



Provincia di Genova

AMBITO REGIONALE DI BACINO 15

PIANO DI BACINO STRALCIO SUL RISCHIO IDROGEOLOGICO

(ai sensi dell'art. 1, comma1, del D.L. 180/1998 convertito in L. 267/1998)



Studio idraulico di dettaglio del torrente BOATE



Approvato con D.C.P. n. 6 del 16.02.2005
Modificato con D.C.P. n. 24 del 21.03.2007

Elaborato	Verificato	Verificato	Regolarità tecnica	Data	Ed.	Rev.
 DONAUCONSULT ZOTTL & ERBER Ziviltechnikergesellschaft m. b. H.	Dott. Geol. Aurelio Giuffrè Dott. Geol. Maria Ferrando	Dott.ssa Maria Traverso	Dott. Geol. Mauro Lombardi	21.03.2007	1	0

PROVINCIA DI GENOVA - Area 06 - Difesa del Suolo e Pianificazione di Bacino
Largo F. Cattanei, 3 16147 - Genova Quarto - Telefono 010/54991 - fax 010/5499.861
e-mail: Area06-DifesaDelSuolo@provincia.genova.it

Area 06 Certificata ISO 9001:2000 – Sistema di Gestione Qualità – RINA – Certificato N° 6556/02



Provincia di Genova

TORRENTE BOATE

STUDIO IDRAULICO DI DETTAGLIO CON
ANNESSA PROGETTAZIONE PRELIMINARE

Il committente

Il tecnico

Committente								
Provincia di Genova Area 06 - Difesa del Suolo, Opere Ambientali e Piani di Bacino								
Titolo del progetto								
Interventi di adeguamento idraulico del torrente Boate								
Contenuto								
Relazione tecnica: Rilievo topografico e modellazione idraulica di dettaglio								
Redatto		Modificato			Scala		Pianta No.	
WaG	07.05.2004	a	WaG	23.08.04	Risultati mod. 2D			
Controllato		b	WaG	09.11.04	Modifiche			
		c						
Pagine: 52		No. progetto : 04-25			T:\PROJEKTE\2004\04_25_Rapallo\stud\text\rel_tec2.doc			

Studio ADgeo



DONAUCONSULT
ZOTTL & ERBER
Ziviltechnikergesellschaft m. b. H.



PATSCHIEDER PARTNER
INGENIEURGEMEINSCHAFT • STUDIO ASSOCIATO

I-35040 Ponso (PD)
via Molette 32

A-1170 Vienna
Klopstockgasse 34

I-39024 Malles (BZ)
Via Russia 21

Indice

1.	Premessa.....	3
2.	Dati e documentazione esistenti.....	4
2.1	Quadro legislativo e normativo di riferimento	4
2.2	Dati di base utilizzati ed attività conoscitive.....	5
2.3	Studi idrologici esistenti	7
2.4	Studi idraulici esistenti	9
2.5	Riassunto finale dei dati esistenti ed approfondimenti necessari	10
3.	Descrizione dell'area progettuale.....	11
3.1	Generalità	11
3.2	Caratteristiche del bacino imbrifero in esame	12
3.2.1	Geografia	12
3.2.2	Geologia e geomorfologia.....	13
3.2.3	Reticolo idrografico	15
3.2.4	Idrologia	16
3.3	Tratto progettuale in esame.....	18
3.3.1	Generalità	18
3.3.2	Torrente S. Maria	19
3.3.3	Torrente S. Pietro.....	20
3.3.4	Torrente Boate	21
3.4	Eventi storici	25
4.	Rilievo topografico	28
4.1	Rilievo topografico	28
4.2	Analisi del rilievo topografico	29
5.	Studio idraulico di dettaglio.....	29
5.1	Considerazioni introduttive	29
5.2	Modello idrologico.....	31
5.3	Valutazione del trasporto solido	34
5.4	Modellazione idraulica monodimensionale dell'alveo.....	36
5.5	Modellazione idraulica bidimensionale delle aree perfluviali	39
5.5.1	Descrizione del modello utilizzato	39

5.5.2	Dati di base	43
5.5.3	Elaborazione del modello.....	45
5.6	Risultati dello studio idraulico di dettaglio.....	46
5.7	Analisi del rischio idraulico	48
6.	Riassunto.....	49
	Bibliografia.....	51

1. Premessa

In data 10 febbraio 2004 la Provincia di Genova, Area 06, Difesa del Suolo, Opere Ambientali e Piani di Bacino (di seguito denominata Area 06) ha assegnato all'associazione temporanea di imprese (ATI) "Gruppo Donauconsult" l'incarico relativo allo "Studio idraulico di dettaglio con annessa progettazione preliminare degli interventi di adeguamento idraulico del torrente Boate".

L'ATI "Gruppo DonauConsult" è costituita dalla DonauConsult Zottl & Erber Ziviltechniker s.r.l. con sede a Vienna (Austria), dallo studio associato Patscheider & Partner con sede a Malles Venosta (BZ) e dallo studio ADgeo con sede a Ponso (PD). Il Dipl. Ing. Peter Hanisch, legale rappresentante della DonauConsult Zottl & Erber Ziviltechniker s.r.l., riveste il ruolo di capogruppo dell'ATI.

La realizzazione del presente progetto è stata in parte suggerita nella relazione idraulica del "Piano di Bacino Stralcio per il rischio idrogeologico ex D.L. 180/98 e s.m.i. dell'Ambito 15" (di seguito denominato Piano di Bacino). Il Piano di Bacino era stato redatto ai sensi dell'art. 1, comma 1, del D.L. n° 180 del 11 giugno 1998, convertito con modificazioni nella Legge n° 267 del 3 agosto 1998. L'approvazione dello stesso Piano con D.C.P. n° 27 risale al giorno 12 dicembre 2002.

Di conseguenza l'Area 06 ha bandito il presente progetto tramite trattativa privata, specificando le seguenti prestazioni progettuali da espletare:

- Rilievo plano-altimetrico del corso d'acqua del torrente Boate e di un tratto significativo dei torrenti S. Maria e S. Pietro nonché delle aree perifluviali del torrente Boate comprendendo interamente le aree mappate come fasce di inondabilità A – B – C nel Piano di Bacino,
- Studio idraulico di dettaglio del torrente Boate che permetta la simulazione della dinamica dell'esondazione nelle aree perifluviali con determinazione di tiranti idrici e velocità di scorrimento per i tempi di ritorno di 30, 50, 200 e 500 anni,
- Progetto preliminare ex art. 16, comma 3, legge n° 109 del 1994 e artt. da 18 a 24, D.P.R. n° 554 del 1999, volto alla mitigazione del rischio idraulico nelle aree limitrofe al torrente nel comune di Rapallo.

Il presente progetto persegue quindi le indicazioni del Piano di Bacino, rappresentandone la sua logica continuazione ed integrandosi nello stesso, rispettando le indicazioni contenute nel D.P.C.M. 29 settembre 1998: Atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all'art. 1, commi 1 e 2, del decreto-legge 11 giugno 1998, n. 180. Infatti, il progetto rappresenta la terza fase della individuazione e perimetrazione delle aree a rischio idraulico, come descritta nel succitato Atto di indirizzo: „Fase terza - Fase di programmazione della mitigazione del rischio: Detta fase si sostanzia in analisi ed elaborazioni, anche grafiche, sufficienti ad individuare le tipologie di interventi da realizzare per la mitigazione o rimozione dello stato di rischio, a consentire l'individuazione, la programmazione e la progettazione preliminare per l'eventuale finanziamento degli interventi strutturali e non strutturali di mitigazione del rischio idraulico o comunque per l'apposizione di vincoli definitivi all'utilizzazione territoriale, e a definire le eventuali, necessarie misure di delocalizzazione di insediamenti.”

Il progetto è stato suddiviso in due stralci funzionali e precisamente nella prima fase, che consiste nell'elaborazione dello studio idraulico di dettaglio, e nella seconda fase in cui viene elaborato il progetto preliminare di sistemazione idraulica. Le due fasi, comunque, non sono da ritenersi distinte l'una dall'altra, poiché la seconda fase si fonda sui risultati della prima fase di studio.

Gli elaborati del presente progetto sono stati redatti in conformità alle regole e alle norme tecniche vigenti in materia, con particolare riferimento agli artt. 18 a 24 del D.P.R. 554/1999.

2. Dati e documentazione esistenti

2.1 Quadro legislativo e normativo di riferimento

Il quadro legislativo e normativo di riferimento del presente progetto rimane simile a quello del Piano di Bacino, specificato nella relazione idraulica dello stesso. Qui di seguito si elencano in maniera riassuntiva le normative e leggi di riferimento del presente progetto:

- Normativa europea:
 - Direttiva 2000/60/CE del parlamento europeo e del consiglio del 23 ottobre 2000 che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque.
- Normativa nazionale:
 - L. 180/89: Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo,
 - L. 493/93: Conversione in legge, con modificazioni, del D.L. 398/93 recante disposizioni per l'accelerazione degli investimenti a sostegno dell'occupazione e per la semplificazione dei procedimenti in materia edilizia,
 - D.L. 180/98: Misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella regione Campania,
 - L. 267/98: Conversione in legge, con modificazioni, del D.L. 180/98, recante misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella regione Campania,
 - D.P.C.M. 29 settembre 1998: Atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all'art. 1, commi 1 e 2, del D.L. 180/98,
 - D.L. 132/99: Interventi urgenti in materia di protezione civile,
 - L. 226/99: Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 13 maggio 1999, n. 132, recante interventi urgenti in materia di protezione civile.
- Normativa regionale:
 - L.R. 9/93: Organizzazione regionale della difesa del suolo in applicazione della legge 183/89,
 - L.R. 18/99: Adeguamento delle discipline e conferimento delle funzioni agli enti locali in materia di ambiente, difesa del suolo ed energia.

- Normativa provinciale:

- Piano di Bacino stralcio per il rischio idrogeologico (D.L. 180/98 e s.m.i.), Ambito 15, approvato con DCP n. 27 del 12 dicembre 2002.

Il progetto si fonda inoltre sui seguenti documenti predisposti dall’Autorità di Bacino di rilievo regionale, Comitato Tecnico Regionale:

- Linea Guida n°1: Rischio idraulico residuale nell’ambito della pianificazione di Bacino regionale,
- Raccomandazione n°3: Criteri per l’elaborazione dei Piani di Bacino – Schema di struttura e dei contenuti essenziali di un piano di bacino stralcio sul rischio idrogeologico (ai sensi del comma 1, Art. 1, del D.L. 180/98 convertito con modifiche in L. 267/98),
- Raccomandazione n°7: Criteri per l’elaborazione dei Piani di Bacino – Definizione delle fasce di inondabilità e di riassetto fluviale,
- Raccomandazione n°8: Criteri per l’elaborazione dei Piani di Bacino – Redazione della carta del rischio idrogeologico nei piani stralcio di bacino (ex D.L. 183/89 e D.L. 180/98 e s.m.i.),
- Raccomandazione n°9: Criteri per l’elaborazione dei Piani di Bacino – Indicazioni metodologiche per la redazione del piano di interventi per la mitigazione del rischio idrogeologico nei piani di bacino ex D.L. 180 e s.m.i.,
- Definizione degli ambiti normativi relativi alle fasce di inondabilità in funzioni di tiranti idrici e velocità di scorrimento,
- Redazione della carta del rischio idrogeologico nei piani stralci di bacino (ex L. 183/89 e D.L. 180/98 e ss.mm. e ii.)

2.2 Dati di base utilizzati ed attività conoscitive

Un primo ed importante passo nella procedura progettuale riguarda la raccolta ed il riordino dei dati di base, delle informazioni disponibili e degli studi già svolti nell’ambito della sistemazione idraulica del torrente Boate e dei suoi affluenti principali.

Vale la pena notare che presso i diversi enti è disponibile una quantità voluminosa di dati di base, che si sono rivelati molto utili per l’elaborazione del presente progetto.

Sono stati utilizzati i seguenti dati di base esistenti:

- Dati messi a disposizione dall’Area 06 e dall’amministrazione comunale di Rapallo:
 - Carta tecnica regionale in scala 1:10.000 (fogli n° 231030 e 231070),
 - Piano di bacino stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico (ambito 15) ai sensi del D.L. 180/98 s.m.i. approvato con D.C.P. n° 227 del 12 dicembre 2002, comprensivo di elaborazioni e cartografie (in formato digitale)¹,

¹ Estratti della presente relazione sono stati presi integralmente dalle relazioni tecniche del Piano di Bacino

- Progetto per il dragaggio della “vasca sommersa” alla foce del torrente Boate, elaborato nel 1995 dal dott. Ing. Ernesto La Barbera per conto dell’amministrazione comunale di Rapallo,
- Estratti da un libro sulla storia di Rapallo,
- Mappe catastali di Rapallo (in formato digitale),
- Piante del progetto relative al tratto terminale del torrente S. Maria (in formato cartaceo),
- Sezioni trasversali del tratto finale del torrente Boate (in formato cartaceo, messe a disposizione all’Area 06 dall’amministrazione comunale di Rapallo),
- Carta tecnica della città di Rapallo 1:500, risalente all’anno 1967.
- Dati raccolti presso l’amministrazione comunale di Rapallo:
 - Informazione sulla rete bianca e fognaria della città di Rapallo.
- Dati raccolti presso la Regione Liguria, Servizio Sistemi Informatici, Sportello Cartografico: quote planimetriche ed altimetriche di diversi punti fissi situati nella zona in esame.
- Dati raccolti presso l’Agenzia del Territorio, ufficio provinciale di Genova: Estratto TAF dei punti situati all’interno della città di Rapallo.
- Informazioni reperite su Internet:
 - Estratto dall’AVI (Censimento delle aree storicamente vulnerate in Italia),
 - Sant’Anna: una storia rapallese (da Paolo Sanguineti, Piero Canobbio),
 - Diversi articoli giornalistici.
- Rilievo topografico effettuato sul torrente Boate in occasione dell’elaborazione del Piano di Bacino, messo a disposizione dal dott. Ing. Paolo Noce.

Abbiamo inoltre avuto diversi colloqui con persone direttamente o indirettamente coinvolte nella gestione delle problematiche connesse al torrente Boate, ad esempio con il personale dell’Area 06 incaricato della manutenzione dei corsi d’acqua oppure con il personale del comune di Rapallo che si occupa di urbanistica e della gestione delle utenze della città.

È stato effettuato anche un rilievo topografico di dettaglio del torrente Boate e delle aree perfluviali, come descritto nel capitolo 4.

Oltre a ciò, sono stati compiuti numerosi sopralluoghi nel bacino imbrifero, e soprattutto nell’area soggetta alle esondazioni.

L’insieme delle attività appena descritte - la raccolta dei dati di base esistenti, i colloqui con persone a conoscenza delle problematiche legate al torrente, nonché i sopralluoghi e i rilievi aggiuntivi effettuati - è fondamentale per l’acquisizione di una conoscenza profonda del torrente e delle aree perfluviali. Solo ed esclusivamente questo procedimento permette di riprodurre correttamente nella modellazione idraulica, in modo corretto, le realtà idrologiche, idrauliche e topografiche dell’area in esame. Inoltre, la concertazione tra l’esperto responsabile del modello idraulico e la persona responsabile del progetto preliminare deve essere il frutto dei sopralluoghi effettuati assieme.

2.3 Studi idrologici esistenti

Nell'ambito della redazione del Piano di Bacino è stata condotta una dettagliata analisi idrologica del bacino imbrifero in esame. L'obiettivo delle analisi era definire le portate di piena per assegnati tempi di ritorno attraverso l'elaborazione di una modellazione afflussi – deflussi.

A tale scopo è stata adottata la metodologia di seguito riassunta in modo riassuntivo (per informazioni dettagliate si rimanda alla relazione idraulica ed ai rispettivi allegati del Piano di Bacino)

- Raccolta del materiale disponibile sul regime pluviometrici: misure dirette registrate da stazioni sul territorio in esame, dati già elaborati provenienti da studi di settore condotti su scala regionale
- Determinazione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP) regolarizzando le altezze di pioggia massime annuali per ciascuna durata con l'utilizzo della legge probabilistica asintotica del massimo del tipo I (di Gumbel). Le LSPP sono state elaborate costruendo le curve per diversi tempi di ritorno nella forma:

$$h = a \cdot t^n$$

dove h [mm] rappresenta l'altezza di pioggia per durata t [ore] dell'evento, mentre a ed n sono parametri rappresentativi della stazione. I valori di a ed n sono stati ricavati per tutte le stazioni analizzate, per i tempi di ritorno di 10, 30, 50, 100, 200 e 500 anni.

- Definizione di una stazione fittizia pluviometrica: visto che all'interno del bacino imbrifero del torrente Boate non è presente una stazione pluviometrica, sono state prese in considerazione le stazioni pluviometriche di Colonia Araldi, Piana di Soglio e Chiavari. I dati di queste stazioni sono stati ponderati con pesi proporzionali alle aree di influenza di ciascuna stazione ottenendo così le LSPP per la stazione fittizia rappresentativa per le caratteristiche pluviometriche del bacino del torrente Boate.
- Suddivisione del bacino imbrifero in sottobacini: sono stati individuati 20 sottobacini ed i loro parametri fisici ed idrologici necessari per l'applicazione dei metodi illustrati qui di seguito.
- Calcolo della pioggia netta attraverso il metodo CN-SCS: questo metodo permette di calcolare la pioggia netta, cioè la pioggia che contribuisce attivamente alla formazione della portata di piena. A ciascun tipo di suolo viene attribuito il Curve Number CN, ovvero il valore che rispecchia le capacità di infiltrazione del suolo in funzione della sua copertura e della sua permeabilità. Inoltre esistono tre classi di CN che rappresentano lo stato di imbibimento del terreno. È stato attribuito un CN a ciascun tipo di suolo presente nel bacino imbrifero. Per ogni singolo sottobacino in esame si è calcolata una media ponderata del valore CN.

Poiché lo studio è rivolto al calcolo delle portate di piena e considerato che in occasione di queste ultime molto spesso il terreno del bacino in questione si presenta in condizioni di elevato imbibimento, si è preferito adottare il valore di CN corrispondente alla classe AMC²-tipo III, legato a quella normale (AMC-tipo II) dalla relazione:

² AMC: Antecedent Moisture Condition

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,43 + 0,0057 \cdot CN_{II}}$$

La pioggia netta h_n che rappresenta l'altezza di pioggia depurata $\varphi \cdot h$, viene calcolata sulla base della seguente relazione:

$$h_n = \frac{(h - I_a)^2}{h - I_a + S}$$

dove S è il potenziale specifico massimo di assorbimento del terreno, cioè il volume immagazzinabile a saturazione nello stesso, mentre I_a rappresenta la quota parte del volume affluito che si infila prima che il deflusso abbia inizio, assunto in questa sede pari ad un valore di 2 mm.

Il parametro S è legato al valore di CN attraverso la seguente formulazione:

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

- Valutazione del tempo di corrivazione: Il tempo di corrivazione è definito come il tempo che impiega una singola particella d'acqua per giungere alla sezione di controllo del bacino considerato dal punto più lontano del bacino stesso. Si sono calcolati i tempi di corrivazione per i singoli sottobacini adottando diverse formulazioni empiriche in uso in Italia, formulazioni che tengono conto in maniera diversa tra loro delle grandezze fisiche ed idrologiche dei sottobacini.

Per vari motivi si è ritenuto opportuno assumere il valore ottenuto dalla nota formulazione di Giandotti:

$$t_c = 60 \cdot \frac{4A^{0.5} + 1.5L}{0.8 \cdot (H_{med} - H_0)^{0.5}}$$

dove A [km²] rappresenta l'area sottesa del sottobacino, L [km] la lunghezza dell'asta principale, H_{med} [m s.l.m.] la quota media del bacino e H_0 [m] la quota della sezione di chiusura del sottobacino.

- Modellazione afflussi – deflussi: La modellazione degli afflussi è stata effettuata seguendo un ietogramma di tipo Chicago crescente, vale a dire con la massima intensità di precipitazione alla fine dell'evento. In questo modo si è in grado di modellare in maniera appropriata la saturazione del terreno durante l'evento, saturazione che al termine dell'evento raggiunge quasi il 100 %, quando si hanno i valori di massima intensità.

Dal confronto tra uno ietogramma di tipo Chicago crescente e uno ietogramma di tipo Chicago decrescente, infatti, sono risultate differenze comprese tra il 20 % ed il 50 %, secondo i bacini considerati.

Si ritiene, a questo punto, più realistico adottare uno ietogramma di tipo Chicago crescente con una durata dell'evento pari a quattro volte il tempo di corrivazione e scegliere degli step temporali pari al tempo di corrivazione.

Le portate di piena sono state calcolate attraverso la nota formulazione del metodo razionale. Altri metodi quali il metodo CIMA (regionalizzazione delle portate), il modello di Nash o il metodo della curva inviluppo dell'Ing. Cati sono stati applicati solamente per confronto.

Si sono così ottenute le portate di piena per i diversi tempi di ritorno assegnati per ciascuno dei 20 sottobacini individuati nell'analisi idrologica.

Il dettaglio delle valutazioni idrologiche e la determinazione delle portate di piena sono fornite nell'allegato ID-2 del Piano di Bacino.

2.4 Studi idraulici esistenti

Sempre nell'ambito del Piano di Bacino sono state effettuate verifiche idrauliche concentrate sulle zone a più alto rischio, vale a dire quelle a maggiore densità di urbanizzazione.

Le verifiche idrauliche sono state condotte in moto monodimensionale e permanente, adottando il modello HEC-RAS sviluppato dal US Army Corps of Engineers. I valori di scabrezza scelti hanno assunto valori di $30 - 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per gli alvei naturali e $40 - 45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per i tratti arginati o tombinati.

Le ostruzioni e le opere in alveo nel modello vengono considerate calcolando il rigurgito a monte con le formule classiche, quali la formula di Yarnell per le condizioni subcritiche o la formula di Marchi per la condizione di transizione dallo stato subcritico a quello supercritico attraverso la struttura. Il modello HEC-RAS permette inoltre di simulare il deflusso delle portate di piena attraverso i ponti per accertare che la corrente possa o meno interferire con la struttura dell'impalcato.

E' importante notare che nella modellazione idraulica si è adottata l'ipotesi semplificativa di argini fittizi di altezza infinita posti al limite dell'alveo (in corrispondenza delle sponde di sinistra e di destra): i livelli idrici così ottenuti, allo scopo di delimitare le fasce inondabili, sono stati poi prolungati fino alla intersezione con la corrispondente quota del terreno nelle aree perifluviali. Le fasce inondabili derivate da questo procedimento rappresentano quindi delle assunzioni molto cautelative, visto che non si è tenuto conto dell'effetto della laminazione e dei volumi reali delle piene nelle aree perifluviali.

Sono stati modellati l'asta principale del torrente Boate ed i tratti più importanti dei suoi maggiori affluenti, tra cui l'asta principale del torrente S. Maria, il tratto finale del rio Savagna e del rio S. Massimo e l'asta principale del torrente S. Pietro. Inoltre, nell'ambito di un aggiornamento del Piano di Bacino è stato modellato il tratto finale del rio Cereghetta che in parte è tombinato e scorre sotto la città di Rapallo immettendosi nel torrente Boate all'altezza del ponte ferroviario.

I risultati delle modellazioni idrauliche con la descrizione dei punti critici dal punto di vista della sicurezza idraulica sono riportati nella relazione idraulica del Piano di Bacino e nell'allegato ID-3 della stessa relazione.

Sono stati evidenziati in particolare i problemi idraulici dell'asta terminale del torrente Boate, che sono da affrontare nel presente progetto.

2.5 Riassunto finale dei dati esistenti ed approfondimenti necessari

I dati esistenti rappresentano uno stato di indagine già abbastanza avanzato, tuttavia è necessario approfondirli per poter svolgere un'analisi idraulica ancora più dettagliata ed attendibile, su cui si baserà l'elaborazione degli interventi di adeguamento idraulico del torrente Boate.

In particolare si tratta di approfondire le seguenti tematiche:

- **Dati topografici:** per poter eseguire una modellazione idraulica di dettaglio è indispensabile procedere ad un rilievo topografico di dettaglio dell'alveo del tratto in esame e delle aree perifluviali ad esso attinenti. Per i dettagli sulle modalità adottate e per la precisione conseguita per il rilievo plano-altimetrico si rimanda al capitolo 4.
- **Idrologia:** Le analisi idrologiche condotte fino ad ora hanno permesso di determinare le portate di picco delle piene con assegnati tempi di ritorno. Poiché l'obiettivo è quello di effettuare una modellazione idraulica di dettaglio, oltre a calcolare i valori di picco è importante predisporre anche i volumi delle piene da modellare. Il volume di un'onda di piena, infatti, incide in modo decisivo sulle aree perifluviali allagate realmente, specialmente in casi simili al presente, in cui le piene sono provocate da eventi di pioggia di durata ridotta.

Le fasce di inondabilità delimitate nel Piano di Bacino invece non tengono conto degli apporti dei volumi idrici visto che sono state mappate in base ad una modellazione stazionaria delle piene, vale a dire presupponendo che i volumi di piena siano inesauribili nel tempo, quando invece la realtà suggerisce che, nel caso di esondazione per insufficienza degli argini in un determinato tratto di un corso d'acqua, le portate nel tratto successivo potrebbero risultare ridotte, come peraltro sottolineato nella relazione tecnica del Piano di Bacino.

Si procederà quindi ad approfondire le analisi idrologiche esistenti attraverso un "vero" modello afflussi – deflussi che è in grado di rispecchiare correttamente gli idrogrammi delle piene. Si rimanda al capitolo 5.2 per informazioni dettagliate sul modello idrologico.

- **Modellazione idraulica:** La modellazione idraulica svolta nell'ambito della redazione del Piano di Bacino è stata condotta in moto stazionario e monodimensionale. Già nel Piano di Bacino stesso è stato evidenziato in maniera chiara che gli studi effettuati risultano piuttosto approssimativi, ma pur sempre cautelativi.

Al fine di poter tenere conto degli effetti di laminazione in asta e soprattutto nelle aree perifluviali, è stato suggerito di effettuare una modellazione bidimensionale, in grado di valutare in maniera attendibile i tiranti d'acqua e le velocità di scorrimento nelle aree inondate, considerando anche tutti gli effetti dovuti alle singole strutture presenti nelle aree stesse.

I dettagli sulla modellazione idraulica, svolta nell'ambito del presente progetto, si trovano nei capitoli 5.4 e 5.5.

- **Trasporto solido:** nel Piano di Bacino il fenomeno del trasporto solido non è stato preso in considerazione. Invece, è noto che soprattutto durante gli eventi di piena il trasporto solido può giocare un ruolo fondamentale, sia per gli effetti provocati da erosioni eccessive

dell'alveo, sia per gli effetti dovuti alla deposizione del materiale solido in punti critici delle sezioni di deflusso. Le esondazioni provocate da ostruzioni parziali dell'alveo a causa del trasporto solido (materiale di fondo oppure materiale galleggiante) rappresentano un fenomeno assai frequente, soprattutto sui torrenti.

Di conseguenza, la valutazione del trasporto solido, fatta nel presente progetto, (capitolo 5.3) è molto importante.

3. Descrizione dell'area progettuale

3.1 Generalità

Come già menzionato, la profonda conoscenza dell'area progettuale, compreso il bacino imbrifero sotteso è fondamentale.

A questo scopo sono di primaria importanza sia lo studio dei dati e della documentazione esistente che l'effettuazione di sopralluoghi in campagna. Procedendo in questo modo si è in grado di acquisire una percezione delle caratteristiche idrologiche del bacino imbrifero, delle caratteristiche idrauliche e morfologiche del torrente oggetto di studio nonché dello stato delle opere per la difesa idraulica già realizzate.

Se l'esperto per la modellazione idraulica e la persona incaricata dell'elaborazione del progetto preliminare eseguono assieme i sopralluoghi e i rilievi di campagna, questo può contribuire in maniera rilevante a:

- elaborare un modello idraulico in grado di rappresentare correttamente lo stato attuale,
- valutare le condizioni delle opere esistenti per la protezione contro le piene nonché degli attraversamenti e dei manufatti presenti in alveo,
- valutare in modo attendibile le esondazioni ed i fenomeni ad esse connessi,
- predisporre un modello adatto alla rappresentazione sia dello stato attuale sia dello stato di progetto e permettere un confronto tra lo stato attuale e quello di progetto.

La descrizione delle caratteristiche del bacino imbrifero in esame riportate qui di seguito risulta quindi dal procedimento appena descritto. I sopralluoghi hanno interessato l'intero bacino imbrifero del torrente Boate, ma soprattutto i tratti finali dei torrenti S. Maria e S. Pietro nonché l'asta terminale del torrente Boate e le aree perfluviali ubicate nell'ambito urbano della città di Rapallo.

3.2 Caratteristiche del bacino imbrifero in esame

3.2.1 Geografia

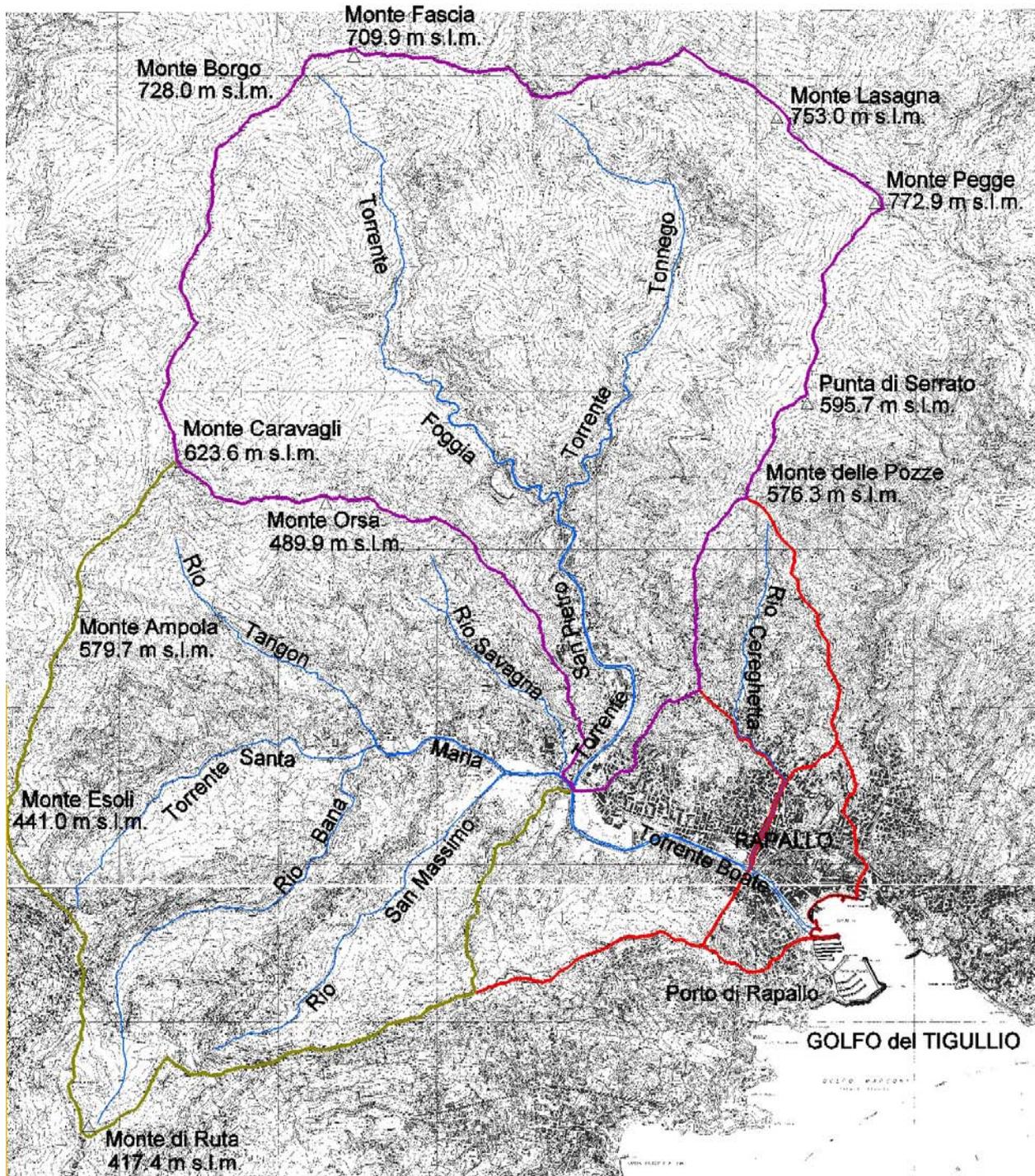


Figura 1 - Corografia del bacino imbrifero

Il bacino del torrente Boate occupa una superficie di 26,14 km² ed è suddiviso in due sottobacini principali: quello tributario del torrente S. Maria con andamento preferenziale ovest-est ed una superficie di 10,12 km² e quello tributario del torrente S. Pietro con andamento preferenziale

nord-sud ed una superficie di 12,13 km². I due torrenti confluiscono all'altezza del casello autostradale di Rapallo, nell'area di Poggiolino, dando origine al torrente Boate che, dopo circa 2 km di scorrimento, sfocia nel golfo di Tigullio, all'interno dell'area portuale di Rapallo. La superficie del bacino sottesa direttamente al torrente Boate occupa un'area di 4 km² ca., di cui 1,09 km² sono occupati dal tributario rio Cereghetta che, intombinato, attraversa la città di Rapallo per poi immettersi nel torrente Boate all'altezza del ponte ferroviario, ca. 560 m prima della foce del torrente Boate.

Il bacino imbrifero del torrente Boate è delimitato ad ovest dalla catena montuosa che si espande dal Monte di Ruta a sud-ovest fino al Monto Borgo a nord-ovest, dal Monte Fascia fino al Monte Pegge al nord, ad est dalla linea Monte Pegge – porto di Rapallo che peraltro forma il spartiacque al torrente S. Francesco, altro corso d'acqua che attraversa il centro abitato di Rapallo, infine al sud dalla linea Monte di Ruta – porto di Rapallo.

La quota massima del bacino è rappresentata dal Monte Pegge che ha un'altezza di 773 m s.l.m. La foce del torrente Boate rappresenta la quota minima del bacino e si trova sul livello del mare.

Dal punto di vista delle temperature il bacino è caratterizzato da una distribuzione unimodale delle temperature che registrano il massimo in agosto ($T_{\max} = 27^{\circ} \text{C}$) ed il minimo in gennaio ($T_{\min} = 6^{\circ} \text{C}$). Circa due terzi delle precipitazioni si registrano in autunno ed inverno, periodo nel quale si hanno in genere le principali piene ed i più drammatici episodi alluvionali, come si potrà peraltro evincere dalla documentazione storica, descritta nel capitolo 3.4.

3.2.2 Geologia e geomorfologia

Nel bacino imbrifero del torrente Boate il tipo litologico caratterizzante è il Flysch, che nell'area in esame è rappresentato soprattutto dai calcari marnosi di Monte Antola, seguiti in ordine decrescente da scisti argillosi e, con significato trascurabile, da arenarie e conglomerati.

Il Flysch è un deposito marino che presumibilmente si formò durante il periodo compreso tra il Cretaceo ed il Paleocene. Il Flysch è composto prevalentemente da marne ed argille, nelle quali talvolta affiorano detriti più grossolani trascinati da correnti di torbida. Durante l'orogenesi alpina, durata fino a qualche milione di anni fa, il Flysch venne ripiegato e deformato, tuttavia in questa zona sfuggì ai fenomeni metamorfici che in altre zone portarono alla trasformazione pressoché completa della struttura e della composizione mineralogica delle rocce. A causa di questi fenomeni le direzioni del giacimento sono fortemente variabili, gli strati hanno inclinazioni tra i 10 e 70°.

Alle litologie sopra descritte, nel fondovalle dei torrenti si sovrappongono i depositi alluvionali e le coperture detritiche.

I corsi d'acqua presenti nel bacino imbrifero del torrente Boate sono vistosamente caratterizzati da fenomeni torrentizi. A causa della ridotta capacità di infiltrazione dei calcari marnosi le precipitazioni in occasione di bruschi rovesci defluiscono superficialmente e le portate dei torrenti possono aumentare notevolmente in tempi brevi.

Per quanto riguarda le principali fonti del materiale solido, si può assumere che questi siano rappresentati da frammenti di estensione ridotta localizzati in prossimità degli alvei. Nelle parti

alte del bacino in prossimità delle cime che rappresentano lo spartiacque si possono osservare erosioni superficiali che si accentuano sicuramente soprattutto in occasione di precipitazioni intense.

La suscettibilità all'erosione delle formazioni litologiche presenti in alveo – prevalentemente di tipo calcareo-marnoso – dipende dalla granulometria, dalla densità del giacimento e dalla cementificazione delle stesse. Si possono osservare diversi fenomeni di erosione, a seconda dell'inclinazione delle giaciture presenti (Figura 2). Tuttavia, le marne in genere si possono giudicare come resistenti all'erosione.

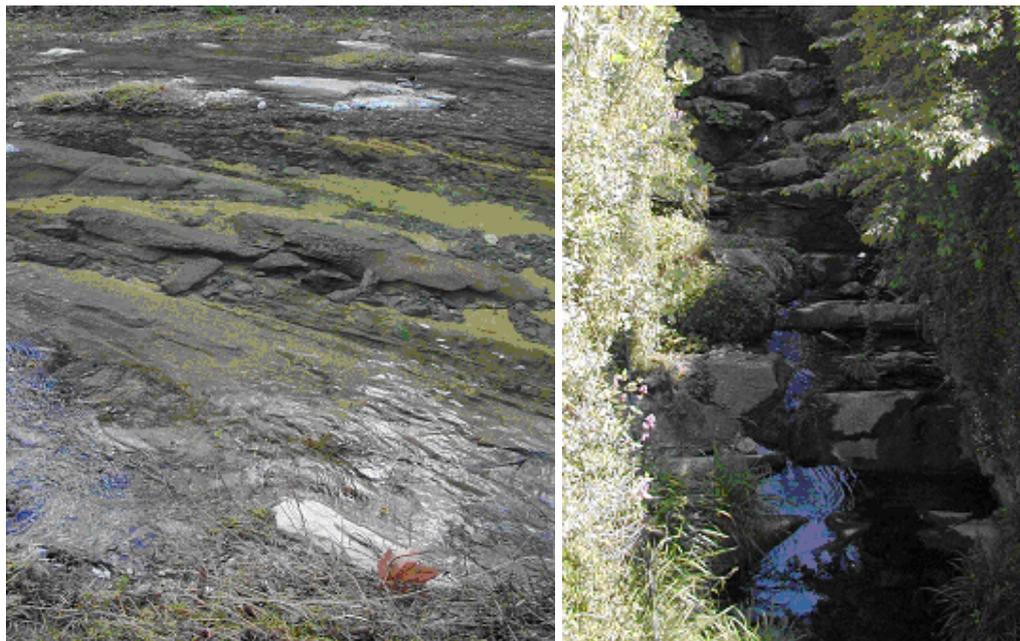


Figura 2 - Fenomeni d'erosione: in parallelo alla giacitura (a sinistra, torrente Boate) e perpendicolarmente alla giacitura (a destra, rio Bana)

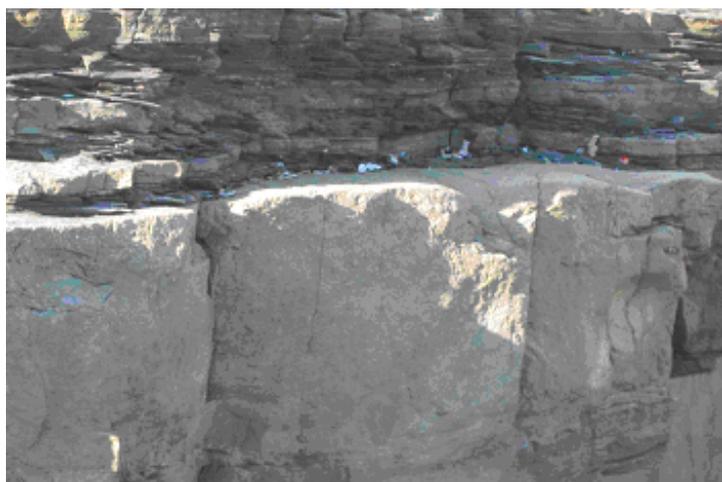


Figura 3 - Diverse stratificazioni delle marne nel bacino imbrifero

Nell'alveo del torrente Boate sono presenti depositi solidi caratterizzati da una distribuzione granulometrica assortita. La geometria del materiale di fondo dipende dalla stratificazione e dalle diaclasi nelle formazioni geologiche (Figura 3): si osservano forme piatte oppure forme piuttosto isometriche. La presenza di materiali molto fini fa sì che i depositi risultino cementati e non soggetti all'erosione durante le condizioni ordinarie di deflusso. Il materiale di fondo presente in alveo sui lati ha uno spessore di 50 cm ca., il letto di magra invece scorre direttamente sul substrato roccioso.

Per quanto riguarda la geomorfologia del bacino in esame vale quanto già descritto in modo esaustivo nella relazione geologica del Piano di Bacino e qui di seguito brevemente riportato.

Lungo il torrente Boate ed i torrenti S. Maria e S. Pietro si riscontra una possibile suddivisione in tre differenti areali geomorfologici ben distinti tra di loro:

- Una zona prettamente urbana rappresentata dal centro abitativo di Rapallo e situata nella parte bassa del bacino, avente una pendenza assai dolce compresa tra 1 e 2 %,
- una parte mediana delle valli principali che, sebbene strette ed acclivi, hanno consentito ancora l'instaurarsi di attività agricole, silvicole e pastorali e l'insediamento di piccoli nuclei abitativi quali San Massimo, S. Martino di Noceto, Santa Maria del Campo, Sant'Andrea di Foggia, Arboccò, Gighnero, S. Quirico d'Assereto e Montepegli,
- una parte alta delle valli dove un aspro paesaggio e la forte acclività non hanno permesso rilevanti azioni antropiche.

Le pendenze dei versanti sono sempre rilevanti e questo si ripercuote sulla stabilità delle coltri che presentano spesso segni di dissesto incipiente od in atto, tali fenomeni risultano tuttavia generalmente controllati dalle opere di ingegneria rese necessarie dall'antropizzazione del territorio.

L'elevata acclività dei vallivi percorsi dalle aste torrentizie, inoltre, è il motivo per il quale l'eventuale costruzione di casse di espansione o di bacini di ritenuta del materiale solido volti alla mitigazione del rischio idraulico sarà difficilmente realizzabile, e avrà un'efficacia alquanto ridotta.

3.2.3 Reticolo idrografico

Il reticolo idrografico in esame è caratterizzato dal fatto che all'origine del torrente Boate ci sono due torrenti, e precisamente il torrente S. Maria ed il torrente S. Pietro. Il torrente Boate stesso ha una lunghezza di soli 2 km ed un bacino imbrifero di estensione limitata. I bacini imbriferi del torrente S. Maria e del torrente S. Pietro presentano delle superfici di estensione simile.

I bacini del torrente S. Maria e del torrente S. Pietro, a loro volta, si possono suddividere di nuovo in bacini imbriferi della stessa importanza. Il torrente S. Maria, infatti, riceve l'apporto dei suoi tributari rio Bana e rio Tangon. La superficie dei loro bacini ha un'estensione simile a quella dell'asta principale dello stesso torrente S. Maria (circa 2 km²). Anche le lunghezze delle aste principali di questi bacini minori sono simili. Di conseguenza, in occasione della formazione di piene ci si deve aspettare tempi di corrivazione simili nei singoli sottobacini con il raggiungimento della portata di picco nello stesso momento e con sovrapposizione quasi lineare dei singoli picchi nell'asta principale del torrente S. Maria. Nel corso inferiore del torrente

S. Maria sono da menzionare il torrente San Massimo, affluente laterale in destra, ed il rio Savagna, affluente in sinistra.

Il corso superiore del torrente S. Pietro si suddivide a sua volta nel torrente Foggia e nel torrente Tonnego. La superficie del torrente Foggia è di 4,08 km², quella del torrente Tonnego è di 5,31 km². Anch'essi, quindi, avendo una superficie simile, raggiungeranno nello stesso momento la portata di picco che andrà ad immettersi nel torrente S. Pietro.

I torrenti menzionati ricevono dei contributi da affluenti minori fino al sesto grado della classificazione di Horton-Strahler, affluenti la cui lunghezza si va riducendo fino a pochi centinaia di metri. Questi affluenti minori molto spesso non presentano degli alvei ben definiti, piuttosto si possono descrivere come impluvi che di regola sono secchi, nei cui però, in occasione di precipitazioni di forte intensità, si raccolgono le acque di ruscellamento superficiale.

E' lecito assumere che i torrenti S. Maria ed il torrente S. Pietro contribuiscono in parti pressoché uguali alla formazione delle piene nel torrente Boate, perché l'estensione dei loro rispettivi bacini imbriferi è quasi identica così come la copertura del suolo e le formazioni geologiche. Di conseguenza c'è da aspettarsi che anche i tempi di corrivazione e le portate di picco saranno simili. Tuttavia, il torrente S. Pietro sembra contribuire in maniera leggermente più incisiva alla formazione delle piene dovute a precipitazioni di durata contenuta, perché l'acclività dei suoi versanti è più accentuata rispetto a quelli situati nel sottobacino del torrente S. Maria.

Anche nei torrenti principali la portata d'acqua in periodi di scarsa piovosità si esaurisce, segno che nel bacino imbrifero non esistono delle sorgenti con giacimenti d'acqua in sotterraneo. Questo fatto sottolinea nuovamente che le piene sono dovute alle precipitazioni di forte intensità, in occasione delle quali la saturazione del terreno viene raggiunta in breve tempo e le acque defluiscono superficialmente.

3.2.4 Idrologia

Le caratteristiche idrologiche del bacino in esame sono state descritte dettagliatamente nella relazione idraulica del Piano di Bacino e vengono riportate in modo piuttosto qualitativo qui di seguito. Per ulteriori approfondimenti si rimanda al Piano di Bacino.

La quota media del bacino del torrente Boate è di 239 m s.l.m., l'acclività media del bacino è di 40,21 %. La lunghezza totale del torrente Boate è di 2 km con una pendenza media del 3 %, la lunghezza totale dell'asta principale del torrente S. Maria è di 4,24 km con una pendenza media del 6,3 %, la lunghezza totale dell'asta principale del torrente S. Pietro è di 6,32 km (incluso il torrente Foggia) con una pendenza media del 9,8 %.

L'acclività forte dei versanti, la superficie contenuta dei singoli sottobacini e la pendenza elevata dei torrenti principali del bacino sono la causa dei tempi di corrivazione molto ridotti. Questo fenomeno porta alla formazione di piene con durata assai breve, caratterizzate da idrogrammi molto accentuati.

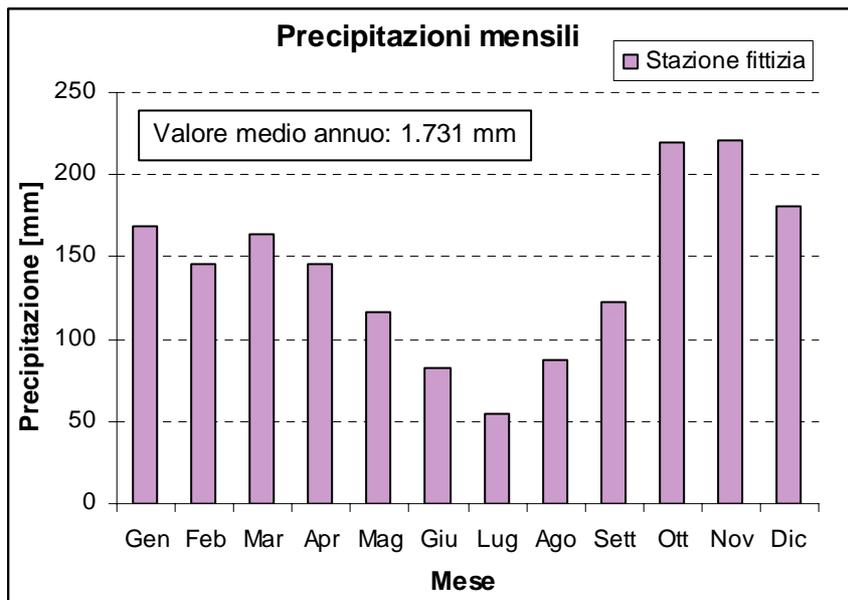


Figura 4 - Precipitazioni mensili nella stazione fittizia

Per quanto riguarda la pluviometria, il bacino imbrifero del torrente Boate è rappresentato nel modo migliore dalla stazione fittizia che pesa le registrazioni dei pluviometri situati a Colonia Araldi, Piana di Soglio e Chiavari. Dalla Figura 4 è chiaro che nell’arco di un anno il regime pluviometrico del bacino è caratterizzato da un massimo di pioggia in primavera (marzo) e da un massimo nei mesi di ottobre – novembre in cui si registrano di gran lunga le maggiori precipitazioni. Il minimo assoluto della pioggia si riscontra nei mesi estivi. Il valore medio annuo è di 1.731 mm che corrisponde circa al doppio della media annuale dell’intero territorio italiano. Il regime pluviometrico con cui abbiamo a che fare nella zona di progetto è chiamato tipo “sub-apenninico-marittimo”.

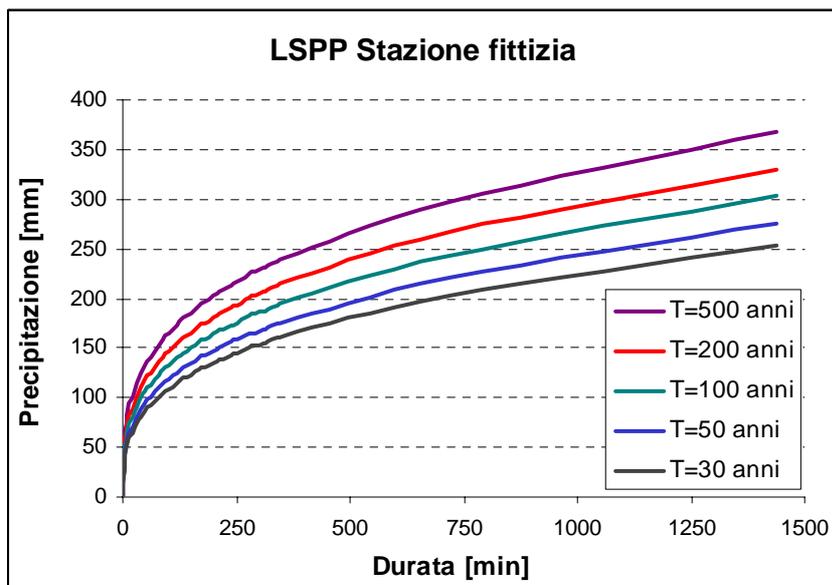


Figura 5 - LSPP della stazione fittizia per diversi tempi di ritorno

Per quanto riguarda le piogge di breve durata (durata <24 ore), si può notare che i massimi giornalieri fin'ora registrati nell'area di progetto ammontano a 219 mm, registrati nella stazione di Chiavari il 15 ottobre 1953 e a 214,6 mm, registrati nella stazione di Colonia Araldi il 29 ottobre 1961. Questi dati confermano che le precipitazioni massime si verificano tendenzialmente in autunno, sia quelle di breve durata che quelle sommate (mensili).

L'elaborazione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (Figura 5), condotta nell'ambito del Piano di Bacino, ha permesso di evidenziare che la precipitazione giornaliera della stazione fittizia varia tra 275 mm per un tempo di ritorno di 50 anni e 370 mm per un tempo di ritorno di 500 anni, mentre la precipitazione con durata di un'ora per esempio varia tra 100 mm ($T_r = 50$ anni) e 140 mm ($T_r = 500$ anni).

Facendo un confronto con il Triveneto, dove la pioggia giornaliera con $T_r=50$ anni raggiunge 110 mm nelle Alpi e 124 mm nella Pianura Padana, mentre la pioggia di un'ora per $T_r=50$ anni si accumula con un livello di 34 mm nelle Alpi e con un livello di 56 mm nella Pianura Padana (Villi, 1994), si nota che le precipitazioni intense nella zona in esame sono caratterizzate da altezze di pioggia rilevanti che spesso superano di molto le altre zone in Italia.

In conclusione, i valori riscontrati in Liguria sono caratteristici di una condizione delicata: il passato ci ha dimostrato come in casi estremi nell'arco di un giorno si può avere un'altezza di precipitazione uguale alla media di due mesi sommati tra loro, precipitazione che si trasforma in piene alle quali gli alvei dei torrenti non sono in grado di reagire in maniera appropriata. A causa di questo fenomeno il territorio in esame è molto spesso soggetto ad eventi calamitosi quali frane, colate, piene, ecc.

3.3 Tratto progettuale in esame

3.3.1 Generalità

Il tratto progettuale in esame riguarda l'ultima parte del corso inferiore del torrente S. Maria e del torrente S. Pietro e il corso completo del torrente Boate fino alla sua foce in mare, compreso la vasca di sedimentazione ed il molo Duca degli Abruzzi. La Figura 6 illustra il tratto progettuale studiato e modellato nel presente progetto.

Il tratto in esame interessa un'area densamente urbanizzata che è soggetta ad un elevato rischio idraulico dovuto alle esondazioni del torrente Boate. L'ambito perifluviale del torrente Boate fa, di conseguenza, anche parte dell'area progettuale.

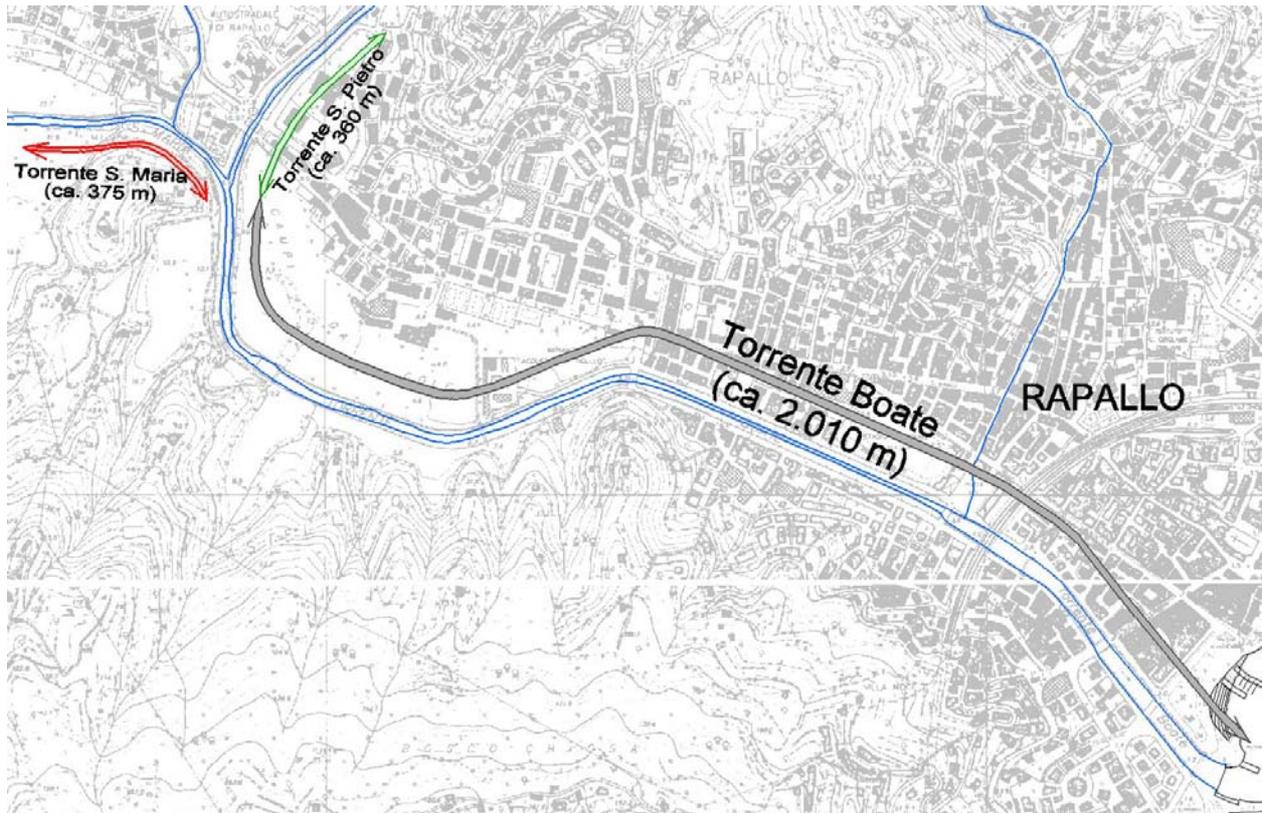


Figura 6 - Tratto progettuale in esame

3.3.2 Torrente S. Maria

Sono stati rilevati³ e modellati i 375 m finali del torrente S. Maria. In questo tratto sponda sinistra risulta arginata con arginature in cemento armato. Per quanto riguarda l'area perifluviale della sponda sinistra, si tratta di una zona urbanizzata in cui sono presenti edifici e giardini. La sponda destra del torrente è rappresentata da una scarpata naturale che è confinata da una collina che si trova all'interno dei campi da golf.

La sezione del torrente è di forma regolare, con una larghezza media di 14 m nell'alveo e di 20 m nella sommità della sezione di deflusso. L'altezza degli argini della sponda sinistra varia tra 3,4 e 3,8 m.

Il fondo alveo è costituito prevalentemente da ciottoli di piccole dimensioni, con presenza, ai lati, di depositi e vegetazione.

A circa 120 m dalla confluenza con il torrente S. Pietro il torrente S. Maria riceve da sinistra l'apporto del rio Savagna che sottende un bacino di 0,78 km².

In passato, in occasione di portate di piena nel torrente S. Maria, il suo pelo d'acqua provocava un rigurgito nel rio Savagna in modo da provocare l'esondazione del rio Savagna stesso. Per fronteggiare questo problema, immediatamente a monte della confluenza del torrente S. Maria con il torrente S. Pietro la provincia di Genova ha recentemente realizzato uno scatolare

³ Per i particolari sul rilievo topografico si rimanda al capitolo 4

scolmatore sulla sponda sinistra per aumentare la capacità idraulica del torrente S. Maria in questo tratto e per abbassare i livelli d'acqua in corrispondenza dello sbocco del rio Savagna (vedi anche Figura 7).

Nel tratto studiato vi sono i due ponti (in ordine da valle a monte):

- in corrispondenza del nodo della confluenza c'è una passerella pedonale di forma ad arco. La luce netta è di 14,5 m.
- il ponte stradale che porta verso l'abitato di Ronco ha una larghezza di 5 m, è ad una campata con una luce complessiva di 20 m ca. La struttura portante è rappresentata da una soletta.



Figura 7 - Torrente S. Maria da valle (a sinistra) e scolmatore sul torrente S. Maria (a destra)

3.3.3 Torrente S. Pietro

Sono stati rilevati e modellati i 360 m finali del torrente S. Pietro. In questa zona il torrente S. Pietro risulta arginato su entrambe le sponde con muri in cemento armato. Su entrambe le sponde del torrente corrono delle strade.

L'alveo ha forma regolare con una larghezza che varia tra 20 e 30 m. Il fondo alveo è costituito prevalentemente da ciottoli, anche di dimensioni maggiori, che testimoniano che in occasione di piene importanti nel torrente S. Pietro può essere mobilitato anche materiale di fondo di notevoli dimensioni. Nel suo tratto finale il torrente S. Pietro ha sviluppato un letto di magra ben distinto con una larghezza che si aggira attorno a 8 – 10 m avente una profondità compresa tra 70 e 140 cm. Le fasce laterali dell'alveo di media portata sono coperte di vegetazione.

Circa 100 m prima della confluenza con il torrente S. Maria ci sono due ponti che collegano il casello autostradale con il centro abitato di Rapallo. I due ponti sono stati costruiti a due campate con una luce complessiva di 24 m ca. La larghezza delle rispettive pile è di 80 cm ca. La struttura portante dei ponti è composta da travi in cemento armato e da una soletta dello spessore totale di 1 m. La larghezza dei ponti è di 10 m, la distanza tra i due ponti è di 13 m.



Figura 8 - Torrente S. Pietro da valle (a sinistra) e in periodo di magra (a destra)

3.3.4 Torrente Boate

3.3.4.1 Generalità

Il torrente Boate ha una lunghezza complessiva di circa 2 km e scorre, dalla confluenza del torrente S. Pietro e del torrente S. Maria, all'interno del campo da golf, per una lunghezza di circa 850 m, per poi entrare nell'abitato di Rapallo e sfociare nel golfo di Tigullio.

Le sezioni dell'alveo sono di forma regolare, con larghezza variabile tra i 25 e i 30 m.

L'alveo risulta arginato su entrambe le sponde che si alternano, sulla sponda destra nella zona del campo da golf fino al ponte in corrispondenza del viale Torino, a sponde naturali in terra.

Le arginature sono state realizzate in cemento armato oppure in pietra con malta per giunti, con le quote delle fondazioni in corrispondenza del substrato roccioso. In un punto sono ancora visibili casseforme in legno. Nei giunti dei muri di protezione si assiste allo sviluppo di fiori, di diverse specie erbacee e di arbusti; tuttavia ciò non indebolisce visibilmente la stabilità delle opere. Inoltre non si riscontrano da nessuna parte cedimenti né fessure importanti nelle strutture.

Il coronamento delle arginature è stato fatto in cemento armato ed è percorribile in quasi tutto il tratto in esame, avendo una larghezza di 60 – 70 cm ca. Dal punto di vista tecnico, quindi, è senz'altro possibile innalzare leggermente il coronamento. Soltanto lungo il corso G. Matteotti fino alla passerella in corrispondenza dello sbocco in mare il coronamento è largo soltanto 20 cm ca.

Nel tratto compreso tra il corso G. Matteotti e la foce, la sezione di deflusso è stata allargata già in passato con l'abbattimento di un muro in pietra secco, di cui sono ancora presenti le tracce in alveo. E' stato realizzato un muro in cemento armato allargando la sezione di ca. 1,2 m e in testata è stato attrezzato di una via pedonale realizzata con sbalzo.

Alla foce del torrente Boate, sul prolungamento della riva destra è situata la cosiddetta "vasca sommersa" che è stata realizzata negli anni 1984/85 allo scopo di annullare il rigurgito verso monte della corrente proveniente dal torrente stesso. La costruzione è stata realizzata mediante

il dragaggio del fondale e delimitata con lastroni in calcestruzzo. La profondità della vasca varia da 1,20 m a monte e 3,50 m a valle, la larghezza varia tra i 30 m ed i 60 m. La lunghezza della vasca è di 330 m circa. Nel 1995 risultava in buona parte interrata e di seguito è stata svuotata prelevando 12.000 –15.000 mc di materiale limoso e in parte sabbioso.

In condizioni di marea normale il rigurgito dal mare si prolunga per ca. 500 metri nel torrente Boate fino all'attraversamento della ferrovia.



Figura 9 - Torrente Boate da piazza Cile verso monte (a sinistra) e dalla foce verso monte (a destra)

3.3.4.2 Attraversamenti

Per quanto riguarda gli attraversamenti ed i manufatti in alveo, si può notare che lungo il torrente Boate esistono un ponte ferroviario, 4 ponti stradali, 5 passerelle e l'attraversamento di una condotta.

Si riporta qui di seguito una breve descrizione degli attraversamenti in ordine da valle a monte:

- Sulla foce del torrente è presente una passerella pedonale con forma ad arco. La luce netta è di 30,5 m. La struttura portante è rappresentata da due travi coperte da una soletta.
- Il ponte stradale in corrispondenza della via Gramsci è largo 10 m ed è stato costruito a due campate con una luce complessiva di 26,5 m ca. La struttura portante è composta da due travi prefabbricate ed una soletta. L'altezza della struttura assume un valore di 1 m, la larghezza della pila in alveo è di 1,5 m.
- Il ponte stradale in corrispondenza del corso G. Matteotti ha una larghezza di 15 m ed è stato costruito a due campate con una luce complessiva di 25 m ca. La struttura portante è composta da due travi prefabbricate ed una soletta. L'altezza della struttura assume un valore di 1,1 m, la larghezza della pila in alveo è di 1,2 m.
- La passerella pedonale in corrispondenza del corso Roma è stata costruita in cemento armato con una trave ed una soletta. La luce netta è di 26,5 m, l'altezza della costruzione è di 1,1 m.
- Il ponte ferroviario ha una larghezza di 18 m. La costruzione è un traliccio eseguito in acciaio con una luce di 25 m ed un'altezza di costruzione di 2,73 m.

- All'altezza della piazza Cile è situato un ponte stradale con una larghezza di 9 m, costruita a tre campate con una luce complessiva di 26,5 m ca. La struttura portante è rappresentata da una soletta dello spessore di 58 cm. Le due pile presenti in alveo hanno una larghezza di 80 cm ciascuna.
- Il ponte stradale in corrispondenza del viale Torino è stato costruito a tre campate con una luce complessiva di 27 m ca. ed è composto da travi prefabbricate e da una soletta. L'altezza di costruzione è di 1,2 m, la larghezza delle pile è di 60 cm.
- Nella zona del campo da golf sono presenti tre passerelle:
 - La passerella 1 ha una larghezza di 2,5 m, è una costruzione in acciaio a due campate con un'altezza di costruzione di 20 cm, una luce complessiva di 30 m ed una pila in alveo avente una larghezza di 90 cm
 - La passerella 2 ha una larghezza di 1,2 m, è una costruzione in acciaio a due campate con un'altezza di costruzione di 25 cm, una luce complessiva di 30 m ed una pila in alveo avente una larghezza di 80 cm
 - La passerella 3 ha una larghezza di 2,0 m, è una costruzione in acciaio a quattro campate con un'altezza di costruzione di 20 cm, una luce complessiva di 30 m ed in alveo tre pile d'acciaio
- A monte delle passerelle è posizionato un attraversamento per condotte costruito a due campate con una pila in alveo con larghezza di 40 cm. Ci sono 6 condotte che attraversano il torrente Boate, la luce complessiva è di 25,5 m.

La struttura portante delle due passerelle situate più a monte nella zona del campo da Golf non è da ritenersi del tutto affidabile in occasione di eventi piena, lo stesso vale per l'attraversamento delle tubazioni.

Si deve inoltre notare che la passerella in corrispondenza del corso Roma funge da struttura portante per una condotta che in prossimità degli appoggi si trova 2 m al di sotto della passerella. Oltre a essere in serio pericolo di danneggiamento, essa provoca certamente un'ostruzione per il deflusso delle piene.

3.3.4.3 Affluenti ed immissioni

Oltre ad alcuni affluenti di minore importanza sulla sponda destra, il torrente Boate riceve sulla sponda sinistra l'apporto notevole del rio Cereghetta, come peraltro già menzionato nel capitolo 3.2.1. Il rio Cereghetta, dopo aver raccolto le acque di una superficie di circa 1 km², è intombinato su una lunghezza di 800 m ca. e attraversa così il centro abitato di Rapallo sotto la via del Carmelo, per poi proseguire sotto il viale Trento e la piazza Cile e sfociare infine nel torrente Boate immediatamente a monte del ponte ferroviario. Il bordo inferiore dello sbocco del rio Cereghetta si trova alla quota del fondo alveo del torrente Boate, il che induce a presumere che in occasione di piene importanti nel torrente Boate il rio Cereghetta non è più in grado di scaricare le sue acque. Di conseguenza il tombino del rio Cereghetta va sotto pressione provocando sollecitazioni non trascurabili all'impalcato superiore dello stesso.

Il torrente Boate riceve inoltre numerose immissioni dalla rete bianca su entrambe le sponde. Tra tutte le immissioni, di cui una percentuale rilevante è di natura privata, spiccano due immissioni importanti che vale la pena sottolineare:

- un'immissione con due tubi attrezzati da valvole di ritegno. L'immissione si trova sulla sponda sinistra immediatamente a monte dello stadio comunale U. Macera.
- un'immissione sulla sponda sinistra, che scarica le acque dal canale denominato rio Fanga, immediatamente a monte dello sbocco del torrente Boate nel golfo del Tigullio.

Informazioni reperite presso l'amministrazione comunale di Rapallo hanno messo in evidenza che le immissione appena descritte scaricano la maggior parte delle acque piovane provenienti dalla zona che si trova a monte del corpo ferroviario e che è confinata dal torrente S. Pietro ad Ovest, dal torrente Boate al Sud, dall'autostrada al Nord e dal rio Cereghetta ad Est. Oltre a ciò sono anche raccolte le acque della zona a valle del corpo ferroviario entro la via della Libertà ed il torrente Boate. Lo scarico principale è il rio Fanga che incrocia il rio Cereghetta nella via della Libertà passando sotto lo stesso, mentre l'immissione a monte dello stadio comunale funge da scolmatore del rio Fanga.

Le acque piovane raccolte nell'area urbanizzata della città vanno quindi ad aggiungersi alle portate già presenti nel torrente Boate. E' importante notare, però, che la rete delle acque piovane è in grado di smaltire le acque soltanto all'inizio delle precipitazioni intense. Nel momento in cui il livello idrico del torrente Boate inizia ad eccedere la quota delle condotte, nelle stesse si crea un rigurgito che fa defluire le acque piovane superficialmente attraverso la città. Questo problema è noto già da tanti anni all'amministrazione comunale e agli abitanti della città, ma è difficile risolverlo visto il sistema complicato ed in parte "oscuro" delle arterie sotterranee creato per scaricare le acque bianche.



Figura 10 - Immissione di due condotte



Figura 11 - Sbocco rio Cereghetta

3.3.4.4 Morfologia

Abbiamo già detto che nell'alveo del torrente Boate sono presenti depositi solidi caratterizzati da una distribuzione granulometrica assortita. La presenza di materiali molto fini fa sì che i depositi risultino cementati e non soggetti all'erosione durante le condizioni ordinarie di

deflusso. Mentre il thalweg scorre direttamente sul substrato roccioso, sulle fasce laterali il materiale raggiunge uno spessore di circa 50 cm ed è coperto da vegetazione.

Oltre ai materiali di media dimensione, nel fondo alveo sono presenti anche dei massi con diametri vicino ad 1 m. Nei tratti rettilinei il fondo non mostra una pendenza trasversale, mentre all'esterno delle curve sono riscontrabili gli scavi tipici per ogni corso d'acqua. La profondità degli scavi cresce con il diminuire del raggio delle curve e raggiunge un massimo di circa 2 m in corrispondenza della curva sinistra all'interno del campo da golf.

Si possono osservare scavi locali anche in prossimità di diversi attraversamenti. Specialmente le pile del ponte in corrispondenza del viale Torino non sembrano essere in uno stato perfetto, visto che le fondazioni risultano scavate e la soglia trasversale non è più in grado di soddisfare la sua funzione.

A valle della prima passerella all'interno del campo da golf sono ancora ben visibili i resti di una soglia trasversale che in passato è stata in gran parte distrutta. Questo fatto dimostra che l'attività morfologica del torrente Boate non è da trascurare, attività che sicuramente raggiunge l'intensità maggiore in occasione delle piene.

Il fondo alveo, tuttavia, sembra trovarsi in uno stato abbastanza stabile, fenomeno dimostrato peraltro nel capitolo riguardante i rilievi topografici.



Figura 12 - ponte viale Torino (a sinistra) e scavo all'esterno della curva (a destra)

3.4 Eventi storici

Il torrente Boate è noto per la sua pericolosità. Pur avendo una portata molto ridotta durante gran parte dell'anno, gli eventi storici hanno mostrato come in occasione di precipitazioni intense la portata nel torrente Boate possa crescere in poche ore di alcuni ordini di grandezza.

Le piene ricadono prevalentemente nel periodo in cui si assiste anche alle precipitazioni maggiori, vale a dire nel periodo di ottobre – novembre.

A questo proposito è importante notare che in molti casi le documentazioni sugli eventi di piena sono poche e di una qualità scadente. Sovente l'unica fonte disponibile è rappresentata dalle persone che osservano gli eventi naturali di un paese o di un comune, le quali tal volta sono

difficilmente rintracciabili. Per far fronte a questa lacuna il Ministro per il Coordinamento della Protezione Civile ha commissionato al Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del CNR il progetto AVI (aree storicamente vulnerate in Italia) allo scopo di realizzare un censimento delle aree storicamente vulnerate da calamità geologiche (frane) ed idrauliche (piene) nel corso del 20° secolo in Italia.

Il progetto AVI⁴, quindi, è stata una delle fonti di ricerca sugli eventi di piena sul torrente Boate. A ciò si sono aggiunte testimonianze di funzionari dell'amministrazione comunale di Rapallo e di abitanti di Rapallo. Inoltre sono stati trovati dei commenti in diversi documenti storici su Rapallo. Qui di seguito viene riportata una breve descrizione degli eventi di piena sul torrente Boate verificatisi nel corso del 20° secolo, eventi di cui esistono delle tracce come sopra descritto. Si tiene ad affermare che le descrizioni sono da valutare con appropriata cautela soprattutto per quanto riguarda l'indicazione di tiranti o volumi d'acqua, informazioni che molto spesso con il passare del tempo nei racconti tendono ad essere accresciute.

- Come riferisce Barni (1983), il giorno 23 novembre 1911⁵ il torrente Boate, ingigantito da una pioggia di notevole intensità abbattutasi la notte precedente sul suo bacino imbrifero, supera gli argini presso il ponte della Paglia a S. Anna ed invade le strade precipitandosi verso il nucleo urbano. Alle 8.30 tutta la città è sommersa da più di un metro d'acqua limacciosa⁶. Alle foce del torrente Boate viene sradicata la passerella collegante il cantiere navale. Il torrente ha abbattuto in più punti i propri argini. Si fa ricorso a barche per recare aiuto a chi si trova in pericolo. Da tutti le parti (Genova, Chiavari, S. Margherita) giungono i soccorsi. Le falle apertesì negli argini vengono tamponati con sacchi di cemento. Fortunatamente non si debbono lamentare vittime. Sia la provincia che il governo pongono a disposizione alcuni finanziamenti straordinari per l'emergenza. Viene ricostruito il ponte alla foce del Boate.
- Barni (1983) riferisce anche sull'alluvione più spaventosa che Rapallo abbia vissuto fino al giorno di oggi. Sabato 25 settembre 1915 in tre ore e mezza cade un quantitativo di pioggia pari a quello che mediamente si registra in circa cinque mesi ed il pluviometro della farmacia Tonolli registra, dalla ore 7.30 alle ore 11, ben 440 millimetri oltre ai 22 caduti nel corso della notte⁷.

Il centro cittadino, nelle zone più basse, già nel primo mattino è ricoperto di una settantina di centimetri d'acqua⁸.

La massa d'acqua ristagna oltre il rilevato ferroviario, essendone impedito il deflusso attraverso l'alveo del Boate poiché il viadotto che lo scavalca offre una luce di soli 15 metri.

⁴ Disponibile su www.db.gndci.cnr.it

⁵ Secondo il database del progetto AVI l'evento ha avuto luogo il giorno 24 ottobre 1911

⁶ Secondo il database del progetto AVI il livello dell'acqua ha raggiunto 2,5 m in località S. Maria e 80 cm nella zona centrale del capoluogo

⁷ Nella stazione fittizia, descritta nel capitolo 2.3, la pioggia centennale con durata di 3,5 ore si accumula a 166,5 mm. Pertanto il valore indicato sembra essere esagerato.

⁸ Fenomeno, questo, da ricondurre presumibilmente alla incapacità della rete bianca di smaltire le acqua piovane

Si forma così un immenso lago dalla superficie, calcolato dall'Ing. Enrico Macchiavello del comune, di circa 900.000 metri quadrati, che racchiude non meno di tre milioni e mezzo di metri cubi d'acqua, per un'altezza di circa 4 metri, che sommerge i vasti campi sino a S. Anna⁹.

Dopo che alle 9.45 S. Anna è stata sommersa, il terrapieno ferroviario cede per circa 300 metri di lunghezza e la piena si abbatte sul centro cittadino.

Molte persone vengono investite di sorpresa dalla poltiglia d'acqua e di fango, altre sono trascinate fino al mare. Si devono contare 15 morti e un disperso. Alla perdita di vite umane si uniscono i danni materiali che appaiono incalcolabili.

Da La Spezia arrivano marinai, pompieri, zappatori ed infermieri, 200 soldati si aggiungono alle squadre di soccorso. Si getta un ponte provvisorio a S. Anna consentendo di superare il torrente S. Pietro, che alla confluenza col S. Maria ha travolto le sponde. Anche le ferrovie ripristinano i collegamenti con Genova.

Nel luglio 1916 la Commissione ministeriale decide lo stanziamento di complessivi 185.000.- Lire ai fini della sistemazione idraulica del torrente Boate con ampliamento del letto, il dimensionamento dei nuovi argini, l'ampliamento a 25 metri con due arcate di sussidio del ponte ferroviario. I lavori di sistemazione idraulica sono stati gestiti dal Consorzio Boate, che è stato incorporato poi dall'amministrazione provinciale di Genova.

- Nei giorni 28 ottobre 1959 e 18 novembre 1959 si verificano ulteriori eventi di piena con lievi danni nel nucleo abitato di Rapallo.
- La piena più recente che occorre menzionare risale al 4 ottobre 1995. Nella località S. Maria che è stata colpita da allagamenti, si è osservato un livello d'acqua con un'altezza di 1,40 m circa. Il torrente Boate è straripato a monte del ponte in corrispondenza della piazza Cile. La massa d'acqua, dopo aver sommerso la piazza Cile, ha continuato il suo deflusso attraverso le aperture dell'attraversamento ferroviario invadendo il centro storico di Rapallo. Inoltre sono state allagate anche le aree perifluviali della sponda destra nella zona di via Costaguta.

Si riferisce a questo evento la notizia riportata nell'edizione del 7 ottobre 1995 del quotidiano "L'Unione Sarda: "A Rapallo è straripato il torrente Boate e l'acqua ha raggiunto il metro e mezzo di altezza in varie zone della città con danni ingenti a negozi e abitazioni, ma, fortunatamente senza gravi danni per le persone. La strada statale Aurelia nel pomeriggio è rimasta interrotta in vari punti, da Genova verso levante. La circolazione ferroviaria verso La Spezia si è svolta per un po' su un unico binario, poi c'è stata un'interruzione in una galleria per cui i treni provenienti da Roma e diretti a Ventimiglia sono stati dirottati sulle linee interne. A tarda sera la riapertura, ma con pesantissimi ritardi. Ambulanze e altri mezzi di soccorso stanno convergendo dalle regioni limitrofe mentre il presidente della Giunta regionale ha inviato un telegramma al presidente del Consiglio chiedendo che venga decretato lo stato di emergenza".

⁹ Anche questi valori sono da interpretare appropriatamente

4. Rilievo topografico

4.1 Rilievo topografico

Il rilievo plano-altimetrico del corso d'acqua del torrente Boate e di un tratto significativo dei torrenti S. Maria e S. Pietro nonché delle aree perfluviali del torrente Boate comprendenti le intere aree mappate come fasce di inondabilità A – B – C nel Piano di Bacino fa parte del presente progetto.

Il rilievo delle sezioni trasversali è finalizzato a descrivere l'andamento particolareggiato e le caratteristiche morfologiche e dimensionali significative dal punto di vista idraulico del corso d'acqua.

Nei giorni dal 13 al 19 maggio 2004 è stato effettuato il rilievo plano-altimetrico mettendo a disposizione una squadra composta da tre tecnici ed utilizzando un tacheometro Wild/Leica TC1000 con registrazione automatica + 3 riflettori su telescopio (alto 2 m) con estensione fino a 4 m. L'apparecchiatura utilizzata garantisce una precisione tale che lo scostamento tra le coordinate del punto rilevato e la sua posizione esatta è sempre meno di 1 cm.

Sono stati rilevati i tratti finali del torrente S. Maria (375 m) e del torrente S. Pietro (360 m), l'intero tratto del torrente Boate nonché le aree perfluviali, come richiesto nel bando di gara. La distanza tra le singole sezioni trasversali si aggira in media sui 40 m. L'ubicazione delle sezioni è stata definita attraverso una stima della distanza di 40 m dalla prossima stazione a monte.

Per rappresentare al meglio la situazione reale dell'area golenale e del fondo alveo sono stati rilevati tutti i punti necessari delle sezioni, di norma ortogonali al corso d'acqua, e comunque è stata presa una distanza tra loro non maggiore di 10 m nell'area golenale e non maggiore di 5 m nella sezione di deflusso. Inoltre è stata rilevata la quota del pelo libero dell'acqua. Visto che il rilievo nel torrente Boate è stato effettuato in periodo di magra, è stato possibile transitare senza difficoltà il fondo alveo. Nel tratto finale del Boate, cioè nella zona interessata dal rigurgito del pelo libero del mare, i lavori sono stati effettuati con l'aiuto di un piccolo motoscafo. Inoltre, è stata rilevata una sezione longitudinale della vasca di sedimentazione presente alla foce.

Oltre alle sezioni trasversali sono stati rilevati anche tutti gli attraversamenti, e precisamente i loro estradossi ed intradossi nonché la geometria delle pile presenti in alveo. Inoltre, sono state rilevate tutte le immissioni con diametro maggiore di 10 cm.

Il rilievo topografico è stato collegato altimetricamente e planimetricamente alle coordinate del caposaldo col n° 23103203 che ha una quota di 11,43 m. Il punto, le cui coordinate sono state rilevate presso i Servizi Informativi Territoriali e Ambientali Regionali della regione Liguria, si trova sulla sponda destra sul bordo destro del ponte che attraversa il torrente S. Pietro e collega il centro di Rapallo con il casello autostradale. Per poter posizionare le sezioni rilevate esattamente dal punto di vista planimetrico, il poligonale realizzato (lunghezza 2.330 m) è stato collegato alla chiesa parrocchiale ed al faro di Rapallo.

Per quanto riguarda le aree perfluviali, è stato effettuato un livellamento dei punti salienti nell'area delle fasce di inondabilità, utilizzando anche in questo caso lo stesso strumento adottato per il rilievo delle sezioni trasversali. Dopodiché i dati ottenuti sono stati sovrapposti alla CTR 1:5.000 per poter collegare le informazioni altimetriche ottenute mediante il

livellamento alle informazioni planimetriche (edifici, strade, piazzali, ecc.) contenute nella CTR. Sono stati comunque controllati in sito alcuni punti marcanti della CTR per poter verificare la sua esattezza, che è stata giudicata soddisfacente. Il poligonale realizzato nelle aree perfluviali ha una lunghezza di 4.700 m.

4.2 Analisi del rilievo topografico

Sono stati messi a confronto i risultati del rilievo topografico effettuato a quelli del rilievo topografico effettuato dall'Ing. Paolo Noce in occasione della redazione del Piano di Bacino.

Visto che la distanza tra le singole sezioni trasversali rilevate in occasione del presente progetto risulta essere ridotta rispetto al rilievo del Piano di Bacino, i dati sono più fitti e di conseguenza forniscono una base più consistente per l'elaborazione del modello idraulico di dettaglio.

Come si potrà evincere anche dagli elaborati grafici, nel corso degli ultimi anni non ci sono da osservare modifiche notevoli del fondo alveo. I fenomeni di deposizione e di erosione rimangono entro un margine trascurabile. È stato possibile convalidare quest'osservazione simulando nella modellazione idraulica una portata d'acqua di 1 m³/s. Il pelo libero dell'acqua in effetti rimane pressoché uguale per entrambi i rilievi. Le modifiche del fondo alveo avvenute nel corso degli ultimi anni possono quindi essere trascurate per quanto riguarda il comportamento idraulico generale del torrente Boate.

Non sono trascurabili, invece, gli scavi attorno alle pile di diversi attraversamenti che certamente sono diventati più profondi anche in seguito ad eventi di piena recenti. In futuro è opportuno osservare attentamente l'evolversi degli scavi in modo da poter prendere delle misure appropriate nel momento giusto. A valle degli scavi sono da notare delle leggere tendenze di rinterro, che allo stato attuale comunque non compromettono la capacità idraulica del torrente Boate.

5. Studio idraulico di dettaglio

5.1 Considerazioni introduttive

Nel Piano di Bacino e nei capitoli precedenti è stata messa in evidenza l'importanza di eseguire una modellazione idraulica di dettaglio del tratto finale del torrente Boate allo scopo di poter procedere poi alla pianificazione di interventi efficaci e realmente in grado di ridurre il rischio idraulico a livelli accettabili.

Le conoscenze profonde del torrente Boate, acquisite attraverso i diversi step di lavoro nell'ambito del presente progetto, nonché le esperienze maturate in progetti simili hanno portato alle seguenti considerazioni che hanno condizionato il procedimento progettuale:

- Le arginature del torrente Boate permettono una chiara distinzione tra l'alveo e le aree perfluviali. Si ritiene opportuna e doverosa l'elaborazione di due diversi modelli idraulici, ovvero di un modello per l'alveo stesso e di uno per le aree perfluviali.
- Per la modellazione idraulica dell'alveo si può elaborare un modello monodimensionale, infatti la sezione di deflusso è chiaramente delimitata dalle arginature e gli effetti

bidimensionali all'interno dell'alveo sono senz'altro trascurabili. La modellazione monodimensionale permette, inoltre, di interpretare in modo assai corretto il comportamento idraulico degli attraversamenti, mentre con una modellazione bidimensionale tale interpretazione comporta delle notevoli difficoltà.

- Il coronamento delle arginature rappresenta in maniera univoca il punto di transizione dall'alveo alle aree perifluviali, dunque il punto di partenza delle esondazioni. Dal punto di vista idraulico le arginature si comportano, in effetti, come sfioratori laterali attraverso i quali l'acqua non smaltibile dalla sezione di deflusso defluisce verso le aree perifluviali. Le arginature fungono quindi da punti di interferenza tra il modello idraulico dell'alveo ed il modello idraulico delle aree perifluviali. Pertanto le portate defluite attraverso le arginature rappresentano l'output dal modello idraulico dell'alveo ed allo stesso tempo l'input del modello idraulico delle aree perifluviali.
- La modellazione del deflusso delle piene nelle aree perifluviali avviene tramite un modello bidimensionale che permette di valutare i tiranti d'acqua e le velocità di scorrimento nelle aree soggette ad allagamento. Nel modello bidimensionale sono rappresentate nel modo più corretto possibile le condizioni di deflusso da attendere nelle aree perifluviali. Infatti, i corsi stradali rappresentano una specie di alveo, delimitato lateralmente dagli edifici, mentre gli edifici perimetrali dai corsi stradali principali figurano dei blocchi di ostruzione attraverso i quali non è possibile il deflusso d'acqua.
- Poiché il bacino imbrifero è di estensione limitata con tempi di corrivazione ridotti è di primaria importanza tener conto dei volumi delle onde di piena che si definiscono attraverso gli idrogrammi delle piene la cui elaborazione sarà descritta nel capitolo seguente. Come anche in altri bacini di superficie limitata, le piene nel torrente Boate sicuramente sono caratterizzate da un'alta non-stazionarietà. Pertanto si procederà a confrontare il volume degli apporti idrici non smaltibile dalla sezione di deflusso con i volumi disponibili nelle aree perifluviali. In questo modo si è in grado di incrementare la qualità del modello idraulico bidimensionale.
- Non esistono né stazioni pluviometriche né idrometri nel bacino imbrifero sul Boate. Inoltre, non sono a disposizione dati precisi sugli eventi di piena verificatisi in passato. Il presente progetto si basa quindi su scenari di piena caratterizzati da incertezze non trascurabili perché si devono attribuire dei valori a numerosi parametri non noti di preciso. Si deve quindi sempre tener presente che i risultati forniti dal presente progetto sono da interpretare in maniera critica.
- Nell'ambito urbano si riscontrano numerosi pozzetti nella sede stradale che raccolgono le acque superficiali. Essendo questo un sistema idraulico di complessità elevata, nel modello idraulico non è stato considerato il comportamento delle reti bianche. Lo smaltimento delle acque piovane sarà però un argomento da approfondire nel progetto preliminare.
- Le modellazioni idrauliche partono dal presupposto che durante gli eventi di piena le opere di protezione contro le piene non sono soggette a gravi danni, assunzione assolutamente lecita visto il loro stato attuale.
- Un'altra assunzione concerne la stabilità del fondo e l'attività del trasporto solido. Il rilievo topografico ha permesso di constatare che il fondo alveo nel corso degli ultimi anni non è

stato soggetto a modifiche notevoli. Ciò porta all'ipotesi che il fondo dell'alveo in occasione di piene importanti non si modifica in modo tale da poter influire sulle condizioni di deflusso e soprattutto sulle caratteristiche del deflusso nelle aree perfluviali. Il trasporto solido non va comunque trascurato e dovrà essere oggetto di indagine al momento della pianificazione degli interventi volti a ridurre il rischio idraulico nell'abitato di Rapallo.

5.2 Modello idrologico

Come menzionato più volte in precedenza, il Piano di Bacino ha individuato per diverse sezioni di chiusura all'interno del bacino imbrifero del torrente Boate i picchi delle portate di piena, non però le caratteristiche delle onde di piena.

Pertanto si è proceduto nel presente progetto all'elaborazione di un modello afflussi – deflussi in grado di modellare, oltre ai picchi di piena, anche gli idrogrammi delle piene. Comunque, nell'elaborazione del modello i picchi di piena raggiunti dovrebbero corrispondere a quelli individuati nel Piano di Bacino. Ai fini di raggiungere questo obiettivo è utile adottare i metodi applicati nel Piano di Bacino. Si utilizzerà quindi il metodo SCS-CN per calcolare le piogge nette, inoltre si adotteranno i tempo di corrivazione utilizzati e si adotteranno degli ietogrammi di tipo Chicago crescente basandosi sulle LSPP della stazione fittizia elaborata nel Piano di Bacino.

Si calcolano piene con tempo di ritorno di 30, 50, 100, 200 e 500 anni, sempre partendo dal presupposto approssimativo che un evento di precipitazione di un fissato tempo di ritorno provoca una piena dello stesso tempo di ritorno.

Si è utilizzato il modello HEC-HMS, sviluppato dal US Army Corps of Engineers. Il modello HEC-HMS permette, in base all'utilizzo di diversi approcci idrologici sviluppatosi nella ricerca scientifica, di elaborare degli idrogrammi di deflusso in diverse sezioni di chiusura di un bacino imbrifero.

A questo scopo è necessario dividere il bacino in singoli sottobacini ed attribuirli le loro caratteristiche idrologiche. Visto che il Piano di Bacino ha individuato le caratteristiche idrologiche e fisiche nei singoli sottobacini sempre riferendosi alle sezioni di chiusura procedendo da monte a valle, è stato necessario definire alcuni sottobacini nuovi che non stati considerati in occasione dell'elaborazione del Piano di Bacino. La suddivisione modificata del bacino imbrifero e la denominazione dei singoli sottobacini sono riportate nell'allegato B2.11. Si è dovuto valutare i parametri idrologici dei nuovi sottobacini, parametri riportati nell'allegato B2.12.

Poiché è stato utilizzato il metodo SCS-CN per il calcolo delle piogge nette, metodo di cui dispone anche il modello HEC-HMS, è stato di sostanziale importanza definire il valori CN per i nuovi sottobacini. Per coerenza, ci si è orientati sui valori CN già definiti per gli altri sottobacini nell'ambito dell'elaborazione del Piano di Bacino.

L'idrogramma di deflusso viene calcolato attraverso il metodo dell'idrogramma unitario¹⁰, che è l'idrogramma risultante da 1 mm di precipitazione in un intervallo unitario di tempo. Assumendo

¹⁰ UH – unit hydrograph

che la pioggia netta di una certa entità produce sempre lo stesso deflusso (invarianza del tempo) e che le ordinate del deflusso sono proporzionali alla quantità delle piogge netta, è lecito elaborare in modo lineare gli idrogrammi di deflusso sovrapponendo piogge con una quantità maggiore dell'unità e con una durata maggiore del tempo unitario (Maniak, 1997). Nel modello HEC-HMS sono impostati diversi metodi per costruire l'idrogramma unitario e anche in questo caso è stata adottata una metodologia sviluppata dal SCS¹¹ la quale necessita l'introduzione del tempo di corrivazione. Come già menzionato, nel Piano di Bacino i tempi di corrivazione utilizzati sono stati quelli calcolati mediante la formulazione di Giandotti. Si è proceduto, quindi, ad elaborare i tempi di corrivazione per i nuovi sottobacini utilizzando di nuovo l'equazione di Giandotti.

Un altro importante passo del modello afflussi – deflussi consiste nella definizione di aste torrentizie nelle quali defluiscono le piene formatesi a monte delle stesse. Le caratteristiche salienti delle aste prese in considerazione sono riportate nell'allegato B2.12. Il deflusso lungo le aste nel modello HEC-HMS è modellato attraverso la teoria dell'onda cinematica.

Per elaborare gli idrogrammi di deflusso, infine, è necessario introdurre nel modello HEC-HMS l'andamento delle piogge per i diversi tempi di ritorno. Per mancanza di dati di base migliori, in questa sede è stato assunto che sull'intero bacino imbrifero si abbatte la stessa pioggia, vale a dire che lo ietogramma delle piogge rimane invariato per tutto il bacino.

La durata degli eventi assunta approssimativamente quattro volte il tempo di corrivazione, come peraltro è stato fatto anche nel Piano di Bacino. Questo approccio è in linea con le raccomandazioni reperibili in bibliografia (Placer County, 1990). Tuttavia, si è dovuto procedere ad un'iterazione per quanto riguarda il time step scelto e la durata degli eventi. Soltanto in questo modo è stato possibile ottenere i valori di picco indicati dal Piano di Bacino.

Ai fini del presente progetto non si sono calcolati idrogrammi di piena per ogni singola sezione di chiusura, si è ritenuto opportuno piuttosto calcolare le piene solamente per il tratto oggetto del progetto. Sono tre le sezioni di chiusura considerate: la confluenza del torrente S. Maria con il torrente S. Pietro, il punto dell'immissione del rio Cereghetta e lo sbocco del torrente Boate in mare.

Nell'allegato B2.13 sono riportati i risultati della modellazione afflussi – deflussi. Si possono notare le seguenti osservazioni:

- Poiché si è dovuto variare i time step per ottenere i valori di picco prescritti dal Piano di Bacino, è ovvio che i volumi degli apporti idrici sono diversi per le tre sezioni di chiusura considerate. Si può comunque affermare che i volumi ottenuti non variano in maniera eccessiva tra di loro e che possono quindi senz'altro rappresentare una gamma di volumi possibili per gli assegnati tempi di ritorno.

I time step e le durate degli eventi di progetto risultati dalle iterazioni sono riportati nella Tabella 1.

¹¹ Soil Conservation Service (USA)

Ubicazione	Time step	Durata
Confluenza S. Maria – S. Pietro	110 min (1,83 ore)	550 min (9,17 ore)
Immissione Cereghetta	140 min (2,33 ore)	700 min (11,67 ore)
Sbocco in mare	130 min (2,17 ore)	650 min (10,83 ore)

Tabella 1 - Time step e durate degli eventi scelti

- Nel modello le prime 8 ore servono ad imbibire il terreno, mentre l'onda di piena inizia a salire in modo rilevante in occasione della precipitazione intensa che si verifica secondo l'assunzione dell'ietogramma Chicago crescente nell'ultimo time step. Il picco della piena è da osservare alla fine delle piogge. Dopodiché la portata inizia a diminuire per poi esaurirsi nell'arco di 3 – 4 ore. La Figura 13 mostra un esempio di un idrogramma elaborato, per gli altri risultati si rimanda all'allegato B 2.13.

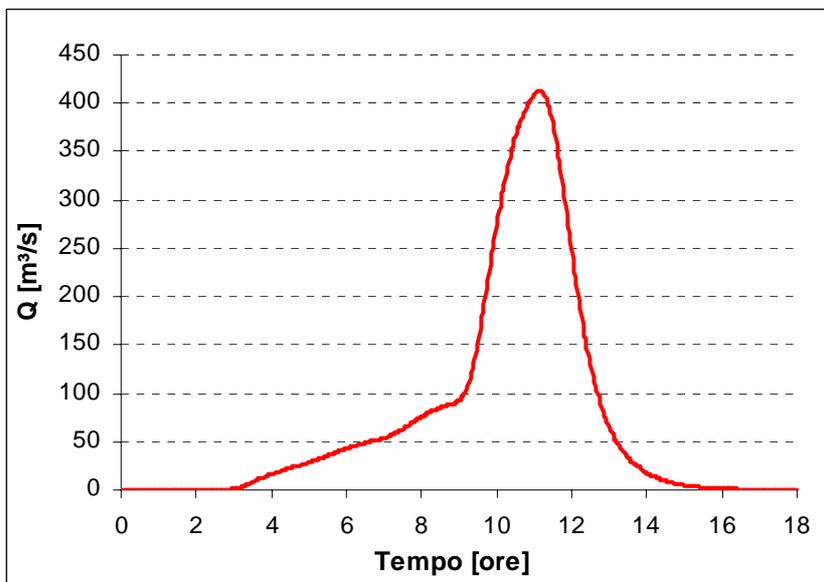


Figura 13 - Esempio: Idrogramma della piena centennale alla foce

- I volumi calcolati non rappresentano i volumi d'esondazione, ma il volume totale delle piene, vale a dire la somma tra il volume smaltito della sezione di deflusso ed il volume esondato nelle aree perfluviali.
- I valori di picco ottenuti corrispondono in maniera abbastanza corretta ai picchi individuati nel Piano di Bacino. Le percentuali di variazione si aggirano su un massimo del 2 %. In Tabella 2 sono riportati i valori di picco ottenuti nonché la media dei volumi delle onde di piena.

Tempo di ritorno	Confluenza S. Maria – S. Pietro	Immissione Cereghetta	Sbocco in mare	V _{med}
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³]
30	311	323	333	3.636.000
50	345	358	369	4.084.333
100	388	400	413	4.561.000
200	433	447	461	5.156.333
500	489	502	519	5.779.667

Tabella 2 - Valori di picco ottenuti tramite la modellazione afflussi – deflussi

- I coefficienti di deflussi per i singoli eventi si aggirano attorno all'80 %, valore sicuramente elevato, però giustificato in occasione di piene importanti.
- Per la confluenza dei torrenti S. Pietro e S. Maria nonché del rio Savagna (il cui sbocco ai fini della modellazione idrologica può essere spostato senz'altro fino alla confluenza dei torrenti S. Pietro e S. Maria) si sono elaborati gli apporti liquidi dei singoli bacini. Vale la pena menzionare che gli apporti liquidi dei singoli bacini possono anche variare, provocando comunque una piena dello stesso tempo di ritorno a valle. Le piene nel torrente Boate possono essere composte da apporti medi di ciascun bacino contribuente oppure da un apporto importante di un bacino, mentre gli apporti degli altri bacini rimangono contenuti. Inoltre, la coincidenza di piene dello stesso tempo di ritorno, per esempio nel torrente S. Maria e nel torrente S. Pietro, provocherebbe nel torrente Boate una piena di un tempo di ritorno molto più elevato.
- E' importante ripetere che nel bacino imbrifero del torrente Boate non esistono stazioni di misura. Di conseguenza non è possibile calibrare il modello afflussi – deflussi. Le uniche fonti su cui ci si può basare sono i rari dati legati ad eventi storici. Gli idrogrammi forniti rappresentano quindi degli eventi composti in maniera puramente sintetica.

5.3 Valutazione del trasporto solido

Come è stato menzionato più volte in precedenza, il torrente Boate dal punto di vista morfologico sembra essere in uno stato assai stabile, non mostrando grosse tendenze di deposizione di materiale solido o di erosione del fondo alveo, com'è stato anche confermato dal rilievo topografico effettuato e dal confronto con il rilievo precedente. Le seguenti osservazioni sottolineano ulteriormente quanto assunto:

- Il letto di magra del torrente Boate scorre in gran parte sul substrato roccioso. La roccia forma un letto stabile e non può essere quindi erosa in eventi di piena. Il dilavamento della

roccia dovuta all'attività erosiva dell'acqua avviene in un arco di tempo molto esteso e non è quindi da considerare nel presente progetto.

- Il letto di media portata sulle fasce risulta leggermente più alto rispetto al letto di magra a causa dei depositi di materiale solido accumulatisi nel corso degli anni e coperti in genere da uno strato di vegetazione, segno questo di una leggera attività del torrente di intensità comunque molto bassa. Non risultano invece scalzamenti delle fondazioni delle arginature, in nessuna parte del torrente Boate. Questa osservazione permette di concludere che il letto di media portata non è soggetto ad erosione in occasione di eventi di piena.
- Non sono visibili estese zone di deposito nel torrente Boate. Inoltre non risultano prelevamenti di grandi volumi di materiale solido in seguito ad eventi di piena. E' stato riferito dal personale della Provincia di Genova incaricato della manutenzione dei corsi d'acqua che nel corso degli ultimi 7 – 8 anni sono stati prelevati ca. 2.000 m³ di materiale solido dal torrente Boate.
- Nel bacino imbrifero non esistono estese fonti di materiale solido. Pertanto in eventi di piena la capacità di trasporto dei singoli corsi d'acqua non è da ritenersi saturata cosa che risulta in volumi ridotti di materiale solido trasportato.

Anche le testimonianze degli eventi storici in genere si riferiscono soprattutto ai massi d'acqua, che sembrano comunque contenere piuttosto sostanze in sospensione che si depositano sotto forma di fango nelle aree perifluviali. Volumi eccessivi di materiale solido in occasione di piene non si riscontrano nelle aree perifluviali, quindi è del tutto lecito assumere che il trasporto solido in occasione di eventi di piena non gioca un ruolo fondamentale.

Pertanto è valido senz'altro effettuare la modellazione idraulica presupponendo che il fondo alveo rimanga fisso durante il deflusso dell'onda di piena. Le inesattezze nei risultati della modellazione, sorte da quest'assunzione, in ogni caso sono da ritenere essere molto meno rilevanti che quelle derivanti per esempio dalla definizione dei parametri necessari all'elaborazione del modello idrologico.

Non considerare il trasporto solido nella modellazione idraulica non significa però che il trasporto solido può essere trascurato in sede della pianificazione degli interventi volti alla mitigazione del rischio idraulico, dato che i seguenti fattori possono assumere un significato rilevante dipendente dalle circostanze:

- Anche se l'attività di trasporto solido è sempre limitata, essa è certamente più importante nel torrente S. Pietro che nel torrente S. Maria. Quest'assunzione è confermata dal fatto che nel fondo alveo del torrente S. Pietro è riscontrabile materiale solido di dimensioni maggiori che nel torrente S. Maria. E' lecito anche assumere che prima dell'ultima sistemazione idraulica il torrente S. Pietro ha fornito volumi notevoli di materiale solido al torrente Boate. Questo dato e la capacità di deflusso insufficiente del torrente S. Pietro sono stati alla base dell'allargamento dell'alveo nella sua parte finale. Oggigiorno l'alveo del torrente S. Pietro presenta pressoché la stessa larghezza del torrente Boate. Poiché la pendenza media longitudinale nell'ultimo tratto del torrente S. Pietro e quella nel torrente Boate sono simili, si può assumere che la capacità di trasporto solido nel torrente S. Pietro è ridotta rispetto al torrente Boate, visto che le portate nel torrente Boate sono maggiori. Di conseguenza, c'è da aspettarsi che in occasione di un'elevata attività di trasporto solido gran parte del

materiale si depositerà nel torrente S. Pietro prima di raggiungere il torrente Boate. Questo fenomeno è oggetto di uno studio approfondito del torrente S. Pietro e non è tema del presente progetto.

- Visto che la portata di materiale solido dal torrente S. Maria rimane sempre limitata, nel torrente Boate durante le piene c'è da affrontare un deficit di materiale solido, che si manifesta in scavi laddove il substrato roccioso non è presente. Abbiamo già riferito che questi scavi locali si riscontrano all'esterno delle curve ed in corrispondenza delle pile degli attraversamenti.
- I tributari del torrente Boate scorrono in alvei che sovente sono accompagnati da specie arbustive e da alberi che talvolta possono essere trascinati facilmente in occasione di piene. Specialmente in corrispondenza degli attraversamenti gli elementi galleggianti possono ostruire le luci provocando l'esondazione delle acque a monte.

5.4 Modellazione idraulica monodimensionale dell'alveo

Come già spiegato nel capitolo 5.1, per la modellazione dell'alveo è stato elaborato un modello monodimensionale in moto stazionario. A questo scopo è stato utilizzato l'ormai noto e molto diffuso modello HEC-RAS sviluppato dall'US Army Corps of Engineers.

Come dati topografici di base sono state utilizzate le sezioni trasversali ricavate dai rilievi topografici, i dati idrologici posti a base della modellazione sono quelli ricavati dal modello afflussi – deflussi descritto nel capitolo 5.2.

Il rilievo delle sezioni trasversali con una distanza di 40 m tra loro nonché il rilievo esatto dei manufatti permette di ottenere dei dati topografici più attendibili che nelle modellazioni precedenti.

I valori di scabrezza utilizzati sono stati assunti in base ai sopralluoghi effettuati. Facendo un confronto tra le caratteristiche delle sezioni di deflusso e del materiale solido presente in alveo con delle condizioni simili riscontrate in altri progetti è possibile procedere ad una stima attendibile dei valori di scabrezza. Si è potuto constatare che le assunzioni delle modellazioni precedenti sono senz'altro valide. Si è quindi assunto un valore di Strickler di $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per l'alveo e gli argini ed un valore di Strickler di $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per le zone con singoli ostacoli (scale, piante, ecc.).

Per quanto riguarda le condizioni a contorno del modello, è stato necessario definire soltanto quella a valle del modello, dato che la corrente è sempre di carattere subcritica. Come è ben noto, a valle del modello si trova il livello del mare che può variare per un massimo di 60 cm. Un'analisi di sensitività ha mostrato che l'altezza del livello del mare non incide sulla dinamica della piena visto che le esondazioni si verificano a monte della zona di rigurgito dal mare che avanza al massimo fino al ponte ferroviario.

Il modello è stato sottoposto ad un attento confronto con il modello realizzato in occasione della redazione del Piano di Bacino. Il confronto ha confermato quanto già riportato nella relazione idraulica del Piano di Bacino: la modellazione, infatti, era stata eseguita con degli argini fittizi di altezza infinita, un metodo non corretto se relazionato ai fenomeni che si verificano in realtà. Dal punto di vista idraulico gli argini rappresentano piuttosto degli sfioratori laterali sui quali la

corrente può defluire liberamente e provocare le esondazioni nelle aree perfluviali che si trovano ad una quota più bassa degli argini. Una volta uscita dall'alveo e defluita attraverso gli sfioratori laterali, l'acqua non può ritornare più in alveo, salvo il completo riempimento delle aree perfluviali fino a superare la quota degli argini.

Il modello HEC-RAS possiede un'opzione la quale permette di tener conto degli sfioratori laterali. In un primo istante viene calcolato il valore di piena a partire della quale lo sfioratore laterale entra in funzione. Dopodiché viene svolto un procedimento iterativo mirato ad ottenere la portata che defluisce sullo sfioratore e la portata che rimane nell'alveo. E' ovvio che in questo modo la portata a valle dello sfioratore diminuisce, cosa che rispecchia molto di più la realtà piuttosto che l'impostazione di argini fittizi assunti nella modellazione precedente.

Distanze progressive ¹²		Denominazione	Torrente	Ubicazione	Piena esodata	Sponda interessata
[km]	[km]					
0,592	0,868	SN1	Boate	A monte del ponte in corrispondenza della piazza Cile	Tr = 50	Ds
0,592	0,953	DS1	Boate	A monte del ponte in corrispondenza della piazza Cile	Tr = 50	Sx
1,675	1,683	SN2	Boate	All'interno del campo da Golf a valle della seconda passerella	Tr = 500	Sx
1,686	1,773	SN3	Boate	All'interno del campo da Golf a monte della seconda passerella	Tr = 200	Sx
1,775	1,812	SN4	Boate	All'interno del campo da Golf a monte della terza passerella	Tr = 500	Sx
1,872	2,014	SN5	Boate	All'interno del campo da Golf a monte del ponte condotte	Tr = 500	Sx
0,112	0,226	SN6	S. Pietro	A monte del ponte verso il casello autostradale	Tr = 500	Sx

Tabella 3 - Tratti oggetto di esondazioni

¹² ricavate dall'allegato B 3,1: Sezione longitudinale del torrente Boate

In diversi tratti (riportati in Tabella 3) della zona studiata la sezione di deflusso non è in grado di smaltire le ondate di piena e ci si devono aspettare delle esondazioni. Oltre a questi sono da notare altre due zone di fuoriuscita di acqua dall'alveo:

- un tratto di una lunghezza di ca. 140 m sulla sponda destra del torrente S. Pietro che termina ca. 60 m a monte del ponte che collega Rapallo al casello autostradale. La golena destra viene rappresentata dalla strada che porta verso gli abitati nel bacino del torrente S. Pietro ed è inondata a partire da una piena di $Tr = 200$ anni. Visto che tra la strada e l'alveo non spicca un argine sopraelevato rispetto al corpo stradale, la strada stessa in caso di esondazione funge da sezione di deflusso, facendo tornare l'acqua nel proprio alveo prima di raggiungere il ponte. Per l'intera ondata di piena il pelo libero dell'acqua sulla strada corrisponde al pelo dell'acqua nell'alveo, salendo e scendendo in maniera identica.
- Un tratto sulla sponda destra del torrente Boate all'interno dal campo da golf che si estende da valle della prima passerella fino alla terza passerella ed è interessato da esondazioni già a partire da una piena di $Tr = 30$ anni nella parte più a valle e a partire da una piena di $Tr = 200$ anni nella parte situata più a monte. In questo tratto la golena di destra mostra una pendenza trasversale in direzione dell'alveo partendo a salire dalla quota dell'argine destro. Anche in questo caso il pelo libero dell'acqua nella golena per l'intera ondata di piena corrisponde al pelo dell'acqua nell'alveo.

Per i motivi appena descritti nelle due zone menzionate gli argini non funzionano da sfioratori laterali e non sono quindi oggetto della modellazione bidimensionale. Esse vengono comunque considerate nell'elaborazione delle fasce di inondabilità.

Confrontando l'idrogramma di piena con la portata a partire dalla quale le esondazioni hanno inizio, si può ricavare l'idrogramma che defluisce sopra gli argini cosa che rende possibile calcolare anche il volume d'acqua che va ad allagare le aree perfluviali.

Nell'allegato B2.22 sono riportati gli idrogrammi ricavati dal modello idrologico nonché gli idrogrammi di esondazione usciti attraverso gli sfioratori laterali. Ai fini esplicativi è riportato un esempio nella Figura 14. La curva di colore azzurro chiaro rappresenta l'idrogramma della piena di $Tr = 200$ anni nella zona di esondazione SN1 con il picco che ammonta a $451 \text{ m}^3/\text{s}$. A partire della portata di $377 \text{ m}^3/\text{s}$ sta per iniziare l'esondazione sopra l'argine sinistro. L'esondazione avrà una durata di 78 minuti raggiungendo una portata massima di $45 \text{ m}^3/\text{s}$. L'idrogramma di esondazione è rappresentato dalla curva in verde, il volume esondato assume un valore calcolato di 151.258 m^3 .

L'idrogramma di esondazione rappresenta l'interfaccia tra la modellazione monodimensionale dell'alveo e quella bidimensionale delle aree perfluviali. Si rimanda al capitolo 5.5.2 per prendere visione di come si è proceduto per elaborare l'input del modello bidimensionale.

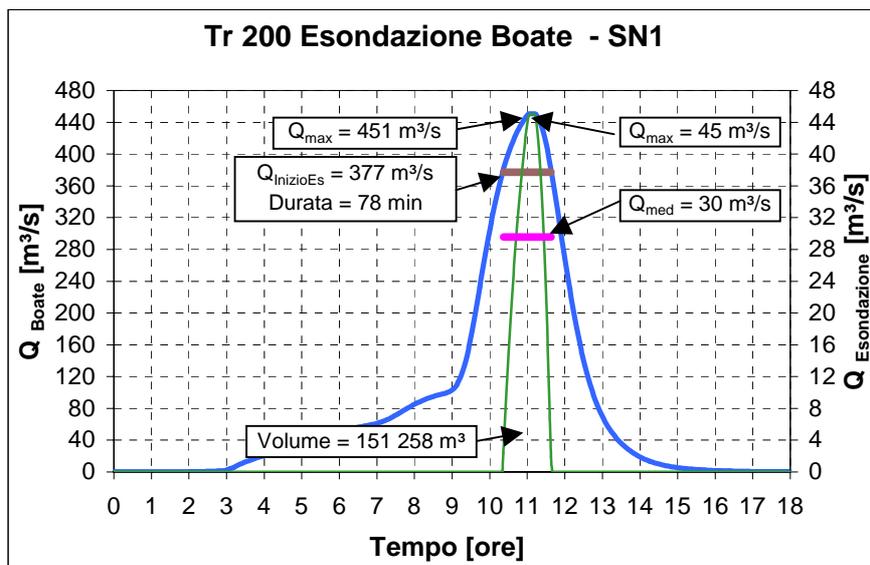


Figura 14 - Esempio per il calcolo dell'idrogramma di esondazione

5.5 Modellazione idraulica bidimensionale delle aree perfluviali

5.5.1 Descrizione del modello utilizzato

5.5.1.1 Generalità

Per la modellazione bidimensionale è stato utilizzato il programma FLO-2DH¹³ che fa parte del modulo FESWMS¹⁴ che è implementato nell'ambiente SMS¹⁵, sviluppato al EMRL¹⁶ della "Brigham Young University". Il pacchetto software SMS è composto da diversi componenti quali modelli bidimensionali agli elementi finiti o alle differenze finite, modelli monodimensionali, modelli per il calcolo del trasporto solido, delle dispersione di onde, ecc.

Il pacchetto SMS è un programma di tipo modulare che permette di elaborare attraverso diversi moduli di pre-processing tutti gli elementi necessari alla modellazione idraulica bidimensionale. SMS possiede inoltre diversi strumenti di post-processing per portare i risultati in un formato grafico di facile comprensibilità per l'utilizzatore.

Uno dei moduli essenziali è il Mesh Module, il quale sta alla base della generazione della griglia di calcolo che è composta da nodi, elementi, caratteristiche degli elementi e delle condizioni al contorno. Gli elementi, la cui definizione avviene tramite i nodi appartenenti ai singoli elementi, possono essere di tipo triangolare oppure quadrilateri, inoltre è possibile attribuire dimensioni

¹³ FLO-2DH – Two-dimensional flow in a horizontal plane

¹⁴ FESWMS – Finite Element Surface Water Modeling System

¹⁵ SMS – Surface-Water Modeling System

¹⁶ EMRL – Environmental Modeling Research Laboratory

variabili agli elementi ai fini di concentrare il numero di elementi in zone dov'è richiesto un maggior grado di dettaglio.

Il modello FLO-2DH è un modello idrodinamico in grado di analizzare sia correnti lente che veloci, con la possibilità di propagare su fondo bagnato o asciutto. Il programma permette inoltre di modellare sfioratori, tombini, opere d'immissione e pile di attraversamenti. L'idrogramma modellato può essere di tipo stazionario o non-stazionario. Come risultato vengono forniti le velocità di deflusso ed i tiranti d'acqua per ogni nodo della griglia di calcolo.

5.5.1.2 Metodo di calcolo

Il programma applica il metodo agli elementi finiti che rappresenta uno dei metodi numerici volti alla risoluzione di equazioni differenziali riscontrati in diversi problemi fisici o matematici. Il sistema delle equazioni governanti viene risolto mediante il "Galerkin finite element method" che incorpora il metodo dei residui ponderati per trovare le soluzioni delle equazioni differenziali.

Il sistema di coordinate implementato nel modello è rappresentato dalla Figura 15.

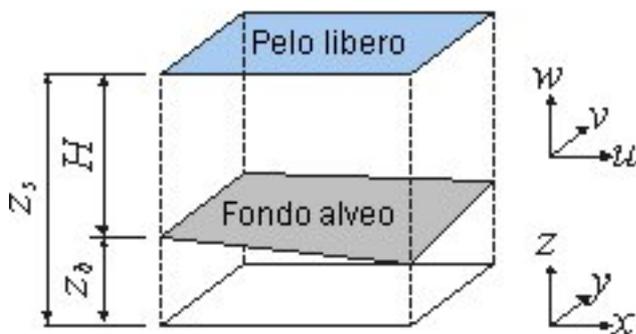


Figura 15 - Sistema di coordinate nel modello FESWMS

Alla base del modello stanno le equazioni alle acque basse composte dall'equazione di bilancio delle quantità di moto nella direzione x

$$\frac{\partial(HU)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta_{uu} HUU + (\cos \alpha_x \cos \alpha_z)^2 \frac{1}{2} gH^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_{uv} HUV) + \cos \alpha_x gH \frac{\partial z_b}{\partial x} - \Omega HV + \frac{1}{\rho} \left[\tau_{bx} - \tau_{sx} - \frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right] = 0$$

dall'equazione di bilancio delle quantità di moto nella direzione y

$$\frac{\partial(HV)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{vu} HVU) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta_{vv} HVV + (\cos \alpha_y \cos \alpha_z)^2 \frac{1}{2} gH^2 \right) + \cos \alpha_y gH \frac{\partial z_b}{\partial y} - \Omega HU + \frac{1}{\rho} \left[\tau_{by} - \tau_{sy} - \frac{\partial(H\tau_{yx})}{\partial x} - \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right] = 0$$

e dall'equazione di continuità

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = q$$

dove β_{uu} , β_{uv} , β_{vu} e β_{vv} , espressi dalle equazioni

$$\beta_{uu} = \frac{1}{HUU} \int_{z_b}^{z_s} uu \, dz, \quad \beta_{vv} = \frac{1}{HVV} \int_{z_b}^{z_s} vv \, dz$$

$$\beta_{uv} = \beta_{vu} = \frac{1}{HUV} \int_{z_b}^{z_s} uv \, dz$$

sono dei fattori di correzione che tengono conto della distribuzione logaritmica della velocità nella direzione verticale. Assumendo che il valore β sia uniforme e che la distribuzione della velocità in direzione verticale possa essere espressa dalla

$$u = \frac{U_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z - z_b}{k}\right)$$

con la velocità di frizione

$$U_* = \sqrt{c_f} U$$

dove c_f è un coefficiente di frizione adimensionale, κ è la costante di Karman ($\approx 0,4$) e k è la scabrezza, β diventa

$$\beta = 1 + \frac{c_f}{\kappa^2}$$

Nel programma FLO-2DH questo valore viene calcolato attraverso

$$\beta = \beta_0 + c_\beta c_f$$

Le due ultime equazione assumono la stessa forma mettendo $\beta_0=1$ e $c_\beta = \frac{1}{\kappa^2}$. Il coefficiente di resistenza c_f è ricavato da

$$c_f = \frac{g}{C^2}$$

dove C è il coefficiente di Chézy. Mettendo a confronto l'equazione di Chézy

$$Q = AV = AC\sqrt{RI}$$

all'equazione di Darcy-Weisbach

$$Q = A\sqrt{\frac{8g}{\lambda}}\sqrt{RI}$$

si ricava c_f tramite la formulazione

$$c_f = \frac{\lambda}{8}$$

Mettendo $\beta_0=1$ e $c_\beta=0$, come è l'impostazione default nel programma, si assume che le variazioni verticali nella velocità sono trascurabili.

Il parametro Ω nelle equazioni alle acque basse rappresenta il coefficiente di Coriolis che rispecchia gli effetti della rotazione della terra sul movimento dell'acqua. Questo coefficiente nel programma FLO-2DH viene assunto come una costante.

I parametri τ_{bx} e τ_{by} rappresentano lo sforzo tangenziale al fondo come segue:

$$\tau_{bx} = \rho c_f m_b U \sqrt{U^2 + V^2}$$

e

$$\tau_{by} = \rho c_f m_b U \sqrt{U^2 + V^2}$$

con

$$m_b = \cos \alpha_z$$

τ_{sx} e τ_{sy} stanno per lo sforzo tangenziale alla superficie del pelo libero, causato dal vento, sono però trascurati nell'ambito della presente modellazione.

5.5.1.3 Nota relativa alla griglia del modello

Per quanto riguarda la griglia del modello idraulico, vale la pena aggiungere le considerazioni riportate qui di seguito.

Come sopra menzionato gli elementi della griglia si definiscono attraverso i nodi. Il modello idraulico calcola per ciascun nodo il tirante d'acqua t ed i componenti della velocità di scorrimento v_x e v_y . Da queste grandezze derivano il pelo libero dell'acqua e la velocità risultante.

Ai fini di poter elaborare delle carte con i tiranti d'acqua e le velocità di deflusso, è necessario spalmare i risultati di calcolo, che si riferiscono ai singoli nodi, cioè a singoli punti dell'area in esame, sulla superficie circostante i nodi. Questo può avvenire tramite il metodo di Thiessen, il quale propone di attribuire a ciascun nodo una superficie di un'estensione tale da tener conto della distanza dal nodo vicino.

L'approccio proposto, tuttavia, non è in grado di soddisfare le esigenze relative al grado di dettaglio del presente progetto, pertanto si è proceduto ad un metodo più preciso.

Ogni elemento è definito in maniera univoca attraverso i suoi nodi presenti negli angoli dell'elemento (1-2-3). Il programma FESWMS, per ottenere una maggiore stabilità delle matrici di calcolo, inserisce dei nodi aggiuntivi (4-5-6) nei punti situati nel mezzo di un lato dell'elemento. Per i sei nodi (1-2-3-4-5-6) vengono poi calcolati i valori delle grandezze t , v_x e v_y .

Facendo la media dei valori calcolati per ogni elemento, si otterrebbe un valore rappresentante l'elemento. In questo modo, però, c'è il rischio di perdere le informazioni locali. Per far fronte a ciò, ogni elemento viene suddiviso ulteriormente e si ottengono per ogni elemento 4 sub-elementi delimitati dai nodi 1-6-4, 6-3-5, 5-2-4 e 4-6-5. Procedendo in questo modo nell'elaborazione dei risultati ci si può servire di una griglia addensata, denominata griglia di elaborazione (rappresentata nell'allegato B 5,12), che contiene un numero di elementi quattro volte più alto della griglia standard.

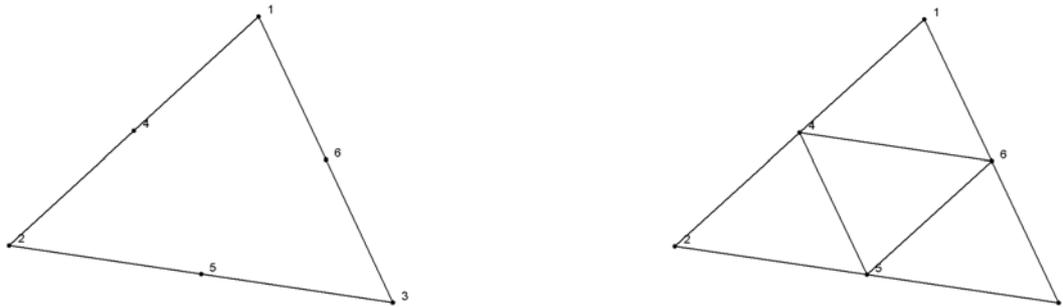


Figura 16 - Elemento standard e elemento suddiviso

Per i tiranti d'acqua e le velocità di scorrimento viene calcolato un valore rappresentativo per ciascun sub-elemento, facendo la media dei tre nodi che lo definiscono. In questo modo si è in grado di ottenere un grado di precisione soddisfacente per la rappresentazione dei calcoli.

I dati output del modello idraulico vengono importati nel programma ArcView, che rappresenta uno strumento molto potente per la redazione delle carte.

5.5.2 Dati di base

Ai fini della creazione del modello idraulico bidimensionale sono stati utilizzati i seguenti dati di base:

- **Dati topografici:** Le coordinate planimetriche sono state ricavate dalla Carta Tecnica Regionale 1:5.000. Effettuando il rilievo topografico nelle aree perifluviali è stato possibile verificare e completare le informazioni planimetriche della CTR, inoltre sono state assegnate le quote altimetriche ai punti rilevati.

In seguito all'integrazione dei punti rilevati con i dati topografici già esistenti nella CTR, si elabora un modello digitale del terreno che viene introdotto come input nel programma SMS.

- **Portate:** La Figura 14 (capitolo 5.4) mostra chiaramente che il deflusso sopra lo sfioratore laterale è un evento con carattere non stazionario. Nonostante ciò si è proceduto ad assumere un valore singolo di portata di uscita che serve come dato input alla modellazione bidimensionale descritta nel capitolo seguente.

La decisione di scegliere un valore singolo di portata per la modellazione idraulica deriva dal fatto che, nel caso in cui nella modellazione bidimensionale si tenesse conto della non-stazionarietà inserendo l'idrogramma di esondazione, il tempo per la modellazione andrebbe ad aumentare in modo inaccettabile.

Comunque, si è adottato un approccio semistazionario, descritto qui di seguito con un esempio, che permette di tener conto della non-stazionarietà dei fenomeni da studiare nelle aree perifluviali. Il volume esondato sulla sponda sinistra a monte della piazza Cile della piena cinquecentennale è di 289.394 m³. Questo volume d'acqua va ad estendersi nell'area perifluviale. Attraverso un procedimento iterativo è possibile ottenere la portata che provoca un'inondazione tale da riempire l'area perifluviale con il volume esondato dal torrente Boate. In questo esempio una portata di 41 m³/s è in grado di riempire nell'area perifluviale un

volume di 231.515 m³. Se a questo valore si somma il volume occupato da cantine e piccoli vicoli di cui non è stato tenuto conto nella creazione della griglia di calcolo (vedi capitolo 5.5.3.2), volume che equivale circa il 25 % del volume totale, si ottiene un volume totale di 289.394 m³ corrispondente al volume dell'idrogramma di esondazione. Il valore di 41 m³/s, ricavato tramite iterazione, rappresenta quindi la portata ponderata della piena cinquecentennale che va ad inondare l'area perfluviale sulla sponda sinistra in seguito alla tracimazione della zona SN1.

Nella Tabella 4 sono riportati le portate massime, le portate ponderate utilizzate come input nella modellazione bidimensionale (Q_{2d}), i volumi esondati e le durate dell'esondazione dei singoli eventi modellati. Dalla tabella si evince che la portata ponderata assume un valore minore rispetto alla portata massima di fuoriuscita. Come menzionato, tramite questo procedimento si è in grado di tener conto dei volumi delle esondazioni. Lo si può giustificare ulteriormente con il fatto che l'idrogramma di esondazione si va laminando fin dai primi istanti nelle aree perfluviali e che la portata massima subisce subito un'attenuazione a causa di perdite locali e dovute alla scabrezza. D'altra parte, al momento del raggiungimento del colmo della portata le aree perfluviali sono riempite soltanto fino circa a metà e la portata massima può defluire ancora sotto le condizioni di uno sfioratore libero sopra l'argine. Perciò sulla corrente libera nel fondo alveo non ci sono effetti di rigurgito provocati dal riempimento delle aree perfluviali da prendere in considerazione.

E' importante notare che il procedimento semistazionario adottato fa sì che i risultati ottenuti siano dalla parte sicura, visto che al momento del raggiungimento della portata al colmo una porzione delle masse d'acqua ha già raggiunto il waterfront ed è defluito nel golfo del Tigullio.

Infine, è ovvio che l'ubicazione delle portate d'ingresso nel modello bidimensionale corrisponde ai tratti di esondazione risultanti dalla modellazione monodimensionale.

Denominazione	Tr = 50				Tr = 200				Tr = 500			
	Q _{max}	Q _{2d}	V	d	Q _{max}	Q _{2d}	V	d	Q _{max}	Q _{2d}	V	d
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³]	[min]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³]	[min]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³]	[min]
SN1	6,4	4,1	6.432	26	44,5	32,3	151.258	78	60,0	41,0	289.394	82
DS1	1,9	1,2	1.897	26	28,7	16,0	87.750	78	40,1	16,0	147.496	82
SN2									0,43	0,43	826	32
SN3					1,8	1,2	734	10	13,04	10,45	20.062	32
SN4									1,07	1,01	1.095	18
SN5									2,92	1,93	1.855	16
SN6									11,43	7,35	14.115	30

Tabella 4 - Portate e volumi esondati nonché durate dell'esondazione per i tempi di ritorno assegnati

- Scabrezze: Nelle aree perifluviali sono stati adottati i seguenti valori di Strickler:

– Corpi stradali:	$k_{St} = 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
– Pareti verticali (edifici, muri, ecc.)	$k_{St} = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
– Aree verdi con vegetazione bassa (erba):	$k_{St} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
– Aree verdi con vegetazione alta (arbusti, cespugli):	$k_{St} = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

I valori assunti derivano da ricerche in bibliografia e dall'esperienza maturata in progetti simili.

A questo punto vale la pena notare che non è possibile calibrare il modello idraulico bidimensionale riguardo i parametri assunti in sede di creazione del modello (tratti di esondazione, portate, scabrezze) visto che non esistono dei dati precisi su eventi passati.

5.5.3 Elaborazione del modello

5.5.3.1 Delimitazione del modello

Per la delimitazione del modello sono stati seguiti i limiti delle fasce fluviali mappate nell'ambito della redazione del Piano di Bacino, aggiungendo un margine di almeno 25 m. Tuttavia, i limiti del modello sono stati adattati con l'aiuto dei sopralluoghi e dei rilievi topografici.

Sono stati creati due modelli separati, e precisamente uno dell'area perifluviale di destra e uno di quella di sinistra. Questo procedimento è da ritenersi senz'altro affidabile poiché l'acqua, una volta straripata sopra l'argine, non ritorna più in alveo e l'evolversi delle piene nelle aree perifluviali delle due sponde rimane separato. Procedendo in questo modo i tempi di calcolo sono ridotti.

5.5.3.2 Creazione della griglia di calcolo

Nell'ambito della generazione della griglia di calcolo è stata effettuata una distinzione tra le zone di libero deflusso e le zone di ostruzione del deflusso, rappresentate prevalentemente da edifici.

Il modello digitale del terreno fornisce delle informazioni molto sofisticate e dettagliate che renderebbero alquanto inefficace la gestione del modello. Per poter elaborare un modello da gestire in modo ragionevole sono state generalizzate le informazioni topografiche aggregando singoli edifici delimitati da corsi stradali e creando blocchi unici, come rappresentato dall'estratto del modello nella Figura 17. In questo modo le strade secondarie non vengono prese in considerazione come zone di deflusso libero. L'adozione di questo procedimento è giustificata dal fatto che in questo modo nel modello si assume una minore superficie di deflusso libero rispetto alla realtà e di conseguenza i risultati ottenuti hanno un margine di sicurezza maggiore.



Figura 17 - Singoli blocchi degli edifici (sinistra) e blocchi di edifici raggruppati (destra)

Lo stadio comunale è stato trattato come una superficie di deflusso libero. Non sarebbe stato corretto considerare lo stadio come blocco di ostruzione, poiché il muro circondante non è stato certamente dimensionato per la spinta dell'acqua. Pertanto si deve assumere che in caso di piena il muro cede subito per la spinta dell'acqua. Inoltre è necessario notare la presenza di diverse aperture (accessi, ecc.) nel muro che fanno entrare subito l'acqua nel campo sportivo.

La griglia di calcolo generata contiene in totale 49.141 nodi e 108.371 elementi.

5.5.3.3 Condizioni al contorno

In base ai sopralluoghi ed alle caratteristiche topografiche dell'area in esame sono state definite le condizioni al contorno:

- L'input è rappresentato dai punti dove si verificano le esondazioni dall'alveo, punti per i quali in precedenza sono stati elaborati i valori medi delle portate di esondazione.
- Un'altra condizione al contorno è rappresentata dal waterfront. La linea di separazione tra il corpo del marciapiede e la spiaggia funge da sfioratore. Un'analisi di sensitività condotta sulle oscillazioni del livello del mare ha dimostrato che queste non influiscono in nessuna maniera sulla dinamica delle esondazioni nelle aree periferiali.

5.6 Risultati dello studio idraulico di dettaglio

I risultati dello studio idraulico di dettaglio sono stati descritti in parte già nel capitolo 5.4, dove sono state riportati i tratti del torrente Boate non in grado di smaltire le piene di progetto.

I risultati della modellazione bidimensionale, condotta secondo le indicazioni riportate nel capitolo 5.5, sono rappresentati dagli allegati B 5,4 – B 5,8. In queste piante sono riportate, per ciascuna delle piene modellate, le planimetrie con le quote del pelo libero d'acqua, i tiranti d'acqua e le velocità di scorrimento, parametri che sono decisivi per indicare l'intensità di un evento. Negli allegati menzionati si può prendere visione, inoltre, delle aree e fasce di inondabilità nonché del rischio idraulico presente nella zona studiata.

Per quanto riguarda le aree di inondabilità (allegato B 5,5), si può notare che pressoché l'intero nucleo urbano è inondato già a partire da una piena con $Tr = 50$ anni. Si deve questo fenomeno al fatto che le aperture (passaggi stradali e pedonali) nel corpo dell'attraversamento ferroviario

provocano una zona di rigurgito a monte degli stessi perché la loro capacità idraulica non basta per smaltire senza rigurgito le piene provenienti dalle esondazioni SN 1 e DS 1. Lo stesso discorso vale anche per la zona del corso G. Matteotti che viene incrociato soltanto da tre strade principali, e precisamente dalla via Roselli, dal corso della Libertà e dal Corso G. Mameli. Anche in quella zona si crea un rigurgito cosa che provoca l'inondazione della zona situata entro l'attraversamento ferroviario ed il corso G. Matteotti. A causa di questi fenomeni le aree allagate dalle piene con $Tr = 200$ anni e 500 anni nel nucleo urbano non sono molto maggiori dell'area allagata dalla piena con $Tr = 50$ anni, benché le intensità (tirante d'acqua e velocità di scorrimento) ovviamente siano di diversa entità. E' da spiegare questo ulteriormente con il fatto che il profilo del terreno nelle parti esterne del nucleo urbano inizia a salire in maniera accentuata.

La zona situata a monte della via A. d'Aosta, compreso il campo da Golf, non viene raggiunta da una piena di $Tr = 50$ anni, bensì dalle piene con $Tr = 200$ anni e 500 anni, dovuto questo alle esondazioni denominate SN2 – SN6. Dall'allegato B 5,5 si può osservare come la piena con $Tr = 200$ anni si estende nell'area perfluviale soltanto a partire dell'esondazione in zona SN4, mentre la piena con $Tr = 500$ anni si estende a partire dalle esondazioni nelle zone SN2 - SN6.

Dagli allegati B 5,422, B 5,432 e B 5,442 si evince che i maggiori tiranti d'acqua sono da osservare nelle seguenti zone:

- In sponda destra dietro la via Milano, nella zona della via F. Tardito, della via Amendola e della via Costaguta. In queste aree sono presenti delle depressioni rispetto alle aree circostanti, depressioni che vanno riempiendosi in occasione di inondazioni;
- In sponda sinistra: anche nella zona dell'attraversamento della via della Libertà sotto il corpo ferroviario è presente una depressione nella quale il tirante d'acqua naturalmente assume un valore elevato;
- In sponda sinistra: anche il corso Mameli a valle dell'attraversamento ferroviario ed il corso Italia sono caratterizzati da elevati tiranti idrici.

In valori assoluti i tiranti d'acqua per la piena cinquantennale assumono dei valori fino a 1.8 m, mentre per la piena cinquecentennale sono da notare tiranti d'acqua con altezze fino a 2.5 m.

Per quel che riguarda, invece, le velocità di scorrimento, i valori maggiori sono da notare soprattutto nelle strade che corrono in parallelo al torrente Boate, visto che queste strade formano degli alvei nei cui l'acqua ha la sua direzione di flusso preferenziale. I valori maggiori assoluti si possono osservare nel corso della Libertà nella zona che si apre verso la piazza del 4 novembre. La velocità elevata in questa zona in parte è dovuta al rigurgito presente a monte che provoca un carico totale elevato che risulta in una velocità aumentata rispetto a condizioni di libero deflusso.

In base ai tiranti d'acqua ed alle velocità di scorrimento ottenuti sono state elaborate, poi, delle carte delle fasce di inondabilità, tenendosi alla pubblicazione "definizione degli ambiti normativi relativi alle fasce di inondabilità in funzioni di tiranti idrici e velocità di scorrimento" emessa dal Comitato Tecnico Regionale.

Ai sensi della citata pubblicazione è stata definita una fascia A che comprende le aree perfluviali inondabili al verificarsi di un evento di piena con portata al colmo di piena

corrispondente a periodo di ritorno $T = 50$ anni ed una fascia B comprendente le aree perifluviali inondabili al verificarsi di un evento di piena con portata al colmo di piena corrispondente a periodo di ritorno $T = 200$ anni.

All'interno della fascia A sono state individuate, sulle base delle caratteristiche dell'inondazione a $T =$ anni, aree a minor pericolosità relativa A0 ed aree AA con alta e media pericolosità relativa. Anche all'interno della fascia B sono state individuate aree B0 e BB, attraverso lo stesso metodo adottato per la fascia A.

La pericolosità relativa si definisce attraverso un diagramma, evidenziato nella succitata pubblicazione e riportato nella Figura 18, il quale combina le velocità di scorrimento ed i tiranti idrici.

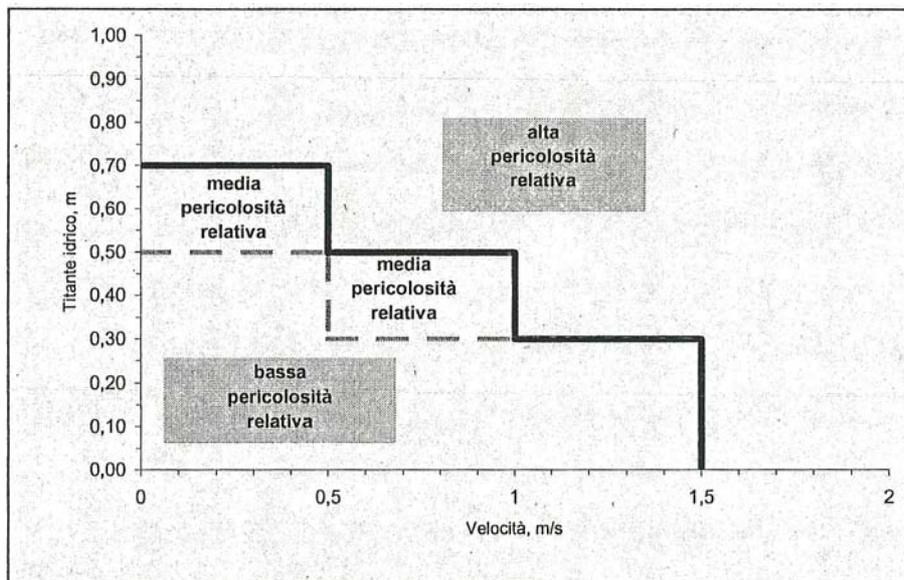


Figura 18 - Soglie di pericolosità relativa in termini di idrante idrico condizionato dalla velocità della corrente

5.7 Analisi del rischio idraulico

Di seguito alle elaborazioni succitate è stata anche elaborata una carta del rischio idraulico, tenendosi alla raccomandazione del Comitato Tecnico Regionale "Redazione della carta del rischio idrogeologico nei piani stralci di bacino (ex. L. 183/89 e D.L. 180/98 e ss.mm. e ii.)".

L'espressione formale ormai consolidata del rischio (R), adottata anche nell'atto indirizzo e coordinamento relativo del D.L. 180/98 coinvolge tre componenti (Autorità di bacino, provincia di Genova, 2000):

- pericolosità (P) intesa come probabilità che si realizzino le condizioni di accadimento dell'evento calamitoso;
- valore degli elementi a rischio (E), intesi come persone e beni;
- vulnerabilità (V), intesa come la capacità degli elementi a rischio a resistere all'evento in considerazione.

Attraverso la seguente formulazione le tre componenti sono combinate:

$$R = P \cdot E \cdot V$$

Il rischio R viene determinato attraverso una procedura semplificata. Innanzitutto si assume uniforme, e quindi pari a 1, la vulnerabilità degli elementi a rischio. La definizione delle classi di elementi a rischio si basa sostanzialmente sulla carta di uso del suolo. Le classi di elementi a rischio sono pertanto le seguenti:

- E₀: aree disabitate o improduttive
- E₁: edifici isolati, zone agricole
- E₂: nuclei urbani, insediamenti industriali e commerciali minori
- E₃: centri urbani, grandi insediamenti industriali e commerciali, principali infrastrutture e servizi

Il rischio idraulico è determinato dalla sovrapposizione delle tre fasce di inondabilità con gli elementi a rischio, secondo le intersezioni indicative riportati nella Figura 19.

ELEMENTI A RISCHIO	FASCE DI INONDABILITÀ		
	200 < T ≤ 500 fascia C	50 < T ≤ 200 fascia B	T ≤ 50 fascia A
E ₀	R ₀	R ₁	R ₁
E ₁	R ₁	R ₂	R ₃
E ₂	R ₂	R ₃	R ₄
E ₃	R ₂	R ₄	R ₄

Figura 19 - Intersezione tra fasce di inondabilità ed elementi a rischio per definire il rischio idraulico

L'allegato B 5,7 evidenzia che pressoché l'intero nucleo urbano di Rapallo risulta essere zona di rischio idraulico molto elevato, da una parte perché si tratta di una zona di classe di elementi E₃, dall'altra parte perché già la piena von Tr = 50 anni allaga quasi l'intero nucleo urbano. La zona del campo da Golf e delle sue vicinanze, invece, risulta trovarsi in una zona di rischio moderato rispettivamente medio.

6. Riassunto

La seguente relazione presenta la prima fase del progetto di adeguamento idraulico del torrente Boate, e precisamente la fase della modellazione idraulica di dettaglio.

Parallelamente ad un attento studio dei dati e delle documentazioni esistenti sono stati effettuati dei sopralluoghi e dei rilievi di campagna. Nell'ambito di queste attività è stato eseguito un rilievo topografico di dettaglio dell'asta terminale del torrente Boate e delle aree perfluviali annesse all'area progettuale.

Di seguito è stato realizzato uno studio idraulico di dettaglio attraverso l'elaborazione di un modello afflussi-deflussi, una modellazione monodimensionale dell'alveo del torrente Boate ed una modellazione bidimensionale delle aree perfluviali.

Lo studio ha permesso di approfondire l'attendibilità delle fasce fluviali, delimitate già nell'ambito del Piano di Bacino. Tuttavia, anche la modellazione idraulica di dettaglio ha evidenziato che il nucleo abitativo della città di Rapallo è soggetto ad inondazioni già a partire da una piena cinquantennale con tiranti idrici e velocità di deflusso elevati in alcune zone localizzate. Di conseguenza, pressoché l'intero nucleo urbano di Rapallo risulta trovarsi in una zona di rischio idraulico molto elevato.

La modellazione idraulica di dettaglio servirà, quindi, all'elaborazione di misure adeguate volte alla mitigazione del rischio idraulico nell'abitato di Rapallo.

Vienna, Malles, Rapallo, 10 novembre 2004

Gruppo Donauconsult

Bibliografia

- G.L. Barni (1983): *“Storia di Rapallo e della gente del Tigullio”*, Genova, Sabatelli Liguria
- Chow, V.T., Maidment, D.R. und Mays, W.M. (1988): *„Applied Hydrology“*, McGraw-Hill Book Company, International Edition
- Maniak, U. (1997): *“Hydrologie und Wasserwirtschaft”*, un'introduzione per ingegneri, Springer – Verlag Berlin Heidelberg
- Placer County Flood Control and Water Conservation District (1990): *“Stormwater management manual”*, Auburn, CA
- US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (2001): *„HEC-RAS 3.0 River Analysis System“*, User Manual and Hydraulic Reference Manual
- US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (2000): *„HEC-HMS 2.1 Hydraulic Modeling System“*, User Manual and Technical Reference Manual
- U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (2002): *“User’s Manual for FESWMS Flo2DH Two-dimensional Depth-averaged Flow and Sediment Transport Model, Release 3”*, Publication No. FHWA-RD-03-053
- Villi, V. (1994): *“Valutazione delle piogge estreme nell’Italia nord-orientale”*, in *“La valutazione delle piene in Italia*, CNR, Roma