

POLITECNICO di TORINO

Collegio di Ingegneria Civile

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Civile

a.a. 2017/2018



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**ETEROGENEITÀ IDRAULICA NEI CORSI D'ACQUA A CANALI  
INTRECCIATI. IL CASO DEL TORRENTE BORBERA**

Relatori: Prof. Vincenzo Carlo Camporeale

Candidato: Fabio Sola

Ing. Riccardo Vesipa

Prof. Luca Ridolfi

Dicembre 2018



## **RINGRAZIAMENTI**

Questo lavoro rappresenta per me la fine di un ciclo, un ciclo incominciato molti anni fa, ancora prima di iniziare i miei studi accademici. Si conclude quel periodo della vita in cui un ragazzo è studente e vede il mondo con gli occhi di chi ancora deve affrontare ciò che la vita lo attende. Questi ultimi anni qui al Politecnico di Torino mi hanno permesso di crescere come persona e di avere la fiducia necessaria ad affrontare il mondo che mi aspetta. Sono molto contento di questo traguardo dato che già dalle scuole medie volevo diventare ingegnere e per quanto la strada sembrava sempre più lunga ed irta di ostacoli sono fiero di poter dire ce l'ho fatta.

Un ringraziamento va ai miei relatori: Vincenzo Carlo Camporeale, mio relatore e docente nel mio percorso di studio; Riccardo Vesipa, per la sua disponibilità e grande aiuto che mi ha dato nella stesura di questo lavoro; ed ultimo a Luca Ridolfi per il supporto durante questo lungo periodo.

In fine ringrazio tutti coloro che mi sono stati vicini e che mi hanno sostenuto anche nei momenti di sconforto e di delusione. In particolar modo ringrazio la mia famiglia e la mia ragazza che mi hanno sempre incoraggiato in qualunque situazione mi trovassi e non hanno mai perso la fiducia in me.

Sono sicuro che se le persone a me vicine continueranno a sostenermi e con le competenze apprese nei miei anni di studio, sarò in grado di superare tutti gli ostacoli che la vita mi porrà davanti.

Fabio

# SOMMARIO

<b>RINGRAZIAMENTI</b>	<b>I</b>
<b>SOMMARIO</b>	<b>II</b>
<b>1 INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>2 TIPOLOGIE DI MORFOLOGIA FLUVIALE</b>	<b>3</b>
<b>2.1 CORSI D'ACQUA A CANALI INTRECCIATI</b>	<b>6</b>
<b>3 DESCRIZIONE DEL SITO</b>	<b>9</b>
<b>3.1 CARATTERIZZAZIONE GEOMORFOLOGICA E SELEZIONE DEL TRATTO ANALIZZATO</b>	<b>9</b>
<b>3.2 CARATTERISTICHE IDROLOGICHE DEL TORRENTE</b>	<b>15</b>
<b>3.2.1 PORTATE ANNUALI</b>	<b>15</b>
<b>3.2.2 PORTATE CON TEMPI DI RITORNO MAGGIORI DELL'ANNO</b>	<b>20</b>
3.2.2.1 <i>Coefficiente di deflusso</i>	20
3.2.2.2 <i>Intensità di pioggia</i>	21
<b>3.3 MATERIALE DI FONDO</b>	<b>25</b>
<b>4 MODELLO NUMERICO</b>	<b>29</b>
<b>4.1 SOFTWARE SIMULAZIONE - BASEMENT</b>	<b>30</b>
<b>4.1.1 EQUAZIONI DI SAINT VENANT</b>	<b>31</b>
4.1.1.1 <i>Forma conservativa delle SVE</i>	31
4.1.1.2 <i>Conservazione della quantità di moto</i>	32
4.1.1.3 <i>Condizioni di chiusura interna</i>	33
4.1.1.4 <i>Condizioni al contorno</i>	34
<b>4.1.2 EQUAZIONI SHALLOW WATER</b>	<b>35</b>
4.1.2.1 <i>Condizioni di chiusura interne</i>	37
4.1.2.1.1 <i>Turbolenza</i>	37
4.1.2.1.2 <i>Sforzo di taglio al fondo (Bed Shear Stress)</i>	37
4.1.2.2 <i>Condizioni al contorno</i>	38
<b>4.1.3 METODI PER RISOLVERE LE EQUAZIONI DI FLUSSO</b>	<b>38</b>
4.1.3.1 <i>Metodo dei volumi finiti</i>	38
<b>4.1.4 EQUAZIONE DI SAINT – VENANT DISCRETIZZATE</b>	<b>39</b>

4.1.4.1	<i>Raggio idraulico e coefficiente d'attrito</i>	41
<b>4.2</b>	<b>DATI DI INPUT</b>	<b>42</b>
<b>4.3</b>	<b>CONSTRUZIONE DELLA MESH DI CALCOLO</b>	<b>43</b>
4.3.1	<b>ELIMINAZIONE DELLA VEGETAZIONE</b>	<b>43</b>
4.3.2	<b>SOTTOCAMPIONAMENTO</b>	<b>46</b>
4.3.3	<b>MODELLAZIONE MESH</b>	<b>51</b>
4.3.3.1	<i>Comandi per la modellazione della Mesh</i>	52
4.3.3.2	<i>Ottimizzazione numerica della mesh</i>	53
4.3.3.3	<i>Dominio</i>	54
4.3.3.4	<i>Breakline</i>	55
4.3.3.5	<i>Interpolazione delle quote</i>	58
4.3.3.6	<i>Materiale di fondo</i>	59
4.3.3.7	<i>Visualizzazione 3D della Mesh</i>	61
4.3.3.8	<i>Esportazione Mesh</i>	63
<b>4.4</b>	<b>CONDIZIONI AL CONTORNO</b>	<b>64</b>
4.4.1	<b>SEZIONE D'INGRESSO E D'USCITA</b>	<b>64</b>
4.4.2	<b>IDROGRAMMA D'INGRESSO</b>	<b>65</b>
4.4.3	<b>ANALISI DELLA FUORIUSCITA DALL'AREA DI COMPUTAZIONE</b>	<b>66</b>
4.4.4	<b>COEFFICIENTE DI ATTRITO</b>	<b>67</b>
<b>4.5</b>	<b>CONDIZIONE INIZIALE</b>	<b>70</b>
<b>4.6</b>	<b>DEFINIZIONE TIME STEP</b>	<b>71</b>
<b>4.7</b>	<b>DEFINIZIONE DEI DATI DA OTTENERE COME OUTPUT.</b>	<b>72</b>
<b>5</b>	<b>RISULTATI</b>	<b>73</b>
5.1	<b>VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI</b>	<b>75</b>
5.2	<b>COMPORTAMENTO GLOBALE DEL TRATTO SIMULATO</b>	<b>90</b>
5.3	<b>COMPORTAMENTO DEI CANALI INTRECCIATI DEL TRATTO SIMULATO</b>	<b>105</b>
5.3.1	<b>ESTRAZIONE SEZIONI</b>	<b>105</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>111</b>
	<b>ALLEGATI</b>	<b>113</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>135</b>
	<b>SITOGRAFIA</b>	<b>135</b>



## **1 INTRODUZIONE**

Lo scopo di questo lavoro è studiare ed esaminare le caratteristiche idrauliche di un torrente montano a canali intrecciati tramite un modello numerico bidimensionale. Il torrente scelto è il Borbera, situato nell'Alessandrino, affluente dello Scrivia. Tra il comune di Cabella Ligure e Albera Ligure il torrente presenta un tratto rettilineo, ideale per lo studio. Le simulazioni sono state effettuate con il software BASEMENT sviluppato dal Politecnico federale di Zurigo.

L'obiettivo di questa tesi è duplice. In primo luogo, si vuole elaborare il rilievo, che presenta una altissima densità di dati, per generare il dominio di computazione fedele all'alveo. In secondo luogo, si vuole caratterizzare idraulicamente e morfologicamente il torrente. Sarà pertanto necessario studiare sia il comportamento globale sia il comportamento localizzato in determinate sezioni del torrente. Il comportamento globale del torrente verrà studiato tramite un'indagine statistica sui risultati ottenuti dalla simulazione. Il comportamento locale verrà, invece, studiato tramite il calcolo di parametri idraulici e morfologici di determinate sezioni d'alveo.



## 2 TIPOLOGIE DI MORFOLOGIA FLUVIALE

Le morfologie fluviali che possono assumere i corsi d'acqua dipendono dalla pendenza della valle, dalla granulometria dei sedimenti, dal regime idrologico e dall'intensità della vegetazione. Questi fattori influenzano non solo le caratteristiche idrauliche dei canali ma anche il loro tracciato planimetrico. In letteratura vengono definite tre morfologie fluviali: corsi d'acqua rettilinei, meandriiformi e corsi d'acqua a canali intrecciati.

I corsi d'acqua rettilinei sono piuttosto rari in natura dato che generalmente non si riscontrano per tratti più lunghi di 10 volte la larghezza dell'alveo. I fiumi a canali rettilinei si riconoscono perché la portata liquida viene convogliata all'interno dell'unico canale che occupa l'intera sezione d'alveo ed ha un tracciato lineare. Generalmente la sezione dell'alveo presenta una notevole simmetria mantenuta per tutto il tracciato. La ridotta pendenza del fondo (dell'ordine di qualche metro al chilometro) stabilizza il fondo dell'alveo impedendo la sua evoluzione. I fiumi rettilinei mantengono le proprie caratteristiche finché non si vengono a generare piccole perturbazioni del tracciato, causate dallo spostamento delle sponde o dalla sedimentazione non simmetrica nella sezione d'alveo, che causano una sinuosità nel percorso. Questa sinuosità nel tempo evolverà sempre di più cambiando la morfologia del corso d'acqua. In figura 2.1 è mostrato il fiume Po nel comune di Verolengo (Piemonte) dove il canale è pressoché rettilineo.



**Figura 2.1** Canale rettilineo. Il fiume Po a Verolengo.

I corsi d'acqua meandriiformi sono caratteristici per la sinuosità del loro tracciato. Le curve, tipiche dei canali meandriiformi, sono dette meandri, i quali hanno generalmente una sezione asimmetrica. La sezione è formata da una zona di erosione, nell'estradosso del meandro, e da una zona di sedimentazione, all'intradosso del meandro. La portata liquida, come per i canali rettilinei, viene convogliata all'interno dell'unico canale che occupa l'intera sezione d'alveo. Questa caratteristica, legata alla pendenza del fondo che è generalmente maggiore dei canali rettilinei, permette al meandro di evolvere nello spazio e nel tempo. Nella maggior parte dei casi un corso d'acqua da canale rettilineo evolve in un canale meandriiforme quando la sinuosità del canale è tale da erodere le sponde. Il materiale eroso verrà depositato nell'intradosso del meandro spostando così la corrente verso l'esterno e permettendo al meandro di migrare verso valle. In figura 2.2 è mostrato il torrente Tanaro nel comune di Cigliè (Piemonte) nel suo tracciato meandriiforme.



**Figura 2.2** Canale meandriiforme. Il torrente Tanaro a Cigliè.

I corsi d'acqua a canali intrecciati (in inglese braided rivers) sono una morfologia tipica dei torrenti montani. La particolare idrologia dei torrenti e la presenza di materiale solido incoerente disponibile per il trasporto solido, fanno sì che le zone montane siano il luogo ideale per lo sviluppo di questi canali. La portata fluisce all'interno di canali separati da accumuli di materiale solido chiamati barre. Le barre mantengono il flusso separato nei canali fino alla loro confluenza. L'elevata pendenza dell'alveo (maggiore rispetto a qualsiasi morfologia) permette al corso d'acqua di trasportare notevoli quantità di materiale solido. La migrazione delle barre e delle biforcazioni comporta l'abbandono di alcuni canali e l'attivazione di canali più antichi permettendo la contemporanea esistenza di habitat differenti nello stesso tratto di torrente. Per esempio, si possono incontrare zone con acqua stagnante oppure zone di rapide. In figura 2.3 è mostrato il torrente Pellice tra i comuni di Vigone e Villafranca (Piemonte) con caratteristiche tipiche dei canali intrecciati.



**Figura 2.3** Torrente a canali intrecciati. Il torrente Pellice tra Vigone e Villafranca.

## **2.1** *CORSI D'ACQUA A CANALI INTRECCIATI*

Questa tesi affronta lo studio di un corso d'acqua a canali intrecciati, pertanto è necessario introdurre le caratteristiche fluviali di questo tipo di morfologia fluviale. Questa particolare classe di corsi d'acqua prende vita soprattutto nelle regioni montane (come visibile nella figura 2.4), dove le pendenze sono elevate e il materiale solido di fondo è abbondante e disponibile al trasporto. La portata, a causa del regime pluviale montano, varia in modo consistente durante l'anno. Le diverse portate definiscono differenti caratteristiche idrauliche all'interno dei canali. Infatti, la portata che viene convogliata all'interno dei canali si separa in modo eterogeneo attribuendo caratteristiche idrauliche diverse ad ogni canale. Al fluire della portata alcuni canali possono essere asciutti o bagnati e attivi o non attivi. I canali attivi sono i canali in cui avviene il trasporto solido. Non tutti i canali bagnati sono canali attivi e perciò solo alcuni muteranno nel tempo causandone la morte o la nascita di nuovi.



**Figura 2.4** Fiume Piave. Tratto in cui ha una morfologia a canali intrecciati.

Come già detto in precedenza, i corsi d'acqua a canali intrecciati sono corsi d'acqua in cui il flusso è suddiviso in più canali separati da barre (o isole) di sedimenti. Ogni canale presenta caratteristiche idrauliche diverse che dipendono dalla pendenza del canale, la portata che viene convogliata all'interno di esso e la capacità di movimentazione del materiale di fondo. Le barre, accumuli di materiale solido che si formano all'interno dell'alveo, dividono la portata in più canali per mezzo delle biforcazioni che si vengono a creare a monte ed a valle di esse. Infatti, il numero di canali idraulicamente attivi presenti in alveo dipende dall'intensità delle

biforcazioni. Pertanto, l'insieme dei canali e delle biforcazioni creano una vera e propria rete idraulica.

La rete idraulica può evolversi velocemente a causa della migrazione delle barre, e perciò delle biforcazioni, responsabili dell'attività dei canali. La migrazione delle barre non è l'unica causa che può portare all'abbandono di canali idraulicamente attivi. Infatti, una diversa ripartizione della portata liquida può influenzare la quantità di trasporto solido dei singoli canali. La disparità del materiale trasportato tra due canali può difatti permettere la sopravvivenza e l'ampiamiento di un canale a discapito di un'altro. La rete idraulica non tende solamente a concentrare la portata in un unico canale ma, grazie all'erosione spondale provocata dall'aumento della portata in un singolo canale, permette di riattivare canali abbandonati. In figura 2.5 è mostrato un tratto del torrente Borbera dove sono chiaramente visibili sia i canali idraulicamente attivi, sia i canali che sono stati abbandonati e perciò secchi.



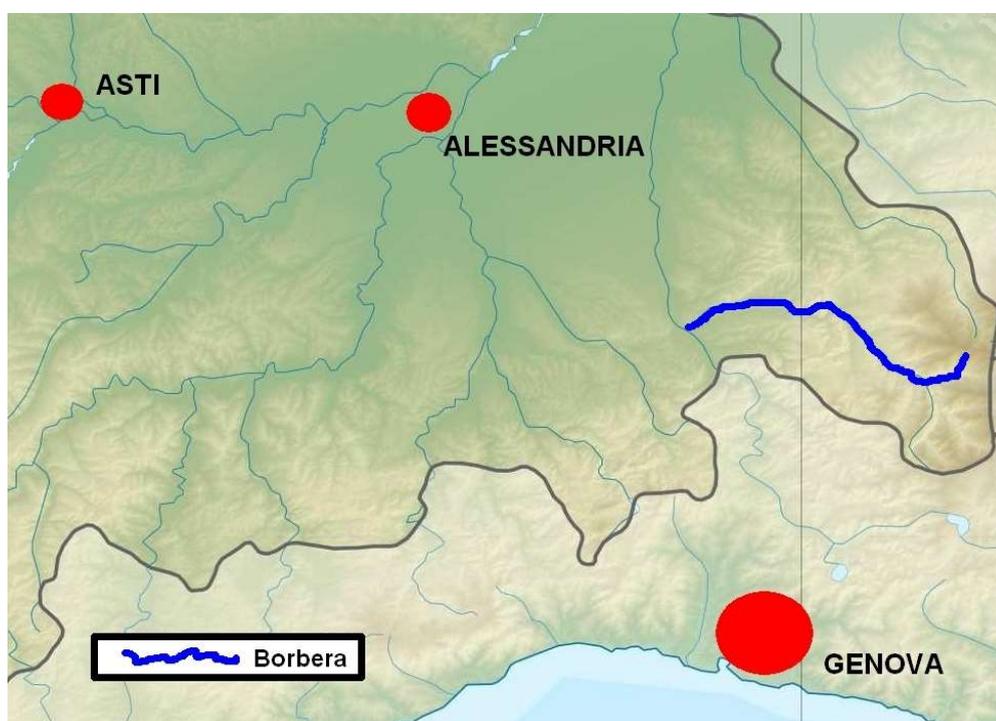
**Figura 2.5** Riprese aerea del torrente Borbera dove sono visibili i canali attivi e canali inattivi.

Anche l'attività dell'uomo influenza la morfologia fluviale, a causa dei suoi interventi sui corsi d'acqua, infatti, l'uomo ha contribuito alla scomparsa in alcune aree di questa tipologia di morfologia. La creazione di dighe per regolare il flusso e la riduzione del sedimento solido, prelevato dai fiumi nelle sezioni di monte, ha fatto sì che i corsi d'acqua cambiassero morfologia. Questa scomparsa rappresenta una grossa perdita proprio perché i canali intrecciati presentano caratteristiche idrauliche ed ecologiche uniche nel loro genere. Per questo, sono state previste operazioni di recupero della morfologia fluviale di aree eccessivamente antropizzate.

### 3 DESCRIZIONE DEL SITO

#### 3.1 CARATTERIZZAZIONE GEOMORFOLOGICA E SELEZIONE DEL TRATTO ANALIZZATO

Nella presente tesi si analizza un tratto del torrente Borbera che presenta le caratteristiche tipiche dei canali intrecciati. Il torrente Borbera è uno dei più grandi torrenti della regione Piemonte, situato nel sud-est della provincia di Alessandria. Il torrente dà nome alla valle in cui scorre, valle poco antropizzata e con una natura ben conservata. Il Borbera è lungo circa 38 km ed è il principale affluente del torrente Scrivia. Nella figura 3.1 è mostrata la posizione del Borbera, nel sud est del Piemonte.



**Figura 3.1** Localizzazione torrente Borbera.

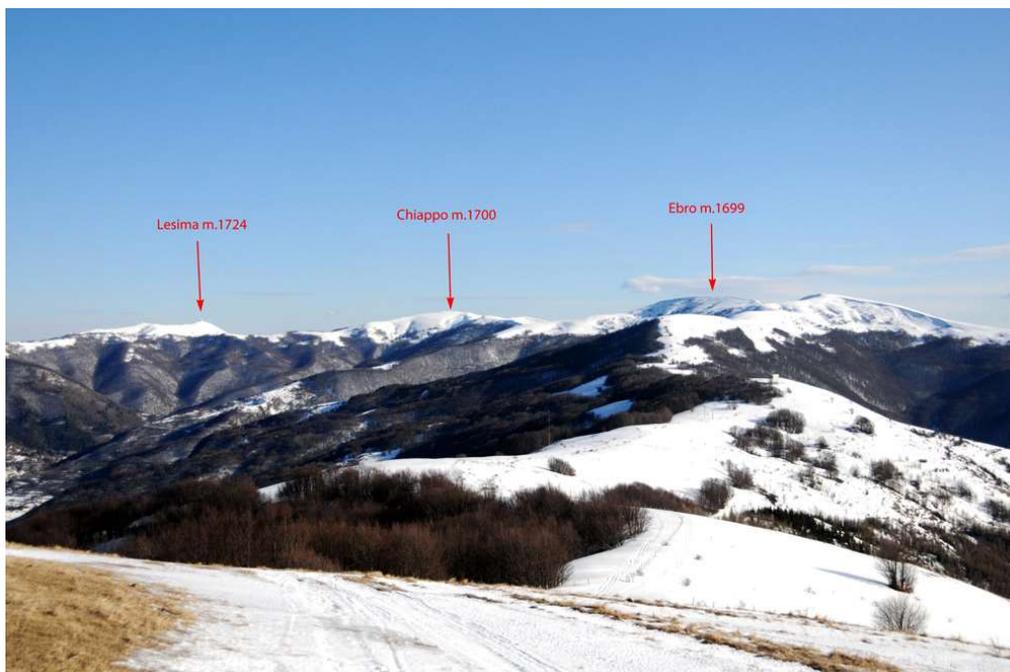
Il Borbera nasce a circa 1400 m di quota tra il Monte Chiappo e l'Antola, sull'Appennino ligure scorrendo in un alveo a forte pendenza (circa 17 m/km) sino al Ponte delle Baracche. Qui riceve dalla sua sinistra orografica la portata dell'Agnellasca, suo primo affluente e, in località Ponte delle Bocche, riceve dalla sua destra orografica la Cosorella. A valle la pendenza si fa meno accentuata e il suo alveo ghiaioso si allarga notevolmente raggiungendo in alcuni punti anche i 400/500 m di larghezza. A circa metà del suo percorso riceve il contributo di svariati affluenti a regime stagionale: il torrente Liassa a Cabella Ligure e il torrente Albirola presso il centro di

San Martino, entrambi provenienti dalla destra orografica. A Rocchetta Ligure convoglia, da sinistra, il Sisola. Fino a Pertuso il torrente allarga sempre più il proprio letto incrementando progressivamente la portata grazie anche al torrente Besante, presente alla destra orografica di Pertuso. Dopo questa ultima confluenza il suo letto si restringe bruscamente per attraversare le Strette di Pertuso, un tratto ingolato dove il Borbera scorre impetuoso sotto imponenti muraglioni di conglomerato di Savignone alternando pozze e rapide in successione. Terminate le gole, dopo circa 6 km, il torrente attraversa una piccola pianura di formazione cenozoica ampliando nuovamente il proprio letto (che in questo tratto raggiunge di nuovo i 500 m di larghezza) e sfiora l'abitato di Persi. Più a valle bagna i comuni di Borghetto di Borbera e Vignole Borbera, dopodiché confluisce da destra nello Scrivia.

In corrispondenza di Persi (Borghetto di Borbera) sono presenti le marne di Cessole del Langhiano, lungo la sponda sinistra del Borbera, e la "straterellata fine" sormontata da bancate arenacee. A Cantalupo Ligure sono presenti conglomerati di puddinga e le argilliti di Pagliaro emergenti tra Rocchetta Ligure e Mongiardino Ligure, mentre in tutta la valle sono presenti i flysch dell'Antola.

La val Borbera ha un'altezza massima di 1700 m s.l.m., quota del Monte Chiappo sull'Appennino ligure, dove nasce il torrente, ed una estensione di circa 213.63 km<sup>2</sup>. Il torrente è delimitato da numerose vette importanti dell'Appennino ligure. Esse sono: Monte Antola (1597 m), Monte Carmo (1640 m), Monte Legnà (1670 m), Monte Cavalmurone (1672 m), Monte Chiappo (1700 m), Monte Ebro (1700 m), Monte Giarolo (1473 m) e il Monte Cosfrone (1671 m).

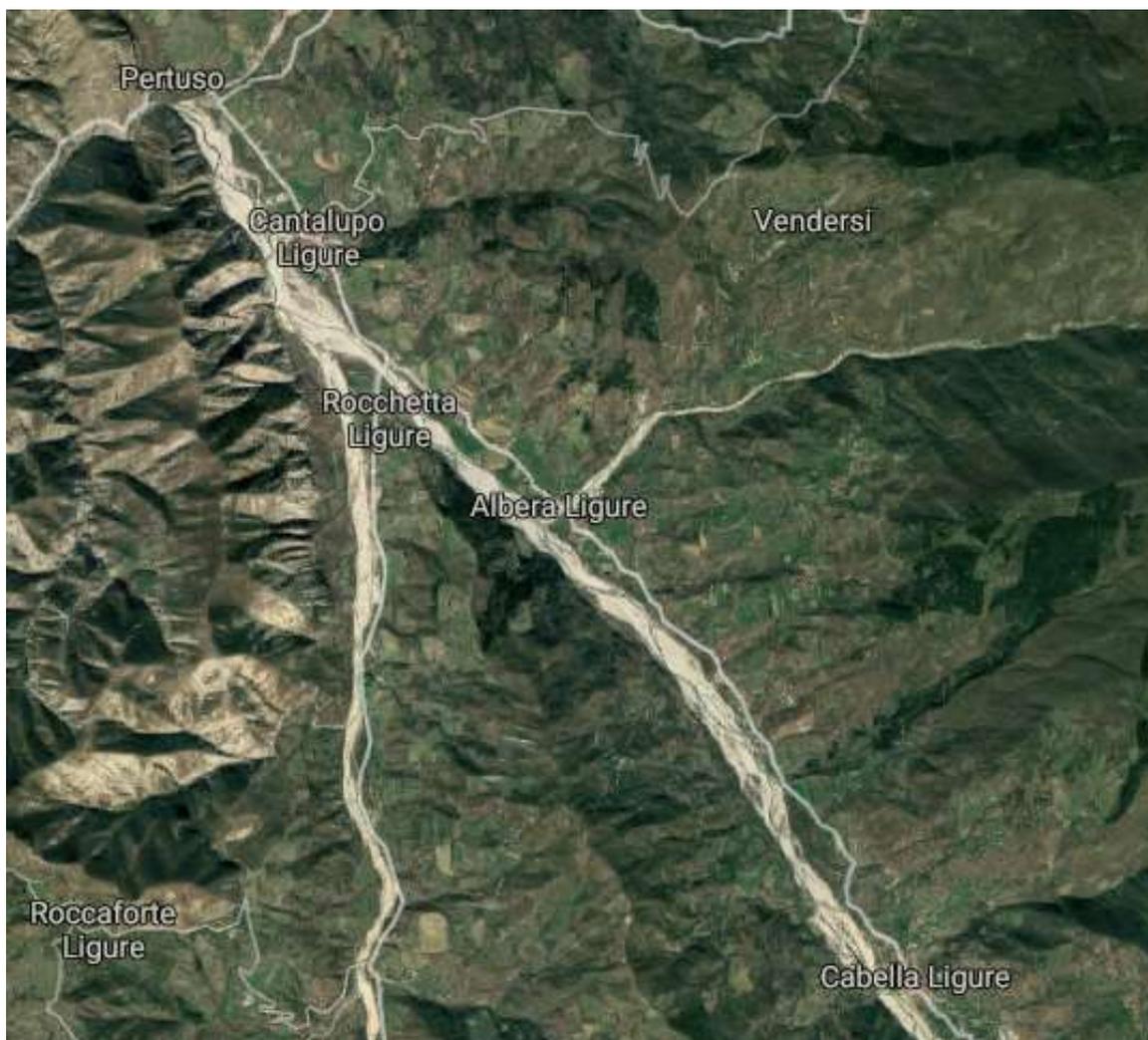
In figura 3.2 è mostrata una foto panoramica dove sono indicati i principali monti della Val Borbera.



**Figura 3.2** Monti principali attorno la Val Borbera.

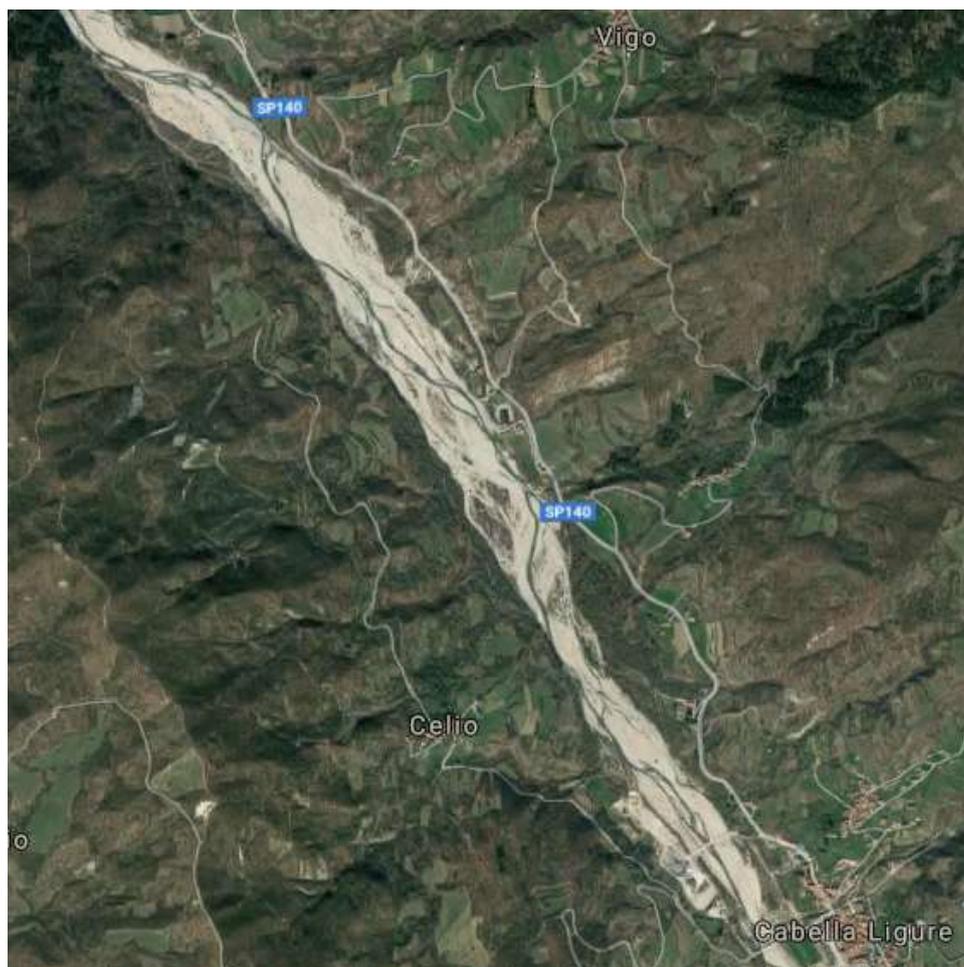
Il regime del Borbera è quello tipico dei corsi d'acqua appenninici (nivo-pluviale) con piene particolarmente impetuose e violente nelle stagioni autunnali e primaverili. Nel periodo estivo ed invernale il torrente è interessato da accentuatissime magre che lo portano in secca.

Il torrente Borbera nel tratto tra Cabella Ligure e Pertuso presenta un alveo quasi del tutto rettilineo ed una morfologia tipica dei canali intrecciati, come è possibile vedere in figura 3.3.



**Figura 3.3** Ortofoto del tratto rettilineo del torrente Borbera.

Il tratto analizzato in questo lavoro è la porzione di torrente compreso tra Cabella Ligure e Albera Ligure. In questo tratto il torrente ha uno sviluppo rettilineo, un alveo naturale (assenza di attraversamenti in alveo) ed è privo di confluenze da parte di corsi d'acqua secondari. Il rilievo di tale tratto è stato realizzato con metodo fotogrammetrico in un periodo di secca e con la vegetazione sfogliata, tipico del periodo di fine autunno o inverno. La secca totale del torrente ha permesso al drone, utilizzato per il rilievo, di rilevare i punti dei canali che compongono l'alveo senza subire l'interferenza provocata dall'acqua. La vegetazione defogliata, ha invece permesso all'apparecchiatura di rilevare punti del fondo anche all'interno di essa. Il tratto esaminato ha una lunghezza di 3000 m per una larghezza di circa 200 m. In Figura 3.4 viene riportata una ripresa aerea del tratto rilevato.



**Figura 3.4** Ripresa aerea del tratto oggetto di studio.

Ricapitolando, il tratto identificato è stato scelto rispetto allo sviluppo del torrente perché presenta le seguenti caratteristiche.

1. Il torrente presenta un tratto rettilineo. In questo modo non occorre considerare gli effetti morfologici che interesserebbero i torrenti con asse curvilineo.
2. Non sono presenti attraversamenti. L'assenza di attraversamenti fa sì che non ci siano gli effetti che le pile dei ponti esercitano sul canale.
3. Non sono presenti confluenze. L'assenza di canali secondari permette di semplificare la simulazione.
4. Il rilievo è stato effettuato nel Novembre 2017, periodo in cui l'eccezionale siccità ha reso il torrente asciutto e la vegetazione defogliata in modo che gli strumenti di misura potessero rilevare i dati altimetrici anche attraverso la vegetazione.

Dopo aver selezionato il tratto oggetto di studio, il Politecnico di Torino ha effettuato nel Novembre 2017 il rilievo altimetrico del tratto in esame tramite una misura fotogrammetrica per mezzo di un drone. La nuvola di punti ottenuta dal rilievo è stata elaborata e si è ottenuto un DEM (Digital Elevation Model) con maglia di 2,5 cm e precisione altimetrica di 1 cm. In figura 3.5 viene riportato il rilievo fotogrammetrico del tratto in esame. Con il rilievo del terreno sarà possibile creare la superficie di simulazione necessaria all'analisi idraulica.



**Figura 3.5** Rilievo fotogrammetrico del tratto misurato.

## 3.2 CARATTERISTICHE IDROLOGICHE DEL TORRENTE

Il Borbera, come tutti i torrenti, ha una portata che varia sensibilmente durante le stagioni passando da periodi con portate di decine di metri cubi al secondo a periodi di secca. Il bacino del torrente, a monte del tratto misurato, ha un'estensione di poco più di 100 km<sup>2</sup>, il che permette di affermare che si tratta di un bacino di medie dimensioni con un regime di tipo nivopluviale, come i bacini che si trovano nell'Appennino ligure. Queste caratteristiche comportano che le portate massime siano nelle stagioni primaverili e autunnali. I periodi di asciutta e magra sono causati da basse precipitazioni in estate e dalla neve che si va ad accumulare sui rilievi più alti in inverno. Questa grande variabilità delle portate fa sì che sia necessario studiare il comportamento idraulico del reticolo di canali al variare della portata. Per determinare le portate che fluiscono nel torrente è necessario effettuare uno studio idrologico sul bacino del torrente Borbera.

In questa tesi, si considerano portate con tempo di ritorno inferiori all'anno, e piene con tempi di ritorno di 2, 5 e 10 anni. Le portate con tempi di ritorno maggiori all'anno saranno determinate con il metodo razionale della trasformazione afflussi-deflussi e le portate annuali col metodo degli L-momenti.

### 3.2.1 Portate annuali

Le portate annuali possono essere ottenute dalla distribuzione di probabilità stimata da un'analisi di frequenza. In statistica l'analisi di frequenza adatta i dati delle distribuzioni, note in letteratura, ai dati del campione. L'obiettivo è quello di descrivere i dati del campione tramite una distribuzione di probabilità. Una distribuzione di probabilità può essere creata conoscendo i suoi stimatori. Gli stimatori vengono individuati attraverso il metodo dei momenti e devono soddisfare una condizione che caratterizza uno o più momenti campionari. In generale si impone l'uguaglianza tra i momenti della distribuzione di probabilità con i momenti del campione. I momenti della distribuzione, che sono la media statistica  $\mu$  e i momenti di ordine superiore  $\sigma$ , vengono uguali ai momenti del campione che sono la media del campione  $\bar{x}$  ed i suoi momenti di ordine superiore  $\bar{v}$ .

Nella stima delle portate viene invece utilizzato il metodo degli L-momenti perché più robusti. Questo metodo permette di descrivere distribuzioni anche molto differenti tra loro. Infatti, gli L-momenti posseggono le caratteristiche di esistenza e di unicità, se esiste la media della distribuzione allora esistono tutti gli L-momenti e quest'ultimi definiscono una distribuzione in maniera univoca. Perciò, se viene utilizzato questo metodo, non possono esistere due distribuzioni con gli stessi valori di L-momenti. Il metodo degli L-momenti confronta gli L-momenti, che sono momenti statistici pesati, con i momenti del campione.

In Piemonte è stato sviluppato il progetto Renefor, un metodo che permette di stimare le curva di durata delle portate basato sul metodo degli L-momenti. Il metodo permette di calcolare la curva di durata rispetto alla distribuzione di Burr, Weibull e Pareto. La scelta della corretta distribuzione viene fatta a partire dai dati dei bacini imbriferi. L'atlante dei bacini imbriferi piemontesi raccoglie le principali caratteristiche morfologiche, climatiche e di utilizzo del suolo. Esso è utilizzato all'interno del metodo perché permette di calcolare gli stimatori degli L-momenti. I valori non possono essere stimati in forma chiusa ma vengono valutati tramite apposite griglie. Nelle griglie sono riportati i limiti delle differenti distribuzioni che servono per scegliere quale distribuzione utilizzare per determinare la curva di durata.

Operativamente la curva di durata delle portate annuali viene stimata avendo a disposizione soltanto le coordinate, nel sistema WGS84, della sezione di interesse. Le coordinate applicate all'atlante dei bacini imbriferi piemontesi permettono di determinare le caratteristiche del bacino e di conseguenza gli stimatori delle distribuzioni. Tutto ciò è possibile grazie ad un algoritmo che si appoggia a QGIS Grass, che restituisce i valori da dover inserire all'interno del foglio di calcolo sviluppato nel progetto Renefor. Il foglio di calcolo permette di ottenere le curve di durata secondo la distribuzione di Burr, di Weibull oppure di Pareto basandosi sui parametri che vengono generati dal foglio di calcolo stesso.

I parametri necessari alla stima della curva di durata delle portate sono di tipo morfologico, climatico e di utilizzo del suolo. Nelle tabelle 3.1, 3.2 e 3.3 vengono riportati i valori calcolati per il torrente Borbera.

I parametri morfologici definiscono le caratteristiche geometriche del bacino. Essi sono l'*Area bacino*, definita come l'area del bacino a monte della sezione di chiusura; la *Quota Media*, la quota media del bacino; la *Quota Massima*, la quota massima del bacino ed infine e l'*a<sub>75percento</sub>* che rappresenta la quota alla quale si sviluppa il 75% dell'area. In tabella 3.1 sono riportati i parametri morfologici ottenuti per il bacino del Borbera a monte della sezione di chiusura.

<i>Area bacino</i>	108,11	km <sup>2</sup>
<i>Quota Media</i>	1015,7	m slm
<i>Quota Massima</i>	1678	m slm
<i>a<sub>75percento</sub></i>	824	m slm

**Tabella 3.1** Parametri morfologici del bacino.

I parametri climatici definiscono come varia il clima e la pluviometria al variare della quota e dell'estensione del bacino. Essi sono *MAP*, il valore medio dell'afflusso totale annuo; l'*IDF<sub>a</sub>* e *std IDF<sub>a</sub>* che sono il valore medio e la deviazione standard del coefficiente pluviale orario della curva di possibilità pluviometrica; *Fourier<sub>BI</sub>*, il valor medio della serie di Fourier del regime pluviometrico e *cv<sub>rp</sub>* il coefficiente di variazione del regime pluviometrico medio sul bacino. In tabella 3.2 vengono riportati i valori dei parametri climatici ottenuti per il bacino del Borbera a monte della sezione di chiusura.

<i>MAP</i>	1424,4	mm
<i>IDF<sub>a</sub></i>	31,13	mm
<i>std IDF<sub>a</sub></i>	1,49	mm/h
<i>Fourier<sub>BI</sub></i>	33,63	-
<i>cv<sub>rp</sub></i>	0,354	-

**Tabella 3.2** Parametri climatici del bacino.

Infine, l'utilizzo del suolo definisce la percentuale di vegetazione del bacino. I parametri di utilizzo del suolo sono:  $clc_2$ , la percentuale di area con boschi, vegetazione arborea, vegetazione arbustiva, cespugliati e  $clc_3$ , percentuale di area con vegetazione erbacea, prato-pascolo, colture speciali, oliveti, vigneti, seminativi. In tabella 3.3 sono riportati le percentuali della vegetazione riferite al bacino del Borbera a monte della sezione di chiusura.

$clc_2$	86,09	%
$clc_3$	13,25	%

**Tabella 3.3** Parametri di utilizzo del suolo del bacino.

I parametri di tabella 3.1, 3.2 e 3.3 vengono utilizzati per ottenere i valori degli L-momenti che sono  $L-CV=0,637$  e  $L-CA=0,528$ .

Con gli L-momenti e le griglie, presenti nel foglio di calcolo definite dal metodo Renefor, è possibile determinare che la miglior distribuzione da utilizzare per ottenere la curva di durata delle portate è quella di Burr. La formula di Burr definisce la portata come

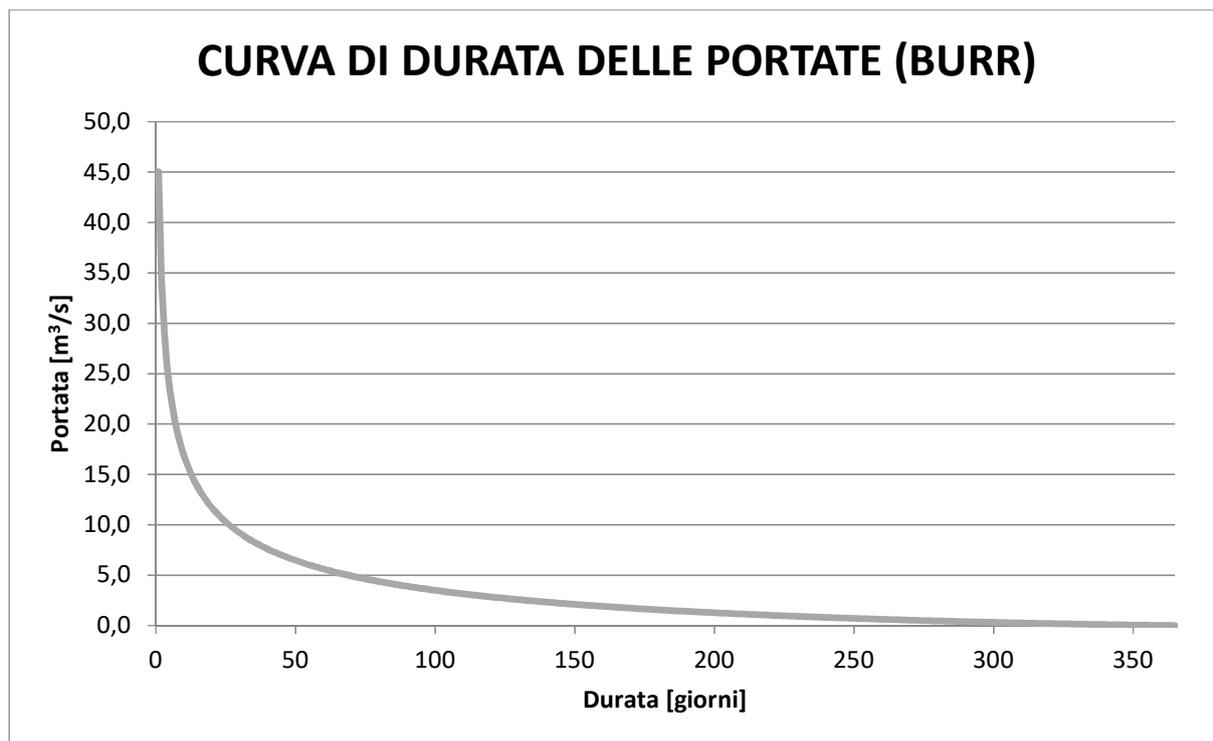
$$Q(d) = a \left( \frac{\left(\frac{d}{365}\right)^{-b} - 1}{b} \right)^{\frac{1}{c}}, \quad (3-1)$$

con  $d$  che rappresenta la durata in giorni,  $b$  e  $c$  sono i parametri estratti dalle griglie ed  $a$  è definito come

$$a = \frac{\bar{Q}}{b^{-\frac{1}{c}} \Gamma\left[\frac{1}{b-c}\right] \Gamma\left[1-\frac{1}{c}\right]}, \quad (3-2)$$

dove  $\Gamma$  la funzione Gamma, nota come funzione gamma di Eulero,  $\bar{Q}$  è la portata media,  $b$  e  $c$  sono ancora i parametri estratti dalle griglie.

In figura 3.6 è mostrata la curva di durata delle portate calcolata.



**Figura 3.6** Curva di durata delle portate calcolata con la distribuzione di Burr.

Dalla curva di durata è possibile scegliere le portate che transitano all'interno del torrente. Sono state scelte le portate riportate in tabella 3.2

gg/anno	Q [m³/s]
183/365	1,5
89/365	3,9
46/365	6,9
22/365	11,1
7/365	20,1
3/365	29,1
1/365	45,0

**Tabella 3.4** Portate annuali scelte per la caratterizzazione idraulica del torrente.

Sono state selezionate le portate che sono più vicine possibili ad una probabilità di accadimento di 1/2 1/4 1/8 ed 1/16 di anno e alla portata massima annuale (1,5; 3,9; 6,9; 11,1 e 45,0 m³/s). Si nota che tra la portata massima (45,0 m³/s) e la precedente (11,1 m³/s) c'è una differenza di circa 30 m³/s. Per lo studio che si sta eseguendo questa variazione è eccessiva, pertanto si è optato per effettuare altre due simulazioni utilizzando la portata di 20,1 m³/s e 29,1 m³/s in modo da avere almeno una simulazione ogni 10 m³/s.

### 3.2.2 Portate con tempi di ritorno maggiori dell'anno

Il metodo razionale è uno dei procedimenti possibili per la determinazione della portata al colmo di piena corrispondente ad un determinato tempo di ritorno. La portata (deflusso) è generata dalla pioggia che cade sul bacino e raggiunge la sezione d'interesse (afflusso). Non tutte le gocce d'acqua raggiungono la sezione di chiusura dato che possono essere assorbite dal terreno. Pertanto, la portata dipende fortemente dal tipo di bacino e dall'antropizzazione di esso.

La portata verrà calcolata come

$$Q = C i_r(t_c, t)A, \tag{3-3}$$

dove  $C$  è il coefficiente di deflusso che dipende dall'antropizzazione del bacino,  $i_r$  è l'intensità di pioggia che dipende dal tempo di corrivazione ed  $A$  è la superficie del bacino.

#### 3.2.2.1 Coefficiente di deflusso

Il coefficiente di deflusso esprime il rapporto tra afflussi e deflussi. Il suo valore è compreso tra 0 e 1 dove 0 significa che tutte le gocce d'acqua vengono assorbite dal terreno e 1 tutte le gocce d'acqua finiscono all'interno del canale. Generalmente all'interno di manuali o libri di testo è possibile trovare delle tabelle che, per ogni tipologia superficiale (livello di antropizzazione), riportano un range di coefficienti di deflusso. La tabella 3.5 è stata estratta dal libro “*Acque meteoriche di dilavamento*” (Montin, 2012).

Tipologia superficiale	$\phi$
Verde su suolo profondo, prati, orti, superfici agricole	0,10-0,15
Terreno incolto, sterrato non compattato	0,20-0,30
Superfici in ghiaia sciolta – parcheggi drenanti	0,30-0,50
Pavimentazioni in macadam	0,35-0,50
Superfici sterrate compatte	0,50-0,60
Coperture tetti	0,85-1,00
Pavimentazioni in asfalto o cls	0,85-1,00

**Tabella 3.5** Coefficienti di deflusso associati al livello di antropizzazione del bacino.

Il bacino in questione è un bacino di montagna naturale e non particolarmente antropizzato, perciò è stato attribuito un valore di 0,20.

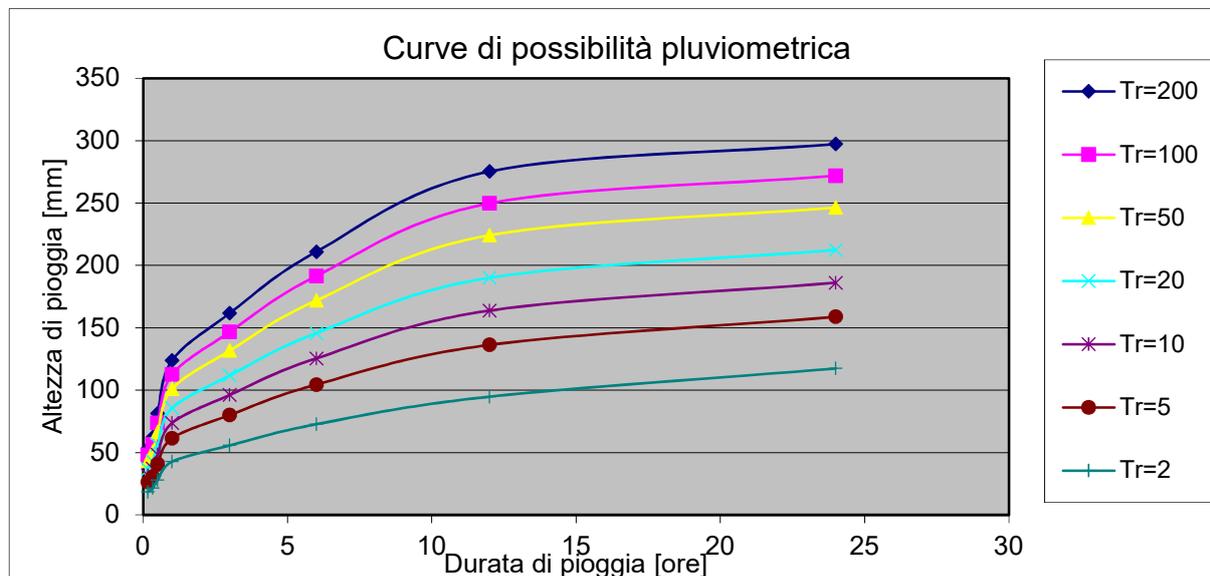
### 3.2.2.2 Intensità di pioggia

L'intensità di pioggia è un parametro che richiede molti dati ed una attenta elaborazione degli stessi. Essa dipende dalle curve di possibilità pluviometrica e dal tipo di bacino. Le curve di possibilità pluviometrica sono particolari tipi di curve che esprimono la relazione tra le altezze massime e le durate di pioggia che si possono verificare in una determinata zona, per un assegnato valore del tempo di ritorno. L'ARPA Piemonte possiede un archivio consultabile online denominato "Atlante delle piogge intense" dove è possibile visualizzare e scaricare i dati relativi alle curve di possibilità pluviometrica per ogni punto da loro calcolato. Le tabelle, che si possono scaricare, riportano l'altezza di pioggia in relazione al tempo di ritorno ed alla durata di pioggia. In tabella 3.6 vengono riportati i dati dell'Arpa Piemonte rispetto alla sezione d'interesse.

Durata di pioggia	Tempi di ritorno						
	2	5	10	20	50	100	200
T							
10 min	18,3	26,3	31,6	36,7	43,3	48,2	53,1
20 min	21,4	30,8	37,0	43,0	50,7	56,5	62,2
30 min	28,0	40,3	48,4	56,2	66,2	73,8	81,3
1 h	42,7	61,4	73,7	85,6	101,0	112,5	123,9
3 h	55,7	80,1	96,2	111,7	131,7	146,7	161,7
6 h	72,7	104,5	125,5	145,7	171,9	191,5	211,0
12 h	94,8	136,3	163,8	190,1	224,2	249,8	275,3
24 h	117,4	158,8	186,1	212,4	246,4	271,9	297,3

**Tabella 3.6** Piogge di assegnato tempo di ritorno per durate da 10 minuti a 24 ore (mm).

In figura 3.7 vengono riportate le curve di possibilità pluviometrica ottenute dalla tabella 3.6.



**Figura 3.7** Curve di possibilità pluviometrica ottenute dai valori delle piogge con assegnato tempo di ritorno per durate da 10 minuti a 24 ore (mm) per il bacino a monte della sezione di chiusura.

Le curve, sopra mostrate, possono essere interpolate da curve esponenziali del tipo

$$y(x) = ax^n. \quad (3-4)$$

Nel caso in esame le curve riportate in figura 3.7 sono approssimate dalla equazione esponenziale (3-4) con i parametri riportati in tabella 3.7.

Tempo di ritorno [anni]	Equazione	a [-]	n [-]
200	$105,55x^{0,3653}$	105,55	0,3653
100	$95,859x^{0,366}$	95,859	0,366
50	$86,093x^{0,367}$	86,093	0,367
20	$73,073x^{0,3688}$	73,073	0,3688
10	$62,981x^{0,3709}$	62,981	0,3709
5	$52,507x^{0,3737}$	52,507	0,3737
2	$36,634x^{0,3807}$	36,634	0,3807

**Tabella 3.7** Equazioni esponenziali utilizzate per interpolare le curve di figura 3.7.

Conoscendo  $a$  ed  $n$  per ogni tempo di ritorno è possibile determinare l'intensità di pioggia tramite la formula

$$i(t) = at^n. \quad (3-5)$$

Inoltre, l'ipotesi di base del metodo razione assume che la portata massima venga raggiunta per un tempo di pioggia pari al tempo di corrivazione. La morfologia ed il tipo di bacino vengono tenuti in considerazione nel calcolo del tempo di corrivazione. Il tempo di corrivazione ( $t_c$ ) è il tempo che impiega la goccia che cade nel punto più lontano (in termini temporali) ad arrivare nella sezione di chiusura. Il tempo di corrivazione viene determinato tramite formule sperimentali che sono da applicare solo per certe categorie di bacini. Il bacino del torrente Borbera, a monte della sezione d'interesse, ha un'estensione di poco superiore i 100 km<sup>2</sup>, e può essere classificato come un medio-grande bacino.

Il tempo di corrivazione è stato calcolato con diverse formule proposte in letteratura. Le formule utilizzate (riportate in tabella 3.8) sono tutte valide per bacini con un'estensione maggiore di 100 km<sup>2</sup>.

Giandotti (3-6)	Viparelli (3-7)	Puglisi (3-8)
$t_c = \frac{4 \cdot A^{0.5} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot (H_{med} - H_{min})}$	$t_c = \frac{L}{3.5 \cdot V}$	$t_c = \frac{6 \cdot \sqrt[3]{L^2}}{\sqrt[3]{H_{max} - H_{min}}}$
3.0443 h	2.2857 h	2.9109 h

**Tabella 3.8** Valori dei tempi di corrivazione ottenuti per diverse formule.

Nelle formule di tabella 3.8  $A$  è l'area del bacino,  $L$  è la lunghezza asta fluviale,  $H_{med}$  è la quota media del bacino,  $H_{min}$  è la quota della sezione di chiusura,  $V$  è la velocità della corrente e  $H_{max}$  è la quota massima del bacino.

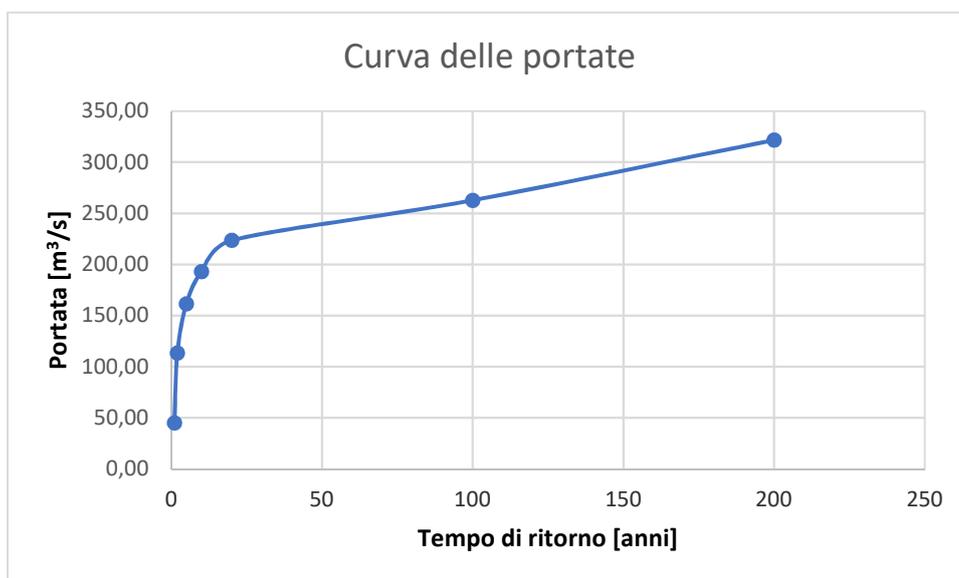
Come si può notare le formule di Giandotti e di Puglisi forniscono due valori molto simili tra loro, mentre con la formula di Viparelli si ottiene un valore molto diverso. Quest'ultima formula, oltre ad essere la più semplificata, non tiene conto della geometria del bacino e perciò non permette di ottenere un tempo di corrivazione corretto. Per queste ragioni il valore ottenuto utilizzando la formula di Viparelli viene scartato e viene preso il valor medio tra i valori ottenuti dalle formule di Giandotti e Puglisi. Il tempo di corrivazione utilizzato è pertanto 2,95 h.

Utilizzando il tempo di corrivazione calcolato ed inserito nella (3-3) si ottengono le portate di tabella 3.9. Per la portata con tempo di ritorno pari all'anno è stato assunto il valore ottenuto dal metodo Renefor.

T ritorno [anni]	Coeff. Deflusso c [-]	$i=a \cdot T_c^n$ [mm/h]	Q [m <sup>3</sup> /s]
1			45,00
2	0,20	55,30	113,50
5	0,20	78,67	161,44
10	0,20	94,07	193,06
20	0,20	108,90	223,49
100	0,20	128,05	262,80
200	0,20	156,71	321,60

**Tabella 3.9** Valori delle portate relative ai propri tempi di ritorno.

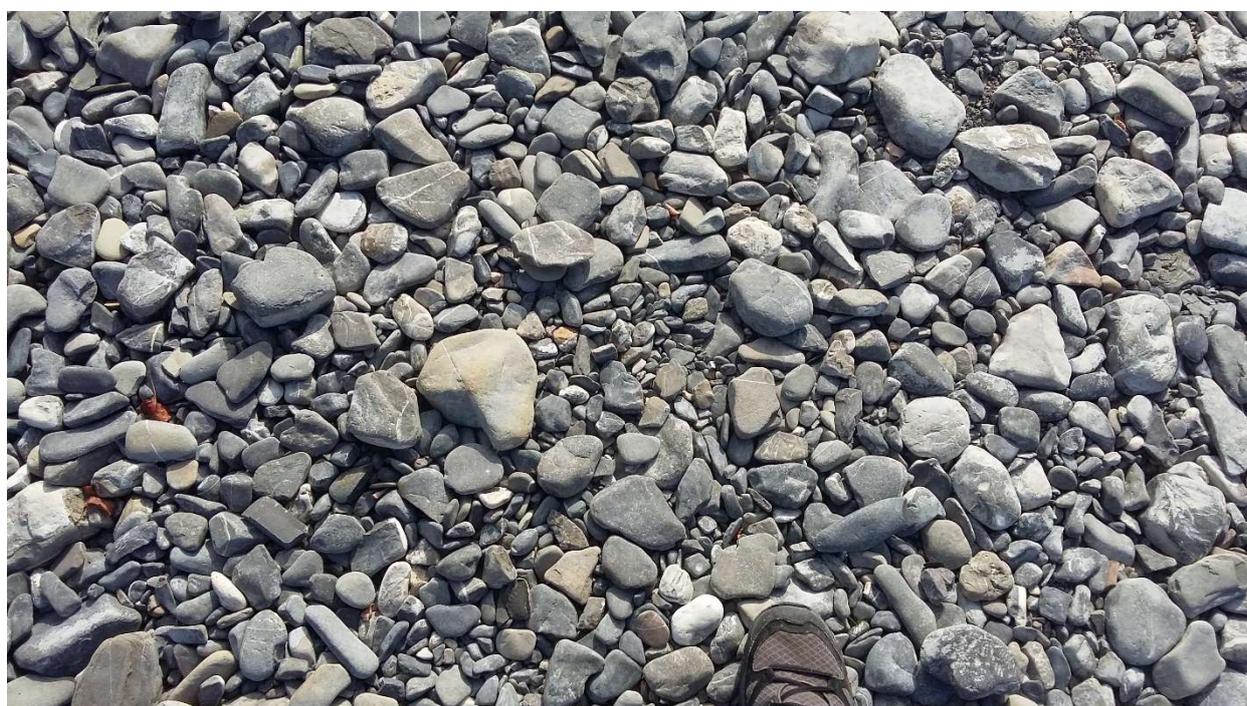
Le portate relative ai tempi di ritorno considerati vengono diagrammate e riportate in figura 3.8.



**Figura 3.8** Andamento delle portate al crescere del tempo di ritorno.

### 3.3 *MATERIALE DI FONDO*

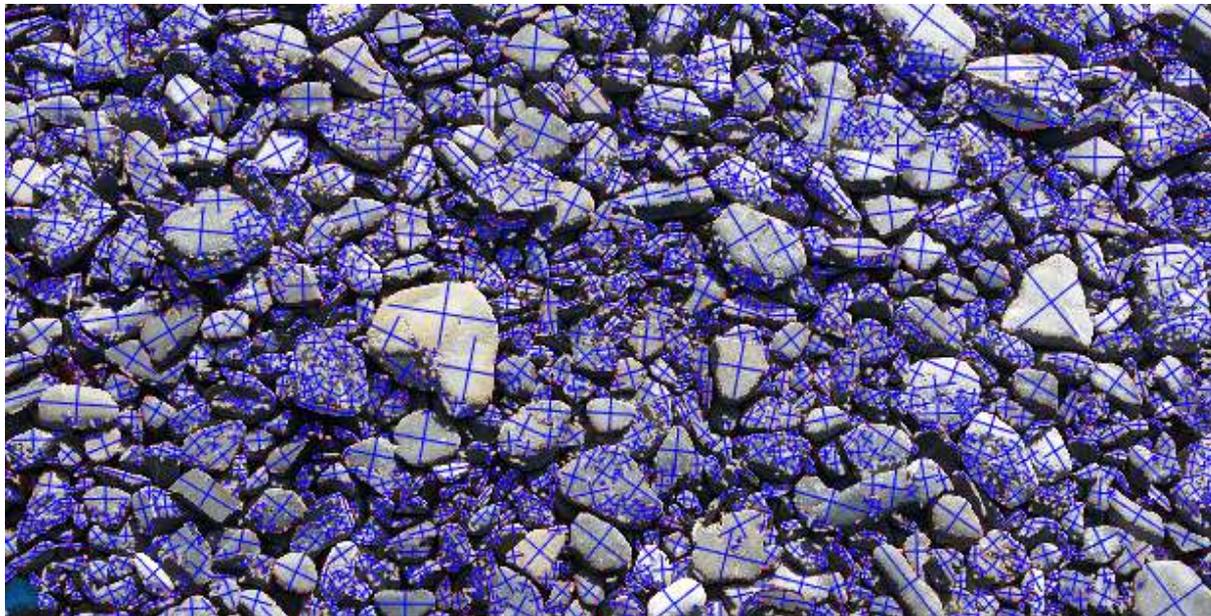
Il materiale solido presente in alveo, e in particolare la sua granulometria, influenza la scabrezza del fondo. La scabrezza è un parametro fondamentale per definire le caratteristiche idrauliche delle correnti. Numerose formule presenti in letteratura permettono di calcolare la scabrezza idraulica dell'alveo dalla curva granulometrica del materiale. La curva granulometrica è un diagramma che riporta i diametri degli elementi e la percentuale (in peso) di particelle aventi diametro inferiore a quello prescelto. Per determinare la curva granulometrica del materiale in alveo si è utilizzato un metodo basato sull'analisi delle immagini. La figura 3.9 è la fotografia utilizzata per l'analisi grafica.



**Figura 3.9** Foto del materiale presente in alveo usata per definire la curva granulometrica del materiale presente in alveo.

Il software utilizzato a tal fine è BASEgrain, è sperimentale ed è fornito da ETH di Zurigo. Il programma richiede di inserire la misura di un elemento noto, presente nella foto, che verrà utilizzata per definire la scala della fotografia. Tramite un algoritmo il programma stabilisce la grandezza degli elementi mostrati nell'immagine e determina le curve granulometriche secondo sei metodi differenti. I metodi utilizzati si basano o sul line-sampling method di Fehr (VAW, 1987) oppure sull'area di ciascun grano e il relativo asse a e b. Il line-sampling è un metodo utilizzato nell'ingegneria per calcolare la probabilità di errore di un determinato dato.

Operativamente si è inserita la fotografia nel programma (mostrata in figura 3.9) ed è stata utilizzata la “scarpa” visualizzata nella foto come elemento noto al fine di determinarne la scala. In figura 3.10 è mostrato il risultato ottenuto dal programma dove si possono osservare le aree dei singoli grani ed i relativi assi.



**Figura 3.10** BASEgrain - Calcolo granulometria.

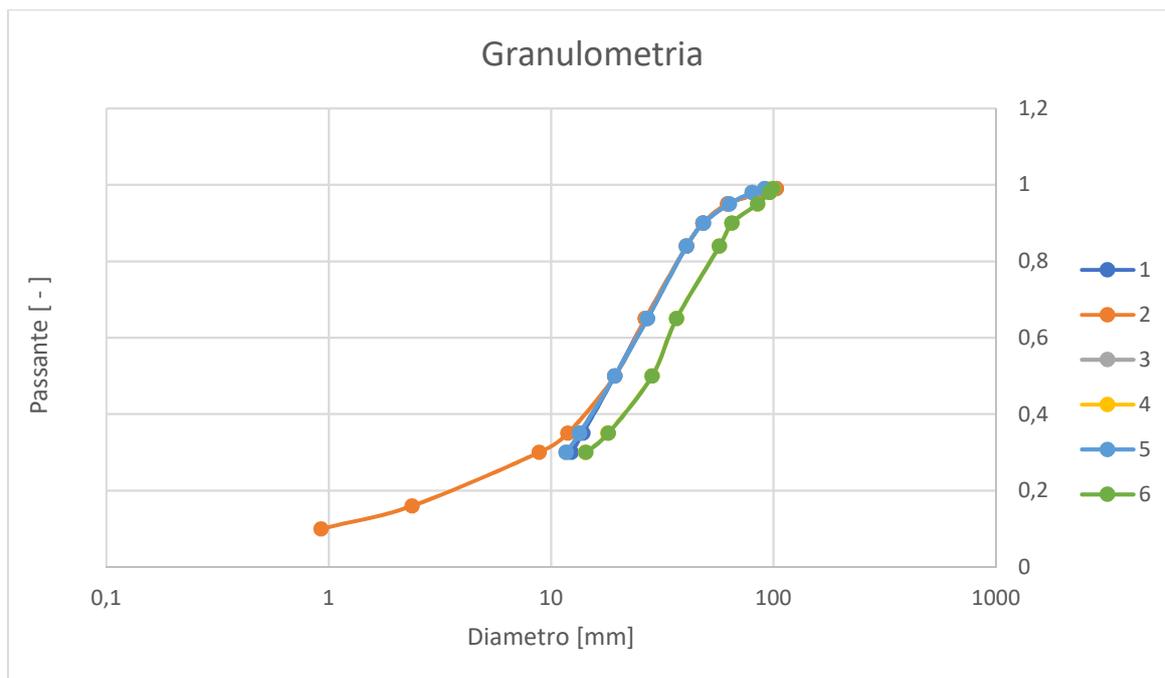
I valori delle curve granulometriche ottenuti da BASEgrain sono riportati in tabella 3.10.

Passante	1	2	3	4	5	6
[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0,10		1				
0,16		2				
0,30	12	9	12	14	12	14
0,35	14	12	13	18	13	18
0,50	19	19	19	28	19	28
0,65	27	27	27	37	27	37
0,84	41	41	41	57	41	57
0,90	48	48	48	65	49	65
0,95	62	62	63	85	63	85
0,98	89	89	80	96	80	96
0,99	103	103	92	100	91	99
d <sub>50</sub> [mm]	19	19	19	28	19	28

**Tabella 3.10** Valori del diametro per relativo passante ottenute da BASEgrain utilizzando sei metodi differenti dove: 1 utilizza il metodo di Fehr, 2 utilizza il metodo Fehr,fin, 3 utilizza gli assi  $a$  e  $b$ , 4 utilizza l'asse  $a$  e due volte l'asse  $b$ , 5 utilizza l'area dei grani ed il 6 utilizza l'area dei grani e l'asse  $b$ .

I valori delle curve granulometriche sono inoltre mostrati in figura 3.11 rappresentati da un grafico che contiene curve tracciate su un piano logaritmico. Il grafico permette di notare che sia la curva 4 che la curva 6 si discostano di poco dalle altre.

Si è optato di tener conto di tutte le curve, nonostante due si distaccassero dalle altre, in quanto non sono state effettuate misure dirette che potessero permettere di scegliere la curva esatta. In questo modo si può tener conto di granulometrie anche di poco diverse tra di loro, senza escludere nessuna curva.



**Figura 3.11** Curve granulometriche ottenute da BASEgrain.

Grazie a questi ultimi dati si è in possesso di tutte le informazioni necessarie per procedere alla creazione del modello numerico utile ad effettuare la simulazione idraulica.

## **4 MODELLO NUMERICO**

Lo studio idraulico di un torrente è possibile tramite una simulazione numerica che utilizza programmi specifici per la simulazione dei corsi d'acqua. I software elaborano al loro interno un elevato numero di equazioni, che tenendo conto di parametri fisici, permettono di ottenere come risultato il comportamento di un corso d'acqua. I programmi per le simulazioni idrauliche hanno al proprio interno le equazioni della meccanica dei fluidi, che applicate ad entità geometriche che rappresentano la topografia del corso d'acqua, permettono di calcolare il campo di moto, il livello e la portata che transita su di esso. I classici software utilizzati effettuano solamente analisi monodimensionali, mentre i più avanzati permettono delle analisi bidimensionali. La differenza tra le due analisi non sta solo nella complessità di definire il problema e perciò l'inserimento di tutti gli input necessari, ma sta soprattutto nella complessità dei risultati forniti ed elaborati. Per quanto riguarda i dati di input le condizioni al contorno ed iniziali sono le medesime per le due analisi, mentre la geometria cambia notevolmente. In un modello monodimensionale sono necessarie solamente delle sezioni dell'alveo mentre in un modello bidimensionale è necessario creare una superficie o mesh che rappresenti il fondo di tutto il dominio di simulazione. La differenza è enorme, come lo sono i risultati forniti. Le analisi monodimensionali forniscono solamente dei valori puntuali (portata, livello, ecc nelle sezioni di input), invece una simulazione bidimensionale fornisce risultati su ogni punto del dominio di simulazione.

Per poter studiare il comportamento di un torrente a canali intrecciati, perciò, si rende necessaria una simulazione bidimensionale al fine di poter determinare con precisione le caratteristiche idrauliche e morfologiche di ogni singolo punto del dominio.

#### 4.1 SOFTWARE SIMULAZIONE - BASEMENT

Il software scelto per l'analisi numerica è BASEMENT, un programma che consente di simulare il comportamento dei corsi d'acqua, tenendo conto del flusso idrico, del trasporto solido e dei manufatti presenti in esso. I processi possono essere descritti con un modello monodimensionale, bidimensionale o accoppiato. Gli effetti dei manufatti sono presi in considerazione imponendo opportune condizioni al contorno nelle sezioni corrispondenti. Per quanto concerne l'analisi morfologica, il trasporto dei sedimenti si distingue in trasporto di fondo e in trasporto in sospensione. Per mettere a punto il modello, l'utilizzatore dispone di un'interfaccia grafica in forma di elenco a tendine dal quale si inseriscono i blocchi. I blocchi corrispondono ai comandi ed ai parametri necessari alla simulazione. Il programma, inoltre, guida l'utilizzatore indicando quali sono i blocchi minimi da inserire per effettuare la simulazione, grazie a scritte sul fondo dell'interfaccia, elencando quali parametri mancano al modello. Per utilizzatori più esperti è prevista la scrittura di file di testo, opportunamente compilati, che vengono letti dal programma. Il file di testo scritto dovrà contenere i blocchi minimi alla simulazione, altrimenti, all'avvio, il programma blocca l'utilizzatore informando che il file è incompleto. Il programma, attualmente rilasciato nella versione 2.7 e la relativa documentazione (Fäh et al. 2011) sono disponibili gratuitamente sul sito [www.basement.ethz.ch](http://www.basement.ethz.ch) del Politecnico federale di Zurigo.

Il risolutore del software consiste in un insieme di 3 sottosistemi numerici che possono essere utilizzati in modo indipendente o combinando più moduli tra loro. Essi sono:



BASEchain: lo strumento numerico monodimensionale che consente di simulare la portata del fiume e la possibilità calcolare i relativi fenomeni di trasporto solido;



BASEplane: lo strumento di risoluzione numerica per sistemi bidimensionali che permette la simulazione del comportamento di torrenti e piane alluvionali, dove i fenomeni idraulici e di trasporto solido non avrebbero una completa rappresentazione con un modello monodimensionale;



BASEsub: Lo strumento numerico a tre dimensioni è destinato alla simulazione del flusso nel sottosuolo, basata sulla geometria spaziale.

Come dichiarato nell'introduzione, l'obiettivo di questo lavoro è la simulazione idraulica bidimensionale di un torrente a canali intrecciati. I risultati che si otterranno verranno utilizzati per estrarre importanti dati per caratterizzare idraulicamente ogni singolo canale. Prima di procedere alla simulazione è opportuno illustrare il modello matematico utilizzato dal software BASEMENT.

#### 4.1.1 Equazioni di Saint Venant

Il modulo BASEchain è basato sulle equazioni di Saint Venant (SVE) per una simulazione monodimensionale. Le equazioni sono valide solamente se sono vere le seguenti ipotesi:

- 1) Distribuzione idrostatica della pressione, questa è soddisfatta se è garantito che le curvature sono piccole e le componenti di accelerazione lungo la verticale sono trascurabili;
- 2) Velocità uniforme in tutte le sezioni trasversali e livello dell'acqua orizzontale;
- 3) Piccola pendenza del fondo del canale, in modo che il coseno dell'angolo tra il profilo del fondo e la linea orizzontale sia piccolo ed approssimabile a 1;
- 4) Le leggi di resistenza allo stato di moto uniforme sono applicabili per un flusso di moto permanente.

##### 4.1.1.1 Forma conservativa delle SVE

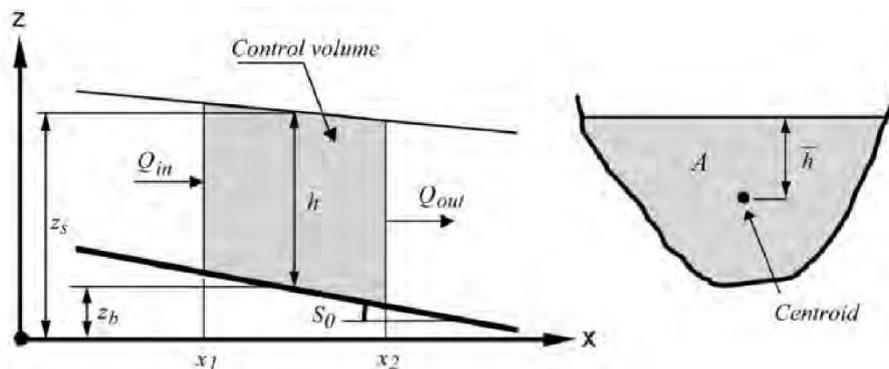


Figura 4.1 Volume di controllo.

Per il volume di controllo (illustrato in figura 4.1), la conservazione della massa è formulata assumendo la densità di massa  $\rho$  costante (flusso incompressibile). Questo porta

fondamentalmente ad una equazione di conservazione del volume. Il cambiamento temporale del volume equivale alla differenza tra il volume di afflusso e quello di efflusso

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_2} A dx + Q_{in} - Q_{out} - q_l(x_2 - x_1) = 0, \quad (4-1)$$

dove  $A$  è l'area trasversale bagnata,  $Q$  è il flusso della corrente,  $q_l$  è il flusso laterale per metro di lunghezza,  $V$  è il volume occupato dal fluido,  $x$  è la distanza e  $t$  è il tempo

#### **4.1.1.2 Conservazione della quantità di moto**

La seconda legge del moto di Newton enuncia: *L'accelerazione di un oggetto è direttamente proporzionale alla forza risultante agente su di esso e inversamente proporzionale alla sua massa.* Da questa espressione si può dimostrare come la variazione di quantità di moto sia uguale alla sommatoria delle forze esterne applicate al volume di controllo, in termini matematici

$$\frac{dp}{dt} = ma = \sum F, \quad (4-2)$$

dove  $p = mu$  è la quantità di moto. Utilizzando il teorema di trasporto di Reynolds (Chaudhry, 1993) e riferendosi al volume di controllo si ottiene una formulazione conservativa del primo membro dell'equazione precedente.

Con la regola di Leibnitz e esprimendo la portata come prodotto tra l'area della sezione e la velocità media della stessa, con ulteriori semplificazioni e l'applicazione del teorema del valore medio per più variabili si ottiene la formulazione seguente:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{Q^2}{A_{red}} \right) + gA_{red} \frac{\partial z_s}{\partial x} + gA_{red} S_f - q_l u_x = 0, \quad (4-3)$$

che rappresenta l'equazione del moto della massa fluida del modello SVE dove  $Q$  è il valore della portata di deflusso,  $x$  indica l'asse di sviluppo del corso d'acqua, per valori ridotti di pendenza del fondo si assume l'asse coincidente con il profilo medio del fondo,  $\beta$  è il coefficiente di ragguglio,  $A_{red}$  è l'area ridotta della sezione, individuata dalla porzione occupata

dall'acqua,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $z_s$  è la quota del pelo libero della corrente e  $S_f$  è la pendenza motrice. In BASEchain, l'influenza dell'afflusso laterale ( $q_l$ ) è trascurato.

#### 4.1.1.3 Condizioni di chiusura interna

La chiusura del problema consiste nella definizione della pendenza motrice  $S_f$ , la quale può essere ricondotta a una relativa tensione al fondo secondo la relazione

$$\frac{\tau_B}{\rho} = gRS_f. \quad (4-4)$$

Il termine a primo membro dell'equazione corrisponde al quadrato della velocità di taglio  $u_*$ . Secondo la formulazione di Chezy la velocità nel canale è proporzionale per mezzo di un coefficiente alla velocità di taglio quindi:

$$u = c_f \sqrt{gRS_f}. \quad (4-5)$$

Il termine  $c_f$  è il coefficiente adimensionale di Chezy; se si vuole esprimere in termini dimensionali tale coefficiente si riscrive la formulazione classica di Chezy:

$$u = C \sqrt{RS_f}, \quad (4-6)$$

con  $C$  espresso in  $m^{1/2}/s$ .

Il coefficiente adimensionale di Chezy è determinato con un approccio basato su una legge di potenza utilizzando il coefficiente di Strickler  $k_{str}$  (o in alternativa quello di Manning  $n$ )

$$c_f = \frac{k_{str} R^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{g}}. \quad (4-7)$$

La relazione che lega i due valori di scabrezza Manning-Strickler ampiamente usata nella pratica è

$$k_{str} = \frac{1}{n}. \quad (4-8)$$

Con un approccio con legge logaritmica che ricorre a una scabrezza equivalente alla Nikuradse  $k_s$ ; BASEMENT implementa una serie di formulazioni tra cui Chezy, Yalin, Bezzola e Darcy-Weissbach (la scabrezza è determinata in funzione del diametro caratteristico  $d_{90}$  del sedimento).

#### 4.1.1.4 Condizioni al contorno

Per la sezione più a monte e quella a valle del canale è necessario conoscere l'influenza delle zone al di fuori del dominio simulato. La prima condizione al contorno da applicare alla sezione di monte è il valore della portata convogliata nel canale. E' necessario definire un'ulteriore condizione al contorno o nella sezione di monte o nella sezione di valle a causa della velocità di propagazione. Se la velocità di propagazione è minore della velocità della corrente le caratteristiche della corrente non saranno in grado di diffondersi verso monte (flusso supercritico). Invece, se la velocità di propagazione è maggiore della velocità della corrente le caratteristiche della corrente si diffondono sia verso monte che verso valle (flusso sub-critico). Quindi, se la corrente è sub-critica, il flusso è influenzato da valle, richiedendo una condizione nella sezione di valle. Mentre, se la corrente è supercritica, nessuna informazione arriva da valle. Quindi è necessaria una condizione al contorno aggiuntiva nella sezione di monte. In tabella 4.1 sono riportati il numero di condizioni al contorno necessarie alla sezione di monte e di valle rispetto al tipo di corrente.

Tipo di corrente	Sezione di monte	Sezione di valle
Sub-Critico ( $F_r < 1$ )	1	1
Supercritico ( $F_r > 1$ )	2	0

**Tabella 4.1** Condizioni al contorno in base al tipo di corrente.

Vi sono diverse possibilità sul tipo di condizione che si può imporre. Tre sono le possibili scelte: presenza di soglia, livello idrico o relazione tirante-portata. Nel caso di presenza di una soglia o paratoia è definibile una legge di flusso dipendente dal tirante a monte della struttura. Nel caso si scelga di impostare il livello idrico del pelo libero sarà necessario definirlo tramite una funzione temporale. Infine, si può definire una relazione che lega il tirante idrico alla portata defluente.

#### 4.1.2 Equazioni shallow water

I modelli matematici adottabili in condizioni di acqua poco profonda governano un'ampia varietà di fenomeni fisici. Per ragioni di semplicità, le equazioni saranno da ora in avanti abbreviate come SWE. Una classe importante di problemi di interesse pratico comporta flussi d'acqua con una superficie libera sotto l'influenza della gravità, in questo campo si ricordano i seguenti casi:

- le maree negli oceani;
- le onde di propagazione delle piene nei fiumi;
- le onde originate dalla rottura di una diga.

La validità del SWE implica le condizioni 1) 3) e 4) assunte per la formulazione del modello SVE. Un requisito fondamentale per l'applicabilità di questa teoria riguarda il primo aspetto, la distribuzione di pressione idrostatica. Supponendo che la componente verticale della velocità delle particelle d'acqua sia trascurabile, si può assumere una distribuzione di pressione idrostatica. Questo consente infine l'integrazione sulla profondità di flusso.

L'ottenimento delle equazioni shallow water deriva dall'integrazione delle equazioni di Navier-Stokes sul tirante o da un approccio diretto di studio su un volume di controllo tridimensionale.

In modo simile al caso delle equazioni del modello SVE si scrivono le equazioni che descrivono la conservazione della massa e della quantità di moto (equazione del moto). L'integrazione sulla verticale dell'equazione che esprime la conservazione del moto dà origine alle tensioni tangenziali ( $\tau$ ). Tali equazioni sono

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}h)}{\partial y} = 0, \quad (4-9)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -g \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho h} \tau_{Bx} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{xx} + D_{xx})]}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{xy} + D_{xy})]}{\partial y}, \quad (4-10)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = -g \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho h} \tau_{By} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{yx} + D_{yx})]}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{yy} + D_{yy})]}{\partial y}. \quad (4-11)$$

Per completare le SWE occorre inoltre definire opportune condizioni al contorno di tipo cinematico e dinamico. La condizione cinematica impone l'assenza di flusso attraverso la superficie libera, quindi è possibile scrivere

$$w_s = \frac{\partial z_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial z_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial z_s}{\partial y} = \frac{dz_s}{dt}, \quad (4-12)$$

In modo simile, al fondo, si impone l'assenza di un flusso attraverso il fondo.

Le condizioni dinamiche sono

$$\tau = (\tau_{sx}, \tau_{sy}), \quad (4-13)$$

$$P = P_{atm}. \quad (4-14)$$

I termini che compaiono nelle formule precedenti sono:

$h$	[m]	profondità dell'acqua
$g$	[m <sup>2</sup> ]	accelerazione gravitazionale
$P$	[Pa]	pressione
$\bar{u}$	[m]	velocità mediata in direzione x
$u_s$	[m]	velocità in direzione x al livello della superficie dell'acqua
$u_B$	[m]	velocità in direzione x sul fondo (solitamente uguale a zero)
$\bar{v}$	[m]	velocità mediata in direzione y
$v_s$	[m]	velocità in direzione y al livello della superficie dell'acqua
$v_B$	[m]	velocità in direzione y sul fondo (solitamente uguale a zero)
$w_s$	[m]	velocità in direzione z alla superficie dell'acqua
$w_B$	[m]	velocità in direzione z in basso (solitamente uguale a zero)
$z_B$	[m]	quota del fondo
$z_s$	[m]	quota della superficie dell'acqua
$\tau_{sx}$	[N/m <sup>2</sup> ]	tensioni tangenziali in direzione x sulla superficie libera (trascurato)
$\tau_{sy}$	[N/m <sup>2</sup> ]	tensioni tangenziali in direzione y sulla superficie libera (trascurato)
$\tau_{Bx}$	[N/m <sup>2</sup> ]	tensioni tangenziali in direzione x sul fondo
$\tau_{By}$	[N/m <sup>2</sup> ]	tensioni tangenziali in direzione y sul fondo
$\bar{\tau}_{xx}, \bar{\tau}_{xy}, \bar{\tau}_{yx},$ $\bar{\tau}_{yy}$	[N/m <sup>2</sup> ]	valore medio degli sforzi turbolenti e viscosi lungo la verticale
$D_{xx}, D_{xy},$	[N/m <sup>2</sup> ]	deviazione degli sforzi turbolenti e viscosi lungo la

#### 4.1.2.1 Condizioni di chiusura interne

La chiusura del problema avviene con la definizione delle tensioni tangenziali viscoso e turbolente.

##### 4.1.2.1.1 Turbolenza

Le sollecitazioni tangenziali viscoso possono essere quantificate in base al concetto di eddy viscosity di Boussinesq, e valgono

$$\tau_{xx} = 2\rho\nu \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{yy} = 2\rho\nu \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{xy} = \rho\nu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (4-15)$$

Se il flusso è dominato dalle forze di attrito, la viscosità totale è la somma della eddy viscosity e della viscosità molecolare (viscosità cinematica del fluido), ovvero

$$\nu = \nu_t + \nu_m. \quad (4-16)$$

La eddy viscosity può essere calcolata come

$$\nu_t = k u_* \frac{h}{6}. \quad (4-17)$$

La viscosità molecolare è una proprietà fisica del fluido ed è costante se si assume l'ipotesi di fluido isotermico.

##### 4.1.2.1.2 Sforzo di taglio al fondo (Bed Shear Stress)

Lo sforzo di taglio in prossimità del fondo è legato alla componente media della velocità per mezzo della legge di attrito quadratica

$$\tau_{Bx} = \rho \frac{|u|u}{c_f^2}, \quad \tau_{By} = \rho \frac{|u|v}{c_f^2}. \quad (4-18)$$

Dove  $|u| = \sqrt{u^2 + v^2}$  è il modulo del vettore velocità.

#### **4.1.2.2 Condizioni al contorno**

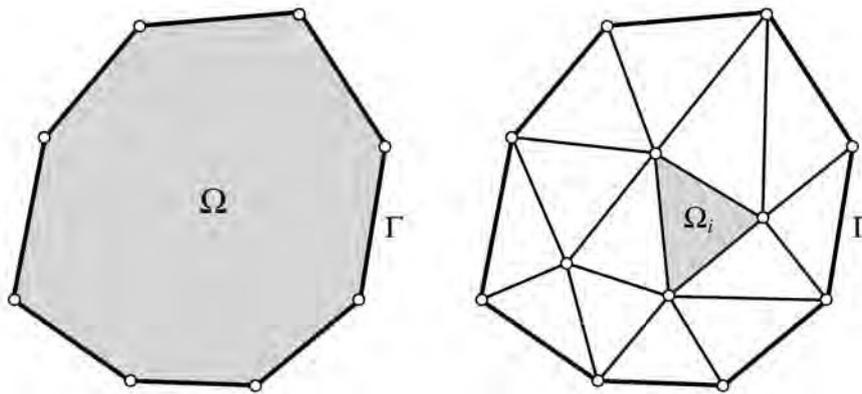
La soluzione delle SWE necessita l'imposizione di condizioni al contorno. I confini fisici possono essere divisi in due categorie: uno *closed*, l'altro *open*. Il primo generalmente esprime che nessuna massa può fluire attraverso il confine, che in genere consiste in una scarpata o un muro. La tipologia *open* riguarda un confine immaginario fluido-fluido e si riferisce alla sezione di ingresso e a quella di uscita della portata fluida.

#### *4.1.3 Metodi per risolvere le equazioni di flusso*

Viste le equazioni che descrivono il fenomeno e le loro condizioni al contorno è necessario definire l'analisi numerica utilizzata per effettuare la simulazione. Le analisi numeriche permettono di ottenere una soluzione approssimata utilizzando o il metodo degli elementi finiti oppure il metodo dei volumi finiti. Il metodo degli elementi finiti riduce le equazioni differenziali, viste in precedenza, ad un sistema di equazioni algebriche. Il metodo dei volumi finiti invece, integra le equazioni differenziali su un volume sui cui confini sono applicate le condizioni al contorno. L'intero volume viene suddiviso in volumi elementari, ma non infinitesimi, ed i confini di questi volumi elementari vengono correlati da relazioni numeriche. BASEMENT utilizza il metodo dei volumi finiti applicando ad ogni elemento della mesh le equazioni discretizzate mostrate nei capitoli successivi.

#### **4.1.3.1 Metodo dei volumi finiti**

Il metodo dei volumi finiti è una tecnica utilizzata per simulazioni numeriche utilizzate in ingegneria. La soluzione viene ottenuta andando ad integrare le equazioni differenziali nel dominio di simulazione. Il dominio di simulazione viene suddiviso, tramite la creazione di una griglia o mesh, in volumi che hanno una dimensione finita. La grandezza degli elementi influisce molto sul risultato, infatti si cerca di avere una mesh molto fitta per calcolare in più punti la soluzione esatta, ma è comunque necessario che non siano troppo piccoli altrimenti il metodo non riesce a convergere. Il volume viene rappresentato da celle, non sovrapposte, che seguono la geometria dell'alveo che si vuole simulare. In figura 4.2 viene mostrato come il dominio può essere discretizzato.

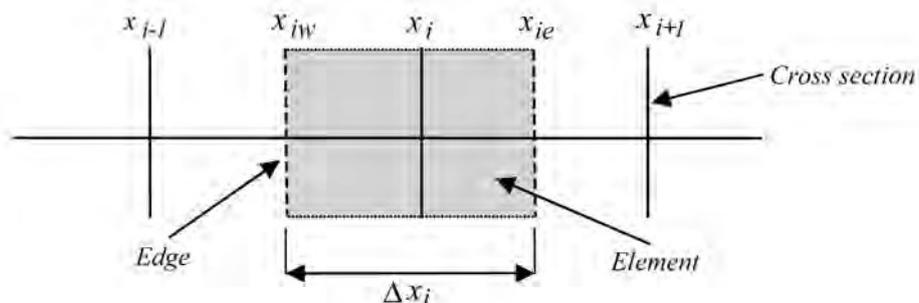


**Figura 4.2** Elementi del metodo dei volumi finiti.

Le celle possono avere diverse forme, triangolari o quadrilatere, e possono essere regolari o non regolari. La caratteristica di non essere regolari permette di rappresentare geometrie anche molto complesse. Su ciascuna cella vengono applicate le leggi di conservazione per determinare le variabili di flusso. I punti a cui sono applicate le variabili possono essere i centroidi (centro degli elementi) oppure i vertici (nodi delle celle). Determinate le variabili e il punto di applicazione il programma applicherà le soluzioni a tutti i punti della mesh.

#### 4.1.4 Equazione di Saint – Venant discretizzate

La discretizzazione temporale si basa sullo schema di Eulero esplicito, in cui i nuovi valori vengono calcolati considerando solo i valori della fase temporale precedente. La discretizzazione spaziale delle equazioni di Saint Venant viene effettuata con il metodo dei volumi finiti, dove le equazioni differenziali sono integrate sui singoli elementi. In figura 4.3 è mostrato il volume dell'elemento monodimensionale.



**Figura 4.3** Discretizzazione del volume nel metodo monodimensionale.

Si presume che i valori, noti nella posizione della sezione trasversale, siano costanti all'interno dell'elemento. In questa sezione si può quindi affermare che l'equazione di continuità può essere discretizzata e scritta come

$$A_i^{t+1} = A_i^t - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (\varphi_{c,iR} - \varphi_{c,iL}) - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (q_{iR}(x_i - x_{i,R}) + q_{iL}(x_{iL} - x_i)); \quad (4-19)$$

e l'equazione della quantità di moto può anch'essa discretizzata e scritta come

$$Q_i^{t+1} = Q_i^t - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (\varphi_{m,iR} - \varphi_{m,iL}) + \sum Sources. \quad (4-20)$$

Per completare l'equazione discretizzata della quantità di moto è necessario definire i valori Sources. Bisogna quindi tener conto dei contributi dati dalla pendenza del fondo e del coefficiente d'attrito.

Tenendo conto anche della pendenza del fondo l'equazione discretizzata della quantità di moto diventa

$$Q_i^{t+1} = Q_i^t - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (\varphi_{m,iR} - \varphi_{m,iL}) + \Delta t g A_{red,i} \left( \frac{z_{S,i+1} - z_{S,i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \right). \quad (4-21)$$

Infine, tenendo anche conto del contributo dal coefficiente d'attrito ( $K$ ) l'equazione della quantità di moto diventa

$$Q_i^{t+1} = \frac{Q_i^{t+1}}{1 + \frac{\Delta t |Q_i^t| g A_i^t}{(K_i^t)^2}}. \quad (4-22)$$

#### 4.1.4.1 Raggio idraulico e coefficiente d'attrito

Il raggio idraulico e coefficiente d'attrito di una sezione trasversale sono calcolati a seconda della geometria specificata dall'utente. La sezione trasversale può essere semplice o composta da un canale principale e zone golenali. Per una semplice sezione trasversale arbitraria e una data elevazione della superficie dell'acqua, il raggio idraulico corrispondente  $R$  viene calcolato dall'area totale bagnata  $A$  divisa per il perimetro totale bagnato  $P$ . In figura 4.4 sono mostrati graficamente i contributi da utilizzare per calcolare il raggio idraulico.

$$R = \frac{\sum A_i}{\sum P_i} \quad (4-23)$$

$$K = c_f \sqrt{gRA} \quad (4-24)$$

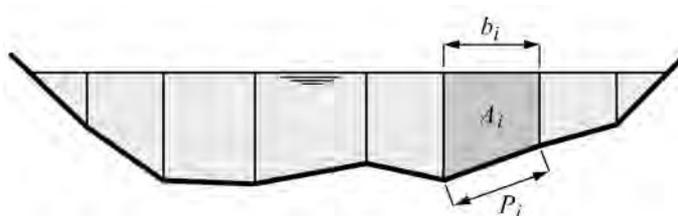


Figura 4.4 Discretizzazione delle entità geometriche in una sezione.

Per ottenere il coefficiente d'attrito  $K$ , è necessario determinare un coefficiente di attrito unico. Questo viene fatto calcolando la media dei valori del coefficiente attrito  $K_i$  (ad esempio Strickler, Manning, Chezy, ecc.) sugli elementi bagnati che giacciono sulla sezione trasversale.

## 4.2 DATI DI INPUT

Come già accennato, la caratterizzazione idraulica del torrente Borbera richiede una simulazione numerica bidimensionale. La simulazione bidimensionale necessita della costruzione di una superficie di computazione (mesh) basata sui dati topografici dell'alveo. La mesh dovrà rappresentare l'alveo del torrente tenendo conto non soltanto della sua planimetria ma anche dell'attrito che esso esercita sulla corrente. Inoltre, il metodo dei volumi finiti richiede l'inserimento di opportune condizioni al contorno della mesh. Le condizioni al contorno sono da applicare alla sezione d'ingresso e di uscita del dominio computazionale in modo da poter calcolare la soluzione in tutti i nodi della mesh. Sarà necessario definire l'idrogramma d'ingresso nella sezione a monte ed il metodo di fuoriuscita del flusso dalla sezione a valle. Le portate inserite nell'idrogramma sono state definite dallo studio idrologico effettuato nel capitolo 3.2.

Dal punto di vista operativo, le operazioni da effettuare prima delle simulazioni possono essere racchiuse in:

1. Costruzione della mesh;
2. Definizione delle condizioni al contorno necessarie a caratterizzare il problema tramite la definizione degli idrogramma di portata e calcolo dei coefficienti d'attrito;
3. Definizione della condizione iniziale;
4. Definizione del time step della simulazione;
5. Definizione dei dati da ottenere come output.

Nelle seguenti sezioni saranno discusse le analisi necessarie per determinare tutti i parametri della simulazione e verrà spiegato come sono stati ottenuti tali parametri a partire da un rilievo con elevato numero di dati misurati.

### 4.3 COSTRUZIONE DELLA MESH DI CALCOLO

La superficie di computazione richiesta nella simulazione idraulica è un insieme di dati geometrici che rappresentano l'alveo dove scorre il flusso. La superficie o mesh, deve approssimare il più possibile l'alveo del torrente oggetto di studio. La mesh è una entità geometrica formata da elementi bidimensionali (elementi) ed elementi puntuali (nodi). I nodi, che sono i vertici degli elementi, contengono le informazioni inerenti alla latitudine, longitudine e quota. Gli elementi definiscono un volume di corrente e la scabrezza della superficie su cui essa scorre. La mesh può essere realizzata con diversi programmi e può avere elementi con forme diverse. In questo caso è stato utilizzato il metodo proposto dagli sviluppatori di BASEMENT.

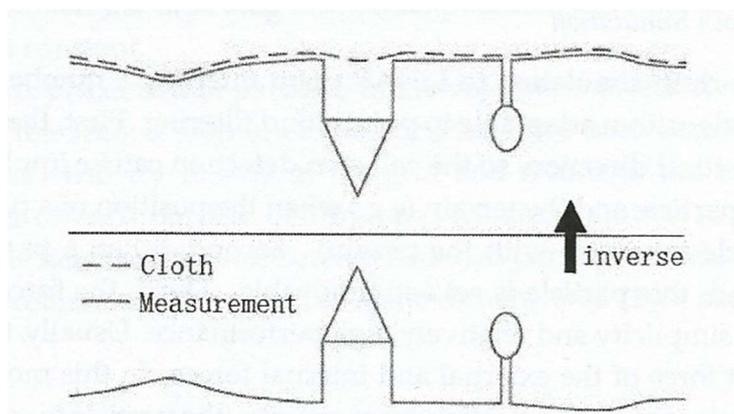
I programmatori di BASEMENT hanno realizzato un plug-in di QGIS, chiamato BASEmesh, il quale permette di generare una mesh triangolare partendo da un layer di punti misurati sul terreno.

Nel nostro caso di studio si pone subito un problema: QGIS non permette di elaborare la mole di dati ottenuti dal rilievo, pertanto è necessario sottocampionare la nuvola di punti passando da una maglia di 2,5 cm a 100 cm. Si è scelto di utilizzare una maglia a 100 cm perché studi dimostrano che anche con una semplificazione così elevata è possibile ottenere una mesh sufficientemente affidabile per la simulazione. Un altro problema riguarda la presenza di vegetazione, presente nel rilievo, che può portare a generare una mesh errata non tenendo conto della esatta geometria del fondo. A causa di questi problemi è stato necessario passare dal DEM originale ad un DTM con una maglia meno fitta in cui la vegetazione è stata rimossa. Per effettuare queste operazioni è stato utilizzato il programma Cloud Compare, programma che permette di trattare nuvole di punti di grosse dimensioni.

#### 4.3.1 Eliminazione della vegetazione

La presenza di punti che appartengono alla vegetazione, rilevati durante le riprese fotogrammetriche, non permette di creare una mesh fedele al terreno. Questo problema può essere risolto andando a rimuovere i punti appartenenti alla vegetazione. Il metodo proposto dell'articolo scientifico "An easy-to-use airborne LIDAR data filtering method based on cloth simulation" (W. Zhang, 2016), sfrutta un algoritmo che confronta la conformazione del terreno con una maglia o "coperta". Il metodo è chiamato "*cloth simulation filter*" o metodo della

coperta. Il metodo prevede di capovolgere idealmente i punti del rilievo (vedi figura 4.5) e di appoggiare una coperta al di sopra di essi. La coperta è formata da una maglia di punti, che può essere più o meno fitta, che cadono per causa della gravità. Perciò, nelle zone in cui i punti fanno parte del terreno la coperta segue fedelmente il terreno mentre nelle zone dove è presente la vegetazione la coperta cade per la gravità. Pertanto, se i punti della coperta sono sovrapposti a quelli rilevati faranno parte della nuvola di punti del terreno altrimenti saranno punti appartenenti alla vegetazione. In figura 4.5 è mostrato il metodo della “*cloth simulation filter*”.



**Figura 4.5** Schema grafico del metodo della “*cloth simulation filter*”.

Utilizzando questo principio è possibile definire due nuvole di punti che saranno formate o solamente dai punti che fanno parte del terreno o dai punti che fanno parte della vegetazione.

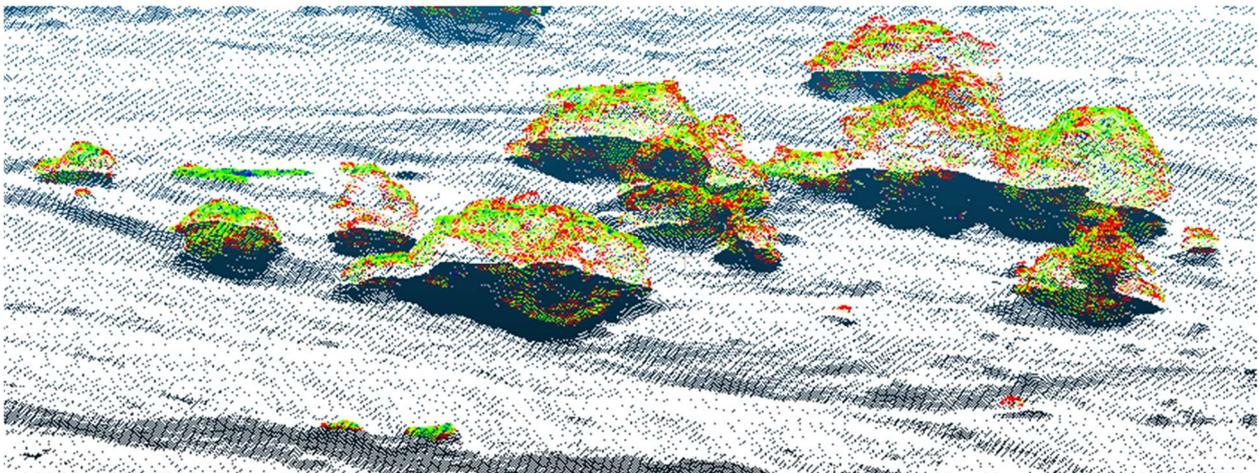
Operativamente, per effettuare questa operazione si utilizzerà il plugin CSF Filter.

Il comando *CSF Filter (Plugin -> CSF Filter)* permette di rimuovere i punti che non fanno parte del terreno (es. alberi, fabbricati, ecc...) dividendo la nuvola di punti in 2 file. Il primo contiene tutti i punti che appartengono al terreno (*ground*) e il secondo tutti i punti appartenenti alla vegetazione (*no ground*). Il programma permette di separare i punti rispetto diverse conformazioni del terreno. La figura 4.6 mostra le diverse conformazioni del terreno che possono essere utilizzate per la suddivisione dei punti.



**Figura 4.6** Possibili conformazioni del terreno: primo caso terreni particolarmente ripidi; secondo caso terreni con una lieve pendenza e terzo caso terreni piani. La possibilità di scegliere lo *slope processing* permette al programma di generare una maglia che segue terreni che hanno puntuali e bruschi cambi di pendenza.

Per scegliere quale conformazione del terreno utilizzare per la suddivisione dei punti, sono state fatte diverse prove. L'unica prova che ha permesso di ottenere un ottimo risultato è quella che ha utilizzato una lieve pendenza (*Relief*) con lo *slope processing*. Nelle altre prove si notava che venivano esclusi punti che facevano parte del terreno (soprattutto nelle sponde dove la componente vegetale è molto accentuata), oppure venivano inclusi nel terreno punti che appartenevano a piccoli arbusti. In figura 4.7 è mostrato come il metodo ha separato i punti che fanno parte della vegetazione dai punti che fanno parte del terreno.



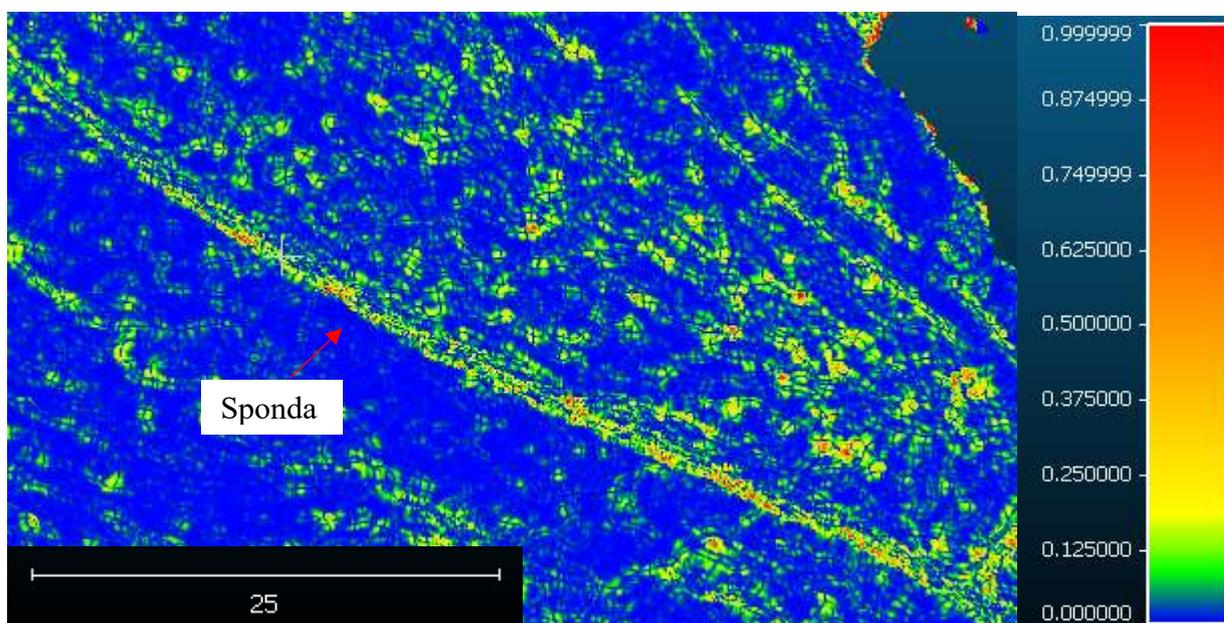
**Figura 4.7** Separazione dei punti della vegetazione. La nuvola di punti in bianco rappresenta i punti che appartengono al terreno, mentre i punti colorati in verde e rosso sono i punti che appartengono alla vegetazione.

Effettuata la separazione dei punti si è proseguito con il sottocampionamento dei soli punti che appartengono al terreno.

#### 4.3.2 Sottocampionamento

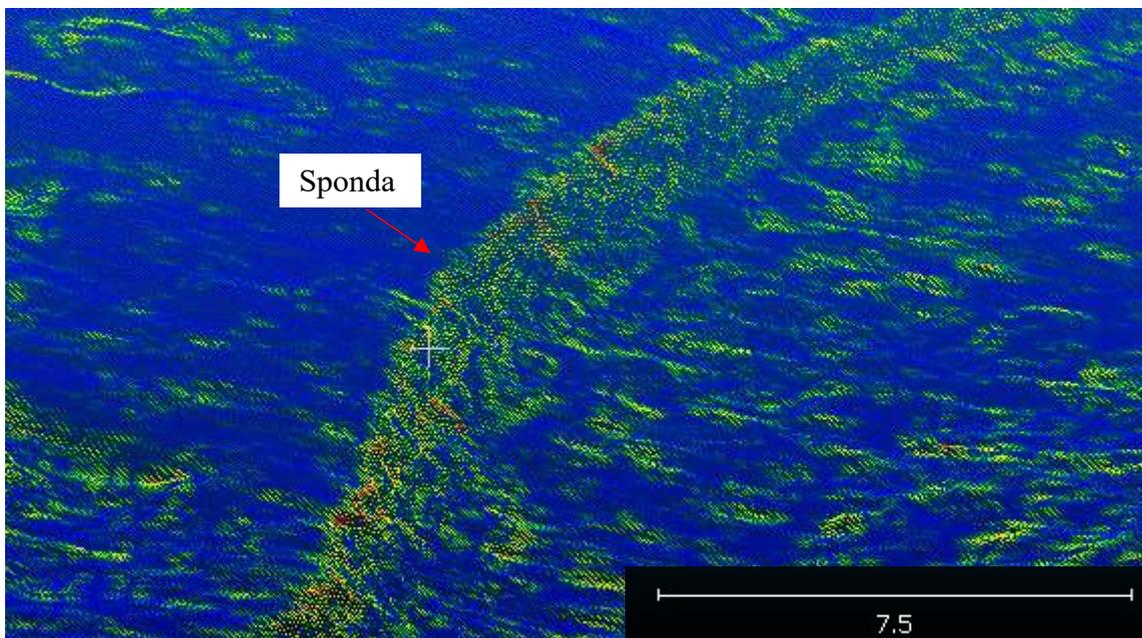
Come affermato in precedenza, la densità di punti all'interno del rilievo è eccessiva e pertanto non permette di creare una mesh utile alla simulazione. E' necessario andare a sottocampionare il rilievo, depurato della vegetazione, in modo da ridurre la densità. Durante un semplice sottocampionamento è possibile che la posizione delle sponde non venga catturato nel modo corretto, portando a creare una mesh errata. Si nota che sulle sponde la curvatura, calcolata tra due punti adiacenti è elevata. Perciò la curvatura può essere un indicatore della posizione e della forma delle sponde. Quindi, sarebbe opportuno che nelle zone a forte curvatura i punti vengano ridotti ma con un passo minore. Nello specifico è necessario che il sottocampionamento utilizzi la curvatura calcolata tra punti adiacenti in modo che si conservino più punti dove la curvatura è maggiore.

Operativamente la curvatura è stata calcolata usando il comando *Curvature (Tools -> Other -> Curvature)*. In figura 4.8 è mostrato un tratto in cui è stata calcolata la curvatura.



**Figura 4.8** Curvatura calcolata per un tratto di torrente mostrato sul piano orizzontale. I punti che vanno a formare la linea sono quei punti con una curvatura maggiore che appartengono alla sponda dell'alveo.

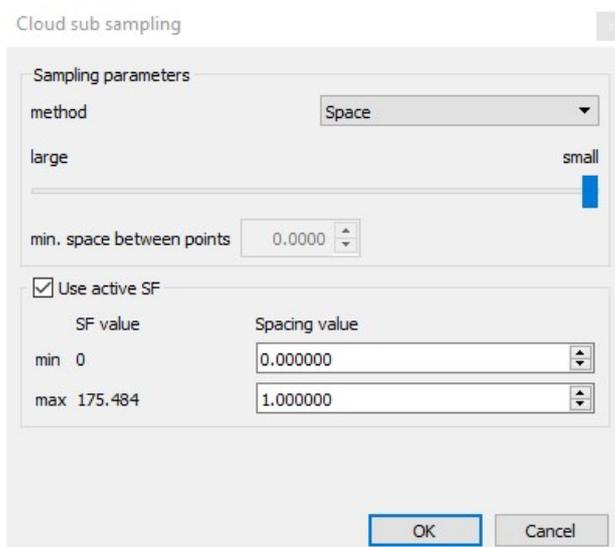
La figura 4.9 mostra una visualizzazione tridimensionale della sponda mostrata in figura 4.8 in cui si nota che a maggior curvatura corrisponde una maggior pendenza.



**Figura 4.9** Visualizzazione tridimensionale della sponda mostrata in figura 4.8.

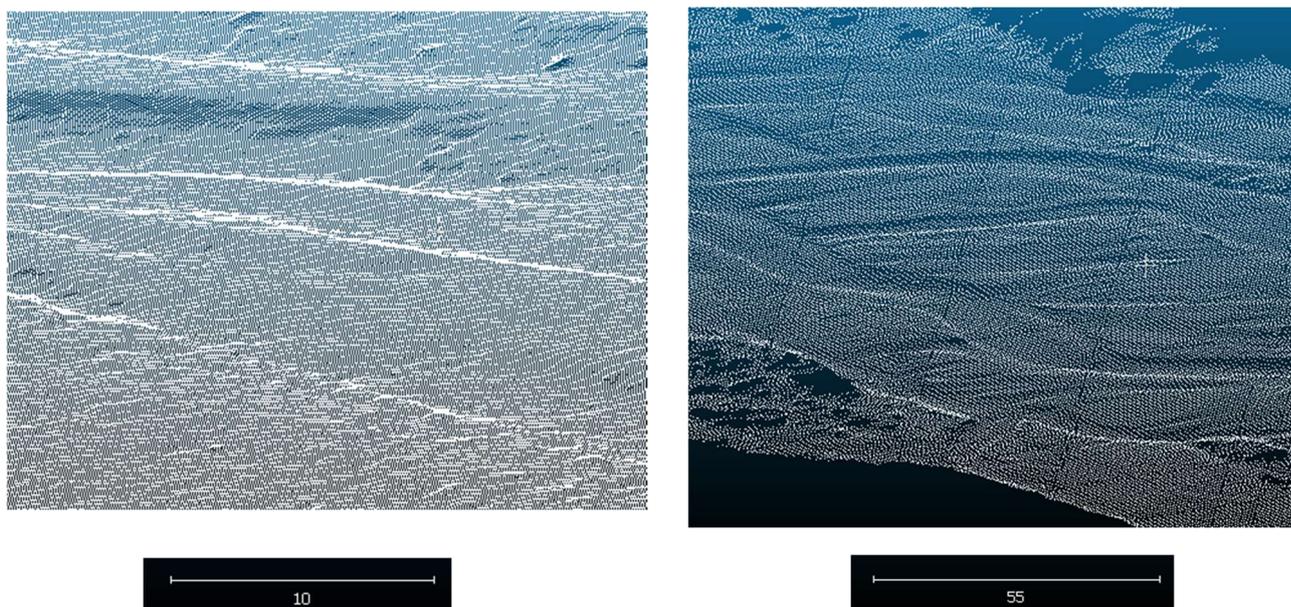
Calcolata la curvatura si procede con il sottocampionamento. Il sottocampionamento viene effettuato tramite il comando di *Subsample* (*Edit -> Subsample*), il quale permette di semplificare la maglia e ridurre il numero di punti. Il comando permette di sottocampionare tenendo conto della distanza geometrica tra punti adiacenti e dalla curvatura. Tenendo conto della curvatura è possibile effettuare una semplificazione di tipo spaziale se la curvatura è lieve, oppure di conservare i punti presenti in una regione se la curvatura è elevata.

In figura 4.10 è mostrata la schermata con le impostazioni utilizzate.



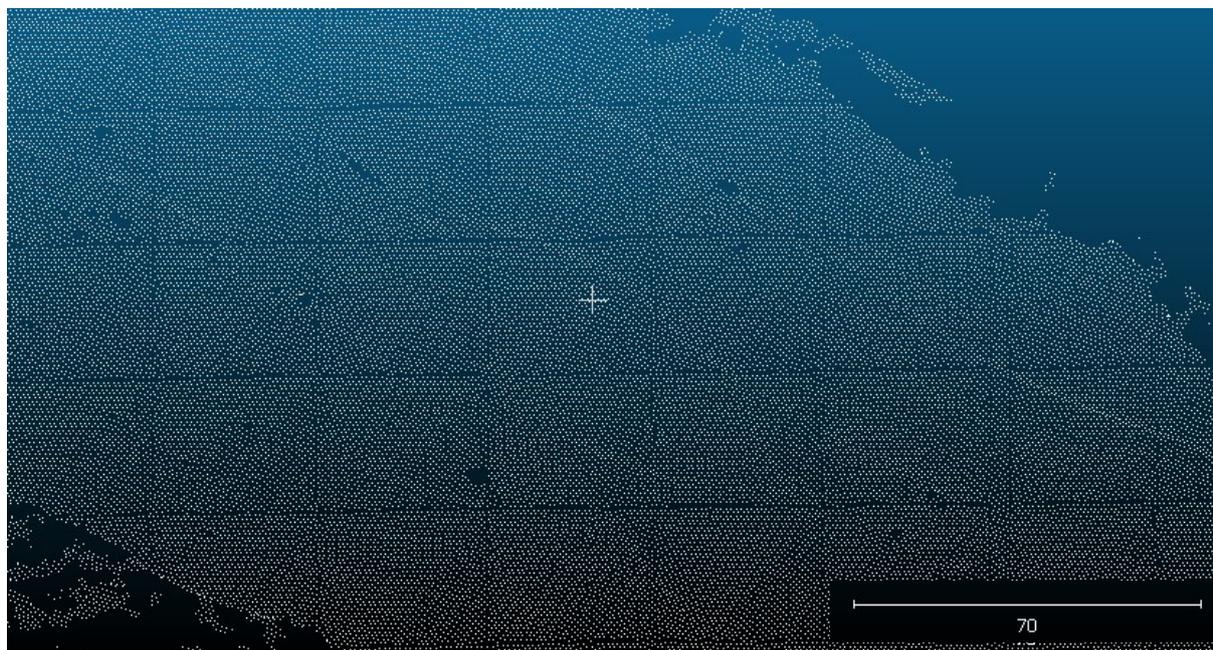
**Figura 4.10** Schermata comando *subsimple*.

Nel caso in esame è stato utilizzato un valore spaziale di 1,00 per ottenere una distanza massima tra 2 punti di 1,00 m. Il valore di 1,00 m è il valore massimo di distanza che si può trovare all'interno della nuvola di punti sottocampionata. Infatti, dove la pendenza è elevata, si è considerata la curvatura e pertanto si è potuto tenere conto di un punto ogni 10 cm. In figura 4.11 sono riportate due immagini che illustrano lo stesso canale, mostrato su due scale diverse, in modo che sia apprezzabile la densità di punti presenti prima e dopo la semplificazione.



**Figura 4.11** Confronto tra la nuvola di punti originale e la nuvola di punti semplificata.

In figura 4.12 è mostrato un tratto della nuvola di punti sottocampionata in cui è possibile notare le zone in cui la densità dei punti è più elevata a causa della maggiore curvatura.



**Figura 4.12** Sottocampionamento della nuvola di punti dove si notano le zone con curvatura maggiore che presentano una densità maggiore di punti.

Si è proceduto a testare i medesimi parametri con una procedura inversa, dove prima è stato effettuato il sottocampionamento e poi sono stati rimossi i punti appartenenti alla vegetazione. Si è riscontrato che le due procedure fornivano il medesimo risultato.

Il passaggio finale consiste nel creare il DTM utilizzando la nuvola di punti trattata. Nella nuvola di punti trattata sono presenti dei vuoti, generati dalla rimozione della vegetazione. E' possibile stimare i valori di queste zone vuote interpolando i valori dei punti limitrofi.

Operativamente si è proceduto all'interpolazione dei dati per ottenere un DTM, ed in seguito si è creato un raster con i punti presenti nel DTM. Il raster è un formato più versatile e maneggevole soprattutto per i programmi di analisi territoriale come QGIS.

Operativamente, quest'ultima operazione è stata effettuata con il comando *Rasterize (Tools -> Projection -> Rasterize)*.

In figura 4.13 è mostrato il raster della nuvola di punti interpolata dopo il sottocampionamento e la rimozione della vegetazione.



**Figura 4.13** Raster della nuvola di punti interpolata dopo il sottocampionamento e la rimozione della vegetazione.

### 4.3.3 Modellazione mesh

Dopo aver trattato i dati rilevati, si è passati alla creazione della superficie di calcolo. La mesh dovrà approssimare il più possibile l'alveo e tenere conto delle zone vegetate. Per ottenere una mesh affidabile è necessario che gli elementi siano piccoli (per seguire meglio il profilo del terreno), regolari e con le quote corrispondenti al terreno. Inoltre la mesh dovrà tenere conto delle zone vegetate per considerare gli effetti che ha la vegetazione sulla corrente. Perciò durante la creazione della mesh si deve tenere in conto sia della dimensione degli elementi della mesh, sia delle effettive quote del terreno che delle zone vegetate.

Operativamente la mesh viene creata in più fasi con QGIS tramite l'utilizzo di un plugin sviluppato sempre dall'ETH del politecnico federale di Zurigo, denominato BASEmesh.

La prima operazione che è stata fatta è stato scaricare il plugin BASEmesh seguendo la procedura descritta nel manuale d'utilizzo del programma al capitolo 3.3.5.1.1. e riportate di seguito.

- “(1) Aprire QGIS;
- (2) Entrare su *Gestisci ed installa plugin...* dal menù Plugin dalla barra dei comandi;
- (3) Andare su impostazioni (si dovrebbe vedere solo Repository plugin ufficiale QGIS);
- (4) Selezionare *Aggiungi...* e nel nome scrivere BASEmesh Repository;
- (5) Nell'URL scrivere: [http://people.ee.ethz.ch/~basement/qgis\\_plugins/qgis\\_plugins.xml](http://people.ee.ethz.ch/~basement/qgis_plugins/qgis_plugins.xml);
- (6) Schiacciare OK;
- (7) Il nuovo repository comparirà insieme a quello/i già esistente/i;
- (8) Tornare su *Tutto* e cercare BASEmesh;
- (9) Selezionare BASEmesh e schiacciare *installa.*”

#### 4.3.3.1 Comandi per la modellazione della Mesh

Il Plugin permette di modellare sia una mesh triangolare, sia di estrarre sezioni del terreno. Nel caso in esame verranno descritti i comandi necessari e la procedura da adottare per modellare la mesh utile alla simulazione bidimensionale.

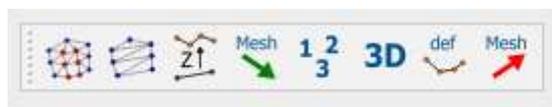


Figura 4.14 Comandi di BASEmesh.

I comandi mostrati in figura 4.14 sono (in ordine come nell'immagine da sinistra a destra):

- 1) *Quality meshing*, permette di generare una mesh triangolare con parametri avanzati ma con quote di ogni elemento uguali a 0;
- 2) *Elevation meshing*, permette di generare una mesh triangolare dalla triangolazione dei punti del terreno;
- 3) *Interpolation*, permette di attribuire le quote ad ogni singolo punto della mesh a partire da un layer di punti o un DEM. Questo comando viene utilizzato solo dopo il comando *Quality meshing*;
- 4) *Import meshing*, permette di importare e di aprire su QGIS un file *.2dm* (formato letto da BASEMENT);
- 5) *Renumber meshing*, permette di modificare manualmente gli elementi che compongono la mesh;
- 6) *3D view*, effettua un plottaggio a video della mesh in 3 dimensioni dove è permesso spostarsi al di sopra e vedere il modello completo;
- 7) *Stringdef*, permette di estrapolare le sezioni per una analisi monodimensionali;
- 8) *Export meshing*, permette di estrarre la mesh in un file *.2dm*.

Per creare la mesh si è optato nell'utilizzare il comando *Quality meshing* dato che è possibile modulare il risultato andando ad inserire dei parametri avanzati.

### 4.3.3.2 Ottimizzazione numerica della mesh

L'utilizzo del comando *Quality meshing* permette di creare una mesh formata da nodi ed elementi dove gli elementi vengono calcolati solo sulle componenti spaziali di latitudine e longitudine senza tener conto delle quote. Le quote verranno applicate in seguito ai nodi tramite il comando *Interpolation*. In figura 4.15 è mostrata la schermata del comando *Quality meshing*, dove è possibile notare gli input necessari.

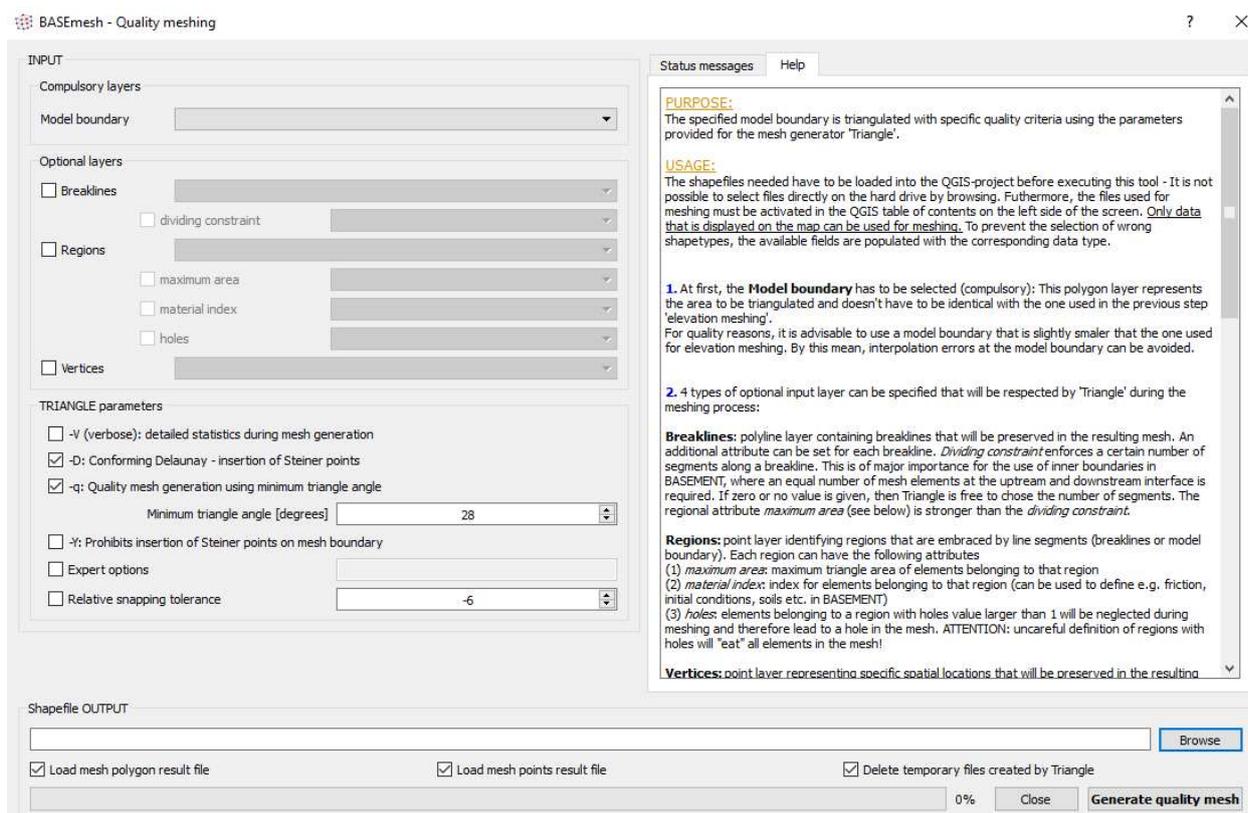


Figura 4.15 Schermata *Quality meshing*.

Il comando è composto da due sezioni: *Compulsory layer* e *Optional layer*.

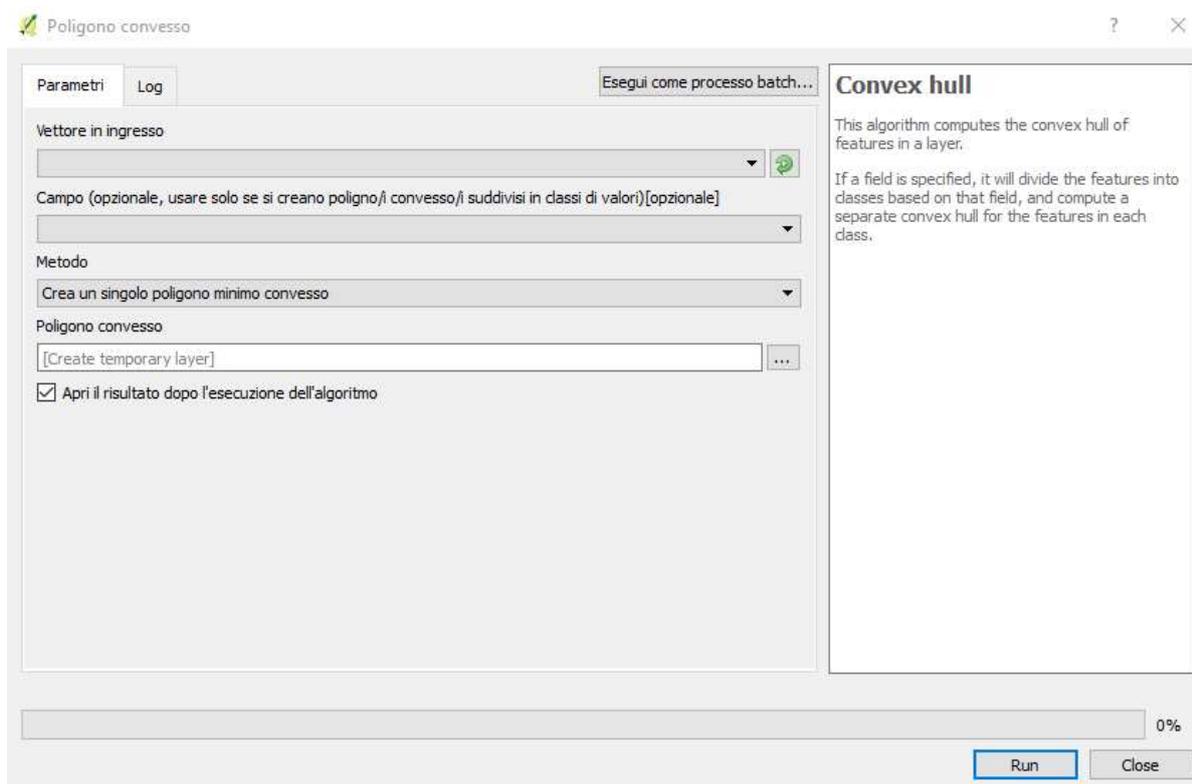
All'interno del *Compulsory layer* fa parte l'input *Model boundary*, (layer formato superficie) il quale rappresenta il domino della mesh (area contenente tutti i punti del rilievo).

*Optional layer* è formato da: *Breaklines*, o linee di break (layer formato linea) le quali impediscono al programma di generare elementi della mesh tra punti che si trovano in due regioni diverse (dato facoltativo) e *Regions*, (layer di tipo punti) i quali rappresentano i punti del rilievo.

I parametri dei triangoli sono ulteriori dati che possono essere forniti per modulare la forma e la grandezza dei singoli elementi. In questa fase di elaborazione non è ancora possibile poiché non siamo in possesso del dominio della mesh e delle *breakline*.

### 4.3.3.3 Dominio

La necessità di creare una superficie che rappresenta il dominio della mesh, permette di esplorare ulteriori comandi presenti all'interno di QGIS. Il dominio rappresenta il luogo dei punti misurati contenuti all'interno di una singola superficie. Esso può essere ottenuto andando a tracciare a mano il perimetro dei punti più esterni tra quelli misurati oppure può essere ottenuto in automatico tramite il comando *Convex hull*. Il comando genera un singolo poligono convesso il quale contiene i punti del layer d'ingresso. La figura 4.16 mostra la schermata del comando *Convex hull*.



**Figura 4.16** Schermata *Convex hull*.

Il risultato viene mostrato in figura 4.17 dove il layer verde rappresenta i punti del DTM mentre il layer in viola rappresenta il dominio dei punti ottenuto tramite il *Convex hull*.

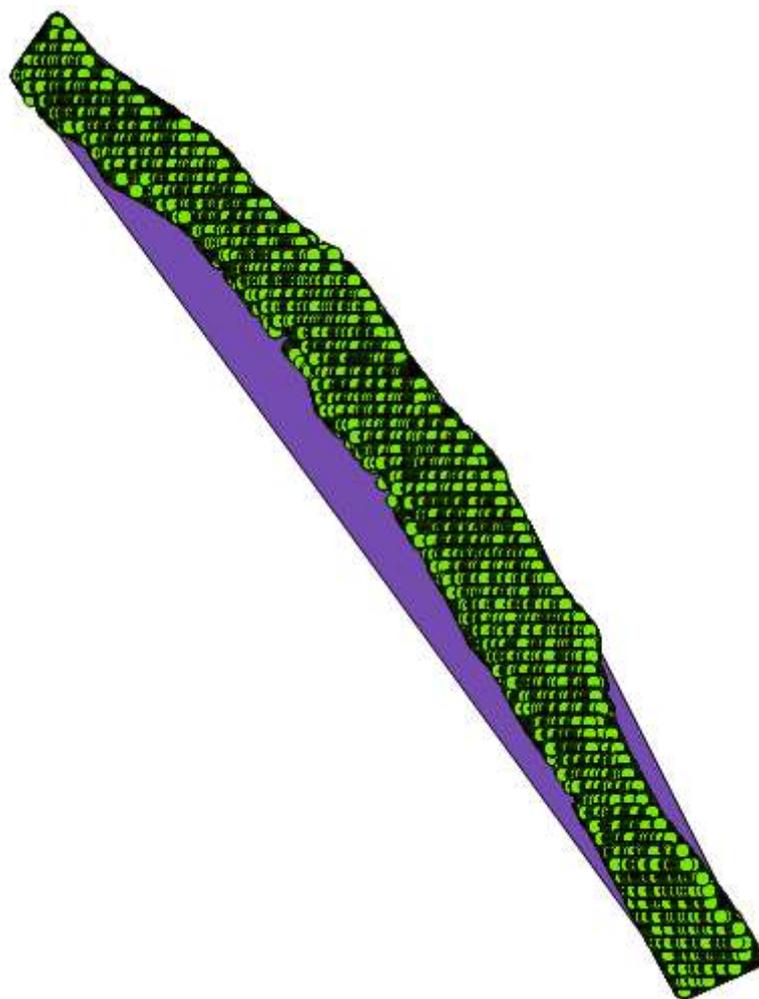


Figura 4.17 Poligono convesso che racchiude la nuvola di punti.

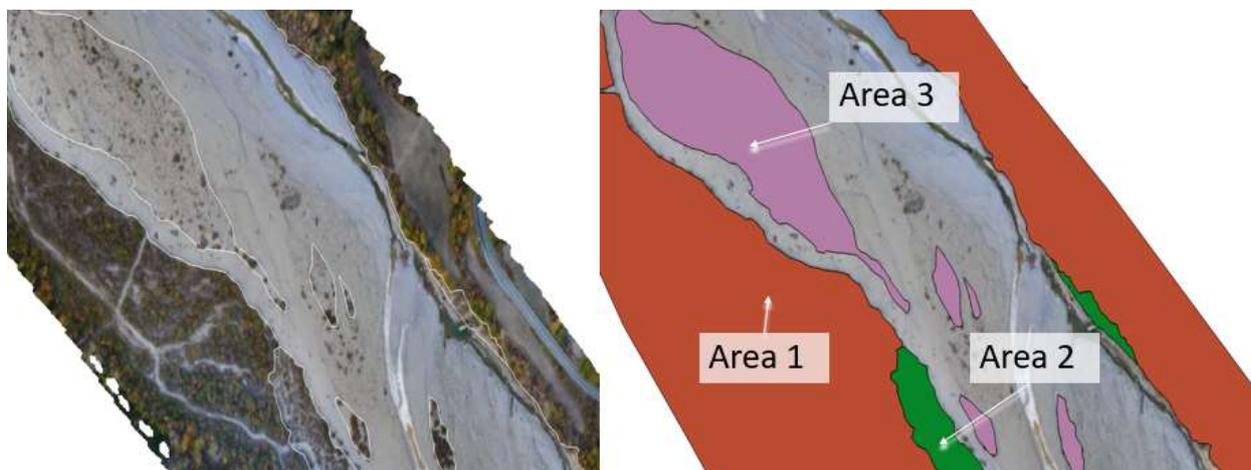
#### 4.3.3.4 Breakline

Le *breakline* sono linee tracciate dall'operatore per suddividere i punti misurati in regioni con omogenee caratteristiche come per esempio il materiale superficiale, coefficienti d'attrito ecc...

Le *breakline* impediscono a BASEmesh di generare elementi tra punti di aree differenti. Per ottenere le *breakline* si è scelto di suddividere il rilievo in aree con vegetazione omogenea. Le aree sono tracciate a mano, in modo soggettivo, a partire dall'ortofoto del tratto del torrente Borbera. Sono state individuate e tracciate tre aree di vegetazione omogenea. Esse sono: Area 1, zona con alta vegetazione con piante ad alto fusto presenti sulle sponde dal torrente; Area 2,

zona con media vegetazione con piante a basso fusto/sterpaglia presente a bordo alveo e Area 3, zona con bassa vegetazione con la maggior parte di sterpaglia presente in alveo su “isole”.

In figura 4.18 sono mostrate due immagini dove su un tratto del Borbera sono riportate diverse informazioni. Nell’immagine di destra sono mostrate le aree di vegetazione omogenea. Nell’immagine di sinistra si vedono le *breakline* (perimetri delle aree 1, 2 e 3) su ortofoto.



**Figura 4.18** Differenti aree di vegetazione.

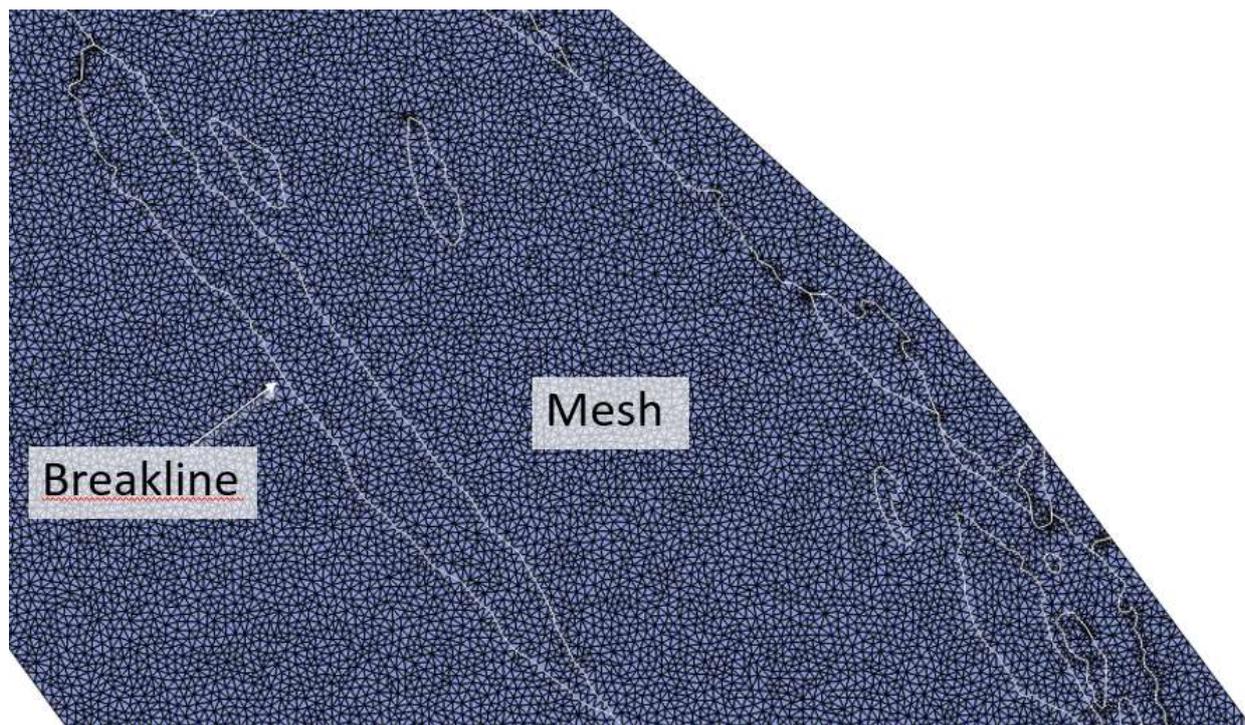
Dopo aver tracciato le aree sono stati estratti i perimetri (*Vettore-> Strumenti di Geometria-> da poligoni a linee*) ed utilizzati come *breakline*.

Con questa ultima operazione si hanno a disposizione tutti i dati necessari per la modellazione della mesh. La figura 4.19 mostra la schermata già vista in figura 4.15 con gli input utilizzati per la creazione della mesh. Oltre ai valori standard inseriti di default nei parametri dei triangoli è stato selezionato *Expert option* dove inserendo il valore “a” seguito da un numero intero definisce un vincolo rigido sulla massima estensione degli elementi triangolari, con il valore che rappresenta l’area in metri quadri. La scelta di utilizzare il valore *a10* (massima area 10 m<sup>2</sup>) sta nel creare una mesh non troppo fitta (in modo da non rallentare in seguito il motore di calcolo) ed allo stesso tempo poter apprezzare i diversi canali che sono presenti sull’alveo.

The screenshot shows a software interface for mesh generation, divided into three main sections: INPUT, TRIANGLE parameters, and a section for optional layers. The INPUT section includes a 'Compulsory layers' dropdown set to 'Area' and an 'Optional layers' section with checkboxes for 'Breaklines' (checked), 'Regions' (checked), and 'Vertices' (unchecked). The 'Breaklines' section has a dropdown set to 'vegetazione' and a 'dividing constraint' dropdown set to 'id'. The 'Regions' section has a dropdown set to 'Punti\_ground\_matid' and three checkboxes for 'maximum area', 'material index', and 'holes', each with a dropdown set to 'X'. The 'TRIANGLE parameters' section includes checkboxes for '-V (verbose): detailed statistics during mesh generation' (unchecked), '-D: Conforming Delaunay - insertion of Steiner points' (checked), and '-q: Quality mesh generation using minimum triangle angle' (checked). The '-q' option has a 'Minimum triangle angle [degrees]' dropdown set to '28'. Other options include '-Y: Prohibits insertion of Steiner points on mesh boundary' (unchecked), 'Expert options' (checked) with a text input 'a10', and 'Relative snapping tolerance' (unchecked) with a dropdown set to '-6'.

**Figura 4.19** Schermata con i valori utilizzati per la creazione della mesh.

Il risultato che si ottiene (mostrato in figura 4.20) è una mesh formata da elementi triangolari piani e nodi con quote uguali a 0. Le quote verranno associate alla mesh nella fase successiva utilizzando il raster che si è creato in precedenza. Inoltre, in figura 4.20 sono visibili gli elementi della mesh contenuti all'interno delle *breakline*. Gli elementi hanno un'estensione molto simile tra loro grazie all'utilizzo delle *Expert option*.



**Figura 4.20** Mesh con elementi di area massima di  $10 \text{ m}^2$  separati dalle *breakline* definite dalle aree di vegetazione omogenea.

La mesh generata ha superficie totale di  $967230 \text{ m}^2$  con 78609 nodi e 155400 elementi. L'area media degli elementi è perciò  $6,22 \text{ m}^2$ .

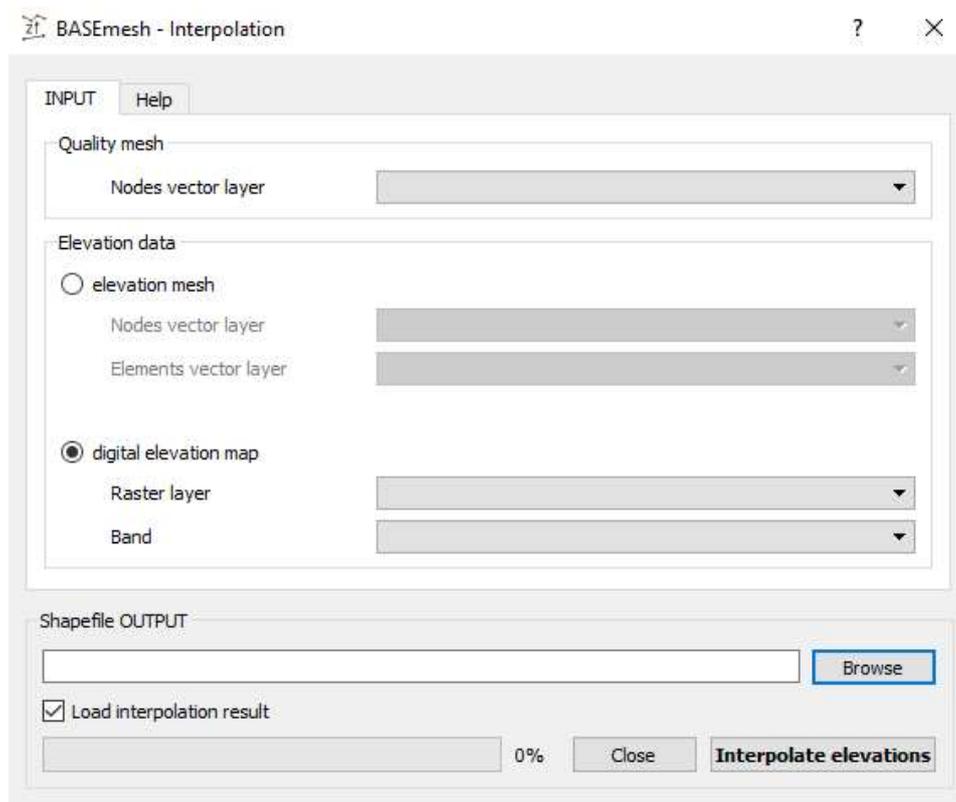
La mesh ottenuta però non può ancora essere utilizzata nella simulazione idraulica. In primo luogo, il comando di *Quality mesh*, come descritto in precedenza, permette sì di creare una mesh a partire dai dati geometrici presenti dai punti misurati e caricati sul programma, ma non tiene conto delle quote. Pertanto, si è in possesso solo di elementi piani dove la quota di ogni singolo nodo è uguale a 0. In secondo luogo, durante la creazione della mesh il software restituisce una mesh con un valore di *matid* (materiale) uguale ad 1 per ogni singolo elemento. Questo implica che il programma associa a tutta la mesh lo stesso materiale, e perciò non tiene conto delle zone di vegetazione definite in precedenza.

#### 4.3.3.5 Interpolazione delle quote

Per associare le quote alla mesh, gli sviluppatori di BASEmesh hanno creato il comando *Interpolation*. Esso permette di associare i valori dei punti misurati (DEM/DTM) ai nodi della

mesh. Se i nodi della mesh non coincidono con i punti misurati è prevista una interpolazione lineare tra i valori più prossimi.

Operativamente si è utilizzato il comando *Interpolation* per associare le quote presenti nel raster, creato in precedenza, ai nodi della mesh. La figura 4.21 mostra la schermata del comando *Interpolation*.



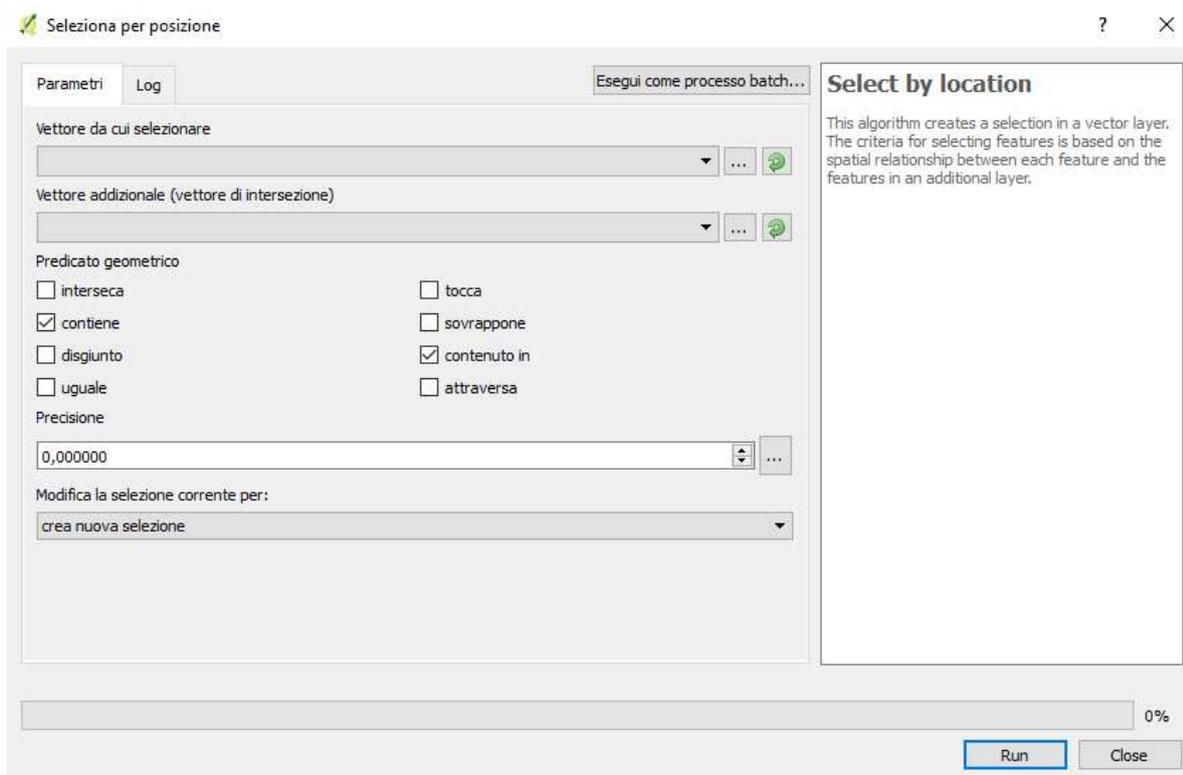
**Figura 4.21** Schermata *Interpolation*.

#### 4.3.3.6 Materiale di fondo

Per associare il giusto materiale agli elementi della mesh è necessario andare a modificare il valore di *matid* presente tra le caratteristiche degli elementi della mesh. Il valore di *matid* di un elemento rappresenta il materiale presente su di esso. Come definito nel capitolo 4.3.3.4 si è suddiviso il dominio in tre differenti aree di vegetazioni omogenee. Bisogna tener conto che i punti che non ricadono all'interno di una delle 3 aree di vegetazione, sono elementi che appartengono all'alveo. Perciò è necessario assegnare quattro valori diversi per aree diverse.

Operativamente è necessario andare a selezionare gli elementi che ricadono all'interno delle aree definite in precedenza e modificare il valore di *matid*. Per non dover cambiare un dato alla

volta è possibile selezionare il comando “*seleziona per posizione*” (*Vettore -> Strumenti di Ricerca -> Seleziona per posizione*) il quale permette di individuare tutti gli elementi che sono contenuti all’interno di un’area. Dato che il valore che viene generato in automatico durante la creazione della mesh è pari a 0, gli elementi che fanno parte dell’alveo manterranno il valore 0. Mentre gli elementi che appartengono alle aree vegetate avranno il valore 1 nelle aree con alta vegetazione, 2 nelle aree con media vegetazione e 3 nelle aree con bassa vegetazione. In figura 4.22 è mostrata la schermata del comando *seleziona per posizione* che permette di selezionare gli elementi della mesh che sono inclusi in un altro layer, come per esempio le aree di vegetazione.



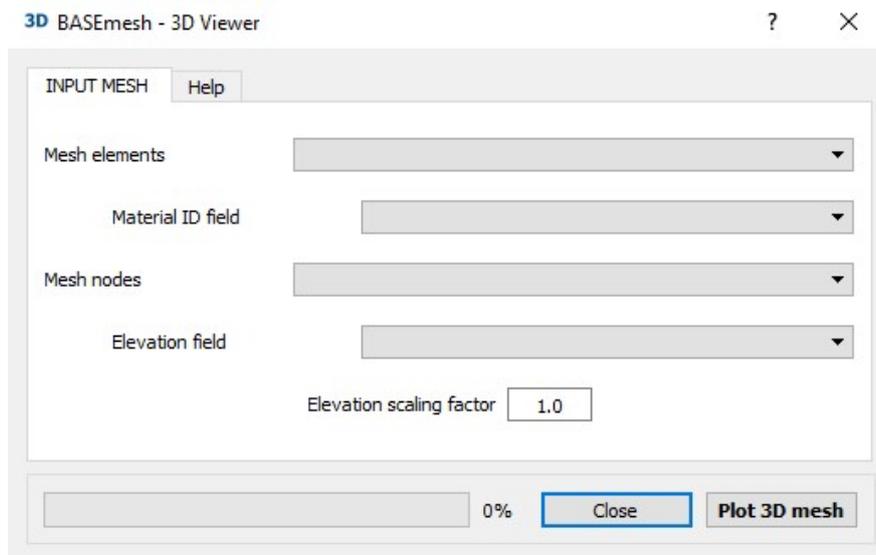
**Figura 4.22** Schermata utilizzata per selezionare gli elementi rispetto ad un layer.

Dopo che sono stati selezionati gli elementi a cui modificare il materiale è possibile entrare nella tabella degli attributi ed inserire i valori desiderati.

Effettuato lo stesso procedimento per ogni area di vegetazione omogenea si è ottenuta la mesh definitiva da utilizzare nella simulazione.

#### 4.3.3.7 Visualizzazione 3D della Mesh

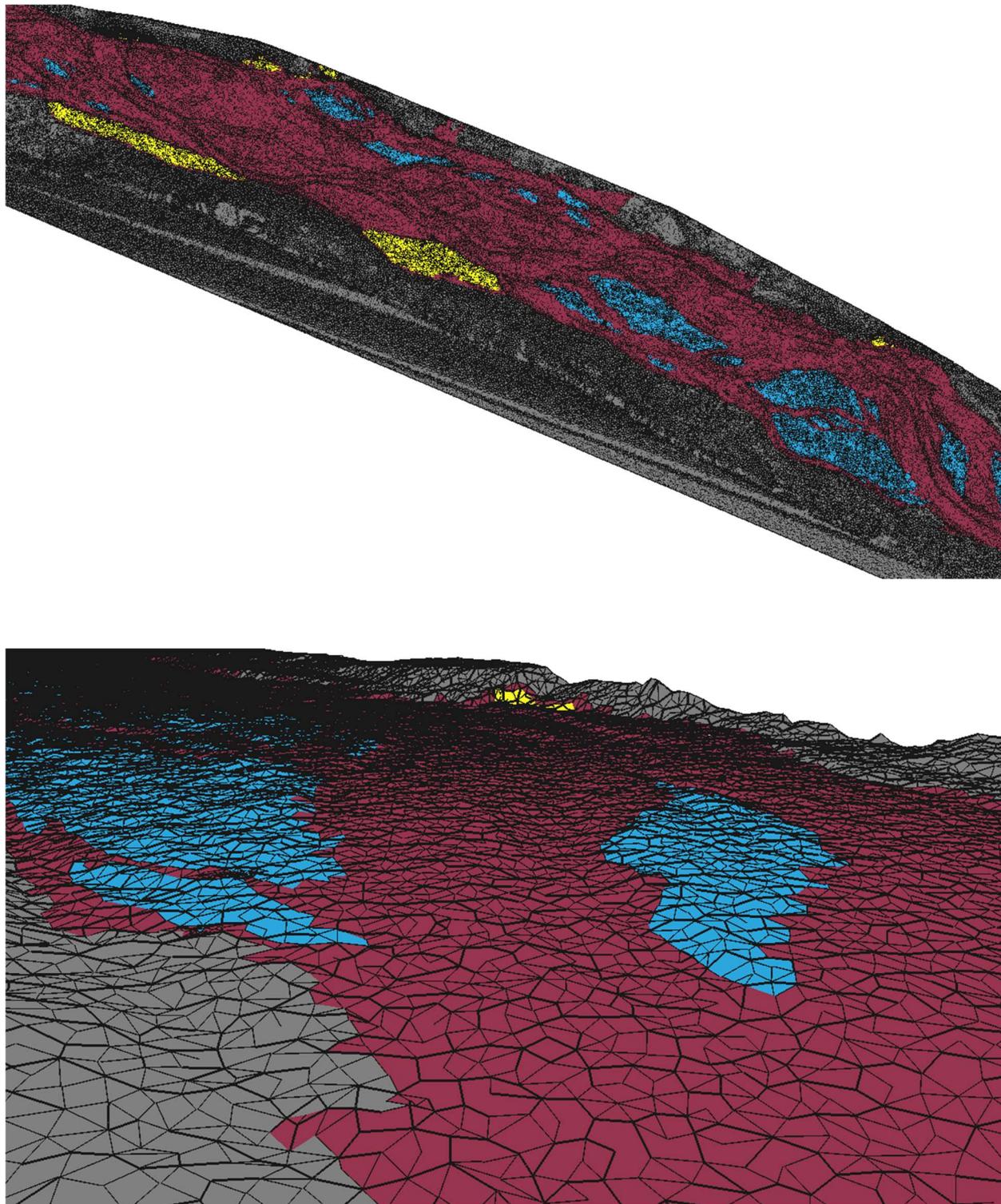
Dopo aver completato le operazioni necessarie alla realizzazione della mesh in tutte le sue componenti è possibile utilizzare il comando *3D view* per avere una visualizzazione d'insieme della mesh e confermare che il lavoro effettuato sia coerente con i dati misurati. La figura 4.23 mostra la schermata di *3D Viewer* dove il comando richiede l'inserimento dei nodi e degli elementi della mesh per ottenerne la visualizzazione.



**Figura 4.23** Schermata *3D Viewer*.

E' possibile visualizzare la mesh tenendo conto dei materiali (colori differenti) ed il fattore di scala sulle quote.

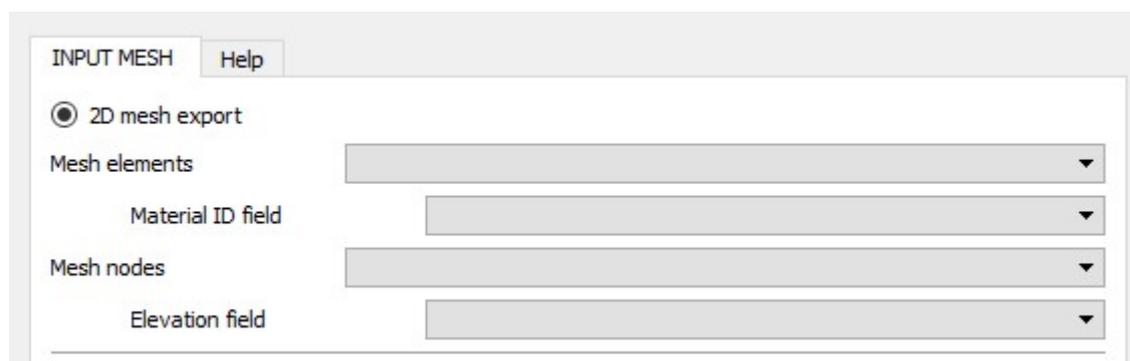
Il risultato mostrato in figura 4.24 utilizza il colore viola per l'alveo, grigio per le aree a forte vegetazione, giallo per le aree a media vegetazione e azzurro per le isole a bassa vegetazione.



**Figura 4.24** Visualizzazione 3D della mesh con differenti colorazione in base al materiale di fondo.

### 4.3.3.8 Esportazione Mesh

Per concludere la modellazione non resta che esportare la mesh in formato *.2dm*, formato necessario a BASEMENT per effettuare l'analisi idraulica. Pertanto, con il comando *Export meshing* è possibile esportare la mesh (formata da nodi ed elementi) all'esterno di QGIS con il formato *.2dm*. In figura 4.25 è mostrata la schermata del comando di esportazione la quale richiede l'inserimento degli elementi e dei nodi che si vogliono esportare.



**Figura 4.25** Esportazione mesh.

Completate le procedure di creazione della mesh è necessario andare a definire le condizioni al contorno, le condizioni iniziali e definizione dei dati da ottenere come output.

#### **4.4**      *CONDIZIONI AL CONTORNO*

Le condizioni al contorno sono delle informazioni essenziali a qualsiasi sistema di equazioni differenziali per poter essere risolto. La soluzione delle equazioni differenziali di De Saint Venant che descrivono le dinamiche dei fluidi richiede l'inserimento di un minimo di 3 condizioni al contorno. Le condizioni al contorno sono applicate alla sezione d'ingresso, alla sezione d'uscita (le due sezioni saranno chiamate Sez\_start e Sez\_end), e sul materiale della mesh. Possono essere inserite ulteriori condizioni al contorno quando sono presenti dati aggiuntivi che possono influenzare la soluzione, come per esempio due torrenti che si uniscono (in tal caso è necessario definire una condizione al bordo sulla sezione iniziale per ciascun torrente)

Le condizioni al contorno che devono essere inserite sono: 1 condizione sulla sezione d'ingresso, definire la condizione di ingresso del flusso all'interno del dominio di simulazione; 1 condizione sulla sezione d'uscita, definire il metodo di fuoriuscita del flusso dall'area di computazione e i coefficienti di attrito, definizione dei coefficienti di Manning.

##### **4.4.1**      *Sezione d'ingresso e d'uscita*

Le condizioni al contorno devono essere applicate a sezioni della mesh. Le due sezioni fondamentali sono la sezione d'ingresso e di uscita del dominio di computazione. La sezione d'ingresso o di inflow è la sezione che si trova a monte della mesh. La sezione d'uscita o di outflow è la sezione a valle della mesh. Nella sezione d'ingresso sarà applicato l'idrogramma d'ingresso che riporta la portata da simulare. Nella sezione d'uscita sarà applicata la condizione di fuoriuscita del flusso dall'area di computazione.

Operativamente è necessario elencare i punti corrispondenti ai nodi della mesh rispetto alla sezione d'interesse all'interno di BASEMENT.

#### 4.4.2 Idrogramma d'ingresso

L'idrogramma d'ingresso è la condizione che definisce il volume in ingresso per ogni step di simulazione. Il volume in ingresso, viene calcolato ad ogni step temporale come la portata per il time step. Il time step verrà definito nel capitolo 4.7, mentre la portata del torrente è tratta nello studio idrologico del capitolo 3.2. Nello studio idrologico sono state selezionate le portate che caratterizzano il torrente. La simulazione dovrà simulare il comportamento del torrente in regime stazionario, effettuando simulazioni a portata costante. Perciò sarà necessario eseguire una simulazione a portata costante per ogni portata selezionata in precedenza. Le portate selezionate sono riportate in tabella 4.2.

Simulazione	Q [m <sup>3</sup> /s]
1	1,50
2	3,90
3	6,90
4	11,10
5	20,10
6	29,10
7	45,00
8	113,50
9	161,44
10	193,06

**Tabella 4.2** Portate selezionate per la simulazione.

La definizione della portata e del time step non sono condizioni sufficienti a determinare la velocità ed il livello di ogni elemento della mesh nella sezione d'ingresso. Infatti, la portata permette di calcolare il volume del fluido ma non il livello e la velocità della sezione iniziale. Il livello e la velocità della sezione iniziale influenza il livello e la velocità degli elementi adiacenti e perciò il volume di tutti gli elementi della mesh. Per definire il livello e la velocità della sezione iniziale il programma utilizza una distribuzione delle pressioni in condizioni idrostatiche. La distribuzione idrostatica delle pressioni permette al programma di calcolare in modo agevole il livello nella sezione iniziale. Questo permette di avere un valore utile alla simulazione ma che non corrisponde al livello reale. Pertanto, i valori ottenuti negli elementi vicino alle sezioni di contorno non saranno affidabili e non dovranno esser tenuti in conto nella consultazione dei risultati.

Operativamente l'idrogramma deve riportare al suo interno il tempo totale e la portata da simulare in un file *.dat*. Il tempo totale utilizzato per la simulazione rappresenta quanto tempo impiega il flusso a percorrere la mesh. Il valore della portata da simulare è riportato in tabella 4.2. Nel seguente esempio è mostrato l'idrogramma d'ingresso per la portata massima annuale.

#TIME[s]	VALUE
0	45.0
3000	45.0

Il tempo (TIME) è definito in secondi mentre la portata (VALUE) è in m<sup>3</sup>/s.

#### **4.4.3**      *Analisi della fuoriuscita dall'area di computazione*

Oltre alla condizione al contorno da applicare alla sezione d'ingresso è necessario definire un'ulteriore condizione al contorno nella sezione d'uscita. BASEMENT richiede di definire il metodo da utilizzare per calcolare il livello nella sezione finale. Le condizioni permesse sono: zero gradiente, briglia e apertura. Zero gradiente applica alla sezione d'uscita un gradiente pari a zero per la profondità e la velocità della corrente. Briglia simula il comportamento di un fluido che incontra una briglia nella sezione d'uscita. La geometria della briglia viene definita dall'utente. Apertura simula il comportamento di un fluido che fluisce attraverso una apertura posta al fondo di una paratoia.

Nel caso in esame si è scelto di utilizzare l'opzione di zero gradiente. Data la distribuzione idrostatica delle pressioni i valori ottenuti negli elementi vicino alla sezione d'uscita non saranno affidabili e non dovranno essere tenuti in conto nella consultazione dei risultati, come nella sezione iniziale.

#### 4.4.4 Coefficiente di attrito

Il coefficiente d'attrito di un elemento dipende dalla scabrezza dell'alveo, ed influenza il moto della corrente che scorre sopra di esso. Come già definito nel capitolo 4.3.3.6 l'alveo è stato suddiviso in 4 zone differenti: alveo inghiaiato, zone con alta vegetazione, zone con media vegetazione e zone con bassa vegetazione. Perciò è necessario definire i coefficienti d'attrito (in termini si coefficiente di Manning) per ogni zona individuata.

Il coefficiente di attrito dell'alveo è calcolabile tramite diverse formule presenti in letteratura. Le formule utilizzano la granulometria del fondo per ottenere il coefficiente di Manning. Si è optato di calcolare il coefficiente di attrito con le formule riportate in tabella 4.3 per ogni curva granulometrica calcolate nel capitolo 3.3.

curve	$d_{50}$ [mm]	$d_{90}$ [mm]	Strickler (4-25)	Meyer- Peter & Muller (4-26)	Julien (4-27)	Julien (4-28)	Crow (4-29)	Crow (4-30)
			$\frac{d_{50}^{\frac{1}{6}}}{21,1}$	$\frac{d_{90}^{\frac{1}{6}}}{26,0}$	$0,062 \cdot d_{50}^{\frac{1}{6}}$	$0,038 \cdot d_{90}^{\frac{1}{6}}$	$0,034 \cdot d_{50}^{\frac{1}{6}}$	$0,036 \cdot d_{90}^{\frac{1}{6}}$
1	19	48	0,0246	0,0232	0,032124	0,027744	0,017617	0,021713
2	19	48	0,0246	0,0232	0,032124	0,027744	0,017617	0,021713
3	19	48	0,0246	0,0232	0,032117	0,027765	0,017613	0,021729
4	28	65	0,0262	0,0244	0,034256	0,029162	0,018786	0,022823
5	19	49	0,0246	0,0232	0,032129	0,02778	0,017619	0,021741
6	28	65	0,0262	0,0244	0,034256	0,029165	0,018786	0,022825

**Tabella 4.3** Valori di Manning.

I risultati ottenuti vengono mediati rispetto al metodo utilizzato e riportati in tabella 4.4.

Strickler	Meyer-Peter & Muller	Julien ( $d_{50}$ )	Julien ( $d_{90}$ )	Crow ( $d_{50}$ )	Crow ( $d_{90}$ )
0,0251	0,0236	0,0328	0,0282	0,0180	0,0221

**Tabella 4.4** Valori di Manning mediati.

Si osserva che le formule proposte da Julien e Crow che utilizzano il  $d_{50}$  si discostano di molto dai risultati ottenuti con le altre formule. Perciò si è scelto di escludere questi valori dalla media complessiva. Il valore ottenuto dalla media dei valori medi di Strickler, Meyer-Peter & Muller, Julien ( $d_{90}$ ) e Crow( $d_{90}$ ), ed utilizzato come coefficiente d'attrito dell'alveo è 0,025.

Per quanto riguarda le zone vegetate, non è stato possibile utilizzare alcun metodo analitico per definire il coefficiente d'attrito. La determinazione del coefficiente d'attrito dovrà tenere conto della differente vegetazione presente in alveo. Nel libro *Open-Channel Hydraulics*, (Chow, 1959), vengono proposte delle tabelle che riportano i diversi valori di Manning rispetto alla vegetazione presente in alveo. La figura 4.26, estratta dal libro, riporta la tabella con i valori minimi, medi e massimi del valore di Manning rispetto al diverso tipo di vegetazione.

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
<b>A. Natural streams</b>			
1. Main Channels			
a. Clean, straight, full, no rifts, or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. Same as "d" but more stones	0.045	0.050	0.060
g. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150
2. Flood Plains			
a. Pasture no brush			
1. Short grass	0.025	0.030	0.035
2. High grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. No crop	0.020	0.030	0.040
2. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
2. Same as above, but heavy sprouts	0.050	0.060	0.080
3. Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.080	0.100	0.120
4. Same as above, but with flow into branches	0.100	0.120	0.160
5. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.110
3. Mountain streams, no vegetation in channel, banks usually steep, with trees and brush on banks submerged			
a. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070

Figura 4.26 Valori di Manning a differente vegetazione in alveo.

Nel capitolo 4.3.3.6 erano state definite 4 aree di vegetazione omogenea e relativo valore di *matid*. Per l'alveo è già stato definito il valore del coefficiente d'attrito, mentre per le aree

vegetate è necessario definirlo rispetto alla figura 4.26. Per le zone a bassa vegetazione (sterpaglia presente sulle barre di sedimenti) si è assunto il valore di 0,04 valore intermedio tra il minimo ed il medio riportato al punto 2.c.1. Per le zone a media vegetazione (piante a basso fusto/sterpaglia presente a bordo alveo) si è assunto il valore di 0,05 valore medio riportato al punto 2.c.2. Ed infine, per le zone ad alta vegetazione (piante ad alto fusto presenti sulle sponde dal torrente) si è assunto il valore di 0,1 valore medio riportato al punto 2.d.3.

Si riassumono in tabella 4.5 i valori di scabrezza dell'alveo e delle zone vegetate.

Zona	Valore di Matid	Coefficiente di Manning [ $s/m^{1/3}$ ]
Alveo	0	0,025
Bassa vegetazione	3	0,04
Media vegetazione	2	0,05
Alta vegetazione	1	0,1

**Tabella 4.5** Valori dei coefficienti di Manning utilizzati nella simulazione delle zone di vegetazione omogenea e valore di matid definito nella mesh.

#### 4.5 CONDIZIONE INIZIALE

La condizione iniziale come le condizioni al contorno è necessaria per riuscire a risolvere un sistema di equazioni differenziali. Il programma richiede di inserire una condizione iniziale che rappresenta la soluzione al tempo zero. Se non si è ha nessun dato si può utilizzare l'impostazione “*dry*” dove il programma simula che al tempo zero la superficie di simulazione sia completamente asciutta.

#### 4.6 *DEFINIZIONE TIME STEP*

Lo step temporale della simulazione idraulica viene determinato in base numero di Courant. Nel caso del modello bidimensionale, il numero di Courant è definito come

$$CFL = \frac{\sqrt{u^2+v^2}+c}{L} \Delta t \leq 1, \quad (4-35)$$

dove L è la lunghezza di un bordo, u, v e c sono le velocità della corrente nell'elemento con  $c = \sqrt{gh}$ . Il numero CFL deve essere inferiore all'unità ed è definito direttamente dal programma utilizzando i valori delle velocità calcolate dallo step precedente.

#### **4.7**     *DEFINIZIONE DEI DATI DA OTTENERE COME OUTPUT.*

BASEMENT oltre a richiedere come input la mesh, le condizioni al contorno e la condizione iniziale chiede di definire i parametri che si vogliono consultare alla fine della simulazione. Il programma può restituire diversi parametri rispetto ad ogni nodo della mesh come, la profondità della corrente, la velocità, il coefficiente di scabrezza, le tensioni tangenziali, il materiale sospeso e trasportato, ecc. Naturalmente effettuando una analisi idrodinamica, non sarà possibile esportare tutti i parametri che il software può calcolare, ma solamente quelli calcolati dal modello idraulico. Il programma, per non esportare tutti i valori calcolati, richiede di definire quali parametri deve restituire alla fine della simulazione.

Nel caso in esame si è richiesto di estrarre i valori che corrispondono: alla profondità, il campo di moto bidimensionale e le tensioni tangenziali per ogni nodo della mesh.

Definiti i dati di input si è proceduto alla simulazione idraulica. Per effettuare la simulazione è necessario scrivere lo script utilizzato da BASEMENT (riportato in allegato l'esempio della portata massima annuale, Script 1).

## 5 RISULTATI

In tabella 5.1 sono riassunte le simulazioni numeriche eseguite e le relative portate simulate. Sono anche riportati i tempi simulati e la corrispondente durata delle simulazioni numeriche.

Simulazione	Portata [m <sup>3</sup> /s]	Tempo simulato	Durata della simulazione
1	1,50	1h 18 min	45min
2	3,90	1h 31min	1 h 16min
3	6,90	1h 7min	1h 40min
4	11,10	1h 23min	3h 50min
5	20,10	48 min	3h 23min
6	29,10	39 min	3h 45min
7	45,00	50 min	7h 35min
8	113,50	24 min	6h 6min
9	161,44	20 min	4h 25min
10	193,06	19 min	5h 2min

**Tabella 5.1** Sintesi delle simulazioni numeriche eseguite. La durata della simulazione si riferisce ad un computer con le seguenti caratteristiche: Processore Intel®Core™ i7-6500U con frequenza base di 2,50 GHz; RAM da 8,00 GB e Sistema operativo a 64 bit.

I risultati ottenuti dalla simulazione idraulica sono i valori di profondità, del campo di moto e della tensione tangenziale per ogni nodo della mesh. Nello studio della morfologia dei corsi d'acqua è utile conoscere anche la tensione adimensionale di Shields, che è un parametro di mobilità dei sedimenti. Il parametro di mobilità non viene calcolato direttamente dal programma ma può essere calcolato utilizzando la relazione

$$\theta = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{50}}, \quad (5-1)$$

dove  $\theta$  è il parametro di mobilità,  $\tau$  è la tensione tangenziale,  $\gamma_s$  è il peso specifico del materiale di fondo,  $\gamma_w$  è il peso specifico acqua e  $d_{50}$  è il diametro medio dei sedimenti.

Operativamente sono stati esportati in un file di testo ASHII le tensioni tangenziali calcolate da BASEMENT, e tramite uno script di Matlab (riportato nell'allegato, Script 2) sono stati ottenuti i valori del parametro di mobilità per ogni nodo della mesh. I valori da inserire nella formula (5-1) sono riportati in tabella 5.2.

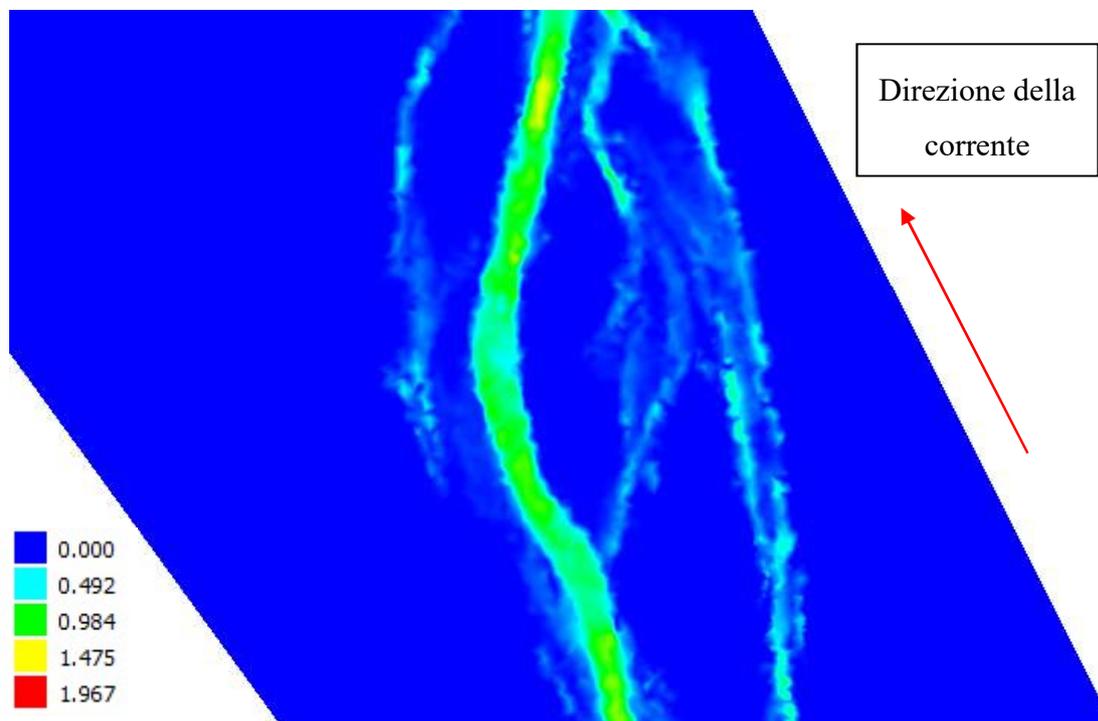
$\gamma_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$d_{50}$ [m]
2600	1000	0,019

**Tabella 5.2** Valori utilizzati per calcolare il parametro di mobilità.

## 5.1 VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI

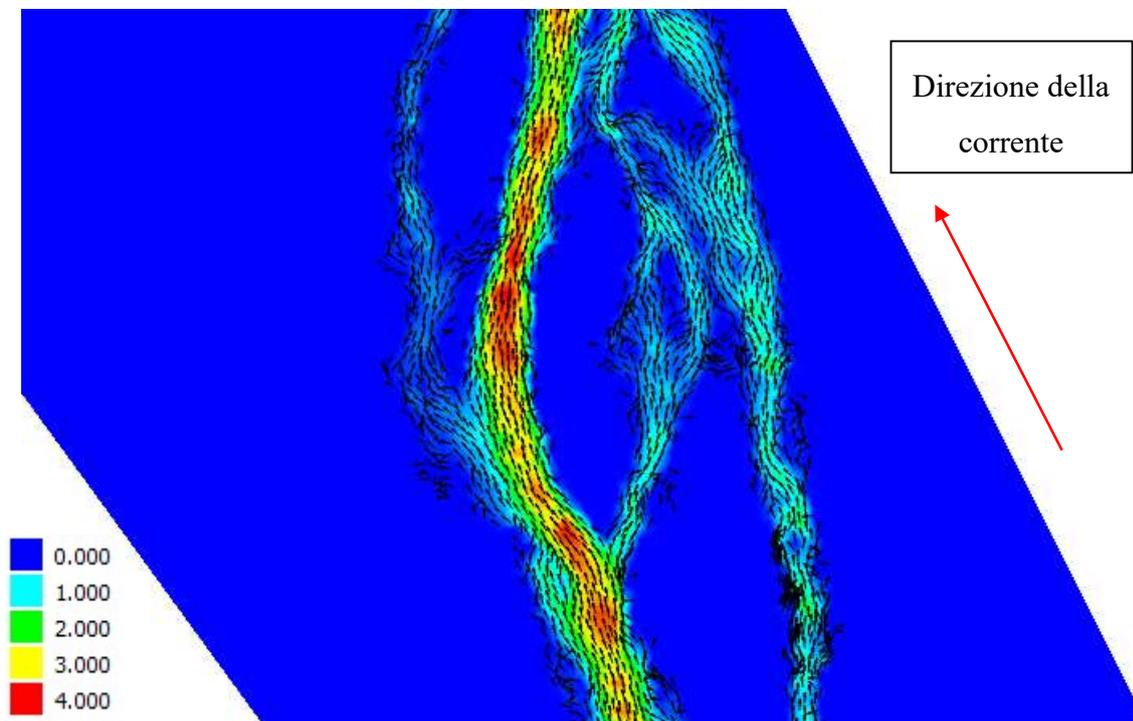
I risultati che si visualizzeranno nel seguito sono: la profondità, il campo di moto, le tensioni tangenziali e il parametro di mobilità.

Operativamente i risultati mostrati sono stati ottenuti con un plugin, denominato Crayfish, di QGIS che permette la loro visualizzazione in forma grafica. La mappa cromatica con i valori della profondità permette di conoscere per una data portata il valore della profondità dell'acqua all'interno di ogni punto del dominio di computazione. Inoltre, permette di identificare su una sezione il numero di canali bagnati. In figura 5.1 è riportata la mappa cromatica riferita alla profondità della corrente ottenuta dalla simulazione della portata massima. In legenda sono riportati i valori, in metri, della profondità della corrente.



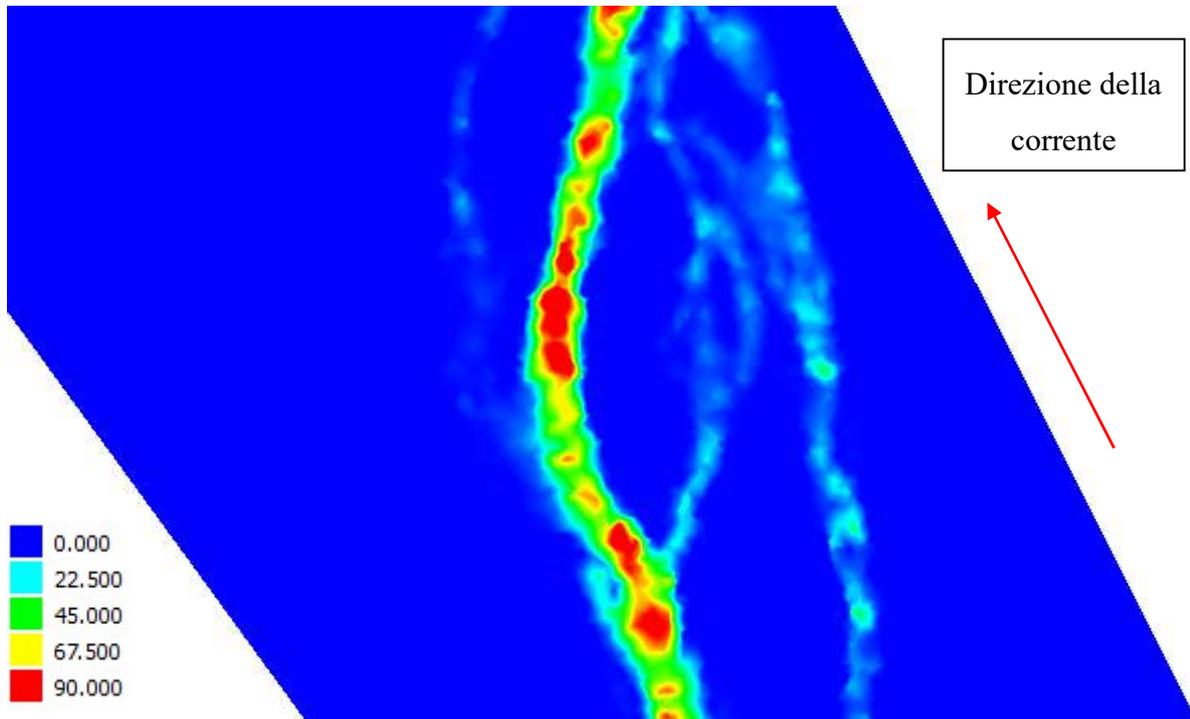
**Figura 5.1** Esempio di mappa delle profondità (m), della corrente in una porzione d'alveo, per la portata massima annuale  $Q=45,0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La mappa del campo di moto permette di conoscere per una data portata il modulo della velocità e la direzione del flusso per ogni punto del dominio di computazione. Com'è visibile in figura 5.2 il vettore definisce la direzione del flusso mentre il colore definisce il modulo della velocità. In legenda sono riportati i valori delle velocità in m/s.



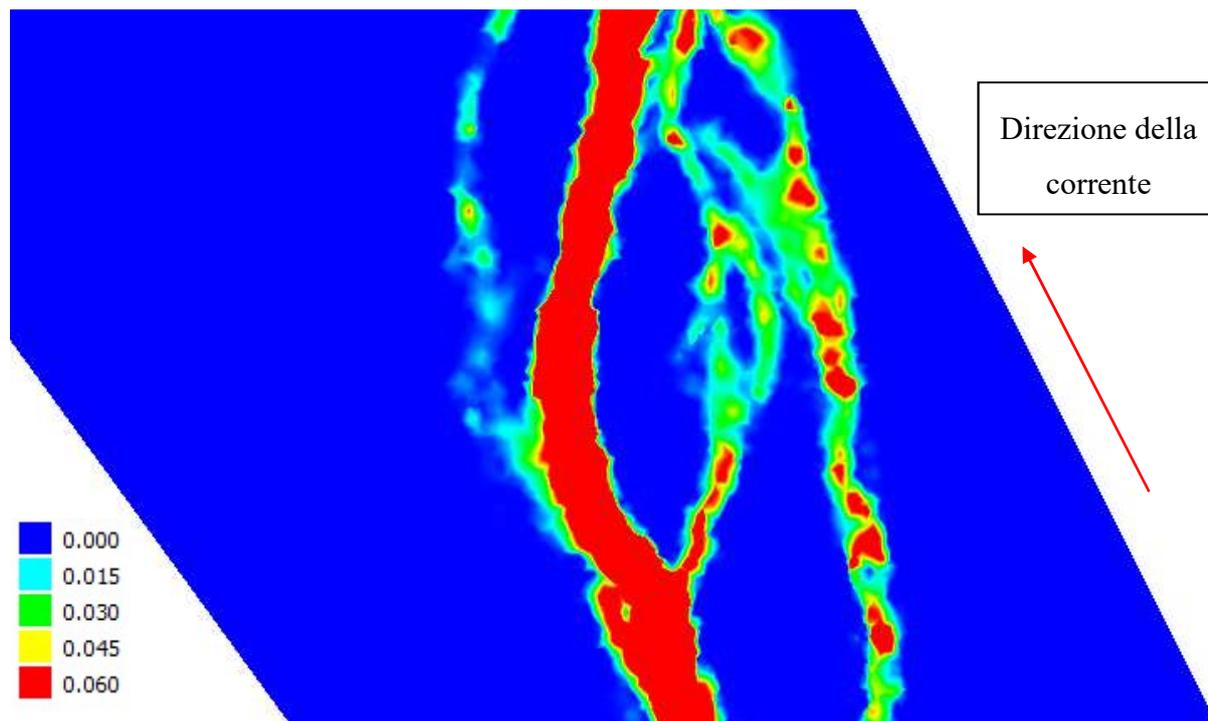
**Figura 5.2** Esempio di mappa delle velocità (m/s), della corrente in una porzione d'alveo, per la portata massima annuale  $Q=45,0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La mappa cromatica con i valori delle tensioni tangenziali permette di conoscere il valore delle tensioni tangenziali al fondo, per una data portata, per ogni punto del dominio di computazione. Questi valori sono quelli utilizzati per determinare il parametro di mobilità. In figura 5.3 si riporta un tratto del tracciato con i valori delle tensioni tangenziali per la portata massima annuale. In legenda sono riportati i valori delle tensioni tangenziali in  $N/m^2$ .



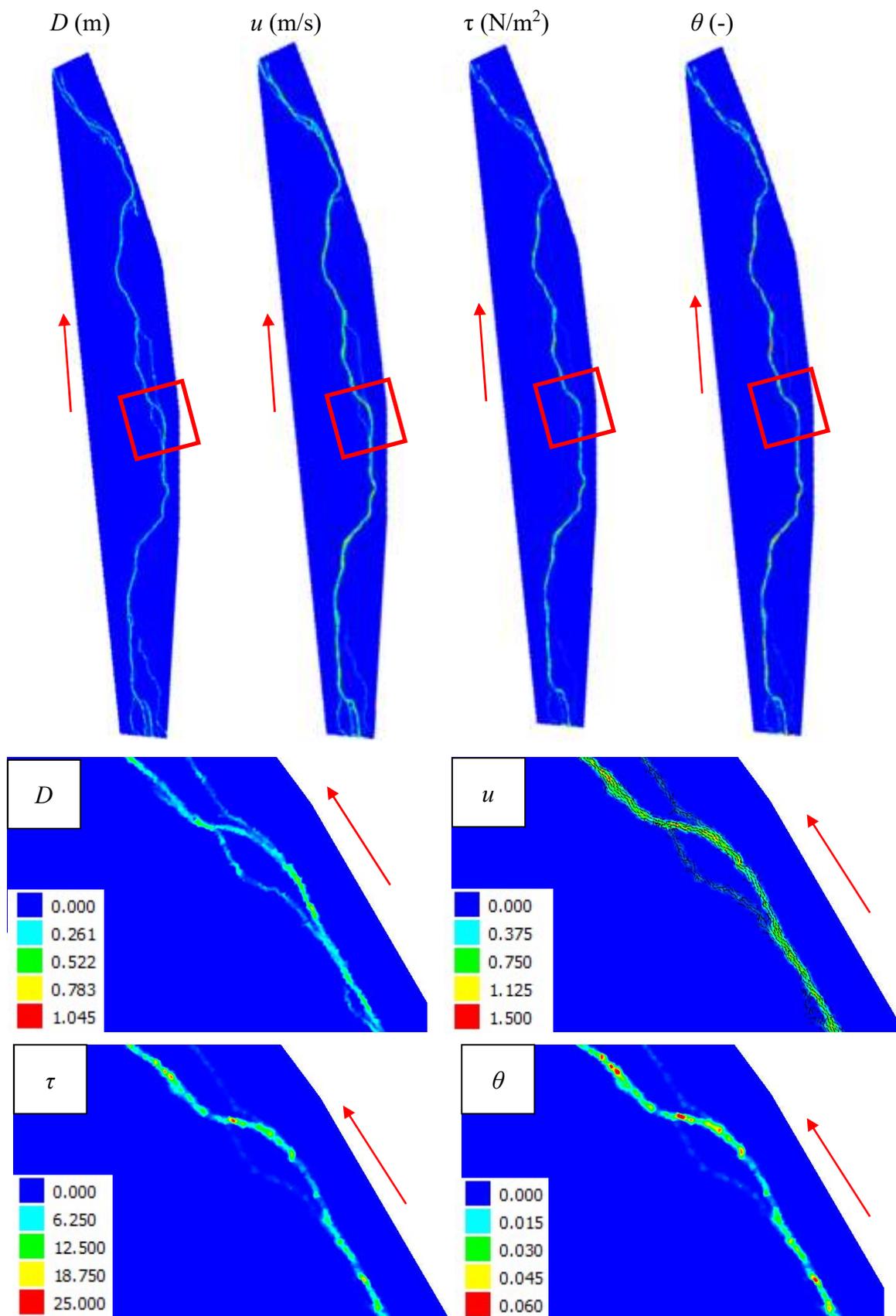
**Figura 5.3** Esempio di mappa delle tensioni tangenziali ( $N/m^2$ ), della corrente in una porzione d'alveo, per la portata massima annuale  $Q=45,0 m^3/s$ .

Infine, la mappa cromatica con i valori del parametro di mobilità per una data portata permette di identificare se un canale è attivo (permette il trasporto solido) oppure no. Se il parametro di mobilità supera un valore critico, definito dalla teoria di Schield, allora esiste trasporto solido di fondo. Il valore critico qui utilizzato è  $\theta_c=0,06$ . In figura 5.4 è mostrata una porzione dove è visibile il canale principale in rosso (con valori del parametro di mobilità maggiori o uguali al valore critico) nel quale è permesso il trasporto solido e canali secondari che sono morfodinamicamente inattivi. In legenda sono riportati i valori del parametro di mobilità.

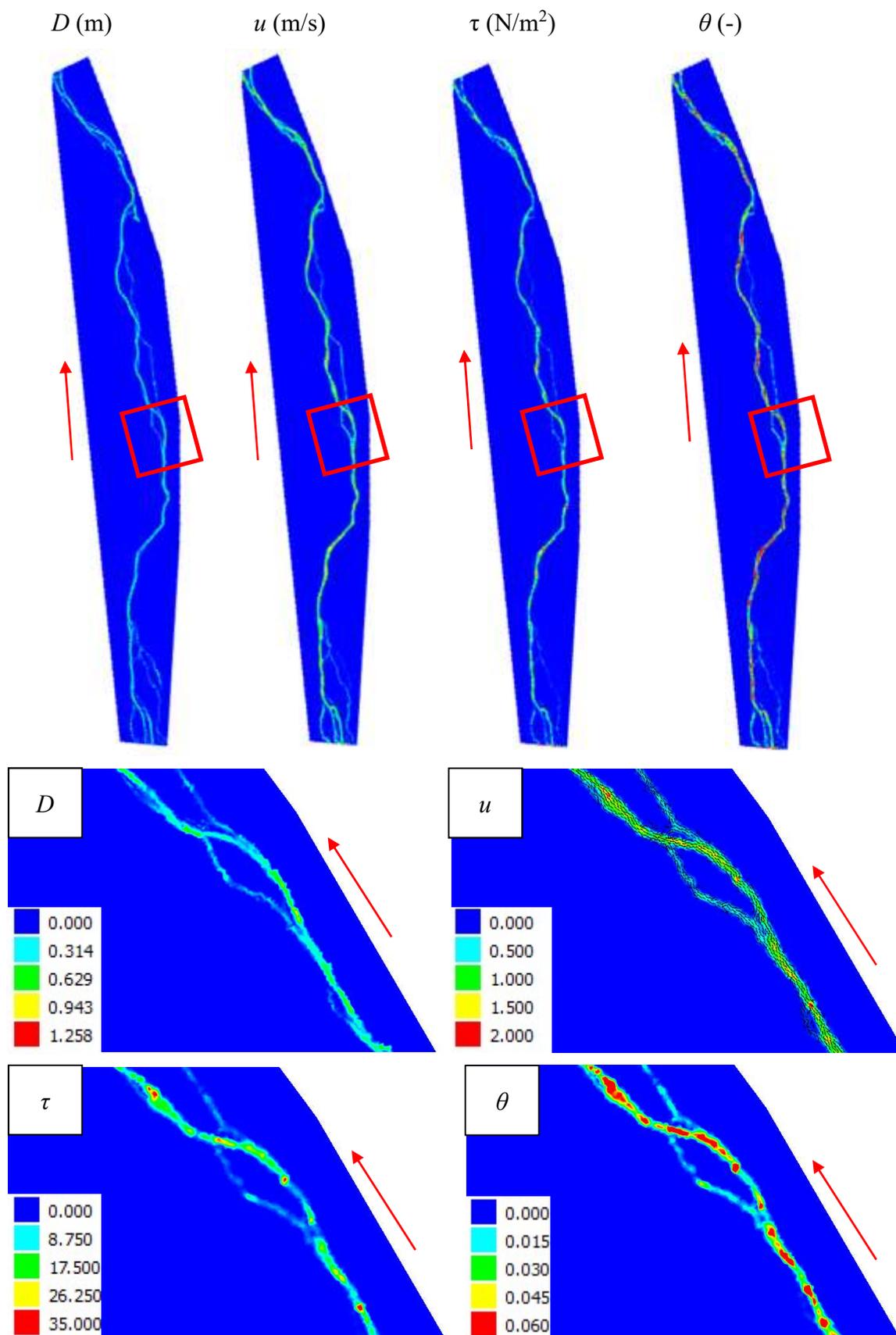


**Figura 5.4** Esempio di mappa del parametro di mobilità (-), della corrente in una porzione d'alveo, per la portata massima annuale  $Q=45,0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

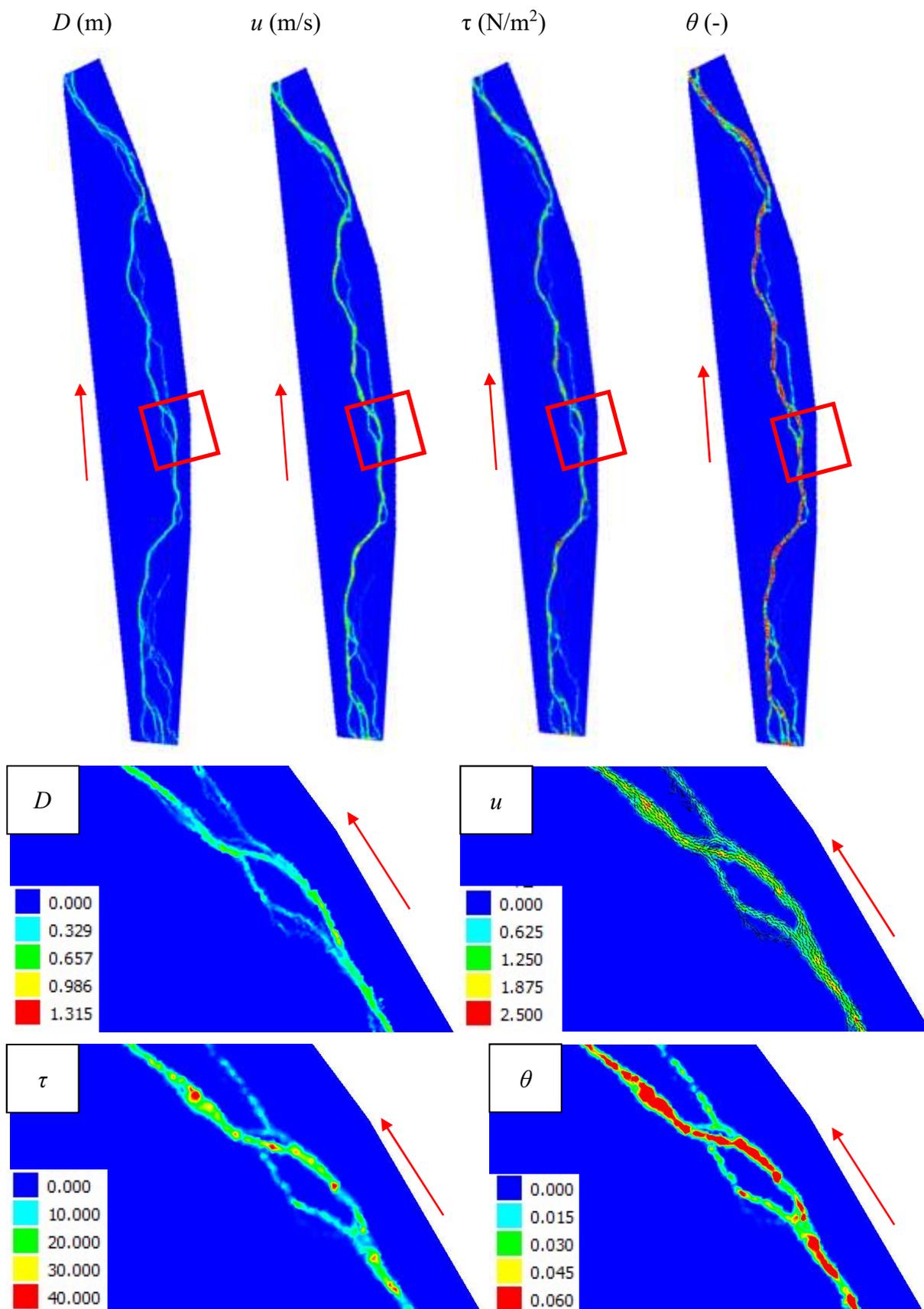
Di seguito vengono riportate le mappe cromatiche delle profondità  $D$ , velocità  $u$ , tensioni tangenziali al fondo  $\tau$  e parametro di mobilità  $\theta$ .



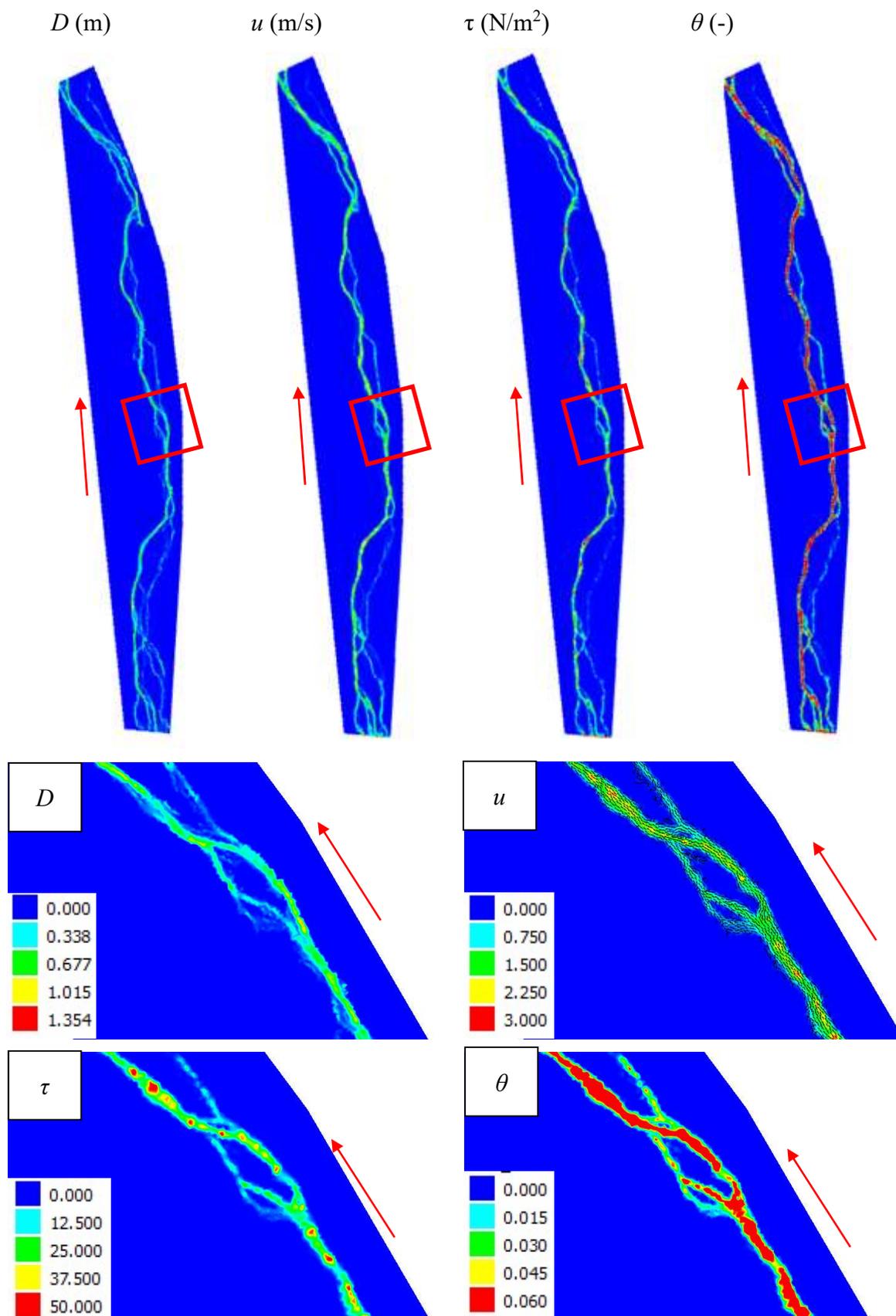
**Figura 5.5** Mappe cromatiche dei parametri idraulici riferiti alla portata  $Q=1,50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le mappe riportate nella 2° e 3° fila si riferiscono al rettangolo rosso della 1° fila. La freccia in rosso indica la direzione del flusso della corrente.



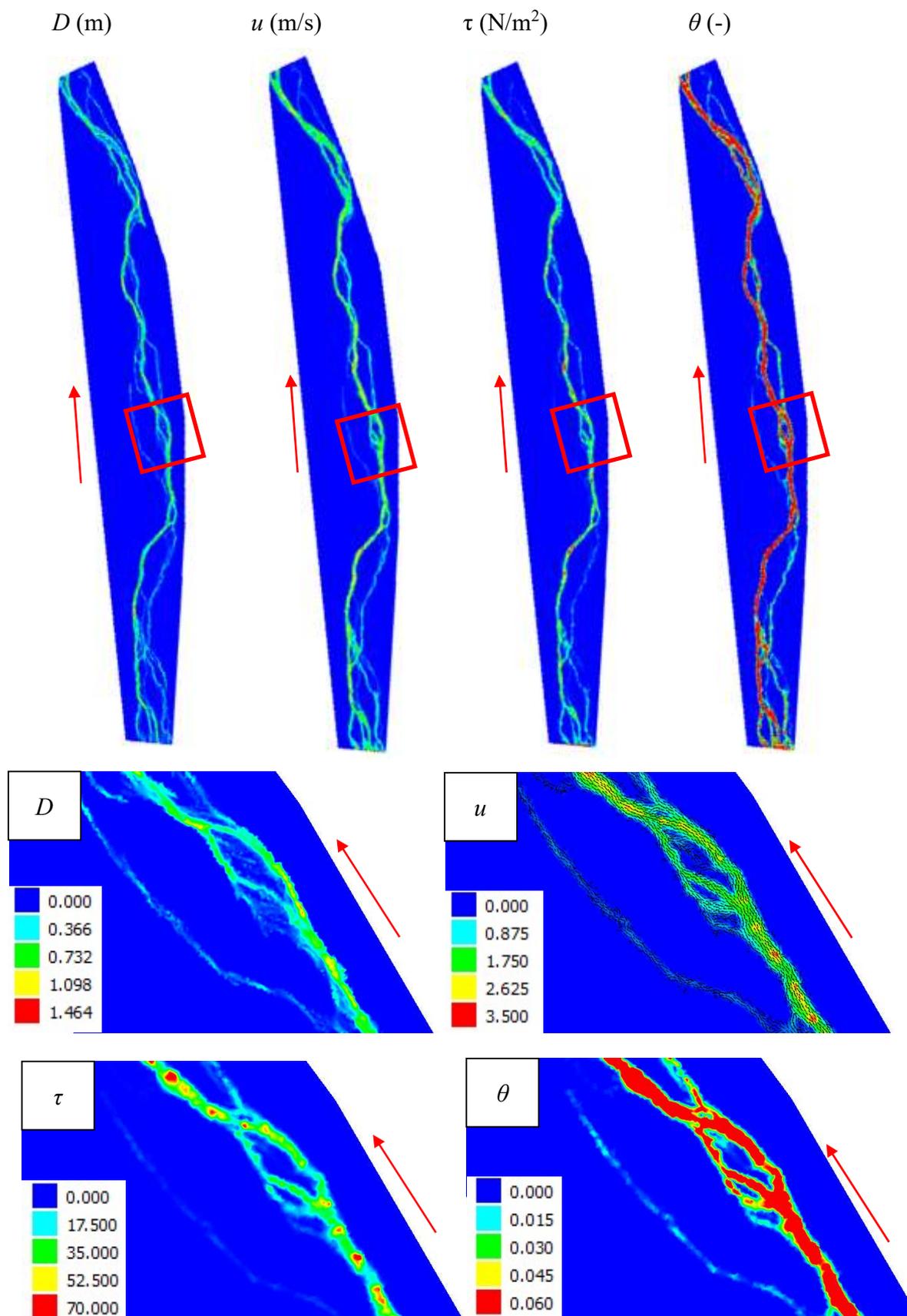
**Figura 5.6** Mappe cromatiche dei parametri idraulici riferiti alla portata  $Q=3,90 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le mappe riportate nella 2° e 3° fila si riferiscono al rettangolo rosso della 1° fila. La freccia in rosso indica la direzione del flusso della corrente.



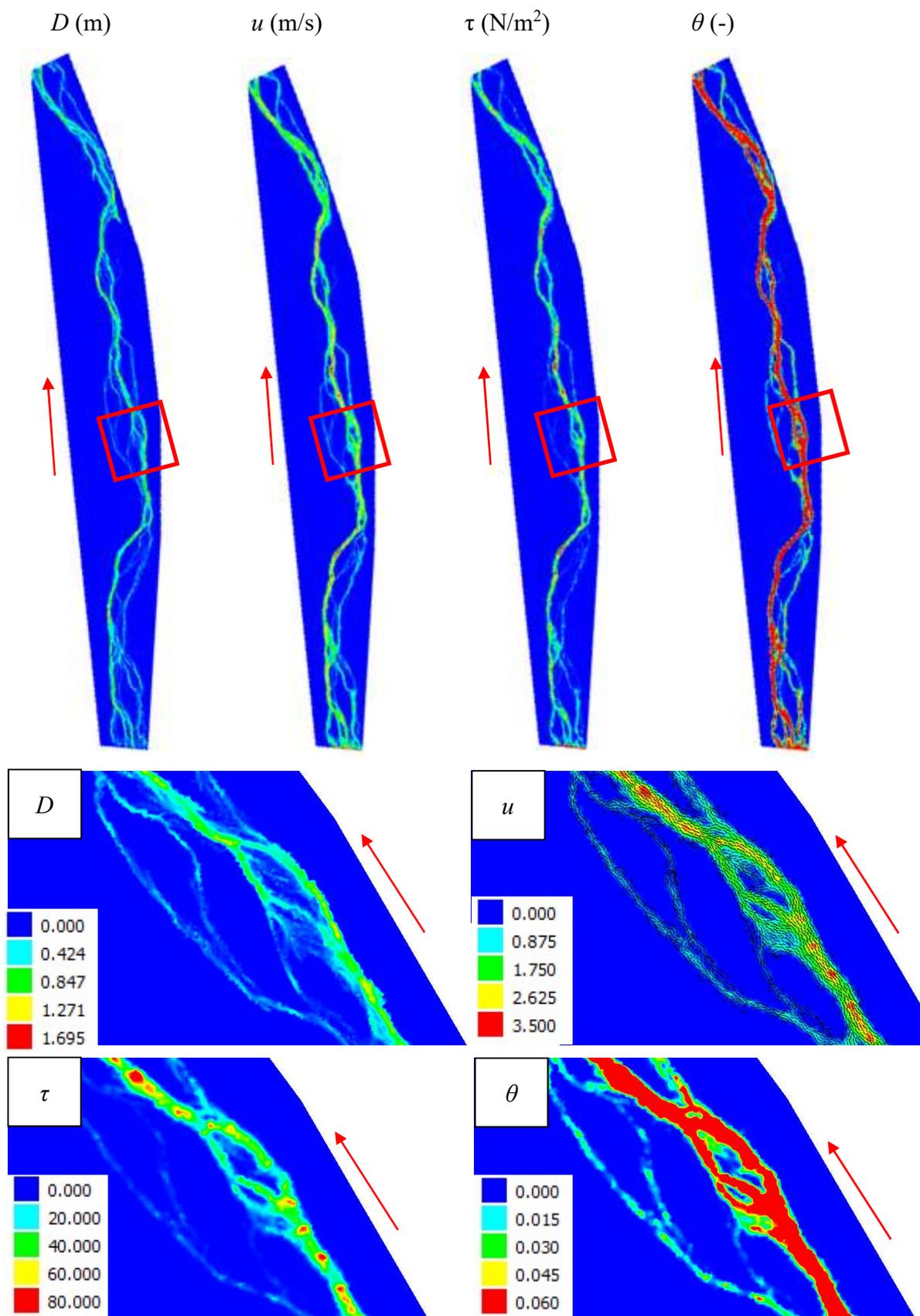
**Figura 5.7** Mappe cromatiche dei parametri idraulici riferiti alla portata  $Q=6,90 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le mappe riportate nella 2° e 3° fila si riferiscono al rettangolo rosso della 1° fila. La freccia in rosso indica la direzione del flusso della corrente.



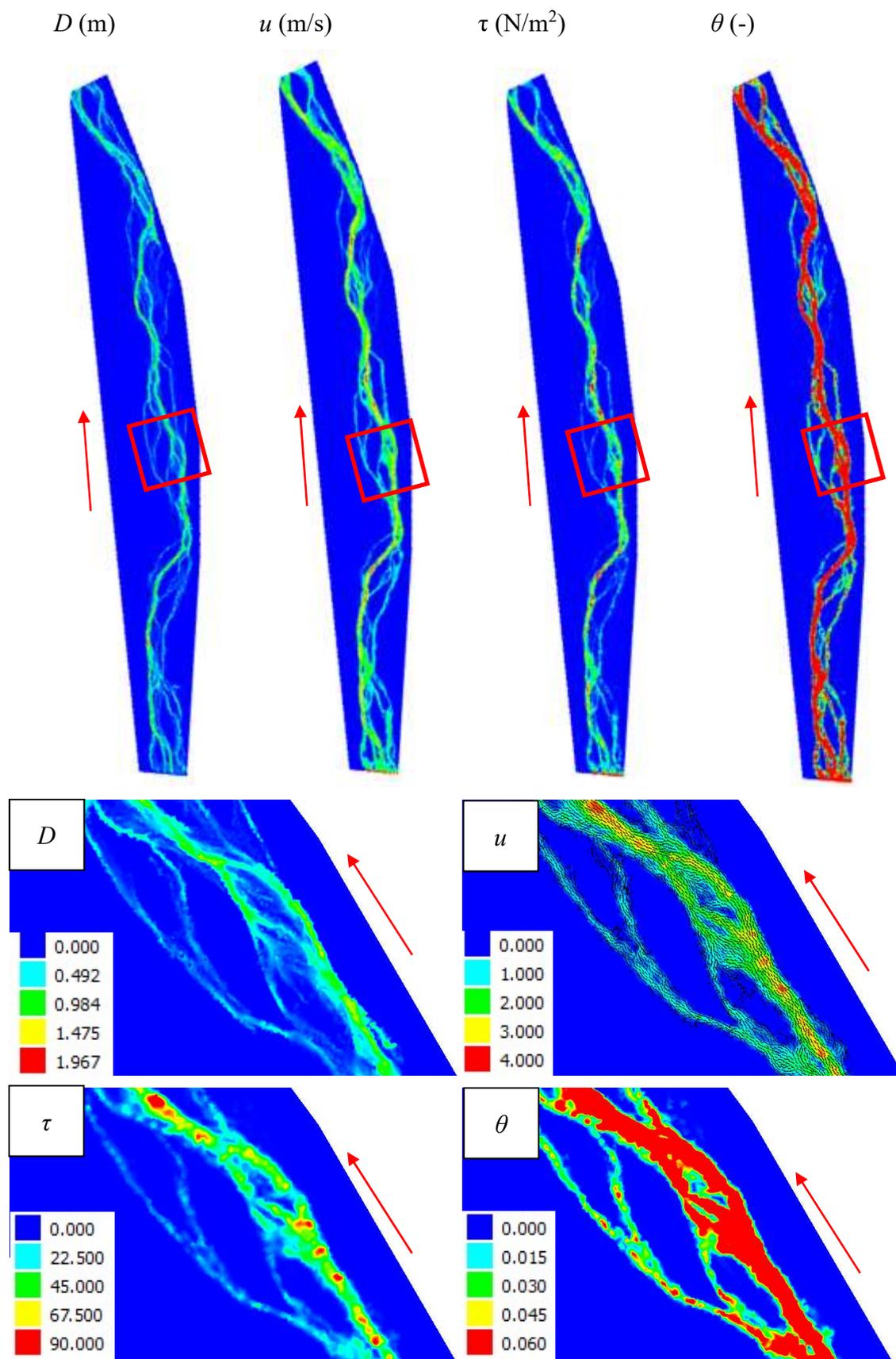
**Figura 5.8** Mappe cromatiche dei parametri idraulici riferiti alla portata  $Q=11,10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le mappe riportate nella 2° e 3° fila si riferiscono al rettangolo rosso della 1° fila. La freccia in rosso indica la direzione del flusso della corrente.



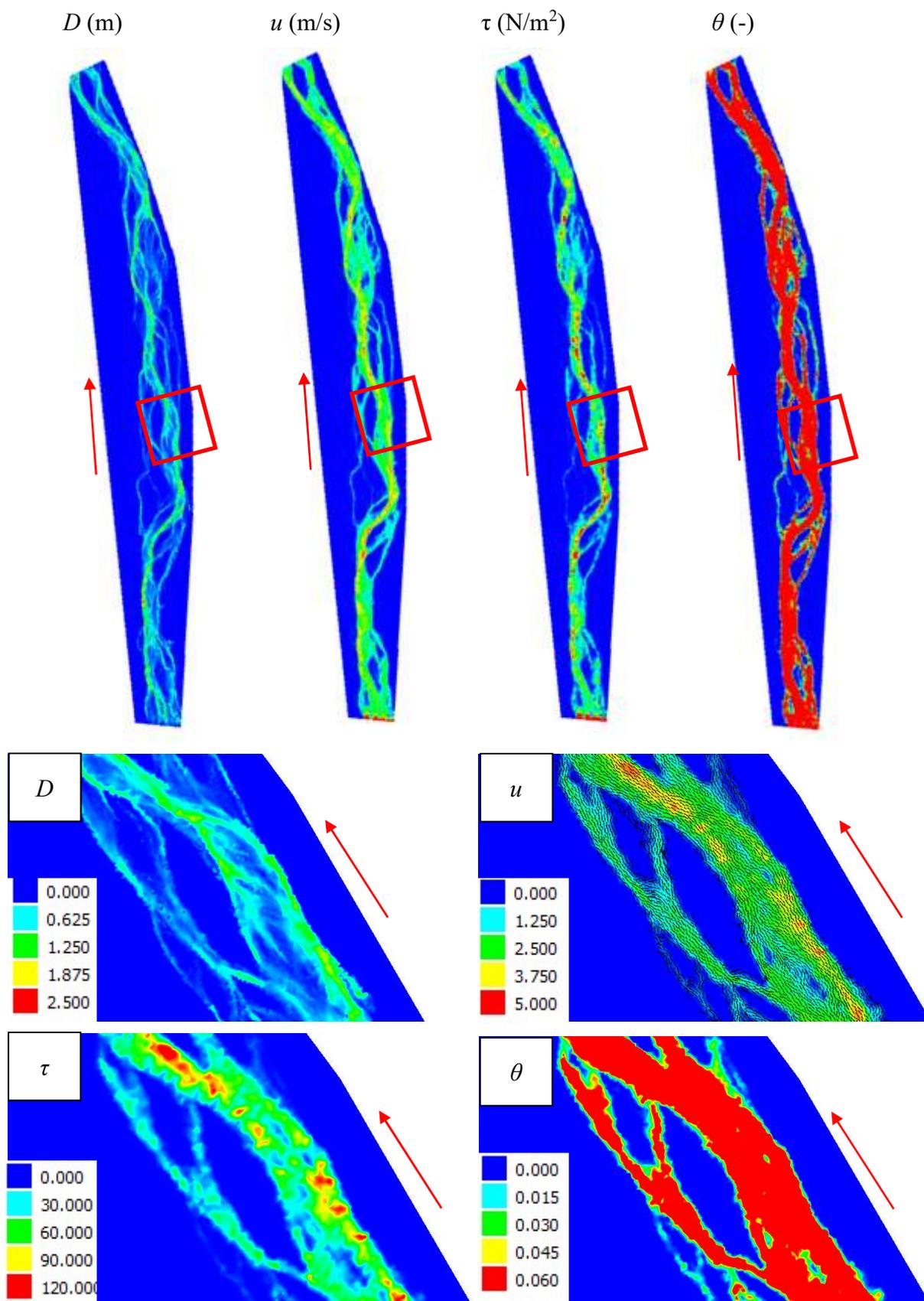
**Figura 5.9** Mappe cromatiche dei parametri idraulici riferiti alla portata  $Q=20,10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le mappe riportate nella 2° e 3° fila si riferiscono al rettangolo rosso della 1° fila. La freccia in rosso indica la direzione del flusso della corrente.



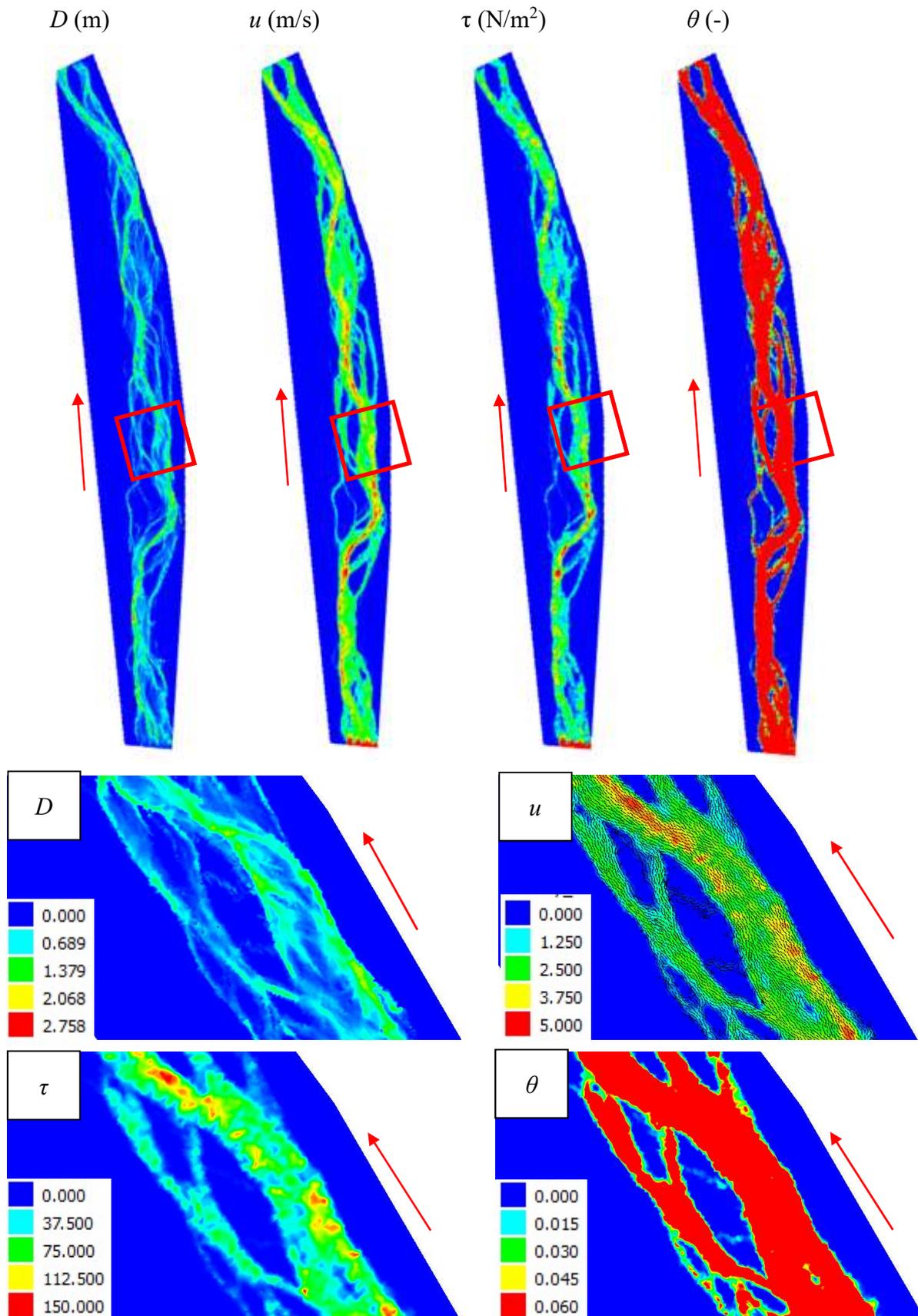
**Figura 5.10** Mappe cromatiche dei parametri idraulici riferiti alla portata  $Q=29,10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le mappe riportate nella 2° e 3° fila si riferiscono al rettangolo rosso della 1° fila. La freccia in rosso indica la direzione del flusso della corrente.



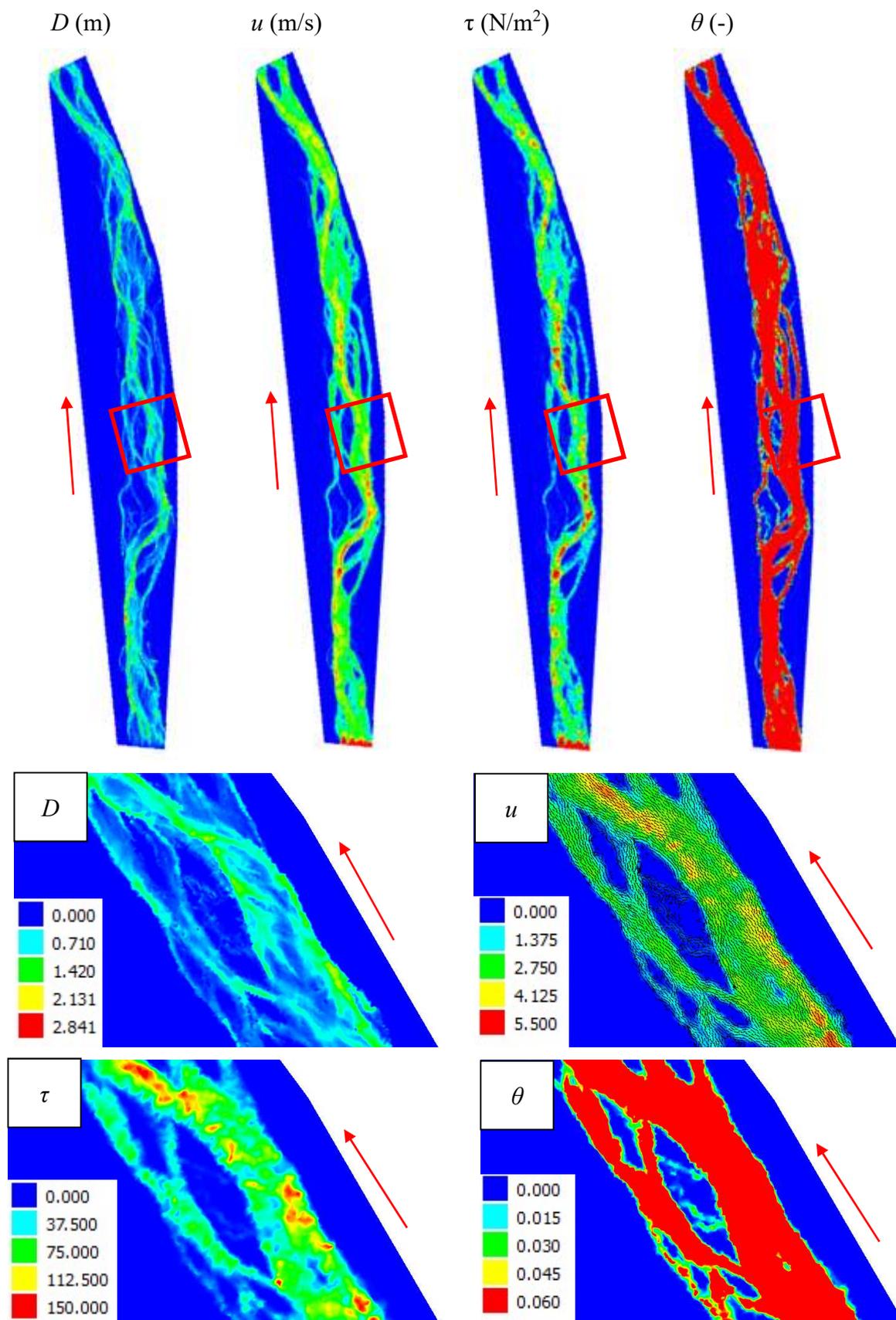
**Figura 5.11** Mappe cromatiche dei parametri idraulici riferiti alla portata  $Q=45,00 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le mappe riportate nella 2° e 3° fila si riferiscono al rettangolo rosso della 1° fila. La freccia in rosso indica la direzione del flusso della corrente.



**Figura 5.12** Mappe cromatiche dei parametri idraulici riferiti alla portata  $Q=113,50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le mappe riportate nella 2° e 3° fila si riferiscono al rettangolo rosso della 1° fila. La freccia in rosso indica la direzione del flusso della corrente.

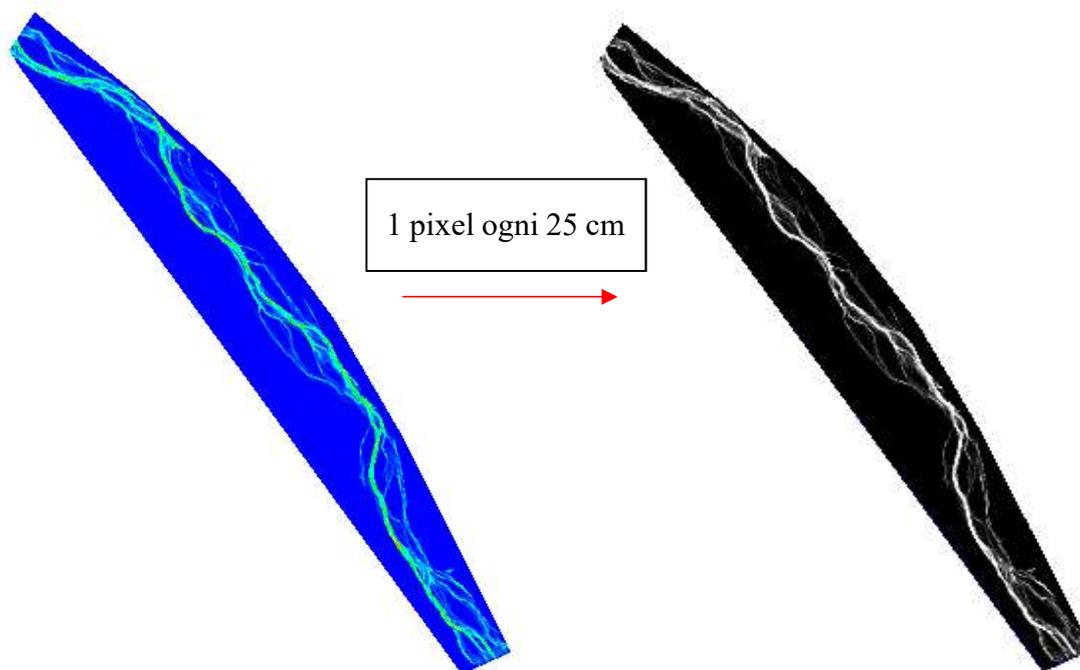


**Figura 5.13** Mappe cromatiche dei parametri idraulici riferiti alla portata  $Q=161,44 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le mappe riportate nella 2° e 3° fila si riferiscono al rettangolo rosso della 1° fila. La freccia in rosso indica la direzione del flusso della corrente.



**Figura 5.14** Mappe cromatiche dei parametri idraulici riferiti alla portata  $Q=193,06 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le mappe riportate nella 2° e 3° fila si riferiscono al rettangolo rosso della 1° fila. La freccia in rosso indica la direzione del flusso della corrente.

Grazie a Crayfish è possibile consultare i risultati calcolati da BASEMENT ma non è possibile effettuare alcuna operazione su di essi. L'unica operazione concessa è di salvare la mappa cromatica in formato raster con una definizione massima di un punto ogni 25 cm. In figura 5.5 si mostra il raster che si ottiene da Crayfish per la mappa cromatica delle profondità corrispondenti alla portata massima annuale  $Q=45,0 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 5.15** Passaggio da mappa cromatica delle profondità a raster per la portata massima annuale  $Q=45,0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La stessa procedura viene ripetuta per ogni mappa cromatica relativamente alla profondità, velocità, tensioni tangenziali e parametro di mobilità di ogni portata simulata.

I soli risultati ottenuti, non permettono di caratterizzare idraulicamente e morfologicamente il torrente. Infatti è necessario elaborare i risultati per studiare sia il comportamento globale sia il comportamento in determinate sezioni del torrente.

In primo luogo sarà effettuato uno studio globale del comportamento della corrente del tratto simulato tramite un'indagine statistica. L'indagine statistica permette di estrarre le curve di frequenza cumulata e gli istogrammi della profondità della corrente, velocità, tensioni tangenziali e parametro di mobilità.

In secondo luogo sarà ricercato un metodo per estrarre i parametri idraulici e morfologici in una sezione per caratterizzare i canali intrecciati del tratto simulato.

## 5.2 *COMPORAMENTO GLOBALE DEL TRATTO SIMULATO*

Lo studio delle caratteristiche globali del torrente nel tratto simulato viene effettuato tramite un'indagine statistica. L'indagine statistica permette di acquisire informazioni su una popolazione per descrivere quantitativamente il suo comportamento.

La definizione della distribuzione di frequenza cumulata e dell'istogramma della frequenza dei valori di profondità della corrente, velocità, tensioni tangenziali e parametro di mobilità, permette lo studio globale delle caratteristiche idrauliche e morfologiche del torrente. La distribuzione di frequenza cumulata è una curva che rappresenta la somma delle frequenze assolute di un parametro. L'istogramma della frequenza è la rappresentazione di una distribuzione di frequenza. La sovrapposizione delle curve di frequenza cumulata permette di visualizzare i parametri idraulici e morfologici che variano all'aumentare della portata che transita in alveo e di trarne delle conclusioni. Tramite questo mezzo è possibile trarre delle conclusioni sul comportamento del tratto simulato.

Operativamente i raster dei risultati ottenuti sono stati ritagliati per eliminare gli effetti che le condizioni al contorno hanno nelle sezioni limitrofe. In seguito tramite Matlab sono state estratte le popolazioni dai raster ritagliati. Quindi si è preceduto a definire la frequenza assoluta di ogni parametro in funzione della portata simulata. Infine sono state calcolate e tracciate le distribuzioni di frequenza cumulata e gli istogrammi. Lo script utilizzato è riportato negli allegati come Script 3.

Di seguito vengono riportati i grafici ottenuti per la profondità della corrente, velocità, tensioni tangenziali e parametro di mobilità per ogni portata simulata.

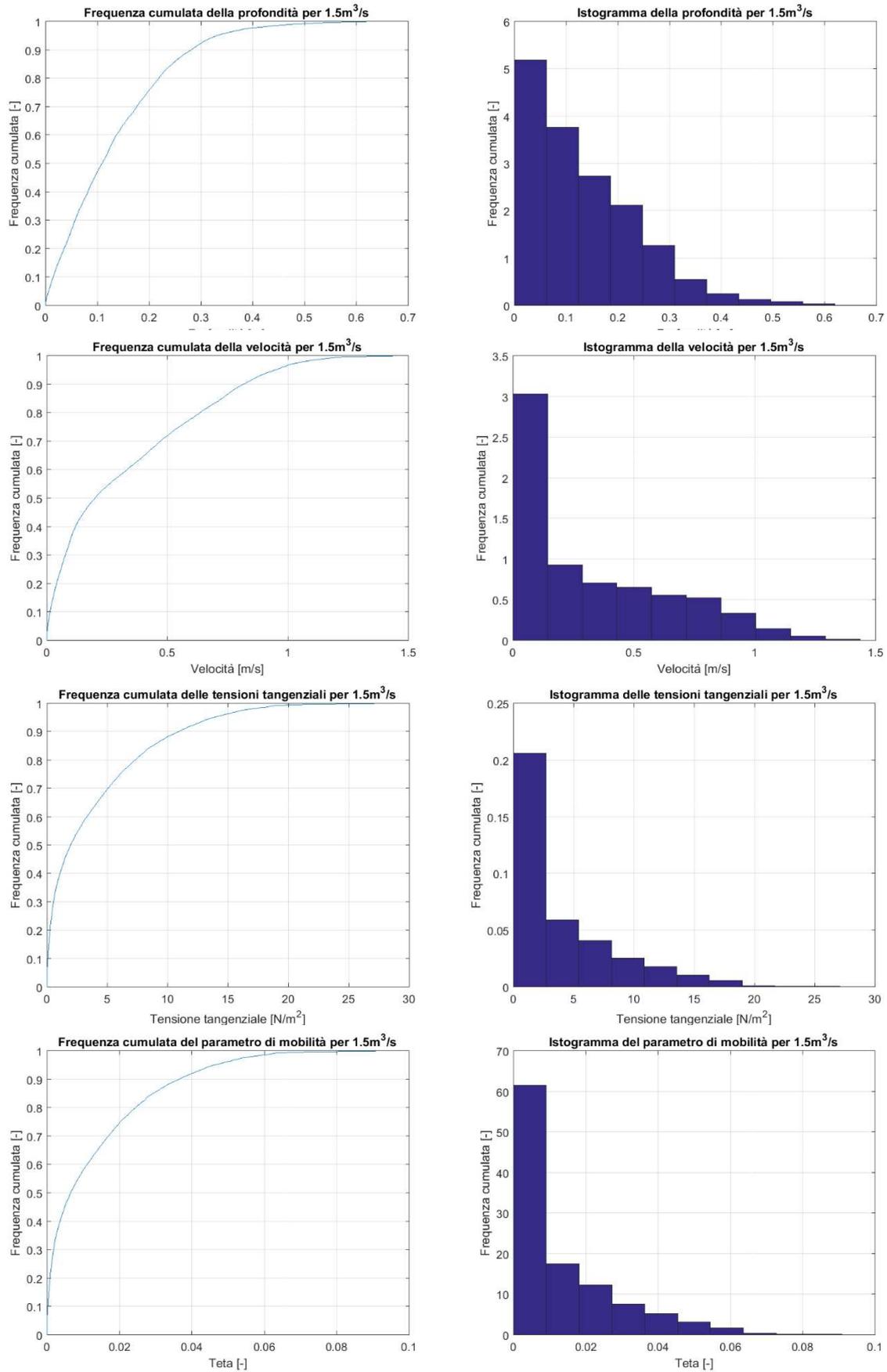


Figura 5.16 Caratterizzazione statistica dei parametri idraulici per la portata  $Q=1,50 \text{ m}^3/\text{s}$ .

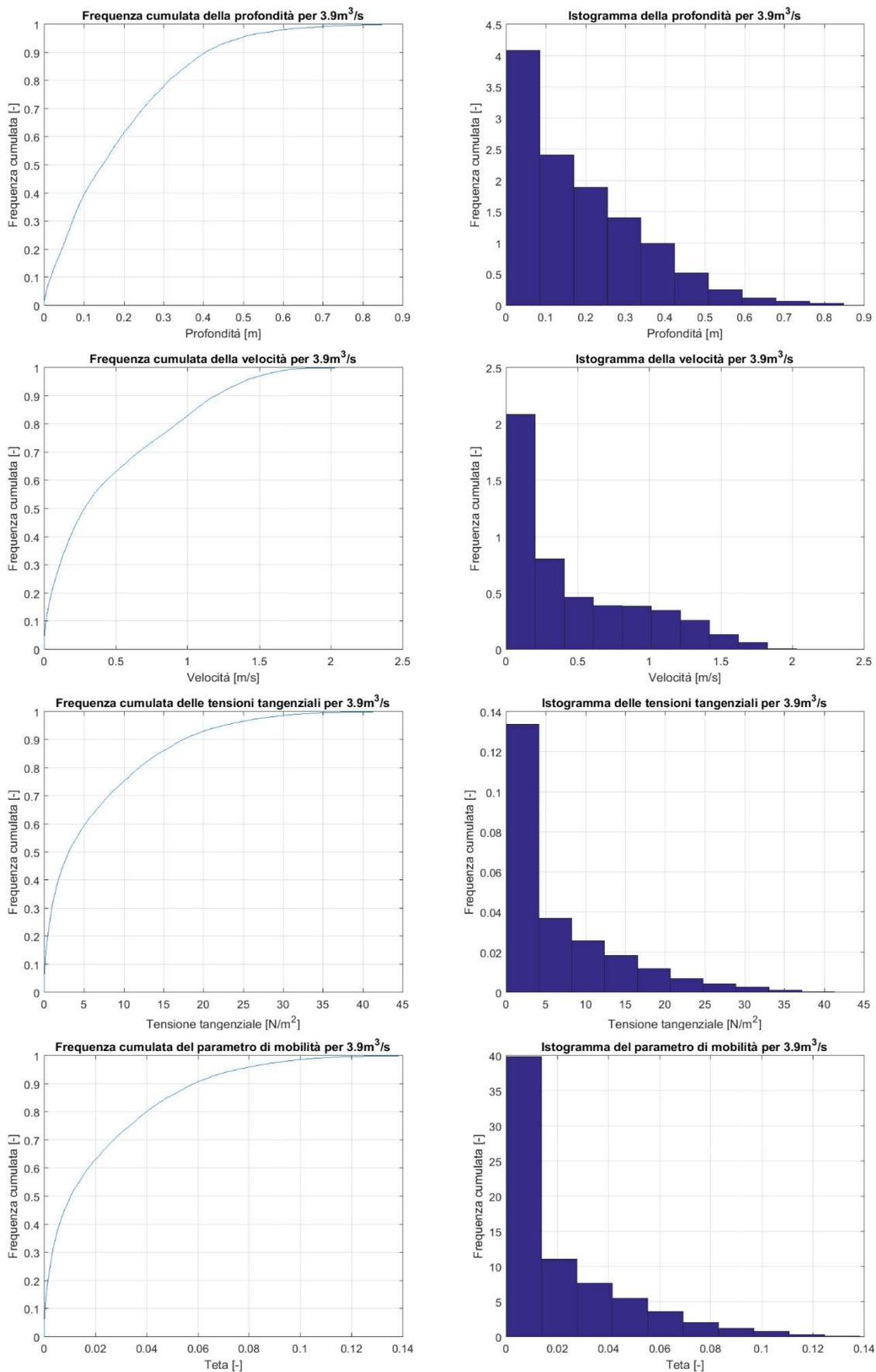


Figura 5.17 Caratterizzazione statistica dei parametri idraulici per la portata  $Q=3,90 \text{ m}^3/\text{s}$ .

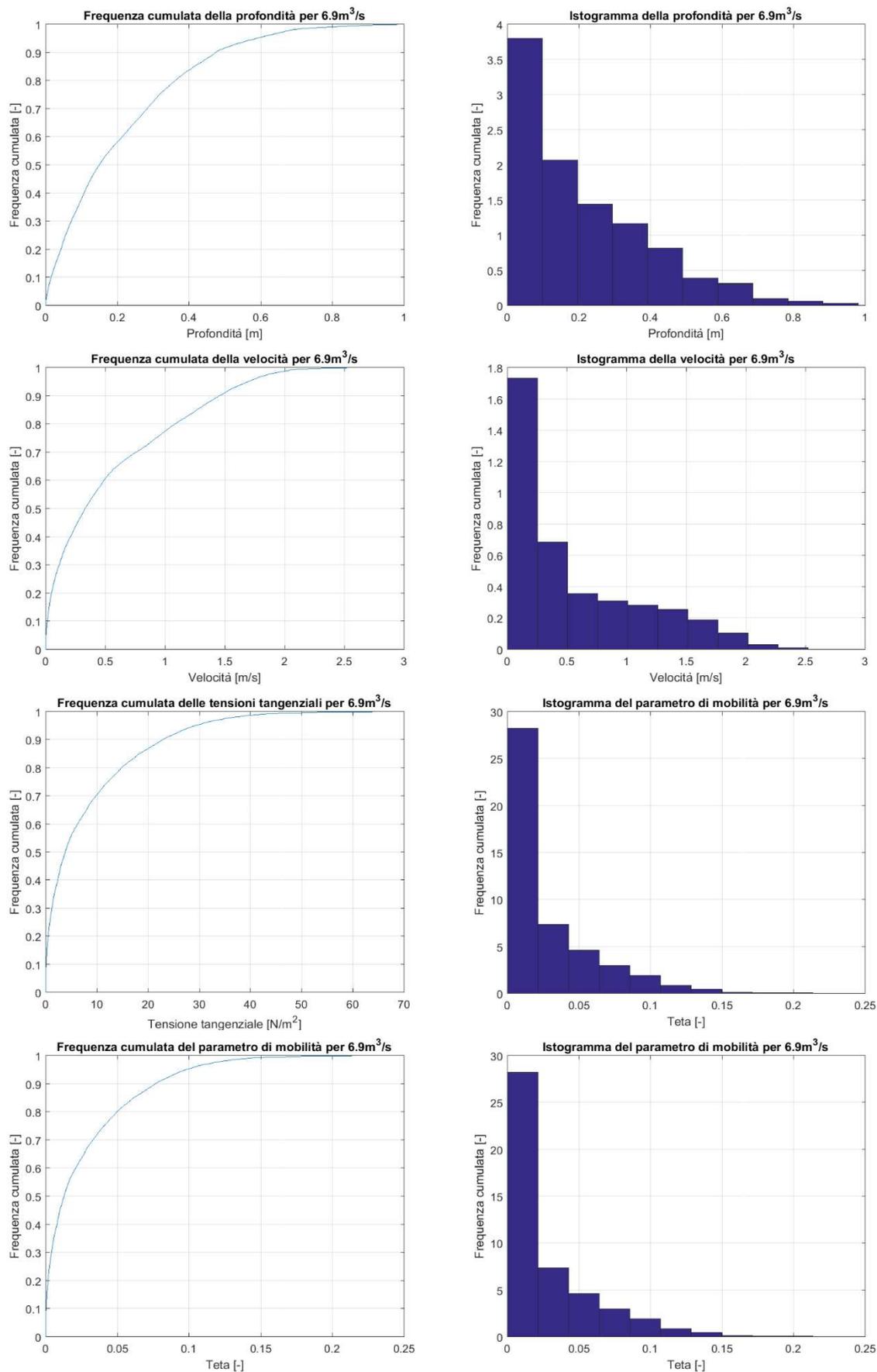


Figura 5.18 Caratterizzazione statistica dei parametri idraulici per la portata  $Q=6,90 \text{ m}^3/\text{s}$ .

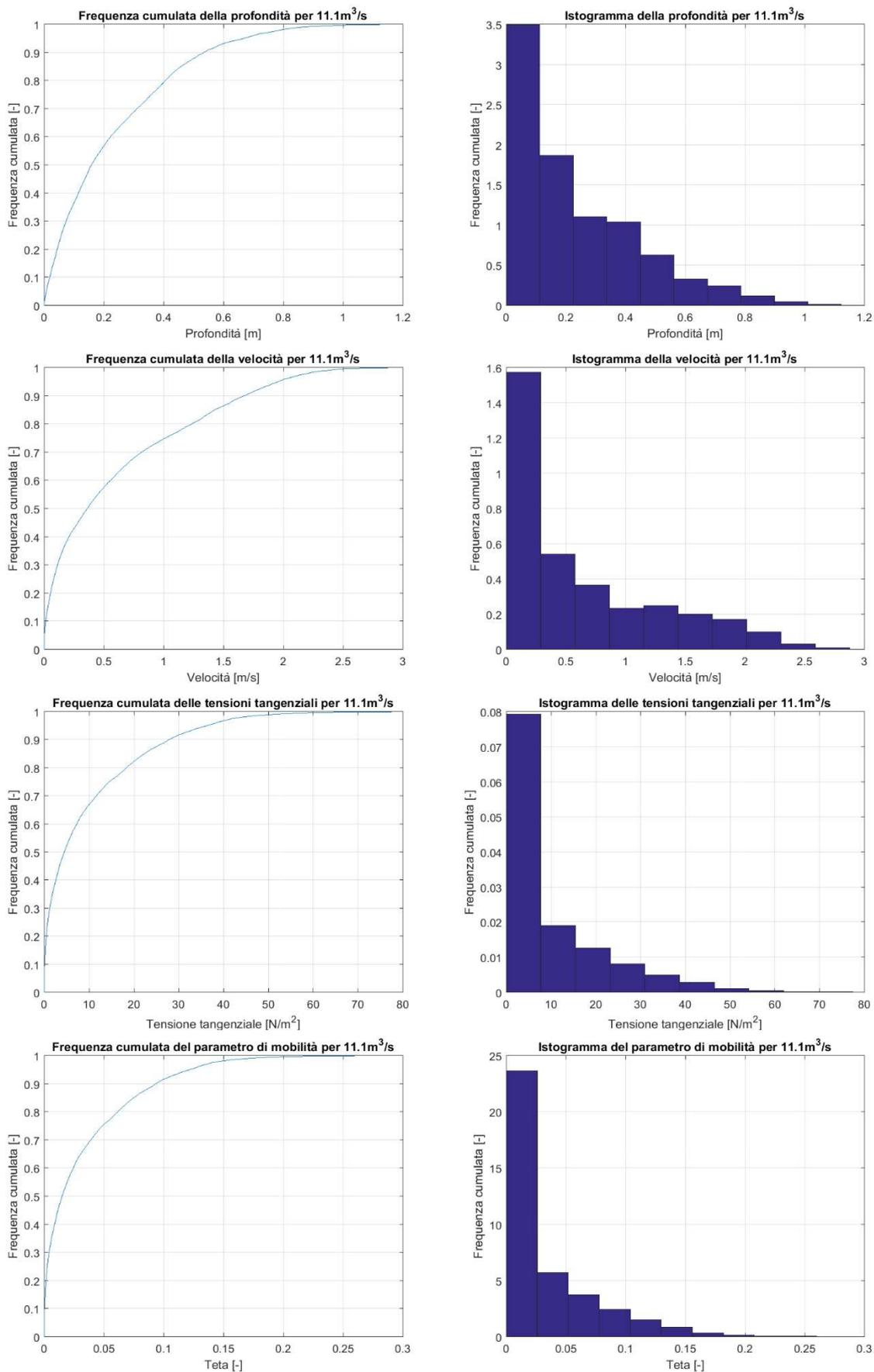


Figura 5.19 Caratterizzazione statistica dei parametri idraulici per la portata  $Q=11,10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

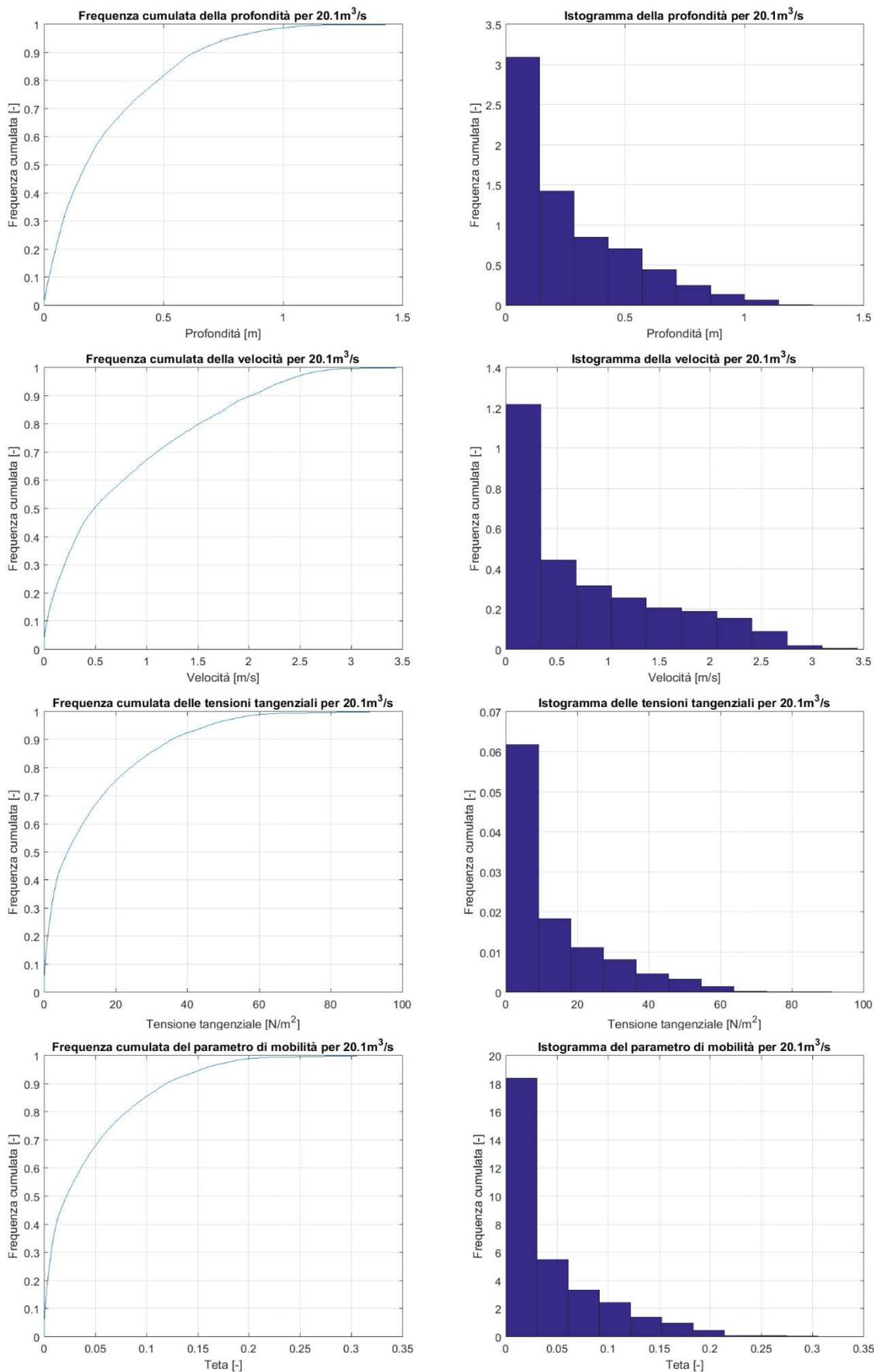


Figura 5.20 Caratterizzazione statistica dei parametri idraulici per la portata  $Q=20,10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

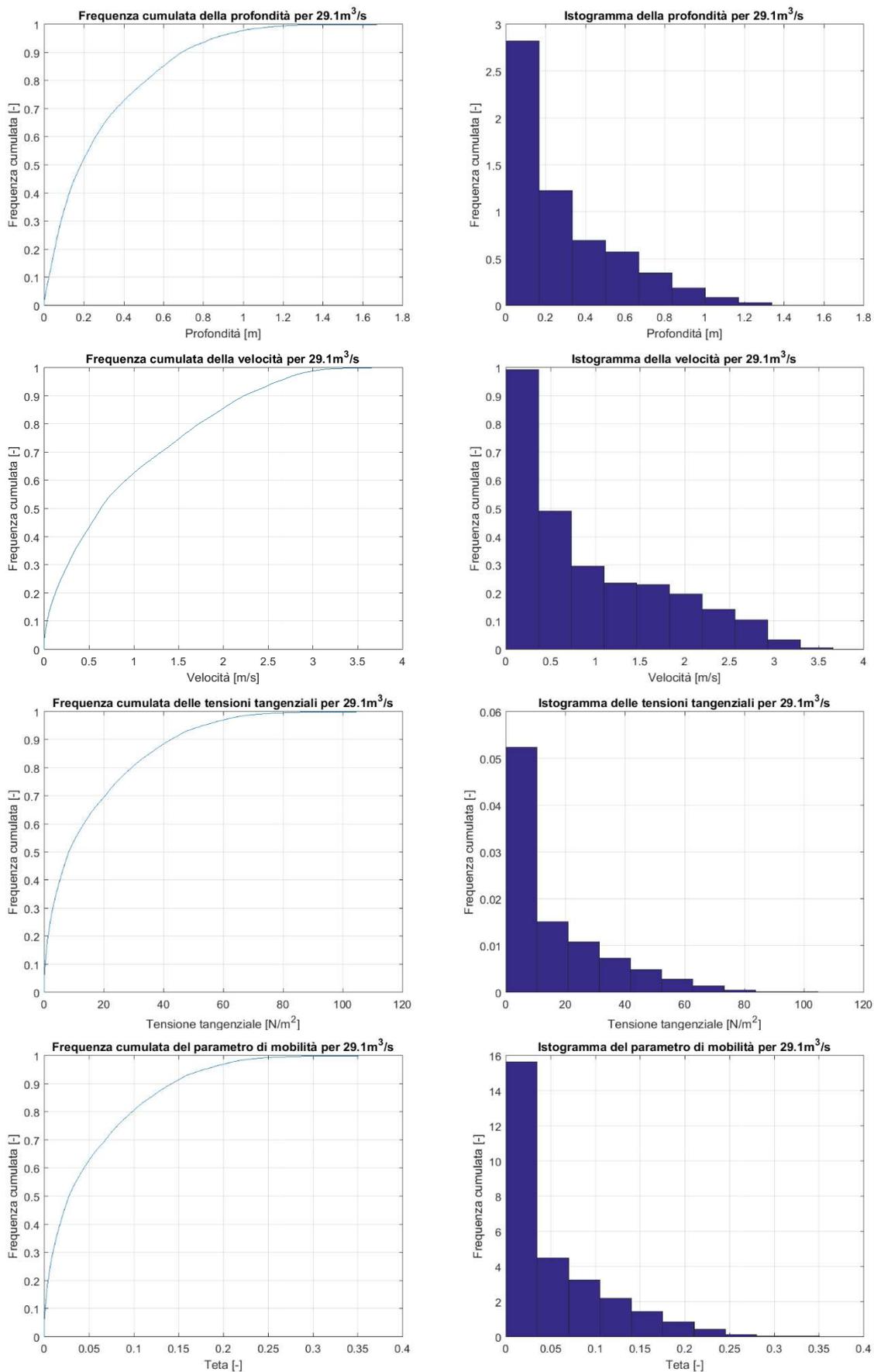


Figura 5.21 Caratterizzazione statistica dei parametri idraulici per la portata  $Q=29,10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

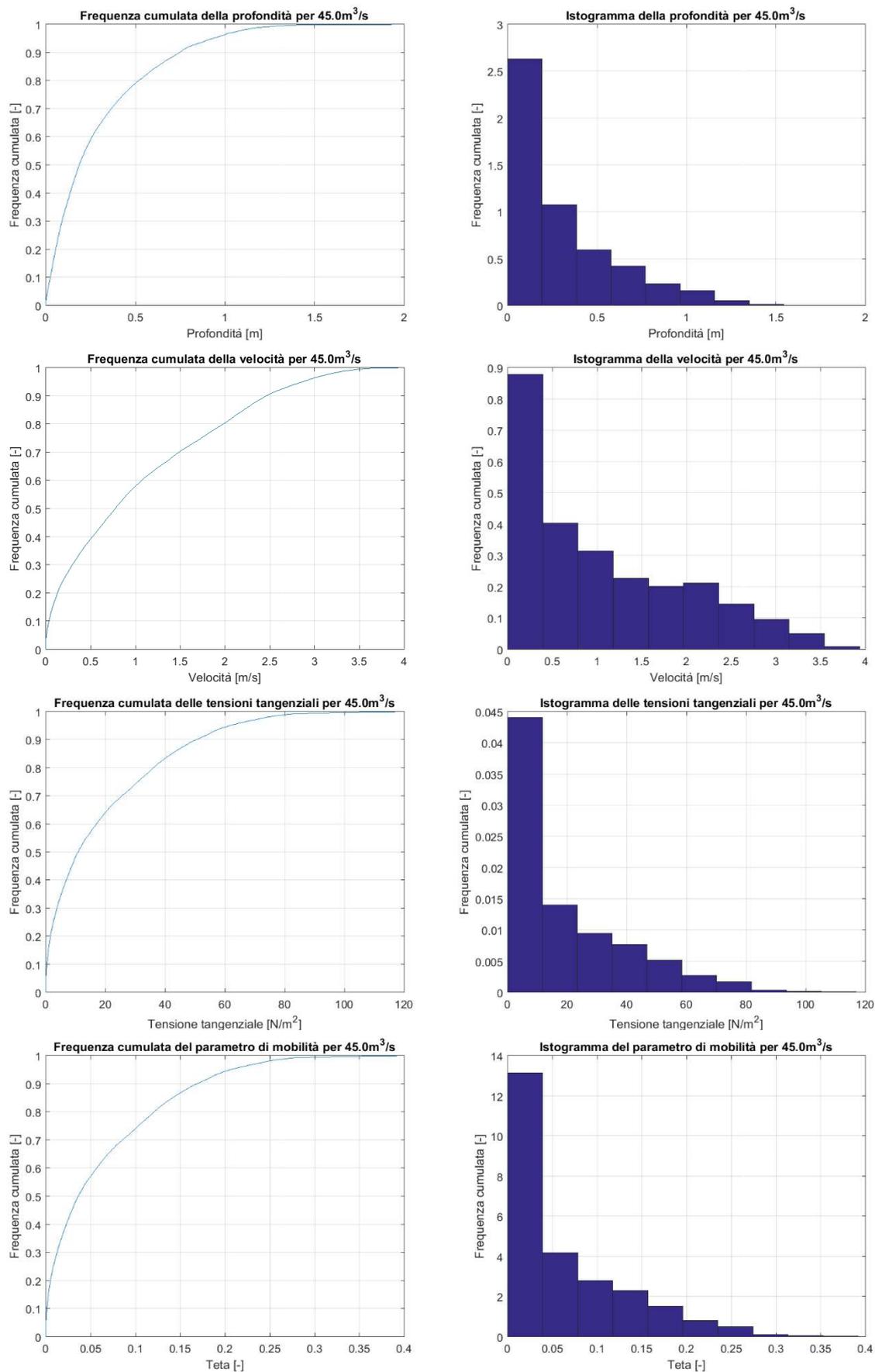
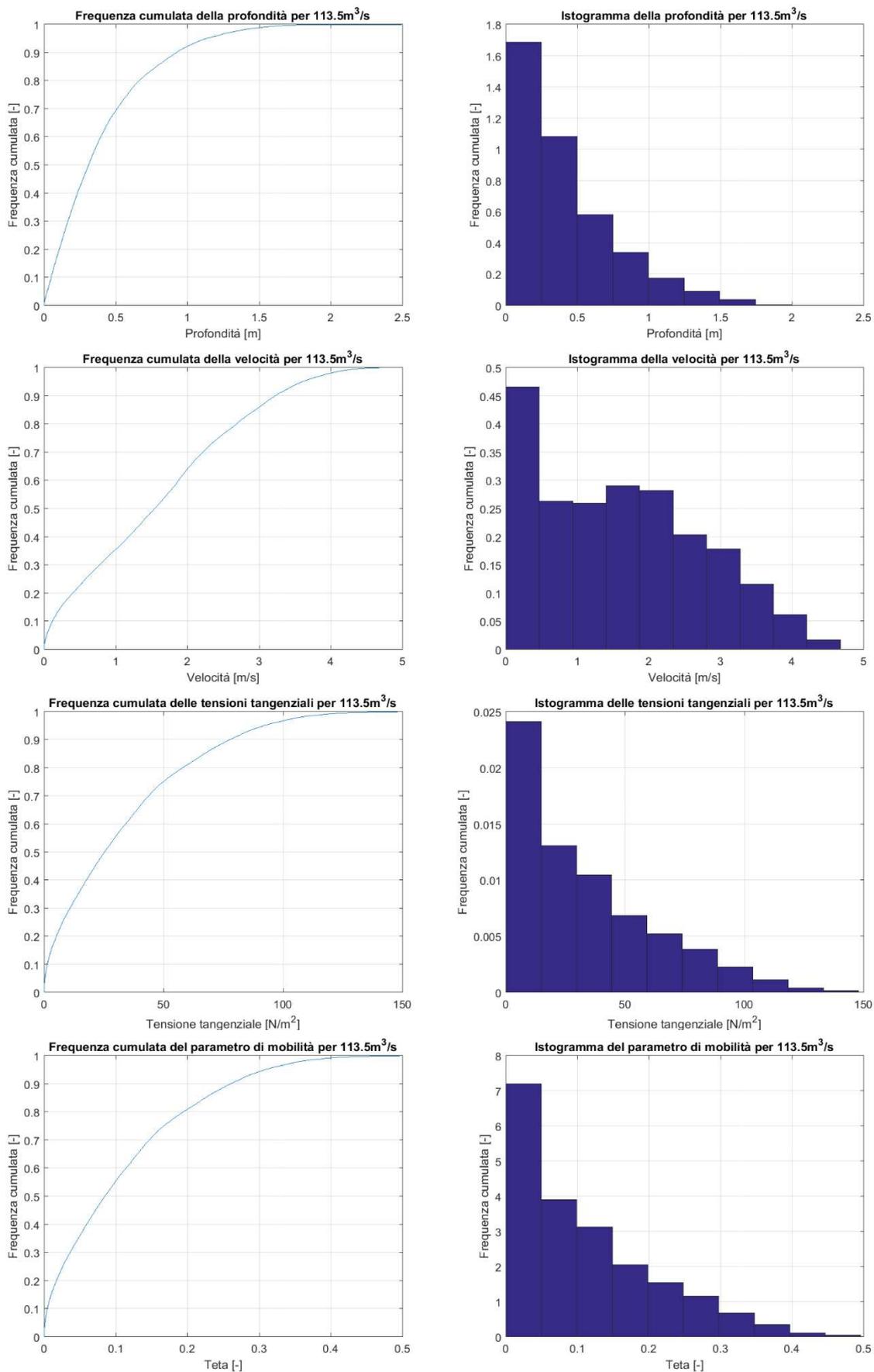


Figura 5.22 Caratterizzazione statistica dei parametri idraulici per la portata  $Q=45,00 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 5.23** Caratterizzazione statistica dei parametri idraulici per la portata  $Q=113,50 \text{ m}^3/\text{s}$ .

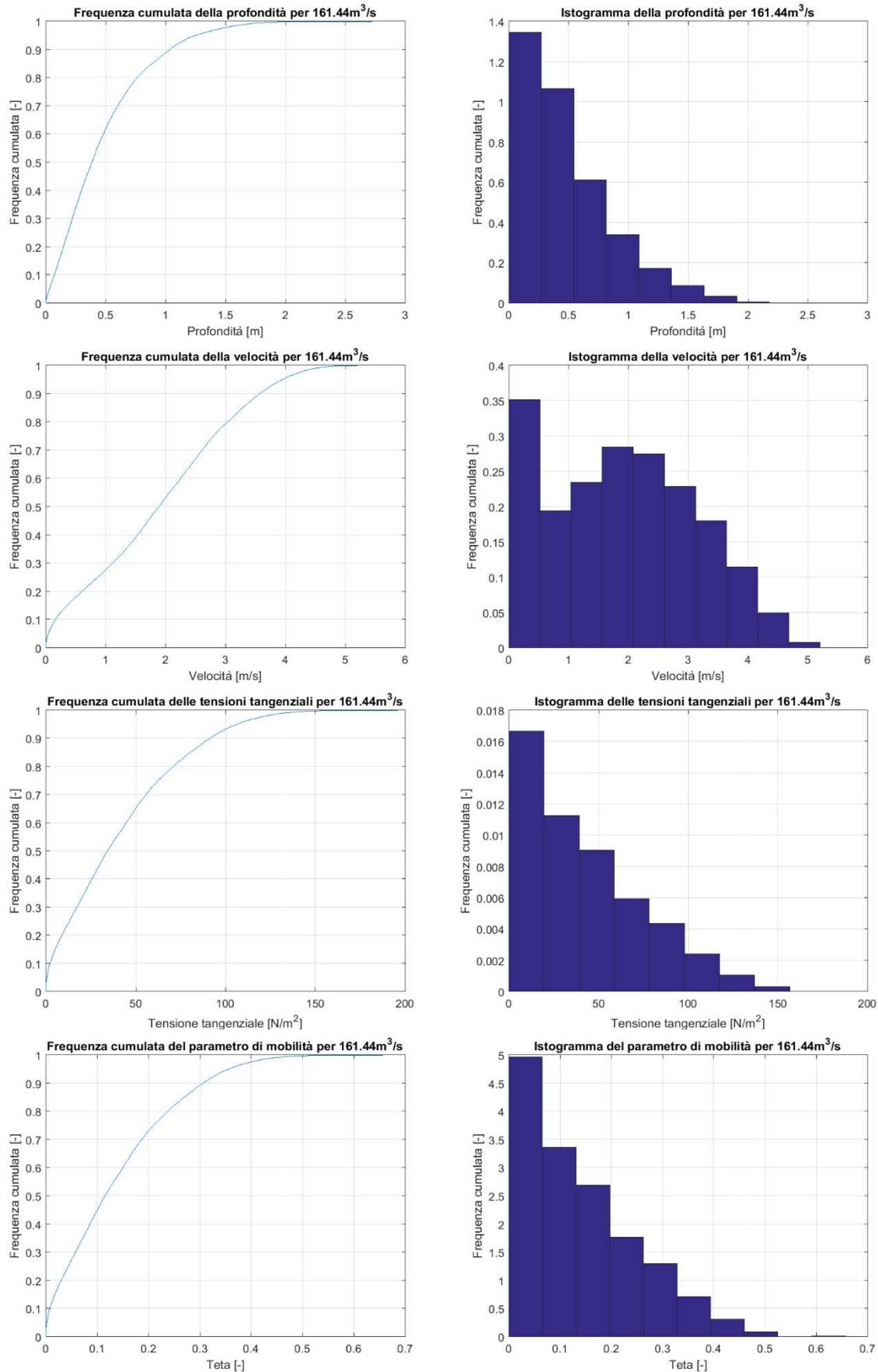
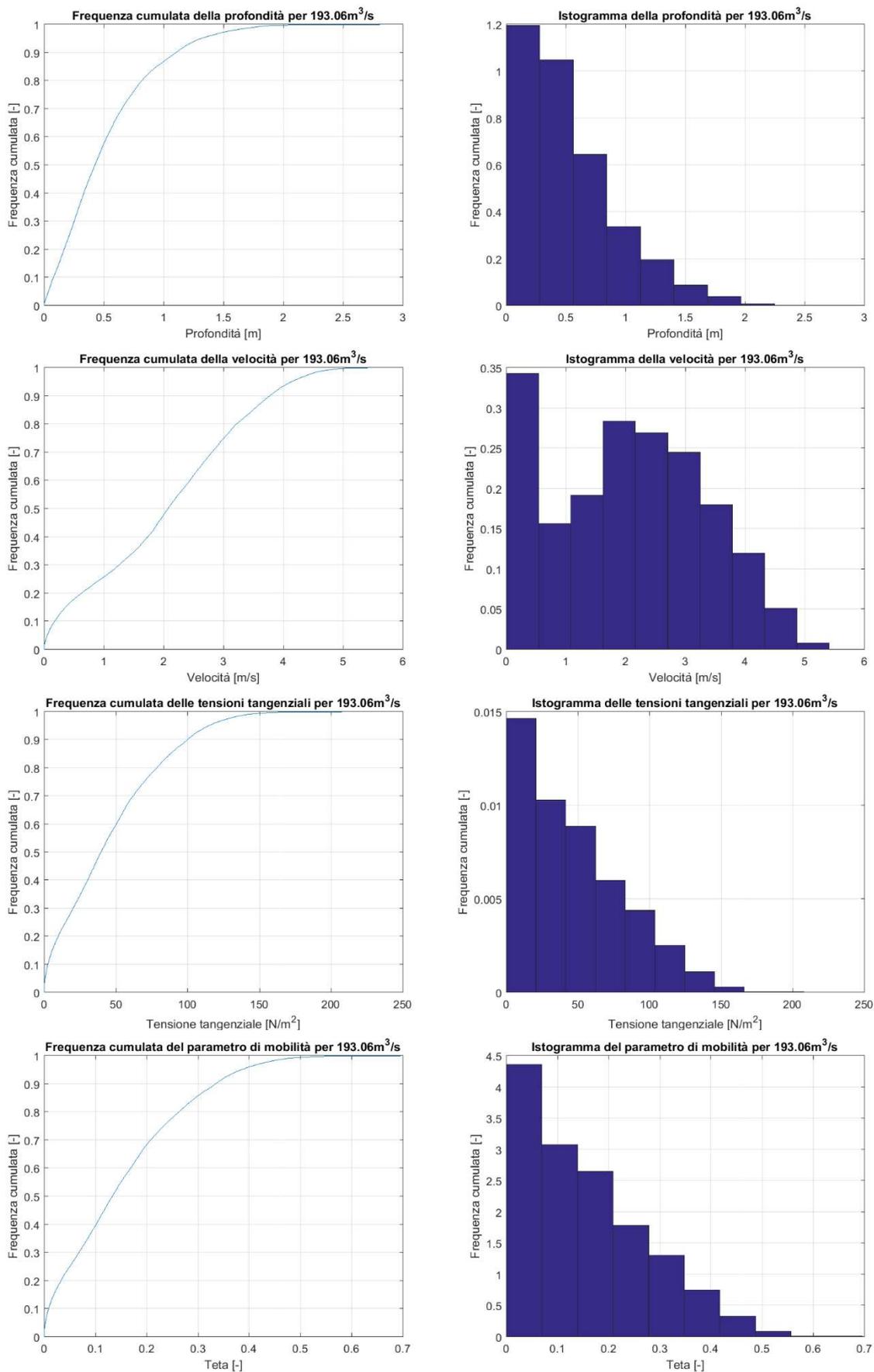
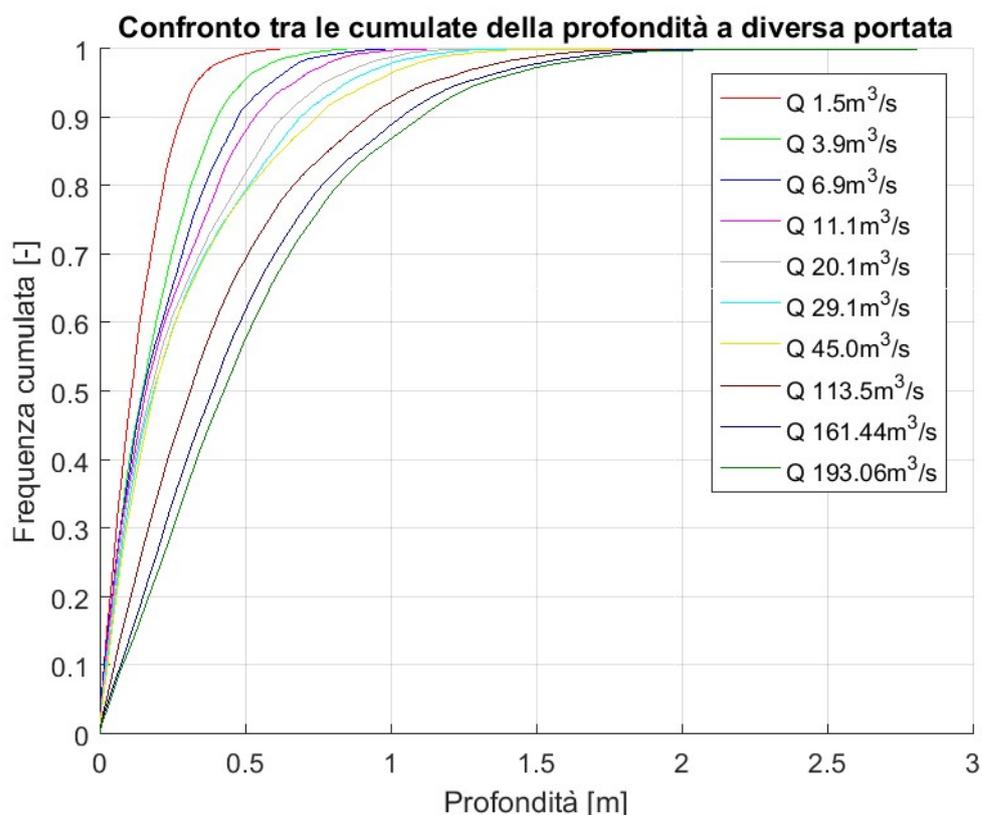


Figura 5.24 Caratterizzazione statistica dei parametri idraulici per la portata  $Q=161,44 \text{ m}^3/\text{s}$ .



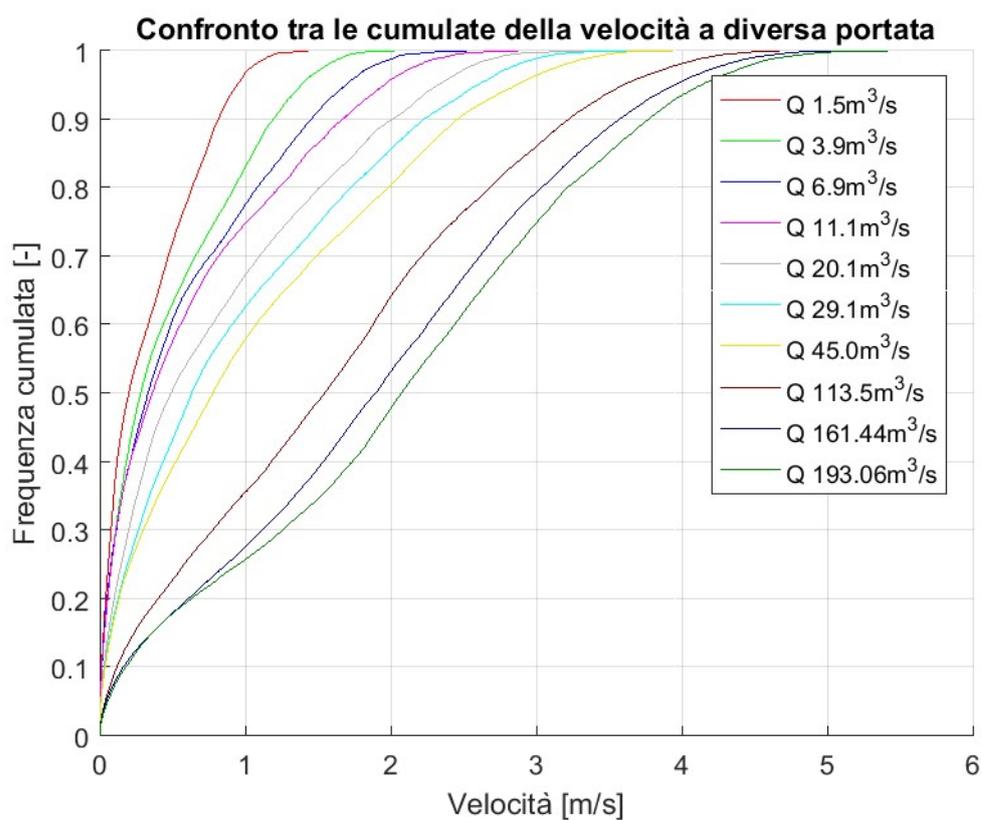
**Figura 5.25** Caratterizzazione statistica dei parametri idraulici per la portata  $Q=193,06 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Sovrapponendo le distribuzioni delle frequenze cumulate della profondità della corrente per ogni portata simulata si ottiene in grafico di figura 5.26. Nel grafico si nota come per le portate annuali i valori che si ottengono per una frequenza inferiore al 50% siano simili. Ciò definisce che la profondità media dei canali è pressochè costante nelle portate annuali e quindi che la profondità media della corrente non varia al variare delle portate. Viceversa nelle portate di piena sono i valori di picco che tendono a rimanere costanti. Questo dimostra che durante gli eventi di piena i canali più profondi manterranno un livello pressochè costante e perciò l'aumento della portata viene convogliata e gestita dai canali secondari.



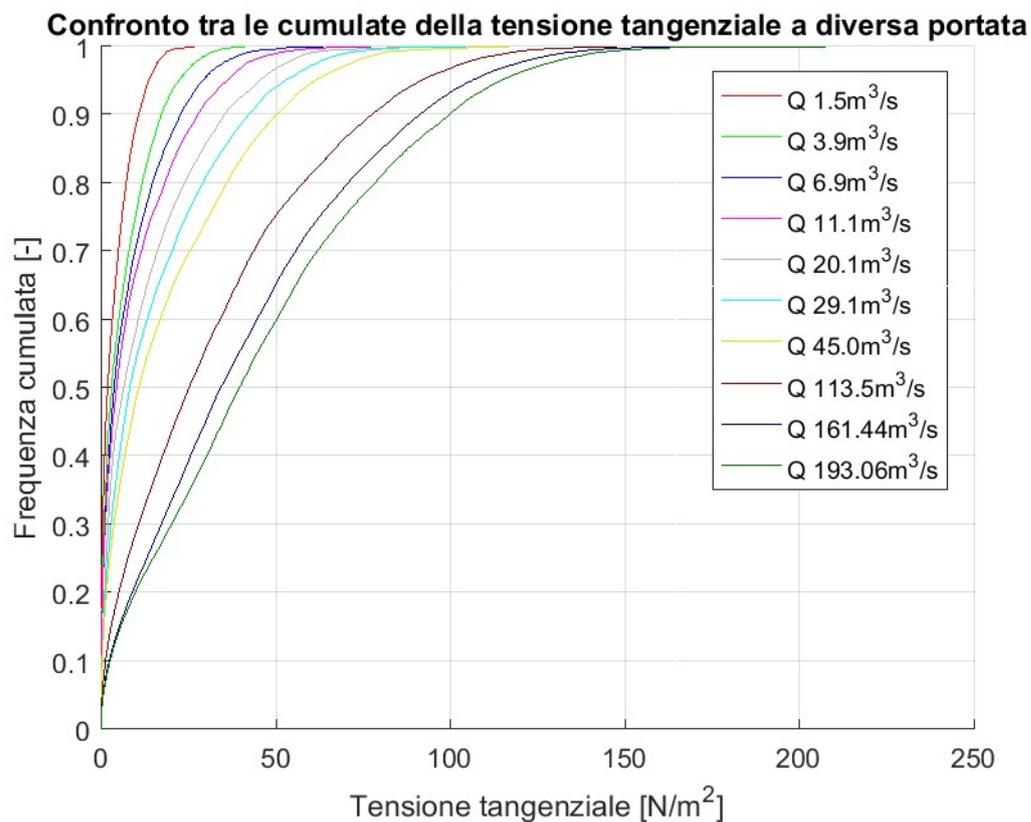
**Figura 5.26** Distribuzione delle frequenze cumulate della profondità della corrente per diverse portate.

Sovrapponendo le distribuzioni delle frequenze cumulate della velocità della corrente per ogni portata simulata si ottiene in grafico di figura 5.27. Nel grafico si nota che la velocità per le portate annuali è mediamente inferiore ad 1,00 m/s e viene raggiunto un picco di circa 3,00 m/s. Il passaggio da 1,00 a 3,00 m/s permette di affermare che nel dominio di simulazione esistono zone in cui l'acqua si muove lentamente ed altre zone di rapida. Questo permette la coesistenza di diversi ecosistemi all'interno dell'alveo. Per le portate di piena si nota che nonostante la grande portata transitata e velocità di picco elevate (più di 5,00 m/s) esistono ampie zone (poco meno del 30% dell'area) in cui la velocità rimane inferiore a 1,00 m/s. Queste zone sono possibili rifugi per i pesci che altrimenti verrebbero trasportati via dalla corrente.



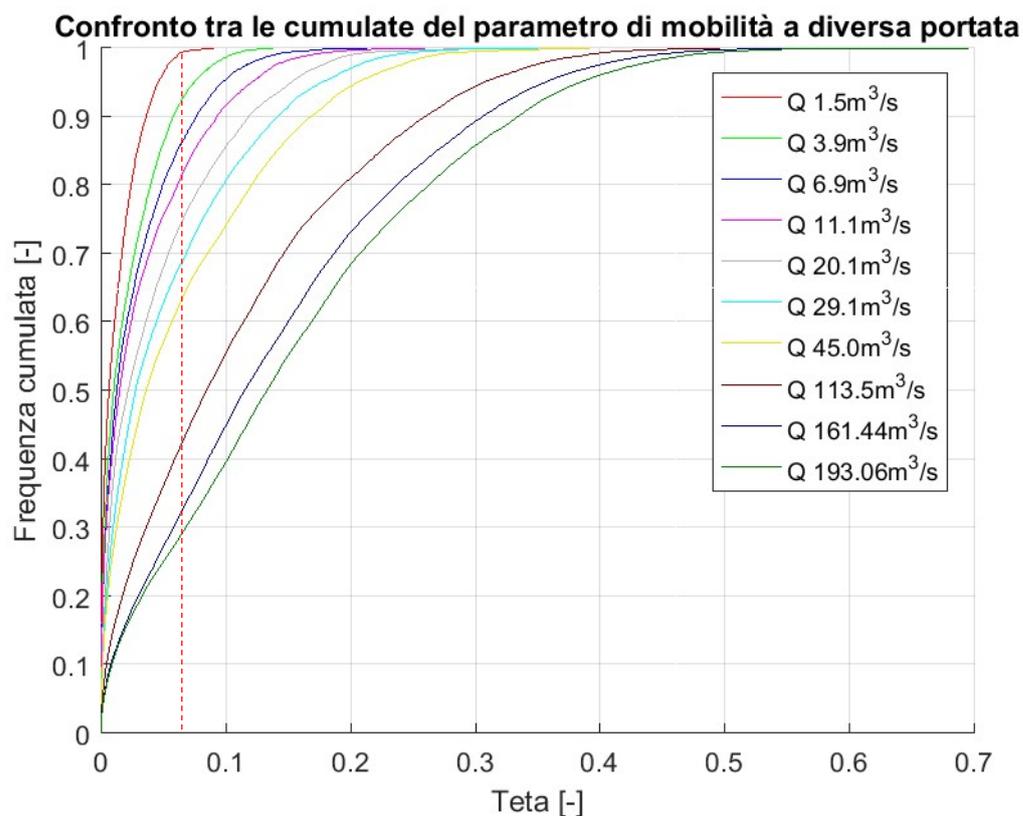
**Figura 5.27** Distribuzione delle frequenze cumulate della velocità della corrente per diverse portate.

Sovrapponendo le distribuzioni delle frequenze cumulate delle tensioni tangenziali al fondo per ogni portata simulata si ottiene in grafico di figura 5.28. Dato che le tensioni tangenziali sono state utilizzate per calcolare il parametro di mobilità ci si aspetta che i grafici siano uguali ma con valori sull'ordinata differenti.



**Figura 5.28** Distribuzione delle frequenze cumulate della tensione tangenziale della corrente per diverse portate.

Sovrapponendo le distribuzioni delle frequenze cumulate del parametro di mobilitazione per ogni portata simulata si ottiene in grafico di figura 5.29. Dal grafico si nota che per le portate annuali il valore del parametro di mobilità critico ( $\theta_c=0,06$ ) viene superato in meno del 40% dei punti. Invece per le portate di piena il valore del parametro di mobilità critico viene superato da più dell'80% dell'alveo bagnato. Questo permette di affermare che con le portate annuali il trasporto solido è nullo o minimo e perciò i canali non evolveranno. Invece durante le portate di piena l'intero alveo è interessato dal trasporto solido e perciò dall'evoluzione dei canali.



**Figura 5.29** Distribuzione delle frequenze cumulate del parametro di mobilitazione della corrente per diverse portate. La linea rossa tratteggiata rappresenta il parametro di mobilità critico.

### 5.3 *COMPORAMENTO DEI CANALI INTRECCIATI DEL TRATTO SIMULATO*

Il comportamento dei singoli canali del tratto simulato viene studiato tramite parametri idraulici e morfologici relativi a determinate sezioni per una portata simulata. I parametri idraulici descrivono l'idraulica dei canali utilizzando la profondità, velocità e tensione tangenziale della portata convogliata all'interno del singolo canale, mentre i parametri morfologici descrivono l'evolversi dei canali tra una sezione e l'altra a partire dalla profondità e parametro di mobilità dei canali.

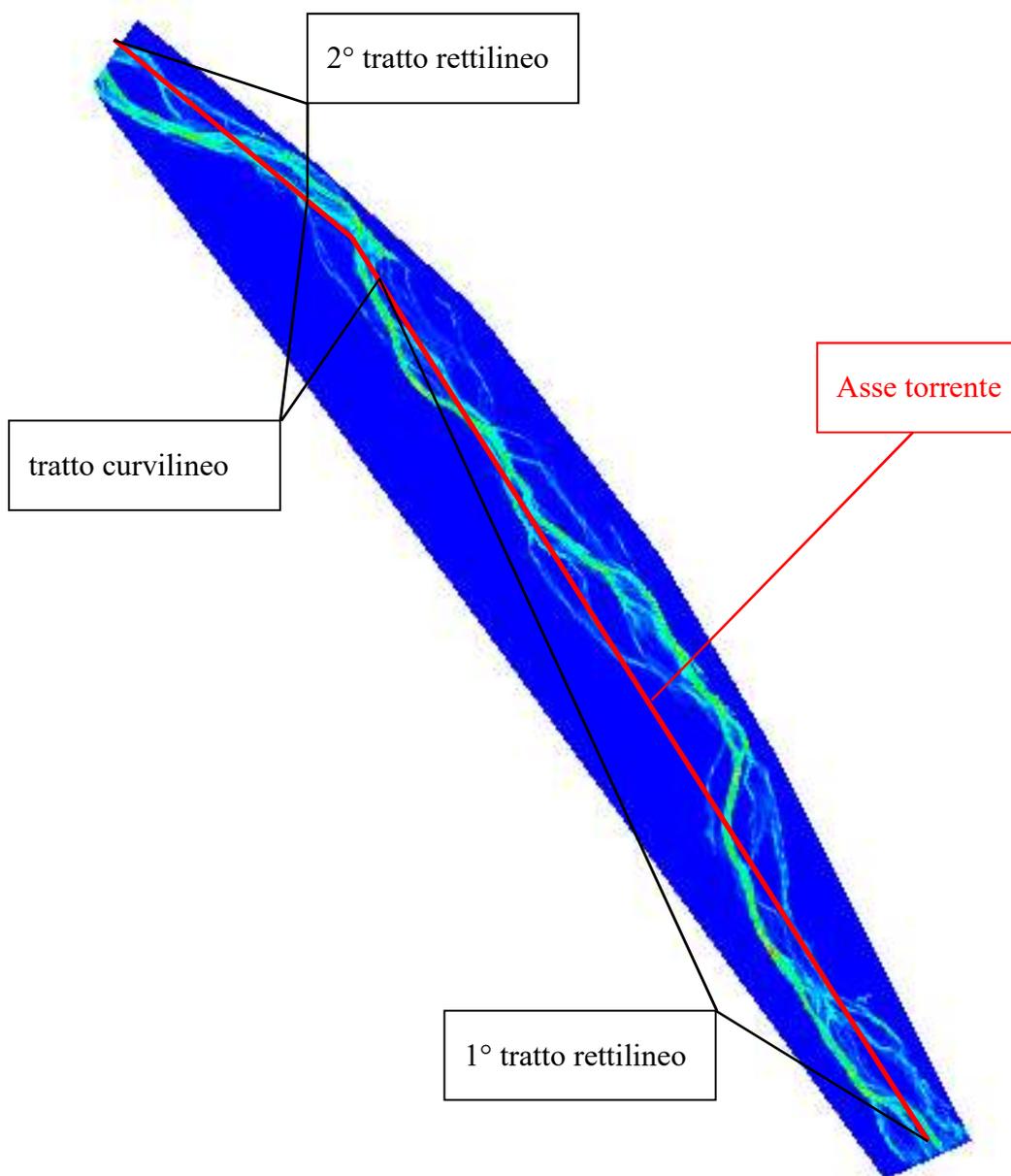
In questa tesi non verranno calcolati i parametri ma si cerca un metodo per estrarre sezioni dai raster.

#### 5.3.1 *Estrazione sezioni*

Come descritto in precedenza i parametri idraulici e morfologici si ottengono da sezioni di alveo, perciò si rende necessario identificare una procedura unica per definire una serie di sezioni, ed estrarne i valori. L'ideale sarebbe estrarre il più alto numero di sezioni contenenti sia i valori di velocità, profondità, tensioni tangenziali e parametro di mobilitazione riferito ad ogni portata simulata. L'ipotesi è di realizzare una sezione al metro per lunghezza del tratto misurato ed estrarne i relativi valori per ogni portata. Essendo il tratto misurato di circa 3000 m e 10 le portate simulate si avrebbe a disposizione circa 30000 sezioni per effettuare considerazioni sul comportamento del torrente. E' necessario che le sezioni siano fisse, le stesse per ogni portata, in modo che sia possibile effettuare un confronto nella singola sezione al variare della portata o al variare della distanza dalla sezione iniziale.

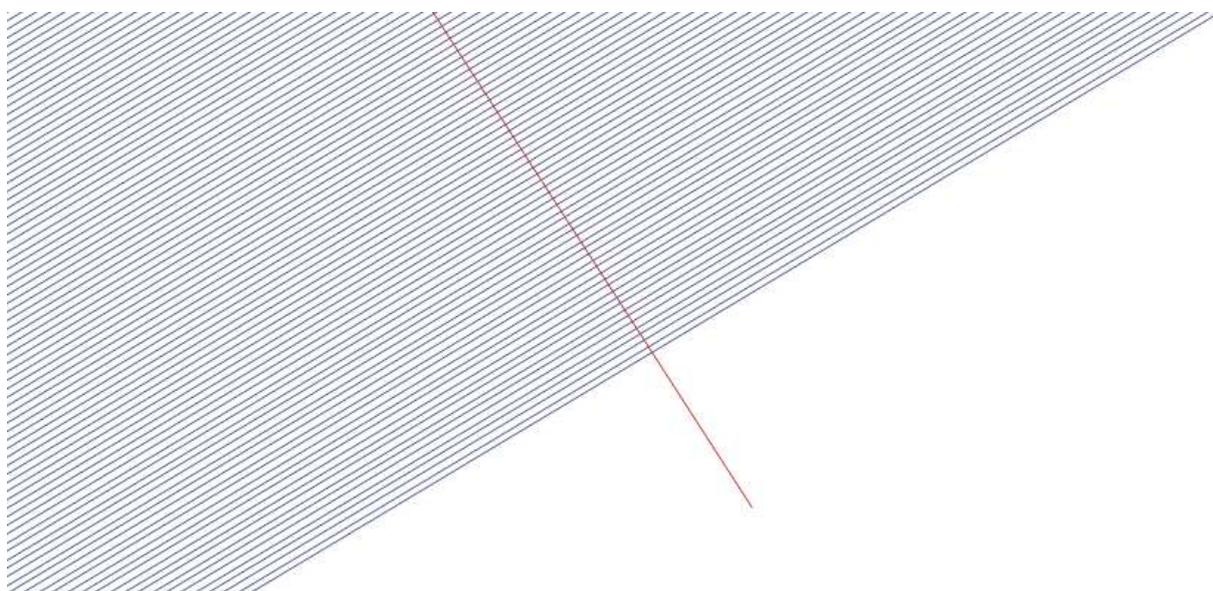
Operativamente dato che i risultati sono stati visualizzati ed elaborati tramite QGIS si è scelto, per convenienza, di continuare ad utilizzare il medesimo programma sia per il tracciamento delle sezioni che per l'estrazione dei risultati. Per quanto riguarda il tracciamento bisogna tener conto che le sezioni devono essere il più possibili ortogonali all'asse dell'alveo e devono essere fisse, ovvero sempre le medesime per ogni portata simulata. In oltre si deduce che è necessario trovare un mezzo che ci permetta di tracciare in modo automatico una sezione al metro per la lunghezza del tratto misurato. Il plugin trovato per il tracciamento delle sezioni è denominato QAD.

Il tracciamento delle sezioni è una operazione non banale, di fatti se si osserva con attenzione il tratto simulato si può affermare come non sia perfettamente rettilineo. Questa affermazione non ci permette di creare tutte sezioni parallele tra loro ma ci fa suddividere il dominio in 3 insiemi: un primo tratto rettilineo (dalla sezione di inizio simulazione), un tratto curvilineo (collegamento tra il primo tratto rettilineo ed il secondo) ed infine un secondo tratto rettilineo (fino alla sezione di fine simulazione). In figura 5.30 è mostrato come è stato suddiviso il dominio di simulazione.



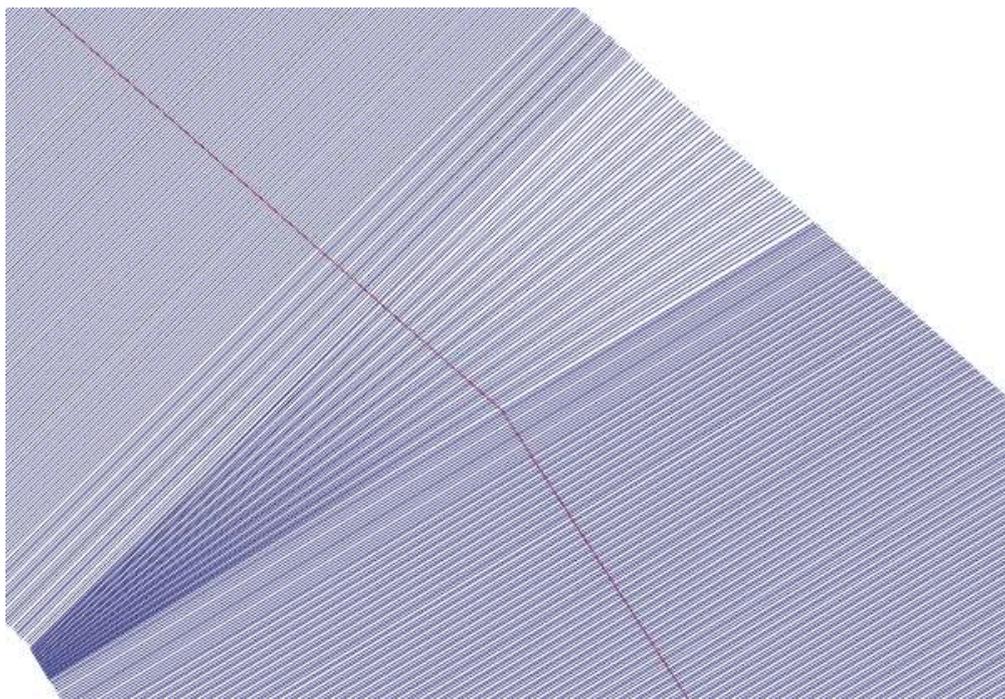
**Figura 5.30** Suddivisione in 3 tratti per il tracciamento delle sezioni.

Avendo così suddiviso il dominio si prosegue al tracciamento delle sezioni. Il Plugin QAD permette all'utente di poter disegnare su QGIS con i comandi classici di AutoCAD. L'aiuto è notevole perché tracciare sezioni con i comandi classici di QGIS pone diverse difficoltà. I comandi che si rendono indispensabili per questa operazione sono due: Offset e Cerchio. Il comando Offset permette di creare delle copie parallele di una linea, perciò sarà necessario solamente disegnare la prima sezione il più perpendicolare possibile all'asse dell'alveo ed utilizzare questo comando fino a raggiungere la fine del tratto rettilineo. In figura 5.31 sono mostrate le sezioni parallele tracciate per il primo tratto rettilineo con un passo di un metro.



**Figura 5.31** Comando offset per la creazione delle sezioni parallele.

Il comando Cerchio permette di tracciare i raggi di un settore circolare definendo l'ampiezza angolare ed il numero di sezioni da contenere. In figura 5.32 sono mostrate le sezioni ottenute dal comando cerchio nella zona di collegamento tra il primo ed il secondo tratto rettilineo. La distanza tra le sezioni rispetto all'asse del torrente (la linea rossa) è di un metro anche nel tratto curvilineo.

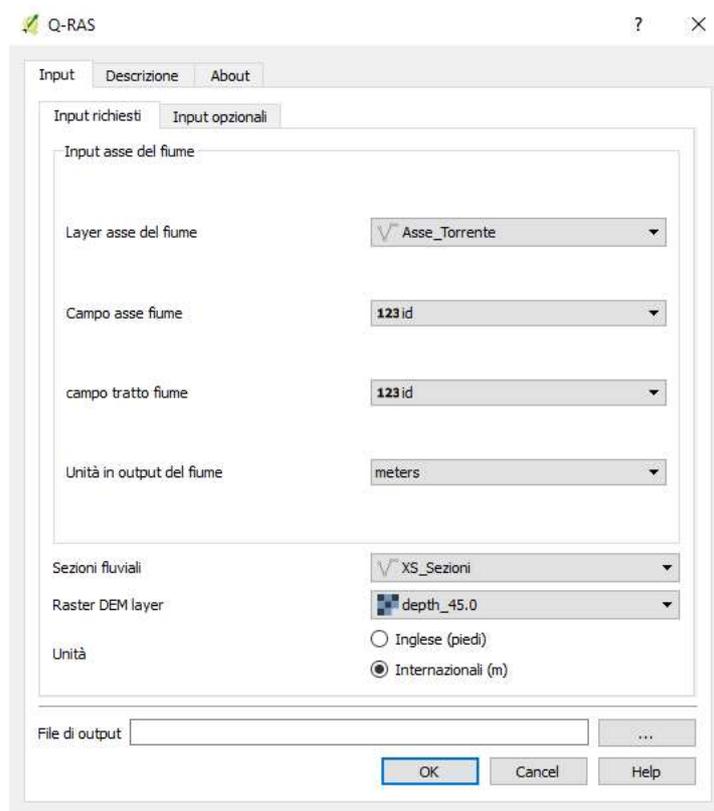


**Figura 5.32** Tratto curvilineo di collegamento tra i tratti rettilinei.

Tracciate le sezioni è possibile passare all'estrazione dei valori dai raster precedentemente ottenuti.

Per l'estrazione dei dati dalle sezioni è necessario trovare un mezzo che possa visualizzare e salvare i risultati che derivano da un raster prendendo come traccia le sezioni tracciate. Il plugin trovato per questa operazione è QRAS.

QRAS nasce per poter fornire le sezioni ad un programma di simulazione idraulica chiamato Hec-Ras. QRAS permette di estrarre le sezioni tracciate al di sopra di un raster per comporre il file geometrico della simulazione monodimensionale di Hec-Ras. Il plugin richiede l'inserimento di pochi parametri ovvero: l'asse del fiume, le sezioni fluviale ed il raster da cui prelevare le informazioni. In figura 5.33 è riportata la schermata del comando QRAS per l'esportazione dei risultati.



**Figura 5.33** Schermata di QRAS.

Il file che viene generato contiene tutte le sezioni tracciate con i valori del raster in un formato che può essere aperto tramite un foglio di testo. Al suo interno il file contiene solamente le informazioni di un unico raster e perciò sarà necessario effettuare la stessa procedura per tutti i raster generati precedentemente. In pratica vengono generate: circa 3000 sezioni per 40 raster (4 parametri per 10 portate simulate) per un totale di circa 120000 sezioni.

I singoli file così come sono, però, non possono essere utilizzati dato che contengono al loro interno informazioni utili ad Hec-Ras. L'enorme numero di sezioni e le informazioni non utili all'operatore sono un grosso limite operativo. Perciò si è optato di utilizzare nuovamente Matlab per poter elaborare e leggere tutte le sezioni.

La difficoltà nell'elaborare lo script sta nel definire la lunghezza delle sezioni, dato che ognuna è diversa dall'altra, ed elaborare tutte le sezioni presenti nei singoli file. Lo script formulato viene riportato negli allegati come Script 4.

La procedura così proposta permette di identificare le sezioni ed i suoi parametri in ogni portata simulata.



## 6 CONCLUSIONI

Nello svolgimento di questa tesi, due erano gli obiettivi preposti. Il primo obiettivo era l'elaborazione del rilievo con una altissima densità di dati, il secondo era effettuare una simulazione idraulica bidimensionale di un torrente a canali intrecciati e trarre considerazioni in merito al comportamento al variare delle portate transitate.

I dati rilevati necessitano delle operazioni preliminari perché inadatti da essere utilizzati dal software. Perciò sono necessarie due operazioni. La prima è la rimozione dei punti che appartengono alla vegetazione. La seconda è la riduzione della densità di punti effettuando un sottocampionamento che tiene conto della curvatura. Queste operazioni hanno permesso di realizzare una mesh fedele al terreno rilevato.

I risultati principali ottenuti dalla simulazione idraulica sono la profondità, velocità, tensioni tangenziali e parametro di mobilità. Questi dati permettono di studiare sia il comportamento globale del torrente che dei singoli canali. L'analisi globale del tratto simulato ha permesso di confermare che in alveo coesistono diverse condizioni idrauliche. Questo permette la contemporanea esistenza di diversi ecosistemi. Il comportamento dei singoli canali invece, non viene del tutto analizzato ma lo studio si è limitato ad illustrare un metodo per estrarre i dati in ogni singola sezione tracciata per una futura analisi locale.

I risultati fino a qui ottenuti rappresentano la base per poter proseguire uno studio approfondito dei corsi d'acqua a canali intrecciati. Infatti, i risultati possono essere utilizzati per effettuare analisi più dettagliate sugli ecosistemi oppure studi sull'evoluzione della morfologia.



## ALLEGATI

**Script 1** Blocchi di calcolo di BASEMENT per la portata massima annuale.

```
PROJECT {
    title = Tesi_Borbera
    author = Fabio_Sola
    date = 09/05/2018
}
DOMAIN {
    multiregion = Borbera
    PARALLEL {
        number_threads = 1
    }
    PHYSICAL_PROPERTIES {
        gravity = 9.81
        viscosity = 1e-006
        rho_fluid = 1000
    }
    BASEPLANE_2D {
        region_name = Borbera
        GEOMETRY {
            type = 2dm
            file = \Borbera_fine_veg_corr.2dm
            STRINGDEF {
                name = Sez_start
                node_ids = (2736 8235 8079 18934 7500 72344 38553
47641 35 47642 47638 47644 40472 48384 48377 73541 20967 54598 52382 54599 20984
54604 20985 55675 34 77043 27115 71343 18833 18843 18835 18837 33 68945 32 5010 5136
5174 31 )
                upstream_direction = right
            }
            STRINGDEF {
                name = Sez_end
                node_ids = (7 8 6041 6035 6002 5825 6978 7298 9 10 7375
7364 64688 7273 75969 64298 77901 6870 77895 75975 74067 77515 74070 11 74065 74040
74050 74021 74038 74025 74036 4014 78592 21750 27977 4105 17881 4169 13869 1724
17885 1714 17887 15857 4063 15854 3127)
```

```
        upstream_direction = right
    }
}
TIMESTEP {
    total_run_time    = 3000
    CFL               = 1.0
    initial_time_step = 0.0001
    minimum_time_step = 1
    maximum_time_step = 500
    start_time        = -1.0
    ignore_wave_celerity = off
    morph_cycle       = off
}
HYDRAULICS {
    FRICTION {
        type           = manning
        input_type     = index_table
        index          = (0 1 2 3 )
        friction       = (0.025 0.100 0.050 0.040)
        default_friction = 0.025
        grain_size_friction = no
        wall_friction  = off
    }
    PARAMETER {
        simulation_scheme      = exp
        riemann_solver        = exact
        minimum_water_depth    = 0.05
        riemann_tolerance      = 1.0e-6
        velocity_update_partial = volume_area
        dynamic_depth_solver    = on
        dynamic_depth_solver_precision = 0.005
        geo_min_area_ratio      = 0.05
        geo_max_angle_quadrilateral = 45
        geo_min_aspect_ratio    = 0.06
    }
}
```

```
BOUNDARY {
    type          = hydrograph
    string_name    = Sez_start
    file          = hidrograph.dat
    slope         = 0.0002
    max_interval   = 20
    number_of_iterations = 5000
    weighting_type = conveyance
    dynamic_slope  = no
    precision      = -1.0
    wse_calc_method = average
}
INITIAL {
    type = dry
}
BOUNDARY {
    type      = zero_gradient
    string_name = Sez_end
}
}
OUTPUT {
    console_time_step = 60.0
    restart_time_step = 1E32
    SPECIAL_OUTPUT {
        type      = node_centered
        format     = sms
        values     = (wse depth velocity tau)
        output_time_step = 3000
        threshold_wse = -1000000
    }
    SPECIAL_OUTPUT {
        type      = node_centered
        format     = ascii
        values     = (wse depth velocity tau)
        output_time_step = 3000
    }
}
```

```
ids_instead_coords = no
threshold_wse      = -1000000
}
SPECIAL_OUTPUT {
  type              = stringdef_history
  stringdef_values  = (Q u wse)
  stringdefs        = (Sez_start Sez_end )
  output_time_step  = 100
  flush_all_num_steps = 0
  history_one_file   = no
  threshold_wse     = -1000000
}
}
}
}
```

**Script 2** Calcolo del parametro di mobilità a partire dalle tensioni tangenziali per la portata massima annuale.

```
clear all
fileID=fopen('Borbera_nds_tau_45.0.sol');

fseek(fileID,0,'bof');
C = textscan(fileID,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',4);
cc=char(C{1,1});
num_nodi_cella = textscan(cc,'ND %f');
num_nodi=num_nodi_cella{1,1};

fseek(fileID,0,'bof');
C = textscan(fileID,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',8);
dat2 = (textscan(fileID,'%s',num_nodi,'delimiter','\n'));
dat2_c=char(dat2{1,1});

fseek(fileID,0,'bof');
dat = (textscan(fileID,'%s',num_nodi,'delimiter','\n', 'headerlines',10+num_nodi));
dat_c=char(dat{1,1});

for cont_scan=1:length(dat_c)
    tau_cell(cont_scan)=textscan(dat_c(cont_scan,:),'%20.19f');
end

tau_a=cell2mat(tau_cell);

gamma_w=1000;
gamma_s=2600;
d50=0.019;
g=9.81;
teta_a = tau_a/((gamma_s-gamma_w)*g*d50);

fseek(fileID,0,'bof');
testa1 = (textscan(fileID,'%s',6,'delimiter','\n', 'headerlines',0));
```

```
testa1_c=char(testa1{1,1});

fseek(fileID,0,'bof');
testa2 = (textscan(fileID,'%s',2,'delimiter','\n', 'headerlines',7));
testa2_c=char(testa2{1,1});

fseek(fileID,0,'bof');
TS = (textscan(fileID,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',num_nodi+9));
TS_c=char(TS{1,1});
fclose(fileID);

fid=fopen('Borbera_nds_teta_45.0.sol','w');
fprintf(fid,'%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c\r\n',te
sta1_c');
fprintf(fid,'%s\r\n','NAME "teta_45.0"');
fprintf(fid,'%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c\r\n',te
sta2_c');
fprintf(fid,'%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c%c\r\n',dat2_c');
fprintf(fid,'%s\r\n',TS_c);
fprintf(fid,'%f\r\n',teta_a);
fprintf(fid,'%s','ENDDDS');
fclose(fid);
```





```

xlabel('Profondità [m]')
ylabel('Frequenza [-]')
print('Depth','-dtiff')
depth=repelem(x_depth_fin,y_depth_fin);
[f1,x1]=ecdf(depth);
plot(x1,f1)
grid on
title(['Frequenza cumulata della profondità per ' [str_portata] 'm^3/s'])
xlabel('Profondità [m]')
ylabel('Frequenza cumulata [-]')
print('Depth_cumulata','-dtiff')
ecdfhist(f1,x1)
grid on
title(['Istogramma della profondità per ' [str_portata] 'm^3/s'])
xlabel('Profondità [m]')
ylabel('Frequenza cumulata [-]')
print('Depth_istogramma','-dtiff')
Grafico.depth=depth;
Grafico.x_depth=x1;
Grafico.f_depth=f1;

%velocity
Min_velocity = (textscan(fileID_velocity,<HistMin>%f,1,'delimiter','\n', 'headerlines',4));
Min_velocity_n=cell2mat(Min_velocity);
Max_velocity = (textscan(fileID_velocity,<HistMax>%f,1,'delimiter','\n', 'headerlines',1));
Max_velocity_n=cell2mat(Max_velocity);
space_velocity = (textscan(fileID_velocity,<BucketCount>%n,1,'delimiter','\n',
'headerlines',1));
space_velocity_n=cell2mat(space_velocity);
Ist_velocity =
(textscan(fileID_velocity,<HistCounts>%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|
%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|%n|

```



```
a=a+1;
else
    i=0;
end
end
end

x_velocity_fin=x_velocity(a+1:end);
y_velocity_fin=y_velocity(a+1:end);
plot(x_velocity_fin,y_velocity_fin)
grid on
title(['Velocità con la portata ' [str_portata] 'm^3/s'])
xlabel('Velocità [m/s]')
ylabel('Frequenza [-]')
print('Velocity','-dtiff')
velocity=repelem(x_velocity_fin,y_velocity_fin);
[f2,x2]=ecdf(velocity);
plot(x2,f2)
grid on
title(['Frequenza cumulata della velocità per ' [str_portata] 'm^3/s'])
xlabel('Velocità [m/s]')
ylabel('Frequenza cumulata [-]')
print('velocity_cumulata','-dtiff')
ecdfhist(f2,x2)
grid on
title(['Istogramma della velocità per ' [str_portata] 'm^3/s'])
xlabel('Velocità [m/s]')
ylabel('Frequenza cumulata [-]')
print('velocity_istogramma','-dtiff')
Grafico.velocity=velocity;
Grafico.x_velocity=x2;
Grafico.f_velocity=f2;
```









```
print('Teta','-dtiff')
teta=repelem(x_teta_fin,y_teta_fin);
[f4,x4]=ecdf(teta);
plot(x4,f4)
grid on
title(['Frequenza cumulata del parametro di mobilità per ' [str_portata] 'm^3/s'])
xlabel('Teta [-]')
ylabel('Frequenza cumulata [-]')
print('teta_cumulata','-dtiff')
ecdfhist(f4,x4)
grid on
title(['Istogramma del parametro di mobilità per ' [str_portata] 'm^3/s'])
xlabel('Teta [-]')
ylabel('Frequenza cumulata [-]')
print('teta_istogramma','-dtiff')
Grafico.teta=teta;
Grafico.x_teta=x4;
Grafico.f_teta=f4;

save(['Grafici' str_portata '.mat'],'Grafico');

fclose(fileID_depth);
fclose(fileID_velocity);
fclose(fileID_tau);
fclose(fileID_teta);
```

**Script 3** Estrazione quote, profondità, velocità, tau e teta di ogni singola sezione per la portata massima annuale.

```
clear all
```

```
str_portata='45.0';
```

```
fileID_depth=fopen(['XS_dept_' str_portata 'm3s.sdf']);
```

```
fileID_quote=fopen(['XS_quote.sdf']);
```

```
fileID_velocity=fopen(['XS_velocity_' str_portata 'm3s.sdf']);
```

```
fileID_tau=fopen(['XS_tau_' str_portata 'm3s.sdf']);
```

```
fileID_teta=fopen(['XS_teta_' str_portata 'm3s.sdf']);
```

```
fseek(fileID_depth,0,'bof');
```

```
END = (textscan(fileID_depth,'%33s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',56));
```

```
END_c=char(END{1,1});
```

```
fseek(fileID_depth,0,'bof');
```

```
vuoto = (textscan(fileID_depth,'%33s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',1));
```

```
vuoto_c=char(vuoto{1,1});
```

```
fseek(fileID_depth,0,'bof');
```

```
N_sez_tot = (textscan(fileID_depth,'NUMBER OF CROSS-SECTIONS: %f',1,'delimiter','\n', 'headerlines',12));
```

```
N_sez_tot_a=cell2mat(N_sez_tot);
```

```
n_punt=1;
```

```
n_sez=1;
```

```
i=1;
```

```
N_inn=97;
```

```
fseek(fileID_depth,0,'bof');
```

```
Stri_depth = (textscan(fileID_depth,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',97));
```

```
fseek(fileID_quote,0,'bof');
```

```
Stri_quote = (textscan(fileID_quote,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',97));
```

```
fseek(fileID_velocity,0,'bof');
Stri_velocity = (textscan(fileID_velocity,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',97));

fseek(fileID_tau,0,'bof');
Stri_tau = (textscan(fileID_tau,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',97));

fseek(fileID_teta,0,'bof');
Stri_teta = (textscan(fileID_teta,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',97));

while n_sez<15%N_sez_tot_a+1
    tic
    while i>0;
        %fseek(fileID_depth,0,'bof');
        Stri_depth = (textscan(fileID_depth,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',0));
        Stri_depth_c=char(Stri_depth{1,1});

        Stri_quote = (textscan(fileID_quote,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',0));
        Sez_quote_cc=cell2mat(Stri_quote{1,1});

        Stri_velocity = (textscan(fileID_velocity,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',0));
        Sez_velocity_cc=cell2mat(Stri_velocity{1,1});

        Stri_tau = (textscan(fileID_tau,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',0));
        Sez_tau_cc=cell2mat(Stri_tau{1,1});

        Stri_teta = (textscan(fileID_teta,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',0));
        Sez_teta_cc=cell2mat(Stri_teta{1,1});

        if strcmp(END_c,Stri_depth_c)==1
            %N_inn=N_inn+i+31;
            i=0;
            spazio_testalino=31;
```

```
Stri_depth = (textscan(fileID_depth,'%s',1,'delimiter','\n',
'headerlines',spazio_testalino));
Stri_quote = (textscan(fileID_quote,'%s',1,'delimiter','\n',
'headerlines',spazio_testalino));
Stri_velocity = (textscan(fileID_velocity,'%s',1,'delimiter','\n',
'headerlines',spazio_testalino));
Stri_tau = (textscan(fileID_tau,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',spazio_testalino));
Stri_teta = (textscan(fileID_teta,'%s',1,'delimiter','\n', 'headerlines',spazio_testalino));
else
if strcmp(vuoto_c,Stri_depth_c)==1
    i=i+1;
else

Sez_depth_cc=cell2mat(Stri_depth{1,1});
xydepth=textscan(Sez_depth_cc(1,:),'%f, %f, %f');

x(n_punt)=xydepth{1};
y(n_punt)=xydepth{2};
depth(n_punt)=xydepth{3};

xyquote=textscan(Sez_quote_cc(1,:),'%f, %f, %f');
quote(n_punt)=xyquote{3};

xyvelocity=textscan(Sez_velocity_cc(1,:),'%f, %f, %f');
velocity(n_punt)=xyvelocity{3};

xytau=textscan(Sez_tau_cc(1,:),'%f, %f, %f');
tau(n_punt)=xytau{3};

xyteta=textscan(Sez_teta_cc(1,:),'%f, %f, %f');
teta(n_punt)=xyteta{3};

if n_punt==1
    distanza(n_punt)=0;
else
```

```
distanza(n_punt)=distanza(n_punt-1)+sqrt(((x(n_punt)-x(n_punt-1))^2)
+((y(n_punt)-y(n_punt-1))^2));
    end
    n_punt=n_punt+1;
    i=i+1;
    end
end

end

toc
Sez(n_sez).distanza= distanza;
Sez(n_sez).profondita= depth;
Sez(n_sez).quote= quote;
Sez(n_sez).velocita= velocity;
Sez(n_sez).tau= tau;
Sez(n_sez).teta= teta;

n_sez=n_sez +1;
i=1;
n_punt=1;
x=[];
y=[];
xydepth=[];
depth=[];
distanza=[];
quote=[];
xyquote=[];
velocity=[];
xyvelocity=[];
tau=[];
xytau=[];
teta=[];
xyteta=[];

end
```

```
fclose(fileID_depth);  
fclose(fileID_velocity);  
fclose(fileID_tau);  
fclose(fileID_teta);  
  
save(['sezioni' str_portata '.mat'],'Sez');
```



## BIBLIOGRAFIA

- Chow, V. T. (1959). *Open-channel Hydraulics*.
- EDF R&D. (2015). *User Manual of CloudCompare, version 2.6.1*. [www.cloudcompare.org](http://www.cloudcompare.org).
- Montin, P. (2012). *Acque meteoriche di dilavamento*. Palermo: Dario Flaccovio Editore s.r.l.
- P.Ashmore. (2013). Morphology and Dynamics of Braided Rivers. In P.Ashmore, *Treatise on Geomorphology* (p. 289-312). San Diego: Academic press.
- QGIS Development Team. (2016). *Sistem Manual of QGIS, version 2.18*. [www.qgis.org](http://www.qgis.org).
- Vetsch D., S. A. (2017). *Sistem Manuals of BASEMENT, Version 2.7*. [www.basement.ethz.ch](http://www.basement.ethz.ch): ETH Zurich.
- W. Zhang, J. Q. (2016). An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote sensing*, 22.

## SITOGRAFIA

- Sistema Informatico Ambientale Geografico. (2013, Giugno 18). *Atlante delle piogge intense*.  
Tratto da Arpa Piemonte:  
<http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportale/index.php/documentazione/notizie/13-acqua/21-atlante-delle-piogge-intense>