

REGIONE CALABRIA
COMUNE DI ANDALI

SETTORE FUNZIONI TERRITORIALI U.O.T.

SISTEMAZIONE DELLE SPONDE DEL FIUME CROCCHIO A
PROTEZIONE DELLE PROPRIETÀ SITE IN LOC. BRIGANTE
NEL COMUNE DI ANDALI .

Committente: COMUNE DI ANDALI

Ubicazione: "Loc. Brigante" - Andali (Cz)

TAV. N.º **3**

SCALA 1:.....

Elaborati Progettuali
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA

Spazio Riservato all'Ufficio

UFFICIO TECNICO

Relazione Idrologica - Idraulica

Inquadramento territoriale

Il bacino idrografico del Fiume Crocchio si estende per circa 130 kmq a cavallo dei territori provinciali di Catanzaro e Crotone. È confinante con i bacini dei fiumi Simeri, Alli, Uria, Tacina, Neto, e con altri piccoli bacini nella sua parte terminale. Si sviluppa nella sua parte montana nella Sila e Presila catanzarese e sfocia nel mare Ionio tra le località di Cropani Marina e Botricello.

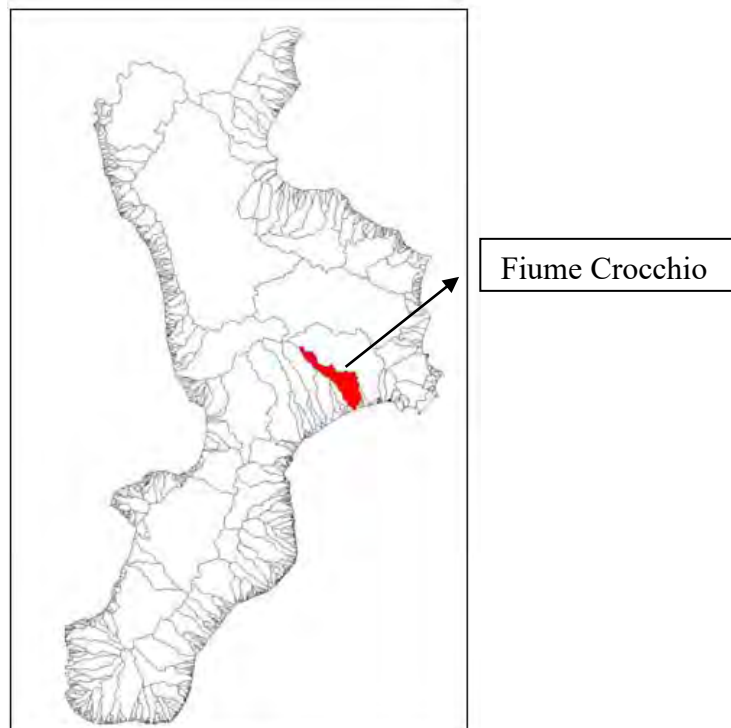


Figura 2- Inquadramento del Fiume Crocchio.

I principali comuni interni al bacino sono: Botricello, Cropani, Sersale, Marcedusa, Cerva, Petronà.

La geologia del bacino presenta particolare interesse per la caratterizzazione del deflusso superficiale.

Il bacino è stato caratterizzato con un'analisi geologica facendo riferimento alla *Carta geologica della Calabria* della cassa del Mezzogiorno con fogli in scala 1:25000.

Il territorio del bacino al di sopra di 400 – 500 m.s.l.m., che rappresenta la maggior parte del territorio, è composto da un complesso igneo-metamorfico di paragneiss e scisti risalenti al Paleozoico. La granulometria va da fine a grossolana. Le rocce di questo complesso sono consistenti e resistenti all'erosione. La permeabilità è generalmente bassa, ma se ne riscontra un aumento nelle zone di più intensa fatturazione. A queste si associano, in alcune aree, gneiss basici con grana da fine a grossolana, localmente intersecati da vene granitiche che presentano analoghe caratteristiche geotecniche. I terreni appartengono al Paleozoico.

Scendendo verso i 350 - 400 metri di quota compaiono aree composte da arenarie e sabbie, generalmente grossolane, bruno-chiare, di età miocenica (Cenozoico). Esse sono discretamente resistenti all'erosione e hanno una permeabilità da media ad elevata.

Sul territorio vallivo si trovano argille siltose grigio-azzurre, con intercalazioni locali di sabbie e silts, risalenti al Pliocene. Vi è contenuta una abbondante microfauna con specie planctoniche e bentoniche. La macrofauna è generalmente scarsa e banale. Gli orizzonti di sabbie e silts, presenti localmente nelle argille, danno luogo a forme di erosione rapida tipo calanchi, talora associate a movimenti franosi. La permeabilità è medio-bassa e il complesso presenta una moderata resistenza all'erosione. Spostandosi verso monte si trovano sabbie e silts, da bruno-chiare a grigie, con intercalazioni argillose e contenuto di microfauna molto scarsa (moderata resistenza all'erosione e media permeabilità).

Lungo il letto del fiume sono presenti terreni ciottolosi e sabbiosi circondati, soprattutto nel tratto di valle, da ampie aree alluvionali fissate dalla vegetazione o artificialmente miste a prodotti di dilavamento.

Caratteristiche planimetriche e altimetriche.

Per effettuare la caratterizzazione planimetrica del bacino in questione, prioritario è stato il tracciamento dello spartiacque del bacino cioè il luogo dei punti da cui hanno origine le linee di massima pendenza che finiscono per raggiungere la sezione di chiusura del bacino. Lo spartiacque si delimita su una carta topografica in base alle isoipse, linee di eguale quota rispetto al livello medio del mare, e alle teste dei canali del reticolo idrografico, imponendo il passaggio per le vette. Lo spartiacque indica, dunque, se la goccia d'acqua che cade durante le precipitazioni va a finire in un bacino o in un altro.

Le principali caratteristiche planimetriche del bacino del Crocchio, sotteso dalla sezione di foce, sono:

- Superficie: 129.68 km²;
- Lunghezza della linea spartiacque: 82 km;
- Lunghezza dell'asta principale: 40.4 km;

Per caratterizzare la forma del bacino, si sono determinati i seguenti fattori di forma, che sostanzialmente misurano il grado di allungamento del bacino:

- Rapporto di circolarità: rapporto tra l'area del bacino e l'area del cerchio di ugual perimetro :

$$R_c = \frac{4 \cdot \pi \cdot S}{P^2} = 0.24$$

- Fattore di forma: rapporto tra l'area del bacino e il quadrato della lunghezza dell'asta principale:

$$F_f = \frac{A}{L^2} = 0.08$$

- Rapporto di allungamento: rapporto tra la lunghezza dell'asta principale ed il diametro del cerchio di area pari a quella del bacino:

$$R_{all} = \frac{L \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{4 \cdot S}} = 0.32 \quad \text{forma allungata}$$

- Coefficiente di uniformità di Gravelius: rapporto tra la lunghezza dello spartiacque (perimetro del bacino) e il perimetro del cerchio di uguale area:

$$\Phi = \frac{P}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot S}} = 2.03 \quad \text{forma rettangolare bislunga.}$$

Le principali caratteristiche altimetriche del bacino sono:

- ✓ Quota massima: 1680 m s.l.m.;
- ✓ Quota minima: 0 m s.l.m. (foce).

L'andamento altimetrico del bacino è descritto dalla curva ipsografica (*Fig. 3*). Questa si ottiene riportando in un diagramma cartesiano dei punti le cui ordinate rappresentano la quota, riferita alla sezione di chiusura, e le ascisse indicano l'area del bacino che si trova al di sopra di tale quota. La differenza tra la quota del punto più elevato dello spartiacque e quella della sezione di chiusura è un altro parametro caratteristico del bacino che prende il nome di *rilievo del bacino*.

Per determinare la curva ipsografica, è stato necessario tracciare le curve di livello interne al bacino con equidistanza fissata a 50 m, quindi calcolare le aree sottese a ciascuna di esse e riportare i punti su un diagramma.

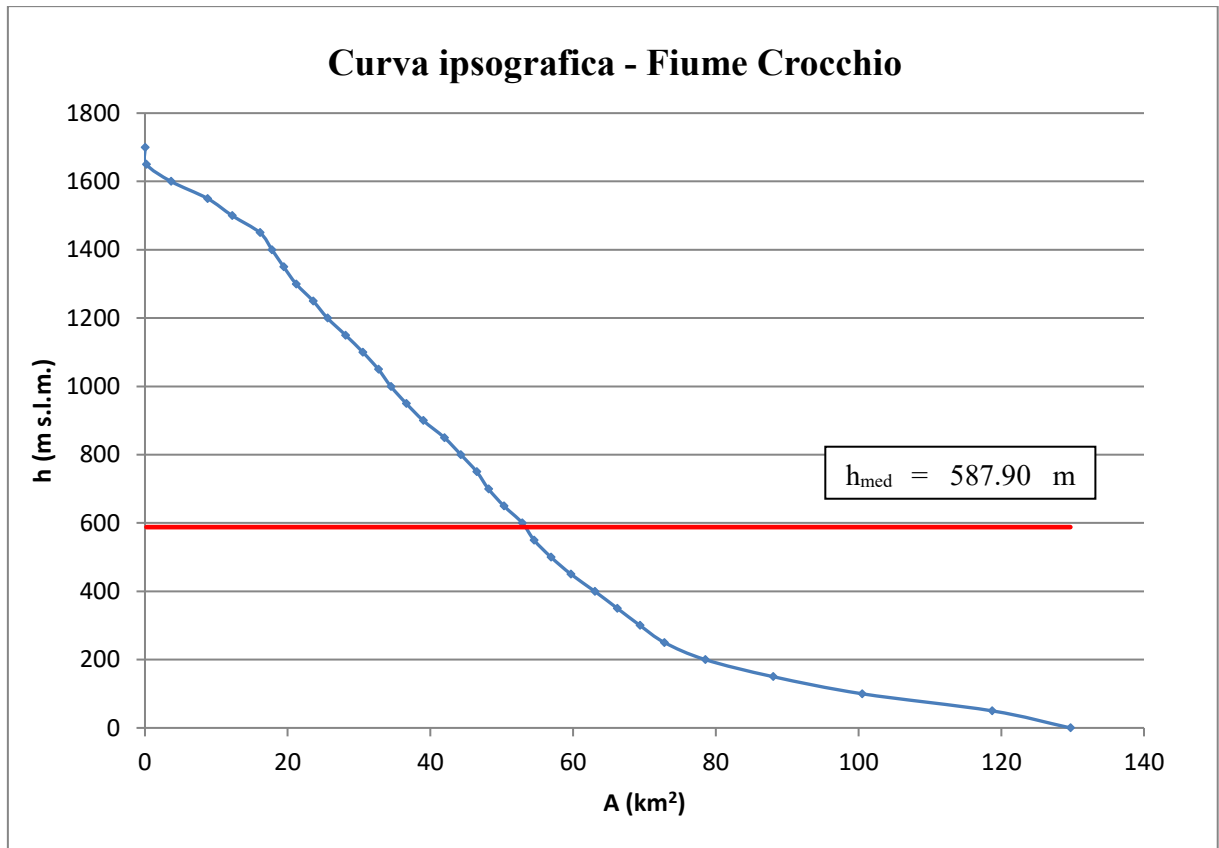


Figura 3- Curva ipsografica del Fiume Crotichio.

Dalla curva ipsografica si può ricavare l'altitudine media del bacino, definita come

$$\bar{h} = \frac{1}{A} \int_0^A h dA .$$

Essa è inoltre pari all'altezza del rettangolo di area equivalente a quella sottesa

dalla curva ipsografica.

Gli ulteriori dati ricavati da tale curva sono pertanto:

- Rilievo del bacino: 1680,00 m;
- Altitudine media del bacino, h_{med} : 587.90 m s.l.m. .

Per caratterizzare infine la pendenza media dei versanti del bacino si è utilizzato il metodo di Alvard-Horton, che consiste nel misurare la lunghezza totale L delle curve di livello (con assegnata equidistanza Δh) comprese nel bacino e quindi nel calcolare la pendenza media

tramite la formula $i_m = \frac{\Delta h \cdot L}{S}$. Il valore ottenuto è i_m : 28 %.

Struttura del reticolo idrografico

Per gerarchizzazione di un reticolo si intende l'ordinamento dei suoi elementi costitutivi secondo precise regole. Alcune definizioni di carattere generale sono:

- *nodi esterni (o sorgenti)*: nodi da cui ha origine una sola asta;
- *nodi interni (o giunzioni)*: nodi in cui convergono più aste;
- *rami esterni*: elementi che collegano una sorgente a una giunzione;
- *rami interni*: elementi che collegano due giunzioni.

E' possibile inoltre definire i seguenti parametri:

- *magnitudine, μ* : numero di sorgenti della rete;
- *distanza topologica, δ* : per ogni sorgente, il numero di rami da attraversare per giungere allo sbocco;
- *diametro, λ* : massima distanza topologica;
- *livello topologico, i* : per ogni ramo, distanza topologica del nodo di monte.

La gerarchizzazione del bacino del Nasari è stata effettuata con il metodo di *Horton-Strahler*.

Le regole di tale gerarchizzazione possono riassumersi nei seguenti punti:

- si procede da monte verso valle;
- i rami che hanno origine da una sorgente sono canali del primo ordine;
- l'unione di due rami dello stesso ordine n genera un ramo di ordine $(n+1)$;
- l'unione di due rami di ordine diverso genera un ramo di ordine pari al maggiore tra i due;
- l'ordine del reticolo Ω è pari all'ordine massimo.

Per quanto riguarda la gerarchizzazione del bacino del fiume Nasari secondo il metodo di *Horton-Strahler* l'ordine è pari a sette.

Tempi caratteristici

Si determinano dei tempi caratteristici che contribuiscono a definire le modalità di risposta del bacino e le sue caratteristiche cinematiche:

- 1) *Tempo di corrivazione.* Il tempo di corrivazione del bacino rappresenta il tempo che una goccia d'acqua impiega a raggiungere la sezione di chiusura, partendo dal punto idraulicamente più lontano da essa e scorrendo sempre in superficie. Nell'individuazione del punto più remoto del bacino e nel calcolo della sua distanza effettiva dalla sezione di chiusura, deve essere considerata non solo la distanza planimetrica ma anche la quota del punto stesso.

Il tempo di corrivazione può essere calcolato attraverso diverse formule empiriche presenti in letteratura. La formula più comunemente usata è quella di Giandotti (*“Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua”*, 1934):

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

nella quale S è la superficie del bacino, espressa in km^2 , L è la lunghezza dell'asta principale, espressa in km, e h_{med} è l'altitudine media del bacino rispetto alla sezione di chiusura espressa in m.

Il valore ottenuto con tale formula è pari a 5.47 h.

- 2) *Tempo di ritardo.* Il tempo di ritardo di un bacino (*lag time*) è inteso come l'intervallo temporale che separa il baricentro dell'istogramma di pioggia efficace (pluviogramma netto) dal baricentro dell'idrogramma del deflusso superficiale (depurato delle portate di base) corrispondente. La sua stima può essere effettuata facendo riferimento a vari

criteri. Secondo le ipotesi di Viparelli (1961), si può ipotizzare che le curve di livello coincidano con le isocorrive (cioè il luogo dei punti caratterizzati dallo stesso tempo di corrivazione) e quindi si può sfruttare per il calcolo del tempo di ritardo la curva ipsografica precedentemente costruita. Si immagini infatti di sostituire, sull'asse delle ordinate, i valori di altitudine con i valori temporali. Risulta intuitivo che alla quota minima della sezione di chiusura corrisponderà il tempo di corrivazione minimo (che per un punto coincidente con la sezione di chiusura è nullo), mentre alla quota massima corrisponderà il tempo di corrivazione massimo (cioè quello che è stato definito tempo di corrivazione del bacino). A questo punto all'altezza media corrisponderà proprio il tempo di ritardo, che può quindi essere valutato con la proporzione:

$$(h_{\max} - h_{\min}) : (t_c - 0) = (\bar{h} - h_{\min}) : (t_r - 0)$$

Il valore ottenuto è: 1.92 h.

Si riporta una tabella riassuntiva che contiene tutte le informazioni planimetriche, le caratteristiche altimetriche e i tempi caratteristici del bacino del Fiume Crocchio.

Bacino del fiume Crocchio	
Caratteristiche planimetriche	
Superficie	129.68 km ²
Lunghezza linea spartiacque	82 km
Lunghezza asta principale	40.4 km
Rapporto di circolarità	0.24
Fattore di forma	0.08
Rapporto di allungamento	0.32 (<i>forma allungata</i>)
Coefficiente di uniformità di Gravelius	2.03 (<i>forma rettangolare bislunga</i>)
Caratteristiche altimetriche	
Quota massima	1680 m s.l.m.
Quota minima	0 m s.l.m.
Quota media	587.9 m s.l.m.
Pendenza media	0.28
Tempi caratteristici	
Tempo di corrivazione	5.47 h
Tempo di ritardo	1.92 h

Tabella - Caratteristiche del Fiume Crocchio.

Analisi statistica delle piogge.

Per lo studio dei dati pluviometrici sono state considerate le stazioni di Albi, Petilia e Sersale:

Nome	Tipologia pluviometro	Quota (m s.l.m.)	Periodo funzionamento	
<i>Albi</i>	in telemisura	717	1919	2005
<i>Petilia</i>	elettronico	802	1934	2001
<i>Sersale</i>	meccanico	750	1920	1984

Tabella - Stazioni pluviometriche di riferimento



Figura 5-Estratto della carta delle stazioni di misura idropluviometriche, PAI (2001)

Le stazioni pluviometriche di *Casa Jolanda*, *Soveria Simeri*, *Sella Marina*, *Cropani*, *Botricello*, *Marcedusa*, non sono state considerate per la esigua e in alcuni casi totale assenza

di dati. Per le stazioni di cui si dispone di dati, invece, sono state reperite le serie storiche dei massimi annuali di piogge di durata di 1, 3, 6, 12, 24 ore.

Stazione di <i>Albi</i>					
Durata piogge (h)	1	3	6	12	24
Numerosità campione	51	51	51	51	51
Valor medio	32.0	52.2	69.9	96.6	131.4
Deviazione standard	12.8	22.2	31.3	47.7	75.1
Coefficiente di variazione	0.401	0.426	0.448	0.494	0.571

Stazione di <i>Petilia</i>					
Durata piogge (h)	1	3	6	12	24
Numerosità campione	37	37	37	37	37
Valor medio	31.8	50.6	70.3	93.8	119.9
Deviazione standard	9.3	18.4	28.7	41.5	59.2
Coefficiente di variazione	0.291	0.363	0.408	0.443	0.494

Stazione di <i>Sersale</i>					
Durata piogge (h)	1	3	6	12	24
Numerosità campione	38	39	38	37	40
Valor medio	31.1	53.5	76.4	103.6	149.5
Deviazione standard	10.9	16.7	24.9	42.5	71.2
Coefficiente di variazione	0.350	0.312	0.326	0.411	0.476

Tabelle - Dati dei massimi annuali di precipitazioni di durata 1,3,6,12,24 ore nelle stazioni di misura.

Modello probabilistico TCEV.

Per lo studio di eventi estremi la distribuzione probabilistica TCEV (Two Component Extreme Value) risulta essere tra le più affidabili. L'espressione risulta essere il prodotto tra due espressioni di Gumbel, rappresentanti una gli eventi ordinari e l'altra gli straordinari. La TCEV presenta di conseguenza il notevole vantaggio di interpolare meglio tutti gli eventi, mostrando una notevole flessibilità. Rispetto tuttavia ai due soli parametri della distribuzione di Gumbel, la TCEV ne presenta quattro, per la stima dei quali è conseguentemente necessario un campione piuttosto numeroso, purtroppo non sempre disponibile.

La funzione di probabilità cumulata ha la seguente espressione:

$$F_X(x) = \exp(-\lambda_1 e^{-x/\theta_1} - \lambda_2 e^{-x/\theta_2})$$

in cui è presente una componente *base* (pedice 1), relativa agli eventi più frequenti, ed una componente *straordinaria* (pedice 2), relativa ad eventi più gravosi e rari,

In particolare, λ_1 e λ_2 esprimono il numero medio annuo di eventi superiori ad una soglia delle due componenti, e θ_1 e θ_2 esprimono il valore medio di tali eventi.

Analogamente, ponendo $\alpha_i = 1/\theta_i$ ed $\varepsilon_i = \theta_i \cdot \ln(\lambda_i)$, la funzione di ripartizione assume la forma:

$$F_X(x) = \exp\{-\exp[-\alpha_1 \cdot (x - \varepsilon_1)] - \exp[-\alpha_2 \cdot (x - \varepsilon_2)]\}$$

che evidenzia quindi l'equivalenza di tale modello al prodotto di due funzioni di distribuzione cumulata di Gumbel.

Per la stima dei quattro parametri $\theta_*, \lambda_*, \theta_1, \lambda_1$ o solo di alcuni di essi si può tuttavia ricorrere ad un'analisi regionale, giustificata dall'ipotesi, verificata, che la Calabria possa essere intesa come una zona pluviometrica omogenea, all'interno della quale è lecito considerare costanti alcuni parametri. In relazione alle precipitazioni, si è dimostrato che i valori di θ_* e λ_*

rimangono invariati in tutta la regione, mentre il valore di λ_1 si può supporre costante in ciascuna delle tre sottozone in cui è stata suddivisa la Calabria: ionica, centrale, tirrenica. Si può dunque procedere a diversi livelli di regionalizzazione, in base alla numerosità del campione che si ha a disposizione:

- *Livello 0*: tutti i parametri vengono stimati su base campionaria, con metodi statistici quale quello della massima verosimiglianza (è il caso di campioni numerosissimi);
- *Livello 1*: i parametri ϑ_* e λ_* vengono stimati su base regionale, λ_1 e ϑ_1 su base campionaria;
- *Livello 2*: i parametri ϑ_* , λ_* , λ_1 vengono stimati su base regionale, ϑ_1 su base campionaria;
- *Livello 3*: tutti i parametri vengono stimati su base regionale (è il caso di totale indisponibilità di campioni).

Vista la buona disponibilità di dati campionari si è ritenuto opportuno procedere al livello 1 regionalizzazione.

Curve di possibilità pluviometrica.

Le curve di possibilità (o di probabilità) pluviometrica (CPP) esprimono la relazione fra le altezze massime annuali di precipitazione h e la loro durata t per un assegnato valore del *periodo di ritorno* T .

Esse sono solitamente descritte da una legge di potenza monomia del tipo:

$$h_{t,T} = a \cdot t^n$$

dove h e t sono rispettivamente l'altezza e la durata della precipitazione e a e n sono dei parametri dipendenti dal periodo di ritorno T .

Il periodo di ritorno può essere considerato come il periodo atteso di tempo che intercorre tra due successivi eventi in cui viene superato il “limite” di progetto. Esso è inoltre legato alla funzione di probabilità cumulata $F_X(x)$, che rappresenta, per definizione, la probabilità che la variabile casuale X non superi il valore x . La relazione è:

$$T = \frac{1}{1 - F_X(x)};$$

per cui, fissato un periodo di ritorno T , è immediatamente calcolabile la probabilità $F_X(x)$ che, in quel periodo di tempo, non venga superato il limite e da questa, noti i parametri della distribuzione, è valutabile il frattile x , cioè proprio il limite che, statisticamente, verrà superato ogni T anni.

Per la determinazione delle suddette curve ci si basa sull'analisi delle curve di frequenza costruite per le serie storiche dei massimi annuali delle piogge di durata 1, 3, 6, 12, 24 ore, adattando a ciascuna di esse, attraverso la stima dei parametri, un modello probabilistico. Dalle curve di frequenza $x - F_X(x)$, fissato il periodo di ritorno T (e di conseguenza il valore $F_X(x)$ associato) per ogni durata è possibile, quindi, ricavare il valore $h_{t,T}$. I valori così determinati vengono riportati su un diagramma (h, t) ed interpolati mediante delle curve caratterizzate dalla espressione (4.8).

Adottando una scala logaritmica, la legge di potenza della formula (4.8) diventa lineare:

$$\log_{10} h = \log_{10} a + n \log_{10} t \quad (4.10)$$

Ponendo $\log_{10} h = Lh$, $\log_{10} a = A$ e $\log_{10} t = Lt$, si ottiene:

$$Lh = A + n Lt \quad (4.11)$$

cioè l'equazione di una retta di intercetta A e coefficiente angolare n .

Note M coppie (h, t) per un certo periodo di ritorno, i parametri A e n possono essere stimati con il metodo dei minimi quadrati, con il quale si stima la retta che minimizza la somma dei quadrati degli scarti tra la retta stessa e i punti individuati dalle M coppie di valori noti.

Note dunque le M coppie (in questo caso sono 5, una per ciascuna durata: 1, 3, 6, 12, 24 ore), i parametri sono valutabili con le seguenti formule:

$$n = \frac{M \sum (Lt)(Lh) - \sum Lt \sum Lh}{M \sum Lt^2 - (\sum Lt)^2} \quad (4.12)$$

$$A = \frac{\sum Lh \sum Lt^2 - \sum Lt \sum (Lt)(Lh)}{M \sum Lt^2 - (\sum Lt)^2} \quad (4.13)$$

Noto A è possibile ricavare immediatamente a dalla semplice relazione $a = 10^A$.

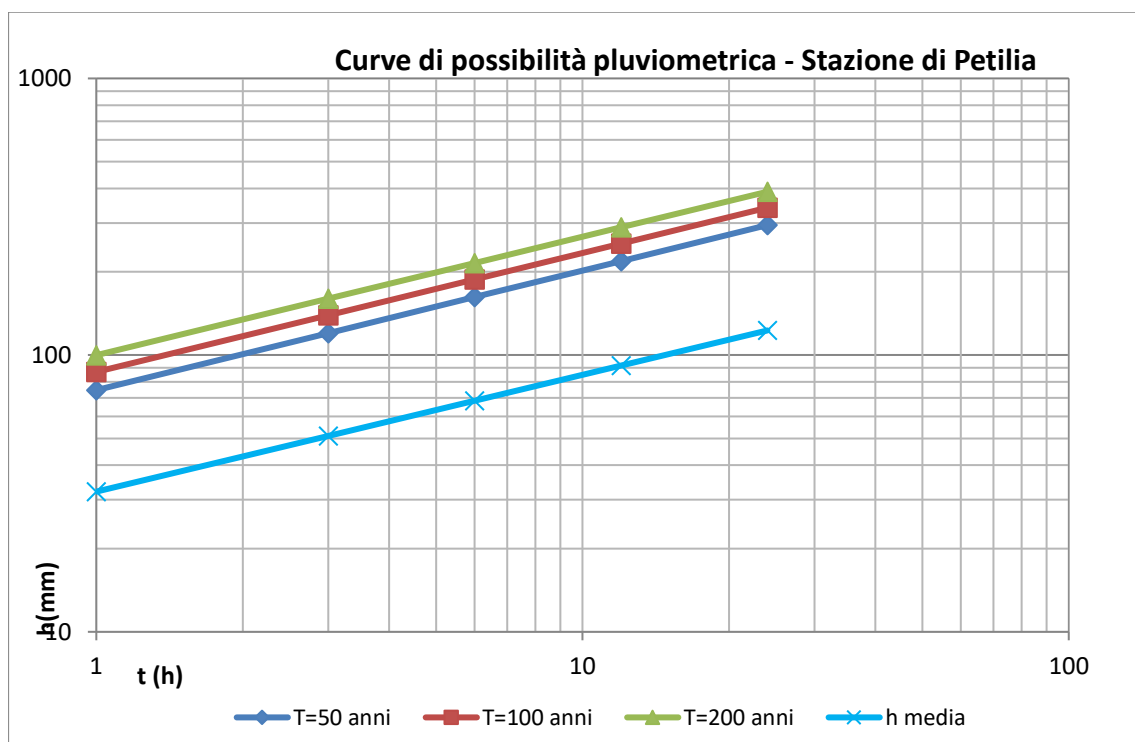
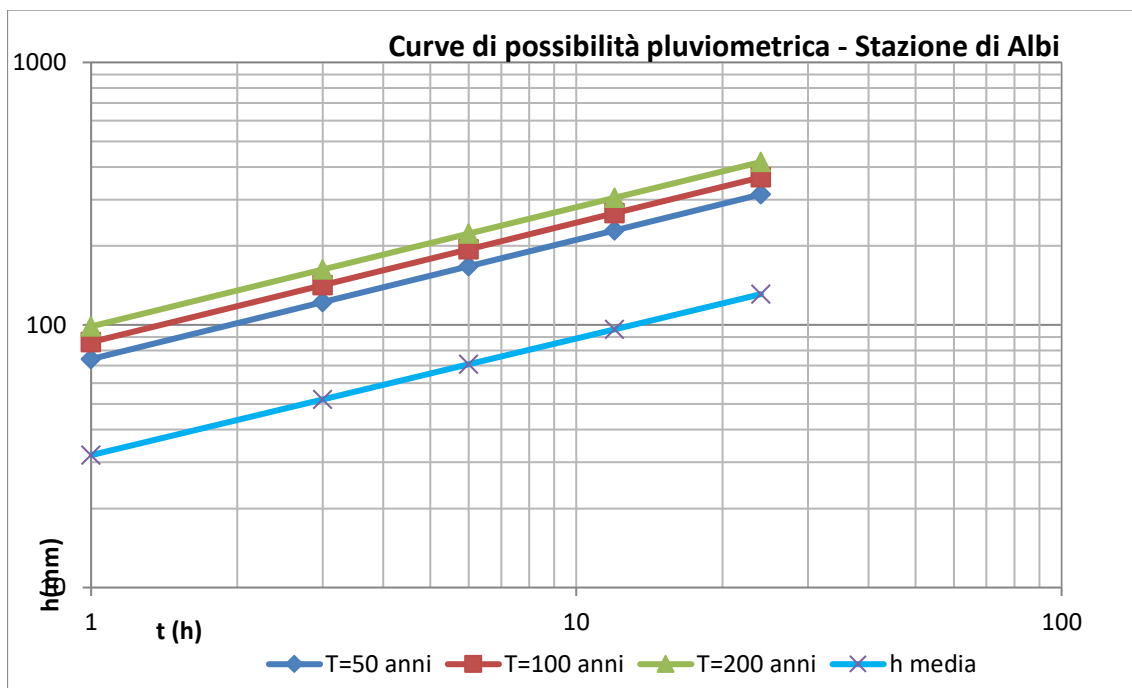
La procedura appena illustrata è stata seguita per tre volte, per ciascuno cioè dei seguenti periodi di ritorno: 50, 100, 200 anni. Ciò ha conseguentemente portato alla costruzione di tre curve di possibilità pluviometrica, caratterizzate dei seguenti parametri:

<i>Albi</i>	<i>n</i>	<i>A</i>	<i>a=10^A</i>	<i>Petilia</i>	<i>n</i>	<i>A</i>	<i>a=10^A</i>
T = 50	0.45	1.87	74.14	T = 50	0.432	1.87	74.75
T = 100	0.45	1.93	86.05	T = 100	0.43	1.94	86.97
T = 200	0.45	1.99	98.70	T = 200	0.43	1.99	99.96

<i>Sersale</i>	<i>n</i>	<i>A</i>	<i>a=10^A</i>
T = 50	0.48	1.88	77.47
T = 100	0.48	1.95	90.14
T = 200	0.48	2.01	103.61

Tabelle - Parametri delle CPP per le stazioni di Albi Petilia e Sersale

Le curve di probabilità pluviometrica, che appaiono come rette essendo rappresentate su scala logaritmica, sono riportate nella pagina seguente.



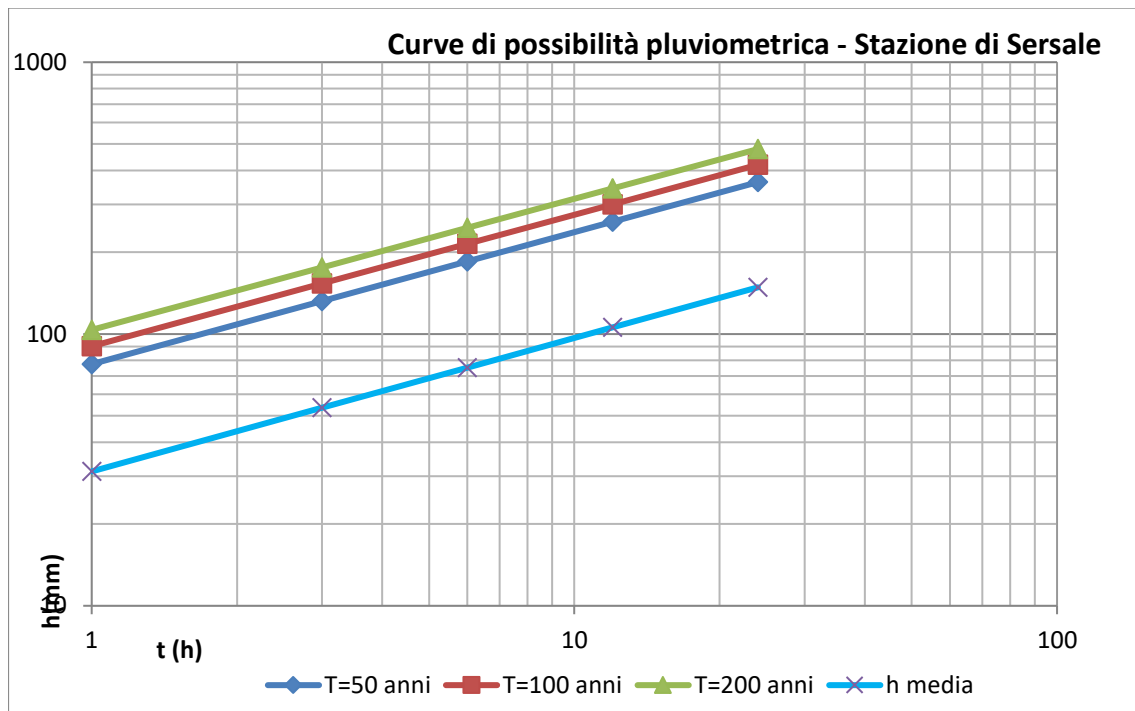


Figura 6- CPP delle stazioni di Albi, Petilia e Sersale.

Le rette di colore azzurro (denominate “h media”) interpolano i valori medi campionari delle tre stazioni.

Una volta stimati i parametri è possibile entrare nella curva caratterizzata da un certo periodo di ritorno e ricavare l'altezza di pioggia corrispondente anche a durate differenti da quelle considerate dal servizio idrografico (1, 3, 6, 12, 24 ore). È stata inoltre costruita la curva di possibilità pluviometrica areale per i diversi tempi di ritorno.

Per determinare la curva di possibilità pluviometrica areale (CPP media del bacino) è necessario definire le equazioni delle CPP dei pluviografi interni o adiacenti al bacino e effettuare la media dei parametri a ed n , pesata rispetto all'area d'influenza di ciascuna stazione, ottenendo l'equazione: $\bar{P}_t = \bar{a} \cdot t^{\bar{n}}$.

La definizione della superficie d'influenza è stata effettuata tracciando i topoieti con il metodo dei poligoni di Thiessen che consiste nell'unire con dei segmenti tutte le stazioni contigue situate all'interno del bacino o nelle sue immediate vicinanze, così da ottenere un reticolo a maglie triangolari, e nel tracciare quindi gli assi cioè le perpendicolari a tali segmenti nel loro

punto medio. Tali perpendicolari individuano dei poligoni irregolari, ciascuno dei quali contiene una stazione al suo interno; questa ha come area d'influenza quella ricadente all'interno del poligono.

<i>Areale</i>	<i>n</i>	<i>A</i>	<i>a=10^A</i>
T = 50	0.46	1.88	76.00
T = 100	0.46	1.95	88.40
T = 200	0.45	2.01	101.59

Tabella - Parametri delle CPP areale.

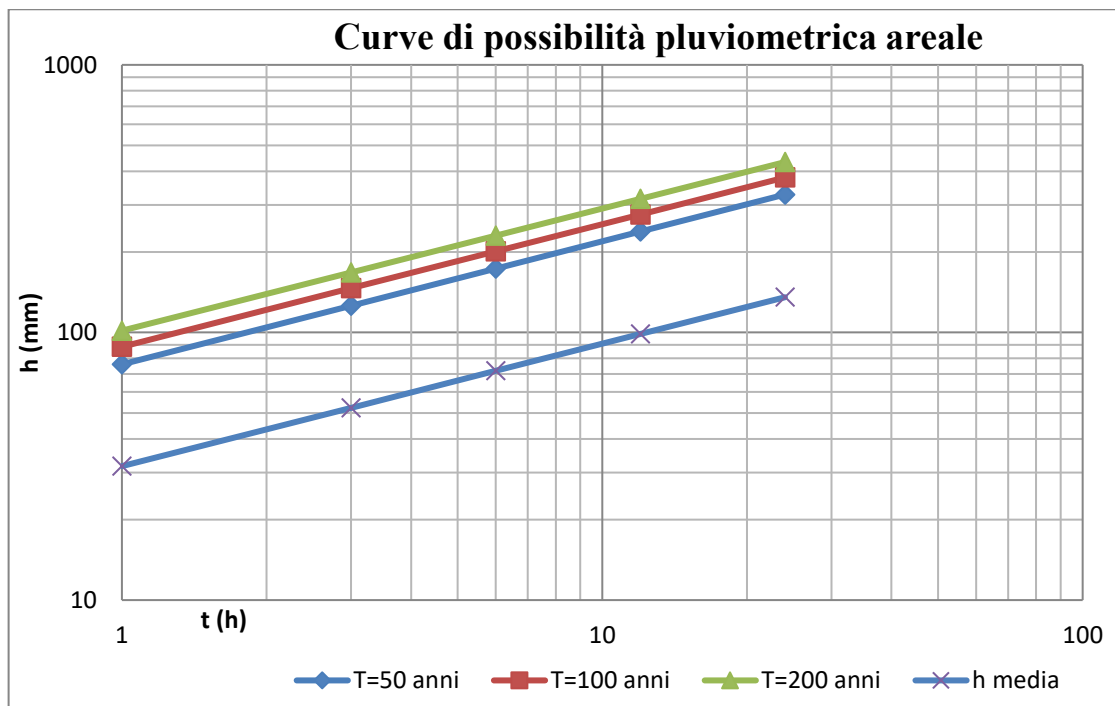


Figura 7- CPP areale.

Indagine fisiografica del bacino del fiume Crocchio

Per il fiume Crocchio sono state definite in precedenza le caratteristiche fisiografiche, altimetriche e planimetriche, inoltre è stato dedotto il valore del parametro CN sulla base

delle tabelle fornite dal SCS che tengono conto dell'uso del suolo e della permeabilità del bacino stesso. Il tempo di corrivazione è stato calcolato con la formula di Giandotti, il tempo di ritardo con l'ipotesi di Viparelli riportate nel paragrafo 4.4. Di seguito si riporta una tabella con le principali caratteristiche del bacino oggetto di studio:

Area (km ²)	Quota max (m.s.l.m.)	Pendenza media (-)	Tempo di corrivazione (ore)	Tempo di ritardo (ore)	CN II (-)
129.68	1680	0.28	5.47	1.92	76

Tabella - Principali caratteristiche del fiume Crocchio.

Determinazione delle portate critiche alla sezione di chiusura

Il valore critico della portata è stato individuato adottando la metodologia proposta dal VAPI (Valutazione delle piene in Italia), tecnica di analisi regionale di tipo statistico. In particolare l'approccio adoperato coincide con il terzo livello di regionalizzazione della procedura VAPI, cioè il metodo della portata indice. La stima della massima portata di piena Q_T corrispondente ad un periodo di ritorno prefissato T è valutata come:

$$Q_T = X'_T \cdot \bar{X}$$

in cui:

$\bar{X}$: è la media della distribuzione dei massimi annuali della portata al colmo,

X'_T : è il fattore di crescita.

La stima del fattore di crescita è una stima probabilistica, infatti il territorio regionale è stato suddiviso in tre sottozone idrometriche omogenee caratterizzate da un'unica distribuzione di probabilità di tale variabile interpretata con la legge probabilistica TCEV, quindi conoscendo il periodo di ritorno, quindi la probabilità di non superamento, invertendo si ricava il fattore di crescita X'_T .

La valutazione di $\bar{X}$ è stata effettuata grazie alla seguente legge empirica:

$$\bar{X} = \frac{C \cdot A \cdot \bar{I}_{tr}}{3.6}$$

In cui A è l'area in km^2 del bacino alla sezione di chiusura pari a 63,08 km^2 , $\bar{I}_{tr}$ parametro climatico, dato dalla media dei massimi annuali di intensità di pioggia di durata pari al tempo di ritardo del bacino (mm/h), e C , coefficiente di deflusso posto pari a 0.165.

La formula utilizzata per il calcolo di $\bar{I}_{tr}$ è la seguente:

$$\bar{I}_{tr} = \frac{\bar{h}_{tr}}{t_r} = \frac{42.67}{1.92} = 22.2 \text{ mm/h}$$

in cui t_r è il tempo di ritardo del bacino in ore mentre $\bar{h}_{tr}$ è la pioggia ricavata dalla curva di possibilità pluviometrica media per un tempo pari al tempo di ritardo

Il bacino del fiume Crocchio ricade per il 90 % nella sottozona ionica e per la restante parte nella sottozona centrale, per questo motivo si è fatto riferimento alla curva di possibilità pluviometrica areale costruita con il metodo dei poligoni di Thiessen. La portata indice vale:

$$\bar{X} = 64.19 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Sono state ricavate le portate critiche con periodo di ritorno pari a 50, 100, 200 anni, moltiplicando la portata indice per i diversi fattori di crescita associati ai diversi periodi di ritorno, i risultati sono riportati nella tabella che segue:

Periodo di ritorno T (anni)	Fattori di crescita X'_T	Portata critica $Q_{cri} (\text{m}^3 / \text{s})$
50	3.57	229.16
100	4.31	276.66
200	5.06	324.81

Tabella 4.7- Portate critiche per la CPP areale.

Profilo di moto permanente: modello monodimensionale

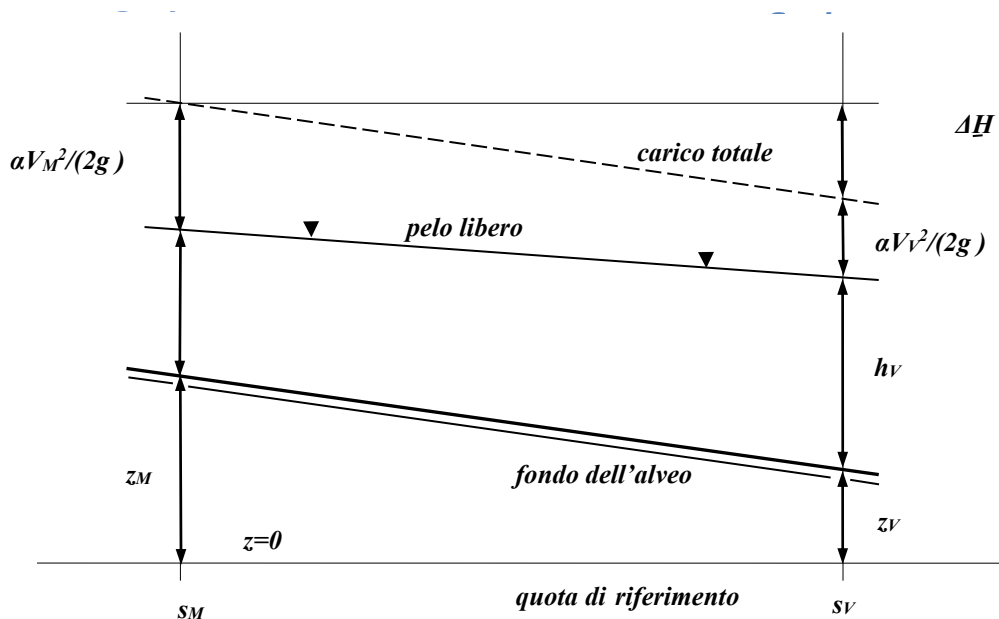
Negli alvei naturali si suole suddividere la sezione trasversale in tre parti, caratterizzate da tre valori di scabrezza, in cui la velocità si possa ritenere uniformemente distribuita: la parte centrale o canale principale (*channel*), interessata dalle portate più basse, e le banchine laterali e golene (*right overbank* e *left overbank*), interessate dalle portate più alte.

Le ipotesi alla base del modello per la determinazione del profilo idrico della corrente sono quelle di condizioni di moto permanente monodimensionale, corrente gradualmente variata, pendenze longitudinali del fondo dell'alveo non eccessive.

L'ipotesi di moto uniforme, che costituisce una semplificazione rispetto allo schema minimo di moto permanente, non è generalmente consentita in quanto comporta approssimazioni eccessive.

Il modello si basa sulla seguente equazione di conservazione dell'energia della corrente misurata rispetto ad un piano orizzontale tra due sezioni generiche di monte e di valle, la cui

risoluzione è ottenuta per iterazione:
$$\left\{ z_M + h_M + \frac{\alpha V_M^2}{2g} \right\} = \left\{ z_V + h_V + \frac{\alpha V_V^2}{2g} + \Delta H \right\}$$



z_M e z_V sono le quote dei punti più depressi delle sezioni trasversali rispetto al piano di riferimento, h_M e h_V sono le profondità d'acqua, V_M e V_V le velocità medie (date dal rapporto

tra portata e area bagnata della sezione), α è il coefficiente di Coriolis di ragguaglio delle potenze cinetiche, g l'accelerazione di gravità e ΔH le perdite di carico nel tratto considerato.

Le perdite di energia che subisce la corrente fluida tra due sezioni trasversali contigue sono espresse come segue:

$$\Delta H = L \cdot J_m$$

in cui L è la lunghezza del tratto analizzato e J_m è un valor medio della cadente piezometrica (che rappresenta le perdite di carico per unità di lunghezza).

La determinazione della cadente J , sezione per sezione, avviene tramite l'equazione di moto uniforme di Strickler:

$$Q = A \cdot K \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2}$$

in cui Q è la portata totale transitante nell'alveo, A è l'area bagnata della sezione trasversale, R il raggio idraulico (dato dal rapporto tra area e contorno bagnato), K è l'inverso del coefficiente di scabrezza n di Manning.

La cadente J è quindi esprimibile, in ciascuna sezione, ma il suo valore rappresentativo nel tratto considerato J_m è valutato come la media (aritmetica, geometrica o armonica) dei due valori consecutivi.

Il software HEC-RAS seleziona automaticamente l'equazione più appropriata per il calcolo di J_m , secondo che, nel tratto considerato, l'alveo sia a forte o debole pendenza e la corrente sia lenta o veloce, accelerata o decelerata.

4.2.1 Procedura di calcolo del profilo

La procedura di calcolo è così articolata:

- A partire dal valore noto di tirante nella sezione a valle (per condizioni di corrente lenta) si calcola, per tale sezione, l'energia e la cadente;

- Si ipotizza un valore di tirante nella sezione immediatamente a monte e si calcola anche per questa l'energia e la cadente;
- Si determina il valore della cadente media e la differenza di energia fra le due sezioni;
- Si calcola $\Delta S = \frac{\Delta E}{J_m}$;
- Si itera tale procedimento finché non si trova un valore di tirante tale che il ΔS calcolato sia pari all'effettiva distanza rilevata fra le due sezioni.

4.3 Valutazione del coefficiente di scabrezza

Discorso a parte merita la determinazione del valore del coefficiente di scabrezza. La scabrezza che si esplica tra una corrente idrica e l'alveo naturale che la contiene è dovuta, infatti, non solo alla granulometria dei sedimenti del fondo, ma anche a diversi altri fattori tra i quali si possono annoverare le differenti forme che può assumere il fondo, gli ostacoli che ne possono sbarrare il cammino, le irregolarità della sezione trasversale, l'andamento sinuoso del corso d'acqua.

Il coefficiente di scabrezza, pertanto, può essere determinato in diversi modi, alcuni più rigorosi, altri più empirici. In generale si può ricorrere alla formula di Cowan (*"Estimating hydraulic roughness coefficients"*, 1956), che tiene conto di due diversi processi dissipativi dell'energia della corrente: uno legato alla forma, alla dimensione ed alla disposizione degli elementi che determinano la scabrezza e l'altro agli ulteriori effetti dissipativi generati nei bruschi cambiamenti di forma e direzione della sezione trasversale.

Tale formula assume la forma:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5 \quad (4.4)$$

con n_0 =valore della scabrezza dovuto al materiale di fondo (nell'ipotesi di alveo cilindrico e corrente uniforme), n_1 =valore addizionale della scabrezza dovuto all'effetto delle irregolarità della sezione trasversale, n_2 =valore addizionale della scabrezza dovuto alla variazione di forma e dimensione della sezione lungo il tronco, n_3 =valore addizionale della scabrezza dovuto alle ostruzioni (radici e vegetazione varia, accumuli di tronchi, dighe di detrito), n_4 =valore addizionale della scabrezza dovuto alla vegetazione ed m_5 =fattore di correzione dovuto all'andamento sinuoso del corso d'acqua.

Tali valori sono tabulati sulle numerose pubblicazioni della letteratura presente in materia.

Nel caso in esame sono stati stimati i seguenti valori, considerati costanti per tutto il tronco:

$n = 0.035$ per il canale centrale

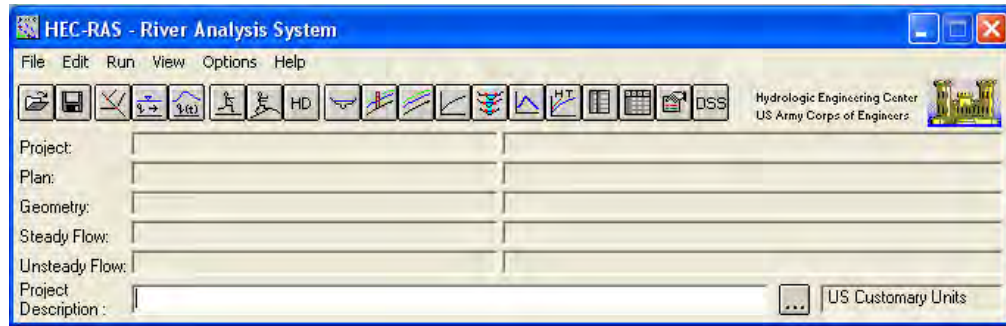
$n = 0.04$ per le golene.



Figura 4.5-Condizioni vegetazionali e granulometriche dell'alveo (periodo autunnale)

Calcolo del profilo di rigurgito con il software HEC-RAS

La ricostruzione dei profili della superficie libera per i tratti fluviali analizzati è stata effettuata mediante il software di simulazione *River Analysis System* del *US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center* (HEC-RAS), (versione 3.1.2).



Interfaccia utente HEC-RAS

Tale software permette di tracciare qualitativamente il percorso dell'alveo fluviale nel tratto in esame, quindi di disegnare le sezioni trasversali e di compiere analisi di moto permanente con conseguente tracciamento dei profili di rigurgito.

Per procedere alla simulazione con HEC-RAS, è necessario fornire al software, oltre al valore di portata e di scabrezza, anche altri dati riguardanti la geometria dell'alveo nel tratto oggetto di studio.

Per quanto riguarda la portata, si è considerato il valore calcolato per un tempo di ritorno pari a 200 anni. Tale valore è pari a $325,00 \text{ m}^3/\text{s}$.

Per il coefficiente di scabrezza, si è considerato il valore calcolato in precedenza con la formula di Cowan.

Le informazioni relative alla geometria sono state desunte dai rilievi effettuati in situ e dalla cartografia disponibile (scala 1:5000) e sono rappresentate dalle sezioni trasversali e dal profilo longitudinale.

Per quanto riguarda il valore della pendenza del fondo alveo, questa è stata misurata a partire dalla cartografia in scala 1:5000, considerando la distanza fra due punti quotati posti in prossimità della sezione in esame e quindi calcolandola come rapporto tra la differenza di altezza fra questi due punti e la distanza longitudinale misurata sulla carta.

Infine, le condizioni al contorno inserite nel programma sono di corrente lenta, avendo assunto a valle il raggiungimento dell'altezza di moto uniforme fornendo in input al software il valore di pendenza pari a 0.005.

Si è quindi verificata la veridicità dell'ipotesi fatta mediante l'analisi dei valori del numero di Froude ($Fr < 1 \rightarrow \text{corrente lenta}$), restituiti in output dal software.

Per il tratto oggetto di studio sono indicate le stazioni identificative delle diverse sezioni trasversali (river stations), numerate in senso crescente risalendo da valle verso monte. Accanto ad ogni sezione si indica la lunghezza in metri (L_c, L_{sx}, L_{dx}) che la separa da quella immediatamente a valle.

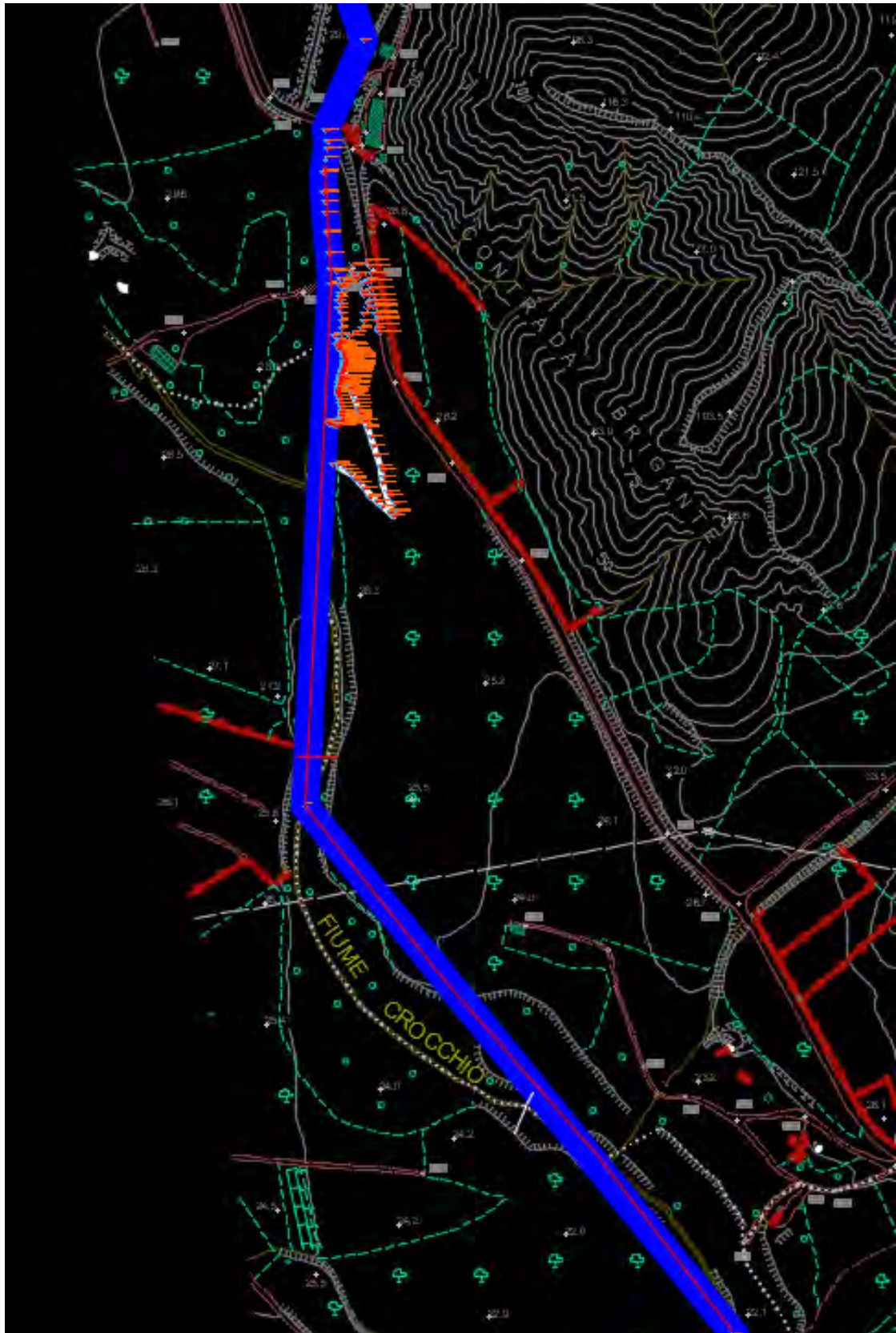
Per la definizione geometrica delle sezioni trasversali è necessario inoltre inserire i valori dei coefficienti di contrazione ed espansione. Tali valori si assumono pari rispettivamente a 0.1 e 0.3, nei casi più comuni di transizioni graduali in regime subcritico, e a valori più elevati (0.3 e 0.5) in tipiche sezioni con presenza di ponti.

Per il disegno della sezione si è proceduto inserendo i punti rilevati con le coordinate in un piano di ascisse e ordinate. Sull'asse delle ordinate sono state riportate le quote dei punti rilevati (esprese in metri s.l.m.) mentre sull'asse delle ascisse sono state riportate le distanze orizzontali fra i punti in un sistema di riferimento arbitrario.

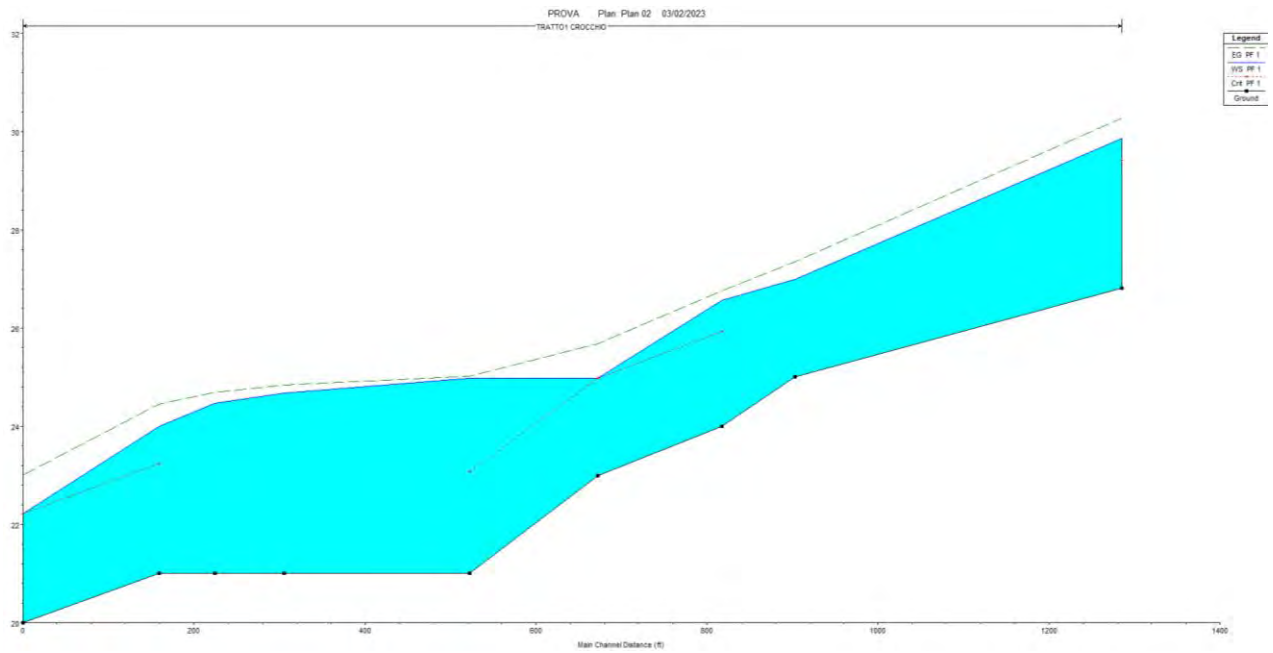
È stato necessario specificare inoltre le ascisse dei punti che delimitano il canale centrale della sezione dell'alveo.

Inseriti quindi tutti i dati geometrici e idraulici, si è proceduto alla simulazione idraulica in moto permanente.

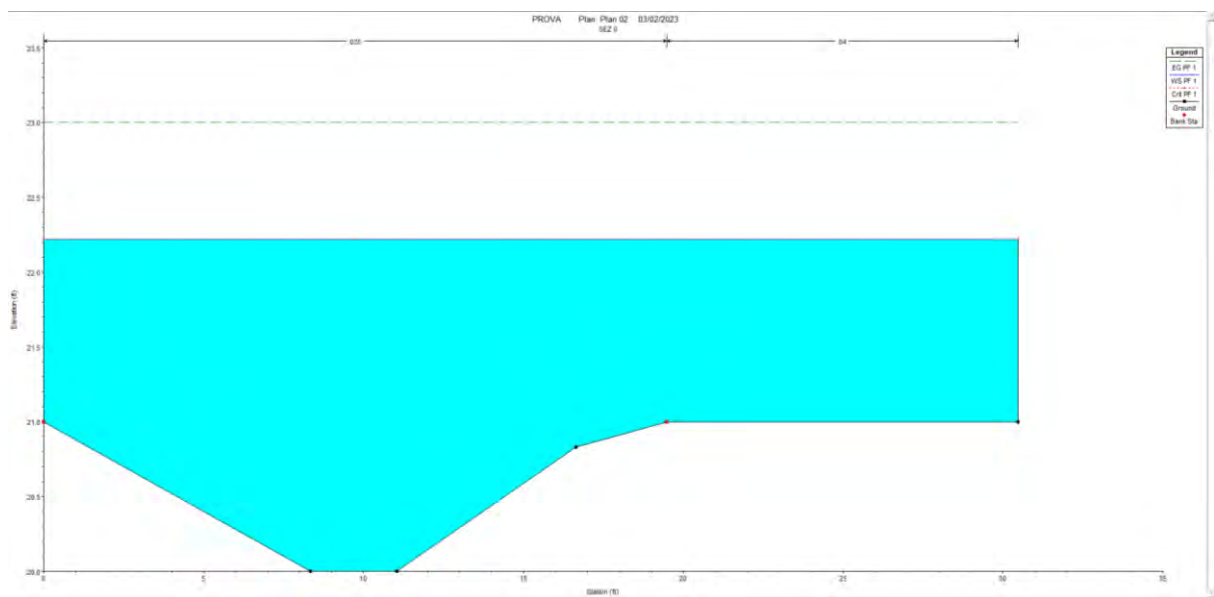
Considerazioni sui risultati dell'analisi idraulica



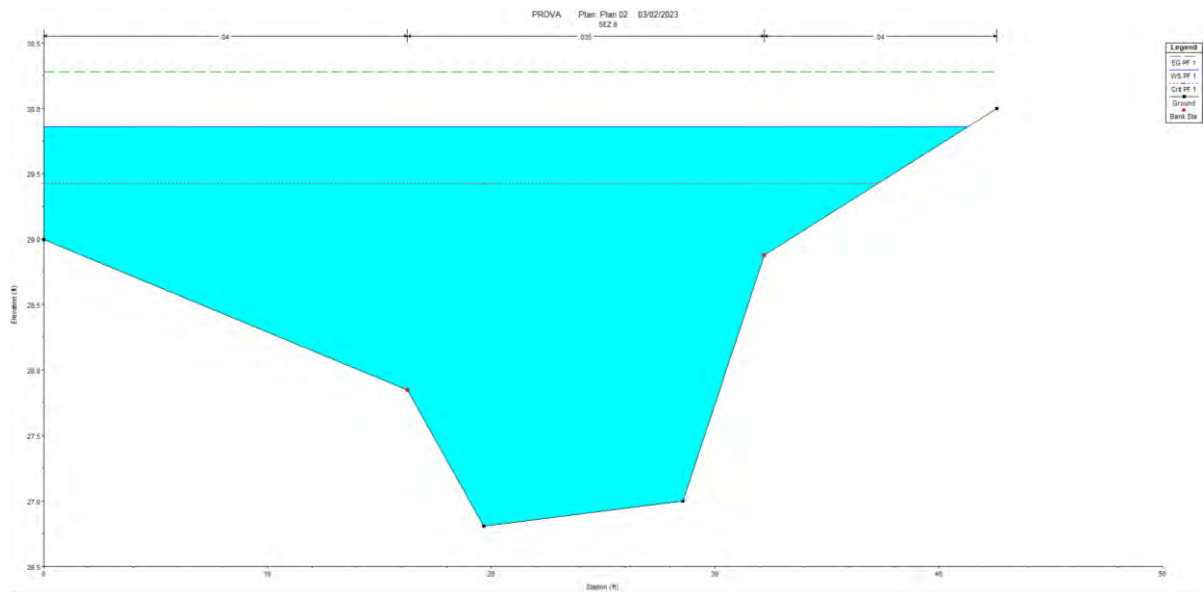
Modellazione idraulica Fiume Crocchio - Planimetria modello Stato Attuale



Profilo di moto permanente ante intervento di sistemazione

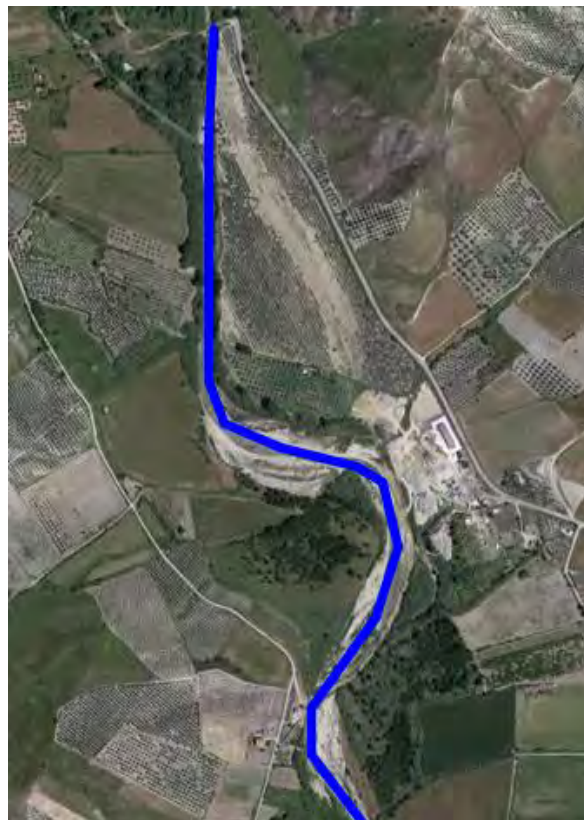


Sezione di valle ante intervento di riprofilatura



Sezione di monte ante intervento di riprofilatura

Dall'analisi idraulica si evince che la portata di piena di progetto non è contenuta nelle sezioni attuali.

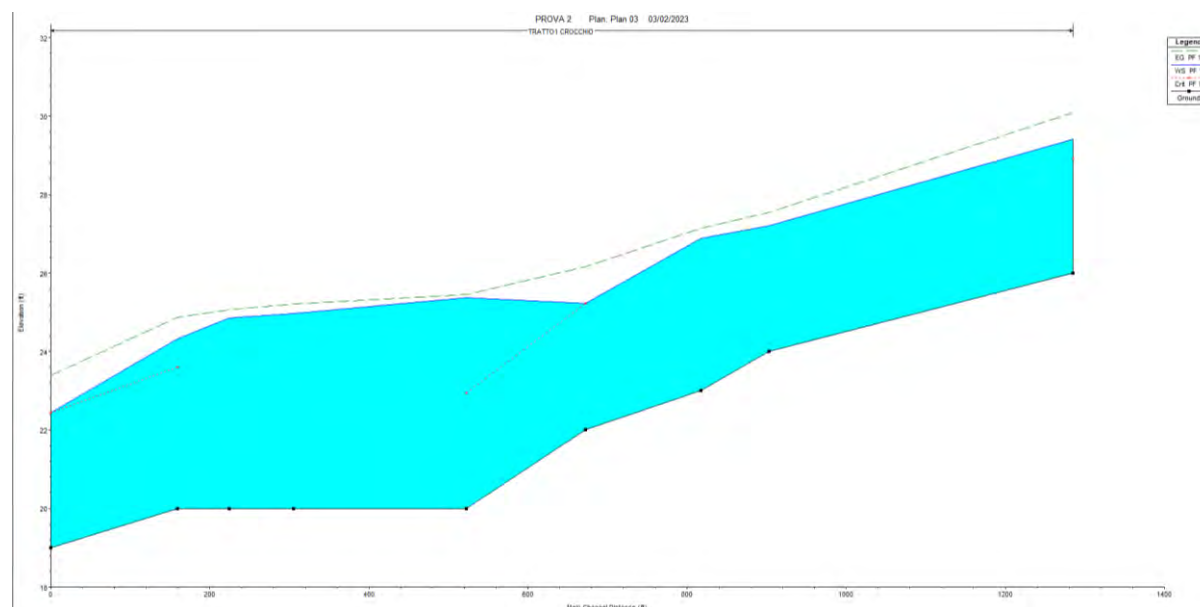


Intervento di Riprofilatura su base ortofoto.

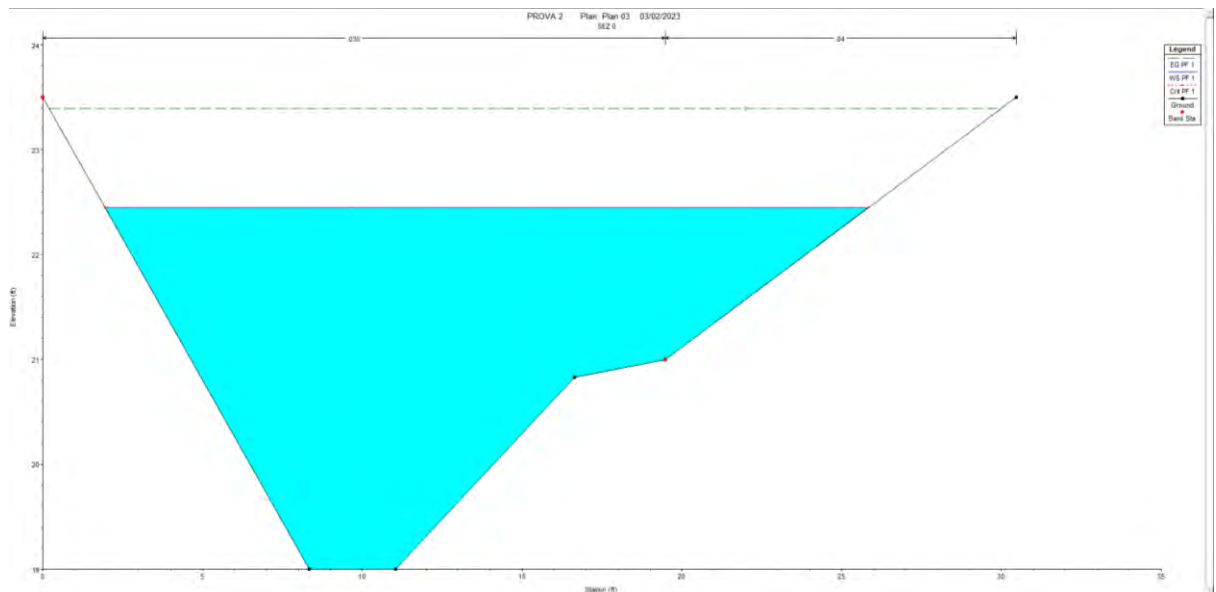
Per il tratto di intervento lungo il Fiume Crocchio per un'estensione di circa 1200,00 m si prevede la risagomatura delle sezioni con una sezione regolare trapezia che prevede una parte centrale di estensione pari a 10,00 m e sulle golene destra e sinistra la creazione di un rilevato spondale a protezione. Tale sistemazione prevede la realizzazione di rilevati dx e sx per il contenimento della piena duecentennale; il materiale di scavo in esubero delle lavorazioni di risagoma sarà compensato dall'acquisizione di materiale inerte dall'alveo del fiume in modo tale da consentire un intervento a costo zero.

Si precisa inoltre che dei 19.440,00 mc di materiale proveniente dallo scavo per la realizzazione della savanella centrale, mc 15.720,00 saranno riutilizzati in sito per la realizzazione delle sponde laterali ed i rimanenti 3.720,00 mc saranno portati fuori dall'alveo del torrente a compenso dei lavori.

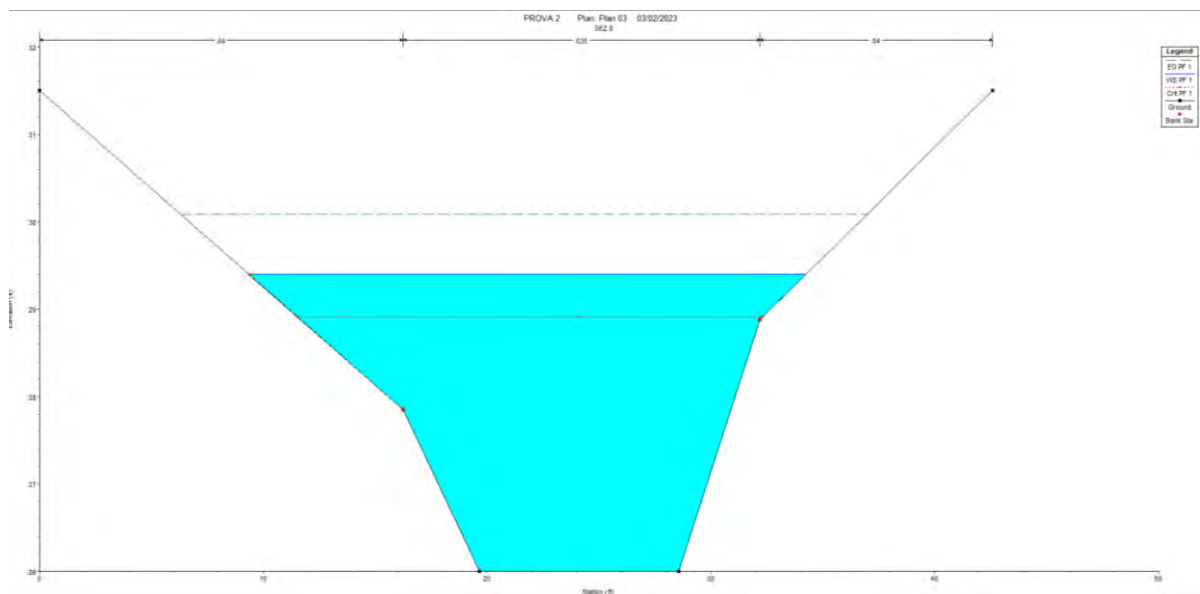
Gli interventi previsti dal presente progetto non modificheranno significativamente le caratteristiche di deflusso del corso d'acqua, tuttavia grazie alla riprofilatura prevista nelle sezioni sopra citate ci sarà un miglioramento delle condizioni di deflusso tale per cui si avrà una maggiore capacità di smaltimento delle portate di piena.



Profilo di moto permanente post intervento di sistemazione



Sezione di valle post intervento di riprofilatura



Sezione di monte post intervento di riprofilatura

Dal confronto ante e post intervento di riprofilatura si può notare la bontà dell'intervento, in quanto la portata duecentennale dopo la risagomatura delle sezioni è sempre contenuta nelle sezioni sistemate ed è sempre garantito il franco di oltre 1,50 metri.

Si rimanda agli elaborati grafici per approfondimenti sulla tipologia dell'intervento di risagomatura delle sezioni.