



Anas SpA

Direzione Centrale Progettazione

TRANS-EUROPEAN TRANSPORT NETWORK EXECUTIVE AGENCY  
TEN-T EA

Ministero  
delle Infrastrutture e dei Trasporti

PROGETTAZIONE PRELIMINARE ED ANALISI ECONOMICA DEL TRATTO  
TERMINALE DEL COLLEGAMENTO DEL PORTO DI CIVITAVECCHIA CON  
IL NODO INTERMODALE DI ORTE PER IL COMPLETAMENTO DELL'ASSE  
VIARIO EST-OVEST (CIVITAVECCHIA-ANCONA)  
2012-IT-91060-P

TRATTA: MONTE ROMANO EST - CIVITAVECCHIA

PROGETTO PRELIMINARE

PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE CENTRALE PROGETTAZIONE

<b>PROGETTISTA:</b> Ing. Maurizio Mancinetti Ordine Ing. di Roma n° 19506		<b>GRUPPO DI PROGETTAZIONE ANAS</b> Ing. F. Bario Ing. F. Bezzi Geol. G. Cardillo Ing. L. Cedrone Ing. P. G. D'Armini Sig.ra A. M. D'Aversa Ing. A. De Leo Geom. E. De Masi Geom. M. Diamente Ing. P. Fabbro Ing. G. Giovannini		
<b>IL GEOLOGO</b> Dott. Geol. Stefano Serangeli Ordine Geol. Lazio n. 659		Geom. R. Izzo Ing. E. Luziatelli Geom. D. Maggi Geom. M. Maggi Ing. E. Mittiga Ing. M. Panebianco Dott.ssa D. Perfetti Ing. A. Petrillo Ing. F. Pisani Arch. R. Roggi		
<b>IL RESPONSABILE DEL S.I.A.</b> Dott. Geol. Serena Majetta				
<b>COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE</b> Arch. Roberto Roggi				
<b>IL RESP. DEL PROCEDIMENTO</b> Ing. Ilaria COPPA		<b>SERVIZI SUPPORTO ESTERNO</b>		
<b>PROTOCOLLO</b>	<b>DATA</b>	<b>VISTO: IL DIRETTORE CENTRALE</b> Ing. Ugo DIBENNARDO		

STUDI GENERALI  
STUDIO IDROLOGICO-IDRAULICO DEL FIUME MIGNONE  
Relazione idraulica – Appendice

<b>CODICE PROGETTO</b> PROGETTO      LIV. PROG.      N. PROG. L0402D    P    1301		<b>NOME FILE</b> L0402D_P_1301_T00_SG07_IDR_RE02_A.DWG		<b>REVISIONE</b>	<b>TAVOLA</b>	<b>SCALA:</b>
<b>CODICE ELAB.</b>		<b>T00SG07IDRRE02</b>		<b>A</b>		
C						
B						
A	EMISSIONE		GIUGNO_2014	TECNICO/RESP.TECN.	MANCINETTI	COPPA
REV.	DESCRIZIONE			REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

## INDICE

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO PRIMO DATI DI BASE</b>	<b>4</b>
<b>1 Cartografia</b>	<b>4</b>
<b>2 Modello digitale dell'elevazione del terreno</b>	<b>5</b>
<b>3 Rilievi topografici pregressi</b>	<b>6</b>
<b>4 Nuovo rilievo topo-batimetrico</b>	<b>7</b>
<b>CAPITOLO SECONDO MODELLI DI MOTO PERMANENTE</b>	<b>11</b>
<b>1 Descrizione del modello</b>	<b>11</b>
<b>2 Applicazione del modello al Mignone alla SS1 Aurelia</b>	<b>12</b>
<b>3 Applicazione del modello al Mignone a Rota</b>	<b>14</b>
<b>CAPITOLO TERZO MODELLO DI MOTO VARIO</b>	<b>19</b>
<b>1 Descrizione del modello</b>	<b>19</b>
<b>2 Applicazione del modello alla valle del Mignone</b>	<b>20</b>
<b>3 Configurazioni del modello</b>	<b>22</b>
3.1 Geometrie del modello della valle del Mignone	22
3.1.1 Valle del Mignone a valle della SS1 Aurelia (modello Quasi 2D)	24
3.1.2 Effetti della rimozione del vecchio ponte dell'Aurelia	28
3.1.3 Nuovo tracciato autostradale	29
3.2 Schematizzazione delle dinamiche di apertura delle brecce arginali	29
<b>4 Calibrazione del modello</b>	<b>33</b>
<b>5 Condizioni al contorno e iniziali</b>	<b>35</b>
<b>CAPITOLO QUARTO SCENARI ANTE OPERAM</b>	<b>36</b>
<b>1 Scenari nelle condizioni ante operam</b>	<b>36</b>
1.1 Scenari realizzati	36
1.2 Sezioni di controllo	38
<b>2 Analisi degli scenari simulati</b>	<b>39</b>
2.2 Scenario con argini fusibili ( <i>afus</i> )	40

2.2.1	Descrizione delle dinamiche d'inondazione	40
2.3	Scenario con argini tracimabili, ma non fusibili ( <b>anofus</b> )	46
2.3.1	Descrizione delle dinamiche d'inondazione	47
2.4	Scenario con argini non tracimabili ( <b>anotra</b> )	47
2.4.1	Descrizione delle dinamiche d'inondazione	48
2.5	Scenari senza il vecchio ponte dell'Aurelia ( <b>afusN</b> , <b>anofusN</b> e <b>anotraN</b> )	49
2.5.1	Descrizione delle dinamiche d'inondazione	50
2.6	Scenari con il nuovo attraversamento autostradale ( <b>sfus</b> , <b>snofus</b> , <b>snotra</b> , <b>sfusN</b> , <b>snofusN</b> e <b>snotraN</b> )	51
2.6.1	Descrizione delle dinamiche d'inondazione	53
2.6.1.1	Confronto tra gli scenari <b>sfus</b> e <b>afus</b>	53
2.6.1.2	Confronto tra gli scenari <b>snofus</b> e <b>anofus</b>	54
2.6.1.3	Confronto tra gli scenari <b>snotra</b> e <b>anotra</b>	55
2.6.1.4	Confronto tra gli scenari <b>sfus</b> e <b>sfusN</b>	56
2.6.1.5	Confronto tra gli scenari <b>snofus</b> e <b>snofusN</b>	56
2.6.1.6	Confronto tra gli scenari <b>snotra</b> e <b>snotraN</b>	56
<b>3</b>	<b>Scelta delle condizioni ante operam di riferimento</b>	<b>57</b>
	<b>CAPITOLO QUINTO INTERFERENZE IDRAULICHE POST OPERAM</b>	<b>60</b>
<b>1</b>	<b>Verifica delle livellette stradali di progetto</b>	<b>60</b>
1.1	Variante n. 1	60
1.2	Variante n. 2	66
1.3	Variante n. 3	71
1.4	Variante n. 4	76
1.5	Scelta del tracciato della strada in progetto	76
<b>2</b>	<b>Interferenze con le piene del Mignone</b>	<b>81</b>
2.1	Geometria del modello idraulico <i>post operam</i>	81
2.2	Simulazioni <i>post operam</i>	83
	<b>CAPITOLO SESTO PAI DELL'AUTORITÀ DEI BACINI REGIONALI DEL</b>	

<b>LAZIO</b>	<b>97</b>
<b>1 PAI vigente</b>	<b>97</b>
1.1 Studio Hydrodata del 1998	97
1.2 Studio DSIC 2003	99
1.3 Fasce fluviali del PAI vigente	100
<b>2 Confronto PAI vigente - presente studio</b>	<b>101</b>
2.1 Interferenze dell'opera in progetto secondo il PAI	103
<b>CAPITOLO SETTIMO EROSIONI D'ALVEO</b>	<b>108</b>
<b>1 Descrizione dei modelli</b>	<b>108</b>
1.1 Obiettivi	108
1.2 Bilancio dei sedimenti	109
<b>2 Fenomeni erosivi</b>	<b>113</b>
<b>APPENDICI</b>	<b>119</b>
<b>Appendice 1. Codice Hec-Ras (moto permanente 1D)</b>	<b>120</b>
1 Introduzione	120
2 Il modello matematico	120
3 Calcolo della cadente media	126
<b>Appendice 2. Codice Hec-Ras (moto vario 1D)</b>	<b>127</b>
1 Introduzione	127
2 Modello matematico	127
3 Soluzione numerica	129
4 Confluenze e biforcazioni	133
5 Perdite di carico	133
<b>Appendice 3. Simulazioni ante operam</b>	<b>136</b>
Tabelle	136
3.1 Scenario con argini fusibili ( <i>afus</i> )	156
Tempo di ritorno di 30 anni	156
Tempo di ritorno di 50 anni	159

Tempo di ritorno di 100 anni	162
Tempo di ritorno di 200 anni	165
Tempo di ritorno di 500 anni	168
3.2 Scenario con arg. tracimabili, ma non fusibili ( <b>anofus</b> )	171
Tempo di ritorno di 30 anni	171
Tempo di ritorno di 50 anni	175
Tempo di ritorno di 100 anni	178
Tempo di ritorno di 200 anni	181
Tempo di ritorno di 500 anni	184
3.3 Scenario con argini non tracimabili ( <b>anotra</b> )	187
Tempo di ritorno di 30 anni	187
Tempo di ritorno di 50 anni	190
Tempo di ritorno di 100 anni	193
Tempo di ritorno di 200 anni	196
Tempo di ritorno di 500 anni	199
3.4 Scenari senza il vecchio ponte dell'Aurelia	202
3.4.1 Scenario con argini fusibili ( <b>afusN</b> )	203
Tempo di ritorno di 30 anni	203
Tempo di ritorno di 50 anni	206
Tempo di ritorno di 100 anni	209
Tempo di ritorno di 200 anni	212
Tempo di ritorno di 500 anni	215
3.4.2 Scenario con argini tracimabili, ma non fusibili ( <b>anofusN</b> )	218
Tempo di ritorno di 30 anni	218
Tempo di ritorno di 50 anni	221
Tempo di ritorno di 100 anni	224
Tempo di ritorno di 200 anni	227
Tempo di ritorno di 500 anni	230

3.4.3	Scenario con argini non tracimabili ( <b>anotraN</b> )	233
	Tempo di ritorno di 30 anni	233
	Tempo di ritorno di 50 anni	236
	Tempo di ritorno di 100 anni	239
	Tempo di ritorno di 200 anni	242
	Tempo di ritorno di 500 anni	245
3.5	Scenari con il nuovo attraversamento autostradale previsto	248
3.5.1	Scenario con argini fusibili ( <b>sfus</b> )	249
	Tempo di ritorno di 30 anni	249
	Tempo di ritorno di 50 anni	252
	Tempo di ritorno di 100 anni	255
	Tempo di ritorno di 200 anni	258
	Tempo di ritorno di 500 anni	261
3.5.2	Scenario con argini tracimabili, ma non fusibili ( <b>snofus</b> )	264
	Tempo di ritorno di 30 anni	264
	Tempo di ritorno di 50 anni	267
	Tempo di ritorno di 100 anni	270
	Tempo di ritorno di 200 anni	273
	Tempo di ritorno di 500 anni	276
3.5.3	Scenario con argini non tracimabili ( <b>snotra</b> )	279
	Tempo di ritorno di 30 anni	279
	Tempo di ritorno di 50 anni	282
	Tempo di ritorno di 100 anni	285
	Tempo di ritorno di 200 anni	288
	Tempo di ritorno di 500 anni	291
3.5.4	Scenario con argini fusibili, no vecchio ponte ( <b>sfusN</b> )	294
	Tempo di ritorno di 30 anni	294
	Tempo di ritorno di 50 anni	297

Tempo di ritorno di 100 anni	300
Tempo di ritorno di 200 anni	303
Tempo di ritorno di 500 anni	306
3.5.5 Scenario con argini tracimabili e non fusibili, no vecchio ponte ( <b>snofusN</b> )	309
Tempo di ritorno di 30 anni	309
Tempo di ritorno di 50 anni	313
Tempo di ritorno di 100 anni	316
Tempo di ritorno di 200 anni	319
Tempo di ritorno di 500 anni	322
3.5.6 Scenario con argini non tracimabili, no vecchio ponte ( <b>snotraN</b> )	325
Tempo di ritorno di 30 anni	325
Tempo di ritorno di 50 anni	328
Tempo di ritorno di 100 anni	331
Tempo di ritorno di 200 anni	334
Tempo di ritorno di 500 anni	337
<b>Appendice 4. Simulazioni <i>post operam</i></b>	<b>340</b>
Tabelle	340
Figure	400
<b>Appendice 5. Formule del trasporto solido</b>	<b>416</b>
Engelund-Hansen	416
Yang	416
Laursen (Copeland)	417
<b>Riferimenti</b>	<b>418</b>

# INTRODUZIONE

I modelli idraulici hanno lo scopo di determinare i livelli idrici e l'ampiezza delle aree inondabili per onde di piena assegnate, nonché l'azione erosiva dell'acqua sugli alvei, allo scopo di individuare gli interventi per mettere in sicurezza le aree a rischio.

In questo studio sono stati impiegati tre tipi di modelli:

- a) un modello a fondo fisso monodimensionale in moto permanente,
- b) un modello a fondo fisso monodimensionale in moto vario.
- c) un modello a fondo mobile monodimensionale in moto gradualmente vario.

L'utilizzo dei modelli è stato guidato da alcune considerazioni.

I modelli a fondo fisso sono abbastanza affidabili, soprattutto dove possono essere tarati direttamente per la presenza di stazioni di misura delle portate. Dove queste stazioni mancano, è possibile scegliere con un sufficiente grado di attendibilità dei valori di letteratura, espressi in funzione delle caratteristiche degli alvei.

I modelli a fondo mobile, invece, impiegano algoritmi che simulano l'erosione e la sedimentazione che non sono tarabili per mancanza delle campagne d'indagine necessarie, che sono comunque difficili e molto onerose. D'altra parte, si può fare soltanto un limitato assegnamento sui parametri forniti dalla letteratura, che sono poco attendibili. Le alterazioni degli alvei simulate dai modelli a fondo mobile devono essere perciò considerate soltanto indicative, anche se molto utili per dare un'idea delle possibili localizzazioni degli scavi e un ordine di grandezza della loro entità.

I modelli monodimensionali riescono a simulare meglio di quelli bidimensionali gli andamenti dei livelli idrici nelle vallate relativamente strette, senza apprezzabili componenti trasversali delle velocità, perché possono far uso efficacemente di algoritmi che simulano al meglio i fenomeni idraulici.

I modelli di moto permanente consentono di valutare meglio di quelli di moto vario l'effetto idraulico di ostacoli e manufatti in alveo, e possono essere

usati per determinare i livelli idrici con buona affidabilità nei tratti in cui la corrente varia lentamente nel tempo rispetto alla lunghezza del tratto.

I modelli di moto vario permettono di tenere conto efficacemente della variabilità delle portate nel tempo, quando questa è rapida rispetto alla lunghezza del tratto considerato, e di valutare l'effetto di laminazione delle esondazioni.

Le condizioni dell'area interessata dallo studio richiedono l'uso integrato di questi strumenti per risolvere i vari problemi posti dagli eventi di piena. In particolare, un modello di moto permanente a fondo fisso, tarato con le misure di livello e portata alle stazioni idrometrografiche del Mignone al ponte della SS1 Aurelia, alla Teleferica di Rota e al ponte di Rota, è stato usato per determinare le scale di deflusso di piena delle tre stazioni idrometrografiche citate.

Il modello monodimensionale di moto vario a fondo fisso, che utilizza gli stessi parametri di taratura di quelli di moto permanente, è stato usato per simulare l'andamento dei livelli idrici nella valle del Mignone, dalla foce e fino a monte della stazione idrometrografica di Rota.

Il modello di moto vario a fondo mobile è stato impiegato per individuare le zone di erosione e l'ordine di grandezza degli scavi.

Le piene utilizzate nei modelli di moto vario sono state desunte dallo studio idrologico descritto nella *Relazione Idrologica* e, in particolare, sono state determinate per mezzo del modello afflussi-deflussi descritto nel capitolo 4 di quella relazione, partendo dalle piogge intense descritte nel capitolo 2.

Questa *Relazione Idraulica* si articola in 7 capitoli:

- nel capitolo primo sono descritti i dati di base utilizzati per la realizzazione dei modelli idraulici e una sintesi sui rilievi topografici appositamente realizzati. Una completa descrizione del rilievo topo-batimetrico realizzato è riportata nella *Relazione sui rilievi topo-batimetrici*;
- nel capitolo secondo sono descritti i modelli di moto permanente utilizzati per definire le scale di deflusso delle stazioni idrometriche del Fiume Mignone. Nel punto 2 quello dalla foce a monte del ponte della SS1 Aurelia. Nel punto 3 quello da alcuni chilometri a valle della stazione idrometrografica di Rota teleferica a monte del ponte sul Mignone a Rota;
- nel capitolo terzo è descritto il modello in moto vario usato:
  - per analizzare, come mostrato nel capitolo quarto, gli scenari *ante operam* e scegliere quelli di riferimento,
  - per valutare, come mostrato nel capitolo quinto, le interferenze dell'opera in progetto nelle condizioni *post operam*;

- nel capitolo sesto si è svolta la valutazione delle interferenze idrauliche dell'opera in progetto riferita al PAI vigente dell'Autorità dei Bacini Regionali del Lazio;
- infine nel capitolo settimo è descritto il modello a fondo mobile e sono indicate le zone soggette a erosione e la possibile entità di queste.

# capitolo primo

## Dati di base

### 1 Cartografia

La base cartografica utilizzata per le elaborazioni idrauliche è costituita dalla Nuova Carta Tecnica Regionale (NCTR) a scala 1:5.000, rappresentata nella figura 1.1. Nella figura si riportano, sulla base della NCTR, l'asse del Fiume Mignone nel tratto modellato e i limiti dei bacini alle sezioni di chiusura lungo il fiume.

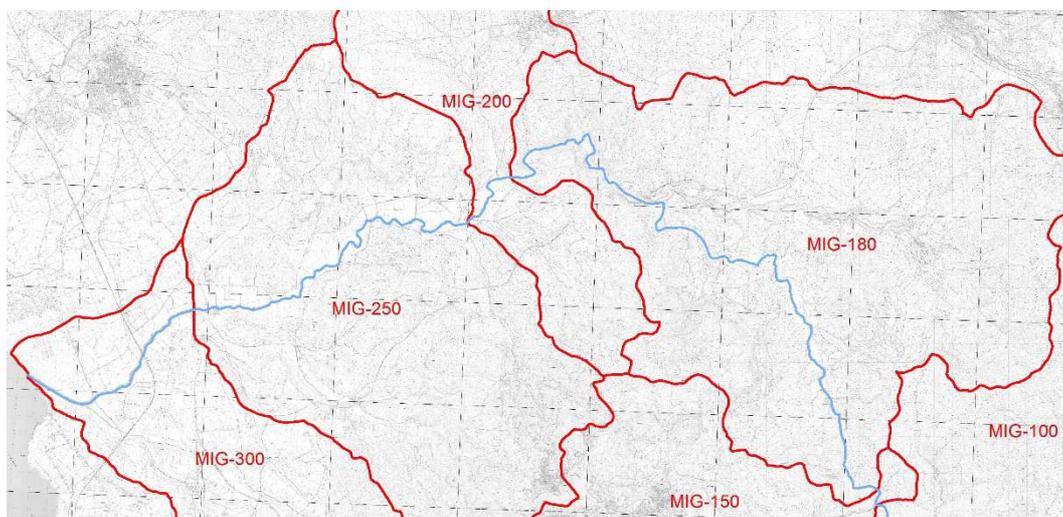


Figura 1.1. NCTR a scala 1:5.000

## 2 Modello digitale dell'elevazione del terreno

Lungo la valle del fiume è disponibile il volo Lidar del Ministero dell'Ambiente, la cui restituzione sotto forma di modello digitale dell'elevazione del suolo (DEM) è riportata nella figura 1.2. La risoluzione spaziale del DEM è a passo di  $1\text{ m}$  nella valle del fiume e di  $2\text{ m}$  lungo la fascia costiera. Nella figura 1.3 si riporta un esploso del DEM disponibile nella valle del Mignone a partire dalla confluenza del Fosso Nasso fino alla foce nel Mar Tirreno.

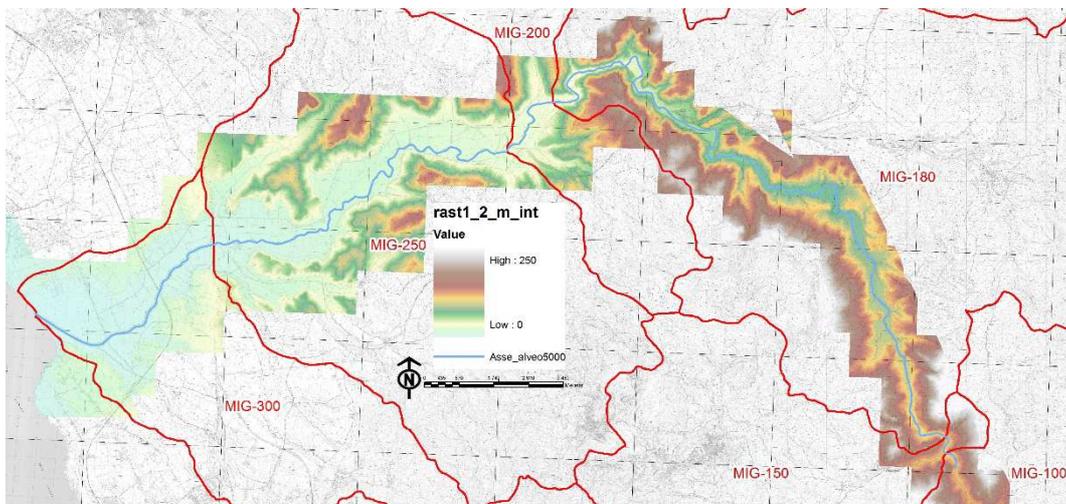


Figura 1.2. DEM nella valle del Mignone modellata idraulicamente

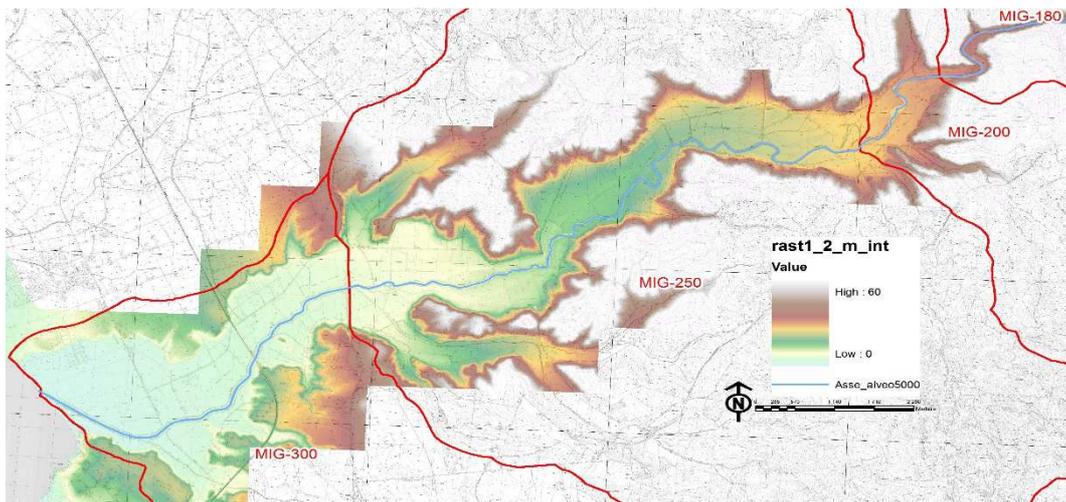


Figura 1.3. DEM della valle del Mignone dalla confluenza del Fosso Nasso alla foce

### 3 Rilievi topografici pregressi

Sono stati acquisiti, i seguenti rilievi topografici:

- rilievi eseguiti dal Consorzio di Bonifica della Maremma Etrusca nel 1958, per i *Lavori di sistemazione del tronco inferiore del Fiume Mignone – 1° Lotto* (progetto degli argini esistenti), in formato cartaceo;
- rilievi eseguiti dal Consorzio di Bonifica della Maremma Etrusca nel 1994, per i *Lavori di manutenzione ordinaria delle opere di bonifica del comprensorio per l'anno 1992*, in formato cartaceo;
- rilievi eseguiti della società Hydrodata per conto dell'Autorità dei Bacini Regionali del Lazio nel 1998, nell'ambito dello *Studio ST10*, in formato cartaceo;
- rilievi del Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile dell'Università degli Studi Roma Tre per conto dell'Autorità dei Bacini Regionali del Lazio del 2003, nell'ambito dello studio *Rilievi, Studi e Ricerche finalizzati all'aggiornamento del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) relativamente alla difesa idraulica dei Bacini Regionali minori – Area Nord*, in formato digitale georeferenziato;
- rilievi della società CO.RI.P. per conto dell'ARDIS del 2007 nell'ambito dei *Lavori di demolizione e rimozione delle costruzioni abusive sull'area golenale destra, ripristino dell'argine a valle della strada litoranea – Progetto esecutivo* e del 2010 nell'ambito degli *Interventi di riassetto idrogeologico della Maremma Laziale, con esecuzione di rilievi topografici sul Fiume Mignone dalla S.S. 1 Aurelia verso monte fino alla confluenza con il Fosso Nasso*, in formato digitale;
- rilievi della società SPEA del 2010 nell'ambito del *Progetto esecutivo della nuova autostrada A12*, in formato digitale georeferenziato.

Come specificato in seguito, i rilievi digitali e georeferenziati indicati sono stati utilizzati per verificare ed integrare il nuovo rilievo topografico eseguito.

## 4 Nuovo rilievo topo-batimetrico

La nuova campagna topo-batimetrica, illustrata nel dettaglio nella relativa *Relazione sui rilievi topo-batimetrici*, è consistita nella rilevazione, durante l'ottobre e il novembre 2013, di 64 sezioni trasversali d'alveo e aree inondabili e di 7 opere d'arte, come mostrato nella figura 1.4.

Al fine di validare il DEM e i rilievi digitali pregressi (rilievo del 2003), alcune delle sezioni del nuovo rilievo sono state rilevate in corrispondenza delle sezioni rilevate nei rilievi pregressi. Successivamente si sono eseguiti dei sistematici confronti tra le nuove sezioni rilevate e le equivalenti sezioni dei rilievi pregressi, e tra le sezioni dei rilievi e le equivalenti sezioni estratte da DEM, di cui nelle figure dalla 1.5 alla 1.7 si riportano alcuni esempi, riscontrando delle differenze di quota estremamente contenute: mediamente non superiori ai 25 cm. Tali modeste differenze hanno consentito di infittire i modelli idraulici, laddove ritenuto opportuno, con nuove sezioni oltre quelle appositamente rilevate, sia utilizzando i rilievi pregressi (rilievo del 2003), sia estraendole direttamente dal DEM.

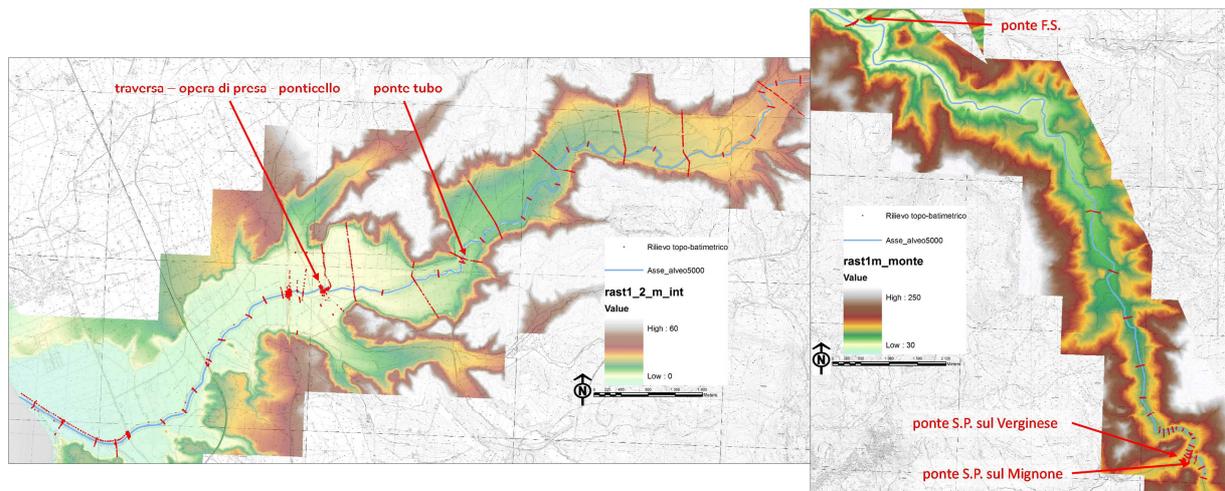


Figura 1.4. Nuovo rilievo eseguito nell'ottobre – novembre 2013

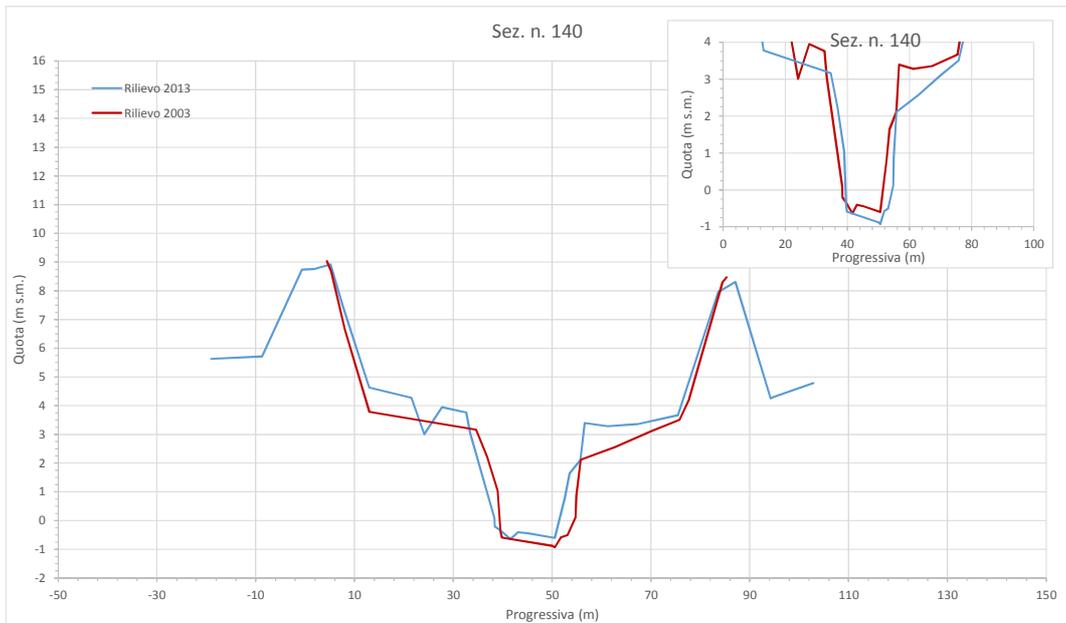
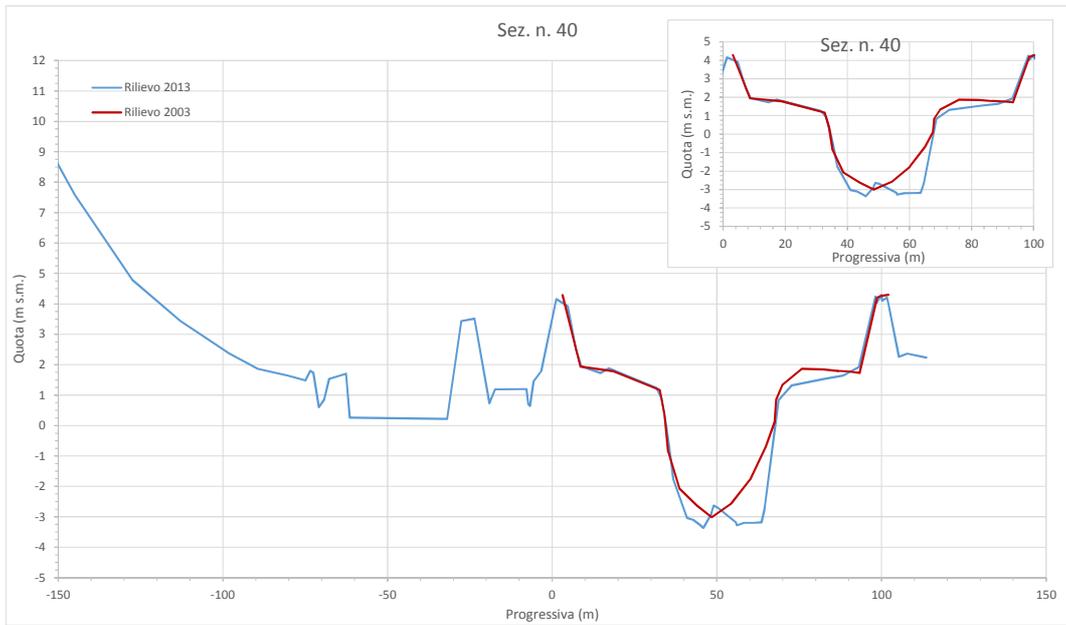


Figura 1.5. Confronti tra sezioni rilevate (rilievi 2003 e 2013)

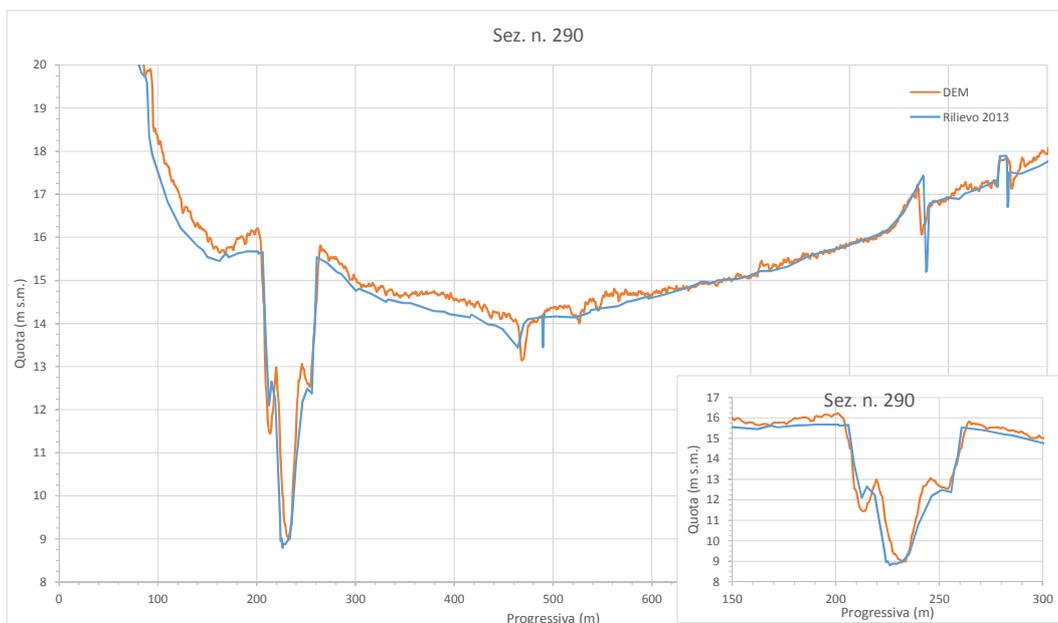
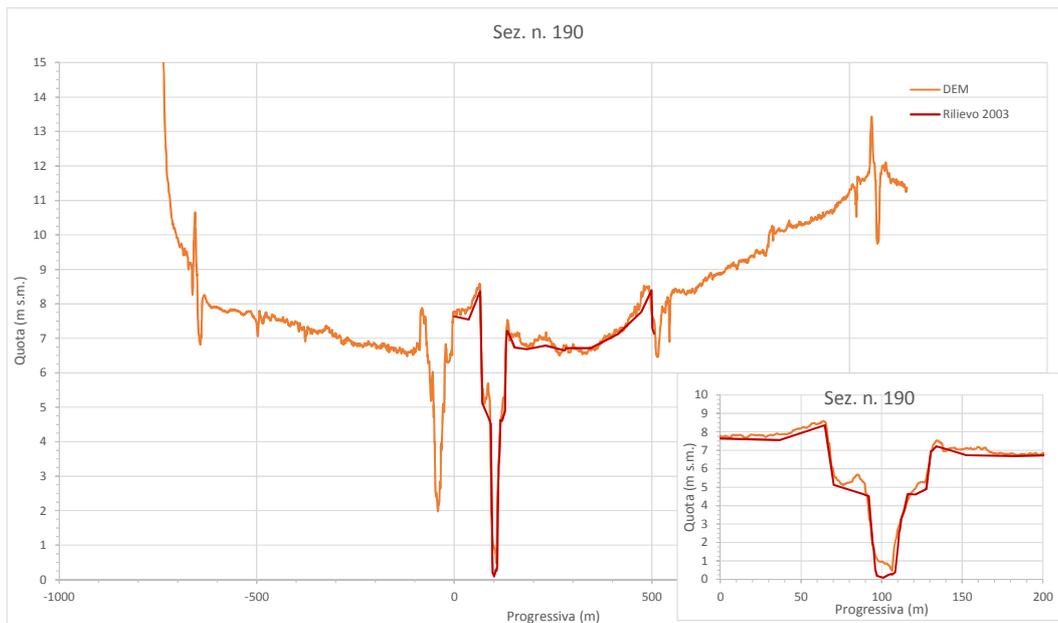


Figura 1.6. Confronti tra sezioni rilevate (rilievi 2003 e 2013) e DEM

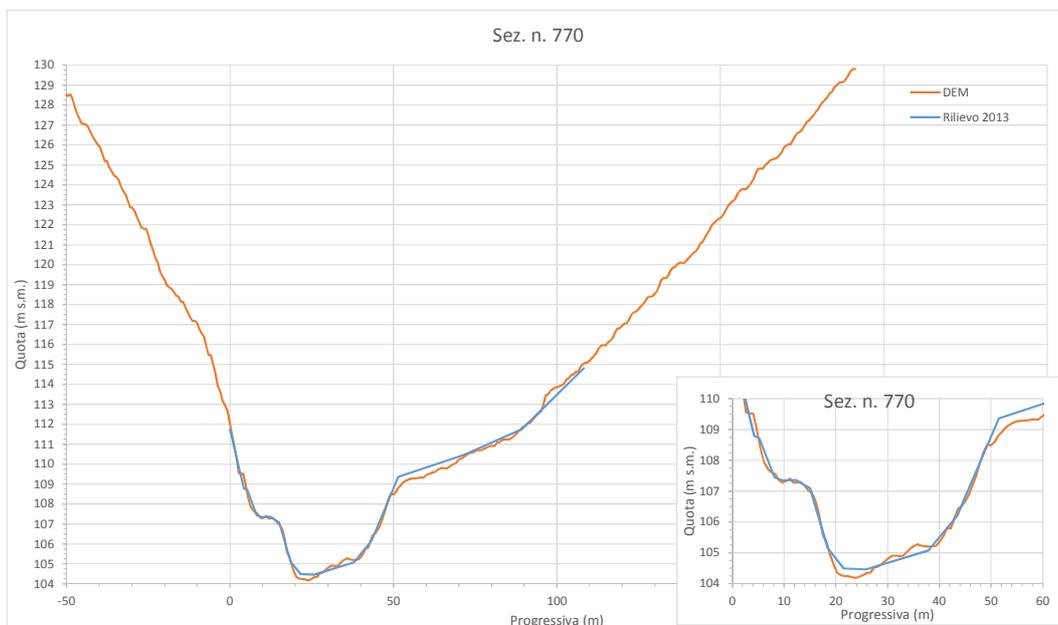
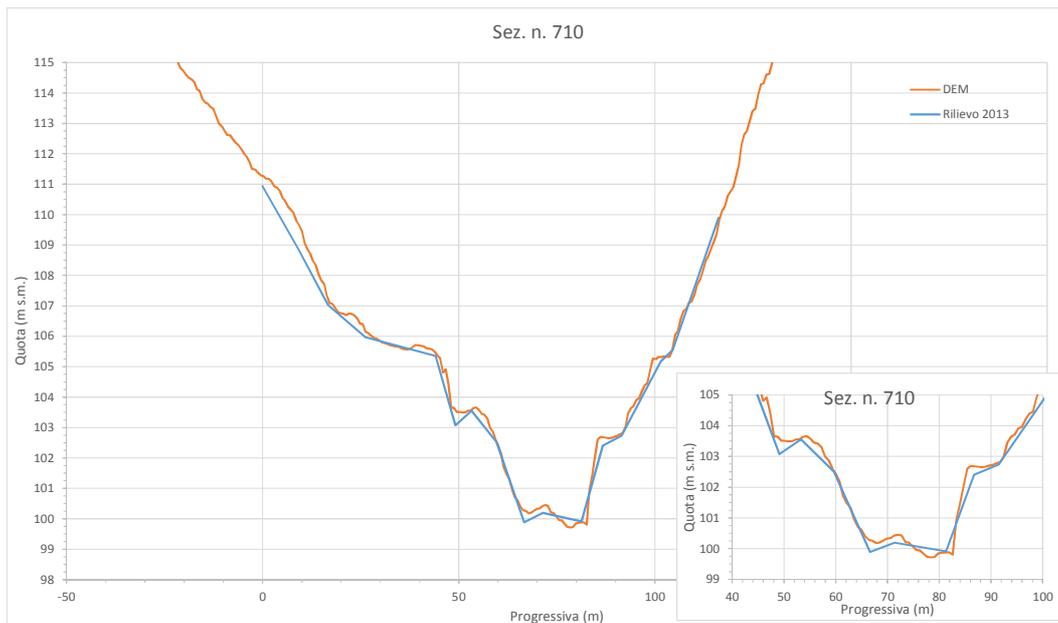


Figura 1.7. Confronti tra sezioni rilevate (rilievo 2013) e DEM

## capitolo secondo

# Modelli di moto permanente

## 1 Descrizione del modello

Per il modello monodimensionale a fondo fisso in moto permanente è stato usato il classico codice Hec-Ras versione 4.1.0 del gennaio 2010, descritto nell'appendice 1, che svolge l'integrazione numerica dell'equazione dei profili di corrente:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i_f - \frac{Q^2}{\chi^2 b^2 h^3}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g b^2 h^3}}$$

dove:

$x$  è l'ascissa lungo l'asse della corrente;

$g$  è l'accelerazione di gravità;

$\alpha$  è il coefficiente di Coriolis per l'energia;

$h$  è l'altezza idrica rispetto al fondo;

$Q$  è la portata;

$b$  è la larghezza della superficie libera;

$i_f$  è la pendenza del fondo;

$\chi$  è il coefficiente di Chezy, espresso dalla formula di Manning:

$$\chi = \frac{1}{n} R^{1/6},$$

con:

$R$  raggio idraulico;

$n$  indice di scabrezza.

## 2 Applicazione del modello al Mignone alla SS1 Aurelia

Come accennato nell'introduzione, il modello è stato tarato sulle misure di portata alla stazione idrometrografica del Mignone alla SS1 Aurelia, secondo quanto indicato nel punto 3 del capitolo 3 della *Relazione Idrologica*.

Lo zero dell'asta idrometrica presente sulla pila del ponte della SS1, rilevato nell'ambito della nuova campagna di rilievi realizzata (figura 2.1), è risultato a quota  $-0,157\text{ m s.m.}$

Sono stati assunti come parametri di taratura gli indici di scabrezza di Manning dell'alveo inciso e delle aree inondabili, ottenendo i seguenti valori:

nell'alveo ordinario:  $n = 0,037$ ,

nelle aree inondabili:  $n = 0,060$ ;

che sono sostanzialmente in linea con quelli ottenuti per le sezioni idrometrografiche dei corsi d'acqua del bacino del Tevere da Bencivenga e al. (2001), e dei corsi d'acqua statunitensi da Ven Te Chow (1986), e dal Corpo Geologico degli Stati Uniti (1989).

Per la realizzazione del modello si sono utilizzate, sia le sezioni idrauliche realizzate con il nuovo rilievo, sia le sezioni realizzate dall'Autorità dei Bacini Regionali del Lazio (rilievo PAI del 2003). La geometria del modello è rappresentata nella figura 2.2.

Il modello è stato usato per la ricostruzione della scala di deflusso alla SS1, tracciando i profili di corrente per portate variabili da  $1$  a  $1500\text{ m}^3/\text{s}$ . Come condizione al contorno di valle è stato imposto un sovrizzo di tempesta pari a  $0,75\text{ m s.m.}$  I profili di corrente sono rappresentati nella figura 2.3.



Figura 2.1. Asta idrometrica del Mignone al ponte della SS1

La scala di deflusso è riportata nella figura 2.4. La scala di deflusso oltre i  $700 \text{ m}^3/\text{s}$  è stata tracciata nella figura con una linea tratteggiata, poiché oltre tale portata cominciano le tracimazioni delle arginature presenti a valle dell'Aurelia e la scala di deflusso diventa aleatoria. La parte a tratteggio della scala di deflusso è stata ottenuta nell'ipotesi di arginature non tracimabili, elevando fittiziamente le sommità arginali nel modello idraulico per impedirne la tracimazione, come indicato nell'esempio di figura 2.5.

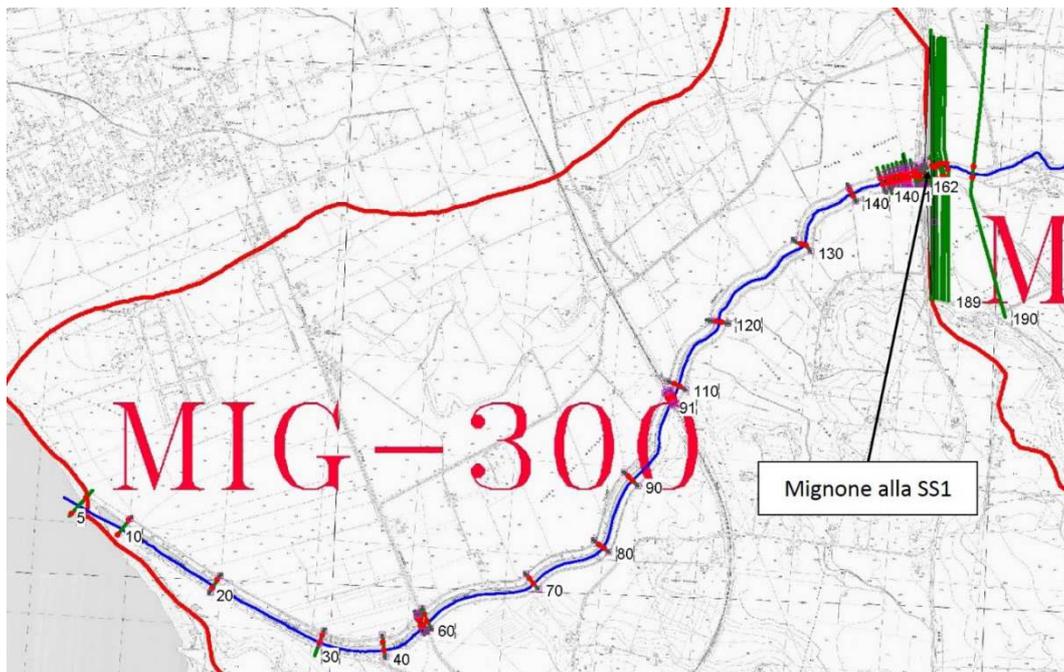


Figura 2.2. Geometria del modello (Scala di deflusso del Mignone al ponte della SS1)

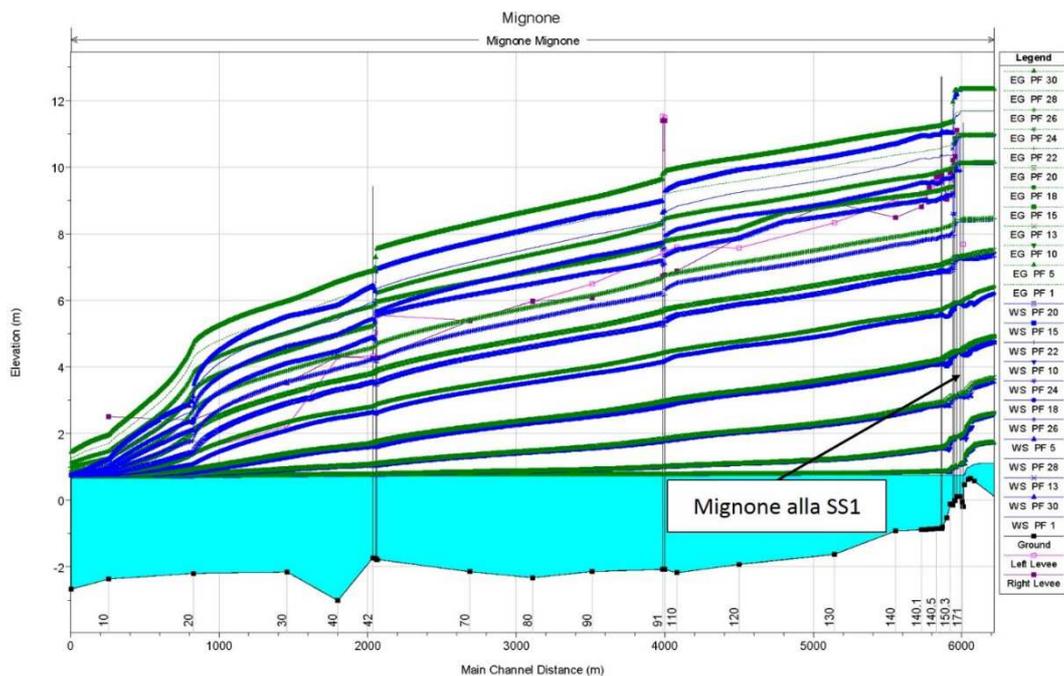


Figura 2.3. Profili di corrente (Scala di deflusso del Mignone al ponte della SS1)

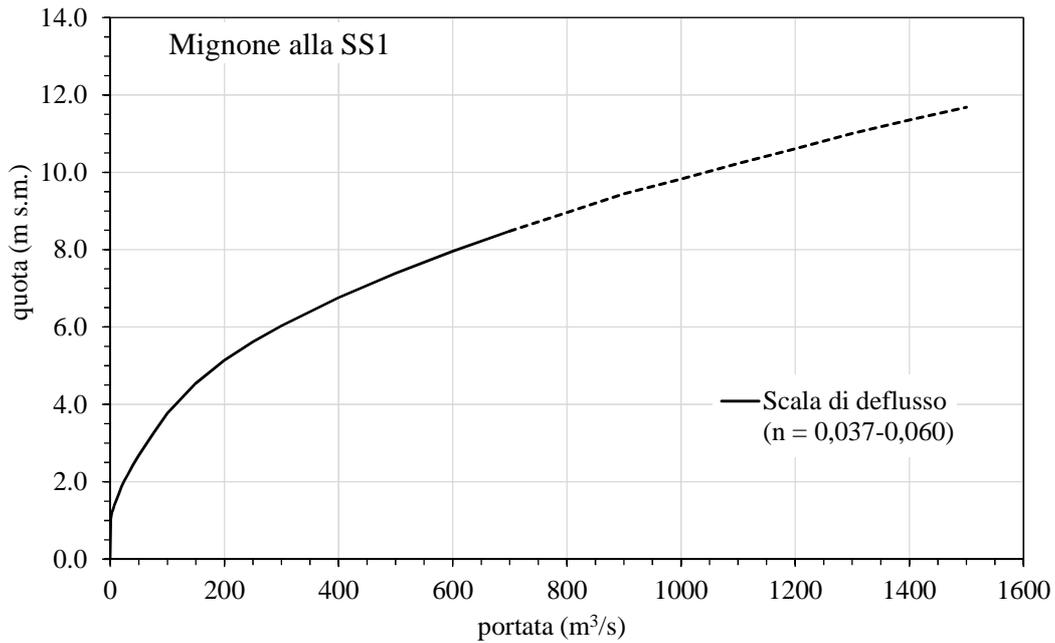


Figura 2.4. Scala di deflusso del Mignone al ponte della SS1 Aurelia

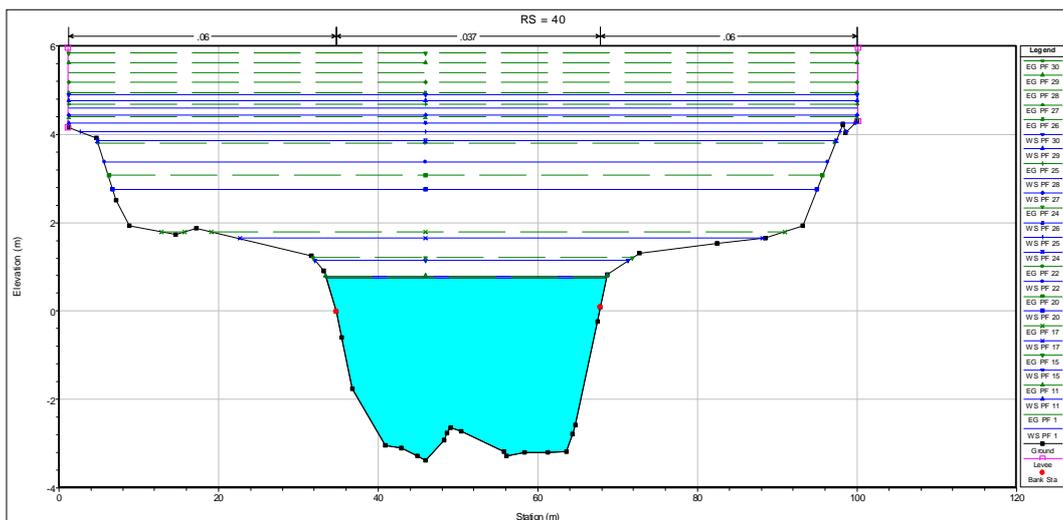


Figura 2.5. Esempio di modellazione con tracimazione arginale impedita (sez. n. 40)

### 3 Applicazione del modello al Mignone a Rota

Come indicato nel punto 2 del capitolo 3 della *Relazione Idrologica* la sezione idrometrografica di Rota era originariamente situata in una stretta ripida

gola del Fiume Mignone a valle della confluenza del Fosso Verginese (sezione di Rota teleferica), mentre recentemente (2012) le misurazioni di livelli idrometrici avvengono al ponte di Rota sul Mignone, ubicato immediatamente a monte del Fosso Verginese, dove si apre una piccola valle sub-pianeggiante.

Gli zeri delle aste idrometriche di Rota teleferica di Rota sul Mignone, rilevati nell'ambito della nuova campagna di rilievi realizzata (figure 2.6 e 2.7), sono risultati rispettivamente alle quote di  $102,347$  e  $105,815$  m s.m.

La geometria del modello è rappresentata nella figura 2.8. Per tutte e due le stazioni idrometrografiche si è utilizzato un unico modello di moto permanente, basato sul nuovo rilievo di sezioni topo-batimetriche realizzato nell'ottobre - novembre 2013, a partire (sez. 630) da circa quattro chilometri a valle della sezione idrometrografica di Rota teleferica (sez. 750) e fino a monte (sez. 830) del ponte di Rota sul Mignone (sez. 805).

Sono stati assunti come parametri di taratura gli indici di scabrezza di Manning dell'alveo inciso e delle zone inondabili, ottenendo i seguenti valori:

dalla sezione n. 630 alla sezione n. 760:

nell'alveo ordinario:  $n = 0,060$

nelle zone inondabili:  $n = 0,100$

dalla sezione n. 770 alla sezione n. 830:

nell'alveo ordinario:  $n = 0,035$

nelle zone inondabili:  $n = 0,080$

che sono sostanzialmente in linea con quelli di letteratura già citati precedentemente.



Figura 2.6. Aste idrometriche del Mignone a Rota teleferica



Figura 2.7. Aste idrometriche del Mignone ~~al ponte di Rota sul Mignone~~

Il modello è stato usato per la ricostruzione della scala di deflusso alle due sezioni idrometrografiche citate, tracciando i profili di corrente per portate variabili da  $1$  a  $800\text{ m}^3/\text{s}$ . Come condizione al contorno di valle è stato imposta condizione di moto uniforme. I profili di corrente sono rappresentati nella figura 2.9.

Le scale di deflusso ottenute sono illustrate nelle figure 2.10 e 2.11.

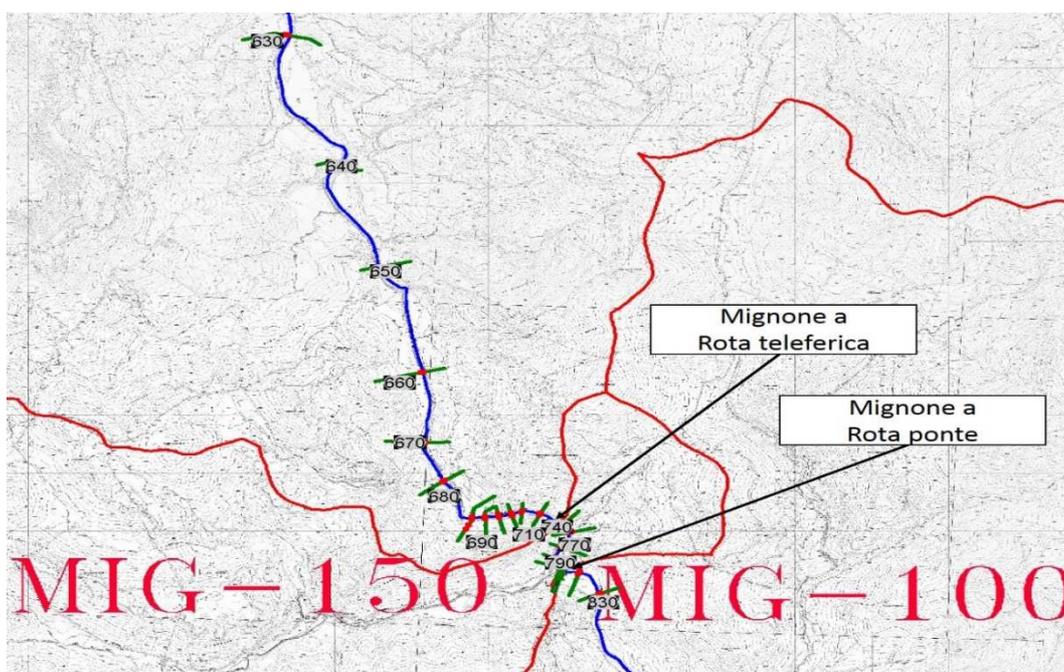


Figura 2.8. Geometria del modello (Scale di deflusso del Mignone Rota)

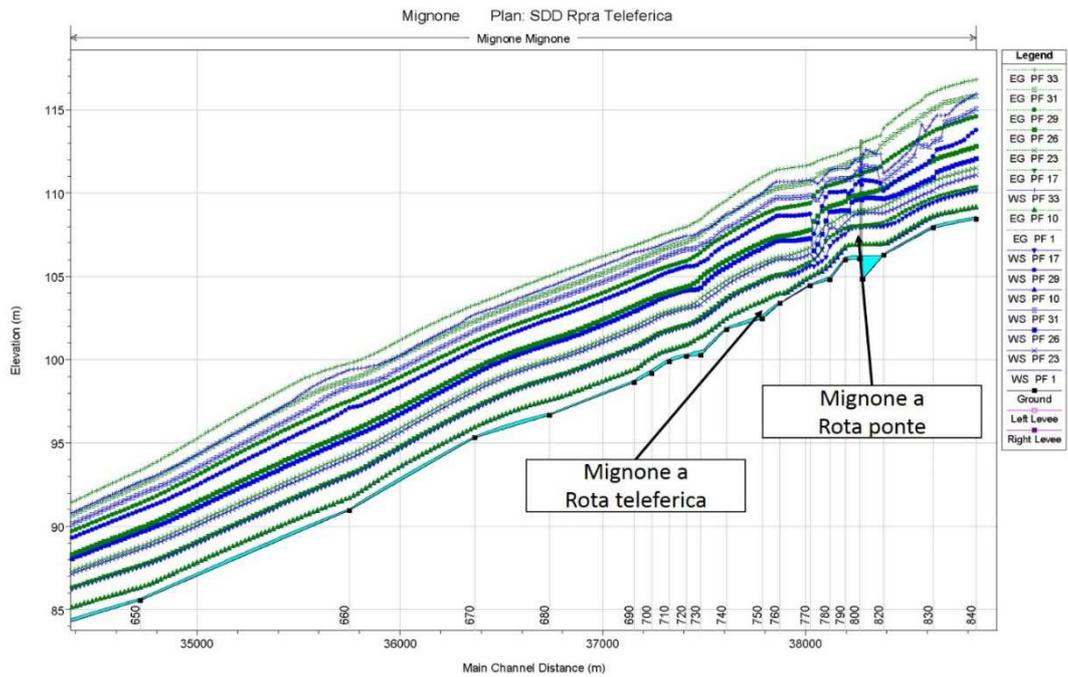


Figura 2.9. Profili di corrente (Scala di deflusso del Mignone a Rota)

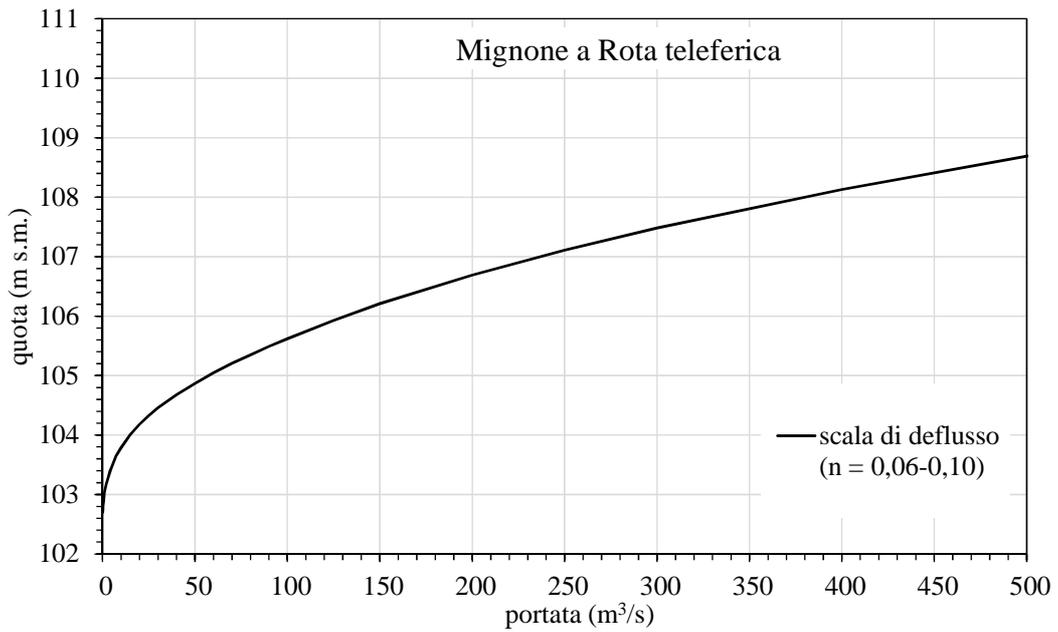


Figura 2.10. Scala di deflusso del Mignone a Rota teleferica

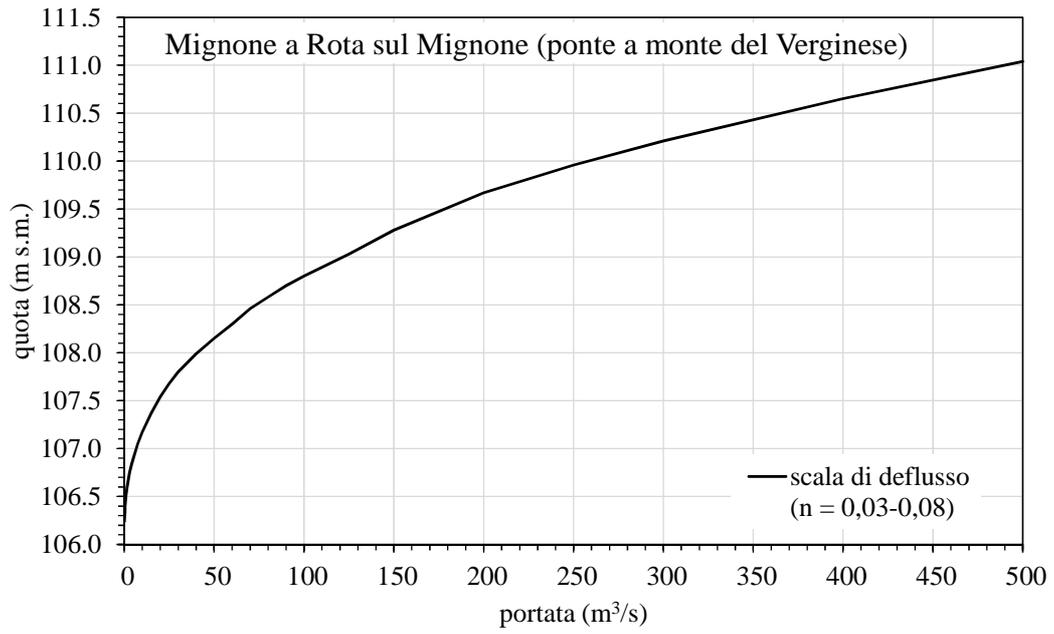


Figura 2.11. Scala di deflusso del Mignone al ponte di Rota

## capitolo terzo

### Modello di moto vario

#### 1 Descrizione del modello

Per il modello monodimensionale a fondo fisso in moto vario è stato usato il classico codice Hec-Ras versione 4.1.0 del gennaio 2010, descritto nell'appendice 2, che svolge l'integrazione numerica delle equazioni di de Saint Venant:

- l'equazione di continuità:

$$b \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0$$

- l'equazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2\beta Q}{\Omega} \frac{\partial Q}{\partial x} + \left( g\Omega - \frac{\beta b Q^2}{\Omega^2} \right) \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\beta Q^2}{\Omega^2} \left( \frac{\partial \Omega}{\partial x} \right)_h - g\Omega(i_f - J_r) - qv = 0$$

dove:

$t$  è il tempo

$\beta$  è il coefficiente di Coriolis per la quantità di moto

$\Omega$  è l'area della sezione bagnata

$J_r$  è la pendenza della linea dell'energia, ricavata dalla formula di Chezy

$q$  è la portata per unità di lunghezza dei contributi laterali

$v$  è la velocità dei contributi laterali

Il modello è stato utilizzato per simulare l'andamento dei livelli idrici per le onde di piene di progetto relative ai tempi di ritorno esaminati di 30, 50, 100, 200 e 500 anni. Le onde di progetto sono state determinate come mostrato nel capitolo 4 della *Relazione Idrologica*.

Per ogni bacino schematizzato (figura 1.1), gli idrogrammi di piena e le portate al colmo per i vari tempi di ritorno esaminati sono rappresentati nella figura 3.1.

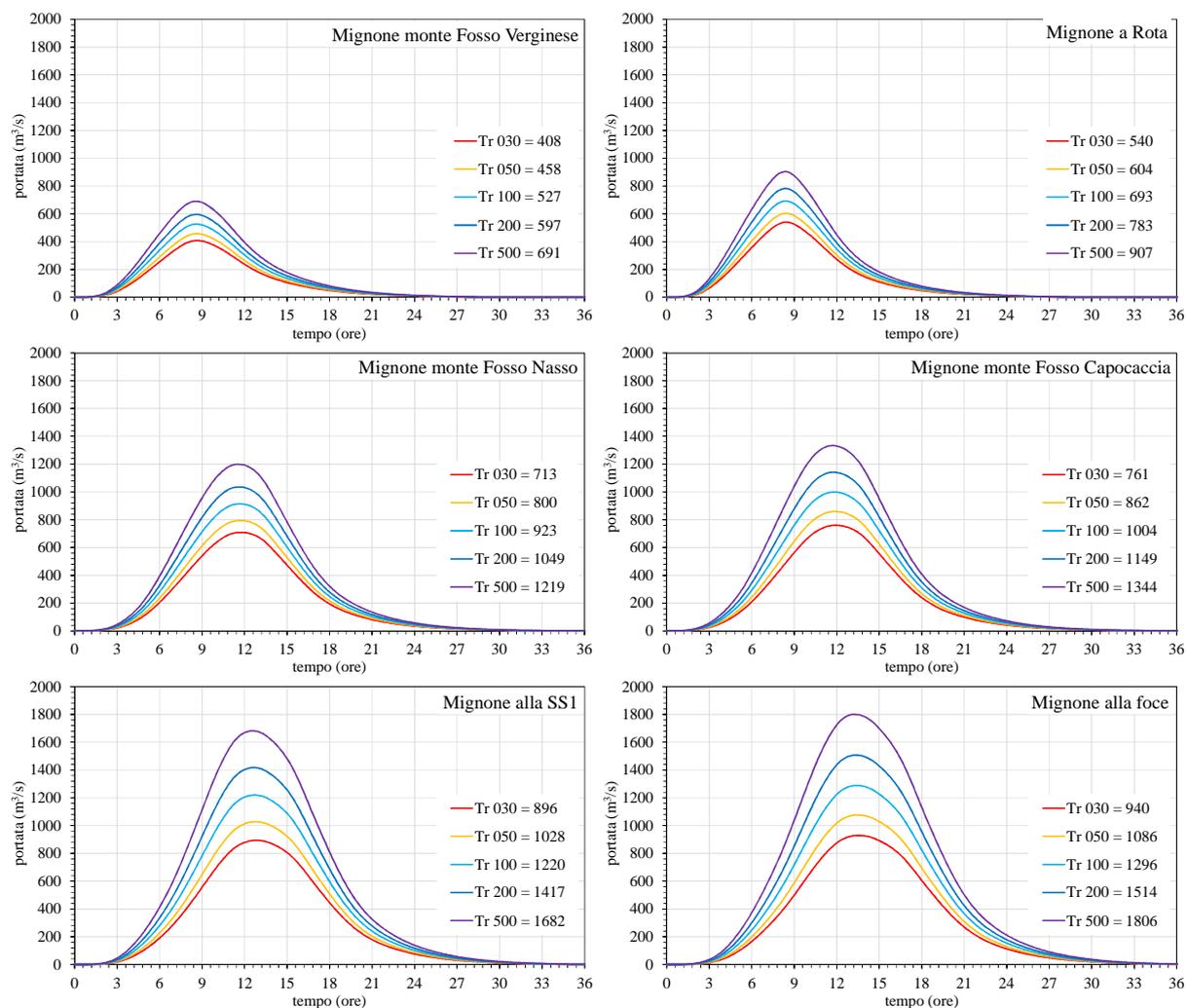


Figura 3.1 – Onde di piena critiche per assegnati tempi di ritorno nei diversi bacini esaminati del Mignone

## 2 Applicazione del modello alla valle del Mignone

La valutazione delle aree inondabili mediante modello numerico in moto vario pone alcuni problemi di carattere computazionale. In linea di principio, è possibile calcolare le aree d'inondazione mediante l'involuppo dei risultati delle varie simulazioni effettuando di volta in volta in ogni tratto

fluviale a monte di una sezione di interesse (sezione di chiusura dei bacini analizzati nel modello idrologico) il corrispondente idrogramma di piena, per assegnato tempo di ritorno. Oltre al notevole onere computazionale, derivante dall'elevato numero di simulazioni, la definizione dell'involuppo dei limiti delle aree inondabili non è immediata, e presenta notevoli problemi di carattere operativo, quali ad esempio la risoluzione di discontinuità nelle perimetrazioni. Si consideri, infatti, che così facendo, in corrispondenza di una sezione di interesse, le aree inondabili vengono tracciate due volte: una prima volta con l'onda di piena del bacino di monte (tratto a monte della sezione di interesse) e una seconda volta con l'onda di piena del bacino di valle (tratto a valle della sezione di interesse); con una conseguente discontinuità nei profili idrici e nei limiti delle aree inondabili.

L'approccio qui seguito è quello di svolgere una sola simulazione numerica per ciascun tempo di ritorno imponendo nelle sezioni d'interesse del modello idraulico (sezioni di chiusura dei bacini idrologici) la congruenza con gli idrogrammi di progetto determinati dallo studio idrologico. I passi della procedura possono essere sintetizzati come segue, procedendo da monte verso valle:

- 1 s'impone a monte del dominio di calcolo (prima sezione di monte del modello idraulico) l'idrogramma di progetto relativo alla prima sezione di interesse del primo bacino idrologico considerato;
- 2 in corrispondenza della sezione di interesse successiva, di valle, si determina l'idrogramma di progetto relativo al bacino idrologico corrispondente, inserendo nel modello idraulico un'ulteriore contributo di portata ottenuto dalla differenza tra l'idrogramma di progetto (modello idrologico) e l'idrogramma fornito dal modello idraulico nella sezione di interesse di valle, ottenuto quindi per trasferimento e laminazione dell'onda di progetto (modello idrologico) della sezione di interesse di monte, dalla sezione di interesse di monte alla sezione di interesse di valle. La sezione del modello idraulico in cui si inserisce il contributo di portata viene scelta opportunamente in corrispondenza della confluenza del principale tributario nel tratto in esame tra le due sezioni di interesse in considerazione. Se i tributari principali sono più di uno, si può opportunamente parzializzare il contributo precedentemente determinato, tenendo in conto il tempo di trasferimento dell'onda di piena dalla sezione dove confluisce un tributario e la sezione di interesse di valle; il tempo di trasferimento dell'onda di piena è fornito dal modello idraulico;
- 3 si procede in questa maniera fino alla sezione estrema di valle del dominio di calcolo del modello idraulico (sezione di chiusura del bacino idrologico complessivo), verificando a posteriori la congruenza tra gli

idrogrammi del modello idraulico nelle varie sezioni di interesse intermedie e gli idrogrammi di piena previsti dallo studio idrologico nelle stesse sezioni di interesse (idrogrammi di progetto), raffinando eventualmente la procedura per tentativi.

In questo modo è possibile svolgere un'unica simulazione per ciascun tempo di ritorno considerato, con un notevole risparmio in termini di calcolo. Inoltre, la perimetrazione delle aree inondate è univoca, poiché la continuità dei flussi idrici relativi allo stesso tempo di ritorno esclude apriori qualsiasi discontinuità nei profili idrici in corrispondenza delle sezioni di interesse.

## 3 Configurazioni del modello

L'infrastruttura viaria in progetto, di cui nella figura 3.2 si mostrano le quattro varianti alternative esaminate, interessa la valle del Fiume Mignone a partire dalla confluenza nel Mignone del Fosso Nasso e fino alla SS1 Aurelia. Come mostrato nella figura, tre delle quattro varianti si mantengono sempre in destra idrografica del fiume, mentre la terza prevede l'attraversamento del fiume in viadotto circa 3 km a monte della SS1 Aurelia. Nella figura, inoltre, si mostra come il fiume sia arginato, dalla sezione immediatamente a valle dell'Aurelia fino al mare.

### 3.1 Geometrie del modello della valle del Mignone

Il modello di moto vario monodimensionale è stato implementato con le sezioni idrauliche ottenute dal rilievo topo-batrimetrico realizzato nell'ottobre novembre 2013. Per infittire il numero di sezioni del modello, previo controllo della congruità delle quote altimetriche come mostrato precedentemente (paragrafo 4 del capitolo 1), tale rilievo è stato integrato:

- nel tratto da poco a monte del ponte della SS1 al mare, con il rilievo delle sezioni d'alveo eseguito dall'Autorità dei Bacini Regionali del Lazio nel 2003;
- nel tratto da poco a monte della confluenza nel Mignone del Fosso Nasso al ponte della SS1 Aurelia, sia con l'estensione delle sezioni nelle aree

inondabili, sia con l'integrazione di nuove sezioni intermedie. Tali integrazioni sono state eseguite tramite estrazione dei relativi punti quotati dal DEM a passo di 1 m;

- nel tratto da poco a monte della confluenza nel Mignone del Fosso Nasso a circa 4 km a valle della sezione idrometrografica del Mignone a Rota teleferica, con l'integrazione di nuove sezioni intermedie tramite estrazione dei relativi punti quotati dal DEM, con eccezione delle due sezioni immediatamente a monte e a valle del ponte della ferrovia Capranica-Civitavecchia, che sono state rilevate;
- nel tratto da circa 4 km a valle della sezione idrometrografica del Mignone a Rota teleferica e fino a monte della nuova sezione idrometrografica di Rota sul Mignone, con l'estensione delle sezioni nelle aree inondabili tramite estrazione dei relativi punti quotati dal DEM.

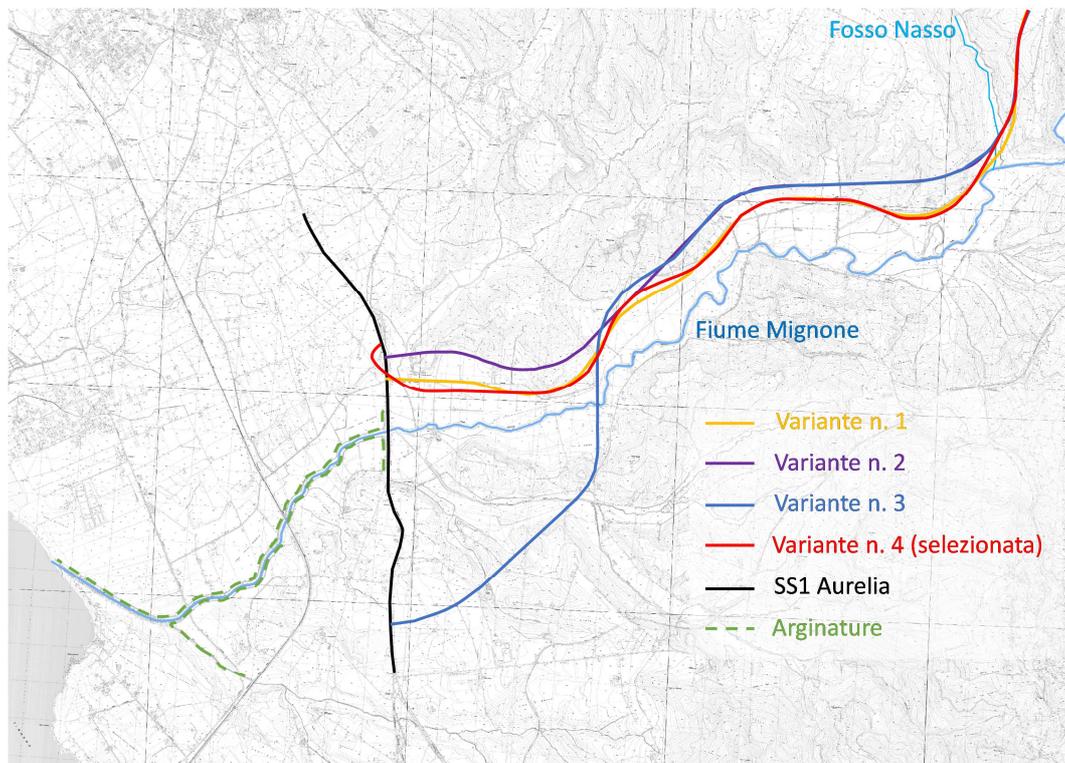


Figura 3.2. Infrastruttura stradale in progetto: varianti esaminate

Nella figura 3.3 si mostra questa prima geometria del modello di moto vario monodimensionale da cui si evince che a valle del ponte della SS1 Aurelia le sezioni idrauliche del modello riguardano esclusivamente l'alveo fluviale contenuto tra le arginature esistenti.

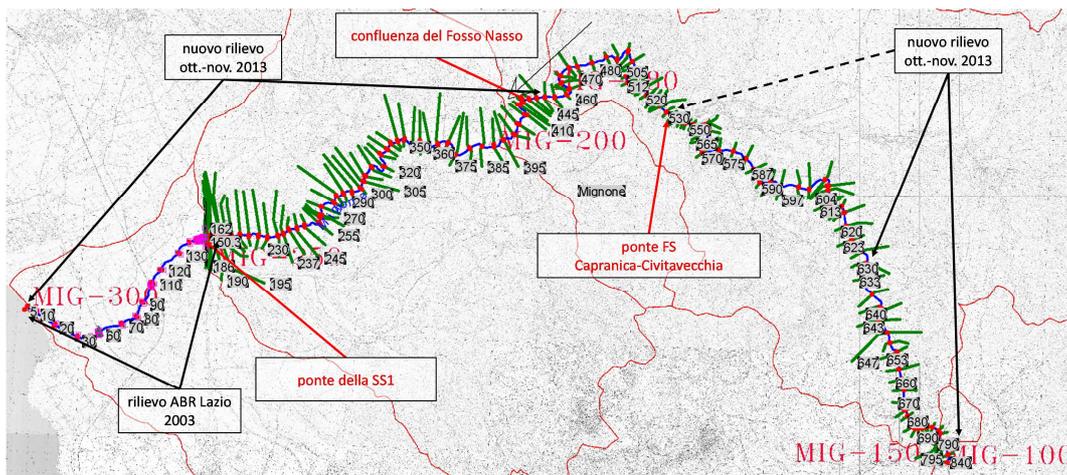


Figura 3.3. Geometria iniziale del modello di moto vario monodimensionale

### 3.1.1 Valle del Mignone a valle della SS1 Aurelia (modello Quasi 2D)

Come indicato precedentemente (paragrafo 2 del capitolo 2), le arginature del Mignone a valle dell'Aurelia vengono tracimate con piene a partire da circa  $700 \text{ m}^3/\text{s}$ , conseguentemente già la piena trentennale, che ha una portata al colmo di circa  $900 \text{ m}^3/\text{s}$  (figura 3.1), produrrebbe la tracimazione degli argini esistenti.

Per valutare le interferenze dell'opera in progetto con le dinamiche di piena del fiume immediatamente a monte della SS1, in cui i livelli e le velocità sono fortemente influenzati dalle condizioni idrodinamiche che si instaurano a valle della SS1, si è ritenuto necessario valutare l'effetto delle tracimazioni arginali e la conseguente apertura di brecce per crollo degli argini erodibili. Tale valutazione è stata eseguita tramite una modellazione *Quasi 2D* in cui a valle del ponte della SS1 Aurelia sono stati schematizzati tre alvei sub-parallelari composti da un *canale principale centrale*, costituito dall'alveo ordinario e di piena fino alle sommità arginali, e da due *canali secondari laterali*, costituiti dalle aree retrostanti le arginature in destra e sinistra idraulica, eventualmente inondabili per sormonto e crollo arginale. Le sezioni idrauliche dei *canali laterali* sono state estratte dal DEM.

I tre alvei schematizzati, mostrati nella figura 3.4, possono scambiare tra di loro portata tramite sfioratori laterali che rappresentano l'andamento dalle sommità arginali. Negli sfioratori laterali il modello idraulico è in grado di simulare l'eventuale apertura di brecce causata dai sormonti arginali.

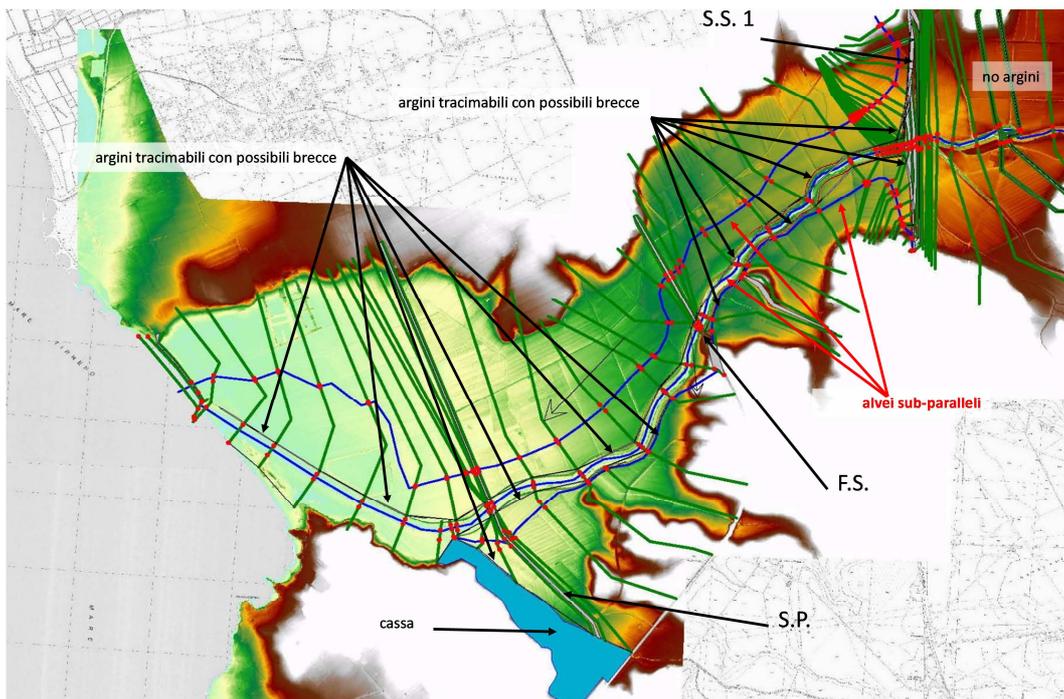


Figura 3.4. Geometria finale del modello di moto vario monodimensionale (zona SS1 – foce)

Nella figura 3.5 si riporta, a partire da poco a monte della SS1 Aurelia e fino alla foce, il profilo del fondo dell’alveo del Fiume Mignone, delle quote minime delle aree retrostanti le arginature e del coronamento arginale.

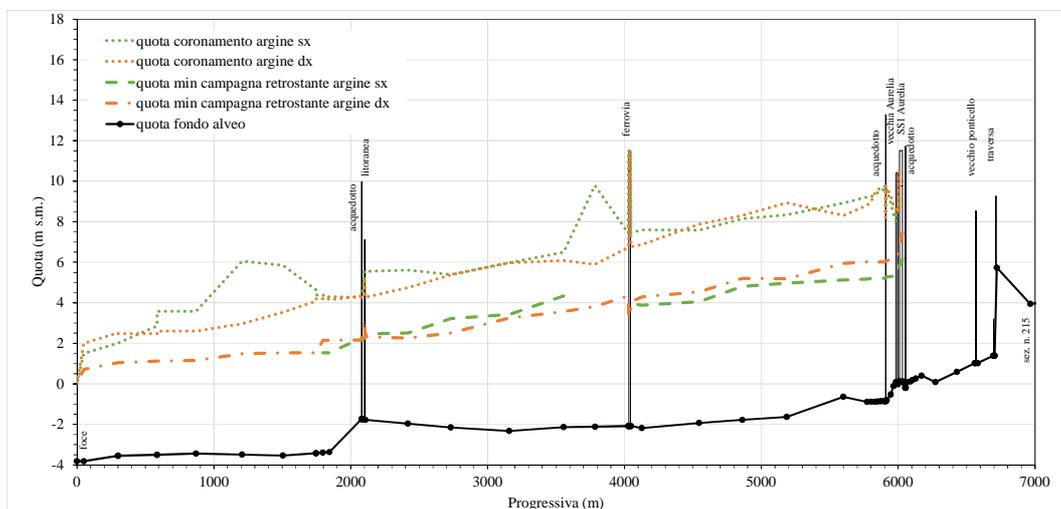


Figura 3.5. Profili del fondo alveo, del fondo delle aree inondabili e dei coronamenti arginali

A valle dell’attraversamento dell’Aurelia, costituito dai ponti dell’attuale SS1 e della vecchia Aurelia, sono presenti quattro attraversamenti del Fiume Mignone:

- due ponti tubo acquedottistici, che interessano solamente l’alveo arginato;

- la ferrovia Roma – Pisa (figura 3.6) che attraversa la valle in rilevato, dove in sinistra idraulica è presente una discontinuità tra le aree eventualmente inondabili a monte e a valle della ferrovia stessa, causata dalla presenza di un rilievo naturale in cui si innestano le arginature esistenti, mentre in destra idraulica le aree eventualmente inondabili a monte e a valle della ferrovia sono connesse tramite due tombini, di cui uno relativo al sottopasso ferroviario della S.P. n. 97;

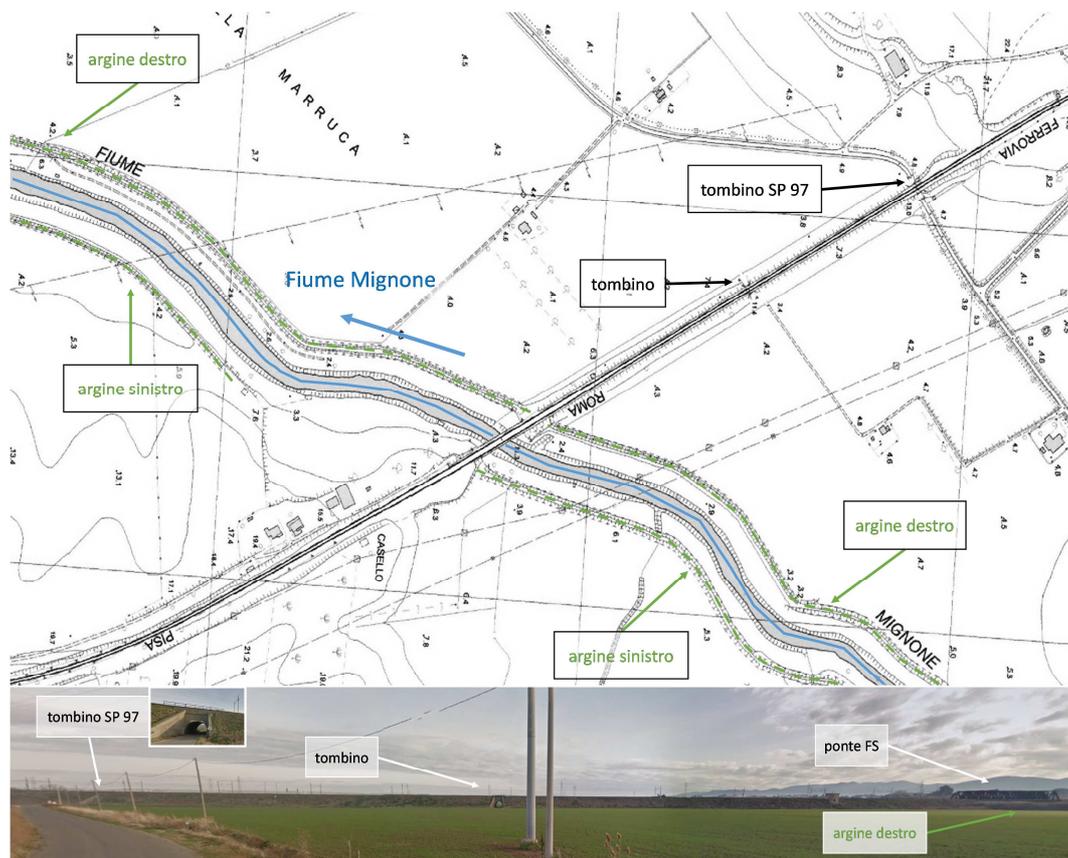


Figura 3.6. Ferrovia Roma – Pisa: attraversamento della valle del Mignone

- la litoranea S.P. n. 45 (figura 3.7), che attraversa la valle del Mignone con quote della livelletta stradale leggermente superiori al piano campagna.

Poco a valle dell'attraversamento della S.P. n. 45, in sinistra idraulica l'argine del Mignone abbandona il fiume e con continuità risale lungo la destra idraulica di un fosso affluente (figura 3.7), denominato Fosso della Vite. Per simulare l'allagamento da parte del Fiume Mignone delle aree di pertinenza di questo fosso, che può avvenire o per rigurgito da valle causato dall'innalzamento dei livelli di piena nel Mignone o per tracimazione delle arginature, nel modello idraulico è stata schematizzata una *cassa*, che rappresenta un'area di accumulo idrostatico (riportata in colore azzurro nella figura 3.4), che può scambiare portata, sia con il Mignone, sia con le aree retrostanti l'arginatura destra del fosso stesso (si consideri che tali aree sono

anche difese dall'arginatura in sinistra idraulica del Mignone, come mostrato nella figura 3.7). Lo scambio di portata può avvenire, sia con il fiume, tramite uno sfioratore che rappresenta la sezione idraulica del fosso alla sua confluenza nel fiume, sia con le aree retrostanti l'arginatura destra del fosso, tramite sfioratori che rappresentano l'andamento delle arginature stesse, in cui possono aprirsi brecce in caso di tracimazione. La curva d'invaso della cassa è stata ricavata direttamente dal DEM.

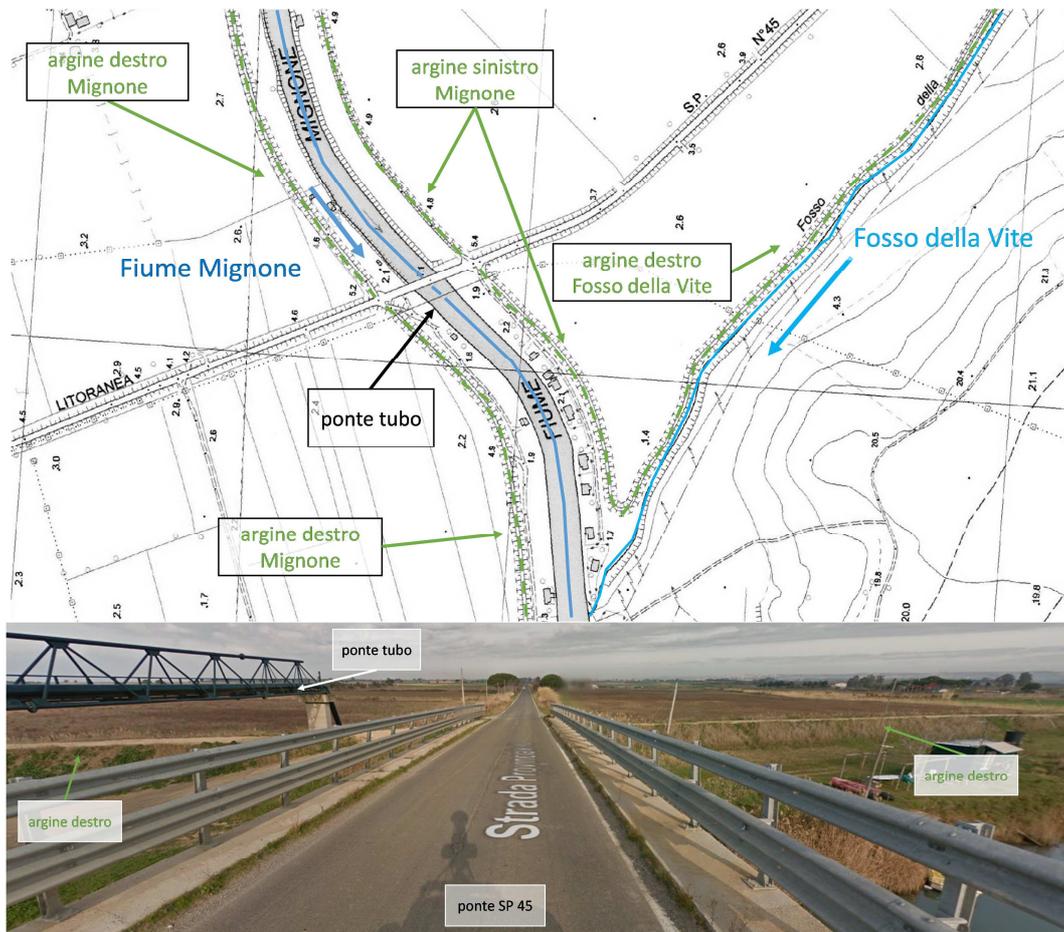


Figura 3.7. Litoranea S.P. n. 45: attraversamento della valle del Mignone

In corrispondenza dell'attraversamento dell'Aurelia sul Mignone sono attualmente presenti due ponti stradali, mostrati nella figura 3.8. Il ponte dell'attuale strada statale è ubicato immediatamente a monte di quello della vecchia Aurelia, che è attualmente dismessa. L'attuale accesso ai due ponti (figura 3.9) è costituito da un unico rilevato stradale che attraversando la valle determina due corde molli con quote estradosso inferiori di circa 3 m rispetto all'estradosso dell'attuale ponte stradale. Anche il vecchio ponte presenta una quota dell'estradosso inferiore di circa 1 m rispetto a quella dell'attuale attraversamento.

Nel modello idraulico le aree inondabili a monte dei due ponti (dove non sono presenti arginature) sono collegate alle aree eventualmente inondabili a valle

dei ponti e a tergo delle arginature tramite sfioratori che rappresentano l'andamento delle quote stradali dei rilevati dell'Aurelia stessa. Le portate sfiorate per tracimazione del rilevato stradale, quindi, possono bypassare il *canale centrale* andando ad allagare direttamente le aree eventualmente inondabili a tergo delle arginature (figure 3.4 e 3.8). Per ovvie ragioni nella modellazione degli sfioratori che rappresentano l'andamento della livelletta dei rilevati dell'Aurelia è stata inibita la formazione di brecce.

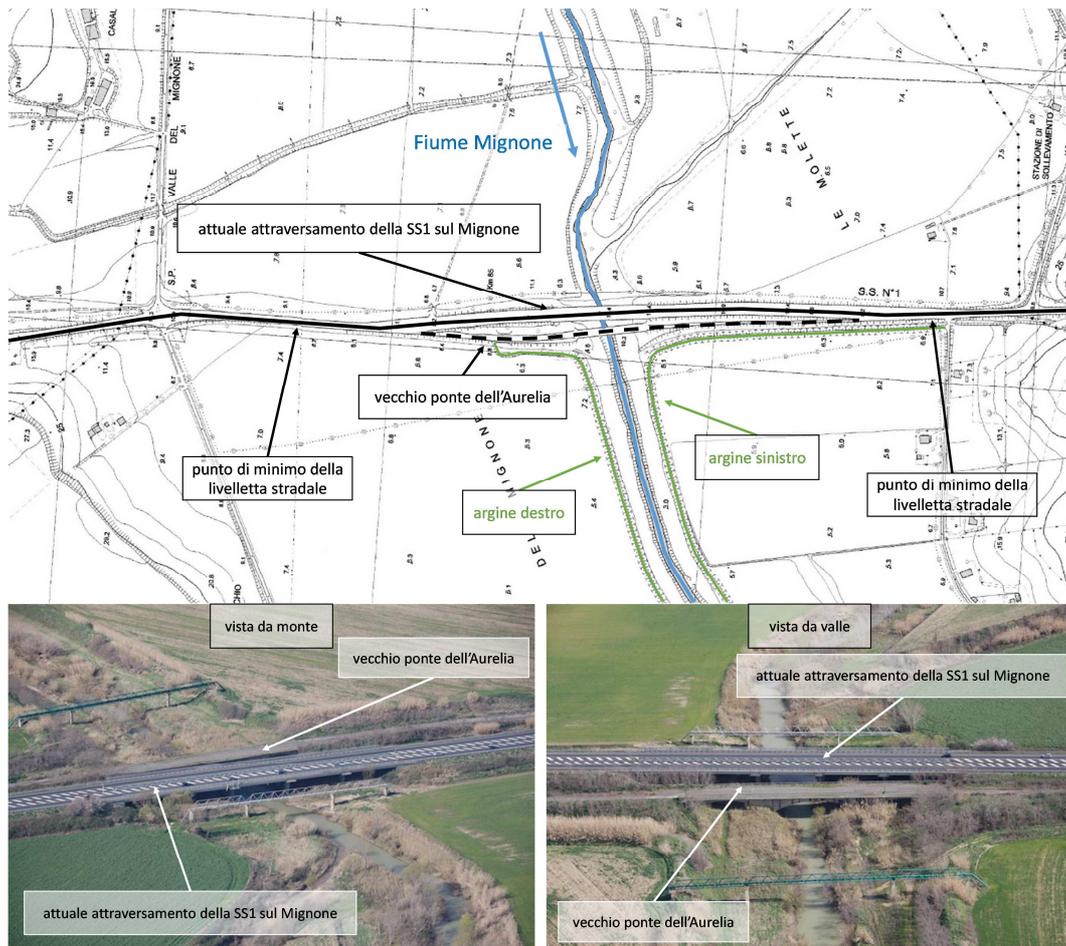


Figura 3.8. Attraversamento della SS1 Aurelia della valle del Mignone

### 3.1.2 Effetti della rimozione del vecchio ponte dell'Aurelia

Come mostrato nella figura 3.8, il vecchio ponte è costituito da tre arcate di cui la principale (centrale) in alveo e le secondarie (laterali) nelle golene di piena. Il vecchio ponte, possedendo una sezione idraulica decisamente inferiore a quella dell'attuale ponte stradale, costituisce un ostacolo al deflusso di piena del fiume. Questa ostruzione genera un rigurgito che si propaga a monte dell'attuale ponte stradale, dove il Mignone può allagare l'ampia vallata. Conseguentemente, l'incremento dell'inondazione a monte produce una laminazione delle piene del fiume a valle dell'attraversamento.

Per valutare gli effetti indotti a monte e a valle dell'attraversamento di una eventuale rimozione del vecchio ponte dell'Aurelia, tutte le simulazioni idrauliche sono state svolte in due distinte configurazioni geometriche del modello idraulico che prevedono, sia la presenza, sia la rimozione del ponte.

### 3.1.3 Nuovo tracciato autostradale

In corrispondenza dell'attraversamento dell'Aurelia sul Mignone è previsto che l'attuale tracciato stradale venga adeguato alla nuova autostrada Civitavecchia - Livorno. Tale adeguamento prevede, sia un innalzamento della livelletta stradale lungo i rilevati di accesso al ponte attuale, che si manterrebbe all'incirca all'attuale estradosso, sia la realizzazione di tre tombini, di cui due stradali e uno idraulico, ubicati alle estremità della valle del Mignone.

Nella figura 3.9 si riporta il profilo dell'adeguamento dell'attraversamento del Mignone al nuovo tracciato autostradale.

Per valutare gli effetti dell'adeguamento dell'attuale ponte stradale alla nuova autostrada prevista, tutte le simulazioni idrauliche sono state svolte anche nella configurazione geometrica del modello idraulico che prevede l'inserimento del nuovo attraversamento autostradale.

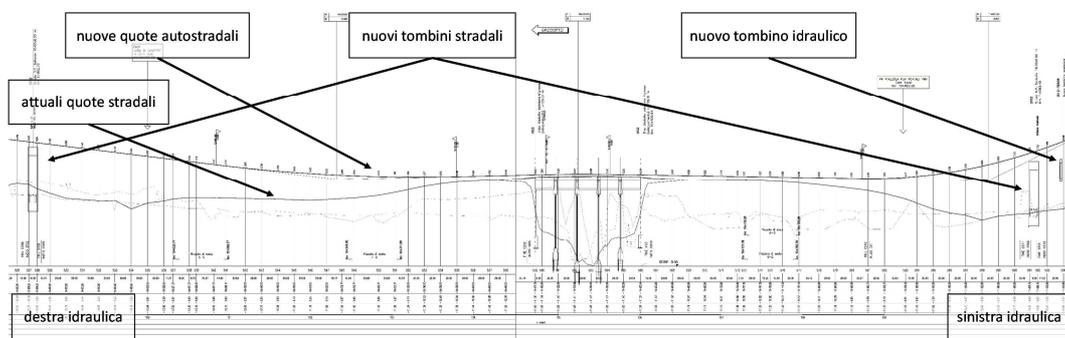


Figura 3.9. Nuovo attraversamento autostradale della valle del Mignone

## 3.2 Schematizzazione delle dinamiche di apertura delle breccie arginali

I parametri necessari alla schematizzazione delle breccie ne descrivono la forma, la larghezza e l'evoluzione temporale.

L'evoluzione temporale di una breccia in un rilevato omogeneo sottoposto a tracimazione risulta sempre di difficile valutazione. La varietà e complessità dei fenomeni fisici coinvolti non consente una determinazione accurata delle dinamiche evolutive. Inoltre, queste sono spesso determinate da fattori

difficilmente valutabili, dipendenti dalla disomogeneità della geometria e delle caratteristiche meccaniche del rilevato. Per questi motivi è arduo determinare in maniera certa l'idrogramma di piena in uscita da una breccia, e l'analisi del fenomeno deve necessariamente essere guidata da principi di cautela.

L'evoluzione della breccia rappresenta, dunque, il fenomeno di maggiore incertezza nella stima della portata uscente dal corso d'acqua. La maggior parte degli approcci seguiti si basa sull'analisi di crolli storici di dighe in materiali sciolti (Wahl, 1998). Questo tipo di analisi si fonda sull'elaborazione di alcune grandezze rappresentative del fenomeno, quali la profondità ed estensione finali della breccia e il tempo necessario per la sua completa formazione. Sebbene affette da incertezza, queste grandezze possono dare una prima indicazione riguardo le dinamiche evolutive del crollo arginale. Tra le varie formule disponibili in letteratura, si è scelto di utilizzare le formule di *MacDonald e Langridge-Monopolis* (1984) e di *Froelich* (1995), che sono basate su un maggiore numero di osservazioni. Queste formule consentono di stimare i parametri più significativi per la caratterizzazione del fenomeno, cioè la larghezza finale della breccia ed il suo tempo di formazione.

Le due formule utilizzate hanno le seguenti espressioni:

$$\text{- MacDonald} \quad V_{er} = 0.0261 \cdot (V_{out} \cdot h_w)^{0.769} \quad (\text{m}^3) \quad (3.10)$$

$$t_f = 0.0179 \cdot V_{er}^{0.364} \cdot 60 \quad (\text{min}) \quad (3.11)$$

$$\text{- Froelich} \quad B = 0.1803 \cdot K_o \cdot V_w^{0.32} \cdot h_b^{0.19} \quad (\text{m}) \quad (3.12)$$

$$t_f = 0.00254 \cdot V_w^{0.53} \cdot h_b^{-0.9} \cdot 60 \quad (\text{min}) \quad (3.13)$$

Nelle formule compaiono le seguenti grandezze:

$V_w$  volume d'acqua invasato

$V_{out}$  volume d'acqua transitato attraverso la breccia

$h_w$  altezza idrica immediatamente a monte dello sbarramento, misurata rispetto al fondo della breccia

$h_b$  altezza della breccia

Le grandezze restituite dalle formule sono:

$V_{er}$  volume di terreno dello sbarramento eroso nel corso dell'apertura della breccia,

$B$  larghezza della breccia,

$t_f$  tempo di formazione della breccia.

Il parametro  $K_0$  è uguale a  $1,4$  nel caso di crollo per tracimazione, mentre nel caso di sifonamento del rilevato arginale esso assume valore unitario. Si sottolinea che i parametri  $V_{er}$ ,  $B$  e  $t_f$  stimati mediante le (3.10 - 3.13) sono soggetti a notevoli errori, e sono talvolta espressi in termini di ordini di grandezza delle variabili medesime (Wahl, 1998). Di conseguenza, le formule di regressione devono essere utilizzate con estrema cautela.

Le formule sopra riportate sono basate sull'elaborazione statistica di dati osservati riguardanti un grande numero di crolli di sbarramenti artificiali in terra. L'applicabilità delle formule al caso del crollo di argini fluviali è giustificata dalla notevole corrispondenza tra i due fenomeni.

La quasi totalità delle formule presenti in letteratura, raggruppate e descritte efficacemente in Wahl (1998), scaturendo dall'analisi statistica di eventi accaduti, correlano grandezze proprie degli invasi artificiali, con i molti possibili parametri di apertura delle brecce. È stato quindi necessario determinare quali grandezze, in ambito fluviale, potessero essere meglio rappresentative di quelle messe in correlazione nelle formule. A partire dalle grandezze presenti nelle formule (3.20 - 3.23), sono quindi state fatte le seguenti ipotesi:

- 1 la breccia si apre per erosione progressiva innescata da sormonto arginale; il parametro  $K_0$  nella formula di MacDonald è quindi assunto pari a  $1,4$ ; si assume quindi in via preliminare che siano assenti fenomeni di sifonamento del rilevato arginale, che potrebbero essere innescati sia da elevati gradienti idraulici nella filtrazione che da fallanze presenti all'interno del corpo arginale,
- 2 sulla base della geometria degli argini nel tratto di corso d'acqua interessato dal presente studio, si sono assunte le seguenti dimensioni caratteristiche della sezione arginale: sezione uniforme, trapezoidale con base pari a  $10\text{ m}$ , coronamento pari a  $4\text{ m}$  e altezza media pari a  $2,5\text{ m}$ . Nella formula di MacDonald la lunghezza della breccia risulta quindi calcolabile come  $V_{er}/A$ , dove  $A$  è l'area della sezione del rilevato arginale pari a  $17,5\text{ m}^2$ ;
- 3 dalle osservazioni condotte su crolli di dighe in terra (Wahl, 1998), la breccia è solitamente di forma trapezoidale con pendenza dei versanti pari ad  $1:Z$  ( $h:v$ ), con  $Z$  variabile da  $1$  a  $3$ . Tuttavia, l'osservazione di brecce arginali in corsi d'acqua della stessa regione con caratteristiche idrologiche simili a quelle del Mignone, evidenzia come la pendenza delle brecce sia maggiore di quella indicata mediamente per le dighe in terra. In mancanza di ulteriori informazioni a riguardo si è ipotizzata una breccia trapezia con fondo coincidente con la quota golenale e  $Z$  pari a  $1$ ; questo, congiuntamente all'ipotesi (2), comporta che  $h_w = h_b = 2,5\text{ m}$  e  $V_{out}$  coincida con il volume  $V_w$ ;

- 4 tutte le brecce arginali che si formano nel corso d'acqua presentano le medesime caratteristiche morfologiche e la stessa dinamica di sviluppo;
- 5 la formazione della breccia avviene qualora il livello idrico, in ciascuno dei *canali* schematizzati, e nella *cassa* collegata al *canale principale*, superi la sommità arginale.

Risulta evidente dalle (3.10 - 3.13) che la dimensione media della breccia ed il suo tempo di formazione dipendono principalmente dal volume transitato attraverso la breccia ( $V_{out} = V_w$ ). Tale volume, insieme al numero complessivo delle brecce che si instaurano nel rilevato arginale, è a sua volta determinato dal volume di piena in ingresso in alveo, e quindi dal tempo di ritorno associato alla piena di progetto. In definitiva, le caratteristiche morfologico/dinamiche della breccia dipendono in linea di principio dal tempo di ritorno dell'evento considerato, imponendo una complessa differenziazione delle dinamiche di tracimazione per ciascun evento. Poiché il volume transitato nella breccia è incognito e dipende dalla evoluzione morfologica della breccia, la determinazione delle caratteristiche delle brecce risulta da un processo non-lineare, la cui soluzione richiede necessariamente un procedimento iterativo. Considerata la complessità dei calcoli richiesti nella determinazione delle caratteristiche delle brecce per ciascun tempo di ritorno, unitamente alla intrinseca incertezza dei risultati ottenuti dalle formule (3.10 - 3.13), si è necessariamente dovuto semplificare il problema adottando una coppia di parametri delle brecce uguale per tutti i tempi di ritorno. Procedendo secondo il principio di cautela, il set di parametri è stato ottenuto applicando il processo iterativo successivamente esposto al caso relativo al tempo di ritorno di *200 anni*.

Il procedimento è consistito nei seguenti passi. Si è ipotizzato un valore di tentativo per il volume medio transitante in tutte le brecce formatesi  $V_{out}$ , mediante il quale si ottengono dalle (3.10 - 3.13) due coppie di valori di primo tentativo per le grandezze  $B$  e  $t_f$ . Utilizzando tali valori nel modello idraulico si è ottenuto un nuovo valore per  $V_{out}$ . Si è proceduto, quindi, con una nuova valutazione dei parametri  $B$  e  $t_f$  fino a convergenza del processo iterativo. Quest'ultimo converge rapidamente (1-2 iterazioni), dimostrando la robustezza delle ipotesi adottate. I valori a convergenza per il tempo di ritorno di *200 anni* risultano essere i seguenti:

MacDonald:  $B = 100 \text{ m}$ ;  $t_f = 30 \text{ minuti}$ ,

Froelich:  $B = 20 \text{ m}$ ;  $t_f = 120 \text{ minuti}$ .

Dei quattro valori ottenuti, il valore di larghezza  $B$  dalla formula di MacDonald è stato determinato a posteriori, sulla base dell'osservazione di brecce occorse in eventi di piena simili in corsi d'acqua analoghi, tra cui anche il Mignone stesso (come mostrato successivamente). Si noti, inoltre, come la formula di MacDonald sia generalmente caratterizzata da un

maggiore intervallo di confidenza nella previsione rispetto ad altre formule (Wahl, 2001). L'elevato valore della ampiezza media della breccia ottenuto nella presente analisi conferma l'incertezza relativa alla formula di MacDonald. L'estrema incertezza nella valutazione dei parametri della breccia è anche dimostrata dalla disparità dei valori ottenuti dalle diverse formule. È da osservare che l'applicazione di altre formule empiriche fornisce risultati più simili a quelli di Froelich.

Per quanto riguarda il tempo di formazione della breccia, in presenza delle incertezze prima enunciate, si è ritenuto opportuno adottare un valore intermedio tra quelli forniti dalle formule di MacDonald e Froelich.

La scelta dei parametri morfologici della breccia è quindi caduta sulla seguente coppia di valori (sezione trapezia con pendenza dei versanti 1:1):

$$B = 40 \text{ m}; \quad t_f = 60 \text{ minuti},$$

che sono quelli adottati per le successive valutazioni delle simulazioni idrauliche eseguite.

## 4 Calibrazione del modello

Nel modello idraulico di moto vario, di cui nella figura 3.10 si riporta la geometria complessiva, sono state adottate le stesse scabrezze adottate nei modelli di moto permanente che, come mostrato precedentemente, sono state determinate tramite taratura dei modelli in corrispondenza delle sezioni idrometrografiche in cui sono state realizzate le misure di portata, con eccezione per la valle del Mignone da monte del ponte della SS1 e fino a poco a monte della confluenza del Fosso Nasso, interessata dall'infrastruttura viaria in oggetto, in cui si è adottata una scabrezza in alveo leggermente superiore a quella determinata per il tratto a valle del ponte della SS1. Tale maggiorazione della scabrezza è dovuta principalmente alla presenza in alveo di isolati alberi ad alto fusto, non presenti nel tratto di valle.

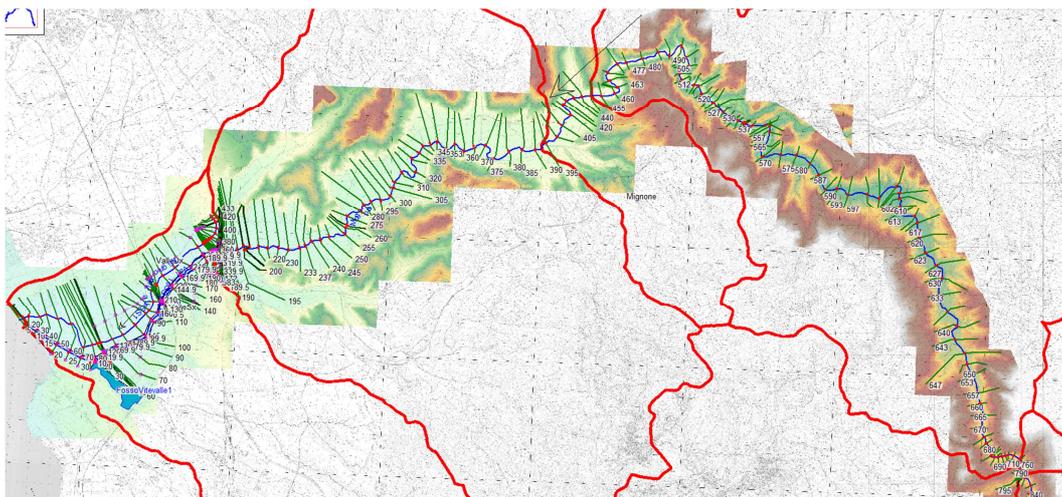


Figura 3.10. Geometria complessiva della valle del Mignone

In particolare si sono adottate le seguenti scabrezze:

nella valle del Mignone a monte della SS1 Aurelia:

- dalla sezione n. 830 alla sezione n. 770 (a monte del ponte di Rota sul Mignone):

nell'alveo ordinario:  $n = 0,035$ ,

nelle zone inondabili:  $n = 0,080$ ,

- dalla sezione n. 760 alla sezione n. 463 (a cavallo della stazione del Mignone a Rota, gole del Mignone):

nell'alveo ordinario:  $n = 0,060$ ,

nelle zone inondabili:  $n = 0,100$ ,

- dalla sezione n. 460 alla sezione n. 200 (a monte della SS1):

nell'alveo ordinario:  $n = 0,040$ ,

nelle zone inondabili:  $n = 0,060$ ,

- dalla sezione n. 190 alla sezione n. 170 (immediatamente a monte della SS1):

nell'alveo ordinario:  $n = 0,037$ ,

nelle zone inondabili:  $n = 0,060$ ;

nella valle del Mignone a valle della SS1 Aurelia:

- nel *canale principale centrale*, dalla sezione n. 162 alla sezione n. 10:

nell'alveo ordinario:  $n = 0,037$ ,

nelle zone golenali:  $n = 0,060$ ,

- nel *canale principale centrale*, dalla sezione n. 10 alla sezione n. 1 (zona di battigia focale):

nell'alveo ordinario:  $n = 0,020$ ,

- nelle zone golenali:  $n = 0,025$ ,
- nel *canale secondario destro*, dalla sezione n. 430 alla sezione n. 1:  
nell'intera sezione:  $n = 0,060$ ,
  - nel *canale secondario sinistro*, dalla sezione n. 380 alla sezione n. 1:  
nell'intera sezione:  $n = 0,060$ .

## 5 Condizioni al contorno e iniziali

Come mostrato nella *Relazione Idrologica* (paragrafo 1.4 del capitolo 5), la determinazione statistica di valori estremi del livello marino è stata realizzata sia con il modello di distribuzione di probabilità di Gumbel, sia con quello di Weibull. Pur mostrando, ambedue le distribuzioni, un buon adattamento al campione statistico disponibile, le stime sono affette da notevole incertezza, dato l'esiguo numero di eventi disponibile (23 eventi). Conseguentemente nelle elaborazioni idrauliche svolte si è deciso di adottare per le condizioni estreme il modello di Weibull in quanto comunemente utilizzato nell'analisi degli estremi ondametricki.

Nella tabella 3.1 si riportano le condizioni di valle imposte al modello idraulico al variare dei tempi di ritorno considerati.

Tabella 3.1 – Valori estremi del livello marino; distribuzione di probabilità di Weibull stimata mediante il metodo della massima verosimiglianza

Tr (anni)	Livello (Weibull) (cm s.m.)
30	65
50	68
100	72
200	75
500	79

Per assicurare stabilità al modello, sono state imposte le seguenti condizioni iniziali nella valle del Mignone a monte e a valle della SS1 Aurelia:

- una portata minima costante pari a 10 m<sup>3</sup>/s, che è ampiamente contenuta nell'alveo ordinario del fiume;
- nei canali secondari destro e sinistro, una portata minima costante pari a 100 l/s, tale da non generare alcun tipo di allagamento.

## capitolo quarto

### Scenari ante operam

#### 1 Scenari nelle condizioni ante operam

Il modello di moto vario descritto nel capitolo precedente è stato utilizzato nelle condizioni *ante operam* per simulare gli scenari successivamente illustrati.

##### 1.1 Scenari realizzati

Per valutare le interferenze dell'infrastruttura viaria in progetto sulle piene del Fiume Mignone nella valle a monte dell'attraversamento della SS1 Aurelia (situazione *post operam*), in cui i livelli e le velocità sono influenzati dalle condizioni idrodinamiche che si instaurano a valle della SS1, si sono analizzati diversi scenari *ante operam* che riguardano diverse schematizzazioni delle possibili configurazioni attuali e future delle valle del Mignone a partire dall'attraversamento della SS1 Aurelia e fino alla sua foce nel Mar Tirreno.

In particolare sono state svolte, per i tempi di ritorno di 30, 50, 100, 200 e 500 *anni*, le seguenti simulazioni:

- ad argini tracimabili e fusibili, in cui si possono aprire delle brecce-quando i livelli idrici raggiungono il coronamento arginale. In questa configurazione si sono simulate anche le possibili tracimazioni del rilevato di accesso all'attuale attraversamento della SS1, in cui sono state impedito le aperture di brecce per crollo, considerate, sia la larghezza del rilevato stradale, sia la presenza del manto stradale difficilmente erodibile. Nelle figure e tabelle successive queste 5 simulazioni sono state indicate sinteticamente con la sigla "**afus**" seguita dal relativo tempo di ritorno simulato: "**afusTr...**";
- ad argini tracimabili ma non erodibili, per valutare anche gli effetti a valle e a monte della SS1 di eventuali tracimazioni arginali che non provocano il crollo arginale. Anche in queste simulazioni i rilevati di accesso alla SS1 sono tracimabili ma non erodibili. Nelle figure e tabelle successive queste 5

simulazioni sono state indicate sinteticamente con la sigla “**anofus**” seguita dal relativo tempo di ritorno simulato: “**anofusTr...**”;

- ad argini non tracimabili, per valutare gli effetti a monte della SS1 di un eventuale adeguamento delle arginature del Mignone alle piene di progetto simulate. In queste simulazioni le quote del coronamento degli argini del Mignone, della livelletta stradale dei rilevati di accesso all’attraversamento della SS1 e dell’estradosso dell’attuale attraversamento stesso della SS1, sono state elevate fino ad impedire la tracimazione con le piene di progetto. Nelle figure e tabelle successive queste 5 simulazioni sono state indicate sinteticamente con la sigla “**anotra**” seguita dal relativo tempo di ritorno simulato: “**anotraTr...**”;

Per valutare l’effetto, a monte e a valle della SS1, dell’eventuale demolizione del vecchio ponte dell’Aurelia (come mostrato nel paragrafo 3.1 del capitolo 3), le precedenti 15 simulazioni sono state ripetute nelle rispettive configurazioni geometriche in cui è stato eliminato l’ingombro (incluse le spalle) del vecchio ponte dell’Aurelia. Nelle figure e tabelle successive queste ulteriori 15 simulazioni sono state indicate sinteticamente con le medesime sigle delle precedenti simulazioni, seguite dalla lettera “**N**”: “**afusTr...N**”, “**anofusTr...N**” e “**anotraTr...N**”.

Per valutare, infine, l’influenza dell’adeguamento ad autostrada dell’attuale attraversamento della SS1, le precedenti 30 simulazioni sono state ripetute nelle rispettive configurazioni geometriche in cui l’attuale attraversamento della SS1 (rilevati di accesso al ponte e ponte stesso) è stato sostituito con il nuovo attraversamento, come mostrato nel paragrafo 3.1 del capitolo 3. Nella configurazione con argini non tracimabili, invece, a differenza del caso con l’attraversamento attuale, si è mantenuto l’attraversamento autostradale che, come esposto successivamente viene tracimato per la portata maggiore, per verificare il possibile by-pass in caso di adeguamento delle arginature a valle della SS1, anche a causa della presenza dei tombini nel rilevato autostradale di accesso al ponte (figura 3.9). Nelle figure e tabelle successive queste ulteriori 30 simulazioni sono state indicate sinteticamente con le medesime sigle delle precedenti simulazioni, in cui la prima lettera “**a**” è stata sostituita con la lettera “**s**”: “**sfusTr...**”, “**snofusTr...**”, “**snotraTr...**” “**sfusTr...N**”, “**snofusTr...N**” e “**snotraTr...N**”.

Complessivamente, come precedentemente indicato, sono state svolte 60 simulazioni nei 12 distinti scenari descritti.

## 1.2 Sezioni di controllo

Al fine di confrontare le simulazioni idrauliche dei diversi scenari ipotizzati, si sono individuate 6 sezioni di controllo, riportate nella figura 4.1, che interessano i tre alvei schematizzati a valle dell'attraversamento della SS1 Aurelia.

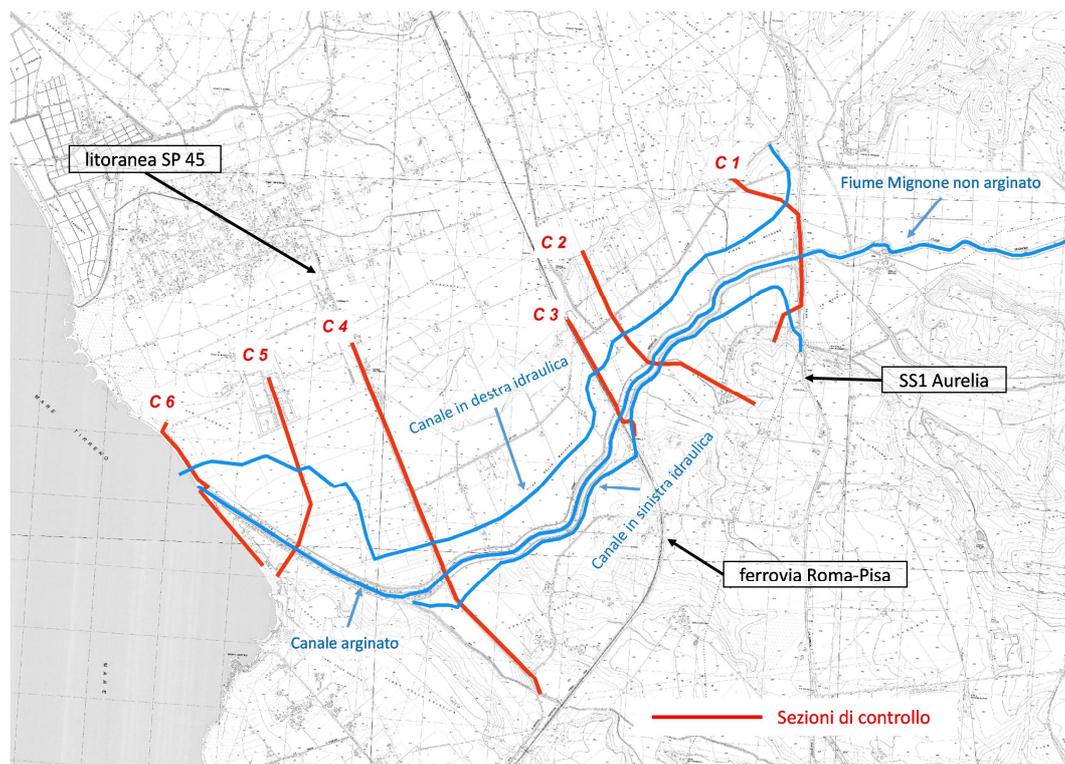


Figura 4.1. Sezioni di controllo lungo i tre alvei schematizzati a valle della SS1 Aurelia

Le sezioni di controllo sono ubicate:

- *sezione C1*: immediatamente a valle dell'attraversamento della SS1, in modo da controllare l'eventuale sfioro sui rilevati viari di accesso al ponte (canali secondari destro e sinistro) e la portata che transita nel canale principale centrale (alveo arginato);
- *sezione C2*: circa 500 m a monte del ponte ferroviario, in modo da controllare l'eventuale portata che transita nei canali secondari destro e sinistro e la portata complessiva che include il canale principale;
- *sezione C3*: immediatamente a monte del ponte ferroviario, in modo da controllare, sia la portata che transita nei due tombini del rilevato ferroviario in destra idraulica, sia la portata che transita nel ponte ferroviario (canale principale). La somma delle precedenti fornisce la portata complessiva in quanto il collegamento monte valle della ferrovia in sinistra idraulica, che nella situazione reale è impedito dalla presenza di un rilievo naturale (paragrafo 3.1 del capitolo 3), è stato schematizzato con