



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

**DICEA**  
DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA CIVILE  
E AMBIENTALE

Contratto con la Regione Toscana avente ad oggetto  
“Progetto di Approfondimento Conoscitivo per l’idrologia  
dei Bacini del Carrione e del Frigido”

Relazione su “Misure idrauliche e sedimentologiche sul Torrente  
Carrione”

*Firenze, Dicembre 2017*

## Indice

Premessa.....	3
1. Misura indiretta della portata liquida con il metodo 'slope-area'.....	4
1.2 Esempio del tratto attrezzato nel T. Vezza in Versilia .....	6
2. Implementazione nel bacino del Torrente Carrione.....	9
2.1 Tratto 1 - Ponte della Bugia.....	9
2.2 Tratto 2 - T. Colonnata .....	15
Bibliografia.....	15

## Premessa

Le misure idrauliche oggetto del presente contratto sono state progettate tenendo conto delle considerazioni di seguito elencate:

- 1) Le misure sono finalizzate alla calibrazione del modello Mobidic per accrescerne l'affidabilità della risposta in fase di previsione degli eventi di piena. Le misure devono pertanto essere acquisite in condizioni idrauliche significative;
- 2) Le caratteristiche del bacino (tra cui la superficie 57 km<sup>2</sup>) sono tali da generare eventi di piena di durata dell'ordine di poche ore. Ciò rende particolarmente incerta la possibilità di effettuare le misure durante la fase utile dell'evento di piena per i seguenti motivi:
  - a. incertezza nella previsione dell'evento ;
  - b. tempo di trasferimento della stazione mobile confrontabile con la durata dell'evento;
  - c. condizioni operative e accessibilità dei luoghi non ottimali.

Per quanto sopra si ritiene che, nel periodo contrattuale, sussista una elevata probabilità di non effettuare alcuna misura o comunque di acquisire dati scarsamente significativi.

Per la calibrazione dei modelli è infatti necessario disporre di un buon numero di dati che possono essere disponibili solo se si prevede una metodologia di misura in grado di far fronte ai tempi rapidi di formazione e propagazione degli eventi di piena.

Tra le diverse metodologie, si ritiene utile sperimentare il metodo "slope-area", già applicato con successo in un tratto attrezzato del Torrente Vezza (Alta Versilia), che prevede l'acquisizione simultanea ed in continuo dei livelli idrici in due o più sezioni di un tratto del corso d'acqua che manifesti caratteristiche accettabilmente uniformi di geometria, scabrezza, pendenza e portata. Dai dati rilevati è possibile risalire alla stima della portata liquida transitata con un'approssimazione tanto migliore quanto migliori sono le caratteristiche di uniformità del tratto considerato e la stima della relativa scabrezza. Si noti che questo metodo non richiede di effettuare le misure di velocità della corrente e pertanto consente di rilevare anche le portate più elevate di piena che invece possono presentare delle difficoltà di misura con i metodi tradizionali basati sull'impiego di un correntometro.

Nella presente relazione vengono descritte le attività di progettazione relative tratti in cui installare gli idrometri per effettuare il monitoraggio delle portate liquide con il metodo 'slope-area'. L'individuazione finale delle sezioni in cui installare gli idrometri sarà concordata con il CFR Toscana.

E' prevista inoltre una caratterizzazione del materiale presente in alveo mediante due rilievi sedimentologici, rappresentativi dei tratti in esame, dello strato superficiale e successiva analisi di laboratorio per l'individuazione delle curve granulometriche. Questi dati verranno impiegati per stimare la scabrezza del fondo alveo.

# 1. Misura indiretta della portata liquida con il metodo 'slope-area'

I metodi indiretti per la stima della portata liquida, a differenza dei metodi tradizionali, consentono di valutare in tempo reale il valore di questa grandezza senza la necessità di effettuare misure di velocità in alveo, che normalmente risultano essere dispendiose quando non addirittura pericolose per gli operatori coinvolti. Tra i numerosi metodi indiretti il metodo 'slope-area' risulta essere uno fra i più affidabili e semplici da utilizzare, a condizione che il tratto interessato dall'applicazione del metodo presenti caratteristiche geometriche e idrauliche gradualmente variate.

Il metodo prevede la misura contemporanea dei tiranti idraulici in due sezioni ravvicinate, di cui si conosca la geometria. Basandosi sui valori di altezza d'acqua misurati e sulle caratteristiche geometriche e sedimentologiche del tratto in esame, la portata in transito viene valutata attraverso un procedimento iterativo, utilizzando le equazioni del moto della corrente liquida in condizioni di deflusso gradualmente variato.

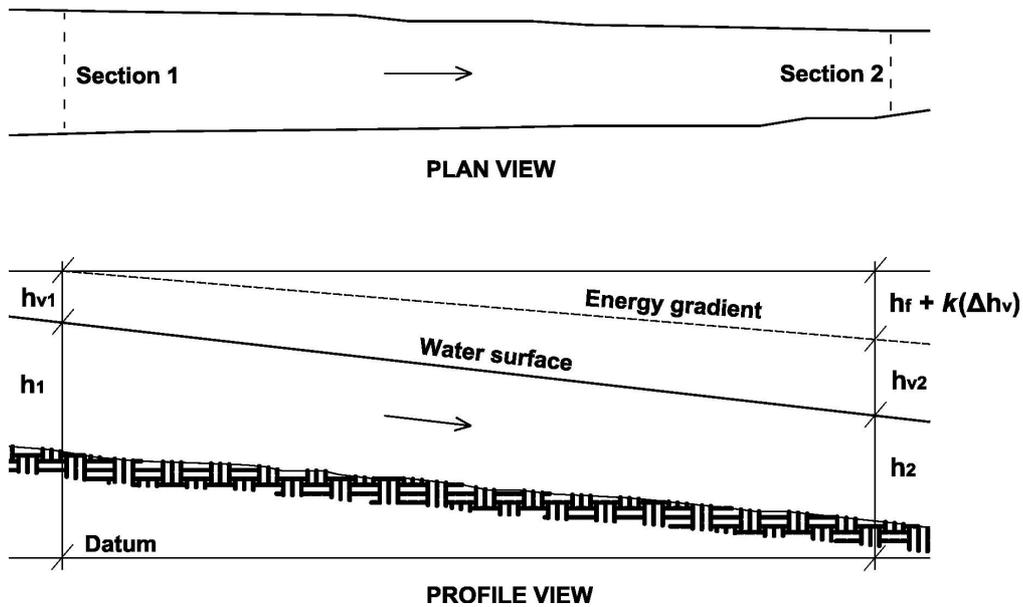


Figura 1: Schema e notazioni

In particolare, la portata in transito  $Q$  viene valutata con la seguente relazione:

$$Q = \frac{1}{n} (AR^{2/3} S^{1/2}) \tag{1}$$

in cui  $n$  è il coefficient di Manning,  $A$  area liquida,  $R$  raggio idraulico ed  $S$  la cadente della linea dei carichi totali.

Introducendo la capacità di convogliamento del tratto (nota come 'conveyance')  $K$ , la relazione (1) può essere scritta come:

$$Q = KS^{1/2} \tag{2}$$

Con riferimento allo schema in Figura 1, nel caso generale di corrente in moto non uniforme soggetta a delle perdite di carico totale sia concentrate, sia distribuite, l'equazione di governo del moto risulta:

$$(h_1 + h_{v1}) = (h_2 + h_{v2}) + h_f + k(\Delta h_v) \quad (3)$$

in cui  $h$  rappresenta il carico piezometrico misurato in ciascuna sezione,  $h_v = \alpha V^2 / 2g$  è il carico cinetico,  $h_f$  rappresenta le perdite di carico distribuite a seguito delle resistenze al moto che si sviluppano lungo il contorno bagnato e  $k(\Delta h_v)$  le perdite di carico concentrate in cui il coefficiente  $k$  è funzione della tipologia di perdita (ad. esempio perdita concentrate per un brusco allargamento della corrente).

La cadente della linea dei carichi totali  $S$  risulta pertanto:

$$S = \frac{h_f}{L} = \frac{1}{L} [\Delta h + \Delta h_v - k(\Delta h_v)] \quad (4)$$

in cui  $\Delta h (=h_1-h_2)$  è la differenza di carico piezometrico tra le due sezioni in esame poste ad una distanza  $L$ .

Assumendo che la capacità di convogliamento  $K$  vari in modo uniforme, la  $K$  media del tratto viene valutata come una media geometrica delle capacità di convogliamento nelle due sezioni in esame.

La portata in transito nel tratto viene quindi calcolata con:

$$Q = \sqrt{K_1 K_2 S} \quad (5)$$

in modo equivalente:

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta h}{\frac{K_2}{K_1} + \frac{K_2^2}{2gA_2^2} [-\alpha_1 (\frac{A_2}{A_1})^2 (1-k) + \alpha_2 (1-k)]}} \quad (6)$$

La metodologia pertanto richiede i seguenti dati di input: geometria del tratto esame, scabrezza, misure contemporanee dei livelli del pelo libero in due sezioni ravvicinate.

La procedura di risoluzione della (5) è iterativa e prevede il calcolo delle seguenti grandezze:

1. l'area liquida ( $A$ ), il raggio idraulico ( $R$ ) e la scabrezza (coefficiente di Manning) per ciascuna sezione.
2. la cadente della linea dei carichi piezometrici ( $i$ ).
3. la conveyance  $K_m$  e  $K_v$  rispettivamente per la sezione di monte e per la sezione di valle.
4. la conveyance media  $K$  tra le due sezioni come media geometrica delle conveyance determinate al punto 3.
5. la prima stima del valore della portata  $Q'$  moltiplicando la conveyance mediata per la radice della pendenza del pelo libero.
6. la differenza tra i carichi cinetici tra la sezione di monte e la sezione di valle utilizzando la portata  $Q'$  per la determinazione delle velocità nelle due sezioni.
7. una nuova cadente della linea dei carichi totali
8. una nuova portata utilizzando la nuova cadente della linea dei carichi totali

9. Ripetere i passi 7 e 8 fino a convergenza.

Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche del tratto, esso dovrebbe soddisfare alle ipotesi fatte, quindi le variazioni di conveyance tra le due sezioni dovrebbe essere il più possibile uniformi, giustificando l'ipotesi di assumere come conveyance la media geometrica tra le due sezioni. Il tratto in esame non deve contenere delle brusche variazioni geometriche quali cascate e salti di fondo: nel caso in cui il tratto abbia queste caratteristiche i risultati che si ottiene hanno scarso valore ed attendibilità. In pratica si preferiscono tratti pressoché rettilinei in cui il moto risulta uniforme o gradualmente variato.

I criteri che possono essere adottati per una corretta scelta delle condizioni ottimali sono:

- la lunghezza del tronco d'alveo dovrebbe essere non inferiore a 75 volte la profondità media della corrente;
- la perdita di quota del pelo libero tra gli estremi del tratto deve essere uguale o maggiore al carico di velocità;
- la perdita di quota del pelo libero tra gli estremi del tratto dovrebbe essere non inferiore al termine cinetico e comunque non inferiore a 0.15 m.

## 1.2 Esempio del tratto attrezzato nel T. Vezza in Versilia

Il tratto fluviale interessato dall'installazione dell'apparecchiatura sperimentale è ubicato sul torrente Vezza, immediatamente a valle dell'abitato di Ponte Stazzemesse (Figura 2). Questa locazione è stata scelta per i seguenti motivi:

- il tratto in esame presenta delle caratteristiche geometriche (pendenza, sezione, scabrezza) sufficientemente costanti lungo un tratto rettilineo di lunghezza pari a circa 200 m;
- il tratto è situato in prossimità della stazione idrometrica di Ruosina, in tal modo sarà possibile effettuare un controllo delle portate stimate;
- la presenza di una strada costeggiante il torrente e la vicinanza di un centro abitato forniscono garanzia riguardo all'approvvigionamento energetico ed alla accessibilità del sito.

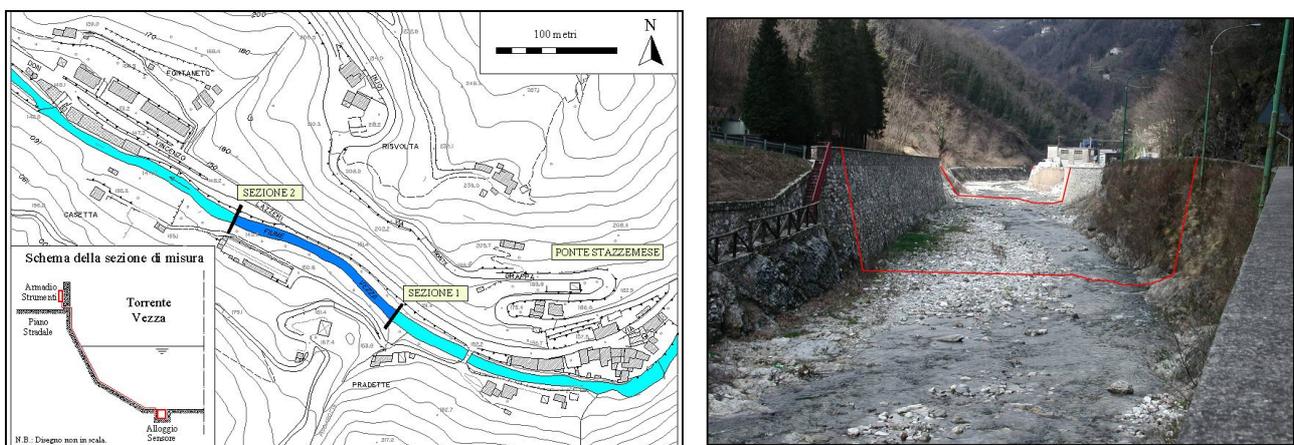


Figura 2: Tratto attrezzato sul T. Vezza in Versilia in località Ponte Stazzemesse.

Il tratto attrezzato è costituito da due stazioni di misura indipendenti, poste ad una distanza reciproca di circa 200 metri. Ogni singola stazione di misura è costituita da un trasduttore di

pressione, per la misura del tirante idrico, e da un datalogger, per la registrazione dei valori di altezza d'acqua misurati (Figura 3).

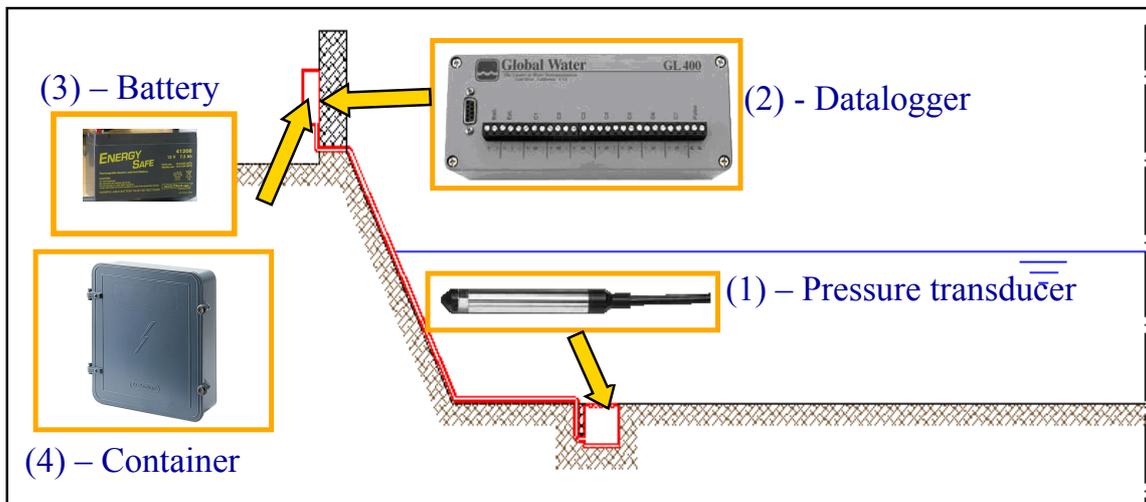


Figura 3: Strumentazione di misura installata in ciascuna sezione.

L'affidabilità del metodo 'slope-area' applicato al tratto attrezzato è stata dapprima valutata mediante accurate simulazioni numeriche, volte allo studio teorico della propagazione di un'onda di piena nel tratto interessato. Tali simulazioni hanno permesso di effettuare una valutazione teorica degli errori di stima delle portate liquide, derivanti dall'applicazione del metodo 'slope-area' al tratto in esame del torrente Vezza. I risultati hanno mostrato degli errori relativi compresi nell'intervallo 5%-10%. Questo errore appare del tutto accettabile in considerazione della semplicità del metodo e degli errori con cui normalmente sono affette le stime effettuate tramite la scala di deflusso.

Infine, in Figura 4 viene mostrato un confronto tra gli idrogrammi di piena alla stazione di Ruosina e gli idrogrammi ottenuti con il metodo 'slope-area' durante un evento del febbraio 2007; si noti come gli idrogrammi risultino del tutto sovrapponibili.

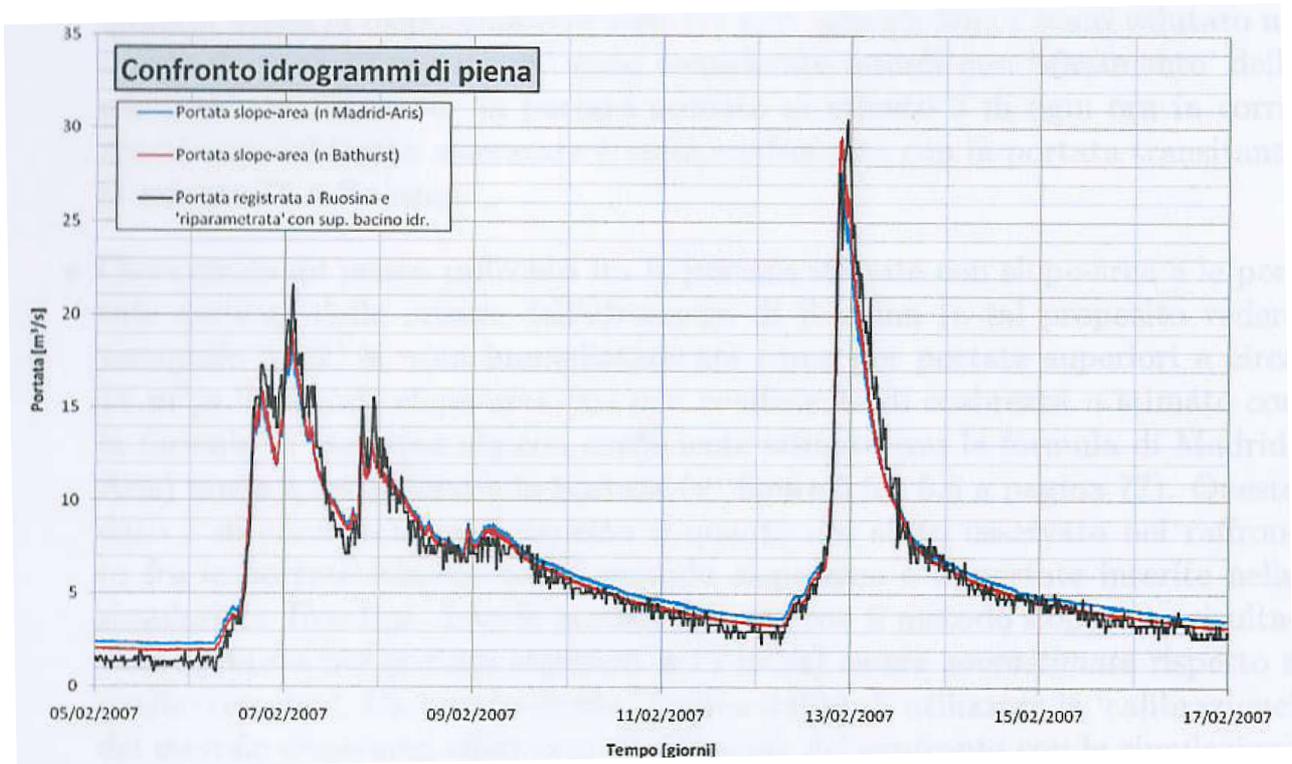


Figura 4: Confronto tra l'idrogramma di piena misurato alla stazione idrometrica di Ruosina e la portata stimata con il metodo 'slope-area'.

## 2. Implementazione nel bacino del Torrente Carrione

Nel bacino del Torrente Carrione sono stati individuati due tratti in cui effettuare il monitoraggio (Figura 5): *tratto 1* sul T. Carrione presso il Ponte della Bugia posto immediatamente a valle della confluenza con il T. Torano ed il T. Colonnata ma a monte rispetto al confluente con il T. Gragnana, *tratto 2* sito sul T. Colonnata.

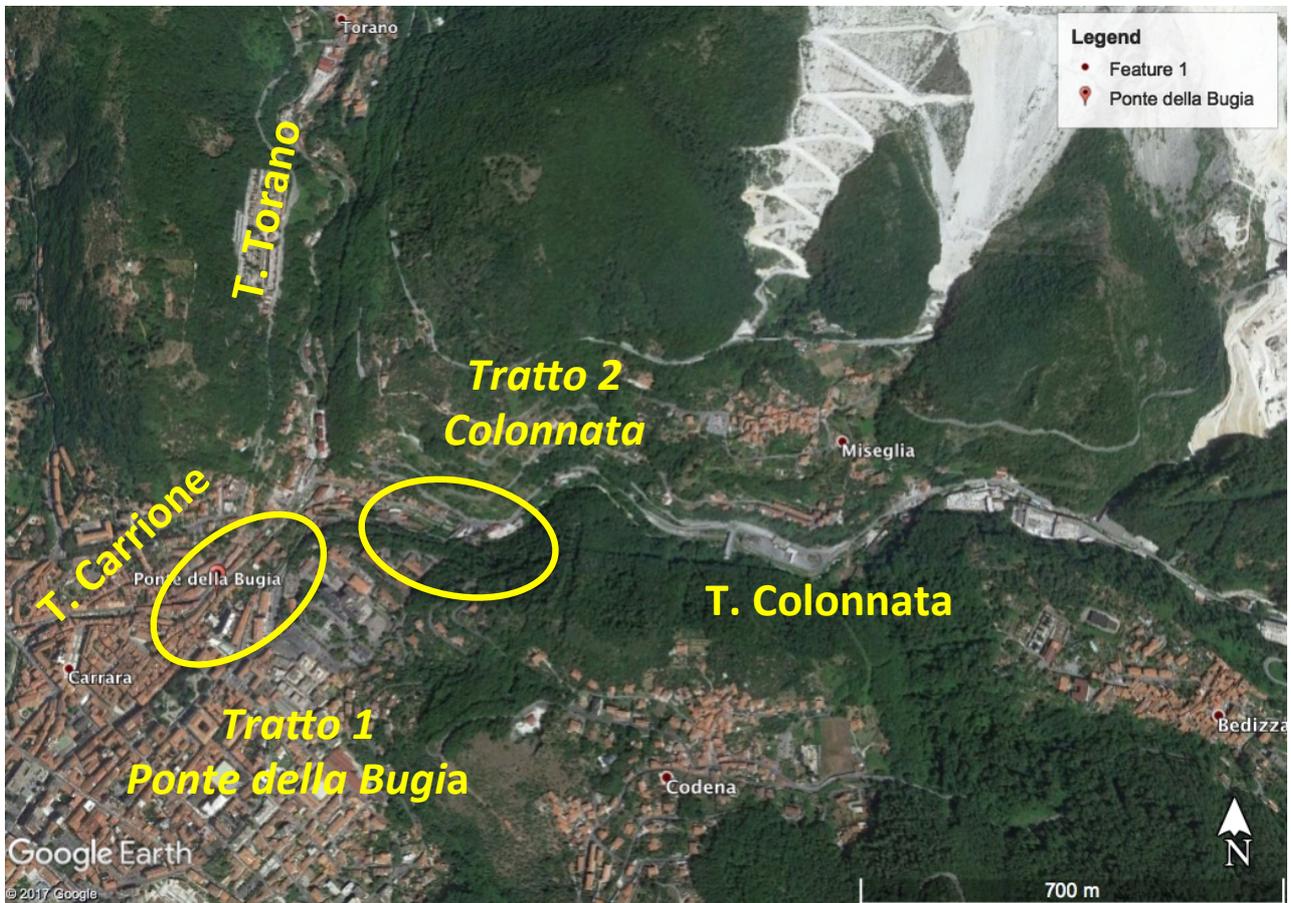


Figura 5: Tratti in cui effettuare il monitoraggio della portata sul T. Carrione e sul T. Colonnata.

### 2.1 Tratto 1 – Ponte della Bugia

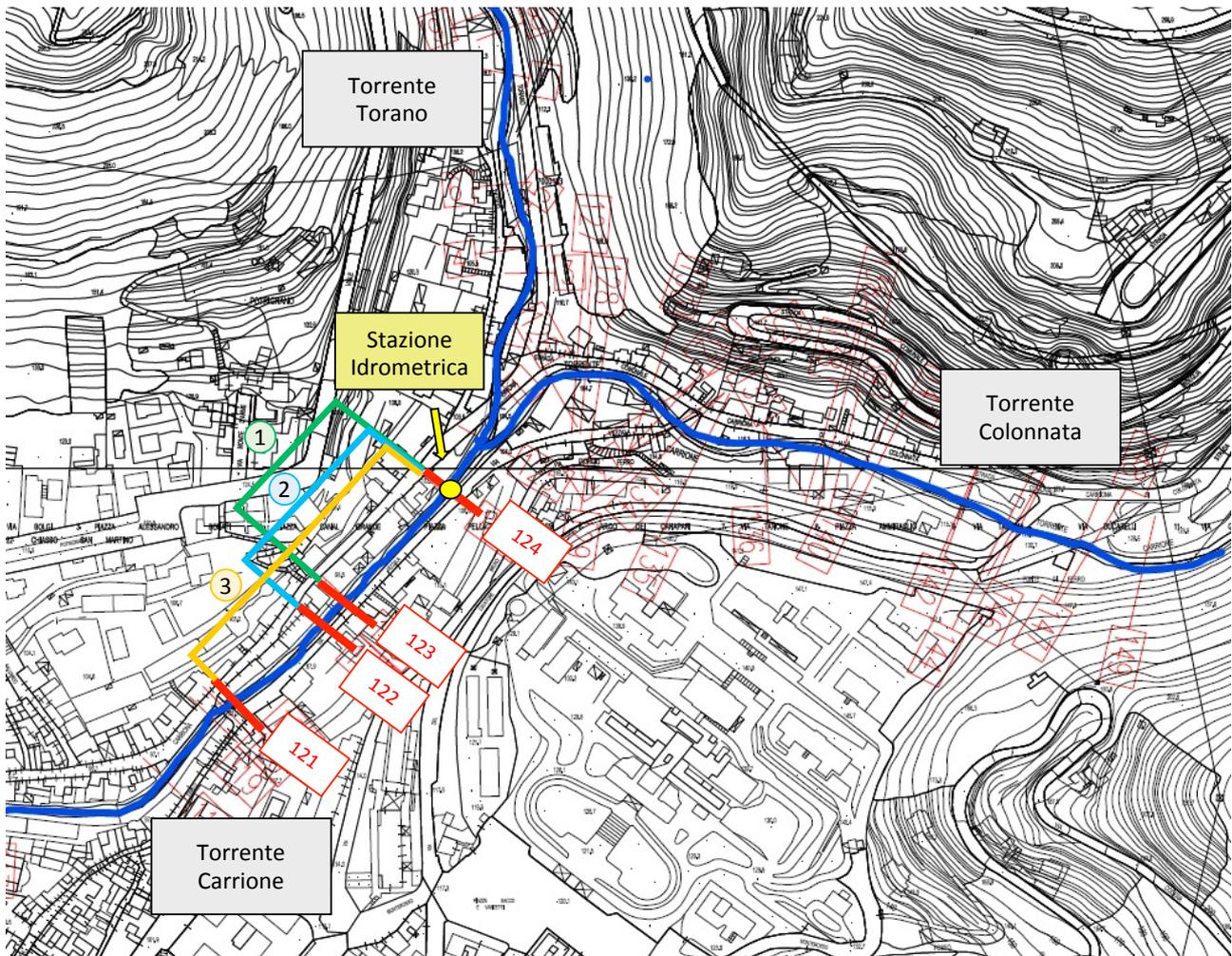
Il tratto 1 risulta facilmente accessibile, rettilineo e presenta delle caratteristiche geometriche pressochè uniformi con pendenza pari a circa 1.29% e larghezza pari a circa 8.5 m (Figura 6).



*Figura 6: Tratto 1 – foto dal Ponte della Bugia verso monte  
(sopralluogo effettuato il 21 marzo 2016)*

La sezione di monte del tratto è posta in corrispondenza della stazione idrometrica del CFR sita nella sezione 124 come risulta dalla planimetria in Figura 7. Questa soluzione risulta particolarmente vantaggiosa in quanto si richiede l'installazione di un solo idrometro aggiuntivo; inoltre sarà possibile confrontare la portata stimata con il metodo 'slope-area' con le misure dirette ottenute alla stazione idrometrica.

Al fine di individuare la sezione di valle e pertanto la lunghezza del tratto sono state effettuate delle simulazioni idrauliche utilizzando il modello idraulico del torrente in Hec-Ras già implementato dall'Università di Genova. In particolare, sono stati analizzati tre scenari corrispondenti ad una sezione di valle del tratto posta nelle sezioni 123, 122 e 121 corrispondenti a delle lunghezze del tratto rispettivamente pari a 87.56 m, 108.66 m e 178.18 m (Figura 7).



*Figura 7: Individuazione della lunghezza del tratto 1.*

Le simulazioni idrauliche hanno permesso di ottenere i profili idraulici ed i livelli nelle diverse sezioni con i quali è stato applicato il metodo 'slope-area'. La portata così stimata è stata poi messa a confronto con la portata in ingresso al modello ed è stato calcolato così l'errore relativo teorico (definito come il rapporto tra la differenza tra la portata del modello e quella calcolata e la portata del modello).

I risultati in Figura 8 mostrano l'errore relativo al variare della lunghezza del tratto e per le diverse portate. L'installazione dell'idrometro di valle nelle sezioni 123 e 121 conduce ad un errore relativo contenuto essendo inferiore al 10% in valore assoluto. Si noti inoltre che l'installazione dell'idrometro nella sezione 122 condurrebbe a degli errori maggiori poiché, come è possibile notare dai profili longitudinali nelle Figure 9,10,11 e 12 tra le sezioni 122 e 123 il profilo della superficie libera risulta localmente perturbato a seguito di un locale aumento della pendenza del fondo.

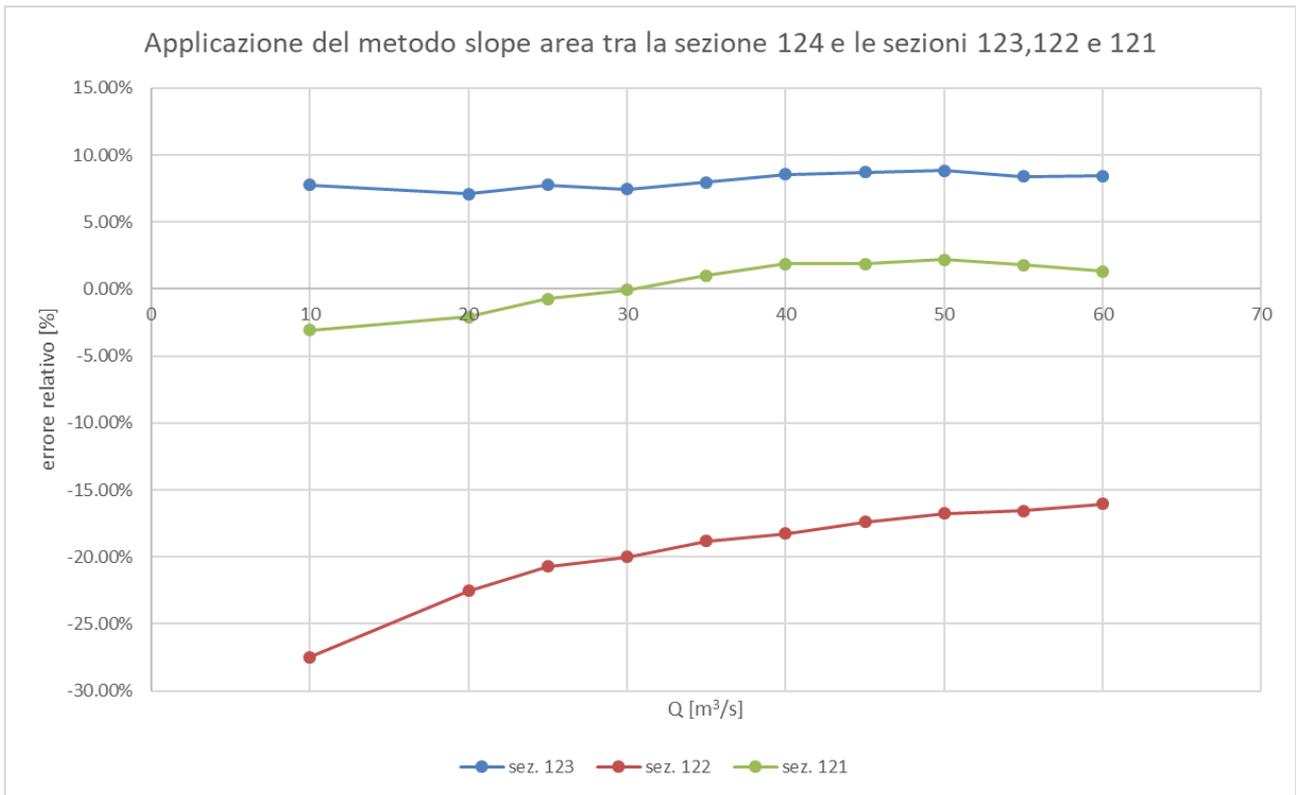


Figura 8: errore relativo teorico sulla stima della portata liquida.

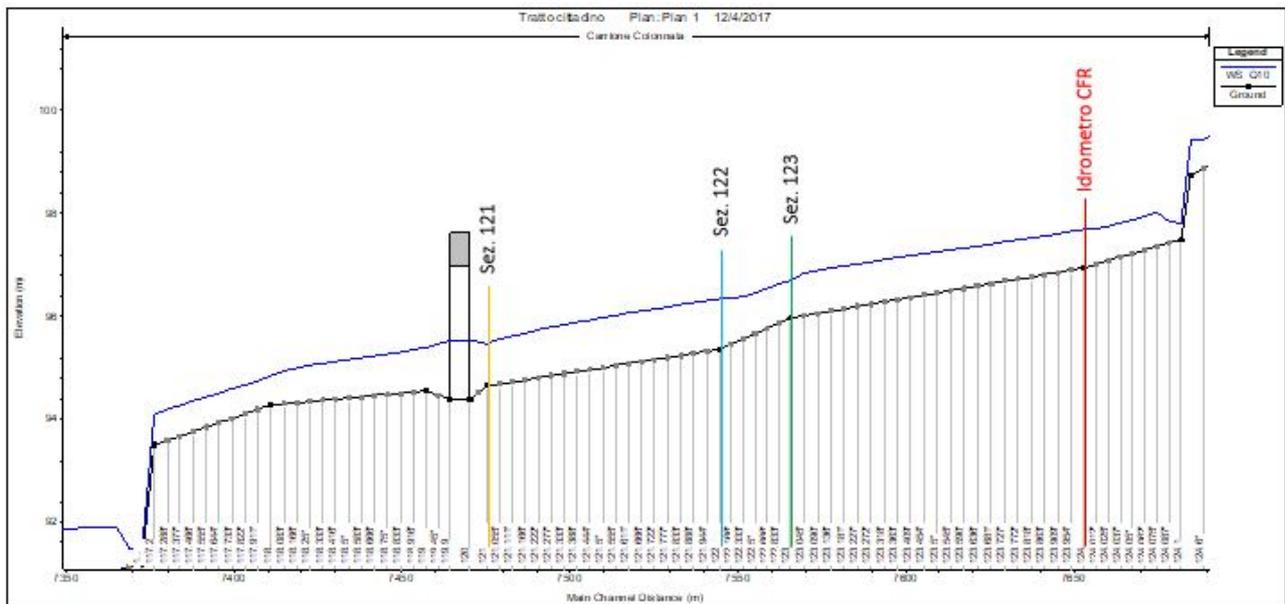


Figura 9: profilo della superficie libera del tratto 1 per  $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

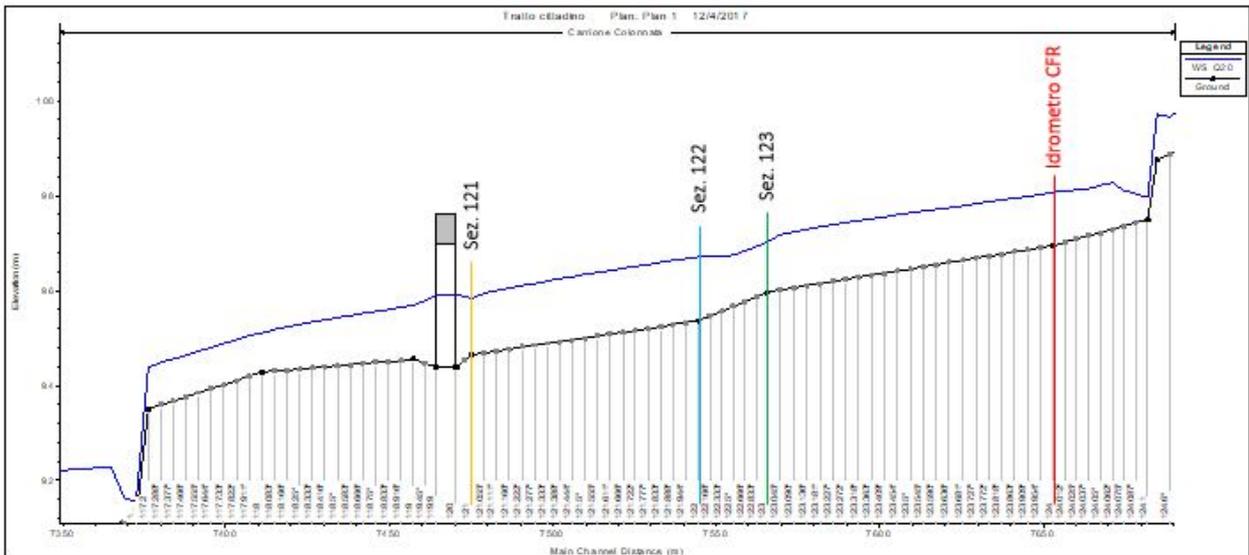


Figura 10: profilo della superficie libera del tratto 1 per  $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ .

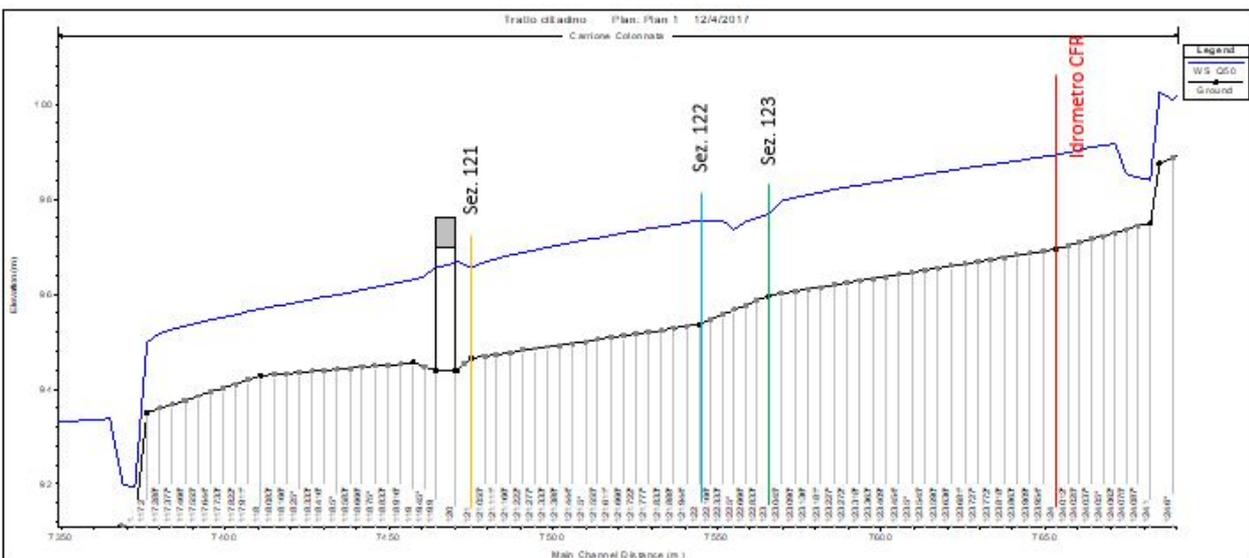


Figura 11: profilo della superficie libera del tratto 1 per  $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$ .

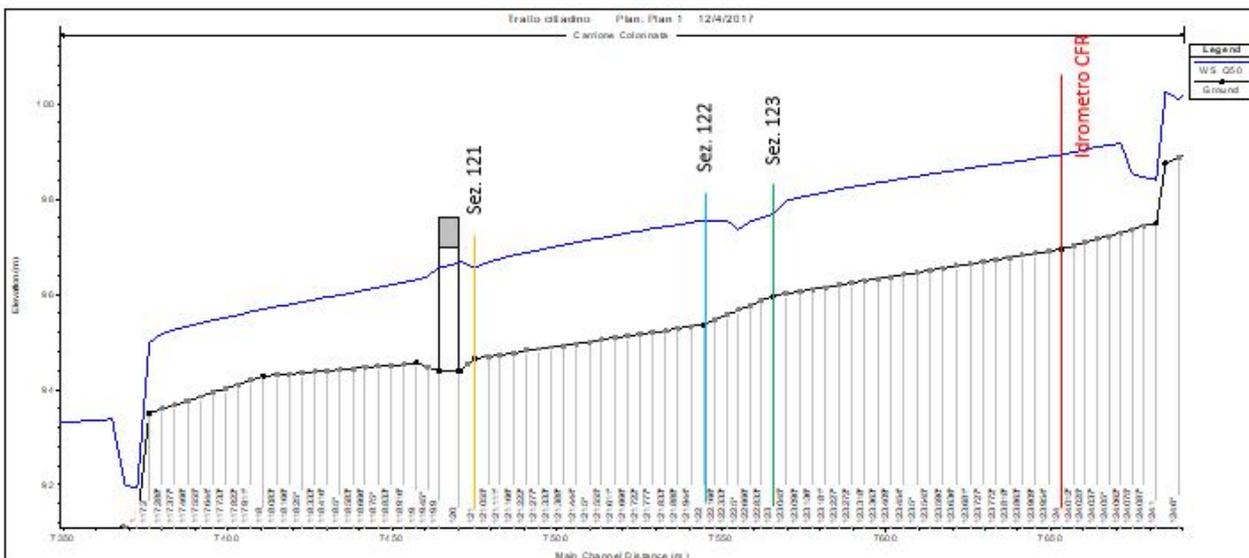


Figura 12: profilo della superficie libera del tratto del 1 per  $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Applicando a queste tre sezioni considerate i criteri di applicabilità precedentemente definiti osserviamo che solo la sez. 121 soddisfa i criteri per tutti i valori di portata considerati, come riportato nelle sottostanti tabelle (Tabella 1 e Tabella 2).

- “la lunghezza del tronco d’alveo dovrebbe essere non inferiore a 75 volte la profondità media della corrente”.

$L_1 = 87.56$  m

$L_2 = 108.66$  m

$L_3 = 178.18$  m

	Q10	Q20	Q25	Q30	Q35	Q40	Q45	Q50	Q55	Q60
sez.124/sez.123	87.56	87.56	87.56	87.56	87.56	87.56	87.56	87.56	87.56	87.56
sez.124/sez.122	108.66	108.66	108.66	108.66	108.66	108.66	108.66	108.66	108.66	108.66
sez.124/sez.121	178.18	178.18	178.18	178.18	178.18	178.18	178.18	178.18	178.18	178.18

Tabella 1. Criterio sulla distanza tra le sezioni. In verde quando il criterio è rispettato, in rosso quando non viene rispettato.

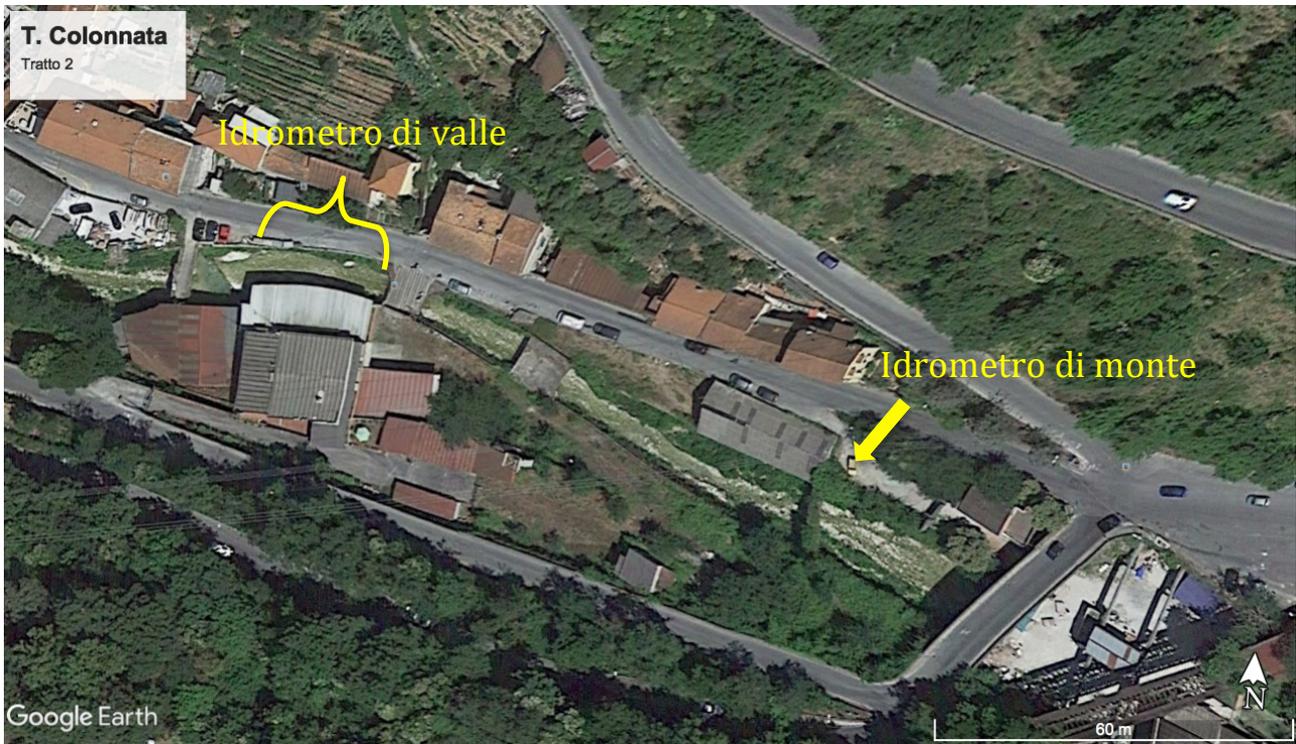
- “la perdita di quota del pelo libero tra gli estremi del tratto deve essere uguale o maggiore al carico di velocità”.
- “la perdita di quota del pelo libero tra gli estremi del tratto dovrebbe essere non inferiore al termine cinetico e comunque non inferiore a 0.15 m”.

		Q10	Q20	Q25	Q30	Q35	Q40	Q45	Q50	Q55	Q60
$\Delta y$	sez.124/sez.123	1	1.38	1.08	1.12	1.14	1.18	1.21	1.23	1.27	1.29
	sez.124/sez.122	1.34	1.72	1.36	1.37	1.37	1.38	1.38	1.38	1.39	1.39
	sez.124/sez.121	2.22	2.6	2.26	2.3	2.31	2.35	2.35	2.36	2.36	2.35

Tabella 2. Criteri sulla perdita di quota tra gli estremi. In verde quando i criteri sono rispettati, in rosso quando non sono rispettati.

## 2.2 Tratto 2 – T. Colonnata

Il tratto 2 sul T. Colonnata è posto poco a monte della confluenza con il T. Torano.



*Figura 13: planimetria Tratto 2 sul T. Colonnata.*

A seguito di un sopralluogo effettuato in data 29/01/2018 è stato individuato un tratto in prossimità della confluenza con il t. Torano.

Data la geometria del tratto si ipotizza l'installazione dell'idrometro di monte su un piccolo ponte pedonale posto subito a valle del ponte di via del Cavatore, mentre l'idrometro di valle potrebbe essere alloggiato lungo la sponda del torrente subito a monte del salto di fondo in prossimità della confluenza con il t. Torano (Figura 13).

Le simulazioni idrauliche sono state svolte considerando le sezioni illustrate in Figura 14.

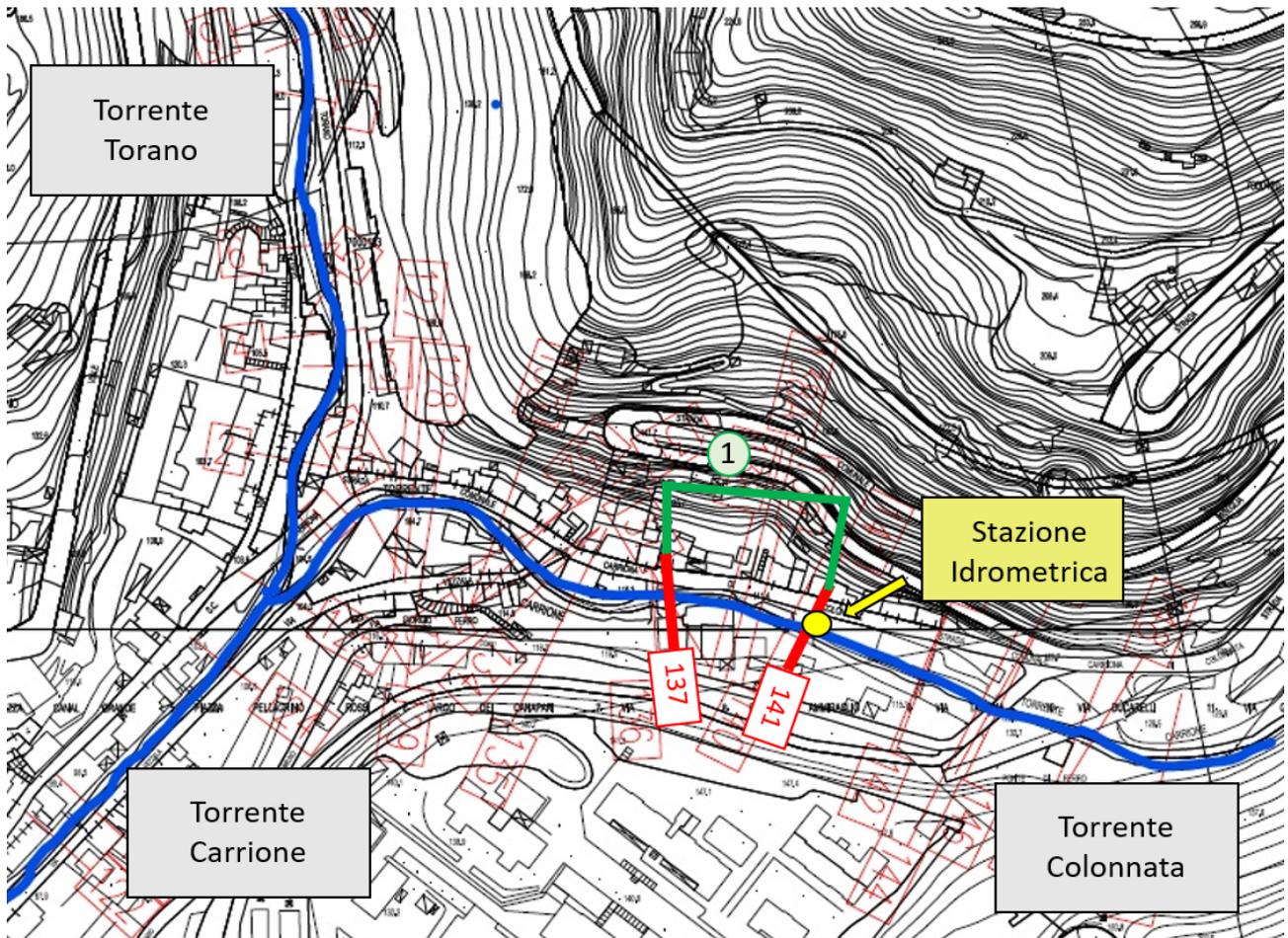


Figura 14: Individuazione della lunghezza del tratto 2 con lo strumento di monte installato nella sezione 141.

Si riportano di seguito i profili ottenuti da simulazioni HEC-RAS nel tratto considerato.

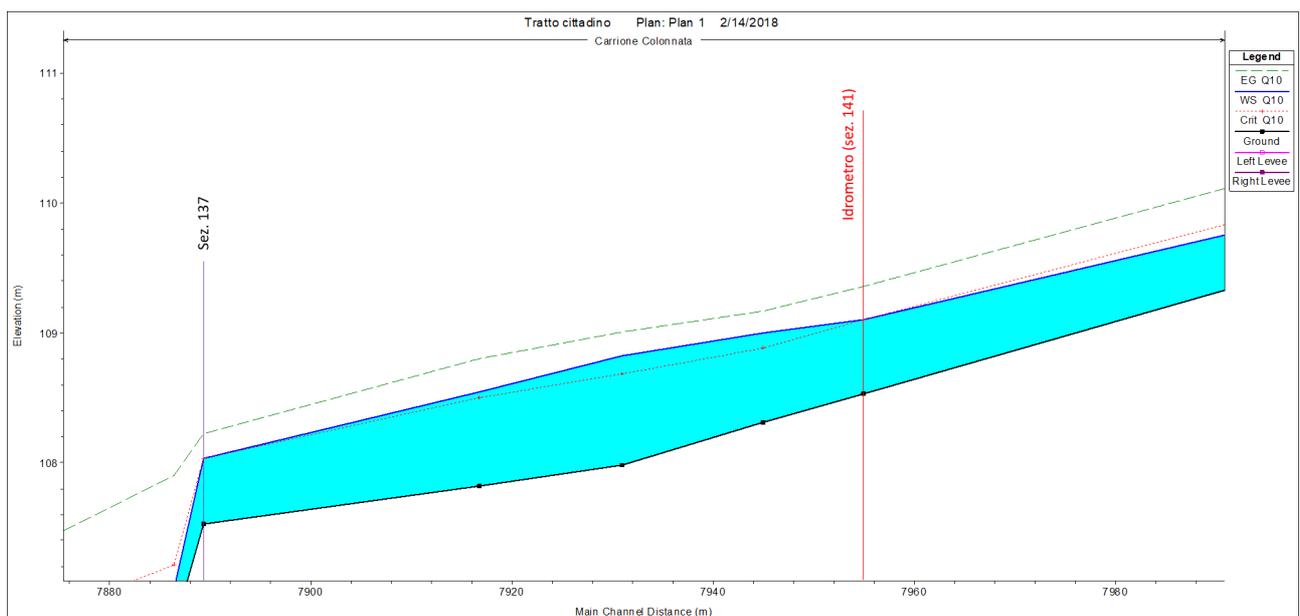


Figura 15: profilo della superficie libera del tratto 2 per  $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

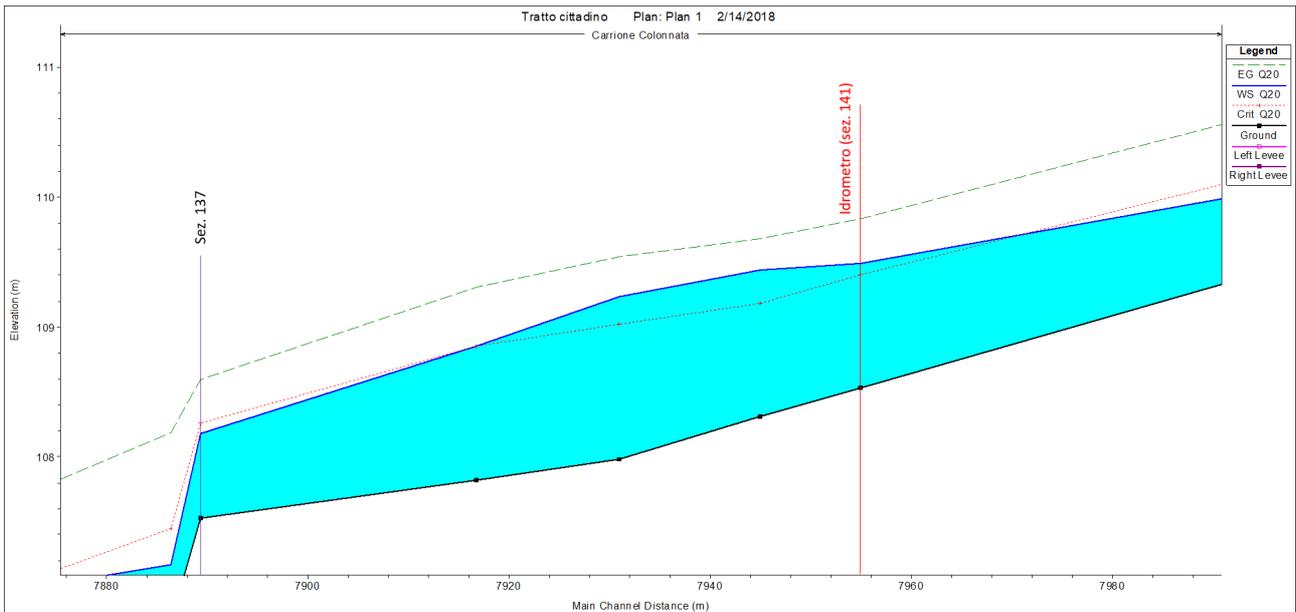


Figura 16: profilo della superficie libera del tratto 2 per  $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ .

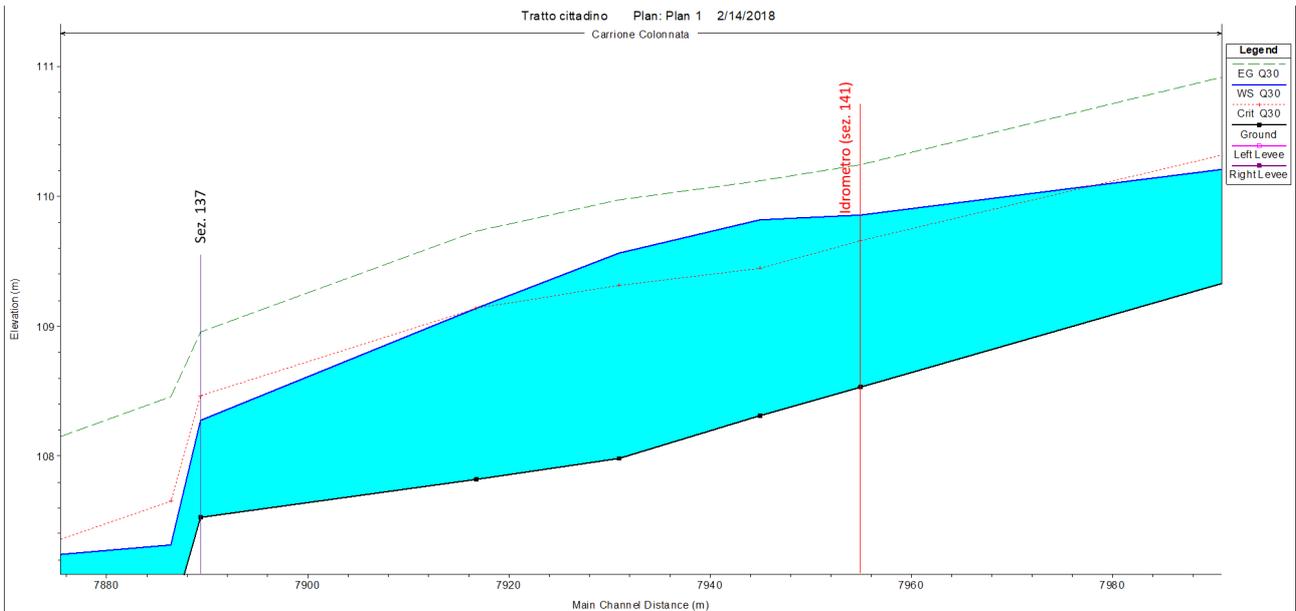


Figura 17: profilo della superficie libera del tratto 2 per  $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$ .

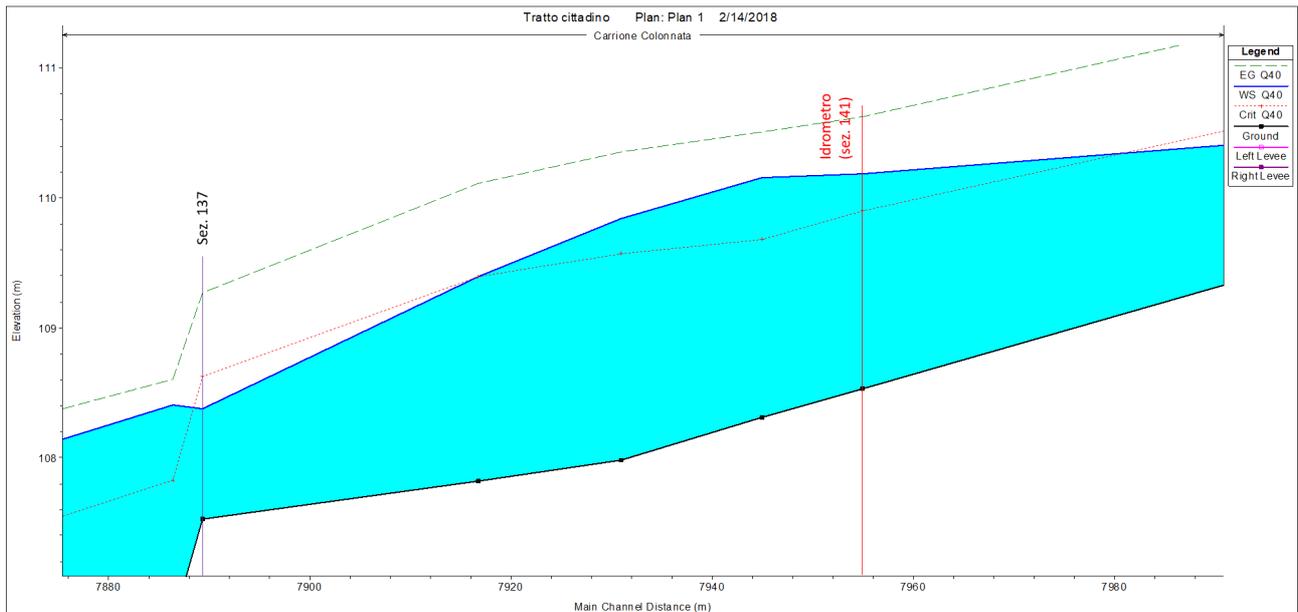


Figura 18: profilo della superficie libera del tratto 2 per  $Q=40 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Dall'applicazione del metodo 'slope-area' si è confrontata la portata stimata con la portata in ingresso al modello ed è stato calcolato così l'errore relativo teorico (definito come il rapporto tra la differenza tra la portata del modello e quella calcolata e la portata del modello), si riporta in Figura 19 l'andamento dell'errore in funzione della portata.

Seguendo questo procedimento si è visto che installando l'idrometro di monte nella sezione 140 l'errore commesso nel calcolo della portata varia tra il 4.62% e lo 0.22%. Si osserva un errore molto ridotto che conduce ad una sottostima della portata transitante; questo errore si riduce all'aumentare della portata stessa.

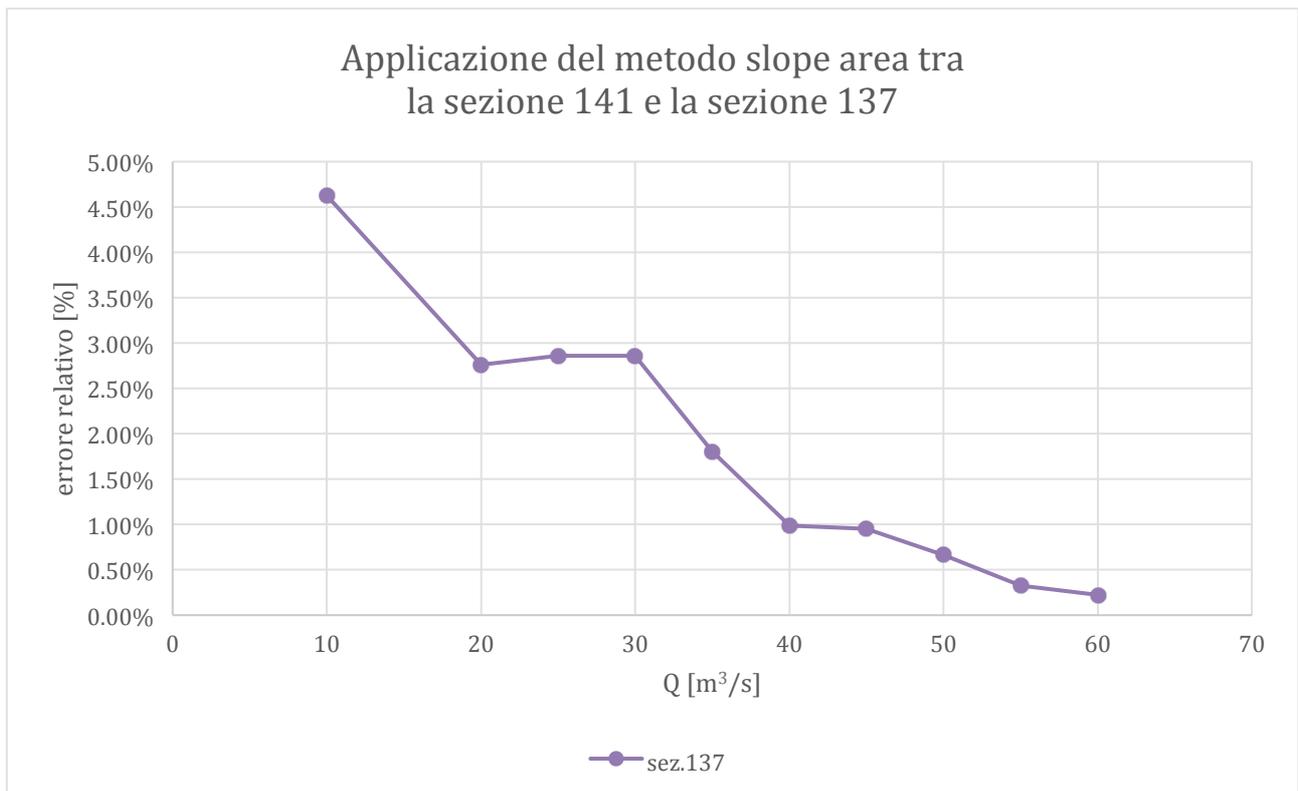


Figura 19: errore relativo teorico sulla stima della portata liquida.

Applicando a questo tratto i criteri di applicabilità precedentemente definiti si osserva che solo la lunghezza del tratto rappresenta una criticità nei confronti dell'installazione degli strumenti, si riportano nelle sottostanti tabelle tali considerazioni (Tabella 3 e Tabella 4).

- “la lunghezza del tronco d'alveo dovrebbe essere non inferiore a 75 volte la profondità media della corrente”.

$$L_1 = 65.67 \text{ m}$$

	Q10	Q20	Q25	Q30	Q35	Q40	Q45	Q50	Q55	Q60
sez.141/sez.137	65.67	65.67	65.67	65.67	65.67	65.67	65.67	65.67	65.67	65.67

Tabella 3. Criterio sulla distanza tra le sezioni. In verde quando il criterio è rispettato, in rosso quando non viene rispettato.

Si osserva che la lunghezza del tratto considerato è tale per cui questo primo criterio risulta soddisfatto solo per una portata pari a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

- “la perdita di quota del pelo libero tra gli estremi del tratto deve essere uguale o maggiore al carico di velocità”.
- “la perdita di quota del pelo libero tra gli estremi del tratto dovrebbe essere non inferiore al termine cinetico e comunque non inferiore a  $0.15 \text{ m}$ ”.

	Q10	Q20	Q25	Q30	Q35	Q40	Q45	Q50	Q55	Q60
$\Delta y$   sez.141/sez.137	1.07	1.31	1.44	1.57	1.69	1.81	1.91	2.02	2.13	2.22

Tabella 4. Criteri sulla perdita di quota tra gli estremi. In verde quando i criteri sono rispettati, in rosso quando non sono rispettati.

## Bibliografia

- Canovaro, F., Mengoni, B., Solari, L., Field monitoring of the flood wave propagation in the Versilia mountain basin (Tuscany, Italy), Proc. IAHR Conference, 2007.
- McCuen, R.H., Hydrologic Design and Analysis; Prentice Hall, New Jersey, 814 pp., 1998.
- Seminara, G., Colombini, M., Studio idraulico del Torrente Carrione con analisi dei possibili interventi per la mitigazione del rischio; 2016.