

# Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'ambiente e il territorio Anno accademico 2020/2021 Sessione di laurea: Dicembre 2021

# Gestione sostenibile dell'idroelettrico in Valle D'Aosta

il caso studio della presa di Nus

Relatore Prof. Paolo Vezza Correlatore Ing. Giovanni Negro **Candidato** Matteo Buffa

# Indice

El	enco	delle f	figure	v
El	enco	delle 1	tabelle $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	ci
Es	stratt	<b>.</b> .	xi	ii
A	bstra	.ct		V
1	Intr	oduzic	one $\ldots$	1
<b>2</b>	Con	itesto i	normativo	<b>5</b>
	2.1	Contes	sto normativo italiano	7
3	Moo fluv	dellazio iale	one dell'habitat 	.1
	3.1	Metod	lologia PHABSIM 1	1
	3.2	Metod	lologia MesoHABSIM	2
		3.2.1	MesoHABSIM in Italia	3
		3.2.2	Manuale ISPRA 154/2017 $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 1$	5
		3.2.3	Manuale ISPRA 132/2016 $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 2$	:1
4	Ana	disi idı	$ m rologiche \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 2$	5
	4.1	Indici	di performance	5
		4.1.1	Nash-Sutcliffe Efficiency - <i>NSE</i>	6
		4.1.2	Indice di corrispondenza - $d$	8
		4.1.3	Coefficiente di determinazione	9
		4.1.4	Errori di misura	9
		4.1.5	Definizione degli Indici di Performance	1

	4.2	Ricost impia	ruzione delle serie di portata: nto di Quincinetto 2 (TO)	32
		4.2.1	Definizione della portata	33
		4.2.2	Verifica della $Q_{Reference}$ calcolata tra il 2018 e il 2020	37
	4.3	Model Fonda	llo idrologico CONTINUUM - zione CIMA	38
		4.3.1	Punti di validazione	38
		4.3.2	Validazione del modello	41
		4.3.3	Condizioni di piena	43
		4.3.4	Condizioni di magra	44
		4.3.5	Conclusioni per l'applicazione del modello CONTINUUM	45
5	Moo bidi	dellazi mensi	one idraulica onale	47
	5.1	Rileva	mento dati	48
		5.1.1	Rilevamento batimetrico	49
		5.1.2	Correzione del DTM	50
	5.2	Il soft	ware <i>HEC-RAS</i>	50
		5.2.1	Creazione del modello $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	52
	5.3	Valida	azione della portata misurata	54
	5.4	Defini	zione coefficiente di Manning	58
		5.4.1	Validazione dei dati simulati	58
		5.4.2	Calcolo analitico	62
	5.5	Model	llazione dell'area bagnata	64
		5.5.1	Portata 3.8 $m^3/s$	65
		5.5.2	Portata 6.2 m <sup>3</sup> /s $\dots$	66
		5.5.3	Portata 10 m <sup>3</sup> /s	67
		5.5.4	Portata $20m^3/s$	68
		5.5.5	Portata 50 m <sup>3</sup> /s	69
		5.5.6	Portata 75 m <sup>3</sup> /s	70
6	App	olicazio	one della metodologia MesoHABSIM	71
	6.1	Defini Idraul	zione delle Unità Morfologiche iche	72
		6.1.1	Portata 6.2 m <sup>3</sup> /s $\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$	73

		6.1.2	Portata 3.8 $m^3/s$	74
		6.1.3	Portata 10 $m^3/s$	75
		6.1.4	Portata 20 $^3$ /s	76
		6.1.5	Portata 50 m <sup>3</sup> /s	77
		6.1.6	Portata 75 m <sup>3</sup> /s	78
		6.1.7	Definizione della tabella attributi	79
	6.2	Definiz	zione del substrato	80
	6.3	Individ	luazione delle specie target	81
		6.3.1	Trota Fario (Salmo Trutta)	82
		6.3.2	Trota Marmorata (Salmo Marmoratus)	82
		6.3.3	Vairone ( <i>Telestes muticellus</i> )	83
		6.3.4	Scazzone (Cottus gobio)	84
	6.4	Definiz	cione dei dati idro-morfologici puntuali all'interno delle UMI	85
	6.5	Verific profon	a della coerenza dei dati di distribuzione di velocità e dità simulate	87
	6.6	Risulta	ati del software	89
		6.6.1	Mappe di idoneità di habitat	89
		6.6.2	Habitat disponibile	92
		6.6.3	Verifica coerenza idoneità di habitat	93
		6.6.4	Curve Habitat-Portata	97
		6.6.5	Evoluzione habitat alle basse portate	.01
7	Con	clusior	${ m ni}$	05
Ri	ngra	ziamer	${ m nti}$	08
In	dice	dei Sir	nboli	.11
Bi	bliog	rafia		.11
Aj	ppen	dici: .		
A	Prin	ncipali	Unità Morfologiche Idrauliche di canale 1	17
в	Cod	lice pe	er la ricostruzione delle portate in condizioni di	
	rifer	rimento	o 1	.21
	B.1	Ricost	ruzione della portata naturale	.21

INDICE			

	B.2	Correzione della portata considerando gli interventi di manuten- zione
С	Vali CIN	dazione modello idrologico <i>CONTINUUM</i> - Fondazione IA127
D	Cal	colo del coefficiente di Manning
$\mathbf{E}$	Mo	delli di habitat per la fauna ittica
	E.1	Trota Fario (Salmo Trutta)
	E.2	Trota Marmorata (Salmo Marmoratus)
	E.3	Scazzone (Cottus Gobio)
	E.4	Vairone ( <i>Telestes Muticellus</i> )
$\mathbf{F}$	Defi	nizione del file di testo <i>MEAS</i> delle misure puntuali 135

# Elenco delle figure

2.1	Tappe del percorso di pianificazione del Piano di Gestione delle acque superficiali, come previsto all'interno della <i>Water Fra-</i> <i>mework Directive</i> ; il percorso viene aggiornato ogni sei anni ( <i>fonte sito MiTE ex MATTM: www.mite.gov.it</i> )	8
2.2	Distretti Idrografici presenti in Italia a partire dall'introduzione del D.Lgs. 152/2006, modificati con la Legge 221/2015 (fonte sito ISPRA: www.isprambiente.gov.it)	10
3.1	Input, fasi procedurali e output della metodologia <i>MesoHABSIM</i> , da [Vezza et al., 2017]	15
3.2	Estratto dell'approccio gerarchico descritto all'interno del M LG 132/2016 dalla scala di bacino alla scala di Unità morfologica [Rinaldi et al., 2016]	21
3.3	Schema successione delle UMI, lungo un corso d'acqua, da monte a valle [Vezza et al., 2017] [Halwas and Church, 2002])	22
3.4	Principali Unità Morfologiche idrauliche di canale in alvei allu- vionali ad elevata pendenza [Vezza et al., 2017]	23
4.1	Posizione della centrale idroelettrica di Quincinetto 2 (TO) e del- l'opera di presa (Pont-Saint-Martin, AO) ( <i>Elaborazione propria</i> <i>tramite</i> QGIS)	32
4.2	Posizione dell'idrometro di Tavagnasco, rispetto alla centrale e all'opera di presa di Quincinetto 2, in viola il confine tra Piemonte e Valle D'Aosta ( <i>Elaborazione propria tramite</i> QGIS) .	33
4.3	Confronto tra l'idrogramma delle portate della Dora Baltea (presso Quincinetto) della $Q_{Naturale}$ e la $Q_{Tavagnasco}$ per il triennio 2018-2020 ( <i>Elaborazione propria, tramite</i> MatLab)	34
4.4	Idrogramma delle portate della $Q_{Reference}$ , calcolata a mon- te della centrale di Quincinetto, confrontata con $Q_{Tavagnasco}$ e $Q_{Turb-DMV}$ (Elaborazione propria, tramite MatLab)	36

4.5	Confronto tra l'idrogramma delle portate della Dora Baltea (a monte dell'opera di presa della centrale di Quincinetto) della $Q_{Naturale}, Q_{Tavagnasco}$ e la $Q_{Reference}$ per il triennio 2018-2020 (Elaborazione propria, tramite MatLab)	37
4.6	Ortofoto rappresentante la posizione delle tre centrali utilizzate per la validazione del modello ( <i>Elaborazione propria tramite</i> QGIS)	39
4.7	Confronto tra la CDP con le portate simulate dal modello $CON-TINUUM$ e quelle registrate dagli idrometri per le centrali di Champagne 2 e Hône ( <i>Elaborazione propria tramite</i> MatLab)	41
4.8	Esempio di validazione del modello $CONTINUUM$ , in condizioni di piena $(Q > Q_{50})$ , presso le centrali di Champagne 2 e Hône 2 $(Elaborazione propria tramite MatLab) \ldots \ldots \ldots \ldots$	43
4.9	Esempio di validazione del modello <i>CONTINUUM</i> , in condizioni di magra ( $Q < Q_{50}$ ), presso le centrali di Champagne 2 e Hône 2 ( <i>Elaborazione propria tramite</i> MatLab)	44
5.1	Nell'immagine è rappresentata la posizione del tratto di Dora Baltea nei pressi di Nus sul quale è stata eseguita la modellazione 2D (in giallo). Inoltre sono state riportate le ortofoto rilevate per mezzo di droni durante la campagna di rilevamento di gennaio 2020 ( <i>Elaborazione propria tramite</i> QGIS)	47
5.2	Rilevamenti eseguiti con <i>RiverSurveyor M9</i> nel tratto di Dora Baltea nei pressi di Nus, interessato dallo studio ( <i>Elaborazione</i> <i>propria tramite</i> QGIS)	49
5.3	Esempio dei dati rilevati attraverso il battello all'interno del software <i>RiverSurveyor</i> ( <i>Elaborazione propria tramite</i> RiverSurveyor)	49
5.4	Geometria e Boundary Condition su cui è stato definito il modello idrodinamico su <i>HEC-RAS</i> ( <i>Elaborazione propria tramite</i> QGIS)	52
5.5	Le impostazioni di calcolo definite all'interno dell' <i>Unsteady Flow</i> <i>Analysis</i> : durata della simulazione, intervallo di tempo, time step e numero di Courant	53
5.6	Distribuzione di velocità e profondità, simulate con <i>HEC-RAS</i> per $Q = 6.2 m^3/s$ e <i>Coefficiente di Manning 0.040 (Elaborazione</i> propria tramite QGIS)	54
5.7	Validazione dei dati di profondità simulata per la verifica della portata presente in alveo al momento del rilievo ( <i>Elaborazione propria tramite</i> MatLab)	56
5.8	Validazione dei dati di velocità simulata per la verifica della portata presente in alveo al momento del rilievo ( <i>Elaborazione propria tramite</i> MatLab)	57

5.9	Validazione dei dati di profondità simulata per la definizione della portata del coefficiente di Manning della Dora Baltea nel tratto di Nus ( <i>Elaborazione propria tramite</i> MatLab)	60
5.10	Validazione dei dati di velocità simulata per la definizione del coefficiente di Manning della Dora Baltea nel tratto di Nus ( <i>Elaborazione propria tramite</i> MatLab)	61
5.11	Zoom sul profilo del transetto rilevato per la misura della portata ( <i>Elaborazione propria tramite</i> RiverSurveyor)	62
5.12	Distribuzione delle profondità e velocità simulate per portata $3.8m^3/s$ e coefficiente di Manning 0.041 <i>(Elaborazione propria tramite</i> QGIS)	65
5.13	Distribuzione delle profondità e velocità simulate per portata $6.2m^3/s$ e coefficiente di Manning 0.041 <i>(Elaborazione propria tramite</i> QGIS)	66
5.14	Distribuzione delle profondità e velocità simulate per portata $10m^3/s$ e coefficiente di Manning 0.041 <i>(Elaborazione propria tramite</i> QGIS)	67
5.15	Distribuzione delle profondità e velocità simulate per portata $20m^3/s$ e coefficiente di Manning 0.041 <i>(Elaborazione propria tramite</i> QGIS)	68
5.16	Distribuzione delle profondità e velocità simulate per portata $50m^3/s$ e coefficiente di Manning 0.041 <i>(Elaborazione propria tramite</i> QGIS)	69
5.17	Distribuzione delle profondità e velocità simulate per portata $75m^3/s$ e coefficiente di Manning 0.041 <i>(Elaborazione propria tramite</i> QGIS)	70
6.1	UMI definite per l'area bagnata ottenuta con una portata di $6.2 m^3/s$ ( <i>Elaborazione Propria tramite</i> QGIS)	73
6.2	UMI definite per l'area bagnata ottenuta con una portata di $3.8 m^3/s$ ( <i>Elaborazione Propria tramite</i> QGIS)	74
6.3	UMI definite per l'area bagnata ottenuta con una portata di $10 m^3/s$ ( <i>Elaborazione Propria tramite</i> QGIS)	75
6.4	UMI definite per l'area bagnata ottenuta con una portata di $20 m^3/s$ ( <i>Elaborazione Propria tramite</i> QGIS)	76
6.5	UMI definite per l'area bagnata ottenuta con una portata di $50 m^3/s$ ( <i>Elaborazione Propria tramite</i> QGIS)	77
6.6	UMI definite per l'area bagnata ottenuta con una portata di $75 m^3/s$ ( <i>Elaborazione Propria tramite</i> QGIS)	78
6.7	Distribuzione dei punti per i quali sono state definite le classi di substrato ( <i>Elaborazione propria tramite</i> QGIS)	80

#### ELENCO DELLE FIGURE

6.8	Esemplare di Trota Fario (Salmo Trutta) allo stato vitale adulto (Fonte: Associazione sportiva pescatori solandri, Web)	82
6.9	Esemplare di Trota Marmorata (Salmo Marmoratus) a diversi stati vitali (Fonte: Associazione sportiva pescatori solandri, Web)	83
6.10	Esemplare di Vairone ( <i>Telestes muticellus</i> ) allo stato vitale adulto ( <i>S. Porcellotti, Web</i> )	83
6.11	Esemplari di Scazzone ( <i>Cottus gobio</i> ) allo stato vitale adulto ( <i>Hans Hillewaert, Wikipedia</i> )	84
6.12	Istogrammi di distribuzione delle classi di profondità, velocità e substrato, individuati all'interno dell'UMI numero 15 per la portata di $6.2 m^3/s$ (Elaborazione propria con lo strumento Zonal Histogram di ArcMap)	86
6.13	Distribuzione cumulate di frequenza delle classi di profondità ( <i>Elaborazione propria tramite</i> MatLab)	87
6.14	Distribuzione cumulate di frequenza delle classi di velocità ( <i>Elaborazione propria tramite</i> MatLab)	88
6.15	Distribuzione di idoneità di habitat per il Vairone ( <i>Telestes Muticellus</i> ) allo stato vitale adulto ( <i>Elaborazione propria tramite</i> QGIS)	90
6.16	Distribuzione di idoneità di habitat per il Vairone ( <i>Telestes Muticellus</i> ) allo stato vitale giovane ( <i>Elaborazione propria tramite</i> QGIS)	91
6.17	Numerazione delle UMI definite per l'area bagnata ottenuta con una portata di $6.2m^3/s~(Elaborazione~Propria~tramite~QGIS)$	93
6.18	Curve Habitat-Portata calcolate nel tratto a valle della presa di Nus per le quattro specie target selezionate: <i>Salmo Trutta</i> , <i>Telestes Muticellus</i> e <i>Salmo Marmoratus</i> (stato vitale adulto e giovane) e <i>Cottus Gobio</i> (stato vitale adulto),	97
6.19	Curve Habitat-Portata calcolate nel tratto a valle della presa di Nus per tre specie target: Salmo Trutta e Salmo Marmora- tus (stato vitale adulto e giovane) e Cottus Gobio (stato vitale adulto), in condizioni di bassa portata ( $Q < 10 m^3/s$ )	101
6.20	Distribuzione di idoneità di habitat per lo Scazzone ( <i>Cottus Gobio</i> ) allo stato vitale adulto per portata compresa tra 3.8 e 10 $m^3/s$ ( <i>Elaborazione propria tramite</i> QGIS)	103
6.21	Distribuzione di idoneità di habitat per la Trota Fario (Salmo Trutta) allo stato vitale adulto per portata compresa tra 3.8 e 10 $m^3/s$ (Elaborazione propria tramite QGIS)	104
E.1	Modello RF Presenza/Assenza della Trota Fario ( <i>Salmo Trutta</i> ) allo stato vitale adulto e giovane	132

E.2	Modello RF di Presenza/Assenza della Trota Marmorata (Salmo Marmoratus) allo stato vitale adulto
E.3	Modello RF Presenza/Assenza dello Scazzone ( <i>Cottus gobio</i> ) allo stato vitale adulto
E.4	Modello RF di Presenza/Assenza del Vairone ( <i>Telestes muticel-</i> <i>lus</i> ) allo stato vitale adulto e giovane

# Elenco delle tabelle

3.1	Strumentazione consigliata per il rilievo idromorfologico, proposta all'interno del Manuale LG ISPRA 154/2017 [Vezza et al., 2017]	16
3.2	Classi di integrità di habitat suddivise secondo l'indice <i>IH</i> [Vezza et al., 2017]	20
4.1	Caratteristiche tecniche della centrale idroelettrica di Quincinet- to 2 [Compagnia Valdostana delle Acque, 2001]	32
4.2	Caratteristiche tecniche delle centrali idroelettriche su cui è stata eseguita la validazione del modello CONTINUUM (Fonte sito del gruppo C.V.A. S.p.A. [Compagnia Valdostana delle Acque, 2001])	40
4.3	Portate di magra $(Q_{74}, Q_{97})$ nei cinque punti di validazione considerati, ottenute sia dalle portate simulate dal modello sia rilevate dagli idrometri $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	42
4.4	Indici di performance per $Q > Q_{50}$ nei cinque punti di validazione	43
4.5	Indici di performance per $Q < Q_{50}$ nei cinque punti di validazione	44
5.1	Indici di performance ottenuti per la validazione della portata al momento del rilievo batimetrico	57
5.2	Indici di performance ottenuti per la validazione del coefficiente di Manning del tratto di Dora Baltea nei pressi di Nus	59
5.3	Calcolo del coefficiente di Manning	62
6.1	Habitat totale disponibile per <i>S. Trutta</i> e <i>S. Marmoratus</i> allo stato vitale adulto e giovane alle diverse condizioni di portata considerata, espresso in $m^2$ e in percentuale sull'area totale	92
6.2	Habitat totale disponibile per <i>Telestes Muticellus</i> allo stato vitale adulto e giovane e <i>Cottus gobio</i> allo stato vitale adulto alle diverse condizioni di portata considerata, espresso in $m^2$ e in percentuale sull'area totale	92

6.4	Probabilità di presenza calcolata dal modello biologico per la Trota Marmorata ( <i>Salmo Marmoratus</i> ) per la <i>Glide</i> numero 14 .	95
6.5	Probabilità di presenza calcolata dal modello biologico per la Trota Fario ( <i>Salmo Trutta</i> ) per la <i>Pool</i> numero 13	96
6.6	Probabilità di presenza calcolata dal modello biologico per la Trota Fario ( <i>Salmo Trutta</i> ) per la <i>Glide</i> numero 14	96
A.1	Descrizione delle principali Unità Morfologiche Idrauliche per alvei ad elevata pendenza tipici del contesto alpino e appenninico italiano [Rinaldi et al., 2016]	117

## Estratto

Al fine di individuare i Deflussi Ecologici (DE) da rilasciare nei tratti sottesi alle derivazioni idroelettriche del gruppo C.V.A. S.p.A., è nata una sperimentazione con il Politecnico di Torino che prevede l'applicazione della metodologia *MesoHABSIM* (MesoHABitat SIMulation model), come descritto all'interno del Manuale LG ISPRA 154/20017.

Nel presente elaborato è stata analizzato il caso studio relativo al tratto sotteso all'opera di presa sulla Dora Baltea, nei pressi di Nus (AO), della centrale idroelettrica di Saint-Clair. In particolare, la metodologia *MesoHABSIM* è stata applicata in un sottotratto idromorfologicamente omogeneo al fine di quantificare la variazione spazio-temporale dell'habitat fluviale, potendo così stabilire l'alterazione indotta dalla presenza di tale derivazione.

Ulteriormente, si è condotta un'analisi idrologica per ricostruire la portata liquida naturale della Dora Baltea in arrivo alla presa della centrale idroelettrica di Quincinetto (TO). In particolare, considerando le portate registrate da un idrometro posto poco a valle della presa (Tavagnasco, TO) e conoscendo l'acqua turbinata dalla centrale, è stato possibile ricostruire la serie giornaliera di portate naturali in arrivo alla sezione di Quincinetto.

Per quanto riguarda il caso studio della Dora Baltea a Nus, per ovviare alla difficoltà che possono incontrare gli operatori ad eseguire il rilievo in campo in condizioni di deflusso elevate, si è seguita una procedura che prevede un solo rilievo idro-morfologico attraverso aerei a pilotaggio remoto APR.

Successivamente, utilizzando il software *HEC-RAS*, è stato possibile costruire un modello idrodinamico bidimensionale che ha permesso di simulare le condizioni idrodinamiche (profondità e velocità) a diverse condizioni di portata. Nota la portata presente in alveo al momento del rilievo idro-morfologico, è stato possibile determinare il coefficiente di Manning caratteristico del tratto in esame e validare il modello utilizzando i dati di profondità e velocità misurati durante il rilievo.

A partire dalla distribuzione spaziale di velocità e profondità simulati e dalle ortofoto rilevate, è stato possibile individuare le Unità Idro-morfologiche

(UMI), il substrato e la presenza di zone rifugio, nel tratto in esame a diverse condizioni di portata.

A questo punto, è stato possibile generare le curve di Habitat-Portata per diverse specie target ritenute significative. Nel caso in esame sono state selezionate *Salmo Trutta, Salmo Marmoratus* e *Telestes Multicellus* (stato vitale giovane e adulto) e *Cottus Gobio* (stato vitale adulto).

Tutte le curve così ottenute mostrano, all'aumentare della portata, una crescita di habitat disponibile e un successivo calo. Per le curve di *Telestes Multicellus, Cottus Gobio* e lo stato giovanile della trota si nota un massimo ben definito per portata inferiore ai 10  $m^3/s$ . In entrambe le trote allo stato vitale adulto si osserva il massimo di idoneità a portata di 50  $m^3/s$ .

In conclusione, il modello costruito si è dimostrato sufficiente robusto per simulare efficacemente le condizioni di habitat per diverse specie, sia allo stato vitale giovane sia adulto, su un range di portate molto ampio, che va da  $3.8 \text{ a } 75 \text{ } m^3/s.$ 

## Abstract

In order to identify the Environmental Flows (E-Flow) to be released in the sections underlying the hydroelectric derivations of C.V.A.~S.p.A. group, a collaboration project carried out with the Polytechnic of Torino which involves the application of the *MesoHABSIM* methodology (MesoHABitat SIMulation model), as described in Manual LG ISPRA 154/20017.

In this thesis the case study relating to the section underlying the water intake structure on the Dora Baltea, near Nus (AO), of the Saint Clair hydroelectric power plant has been analysed. In particular, the *MesoHABSIM* methodology was applied in a hydro-morphologically homogeneous sub-section to quantify the space-time variation of the river habitat, thus being able to establish the alteration induced by the presence of this derivation.

Furthermore, a hydrological analysis was conducted to reconstruct the natural liquid flow rate of the Dora Baltea arriving at the outlet of Quincinetto (TO) hydroelectric power plant. Considering the flow rates recorded by a hydrometer located just downstream of the outlet (Tavagnasco, TO) and knowing the water spined by the plant, it was possible to reconstruct the daily series of natural flows arriving at Quincinetto section.

Regarding the case study of the Dora Baltea in Nus, to overcome the difficulty that operators may encounter in performing the survey in the field under high flow conditions, was followed a procedure that provides a single hydro-morphological survey through APR remotely piloted aircraft.

Subsequently, using *HEC-RAS* software, it was possible to build a twodimensional hydrodynamic model that made possible to simulate hydrodynamic conditions (depth and speed) at different flow conditions. Known the flow rate present in the riverbed at the time of the hydro-morphological survey, it was possible to determine the Manning coefficient of the section under examination and validate the model using the depth and speed data measured during the survey.

Starting from the spatial distribution of simulated speed and depth and the orthophotos detected, it was possible to identify the Hydro-morphological Units (HMU), the substrate and the presence of refuge areas, in the section under examination at different flow conditions.

At this point, it was possible to generate the Habitat-Flow curves for the target species considered significant. In the present case, were selected *Salmo Trutta*, *Salmo Marmoratus* and *Telestes Multicellus* (juvenile and adult life stage) and *Cottus Gobio* (adult life stage).

All the curves obtained show, as the flow rate increases, a growth of available habitat and a subsequent decrease. For the curves of *Telestes Multicellus*, *Cottus Gobio* and the juvenile life stage of the trout is noted a well-defined maximum for flow rate lower than 10  $m^3/s$ . In both trout in the adult life stage, the maximum suitability is observed at a capacity of 50  $m^3/s$ .

In conclusion, the constructed model proved to be sufficiently robust to effectively simulate habitat conditions for distinct species, both in the juvenile and adult life stage, over a very wide range of flow rates, ranging from 3.8 to 75 m3/s.

## 1 Introduzione

Fiumi e torrenti sono una risorsa fondamentale per la vita sia dell'uomo, che della flora e fauna. Forniscono acqua necessaria per l'agricoltura, l'industria, l'uso umano e la produzione di energia. Costituiscono inoltre degli habitat estremamente importanti sia per specie acquatiche, sia per organismi che vivono nella fascia riparia (piante, uccelli, anfibi, ecc...).

A causa della crescente richiesta di acqua da parte delle attività umane e dei cambiamenti climatici (aumento delle temperature e cambiamento nelle precipitazioni), gli habitat fluviali sono messi sempre più sotto pressione. Per questo motivo, si nota un alterazione del naturale regime idrologico del corso d'acqua che mette a rischio la vita della flora e fauna acquatica [Poff and Zimmerman, 2010].

Il presente lavoro di tesi rientra all'interno del progetto di ricerca relativo alla quantificazione della risorsa idrica e la definizione di possibili azioni per una gestione sostenibile dell'idroelettrico in Valle D'Aosta.

Il progetto costituisce una sperimentazione in collaborazione tra il *Politecnico di Torino* e il gruppo *C.V.A. S.p.A.* (Compagnia Valdostana delle Acque), il cui scopo è quello di definire i Deflussi Ecologici nei tratti sottesi alle derivazioni del gruppo per garantire i servizi eco-sistemici nei corsi d'acqua.

Al fine di rispettare al meglio le necessità di flora e fauna che vivono nella fascia riparia, le misure di mitigazione, previste dalla legislazione italiana ed europea, si sono evolute negli ultimi decenni:

- Il primo concetto introdotto è stato il **Deflusso Minimo Vitale** (**DMV**), definito come una portata costante per tutto l'anno che deve rilasciata nel corso d'acqua a valle di un'opera di presa (Legge n. 183 del 15/5/1989: vedasi capitolo 2.1);
- Al fine di soddisfare gli obiettivi della *Water Framework Directive* (Direttiva 2000/60/CE, [European Commision, 2000]), a inizio anni duemila, viene definito il **Deflusso Ecologico** (*DE*). Il DMV non è più considerato un valore costante lungo tutto l'anno, ma varia in funzione delle

necessità degli esseri viventi. Come descritto in [Poff et al., 1997], viene introdotto "*Il paradigma del flusso naturale*", secondo cui il **DE** varia in magnitudo, frequenza e stagionalità seguendo le naturali oscillazioni del regime idrologico (vedasi capitolo 2).

La corretta gestione del flusso d'acqua presente in un fiume risulta di capitale importanza per il funzionamento degli ecosistemi acquatici. Infatti, il regime idrologico dei fiumi influisce su diversi livelli: fiumi, laghi, zone umide e acque sotterranee, agendo su qualità dell'acqua, temperatura, ciclo dei nutrienti, disponibilità di ossigeno e processi geomorfologici che modellano i canali fluviali e le pianure alluvionali. [Poff et al., 1997]

Al fine di determinare l'impatto che il prelievo idrico produce su l'ecosistema fluviale è necessario definire il regime idrologico prima e dopo l'introduzione della derivazione. In questa maniera è possibile quantificare l'eventuale variazione dell'habitat disponibile per le specie di interesse. [Poff and Zimmerman, 2010]

Tuttavia, per poter valutare gli impatti che le derivazioni hanno sugli ecosistemi acquatici, è necessario avere una serie storica di portate di durata statisticamente significativa. In letteratura è riportata una durata minima di 15 anni. Per questo motivo è stato necessario condurre un'analisi idrologica al fine di determinare la portata liquida naturale presente a monte dell'opera di presa.

In particolare, si è eseguita una ricostruzione della portata liquida naturale presente a monte dell'opera di presa della centrale di Quincinetto, TO (vedasi capitolo 4.2). Per farlo si sono considerate:

- le portate misurate da un idrometro posto poco a valle della presa, nei pressi di Tavagnasco (TO);
- l'acqua turbinata dalla centrale;
- il Deflusso Minimo Vitale rilasciato a valle dell'opera di presa;
- la massima portata turbinabile prevista dalla concessione idroelettrica.

Ulteriormente, si è verificata la coerenza delle portate simulate dal modello regionale Afflussi-Deflussi *CONTINUUM*, sviluppato dalla Fondazione CIMA (vedasi capitolo 4.3). A tal fine, si è eseguita una validazione delle portate simulate nei pressi di alcuni idrometri installati nel reticolo idrografico della regione Valle D'Aosta.

Dopo aver definito il regime di flusso naturalmente presente nel corso d'acqua, è possibile applicare la metodologia *MesoHABSIM* (MesoHABitat SIMulation model) sviluppata da Piotr Paraziewicz tra il 2001 e il 2007 [Parasiewicz, 2001]; [Parasiewicz, 2007]; [Parasiewicz et al., 2013]. In questa maniera è possibile quantificare la variazione spazio-temporale dell'habitat fluviale e stabilire l'alterazione indotta dalla presenza di derivazioni idroelettriche nel corso d'acqua.

In anni più recenti la metodologia è stata applicata con successo anche al contesto italiano dal Politecnico di Torino (vedasi [Vezza et al., 2014] e [Vezza et al., 2012]). La ricerca ha inoltre portato alla stesura nel 2017,da parte dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), del "Manuale tecnico-operativo per la modellazione e la valutazione dell'integrità fluviale - 154/2017". [Vezza et al., 2017]

Per questo motivo, oggi MesoHABSIM rappresenta la metodologia di riferimento per la modellazione dell'habitat fluviale e la definizione del **Deflusso Ecologico** (DE) in ambito italiano.

## 2 Contesto normativo

A partire dai primi anni duemila, con l'introduzione della *Water Framework Directive* (Direttiva 2000/60/CE, [European Commision, 2000]), la valutazione e la gestione della risorsa idrica sono entrate a far parte della legislazione europea. Lo scopo della Direttiva è quello di rendere omogenea la gestione della risorsa idrica tra i vari Stati membri.

A tal fine risulta di capitale importanza l'introduzione del concetto di **bacino idrografico** (o **imbrifero**):

"Una formazione geografica naturale che copre l'intero sistema fluviale, dalle sorgenti (compresi gli affluenti più piccoli) fino alla foce, comprese le acque sotterranee."

Poiché si tratta di formazioni naturali, i bacini idrografici non si fermano ai confini nazionali. Risulta, quindi, necessario costituire un coordinamento europeo tra i vari Stati per garantire omogeneità di gestione dei corsi d'acqua dalla sorgente sino alla foce.

Attraverso il monitoraggio di parametri chimici, fisici, biologici e idromorfologici, vengono definite le linee guida atte a prevenire il deterioramento qualitativo e quantitativo, migliorare lo stato delle acque e assicurare un utilizzo sostenibile, basato sulla protezione a lungo termine delle risorse idriche disponibili. Inoltre, grazie al monitoraggi, è possibile classificare lo stato ecologico delle acque superficiali in cinque categorie: *elevato*, *buono*, *sufficiente*, *scarso* e *cattivo*.

L'attuazione della Direttiva è stata preceduta da un attività preparatoria, a carico degli Stati membri, necessaria per il successivo raggiungimento degli obiettivi previsti in ogni ciclo sessennale:

- Definizione geografica dei distretti idrografici e identificazione delle autorità competenti (da concludere entro fine 2003);
- Analisi economica ed ambientale congiunta (da concludere entro fine 2004);
- Elaborazione dei Piani di Gestione dei Bacini Idrografici (River Basin Managment Plans: *RBMPs*) e dei programmi contenenti le misure atte a raggiungere gli obiettivi della Direttiva (da concludere entro fine 2009);

#### CAPITOLO 2. CONTESTO NORMATIVO

• Adozione delle politiche di tariffazione dei servizi idrici (da concludere entro fine 2010).

Il primo ciclo sessennale (2009 - 2015) prevedeva il raggiungimento di un obiettivo ambizioso: tutti i bacini idrografici dovevano raggiungere lo stato ecologico "**Buono**" (*Good Enviromental Status*: **GES**). Affinché ciò sia possibile, gli Stati membri devono collaborare per intraprendere una politica comune di monitoraggio e miglioramento dello stato ecologico, applicando un approccio olistico alla protezione dell'intero corpo idrico: dalle sorgenti, agli affluenti fino a raggiungere la foce. [European Commision, 2014]

A causa delle difficoltà riscontrate dagli Stati membri nel raggiungimento del **GES** entro il 31 Dicembre 2015, la Commissione Europea ha redatto "*Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive -Guidance Document No. 31*" [European Commision, 2015]. Il cui scopo è quello di fornire una visione condivisa dell'importanza dell'utilizzo dei Deflussi Ecologici all'interno dei **River Basin Managment Plans (RBMPs)**.

La Guida è stato sviluppata, in collaborazione con gli Stati membri, raccogliendo raccomandazioni e suggerimenti, emersi durante il primo ciclo. Lo scopo è quello di fornire strumenti e suggerimenti per la definizione e l'adozione dei successivi River Basin Managment Plans (periodo 2015-2021).

Nel documento è riportata una prima definizione di **Deflusso Ecologico** (**DE**), che sottolinea l'importanza della corretta gestione delle risorsa idrica, al fine di garantire il rispetto degli obiettivi presenti all'interno *Water Framework Directive*:

"Con il termine Deflusso Ecologico si definisce un regime idrologico coerente con il raggiungimento degli obiettivi ambientali della WFD nei corpi idrici naturali superficiali, come scritto all'articolo  $4(1)^1$ :

- Non deterioramento dello status esistente;
- Raggiungimento di un buono stato ecologico per tutti i corpi idrici superficiali;
- Rispetto delle norme e degli obiettivi per le zone protette, in particolar modo per quelle in cui il mantenimento o miglioramento dello stato ecologico dell'acqua è un fattore importante per la loro protezione, compresi i siti Natura 2000 designati nell'ambito Direttive Uccelli [European Commision, 2009] e Habitat [European Commision, 1992]. (BHD)"

Si nota come il concetto di *Deflusso Ecologico* si differenzia notevolmente da quello di *Deflusso Minino Vitale*. Infatti, all'interno dei corsi d'acqua deve essere garantita una portata, che non sia solo un flusso minimo costante per tutto l'anno, ma sia tale da rispettare le variazioni annuali dei bisogni biologici di flora e fauna. A tal fine, si rimanda alle Direttive *WFD*<sup>2</sup> e *BHD*<sup>3</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>[European Commission, 2000, Art. 4(1)]

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Water Framework Directive: [European Commission, 2000]

 $<sup>^3\</sup>mathrm{Bird}$  and Habitat Directive: [European Commision, 2009] e [European Commision, 1992]

Il Deflusso Ecologico viene quindi identificato come la portata alla quale si misura la maggior quantità di **habitat disponibile** (valutato in  $m^2$ ) per le specie naturalmente presenti nel corso d'acqua.

Inoltre, la *Guida Europea No. 31* individua nell'applicazione di modelli per la simulazione dell'habitat fluviale (vedasi capitolo 3) lo strumento ideale per valutare la variazione dell'habitat disponibile in funzione della portata.

Tuttavia, è importante tenere presente che, per essere consistenti con gli obietti della WFD<sup>4</sup>, la definizione del Deflusso Ecologico risulta legata solo alle esigenze di flora e fauna presenti nella fascia riparia e non tiene presente eventuali impatti socio-economici. Per questo motivo, sarebbe necessario un riconoscimento di una nuova definizione, che tenga presente anche gli aspetti socio-economici legati alla gestione del corso d'acqua.

Gli Stati membri sono tenuti a tenere presenti le considerazioni raccolte all'interno della *Guida Europea No. 31* per redigere i Piani di Gestione dei Bacini idrografici per il secondo ciclo previsto dalla *WFD* (2015-2021).

Nel capitolo successivo si andrà ad analizzare la situazione legislativa italiana in materia di gestione delle acque.

### 2.1 Contesto normativo italiano

Il tema della gestione della risorsa idrica è stato affrontato nella legislazione italiana a partire dalla fine degli anni '80. In particolar modo, la **Legge n. 183 del 15/5/1989** introduce il concetto di *Deflusso Minimo Vitale (DMV)*, che tuttavia non viene ancora definito con precisione.

Bisogna aspettare altri cinque anni per trovare una definizione più accurata di DMV. Con l'introduzione della *Legge Galli* (Legge 5 gennaio 1994, n.36) si definisce il DMV per i bacini idrografici caratterizzati da prelievi per uso antropico:

"Nei bacini idrografici caratterizzati da consistenti prelievi o trasferimenti [...] le derivazioni sono regolate in modo da garantire il livello di deflusso necessario alla vita negli alvei sottesi e tale da non danneggiare gli equilibri degli ecosistemi interessati."

Nel 1999 si introducono in Italia i Piani di tutela dei bacini idrografici. In particolar modo, all'articolo 22 del **Decreto Legislativo n. 152/99** (Tutela quantitativa della risorsa e risparmio idrico) si afferma:

"Nei piani di tutela dei bacini idrografici sono adottate le misure volte ad assicurare l'equilibrio del bilancio idrico come definito dall'Autorità di bacino, nel rispetto delle priorità della legge 5 gennaio 1994, n. 36, e tenendo conto dei fabbisogni, delle disponibilità, del minimo deflusso

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Vedasi [European Commission, 2000, Art. 4(1)]

vitale, della capacità di ravvenamento della falda e delle destinazioni d'uso della risorsa compatibili con le relative caratteristiche qualitative e quantitative."

Per poter attuare il decreto è necessario aspettare che il Ministro dei Lavori Pubblici, in concerto con gli altri ministri competenti e previa intesa con la Conferenza Stato - Regioni, definisca le linee guida per la predisposizione del bilancio idrico di bacino idonee alla definizione del Deflusso Minimo Vitale.

Sarà necessario aspettare cinque anni affinché le linee guida vengano pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale n.268 del 15/11/2004. Grazie al **Decreto 28** luglio 2004 del Ministero dell'Ambiente viene finalmente data attuazione al *D. Lgs. 152/99.* In particolar modo, all'Allegato 1, al punto 7 si trova la definizione di DMV tuttora in vigore, la cui corretta applicazione è lo scopo di questo elaborato:

"La portata istantanea da determinare in ogni tratto omogeneo del corso d'acqua, che deve garantire la salvaguardia delle caratteristiche fisiche del corpo idrico, chimico-fisiche delle acque nonché il mantenimento delle biocenosi tipiche delle condizioni naturali locali."





Con l'introduzione dell'Articolo 64 del **Decreto Legislativo n. 152/2006**, l'Italia ha introdotto il concetto di **River Basin Managment Plans** (**RBMPs**), recependo quanto previsto all'interno della *Water Framework Directive* (Direttiva 2000/60/CE, [European Commision, 2000]).

In immagine 2.1 è rappresentato il percorso di pianificazione, previsto dal ex Ministero dell'Ambiente, per la definizione dei piani di Gestione dei Corpi idrici superficiali italiani. Ad esclusione dell'individuazione dei corpi idrici superficiali, il piano viene ripetuto per ogni ciclo di pianificazione della durata di sei anni:

- Analisi dei Determinanti, delle Pressioni e degli Impatti (DPSIR);
- Individuazione degli obiettivi di qualità;
- Definizione del programma e delle misure;
- Monitoraggio dello Stato dei Corpi idrici superficiali, sui risultati ottenuti si procede ad eseguire la nuova analisi *DPSIR*, e si inizia un nuovo ciclo di pianificazione della durata di sei anni.

Per il primo ciclo di gestione (2009-2015), il territorio nazionale viene suddiviso in otto distretti idrografici, per ognuno dei quali si prevede la redazione di un piano di gestione, la cui competenza è attribuita alle Autorità di distretto idrografico:

- 1. **Distretto del Serchio**, è costituito dal bacino del fiume Serchio, costituisce un distretto pilota che, a partire dal 2017, ricadrà all'interno del Distretto dell'Appenino settentrionale;
- 2. *Distretto Padano*, è costituito dal bacino del Po;
- Distretto delle Alpi orientali, è costituito dai bacini di: Adige, Alto adriatico, Lemene, Fissaro Tartaro Canalbianco, Bacini regionali del Veneto e del Friuli-Venezia Giulia, Bacino scolante nella Laguna di Venezia (ex lege 29 novembre 1984 n.798);
- 4. **Distretto dell'Appennino settentrionale**, è costituito dai bacini di: Arno, Magra, Fiora, Conca Marecchia, Reno, Bacini della liguria, Bacini della Toscana, Fiumi uniti: Montone, Ronco, Savio, Rubicone e Uso, Foglia, Arzilla, Metauro, Cesano, Misa, Esimo, Musone e altri bacini minori, Lamone, Bacini minori afferenti alla costa Romagnola;
- 5. **Distretto dell'Appennino centrale**, è costituito dai bacini di: Tevere, Tronto, Sangro, Bacini dell'Abruzzo, Bacini del Lazio, Potenza, Chienti, Tenna, Ete, Aso, Menocchia, Tesino e bacini minori della Marche;
- Distretto dell'Appennino meridionale, è costituito dai bacini di: Liri Garigliano, Volturno, Sele, Sinni e Noce, Bradano, Saccione, Fortore e Biferno, Ofanto, Lao, Trigno, Bacini della Campania, Bacini della Puglia, Bacini della Basilicata, Bacini della Calabria, Bacini del Molise;
- 7. *Distretto della Sicilia*, è costituito dai Bacini della Sicilia;
- 8. *Distretto della Sardegna*, è costituito dai Bacini della Sardegna.

#### CAPITOLO 2. CONTESTO NORMATIVO

Con l'inizio del secondo ciclo di gestione (2015-2021), la **Legge n. 221 del 28 dicembre 2015** introduce un nuovo assetto territoriale con una riduzione dei distretti da otto a sette e una diversa distribuzione di alcuni bacini regionali e interregionali lungo la costa adriatica tra Veneto, Emilia Romagna e Marche.



**Figura 2.2:** Distretti Idrografici presenti in Italia a partire dall'introduzione del D.Lgs. 152/2006, modificati con la Legge 221/2015 (*fonte sito ISPRA: www.isprambiente.gov.it*)

In figura 2.2 è possibile confrontare l'assetto dei Distretti idrografici del territorio italiano: prima (figura 2.2a) e dopo (figura 2.2b) l'introduzione della *Legge 221/2015*. Si può notare che il *Distretto dell'Appennino Settentrionale* è quello che ha subito le variazioni maggiori: a partire dal 2015, i bacini idrografici sfocianti nel mare Adriatico sono stati suddivisi tra il *Distretto* 

Padano e Distretto dell'Appennino centrale.

# 3 Modellazione dell'habitat fluviale

I corsi d'acqua sono costituiti da numerose componenti, sia biotiche sia abiotiche, che interagiscono a diverse scale spaziali e temporali. Negli ultimi anni sono stati introdotti metodi di analisi dei sistemi fluviali, basati su un approccio gerarchico multi-scala, in cui si individuano una serie di sotto-sistemi organizzati in modo che i livelli, spaziali o temporali, inferiori siano contenuti in quelli superiori. [Rinaldi et al., 2016]

La valutazione e la modellazione spazio-temporale dell'habitat fluviale risulta uno strumento particolarmente idoneo sia per il monitoraggio dello stato attuale sia per la predizione di scenari futuri, inserendosi perfettamente tra gli strumenti che possono essere utilizzati nell'ambito della "*Water Framework Directive*" [European Commision, 2000] e successive implementazioni ("*Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive -Guidance Document No. 31*" [European Commision, 2015]).

In letteratura i modelli di idoneità di habitat (Habitat Suitability Models - HSMs) presenti vengono classificati in base alla loro risoluzione spaziale e temporale. In particolar modo, i modelli maggiormente utilizzati si dividono in due livelli:

- A livello di **micro-scala**, si trova la metodologia *PHABSIM* (vedasi capitolo 3.1), dove la distribuzione delle singole unità è definita in base a variabili idrauliche. [Bovee et al., 1998]
- A livello di **meso-scala**, si trova la metodologia *MesoHABSIM* (vedasi capitolo 3.2), dove la distribuzione delle singole unità è definita in base a variabili morfologiche. [Parasiewicz, 2001]; [Parasiewicz, 2007]

### 3.1 Metodologia PHABSIM

A partire dagli anni '70, è stata sviluppata la metodologia *PHABSIM* (Physical HABitat SIMulation model) [Bovee et al., 1998] che, applicando un approccio a micro-scala, permette la valutazione dello stato di salute degli habitat fluviali in fiumi a bassa o moderata pendenza.

Con il termine **micro-scala** si identificano elementi dell'ambiente fluviale, con scala spaziale compresa tra  $10^{-2}$  e  $10^1 m$  e scala temporale compresa tra  $10^0$ e  $10^1$  anni, comprendenti singoli individui o gruppi di particelle di sedimento, piante o legname. Le unità spaziali così descritte vengono solitamente chiamate unità sedimentarie o vegetazionali. [Rinaldi et al., 2016]

*PHABSIM* si basa su accurate misure delle condizioni fisiche del corso d'acqua, che permettono di andare a simulare come la variazione di portata presente in alveo influisca sugli habitat fluviali e la distribuzione delle specie.

Tuttavia, l'applicazione di questa metodologia presenta alcune criticità, specialmente nelle fasi iniziali di rilevamento dei dati necessari per la definizione e la validazione del modello:

- Per la corretta applicazione delle metodologia è necessario eseguire rilievi ad alta risoluzione del corso d'acqua di interesse;
- La distribuzione delle specie è definita in base ad un numero limitato di variabili idrauliche, quali profondità e velocità della corrente valutate in un punto specifico;
- Per la validazione del modello e l'applicazione a scale maggiori è necessario individuare "*siti rappresentativi*" ove rilevare i parametri fisici;
- *PHABSIM* ha dimostrato la sua efficacia per la modellazione di corsi d'acqua perenni a pendenza bassa o moderata, mentre si è dimostrato inadeguato per valutare lo stato dell'habitat fluviale di torrenti montani ad elevata pendenza. [Vezza et al., 2014]

Questi sono i motivi che, in anni più recenti, hanno suggerito l'utilizzo di un livello di meso-scala. In questo tipo di approccio la definizione di habitat disponibile, associata ad ogni unità spaziale, è determinata da un maggior numero di parametri.

## 3.2 Metodologia MesoHABSIM

Oggigiorno, l'approccio maggiormente utilizzato è la metodologia *Meso-HABSIM* (MesoHABitat SIMulation model), sviluppata da Piotr Paraziewicz tra il 2001 e il 2007 ([Parasiewicz, 2001]; [Parasiewicz, 2007]. In anni più recenti è stata applicata anche al contesto italiano dal Politecnico di Torino [Vezza et al., 2012]; [Vezza et al., 2014]; [Vezza et al., 2017] (vedasi capitolo 3.2.1).

L'approccio a **meso-scala** si concentra sull'analisi di forme fluviali create da erosione o deposizione di sedimenti spesso in associazione con vegetazione. Le unità spaziali così descritte vengono classificate in base alla scala spaziale e temporale:

- Unità morfologiche: caratterizzate da dimensioni comprese tra  $10^0$  e  $10^2 m$  e durata compresa tra  $10^{-2}$  e  $10^0$  anni;
- Unità idrauliche: caratterizzate da dimensioni comprese tra  $10^{-1}$  e  $10^1 m$  e durata compresa tra  $10^{-1}$  e  $10^1$  anni.

Grazie alla metodologia *MesoHABSIM* è possibile valutare gli habitat presenti nel fiume al variare della portata, simulare scenari di ripristino degli habitat fluviali e definire il DMV in base alle necessità delle specie, sia vegetali sia animali, presenti nel corso d'acqua. [Parasiewicz, 2001]

Nonostante la metodologia sia stata inizialmente sviluppata per i fiumi a bassa e moderata pendenza, *MesoHABSIM* si è mostrata idonea anche alla valutazione dello stato di salute degli habitat fluviali dei corsi d'acqua a carattere torrentizio ed elevata pendenza.

La ricerca svolta dal Politecnico di Torino ha evidenziato alcuni punti di forza per l'applicazione della metodologia *MesoHABSIM* per lo studio di fiumi e torrenti italiani :

- La raccolta dei dati è basata su una robusta struttura gerarchica di classificazione morfologica (vedasi il Manuale LG ISPRA 132/2016: "Sistema di rilevamento e classificazione delle Unità Morfologiche")
   [Rinaldi et al., 2016]
- L'impiego di una vasta gamma di variabili ambientali per la descrizione dell'habitat fluviale, permette un'analisi più esauriente dal punto di vista biologico sia della singola specie che della comunità, valutando l'interazione biotica tra gli organismi scelti come target. ([Vezza et al., 2014]; [Vezza et al., 2017])
- Poiché non è necessario l'utilizzo di modelli di simulazioni idraulica, *MesoHABSIM* possiede la flessibilità necessaria per l'applicazione anche in corsi d'acqua a regime torrentizio.

### 3.2.1 MesoHABSIM in Italia

A seguito di un attività di ricerca svolta dal Politecnico di Torino, la metodologia *MesoHABSIM* è stata applicata con successo al contesto italiano. Il primo studio è stato eseguito su piccoli bacini idraulici (superficie inferiore a  $50 \ km^2$ ) della regione Piemonte [Vezza et al., 2012]. Successivamente lo studio è stato allargato ai torrenti montani ad elevata pendenza presenti su Alpi e Appennini di Valle D'Aosta, Piemonte e Liguria [Vezza et al., 2014].

A seguito di questi primi studi, la metodologia si è dimostrata sufficientemente flessibile e strutturalmente adatta a rappresentare l'elevata variabilità dei corsi d'acqua delle montagne italiane, consentendo un'accurata valutazione della variazione dell'habitat disponibile sia dal punto di vista spaziale che temporale. Per questo motivo, nel 2017, ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) ha redatto il "Manuale tecnico-operativo per la modellazione e la valutazione dell'integrità fluviale - 154/2017" [Vezza et al., 2017], che costituisce il riferimento per la modellazione dell'habitat fluviale in ambito italiano..

Il manuale descrive, sia dal punto di vista metodologico che applicativo, l'utilizzo di *MesoHABSIM* descrivendo l'approccio teorico, il protocollo di raccolta dati, la descrizione dei software GIS per l'elaborazione degli stessi (vedasi capitolo 3.2.2).

La metodologia proposta risulta idonea alla valutazione e modellazione dell'habitat fluviale per:

- la quantificazione e modellazione del DMV;
- la definizione dei Deflussi Ecologici;
- il monitoraggio dei rilasci e dello svaso delle opere di presa;
- la progettazione e il monitoraggio di progetti di riqualificazione fluviale;
- la stima della vocazione ittica di un corso d'acqua;
- la conservazione di particolari specie protetta;
- il calcolo dell'Indice di integrità dell'Habitat fluviale (IH).

Valutando le particolari condizioni del contesto italiano, è stato proposto un adattamento alla metodologia proposta da Parasiewicz. In particolar modo, si è definita una procedura che permette la modellazione degli habitat fluviali anche dove le tecniche standard non risultano idonee:

- 1. La raccolta dei dati viene modificata per venire incontro alle condizioni particolari in cui si va a lavorare: non ci si può più limitare a identificare le UMI attraverso ortofoto o foto aeree [Parasiewicz, 2007], ma è necessaria anche un'accurata analisi in campo.
- 2. I modelli di habitat sono sviluppati su scala regionale, per risultare applicabili a diversi corsi d'acqua caratterizzati da diversa morfologia.
- 3. L'assenza di idrometri sui corsi d'acqua crea un problema per la definizione del regime idrologico. Sono state proposte delle procedure per simulare la portata in alveo e poter generare le serie temporali di habitat al variare del deflusso. Infatti, per poter identificare le condizioni di stress per le specie presenti nel corso d'acqua, è necessario avere serie idrologiche di durata statisticamente significativa: almeno 15 anni.

In conclusione, la metodologia MesoHABSIM è in grado di evidenziare le condizioni di stress a cui sono sottoposti gli organismi della fascia riparia,

anche per i corsi d'acqua ad elevata pendenza. In questa maniera è possibile definire una gestione del Deflusso Minimo Vitale che permetta un aumento di habitat disponibile in funzione delle necessità delle specie presenti:

- Il DMV rilasciato deve seguire il più possibile l'andamento naturale dell'idrogramma del corso d'acqua, garantendo sempre sufficiente disponibilità di habitat.
- La presenza di dighe può essere utile per la gestione di picchi causati da intense precipitazioni, andando ad immagazzinare acqua nel bacino e gestendo il rilascio a valle, in modo da garantire condizioni ottimali per l'habitat.

### 3.2.2 Manuale ISPRA 154/2017

Le fasi procedurali della metodologia *MesoHABSIM*, descritte nel "*Ma*nuale tecnico-operativo per la modellazione e la valutazione dell'integrità fluviale - 154/2017", possono essere sintetizzate in tre punti:

- descrizione dell'habitat tramite rilievo idromorofologico per le diverse condizioni di flusso;
- applicazione dei modelli biologici di idoneità di habitat;
- analisi storica delle variazioni spazio-temporali dell'habitat fluviale.



**Figura 3.1:** Input, fasi procedurali e output della metodologia *MesoHABSIM*, da [Vezza et al., 2017]

Le tre fasi descritte possono essere riassunte nel diagramma riportato in figura 3.1. Come si può notare, le prime due fasi sono propedeutiche all'analisi della variazione spazio temporale dell'habitat fluviale e quindi al calcolo dell'indice di Integrità dell'Habitat (IH).

Nei paragrafi che seguono si descrivono i principali passaggi della procedura, descritta nel Manuale LG ISPRA 154/2017 [Vezza et al., 2017], per l'applicazione della metodologia MesoHABSIM in ambito italiano.

#### Rilievo idromorfologico

La metodologia *MesoHABSIM* opera attraverso un approccio multi-scala, che prevede la mappatura a mosaico del mesohabitat, attraverso l'individuazione di unità morfologiche e sub-unità idrauliche (UMI), al fine di descrivere e quantificare la distribuzione di habitat disponibile per flora e fauna all'interno del corso d'acqua.

**Tabella 3.1:** Strumentazione consigliata per il rilievo idromorfologico, proposta all'interno del Manuale LG ISPRA 154/2017 [Vezza et al., 2017]

Strumentazione	Specifiche consigliate
Telemetro laser	Misura di distanze (errore $\leq 0.3 m$ ), azimuth (errore $\leq \pm 1^{\circ}$ ) e inclinazione (errore $\leq \pm 0.25^{\circ}$ ), con tecnologia Bluetooth
Computer palmare e tablet da campo	Computer di tipo "rugged", GPS integrato, SO Windows 10 e software GIS installato
Correntometro	Acustico, a elica o elettromagnetico, con sensibilità $\leq\pm2~\%$
Treppiede fotografico	Materiale: alluminio amagnetico
Bussola	_

Al fine di eseguire il rilevo idromorfologico in maniera agevole, anche in corsi d'acqua caratterizzati da difficoltà di accesso, si consiglia l'utilizzo di una strumentazione leggera (vedasi tabella 3.1) e la presenza di due tecnici esperti.

Inoltre, con lo scopo di aiutare i tecnici nella classificazione delle unità idromorfologiche, ISPRA ha redatto il manuale "Sistema di rilevamento e classificazione delle Unità Morfologiche dei corsi d'acqua (SUM) - 132/2016" [Rinaldi et al., 2016] (vedasi 3.2.2).

Durante il rilevamento idromorfologico, grazie all'utilizzo di attrezzature GPS e telemetro laser, si vanno ad individuare e rilevare le Unità Morfologiche Idrauliche (UMI) presenti. Ogni unità individuata viene poi caratterizzata da alcuni descrittori ambientali che permettano di valutare la variazione spaziotemporale dell'habitat fluviale, che si osserva per diverse condizioni di portata:

- 1. Data effettuazione rilievo e nome corso d'acqua;
- 2. Portata al momento del rilievo  $(m^3/s)$ ;
- 3. Codice o nome delle UMI che si rileva;
- 4. Pendenza media della superficie libera dell'UMI;
- Connettività longitudinale per il passaggio della fauna ittica (*presenza/assenza*);
- 6. Presenza di zone rifugio da stress fisici o predatori (*presenza/assenza*);
- 7. Distribuzione delle classi di substrato (*12 classi* in base al substrato presente nel tratto);
- 8. Distribuzione di frequenza della profondità dell'acqua, su almeno 15 osservazioni per ogni UMI ( $9 \ classi$ : intervalli di 15 cm fino a  $\geq 120 \ cm$ );
- 9. Distribuzione di frequenza della velocità della corrente, su almeno 15 osservazioni per ogni UMI (**9** classi: intervalli di 15 cm/s fino a  $\geq$  120 cm/s);
- 10. Valore medio del numero di Froude per la UMI.

I software GIS, comunemente installati sui computer palmari (*ArcPad* o *MapStream*), consentono agevolmente l'assegnazione di questi parametri all'interno della tabella attributi del layer "*poligono*" che rappresenta la geometria e la distribuzione spaziale dell'unità individuata.

Le misure di **profondità**, **velocità** e **substrato** vengono registrate come misure puntuali. Nel manuale si descrive come rilevare i punti in modo tale che siano significativi per descrivere ogni UMI:

- la distribuzione dei punti deve essere eseguita in modo casuale;
- il numero di punti raccolti deve essere proporzionale all'area dell'unità morfologica rilevata e distribuito omogeneamente all'interno della stessa;
- il numero di punti minimo per ogni unità è pari a 15; qualora la superficie dell'unità sia minore a  $5 m^2$  la soglia si abbassa a 7 punti oppure a una densità di  $2 punti/m^2$ .

## Modellazione statistica della distribuzione di specie

La metodologia *MesoHABSIM* richiede all'operatore l'utilizzo di modelli di distribuzione di specie per stimare la quantità di habitat disponibile. In particolare, nel Manuale LG 154/2017 si applica l'approccio detto *Target Fish Comunity*. Ossia, si identificano una o più specie della fauna ittica, naturalmente presente nel tratto di fiume in esame, che fungono indicatore biotico per quantificare la risposta agli stress. [Poff and Zimmerman, 2010] [Bain and Meixler, 2008]

La scelta delle specie di riferimento viene fatta in base al contesto ecologico, alla morfologia del tratto, ma anche a considerazioni legati all'interesse della pubblica amministrazione: sia per la conservazione di particolari specie, sia per attività legate alla pesca.

Applicando la tecnica statistica denominata  $Random \ Forest \ (RF)$ , si costruiscono i modelli biologici regionali che stabiliscono i criteri di idoneità

d'habitat per le diverse specie target e i relativi stadi vitali. I modelli così definiti, tarati per i corsi d'acqua alpini e appenninici dell'Italia settentrionale, sono disponibili all'interno del servizio *SimStream* Web (vedasi appendice E).

Il servizio, a partire dai criteri di idoneità dei modelli biologici regionali e considerando le caratteristiche idromorfologiche rilevate, è in grado di assegnare, ad ogni UMI individuata, una probabilità di **Presenza/Assenza** e **Abbondanza** per ogni specie target selezionata.

#### Analisi disponibilità spazio temporale di habitat

A questo punto, si procede con l'analisi della variazione di habitat disponibile e la definizione dell'habitat totale disponibile  $(H_d)$  per ogni specie target considerata. Il servizio *SimStream* Web classifica le UMI individuate in tre categorie: *Non idoneo, Idoneo* e *Ottimale*.

La relazione 3.1 mostra come la superficie delle UMI classificate *Idoneo*  $(H_I)$  e *Ottimale*  $(H_O)$  viene sommata per andare a definire l'**Habitat Totale Disponibile**  $(H_d)$ , espresso in metri quadrati.

$$H_d = H_I * 0.25 + H_O * 0.75 \tag{3.1}$$

Mettendo in relazione l'habitat totale disponibile e la portata alla quale è stato calcolato si definiscono, per ogni specie target selezionata, le **Curve Habitat-Portata**. Le curve mostrano la variazione dell'habitat disponibile in funzione della portata, permettendo l'individuazione della condizione ottimale di portata per ogni specie target.

#### Indice di Integrità Habitat (IH)

Il fine ultimo della metodologia *MesoHABSIM* è quello di quantificare la disponibilità di habitat nelle condizioni idromorofologicamente di interesse, facendo un confronto con le condizioni di riferimento e simulando l'impatto di future alterazioni.

Per questo motivo è stato sviluppato l'Indice di integrità di Habitat (IH), il cui scopo è quello di associare la variabilità spazio-temporale degli habitat in condizioni attuale e future. L'indice viene derivato da due sotto indici: Indice di disponibilità Spaziale di Habitat (ISH) e Indice di disponibilità Temporale di Habitat (ITH).

$$ISH = min \left( \begin{cases} 1 - \frac{|A_{Hd,r} - A_{Hd}|}{A_{Hd,r}} se \frac{|A_{Hd,r} - A_{Hd}|}{A_{Hd,r}} \le 1 \\ 0 se \frac{|A_{Hd,r} - A_{Hd}|}{A_{Hd,r}} > 0 \end{cases} \right)_{specie}$$
(3.2)

L'**ISH** quantifica l'alterazione della superficie di habitat disponibile in un dato periodo di tempo, solitamente pari a un anno. La relazione 3.2 confronta la quantità di habitat disponibile media sul periodo (espressa in % o  $m^2$ ) in condizioni di idrologiche di riferimento  $(A_{Hd,r})$  e alterate  $(A_{Hd})$ . Il valore dell'indice è dato dal minimo tra tutti i valori ottenuti per le diverse specie.

L'**ITH** valuta la variazione temporale nella durata di eventi di stress per la fauna: ossia la durata in giorni, durante la quale si misura una quantità di habitat corrispondente al 97° percentile di portata in condizioni ordinarie (magra ordinaria). Tale soglia viene definita come  $AQ_{97}$ .

$$ITH = \min\left(e^{-0.38AGS}\right)_{snecie} \tag{3.3}$$

In cui AGS è definito dalla relazione 3.4, dove  $d_{c,AQ_{97}}$  e  $d_{c,r,AQ_{97}}$  corrispondono, rispettivamente ai giorni di durata cumulata continua per la curva in condizioni alterate e non alterate:

$$AGS = \frac{1}{d_{max,r}} \cdot \sum_{k=1}^{k=d_{max,r}} \left( \frac{|d_{c,AQ_{97}} - d_{c,r,AQ_{97}}|}{d_{c,r,AQ_{97}}} \right)$$
(3.4)

Come si può notare in relazione 3.3, l'indice ITH è dato dal minimo tra tutti i valori ottenuti per le diverse specie ed è compreso tra 0 e 1:

- ITH = 1 per cui AGS = 0: assenza di giorni di stress;
- ITH = 0.7 per cui AGS = 1: aumento di giorni di stress del 100 %;
- $ITH \cong 0$  per cui AGS = 10: aumento dei giorni di stress del 1000 %;

$$IH = min (ISH, ITH) \tag{3.5}$$

A questo punto, applicando la relazione 3.5, è possibile calcolare l'Indice di **Integrità di habitat** (IH) definito come il minimo tra ISH e ITH. Può variare tra 0 e 1:

- IH = 0: il corso d'acqua presenta un grado elevatissimo di alterazione;
- IH = 1: il corso d'acqua è caratterizzato da assenza di alterazioni, ossia la qualità dell'habitat coincide con quelle di riferimento.

In tabella 3.2 sono riportate le cinque classi di integrità di habitat, individuate in accordo con l'impostazione della Direttiva Quadro delle Acque [European Commision, 2014], definite a partire dai valori calcolati dell'Indice di integrità fluviale.

IH	CLASSE
$IH \ge 0.80$	Elevato
$0.60 \leq IH \leq 0.80$	Buono
$0.40 \leq IH \leq 0.60$	Sufficiente
$0.40 \leq IH \leq 0.20$	Scadente
$0.20$	Pessimo

Tabella 3.2: Classi di integrità di habitat suddivise secondo l'indice IH [Vezza et al., 2017]

## SimStream

Il servizio **SimStream** Web è predisposto per l'applicazione della metodologia *MesoHABSIM* in ambito italiano e il calcolo dell'Indice di integrità di Habitat.

Il software richiede l'inserimento come input:

- data svolgimento del rilievo;
- portata misurata  $(m^3/s)$ ;
- lo *shapefile* con le UMI rilevate;
- il file di testo (detto file MEAS) contente le caratteristiche idro-morfologiche puntuali rilevate: ogni UMI viene descritta, in termini percentuali, in base alle classi di velocità, profondità e alle tipologie di substrato considerate all'interno del M LG ISPRA 154/2017 [Vezza et al., 2017];
- qualora siano stati caricati almeno tre rilievi idro-morfologici (portata misurata, *shapefile* delle UMI e misure puntuali rilevate), è possibile caricare le serie storiche di portata e calcolare le *serie storiche di habitat*, *curve CDS* e l'*indice di integrità fluviale* (IH).
- la selezione delle specie e dello stadio vitale scelte come target.

A seguito del caricamento dei dati, è possibile scegliere gli output richiesti al software, in base al tipo di analisi che si sta svolgendo:

- dati dell'Unità Idromorfologica in esame;
- valutazione dell'idoneità dell'habitat;
- relazione habitat-portata;
- serie storica di portata e habitat<sup>1</sup>;
- curve Curve Durata Sotto-soglia (CDS) per tutte le possibili soglie <sup>1</sup>;
- Indice di integrità dell'Habitat fluviale (IH)<sup>1</sup>.

 $<sup>^1 \</sup>mathrm{disponibile}$ solo se vengono caricate le serie storiche di portata tra gli input di $\mathit{SimStream}$ 

## 3.2.3 Manuale ISPRA 132/2016

Al fine di aiutare i tecnici nella classificazione delle unità idromorfologiche ISPRA ha redatto il manuale "Sistema di rilevamento e classificazione delle Unità Morfologiche dei corsi d'acqua (SUM) - 132/2016" [Rinaldi et al., 2016]. In particolare, nel manuale è descritto l'approccio multi-scala, utilizzato per identificazione e la classificazione delle unità morfologiche nella metodologia MesoHABSIM.



**Figura 3.2:** Estratto dell'approccio gerarchico descritto all'interno del M LG 132/2016 dalla scala di bacino alla scala di Unità morfologica [Rinaldi et al., 2016]

La procedura descritta nel Manuale LG 132/2016 considera i corsi d'acqua come un gruppo di sotto-insiemi gerarchicamente organizzati in cui i livelli inferiori sono contenuti in quelli immediatamente superiori.

In figura 3.2 sono riportati i quattro principali livelli, individuati nel Manuale SUM, in cui viene suddiviso il bacino idrografico:

- Scala di bacino: scala spaziale  $10^2$  e  $10^5$  km<sup>2</sup>;
- **Segmento**: scala spaziale  $10^1 e 10^2 km^2$ ;
- **Tratto**: scala spaziale  $10^{-1}$  e  $10^1 km^2$ ;
- Unità Morfologiche Idrauliche (UMI): scala spaziale  $10^0 e 10^2 m^2$ .

Ciascun livello di scala è caratterizzato da fattori e processi specifici, in cui i livelli gerarchicamente superiori controllano processi, fattori e condizioni dei livelli inferiori.

Per l'applicazione della metodologia *MesoHABSIM* ci si focalizza sull'analisi delle Unità Morfologiche Idrauliche. Si tratta di aree sommerse o emerse, create da fenomeni di erosione e/o deposizione, che possono essere localizzate sia all'interno dell'alveo (*Unità di Alveo*) sia al di fuori (*Unità di Pianura Alluvionale*).



**Figura 3.3:** Schema successione delle UMI, lungo un corso d'acqua, da monte a valle [Vezza et al., 2017] [Halwas and Church, 2002])

In figura 3.3 è raffigurato uno schema di successioni delle UMI in un torrente al variare delle condizioni al contorno. In particolar modo, procedendo da monte verso valle, si ha una diminuzione della pendenza dell'alveo, ciò comporta un calo dell'energia e una diminuzione della dimensione e della quantità del sedimento trasportato.

Il corso d'acqua può quindi essere suddiviso in tre tratti, ognuno caratterizzato da caratteristiche omogenee e da *Unità di Alveo* caratteristiche:

- 1. I tratti *montani confinati* sono caratterizzati da pendenza ed energia elevate. Le UMI di questi tratti possono essere suddivise in due tipologie:
  - **Erosive**, scolpite all'interno del substrato roccioso (ad esempio *plunge pool, pothole, rock step*;
  - Costituite da **sedimento di grosse dimensioni** come massi e blocchi (ad esempio *cascade*, *rapid*).
- 2. I tratti intermedi sono *parzialmente confinati* e caratterizzati da un calo di pendenza ed energia. Oltre alle unità viste nel tratto più a monte, si osservano le prime unità di tipo **deposizionale** quali le *barre* (*centrali* o *laterali*) e le *isole*. In questo zona inizia a formarsi la piana alluvionale.

- 3. I tratti più a valle sono **non confinati** e caratterizzati da pendenza ed energia basse, per questo motivo, il sedimento trasportato è molto fine e la pianura alluvionale è sempre più rilevante ed estesa. In questi tratti troviamo principalmente:
  - Unità Morfologiche Idrauliche che caratterizzano la configurazione del fondo: *Riffle*, *Glide* e *Pool*;
  - Unità deposizionali posizionate lateralmente all'alveo: <br/>  $barre\ di$ meandro o laterali



**Figura 3.4:** Principali Unità Morfologiche idrauliche di canale in alvei alluvionali ad elevata pendenza [Vezza et al., 2017]

Per quanto riguarda il caso particolare di torrenti montani ad elevata pendenza, le principali Unità Morfologiche Idrauliche di canale alluvionale possono essere suddivise in tre categorie:

- *Erosive* a sua volta suddivise in:
  - Unità erosive in alveo **roccioso**: *Pothole*;
  - Unità erosive in alveo costituito da sedimenti: Pool, Riffle;
- Deposizionali: Step, Glide;
- *Miste*: *Cascade*, *Rapid*;

In appendice A è disponibile una accurata descrizione delle Unità Morfologiche Idrauliche presenti negli alvei ad elevata pendenza caratteristici del contesto italiano.

Inoltre, in figura 3.4 sono riportati i profili longitudinali e planimetrici di alvei alluvionali associate alle UMI caratteristiche dei torrenti montani ad elevata pendenza.

## 4 Analisi idrologiche

Per poter determinare l'impatto che un'opera di presa produce sull'ecosistema fluviale e quindi calcolare l'**Indice di Integrità di Habitat** (IH), è necessario conoscere il regime idrologico indisturbato del corso d'acqua.

La condizione ideale, descritta nel Manuale LG 154/2017 [Vezza et al., 2017], è quella di avere un idrometro installato in corrispondenza della sezione dell'opera di presa, che garantisca almeno quindici anni di registrazioni. Tuttavia, questa condizione difficilmente si verifica nella realtà.

Risulta quindi necessario definire delle procedure atte ad eseguire l'analisi idrologica del corso d'acqua, che permettano di ricostruire la portata liquida naturale. All'interno del presente elaborato si sono testate due metodologie:

- Ricostruzione delle serie storiche di portata presso l'impianto idroelettrico di Quincinetto 2 (TO), gestito dal gruppo C.V.A. S.p.A.;
- Verifica della coerenza delle portate simulate dal modello idrologico afflussi-deflussi *CONTINUUM*, sviluppato dalla fondazione CIMA, in corrispondenza di alcuni idrometri installati sulla rete idrografica della regione Valle D'Aosta.

## 4.1 Indici di performance

La valutazione della performance dei modelli idrologici di previsione è di capitale importanza per andare a definire la bontà del modello che si sta applicando.

Per questo motivo, prima di procedere all'applicazione e alla verifica delle procedure individuate, è stato deciso di eseguire una ricerca in letteratura scientifica atta a definire gli indici di performance per i modelli idrologici di previsione. In particolare, gli indici trovano applicazione nella validazione dell'accuratezza del modello idrologico afflussi-deflussi sviluppato dalla fondazione CIMA.

In statistica sono presenti numerosi strumenti per valutare la performance di un modello e definirne l'abilità di rappresentazione della realtà.

#### CAPITOLO 4. ANALISI IDROLOGICHE

Secondo [Legates and McCabe, 1999] per avere un completa ed accurata rappresentazione delle realtà è necessario andare a calcolare più di un parametro. In particolar modo, gli indici di performance vengono divisi in tre categorie e, per ognuna delle quali, si consiglia di definire almeno un parametro:

- Criteri di efficienza (o "goodness-of-fit"): coefficiente di efficienza (NSE: Nash and Sutcliffe Efficiency), indice di corrispondenza (d) o indice di determinazione ( $R^2$ ).
- *Errori di misura assolute*: *RMSE* (errore quadratico medio), *MAE* (errore assoluto medio) oppure *PBIAS* (percentuale BIAS).
- Altri parametri: si può aggiungere anche un paragone tra la media e la deviazione standard dei dati osservati e calcolati durante la simulazione. [Willmott, 1981]

Ognuno di questi criteri di efficienza è definito come una sommatoria di errori (differenza tra dati osservati e modellati) normalizzati rispetto ai dati osservati. Per questo motivo ogni criterio è in grado di valutare, in maniera ottimale, le performance del modello sia in condizioni di piena sia in condizioni di magra. [Krause et al., 2005]

Prima di procedere alla descrizione degli indici di performance, in questo capitolo si definiscono con OBS i dati misurati sul reticolo idrografico e con SIM i valori di portata predetti dal modello idrologico.

## 4.1.1 Nash-Sutcliffe Efficiency - NSE

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (OBS_i - \overline{OBS})^2}$$
(4.1)

La formula 4.1 è stata proposta da diversi autori ([Krause et al., 2005]; [Legates and McCabe, 1999]; [Hwang et al., 2012]; [Moriasi et al., 2007]) per il calcolo del coefficiente di efficienza o NSE, che può variare tra 1 e  $-\infty$ :

- NSE = 1: rappresenta la corrispondenza perfetta tra dati OBS e SIM;
- NSE = 0: rappresenta la non correlazione tra dati OBS e SIM;
- NSE < 0: rappresenta una situazione in cui la media dei dati osservati descrive la situazione meglio dei dati modellati.

In conclusione, si può dire che valori negativi di NSE indicano una simulazione che restituisce valori non accettabili, mentre quando NSE > 0.5 i dati modellati interpretano correttamente il problema. [Shahram et al., 2020] [Moriasi et al., 2007]

La formulazione classica di *NSE* mostra scarsa sensibilità a errori sistematici di sovra o sottostima del modello, in particolar modo per quanto riguarda le condizioni di portata bassa. [Shahram et al., 2020] [Krause et al., 2005]

Per questo motivo, sono state proposte alcune modifiche nel calcolo del coefficiente di efficienza che permettono di avere maggiore sensibilità in alcune particolari condizioni di portata.

## NSE calcolato con valori logaritmici

Considerando una trasformazione logaritmica dei dati simulati e osservati, si ha una riduzione dei valori di picco, mentre i valori di portata più bassi vengono mantenuti costanti.

Con questa formulazione si misura un aumento di sensitività alle condizioni di bassa portata. Pertanto risulta utile quando si è interessati alla valutazione della performance di un modello in condizioni di magra. [Krause et al., 2005] [Shahram et al., 2020]

#### Forma modificata di NSE

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} |OBS_i - SIM_i|^j}{\sum_{i=1}^{n} |OBS_i - \overline{OBS}|^j} \quad with \ j \in N$$

$$(4.2)$$

L'equazione 4.2 è una forma più generale di 4.1. Infatti se si sostituisce j = 2 si ottiene l'equazione classica di *NSE*.

Inoltre, sostituendo j = 1, si nota una notevole riduzione delle sovrastime dovute alle portate di picco. In questa maniera *NSE* risulta idoneo alla valutazione dei dati modellati considerando contemporaneamente le condizioni di magra e di morbida. [Krause et al., 2005] [Legates and McCabe, 1999]

Attualmente in letteratura non sono presenti dati sufficienti per definire un range di validità di *NSE* calcolato in questa forma. [Moriasi et al., 2007]

Criterio relativo di NSE

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{OBS_i - SIM_i}{OBS_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{OBS_i - \overline{OBS}}{\overline{OBS}}\right)^2}$$
(4.3)

La modifica, proposta in equazione 4.3, introduce una normalizzazione della differenza tra i valori osservati e modellati rispetto alla deviazione relativa. Si mostra quindi una significativa riduzione dell'influenza delle condizioni di morbida. In questa maniera viene dato maggior peso alle condizioni di magra, nel calcolo di *NSE*. [Krause et al., 2005]

## 4.1.2 Indice di corrispondenza - d

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (|SIM_i - \overline{OBS}| + |OBS_i - \overline{OBS}|)^2}$$
(4.4)

Secondo alcuni autori ([Krause et al., 2005]; [Legates and McCabe, 1999]) l'indice di corrispondenza (d) è definito dall'equazione 4.4. Secondo [Willmott, 1981] i termini del numeratore vanno invertiti.

Il range di validità di d è compreso tra 1 e 0. Se d = 1 la corrispondenza tra dati OBS e SIM è perfetta, per d = 0 non abbiamo correlazione.

Come visto per il caso di NSE in capitolo 4.1.1, la forma classica di d mostra scarsa sensibilità a errori sistematici di sovra o sottostima del modello, in particolar modo per quanto riguarda le condizioni di magra. Anche in questo caso, sono state proposte delle forme modificate che permettono di analizzare meglio le diverse condizioni di flusso che possono essere presenti in alveo. [Legates and McCabe, 1999]

#### d calcolato con valori logaritmici

Considerando una trasformazione logaritmica dei dati simulati e osservati, si ha una riduzione dei valori di picco, mentre i valori di portata più bassi vengono mantenuti costanti.

In questa maniera si misura un aumento di sensitività alle condizioni di bassa portata. Come osservato nel cso di *NSE*, risulta utile quando si è interessati alla valutazione della performance di un modello in condizioni di magra. [Krause et al., 2005]

#### Forma modificata di d

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} |OBS_i - SIM_i|^j}{\sum_{i=1}^{n} (|SIM_i - \overline{OBS}| + |OBS_i - \overline{OBS}|)^j} \quad with \ j \in N$$
(4.5)

Anche per l'indice di corrispondenza è stata definita una forma più generale dell'equazione standard (vedasi equazione 4.5). Per una descrizione

dettagliata di questa formulazione si rimanda al capitolo 4.1.1 in cui si tratta la forma modificata di *NSE*. [Krause et al., 2005] [Legates and McCabe, 1999]

## Criterio relativo di d

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{OBS_i - SIM_i}{OBS_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{|SIM_i - \overline{OBS}| + |OBS_i - \overline{OBS}|}{\overline{OBS}}\right)^2}$$
(4.6)

La modifica, proposta in equazione 4.6, introduce una normalizzazione della differenza tra i valori osservati e modellati rispetto alla deviazione relativa. Anche in questo caso, si mostra una significativa riduzione dell'influenza delle condizioni di morbida, dando maggior peso alle condizioni di magra nel calcolo dell'indice. [Krause et al., 2005]

## 4.1.3 Coefficiente di determinazione

$$R^{2} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} (OBS_{i} - \overline{OBS}) (SIM_{i} - \overline{SIM})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (OBS_{i} - \overline{OBS})} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (SIM_{i} - \overline{SIM})}}\right)^{2}$$
(4.7)

L'equazione 4.7 per il calcolo del coefficiente di determinazione  $(R^2)$  è stata proposta da [Legates and McCabe, 1999] e [Krause et al., 2005]. Il range di validità di  $R^2$  va da 0 a 1, dove a zero corrispondono modelli che non hanno correlazione e 1 quelli con correlazione massima. [Moriasi et al., 2007]

Inoltre,  $R^2$  può essere considerato un caso particolare di *NSE*. In cui il rapporto tra le deviazioni standard dei dati modellati e osservati sia uguale al coefficiente di correlazione lineare r e il *BIAS* normalizzato rispetto alla deviazione standard dei valori osservati sia pari a 0. [Gupta et al., 2009]

Tuttavia, il coefficiente di determinazione mostra alcune criticità: è stato dimostrato che esistono situazioni in cui è restituito  $R^2$  prossimo a uno, nonostante il modello mostri sistematicamente sovra o sottostima dei valori simulati osservata con altri indici di performance. [Legates and McCabe, 1999] [Krause et al., 2005]

## 4.1.4 Errori di misura

Vengono ora presentati i principali parametri, presenti in letteratura, utilizzati per il calcolo degli errori di misura per la valutazione della performance dei modelli idrologici di previsione:

- *RMSE*: Errore Quadratico Medio; [Legates and McCabe, 1999]
- MAE: Errore Assoluto Medio; [Legates and McCabe, 1999]
- *PBIAS*: Percentuale di BIAS. [Willmott, 1981]

#### Errore Quadratico Medio RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (OBS_i - SIM_i)^2}{N}}$$
(4.8)

L'equazione 4.8 dell'errore quadratico medio (RMSE) è stata proposta da diversi autori: [Legates and McCabe, 1999], [Hwang et al., 2012] e [Willmott, 1981].

Tanto più il valore di RMSE ottenuto è vicino a 0, tanto migliore è la corrispondenza tra dati OBS e SIM. Si possono ritenere accettabili valori al di sotto di 0.5. [Moriasi et al., 2007]

## Errore Assoluto Medio MAE

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |OBS_i - SIM_i|}{N} \tag{4.9}$$

L'equazione 4.9 del MAE è stata proposta da [Legates and McCabe, 1999] e [Hwang et al., 2012]. Nella maggior parte dei casi, si può notare che  $RMSE \geq MAE$ .

Inoltre, il grado in cui RMSE supera il MAE, è considerato indicatore della quantità di outliers presenti nella serie di dati che stiamo analizzando. [Legates and McCabe, 1999]

Tanto più il valore di MAE ottenuto è vicino a 0, tanto migliore è la corrispondenza tra dati OBS e SIM. Si possono ritenere accettabili valori di RMSE inferiori a 0.5. [Moriasi et al., 2007]

#### Percentuale BIAS

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n} (OBS_i - SIM_i) * (100)}{\sum_{i=1}^{n} (OBS_i)}$$
(4.10)

L'equazione 4.10 di PBIAS è stata proposta da [Moriasi et al., 2007]. Il parametro misura la tendenza media dei dati simulati di essere più grandi o più piccoli rispetto a quelli osservati:

- PBIAS = 0 è il valore ideale, i dati modellati rappresentano ottimamente quelli osservati, comunque con dati che si discostano poco da 0 abbiamo un modello accettabile.
- PBIAS < 0 il modello sovrastima il BIAS.
- PBIAS > 0 il modello sottostima il BIAS.

Affinché i valori ottenuti da un modello idrologico di previsione siano considerati accettabili si consiglia di avere un valore di *PBIAS* compreso tra-25%e25%.

## 4.1.5 Definizione degli Indici di Performance

I diversi indici di performance illustrati non sempre restituiscono valori coerenti. Si è dimostrato che, applicati allo stesso modello, due diversi indicatori possono restituire perfetta corrispondenza come nessuna corrispondenza. Ciò è causato dalla diversa sensibilità che mostrano gli indici di performance al variare delle condizioni di flusso.

Come suggerito da [Legates and McCabe, 1999], per ovviare a questo problema, si consiglia di andare a calcolare diversi parametri per ogni modello idrologico di previsione di cui si desidera valutare la performance.

Nel presente elaborato, per la validazione delle portate simulate dal modello idrologico afflussi-deflussi *CONTINUUM*, si è scelto di calcolare:

- 1. **NSE** (Nash and Sutcliffe Efficiency), nella formulazione classica equazione 4.1;
- 2. Indice di corrispondenza (d), nella formulazione classica equazione 4.4;
- 3. Errore quadratico medio  $(\mathbf{RMSE})$  equazione 4.8.

Per il calcolo di NSE e d si è deciso di utilizzare la formulazione classica, poiché le forme modificate hanno ancora dati insufficienti per definire efficacia e il range di validità dell'indice di performance.

Oltre ai criteri statistici presentati nei capitoli precedenti, può essere estremante utile includere anche una **rappresentazione grafica** dei dati misurati e simulati. Solitamente si rappresentano i dati all'interno di uno *scatter plot*, il quale permette di avere un rapido confronto tra i dati misurati e simulati. [Legates and McCabe, 1999] [Moriasi et al., 2007]

## 4.2 Ricostruzione delle serie di portata: impianto di Quincinetto 2 (TO)



**Figura 4.1:** Posizione della centrale idroelettrica di Quincinetto 2 (TO) e dell'opera di presa (Pont-Saint-Martin, AO) (*Elaborazione propria tramite* QGIS)

La centrale idroelettrica Quincinetto 2, TO (vedasi figura 4.1) è situato sull'asta fluviale della Dora Baltea al confine tra la Valle d'Aosta, dove si trova l'opera di presa, e il Piemonte, dove è situata la centrale. L'attuale impianto, entrato in funzione nel 1998, nasce dall'unione di due impianti preesistenti: Carema e Quincinetto 1, realizzati agli inizi del Novecento. In tabella 4.1 sono raccolte le caratteristiche tecniche dell'attuale centrale di Quincinetto 2.

di Quincinetto $2$
Quincinetto (TO)
anno 1988
fiume Dora Baltea
fiume Dora Baltea
280 m s.l.m.
$3 \ 262 \ km^2$
2.3 km a pelo libero
24 m
2 turbine Kaplan
$110 \ m^3/s$
$21 \ \mathrm{MW}$
120 GWh

**Tabella 4.1:** Caratteristiche tecniche della centrale idroelettrica di Quincinetto 2 [Compagnia Valdostana delle Acque, 2001]

# 

## 4.2.1 Definizione della portata

**Figura 4.2:** Posizione dell'idrometro di Tavagnasco, rispetto alla centrale e all'opera di presa di Quincinetto 2, in viola il confine tra Piemonte e Valle D'Aosta (*Elaborazione propria tramite* QGIS)

Al fine di ricostruire la portata liquida naturale della della Dora Baltea in arrivo alla presa della centrale di Quincinetto 2, sono state individuate cinque portate misurate o calcolate:

- 1.  $Q_{Naturale}$ : Portata media giornaliera calcolata da C.V.A. S.p.A. per il periodo compreso tra il 2018 e il 2020, in arrivo all'opera di presa.
- 2.  $Q_{Tavagnasco}$ : Portata media giornaliera registrata presso l'idrometro di Tavagnasco (in figura 4.2 ne è riportata la posizione). La serie a disposizione copre il periodo compreso tra il 2008 e il 2020.
- 3.  $Q_{max}$ : Massima portata che può essere prelevata dalla centrale di Quincinetto 2, in base alla concessione idroelettrica. Per il periodo tra il 2008 e il 2020 è costante a 110  $m^3/s$ .
- 4.  $Q_{Turb}$ : Portata media giornaliera realmente prelevata dalla Dora Baltea ed inviata alle turbine nel periodo tra il 2008 e il 2020.
- 5. DMV: Deflusso Minimo Vitale rilasciato dall'opera di presa:
  - 2008:  $DMV = 0m^3/s;$

- 2009 2011:  $DMV = 2.1m^3/s$
- Dal 2012:  $DMV = 4.2m^3/s$

## Portata naturale tra il 2018 e il 2020

La portata naturale calcolata dal gruppo C.V.A. S.p.A.  $(Q_{Naturale})$ , per il periodo compreso tra 2018 e il 2020, si basa su dati impiantistici misurati in corrispondenza dell'opera di presa e della centrale di Quincinetto 2.

Tuttavia, la portata naturale così calcolata mostra alcune criticità:

- Copre un intervallo di solo tre anni (2018-2020), quindi la serie non risulta sufficiente lunga e rappresentativa del comportamento del corso d'acqua.
- Essendo l'opera di presa a monte dell'idrometro di Tavagnasco, la  $Q_{naturale}$  (serie verde in figura 4.3) dovrebbe essere sempre più bassa della  $Q_{Tavagnasco}$  (serie azzurra). Tuttavia, in condizioni di magra, questa circostanza non sempre è verificata.



**Figura 4.3:** Confronto tra l'idrogramma delle portate della Dora Baltea (presso Quincinetto) della  $Q_{Naturale}$  e la  $Q_{Tavagnasco}$  per il triennio 2018-2020 (*Elaborazione propria, tramite* MatLab)

Per questi motivi, al fine di applicare correttamente la metodologia MesoHABSIM nel tratto sotteso all'opera di presa della centrale idroelettrica di Quincinetto 2, è necessario andare a definire una nuova serie idrologica  $(Q_{Reference})$ , che rispetti alcune condizioni:

• La serie deve avere una durata minima superiore ai tre anni. Nonostante, la soglia minima di durata della serie idrologica da utilizzare è posta a 15 anni ([Vezza et al., 2017]), per il calcolo del *Deflusso Ecologico* e la valutazione dell'impatto ambientale delle derivazioni, è concesso l'utilizzo di serie temporali di lunghezza inferiore, ma superiore a tre anni. • La nuova serie deve sempre rispettare la condizione:

$$Q_{Tavagnasco} > Q_{Reference}$$
 (4.11)

Pertanto, utilizzando i dati registrati presso l'idrometro di Tavagnasco  $(Q_{Tavagnasco})$  e conoscendo l'acqua turbinata dalla centrale, si è deciso di ricostruire la portata presente in alveo per il periodo compreso tra il 2008 e il 2020. In questa maniera è stato possibile ottenere la portata liquida naturale della Dora Baltea in arrivo alla presa della centrale per un periodo di 13 anni.

#### Ricostruzione della portata naturale tra il 2008 e il 2020

La ricostruzione della portata liquida naturale della Dora Baltea in arrivo alla presa è stata eseguita per il periodo compreso tra il 2008 e il 2020. In questa maniera è possibile eseguire una verifica tra la  $Q_{Reference}$  (ricostruita) e la  $Q_{Naturale}$  (fornita da C.V.A. S.p.A.) e garantire omogeneità di calcolo della serie utilizzata per l'applicazione della metodologia *MesoHABSIM* (vedi capitolo 4.2.2).

Per definire  $Q_{Reference}$  si è deciso di andare a confrontare la portata misurata a Tavagnasco con la  $Q_{Max}$ , ossia la massima portata prelevabile dalla centrale  $(110 m^3/s)$ :

- Quando  $Q_{Tavagnasco} < Q_{Max}$ : ad esclusione del DMV, tutta l'acqua presente in alveo viene deviata verso la centrale idroelettrica. In questo caso la  $Q_{Reference}$  è stata posta uguale alla somma della portata inviata alle turbine ( $Q_{Turb}$ ) e il DMV rilasciato dall'opera di presa.
- Quando  $Q_{Tavagnasco} \geq Q_{Max}$ : solo una parte dell'acqua presente in alveo viene deviata verso la centrale idroelettrica, la parte in eccesso rimane all'interno dell'alveo. La  $Q_{Reference}$  viene calcolata a partire dalla portata misurata all'idrometro di Tavagnasco, ridotta di un fattore legato all'area sottesa alla sezione pari al 2 %.

Per la corretta definizione della  $Q_{Reference}$  è necessario considerare che, nel periodo 2008-2020, l'impianto di Quincinetto ha subito diversi interventi di fermo impianto che hanno interessato almeno un'intera giornata:

- Fermo impianto o limitazioni della potenza causati da *condizioni di piena* della Dora Baltea;
- Fermo impianto dovuto ad interventi di *manutenzione ordinaria* (ogni anno l'impianto viene fermato alcune settimane) e *straordinaria*.

Qualora il fermo impianto o la limitazione della potenza dovesse durare uno o due giorni, si è corretta la  $Q_{Reference}$  con un'interpolazione lineare. In caso



**Figura 4.4:** Idrogramma delle portate della  $Q_{Reference}$ , calcolata a monte della centrale di Quincinetto, confrontata con  $Q_{Tavagnasco} \in Q_{Turb-DMV}$  (*Elaborazione propria, tramite* MatLab)

di interventi di durata maggiore si è corretta la  $Q_{Reference}$  con la  $Q_{Tavagnasco}$ ridotta del fattore di area del 2 %.

In figura 4.4 è rappresentato un confronto tra le diverse serie di portata utilizzate per la definizione di  $Q_{Reference}$ :

- in *viola* è rappresentata la portata liquida naturale in arrivo alla presa della centrale idroelettrica di Quincinetto  $(Q_{Reference})$ ;
- in *azzurro* la portata misurata a Tavagnasco  $(Q_{Tavagnasco})$ ;
- in *blu* la portata turbinata dalla centrale a cui è stato sommato il DMV  $(Q_{Turb-DMV});$
- la *linea rossa orizzontale* rappresenta la massima portata derivabile  $(Q_{Max})$ .

In conclusione, osservando l'andamento della curva viola, si può notare che la  $Q_{Reference}$  calcolata segue l'andamento della portata turbinata. Tuttavia, si allontana da essa ogni qual volta la  $Q_{Tavagnasco}$  supera la  $Q_{Max}$  oppure la  $Q_{Turb-DMV}$  arriva a valori prossimi lo zero a causa di fermi impianto.

In Appendice B è riportato il codice MatLab utilizzato per la ricostruzione della portata liquida naturale in arrivo all'opera di presa della centrale di Quincinetto 2. Nella definizione della  $Q_{Reference}$  sono stati considerati anche i fermi impianto che hanno interessato la centrale.

# 4.2.2 Verifica della $Q_{Reference}$ calcolata tra il 2018 e il 2020

La serie di portate  $Q_{Naturale}$ , fornita da C.V.A. S.p.A. per il periodo 2018-2020, non sempre rispettava la condizione  $Q_{Tavagnasco} > Q_{Reference}$ . Si è quindi deciso di verificare il rispetto di questa condizione per la nuova serie di portate calcolata ( $Q_{Reference}$ ).





In figura 4.5 sono raffigurate  $Q_{Naturale}$  (verde),  $Q_{Tavagnasco}$  (azzurro) e la  $Q_{Reference}$  (viola), per il periodo compreso tra il 2018 e il 2020. Si può notare che, a differenza della curva verde, la curva viola sia sempre più bassa della azzurra, anche in condizioni di magra.

In conclusione, si può affermare che la portata ricostruita ( $Q_{Reference}$ ) descriva efficacemente la portata liquida naturale della Dora Baltea in arrivo alla presa della centrale idroelettrica di Quincinetto 2. Quindi è possibile utilizzarla nella metodologia *MesoHABSIM* per il calcolo dell'Indice di integrità di Habitat (*IH*).

## 4.3 Modello idrologico CONTINUUM -Fondazione CIMA

Fondazione CIMA (Centro Internazionale in Monitoraggio Ambientale) è un ente di ricerca senza scopo di lucro. Ha lo scopo di promuovere lo studio, la ricerca scientifica, lo sviluppo tecnologico e l'alta formazione nell'ingegneria e nelle scienze ambientali ai fini della tutela della salute pubblica, della Protezione Civile (PC) e della salvaguardia degli ecosistemi.

La ricerca scientifica condotta dalla Fondazione si concentra sulla mitigazione del rischio da disastro. Fin dalla sua nascita, infatti, la Fondazione si è dedicata alla mitigazione del rischio idrometeorologico, sviluppando modelli matematici che consentissero di migliorare la previsione e la prevenzione dei fenomeni alluvionali, la previsione e la prevenzione degli incendi boschivi. [Fondazione Cima, 1995]

Su incarico della Protezione Civile, CIMA ha sviluppato un modello idrologico Afflussi-Deflussi fisicamente basato per l'analisi delle portate di piena. A tal fine il modello è stato tarato a scala regionale utilizzando i dati rilevati dagli idrometri installati lungo i corsi d'acqua.

Il Modello idrologico *CONTINUUM*, sviluppato inizialmente per le condizioni di piena della regione Valle D'Aosta, è stato modificato per andare a valutare le condizioni di flusso, anche in condizioni di magra, in ogni punto del reticolo idrografico. L'obiettivo è quello di poter quantificare la risorsa idrica presente e quindi gestire il **Deflusso Ecologico** con maggior accuratezza.

Tuttavia, prima di poter utilizzare il modello Afflussi-Deflussi *CONTI-NUUM* per la ricostruzione della portata liquida naturale presente in alveo, è necessario una validazione del modello. Ossia si è verificato che le portate ricostruite dal modello siano confrontabili con i valori registrati da alcuni idrometri installati a monte di alcune opere di presa.

## 4.3.1 Punti di validazione

La validazione del modello è stata eseguita confrontando la portata calcolata dal modello Afflussi-Deflussi e le portate registrata da idrometri installati a monte delle prese di tre centrali idroelettriche gestite dal gruppo  $C.V.A.\ S.p.A.$  (vedi figura 4.6):

- Centrale di Champagne 2: si tratta di un impianto ad acqua fluente che sfrutta le acque della Dora Baltea raccolte nel bacino idroelettrico di La Salle e derivate in un canale di 11 chilometri fino alla vasca di carico a Introd.
- Centrale di Hône 2: si tratta di un impianto ad acqua fluente, caratterizzato da un canale derivatore di oltre 12 chilometri, che preleva l'acqua dal torrente Ayasse e da alcuni suoi affluenti.

• Centrale di Faubourg, si tratta di un impianto ad acqua fluente la cui opera di presa è posta sulla Dora di Verney a valle della confluenza con il torrente Chavannes.



**Figura 4.6:** Ortofoto rappresentante la posizione delle tre centrali utilizzate per la validazione del modello (*Elaborazione propria tramite* QGIS)

A monte delle opere di presa delle tre centrali, sono stati individuati cinque idrometri presso i quali è stata registrata la portata presente in alveo. Queste misurazioni sono state utilizzate per la validazione del modello *CONTINUUM*. In particolar modo i punti sono così distribuiti:

- 1. Champagne 2 Dora Baltea;
- 2. Faubourg Dora Verney;
- 3. Faubourg torrente Chavannes;
- 4. *Faubourg* a valle della confluenza tra il torrente Chavannes e la Dora di Verney;
- 5. Hône $\mathcal 2$  torrente Ayasse.

Le caratteristiche tecniche delle tre centrali, per le quali è stata eseguita la ricostruzione della portata naturale a monte delle opere di presa, sono riassunte in tabella 4.2.

**Tabella 4.2:** Caratteristiche tecniche delle centrali idroelettriche su cui è stata eseguita la validazione del modello *CONTINUUM* (*Fonte sito del gruppo* C.V.A. S.p.A. [Compagnia Valdostana delle Acque, 2001])

Centrale Idroelettrica di Champagne 2		
Comune	Villeneuve (AO)	
Entrata in esercizio	anno 1939	
Asta idraulica	fiume Dora Baltea	
Opera di presa	bacino di La Salle	
Quota	679 m s.l.m.	
Bacino imbrifero	$430 \ km^2$	
Canale derivatore	11 km a pelo libero	
Salto di concessione	202 m	
Gruppi	3 turbine Pelton	
Portata massima derivabile	$17 \ m^3/s$	
Potenza installata	$27 \mathrm{MW}$	
Produzione media annua	140 GWh	
Centrale Idroelettrica di Faubourg		
Comune	La Thuile (AO)	
Entrata in esercizio	anno 2010	
Asta idraulica	torrente Dora di Verney	
Opera di presa	torrente Dora di Verney	
Quota	1451 m s.l.m.	
Bacino imbrifero	$64 \ km^2$	
Canale derivatore	1 km a pelo libero	
Salto di concessione	297 m	
Gruppi	2 turbine Pelton	
Portata massima derivabile	$4.5 \ m^3/s$	
Potenza installata	$10.6 \ \mathrm{MW}$	
Centrale Idroelettrica di Hône 2		
Comune	Hône (AO)	
Entrata in esercizio	anno 1919	
Asta idraulica	torrente Ayasse	
Opera di presa	torrente Ayasse	
Quota	363 m s.l.m.	
Bacino imbrifero	$86 \ km^2$	
Canale derivatore	13 km a pelo libero	
Salto di concessione	745 m	
Gruppi	3 turbine Pelton	
Portata massima derivabile	$2 m^3/s$	
Potenza installata	11 MW	

## 4.3.2 Validazione del modello

In prima analisi è necessario verificare che le portate simulate dal modello *CONTINUUM* e quelle registrate dagli idrometri siano tra loro confrontabili. Per questo motivo, sono state confrontate le **Curve di Durata delle Portate** (CDP).



(b) Curve di Durata delle Portate a Hône 2

**Figura 4.7:** Confronto tra la CDP con le portate simulate dal modello *CONTINUUM* e quelle registrate dagli idrometri per le centrali di Champagne 2 e Hône (*Elaborazione propria tramite* MatLab)

A titolo di esempio, in figura 4.7 sono stati riportate le CDP delle centrali di Champagne 2 e Hône 2. In entrambi i casi, si può notare che la curva delle portate ricostruite dal modello Afflussi-Deflussi è sovrapponibile e quindi confrontabile a quella delle portate registrate dall'idrometro sia in condizioni di magra sia di morbida.

#### CAPITOLO 4. ANALISI IDROLOGICHE

Poiché lo scopo del modello costruito è lo studio delle portate in condizioni di magra, è necessario verificare che i valori di magra ordinaria  $(Q_{74})$  e minimo annuale  $(Q_{97})$  simulati e rilevati siano comparabili.

**Tabella 4.3:** Portate di magra  $(Q_{74}, Q_{97})$  nei cinque punti di validazione considerati, ottenute sia dalle portate simulate dal modello sia rilevate dagli idrometri

	$Q_{74}\left(m^3/s\right)$		$Q_{97}\left(m^3/s ight)$	
	Modellata	Osservata	Modellata	Osservata
Champagne 2	4.2240	4.0640	2.0390	2.4820
Faubourg (Dora Verney)	0.1550	0.2200	0.0740	0.0900
Faubourg (torrente Chavannes)	0.0990	0.2400	0.0310	0.1600
Faubourg (valle confluenza)	0.2930	0.4600	0.1320	0.2600
Hône 2	0.7010	0.6140	0.1650	0.1610

In tabella 4.3 sono riportati, per i cinque punti di validazione considerati, i valori di  $Q_{74}$  e  $Q_{97}$  ottenuti sia dalla serie di portate simulate dal modello sia da quella registrata dagli idrometri. Si può notare che, in entrambe le condizioni di magra e in tutti e cinque i casi analizzati, la differenza tra portata modellata e osservata è sempre limitata.

A questo punto è possibile procedere alla validazione del modello Afflussi-Deflussi. Come descritto nel capitolo 4.1, è stato deciso di generare gli scatter plot, che mettono in relazione la portata modellata e osservata, e calcolare tre indici di performance in ogni punto considerato:

1. NSE: Nash and Sutcliffe Efficiency, formulazione classica:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (OBS_i - \overline{OBS})^2}$$
(4.12)

2. *d*: Indice di corrispondenza, formulazione classica:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (|SIM_i - \overline{OBS}| + |OBS_i - \overline{OBS}|)^2}$$
(4.13)

3. **RMSE**: Errore quadratico medio:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (OBS_i - SIM_i)^2}{N}}$$
(4.14)

Inoltre, prima di procedere alla validazione dei dati, è importante considerare che il modello *CONTINUUM* può rispondere in maniera diversa al variare delle condizioni di flusso presente. Per questo motivo si è deciso di dividere le serie in condizioni di piena  $(Q > Q_{50})$  e condizioni di magra  $(Q < Q_{50})$ ed eseguire due validazioni distinte.

In Allegato C è stato riportato, a titolo d'esempio, il codice usato per il calcolo degli indici di performance e gli scatter plot per Champagne 2.

## 4.3.3 Condizioni di piena

In figura 4.8 sono stati riportati, a titolo di esempio, gli scatter plot ottenuti per le centrali di Champagne 2 e Hône 2, in condizioni di piena  $(Q > Q_{50})$ . Gli indici di performance calcolati per tutti e cinque i punti di validazione per la condizione di morbida sono riportati in tabella 4.4.



**Figura 4.8:** Esempio di validazione del modello *CONTINUUM*, in condizioni di piena  $(Q > Q_{50})$ , presso le centrali di Champagne 2 e Hône 2 (*Elaborazione propria tramite* MatLab)

A questo punto è possibile fare alcune considerazioni sui valori ottenuti dagli indici di performance:

L'indice NSE, ad esclusione del caso di Faubourg (torrente Chavannes), è sempre valida la relazione NSE > 0.5. Quindi, secondo questo indice, la simulazione interpreta correttamente il problema per la modellazione in condizione di morbida. [Moriasi et al., 2007] [Shahram et al., 2020]

**Tabella 4.4:** Indici di performance per  $Q > Q_{50}$  nei cinque punti di validazione

	NSE	d	RMSE
Champagne 2	0.9824	0.9958	0.2863
Faubourg (Dora Verney)	0.8010	0.9298	0.5288
Faubourg (torrente Chavannes)	0.3989	0.7840	1.0853
Faubourg (valle confluenza)	0.6458	0.8719	1.5073
Hône 2	0.9343	0.9800	0.0660

- L'indice *d*, il cui valore dovrebbe essere il più vicino possibile a 1, restituisce valori accettabili in tutti i punti.
- **RMSE**, ad esclusione di *Hône 2*, restituisce sempre valori molto maggiori di 0, pertanto il modello non è accettabile.

In conclusione, questo caso è una chiara dimostrazione della necessità di calcolare e analizzare più di un indice di performance per definire l'affidabilità di un modello idrologico di previsione. Infatti, se analizzassimo solo NSE il modello sarebbe accettabile, mentre non lo sarebbe per i valori ottenuti di RMSE.

## 4.3.4 Condizioni di magra

In figura 4.8 sono stati riportati, a titolo di esempio, gli scatter plot ottenuti per le centrali di Champagne 2 e Hône 2, in condizioni di magra  $(Q < Q_{50})$ , mentre in tabella 4.5 sono raccolti gli indici di performance.



**Figura 4.9:** Esempio di validazione del modello *CONTINUUM*, in condizioni di magra  $(Q < Q_{50})$ , presso le centrali di Champagne 2 e Hône 2 (*Elaborazione propria tramite* MatLab)

A questo punto, anche per le condizioni di magra, è possibile fare alcune considerazioni sui valori ottenuti dagli indici di performance simili a quelle viste nel caso precedente:

Tabella 4.5: Indici di performance per  $Q < Q_{50}$  nei cinque punti di validazione

	NSE	d	RMSE
Champagne 2	0.9632	0.9915	0.4077
Faubourg (Dora Verney)	0.7684	0.9436	0.0498
Faubourg (torrente Chavannes)	-0.8343	0.7147	0.1311
Faubourg (valle confluenza)	0.5072	0.8966	0.1440
Hône 2	0.9735	0.9936	0.0584

- Ad esclusione di *Faubourg (torrente Chavannes)*, che restituisce un valore di **NSE** negativo (condizione assurda per la quale le portate simulate rappresentano meglio di quelli misurate la condizione di flusso nel corso d'acqua), negli altri casi NSE > 0.5.
- Anche in questo caso, l'indice d restituisce valori molto vicini a uno in tutti i punti, pertanto sono ritenuti accettabili.
- **RMSE** restituisce sempre valori inferiori a 0.5, pertanto accettabili. Inoltre, ad esclusione del caso di *Champagne 2*, si può notare che *RMSE* è più basso di 0.2.

## 4.3.5 Conclusioni per l'applicazione del modello CONTINUUM

In conclusione, si può dire che il modello idrologico Afflussi-Deflussi *CONTINUUM*, definito dalla Fondazione CIMA, sia in grado di modellare la portata liquida naturale nei corsi d'acqua della regione Valle D'Aosta, in condizioni di magra, con un accuratezza che si può ritenere accettabile.

Confrontando gli indici di performance riportati nelle tabelle 4.4 e 4.5, è possibile notare che il modello restituisce risultati migliori in condizioni di magra, rispetto a quelle di morbida.

# 5 Modellazione idraulica bidimensionale

La metodologia *MesoHABSIM*, dettagliatamente descritta nel capitolo 3.2 [Vezza et al., 2017], è stata applicata al caso studio di un tratto di Dora Baltea, nei pressi di Nus (AO), a valle dell'opera di presa della centrale idroelettrica di Saint-Clair (Châtillon, AO).



**Figura 5.1:** Nell'immagine è rappresentata la posizione del tratto di Dora Baltea nei pressi di Nus sul quale è stata eseguita la modellazione 2D (in giallo). Inoltre sono state riportate le ortofoto rilevate per mezzo di droni durante la campagna di rilevamento di gennaio 2020 (*Elaborazione propria tramite* QGIS)

In figura 5.1 è raffigurata la posizione dell'opera di presa di Nus sulla Dora Baltea. Inoltre è stato riportato il sottotratto idromorfologicamente omogeneo su cui sono state rilevate, con aerei a pilotaggio remoto (APR), le ortofoto e su cui è stato costruito il modello idraulico bidimensionale (vedasi l'area gialla in figura 5.1). Per la corretta valutazione della variazione spazio-temporale dell'habitat fluviale, il Manuale LG ISPRA 154/2017 [Vezza et al., 2017] consiglia di avere almeno tre rilevamenti idro-morfologici, costituiti da una portata misurata in ingresso, dalla distribuzione delle UMI presenti e da misure puntuali di velocità, profondità e substrato.

Per ovviare alla difficoltà che possono incontrare gli operatori nell'eseguire il rilievo idro-morfologico, a causa delle difficoltà di accesso al corso d'acqua e alle problematiche legate alle condizioni di deflusso elevate, è necessario cercare di minimizzare il numero di rilievi in campo.

Per questo motivo, nel caso studio presentato, si è seguita una procedura che prevede l'esecuzione di un solo rilievo idro-morfologico in campo attraverso aerei a pilotaggio remoto APR (vedasi capitolo 5.1). In questa fase sono state acquisite sia la portata presente in alveo sia ortofoto ad alta risoluzione sia il modello digitale del terreno (DTM).

Successivamente, grazie al software *HEC-RAS*, è stato possibile costruire un modello idraulico bidimensionale che ha permesso di quantificare la variazione spazio-temporale di profondità e velocità nel tratto analizzato, per diverse condizioni di portata.

In questa maniera, è stato possibile analizzare sei condizioni di flusso diverse, ognuna delle quali caratterizzata dalla propria distribuzione di Unità Morfologiche Idrauliche, velocità, profondità e substrato.

## 5.1 Rilevamento dati

Il 26 gennaio 2021, durante una campagna di rilevamento dati, sono state raccolte le informazioni necessarie per definire e validare il modello idrodinamico bidimensionale.

In particolare, sono state eseguiti due tipologie di rilevamento:

- 1. Rilevamento per mezzo di aerei a pilotaggio remoto APR: è stato eseguito un rilievo fotogrammetrico ad alta risoluzione (due e dieci centimetri) dell'area interessata dallo studio. In questa maniera si sono acquisite le ortofoto ad alta risoluzione e il DSM, dal quale è stato ricavato il DTM utilizzato in HEC-RAS.
- 2. *Rilievo con ecoscandaglio*: lo strumento utilizzato (*RiverSurveyor M9*) consiste in un piccolo battello che, grazie a un Acoustic Doppler Current Profiler (ADP), è in grado di rilevare puntualmente la profondità e la velocità di una sezione del corso d'acqua. Inoltre, i punti rilevati vengono georeferenziati grazie a un'antenna GNSS (Global Navigation Satellite System) a doppia frequenza.

## 5.1.1 Rilevamento batimetrico

In immagine 5.2 sono raffigurati i transetti, rilevati dall'ecoscandaglio, sui quali si sono misurate velocità, profondità e portata. Nello specifico, sono state eseguite cinque misure per rilevare la portata e cinque per la batimetria di alcune sezioni del fiume.

In questa maniera è stato possibile correggere il DSM acquisito per mezzo di aerei a pilotaggio remoto APR e ottenere il DTM.



Figura 5.2: Rilevamenti eseguiti con *RiverSurveyor M9* nel tratto di Dora Baltea nei pressi di Nus, interessato dallo studio (*Elaborazione propria tramite* QGIS)

In immagine 5.3 è riportato un esempio della schermata del software *RiverSurveyor* che riporta tutti i parametri acquisiti dal *RiverSurveyor M9* durante il rilevamento di un singolo transetto.



**Figura 5.3:** Esempio dei dati rilevati attraverso il battello all'interno del software *RiverSurveyor* (*Elaborazione propria tramite* RiverSurveyor)

La schermata può essere suddivisa in quattro porzioni distinte:

- A destra in alto è riportato il profilo della profondità misurata dall'ecoscandaglio lungo il transetto;
- A destra al centro è riportata la traccia GPS lungo cui si è mosso il battello durante il rilevamento;
- A destra in basso è rappresentata la sezione del corso d'acqua rilevata e la distribuzione delle velocità misurate con l'ADP lungo il transetto;
- A sinistra sono raccolti gli altri dati registrati dalla strumentazione durante l'esecuzione del rilievo, tra cui la portata presente in alveo.

## 5.1.2 Correzione del DTM

Il DSM acquisito dal drone non rappresenta la reale forma dell'alveo della della Dora Baltea a causa della rifrazione. Infatti, la superficie dell'acqua provoca un distorsione della luce, che altera la reale conformazione dell'alveo rilevata dal drone.

Grazie all'utilizzo di un modello di regressione lineare tra i dati batimetrici dell'ecoscandaglio (considerati come reali) e il rilievo puntuale eseguito dal drone, è possibile definire il *DTM corretto*, che costituisce la base geometrica sul quale si va a costruire il modello idrodinamico in *HEC-RAS*.

## 5.2 Il software HEC-RAS

Il software utilizzato per definire il modello idrologico è $H\!E\!C\text{-}R\!AS$  (Hydrologic Engineering Center River Analysis System), sviluppato da US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources - Hydrologic Engineer Center (HEC).

All'interno del software è possibile eseguire calcoli monodimensionali in stato stazionario e mono/bidimensionale in stato non stazionario. In entrambi i casi è necessario definire la geometria dell'area di studio e impostare le routine di calcolo necessarie a determinare le condizioni idrodinamiche (profondità e velocità) che caratterizzano il tratto di fiume in esame. [Brunner, 2016]

Nel presente elaborato è stata sviluppata una modellazione idrodinamica bidimensionale in stato non stazionario. Gli input richiesti da $HEC\text{-}RAS\,$  per la definizione del modello, sono:

1. *DTM corretto*: costituisce la base geometrica su cui vengono eseguiti i calcoli dal software (vedasi capitolo 5.1);

- 2. *Geometria* del sottotratto idromorfologicamente omogeneo in cui simulare le condizioni idrodinamiche (profondità e velocità) a diverse condizioni di portata e definizione della pendenza del tratto in esame;
- 3. *Coefficiente di Manning*: si tratta dell'inverso del coefficiente di Strickler, definisce la scabrezza del tratto di fiume;
- 4. *Portata* in ingresso nell'area in esame;
- 5. *Impostazioni di calcolo*: si definiscono il time step e il numero di Courant con cui viene eseguita la simulazione.

L'obiettivo è quello di costruire un modello che rappresenti al meglio il tratto di fiume in esame al momento del rilievo. A tal fine, la procedura che si è seguita prevede di far variare uno qualsiasi dei dati di input e quindi procedere con la validazione del modello usando i dati di profondità e velocità rilevati. Si ripete questa sequenza sino al raggiungimento di un accuratezza del modello ritenuta accettabile.

Nel caso in esame è stato deciso di fissare la geometria, la pendenza del tratto, le impostazioni di calcolo e far variare solo portata e coefficiente di Manning all'interno di range definiti a priori:

- Durante il rilievo batimetrico si è misurato una portata compresa tra  $6.2 m^3/s$  e  $6.5 m^3/s$ .
- A partire dalla tipologia del tratto di alveo in esame si ritiene che il coefficiente di Manning possa variare tra 0.040 e 0.045.

In prima analisi è stata verificata la portata presente in alveo al momento del rilievo. In seguito è stato assegnato il coefficiente di Manning eseguendo una validazione con i dati misurati durante il rilievo.

A questo punto, definito e validato il modello, è possibile far variare la portata in ingresso e simulare le condizioni idrodinamiche (profondità e velocità) in diverse condizioni di portata.

## 5.2.1 Creazione del modello

Sulla base del DTM corretto (vedasi capitolo 5.1) è stata definita la geometria su cui sviluppare il modello idrodinamico (vedasi immagine 5.4). Si tratta di un area sufficientemente ampia tale da comprendere tutta la sezione di alveo normalmente interessata dalla presenza di acqua, in condizioni di piena ordinaria.



**Figura 5.4:** Geometria e Boundary Condition su cui è stato definito il modello idrodinamico su *HEC-RAS* (*Elaborazione propria tramite* QGIS)

Inoltre, in questa fase sono state definite le **Boundary Condition** (BC) di monte e valle del sottotratto analizzato. In immagine 5.4 sono rappresentate dalle linee rosse:

- Sezione di Monte è caratterizzata da una pendenza pari a 0.1 %, si è scelta una BC detta "*Flow Hydrograph*": si è definita una portata in ingresso costante per tutto il periodo di analisi.
- Sezione di Monte è caratterizzata da una pendenza pari a 0.15 %, si è scelta una BC detta "Normal Depth Downstream".

A questo punto, l'ultimo aspetto che resta da impostare sono i parametri che definiscono l'analisi di flusso non stazionario:

• Si sono scelte le equazioni complete di Saint Venant ("Full momentum equation") per la soluzione del modello bidimensionale in stato non stazionario.
- L'*intervallo di tempo* di durata della simulazione: deve essere sufficiente lungo da permettere il raggiungimento dello stato stazionario in tutto il sottotratto considerato.
- Le impostazioni di calcolo e la definizione del numero di Courant impostate sono riportate in immagine 5.5.

Starting Date:     1.4482021     Image Date:     Image Date:     1.4482021     Image Date:     Image Date:     1.4482021     Image Date:     Image Date: <th>Unsteady Flow Analysis       X         File Options Help       Short ID: [Q6-2,m0.041         Geneticy File:       Doxabilities_Jika_m0.041         Unsteady Flow File:       BC Q6-2m3/b         POrgonis B Lan       Rescription         Volumetry File:       BC Q6-2m3/b         Volumetry File:       BC Q6-2m3/b         Volumetry File:       BC Q6-2m3/b         Volumetry File:       Smalatore con Q-6.2m3/b e marring 0.041         Volumetry File:       Smalatore con Q-6.2m3/b e marring 0.041         Volumetry File:       Smalatore con Q-6.2m3/b e marring 0.041</th> <th colspan="5">HEC-RAS Unsteady Computation Options and Tolerances General 20 How Options 10/20 Options Advanced Time Step Canthol 10 Maxed How Options C Read Time Step Basic method) S. Second C Adjust Time Step Basic and Courant I I Number of ratings below Minium before doubling 2 D/00 sec Maximum number of failings below them estigs: 2 D/00 sec Courant Methodody C C Courant Methodod</th>	Unsteady Flow Analysis       X         File Options Help       Short ID: [Q6-2,m0.041         Geneticy File:       Doxabilities_Jika_m0.041         Unsteady Flow File:       BC Q6-2m3/b         POrgonis B Lan       Rescription         Volumetry File:       BC Q6-2m3/b         Volumetry File:       BC Q6-2m3/b         Volumetry File:       BC Q6-2m3/b         Volumetry File:       Smalatore con Q-6.2m3/b e marring 0.041         Volumetry File:       Smalatore con Q-6.2m3/b e marring 0.041         Volumetry File:       Smalatore con Q-6.2m3/b e marring 0.041	HEC-RAS Unsteady Computation Options and Tolerances General 20 How Options 10/20 Options Advanced Time Step Canthol 10 Maxed How Options C Read Time Step Basic method) S. Second C Adjust Time Step Basic and Courant I I Number of ratings below Minium before doubling 2 D/00 sec Maximum number of failings below them estigs: 2 D/00 sec Courant Methodody C C Courant Methodod				
OK Carke Defauls	Starting Date: 14/EB3221 Starting Time: 15:00 Ending Date: 14/EB3221 Starting Time: 19:00 Computation Settings Computation Interval: 0.5 Second Uniterval: 00 Minute Uniterval: 0	• The Step Date(d9994yyy hhm)         Driver           1         -           3         -           4         -           5         -           7         -           8         -				

**Figura 5.5:** Le impostazioni di calcolo definite all'interno dell'*Unsteady Flow Analysis*: durata della simulazione, intervallo di tempo, time step e numero di Courant

# 5.3 Validazione della portata misurata

Durante i rilievi batimetrici si è notata una leggera oscillazione della portata misurata tra  $6.2 m^3/s$  e  $6.5 m^3/s$ . Pertanto, la prima analisi che si è eseguita è stata una validazione della portata presente in alveo al momento del rilievo batimetrico.





**Figura 5.6:** Distribuzione di velocità e profondità, simulate con *HEC-RAS* per Q = 6.2 $m^3/s$  e *Coefficiente di Manning 0.040 (Elaborazione propria tramite* QGIS)

In particolar modo, si è deciso di eseguire quattro simulazioni con diversi valori di portata e coefficiente di Manning. Per ognuna si sono estratte le distribuzioni spaziali delle condizioni idrodinamiche simulate:

- $Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.040;
- $Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.045;
- $Q = 6.5 \ m^3/s$ , Manning 0.040;
- $Q = 6.5 \ m^3/s$ , Manning 0.045.

A titolo di esempio, in immagine 5.6, sono riportati i risultati ottenuti per portata  $6.2 m^3/s$  e coefficiente di Manning 0.040. Le classi di velocità e profondità sono state definite come descritto nel Manuale LG ISPRA 154/2017 [Vezza et al., 2017]:

- Profondità: suddivisione in nove classi definite da intervalli di 15 cm, fino a ≥ 120 cm;
- Velocità: suddivisione in nove classi definite da intervalli di 15 cm/s, fino a ≥ 120 cm/s.

Al fine di validare la portata presente in alveo al momento del rilievo, si sono generati gli scatter plot tra le condizioni idrodinamiche simulate con HEC-RAS e rilevate.

Inoltre, al fine di valutare la bontà del modello costruito e verificare la correlazione tra i dati, si calcolano l'**Errore Quadratico Medio** (*RMSE*, equazione 5.1) e il **Coefficiente di determinazione** ( $R^2$ , equazione 5.2):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (OBS_i - SIM_i)^2}{N}}$$
(5.1)

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (OBS_{i} - SIM_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (OBS_{i} - \overline{OBS})^{2}}$$
(5.2)



**Figura 5.7:** Validazione dei dati di profondità simulata per la verifica della portata presente in alveo al momento del rilievo (*Elaborazione propria tramite* MatLab)

In figura 5.7 e 5.8 sono rappresentati, rispettivamente, gli scatter plot di validazione per le profondità e le velocità estratte dalle quattro simulazioni di HEC-RAS effettuate. Si può notare che la validazione delle profondità mostra una maggiore correlazione rispetto a quella delle velocità.

In tabella 5.1 sono riportata i valori di RMSE e  $R^2$  ottenuti dai dati estratti dalle diverse simulazioni. Anche in questo caso, è possibile notare la maggior correlazione nel caso delle profondità. Infatti, si può notare che RMSE risulta sempre maggiore di 0.9, mentre nel caso delle velocità oscilla intorno a 0.6.



Figura 5.8: Validazione dei dati di velocità simulata per la verifica della portata presente in alveo al momento del rilievo (*Elaborazione propria tramite* MatLab)

In conclusione, gli indici di performance calcolati hanno permesso di validare la portata misurata durante il rilievo. Si è deciso di considerare una portata pari a  $6.2 \ m^3/s$  come valore presente in alveo durante il rilievo del 26 gennaio 2020.

 
 Tabella 5.1: Indici di performance ottenuti per la validazione della portata al momento del rilievo batimetrico

	Profondità		Velocità	
	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$
$Q = 6.2 \ m^3/s, \ Manning \ 0.040$	0.917	0.129	0.617	0.108
$Q = 6.2 \ m^3/s, \ Manning \ 0.045$	0.921	0.126	0.626	0.107
$Q = 6.5 \ m^3/s, \ Manning \ 0.040$	0.915	0.131	0.565	0.115
$Q = 6.5 \ m^3/s, \ Manning \ 0.045$	0.921	0.126	0.630	0.106

# 5.4 Definizione coefficiente di Manning

Al fine di determinare il **coefficiente di Manning** che caratterizza il sottotratto di Dora Baltea posto a valle della presa di Nus, nel presente elaborato, sono state applicate due diverse procedure:

- Validazione del modello idrodinamico bidimensionale di HEC-RAS: a seguito della definizione di alcuni possibili valori del coefficiente, si è seguita una procedura di validazione simile a quella vista per la portata misurata (capitolo 5.3);
- 2. **Calcolo analitico**: si procede alla sostituzione dei dati misurati dall'ecoscandaglio durante il rilievo batimetrico nella *formula di Chezy* (equazione 5.3).

## 5.4.1 Validazione dei dati simulati

Definita la portata in ingresso nel "*Flow Hydrograph*" della BC di monte a  $6.2 m^3/s$  e considerando un range di variazione del coefficiente di Manning tra 0.040 e 0.045, sono state definite sei simulazioni:

- $Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.040;
- $Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.041;
- $Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.042;
- $Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.043;
- $Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.044;
- $Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.045.

Le condizioni idrodinamiche di profondità e velocità, simulate da HEC-RAS per i sei valori di coefficiente di Manning selezionati, sono state validate con le misure eseguite dall'ecoscandaglio.

La validazione dei dati è stata fatta in maniera del tutto simile a quanto visto nel caso della portata (vedasi capitolo 5.3). In particolare, si sono costruiti gli scatter plot tra i dati simulati con HEC-RAS e quelli misurati durante il rilievo del sottotratto sia per le profondità (figura 5.9) sia per le velocità (figura 5.10).

Inoltre, per valutare la correlazione tra dati simulati e misurati sono stati calcolati gli indici di performance RMSE e  $R^2$ . I valori calcolati per le sei simulazioni sono stati raccolti in tabella 5.2.

	Profondità		Velocità	
	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$
$Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.040	0.917	0.129	0.617	0.108
$Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.041	0.918	0.128	0.621	0.107
$Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.042	0.919	0.127	0.624	0.107
$Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.043	0.920	0.127	0.625	0.107
$Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.044	0.920	0.127	0.626	0.107
$Q = 6.2 \ m^3/s$ , Manning 0.045	0.921	0.126	0.626	0.107

**Tabella 5.2:** Indici di performance ottenuti per la validazione del coefficiente di Manning del tratto di Dora Baltea nei pressi di Nus

In conclusione, dati gli scatter plot generati (figura 5.9 e 5.10) e gli indici di performance calcolati (tabella 5.2) è possibile fare alcune considerazioni:

- Negli scatter plot, all'aumentare del coefficiente di Manning, si può notare un aumento delle profondità simulate (figura 5.9) e una diminuzione delle velocità (figura 5.10);
- Gli indici di performance (vedasi tabella 5.2) restituiscono maggiore correlazione tra i dati simulati e misurati nel caso delle profondità: RMSE > 0.9, rispetto alle velocità  $RMSE \approx 0.6$ .



**Figura 5.9:** Validazione dei dati di profondità simulata per la definizione della portata del coefficiente di Manning della Dora Baltea nel tratto di Nus (*Elaborazione propria tramite* MatLab)



**Figura 5.10:** Validazione dei dati di velocità simulata per la definizione del coefficiente di Manning della Dora Baltea nel tratto di Nus (*Elaborazione propria tramite* MatLab)

#### 5.4.2 Calcolo analitico

Il coefficiente di Manning (n) può essere ottenuto dalla formula di Chezy:

$$Q = \Omega * \frac{R^{1/6}}{n} * \sqrt{R * i_f} \tag{5.3}$$

Dove  $\Omega$  è l'area bagnata  $(m^2)$ , R è il raggio idraulico (m), Q è la portata  $(m^3/s)$  e  $i_f$  è la pendenza dell'alveo.

I parametri  $\Omega$ ,  $R \in Q$ , necessari per il calcolo del coefficiente di Manning, possono essere facilmente ottenuti dai dati raccolti durante i rilievi di portata eseguiti con *RiverSurveyor*; mentre la pendenza dell'alveo, nel tratto di interesse, viene estratta tramite l'analisi del DTM.



**Figura 5.11:** Zoom sul profilo del transetto rilevato per la misura della portata (*Elaborazione propria tramite* RiverSurveyor)

In immagine 5.11 è possibile vedere l'area bagnata, rilevata dall'ADP di *RiverSurveyor M9* lungo un transetto, rispetto alla reale posizione del fondo dell'alveo.  $\Omega$  viene calcolata sommando la superficie di tutte le celle all'interno delle quali è stata rilevata la velocità dall'ADP.

Tuttavia, come si può notare dall'immagine 5.11, lo strumento non è in grado di rilevare la velocità nella zona più prossima al fondo dell'alveo. Pertanto, l'area bagnata misurata con *RiverSurveyor M9* risulta inferiore rispetto a quella reale.

Per questo motivo, grazie ad un opportuno codice *MatLab* (vedasi appendice D), è stato deciso di calcolare analiticamente l'area e il perimetro bagnato a partire dalla profondità rilevata dall'ADP.

File Rilievo	$Q \ (m^3/s)$	$\begin{array}{c} \Omega_{mis} \\ (m^2) \end{array}$	$\begin{array}{c} \Omega_{cal} \\ (m^2) \end{array}$	$egin{array}{c} R_{mis} \ (m) \end{array}$	$egin{array}{c} R_{cal} \ (m) \end{array}$	<i>i<sub>f</sub></i> (-)	$n_{mis}$ (-)	$\binom{n_{cal}}{(-)}$
20210126102725 20210126103052 20210126103451 20210126112832 20210126113426	$\begin{array}{c} 6.235 \\ 6.421 \\ 6.273 \\ 6.607 \\ 6.268 \end{array}$	10.474 10.920 10.874 23.849 23.722	$10.559 \\ 10.614 \\ 10.778 \\ 27.560 \\ 24.027$	$\begin{array}{c} 0.546 \\ 0.583 \\ 0.592 \\ 0.782 \\ 0.921 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.551 \\ 0.567 \\ 0.587 \\ 0.904 \\ 0.933 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.0013 \\ 0.0013 \\ 0.0013 \\ 0.020 \\ 0.020 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.040 \\ 0.043 \\ 0.044 \\ 0.433 \\ 0.507 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.041 \\ 0.041 \\ 0.043 \\ 0.552 \\ 0.518 \end{array}$

Tabella 5.3: Calcolo del coefficiente di Manning

In tabella 5.3 è possibile notare che la differenza tra l'area bagnata calcolata oppure estratta da *RiverSurveyor* non sia trascurabile. Questo è il motivo che causa la disparità nei valori del coefficiente di Manning ottenuto con le due procedure.

Inoltre, è possibile notare che in due dei cinque rilievi il coefficiente di Manning presenta un ordine di grandezza maggiore rispetto agli altri casi. Ciò è dovuto dalla pendenza dell'alveo che è stata estratta con *HEC-RAS*. Per questo motivo si è deciso di non considerare questi valori nella determinazione del coefficiente di Manning.

In conclusione, a partire dai valori di Manning calcolato (ultima colonna di tabella 5.3) e dai risultati ottenuti dalle simulazioni presentate all'interno del capitolo 5.4.1, si è deciso di assegnare un coefficiente di Manning pari a **0.041** per il sottotratto idromorfologicamente omogeneo di Dora Baltea oggetto di analisi.

# 5.5 Modellazione dell'area bagnata

A questo punto sono stati individuati tutti i dati di input necessari alla definizione del modello idrodinamico bidimensionale, con il quale è possibile analizzare la variazione di profondità, velocità e area bagnata a diverse condizioni di portata.

In particolar modo, si è deciso di simulare le condizioni idrodinamiche del sottotratto in sei diverse condizioni di portata. Inoltre, si riporta la diversa durata delle simulazioni necessaria al raggiungere dello stato stazionario:

- Portata  $3.8 m^3/s$  (durata simulazione 4 h): si tratta del Deflusso Minimo Vitale che deve essere presente in questo tratto;
- Portata  $6.2 m^3/s$  (durata della simulazione 4 h): sono le condizioni di flusso misurate al momento del rilievo;
- Portata  $10 m^3/s$  (durata simulazione 3 h);
- Portata  $20 m^3/s$  (durata simulazione 2.5 h);
- Portata  $50 m^3/s$  (durata simulazione 2 h);
- Portata  $75 m^3/s$  (durata simulazione 1.5 h).

Le condizioni idrodinamiche simulate (area bagnata, distribuzione di velocità e profondità) per le diverse condizioni di portata risultati ottenuti, costituiscono i dati di input utilizzati nella metodologia *MesoHABSIM* [Vezza et al., 2017].

Nelle immagini 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 si riportano le distribuzioni di velocità e profondità simulate, per ogni valore di portata considerata, classificate utilizzando le nove classi di velocità e profondità descritte nel Manuale LG ISPRA 154/2017 [Vezza et al., 2017].

Si può notare che, all'aumentare della portata, si ha un aumento delle velocità e profondità simulate. Inoltre, quando la portata supera i  $50 m^3/s$ , la quasi totalità dell'area bagnata tende verso il colore rosso, ossia verso le classi caratterizzate da velocità (v > 120 cm/s) e profondità maggiori (d > 1.20 m).

# 5.5.1 Portata 3.8 $m^3/s$



(b) Distribuzione di velocità

**Figura 5.12:** Distribuzione delle profondità e velocità simulate per portata  $3.8m^3/s$  e coefficiente di Manning 0.041 *(Elaborazione propria tramite* QGIS)

# 5.5.2 Portata $6.2 \text{ m}^3/\text{s}$



(b) Distribuzione di velocità

**Figura 5.13:** Distribuzione delle profondità e velocità simulate per portata  $6.2m^3/s$  e coefficiente di Manning 0.041 *(Elaborazione propria tramite* QGIS)

# 5.5.3 Portata 10 $m^3/s$



(b) Distribuzione di velocità

**Figura 5.14:** Distribuzione delle profondità e velocità simulate per portata  $10m^3/s$  e coefficiente di Manning 0.041 *(Elaborazione propria tramite* QGIS)

# 5.5.4 Portata 20m<sup>3</sup>/s



(b) Distribuzione di velocità

**Figura 5.15:** Distribuzione delle profondità e velocità simulate per portata  $20m^3/s$  e coefficiente di Manning 0.041 *(Elaborazione propria tramite* QGIS)

# 5.5.5 Portata 50 $m^3/s$



(b) Distribuzione di velocità

**Figura 5.16:** Distribuzione delle profondità e velocità simulate per portata  $50m^3/s$  e coefficiente di Manning 0.041 *(Elaborazione propria tramite* QGIS)

# 5.5.6 Portata 75 $m^3/s$



(b) Distribuzione di velocità

**Figura 5.17:** Distribuzione delle profondità e velocità simulate per portata  $75m^3/s$  e coefficiente di Manning 0.041 *(Elaborazione propria tramite* QGIS)

# 6 Applicazione della metodologia MesoHABSIM

Le condizioni idrodinamiche (profondità e velocità), simulate con *HEC-RAS* alle diverse condizione di portata (vedasi capitolo 5.5), costituiscono la base su cui si applica la metodologia *MesoHABSIM* (vedasi capitolo 3.2).

All'interno del presente capitolo è descritta la definizione dei parametri di input nel sottotratto idro-morfologicamente omogeneo oggetto di studio:

- 1. Definizione delle **Unità Morfologiche Idrauliche** (UMI) per ogni condizione di portata considerata (vedasi capitolo 6.1);
- 2. Definizione del **substrato** presente nel sottotratto idromorfologicamente omogeneo in esame (vedasi capitolo 6.2);
- 3. Individuazione delle **specie target** significative per il tratto in esame (vedasi capitolo 6.3).

A questo punto, utilizzando il servizio *SimStream* Web, è possibile caricare i parametri di input definiti e procedere alla quantificazione della variazione spazio-temporale dell'habitat fluviale. In particolare, il software richiede l'inserimento dei dati in formati ben definiti:

- **Definizione del sito oggetto dallo studio**: nome del fiume, tratto in esame e localizzazione dello stesso (Stato, regione e comune);
- **Data** di svolgimento del rilievo;
- Caricamento dei dati idro-morfologici:
  - Inserimento della portata  $(m^3/s)$  simulata;
  - Caricamento dello *shapefile* con le UMI individuate;
  - Caricamento del *file di testo* (detto *MEAS*) contente le misure puntuali (espresse in termini percentuali) di profondità, velocità e substrato che caratterizzano ogni UMI individuata (vedasi capitolo 6.4);

• Definizione delle *specie ittiche target* e dello stadio vitale scelto come target.

In seguito è possibile scaricare e analizzare i tre output restituiti da *SimStream* e verificare la coerenza variazione spazio-temporale dell'habitat fluviale calcolata:

- 1. Mappe di idoneità di habitat;
- 2. Habitat disponibile  $(H_d)$ ;
- 3. Curve habitat-portata;

# 6.1 Definizione delle Unità Morfologiche Idrauliche

L'identificazione e il riconoscimento delle Unità Morfologiche Idrauliche (UMI) costituisce il primo step della procedura descritta nel Manuale ISPRA 154/2017 [Vezza et al., 2017] per l'applicazione della metodologia *MesoHABSIM*. Nel caso in esame l'area bagnata, ottenuta a diversi condizioni di portata grazie al modello costruito con *HEC-RAS*, costituisce la superficie sulla quale vengono individuate le UMI.

Per ogni condizione di portata considerata, attraverso l'analisi delle distribuzioni di velocità e profondità simulate dal software e dalle ortofoto rilevate con drone, è stato possibile individuare cinque diverse tipologie di UMI (per la descrizione dettagliata, vedasi Appendice A):

- 1. **Backwater**: si tratta di rami di corso d'acqua in cui la velocità dell'acqua è quasi nulla e la profondità è molto bassa. Si può trattare anche di zone di alveo in cui si ha una risalita dell'acqua da valle.
- 2. *Glide*: unità caratterizzate da un profilo longitudinale del fondo e del pelo libero piuttosto regolare.
- 3. **Pool**: depressioni del fondo dell'alveo, sono caratterizzate da tiranti idraulici elevati e velocità ridotte.
- 4. *Rapid*: unità di alvei alluvionali caratterizzate da massi e ciottoli di grandi dimensioni parzialmente organizzati in linee irregolari.
- 5. *Riffle*: unità caratterizzate da flusso meno profondo e più veloce rispetto alle unità contigue.

## 6.1.1 Portata 6.2 $m^3/s$

Si individuano le Unità Morfologiche Idrauliche presenti in alveo al momento del rilievo idro-morfologico, ossia con una portata pari a  $6.2 m^3/s$ . La distribuzione delle 29 UMI individuate in questa condizione rappresenta un riferimento per le successive simulazioni.



**Figura 6.1:** UMI definite per l'area bagnata ottenuta con una portata di  $6.2 m^3/s$  (*Elabora*zione Propria tramite QGIS)

In questo caso sono state individuate quattro tipologie di Unità Morfologiche Idrauliche:

- 1. Glide;
- 2. Pool;
- 3. Rapid;
- 4. Riffle.

## 6.1.2 Portata $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$

La seconda condizione di flusso analizzata è il Deflusso Minimo Vitale rilasciato nella Dora Baltea a valle della presa sulla Dora Baltea della centrale di Saint-Clair:  $3.8 m^3/s$ .



Figura 6.2: UMI definite per l'area bagnata ottenuta con una portata di 3.8 $m^3/s$  (Elaborazione Propria tramite  $\mathsf{QGIS})$ 

La riduzione della portata provoca una riduzione di area bagnata, velocità e profondità simulata. Per questo motivo, è possibile osservare che alcune aree di alveo, precedentemente inondate, risultano ora asciutte e alcune UMI cambiano tipologia passando da *Glide* a *Riffle*.

Rispetto alla condizione di riferimento, le UMI identificate sono 24, suddivise in cinque tipologie. Oltre alle quattro individuate per portata  $6.2 m^3/s$ , si introduce anche *Backwater*:

- 1. Glide;
- 2. Pool;
- 3. Rapid;
- 4. Riffle;
- 5. Backwater.

## 6.1.3 Portata 10 $m^3/s$

La terza condizione analizzata vede un leggero aumento della portata, rispetto alle condizioni di riferimento, raggiungendo i  $10 m^3/s$ .



**Figura 6.3:** UMI definite per l'area bagnata ottenuta con una portata di  $10 m^3/s$  (*Elabora-zione Propria tramite* QGIS)

In immagine 6.3 si può notare che, nonostante l'aumento contenuto della portata, si ha un incremento non trascurabile dell'area bagnata. Per questo motivo si ha sia un aumento del numero di UMI sia di superficie di quelle individuate nella prima simulazione.

In questo caso, sono state individuate 35 Unità Morfologiche Idrauliche. La distribuzione delle tipologie di UMI identificate è simile a quanto visto per la simulazione con portata  $6.2 m^3/s$ . Come per il caso del Deflusso Minimo Vitale sono state identificate cinque tipi di UMI:

- 1. Glide;
- 2. Pool;
- 3. Rapid;
- 4. Riffle;
- 5. Backwater.

## 6.1.4 Portata 20 $^3/s$

La quarta condizione di flusso considerata prevede un ulteriore aumento di portata fino a  $20 m^3/s$ .



Figura 6.4: UMI definite per l'area bagnata ottenuta con una portata di 20 $m^3/s$  (Elaborazione Propria tramite  $\mathsf{QGIS})$ 

In immagine 6.4 si può notare che l'aumento di area bagnata, causa l'apertura di nuovi canali e l'ampliamento della superficie occupata dalle singole Unità Morfologiche Idrauliche.

In questo caso sono state individuate 34 UMI, che sono state nuovamente suddivise in cinque tipologie:

- 1. Glide;
- 2. Pool;
- 3. Rapid;
- 4. Riffle;
- 5. Backwater.

## 6.1.5 Portata 50 $m^3/s$

La quinta condizione di flusso considerata è caratterizzata da un considerevole aumento della portata fino a raggiungere i  $50 m^3/s$ .



**Figura 6.5:** UMI definite per l'area bagnata ottenuta con una portata di 50 $m^3/s$  (*Elabora-zione Propria tramite* QGIS)

Come si può notare in immagine 6.5, si rileva un notevole aumento dell'area bagnata e un omogenizzazione della distribuzione delle Unità Morfologiche Idrauliche.

Sono state individuate 27 UMI, caratterizzate da una dimensione maggiore rispetto alle simulazioni precedenti e suddivise in cinque tipologie:

- 1. Glide;
- 2. Pool;
- 3. Rapid;
- 4. Riffle;
- 5. Backwater.

## 6.1.6 Portata 75 $m^3/s$

In ultima analisi si considera un ulteriore aumento di  $25 m^3/s$  della portata, raggiungendo così i  $75 m^3/s$ .



**Figura 6.6:** UMI definite per l'area bagnata ottenuta con una portata di 75 $m^3/s$  (*Elabora-zione Propria tramite* QGIS)

Come si può notare in immagine 6.6, l'area bagnata occupa ora quasi interamente l'alveo della Dora Baltea nei pressi di Nus. Rispetto alla condizione precedente, si sono aperti alcuni nuovi canali nella zona più a valle del tratto considerato.

Sono state individuate 27 UMI, appartenenti alle quattro tipologie individuate per la condizione di flusso presente al momento del rilievo:

- 1. Glide;
- 2. Pool;
- 3. Rapid;
- 4. Riffle.

Inoltre, si può notare che la distribuzione delle diverse tipologie di UMI individuate è simile alla condizione di  $50 m^3/s$ .

#### 6.1.7 Definizione della tabella attributi

La tabella attributi dello *shapefile* delle Unità Morfologiche Idrauliche individuate deve rispettare rigorosamente alcune regole di formattazione per poter essere riconosciuto e accettato da *SimStream*. In particolar modo, deve essere costituito da 15 colonne con un ordine e contenuto ben definito:

- 1. HMU\_NUM indica il numero progressivo della UMI individuata;
- 2. *HMU\_TYPE* indica la tipologia con cui è stata classificata la UMI;
- 3. Z\_MAX è la quota relativa massima del pelo libero all'interno dell'UMI;
- 4. Z\_MIN è la quota relativa minima del pelo libero all'interno dell'UMI;
- 5. *CONNECTIV* indica se la UMI considerata è connessa o meno, a monte o a valle, con le altre Unità individuate nel tratto. Sono accettati solo i valori "*TRUE*" e "*FALSE*";
- 6. Le successive 10 colonne indicano la presenza o meno di determinate caratteristiche che possono costituire un riparo per le specie individuate. Anche in questo caso sono accettati solo i valori "*TRUE*" e "*FALSE*";
  - BOULDER: indica la presenza di roccia;
  - *CANOP\_SHAD*: indica la presenza di vegetazione lungo le sponde, che genera ombra nell'Unità considerata;
  - *OVERHA\_VEG*: indica la presenza di vegetazione che arriva a coprire e toccare il pelo libero lungo le sponde;
  - *ROOTS*: indica la presenza di radici;
  - SUBMER\_VEG: presenza di vegetazione (alghe) sommerse;
  - *EMER\_VEG*: presenza di vegetazione (alghe) emerse;
  - UNDERC\_BAN: le sponde della UMI risultano erose dal passaggio dell'acqua;
  - WOODY\_DEBR: presenza di detriti legnosi nel tratto;
  - *RIPRAP*: presenza di scogliera artificiale lungo le sponde;
  - *SHALL\_MARG*: lungo i bordi della UMI sono presenti condizioni di bassa velocità e profondità.

## 6.2 Definizione del substrato

A questo punto si procede con l'identificazione dei substrati presenti nel tratto in esame. Il Manuale LG ISPRA 154/2017 [Vezza et al., 2017] suggerisce il posizionamento causale di un numero di punti che siano significativi per descrivere il substrato presente nell'UMI, in base alla sua superficie:

- Superficie >  $5 m^2$ : minimo 15 punti per Unità;
- Superficie  $< 5 m^2$ : minimo 7 punti oppure a una densità pari a  $2 punti/m^2$ .

Per questo motivo è stato deciso di individuare il substrato per l'area bagnata di maggior superficie: ossia per la simulazione eseguita con portata di  $75 m^3/s$ .



**Figura 6.7:** Distribuzione dei punti per i quali sono state definite le classi di substrato (*Elaborazione propria tramite* QGIS)

Grazie all'analisi delle ortofoto ad alta risoluzione, tra le 12 classi di substrato descritte nel Manuale di ISPRA, sono state individuati nove tipologie di substrati:

- 1. *Gigalithal*: substrato roccioso;
- 2. Megalithal: detriti con dimensione superiore ai 40 cm;

- 3. Macrolithal: detriti con dimensione compresa tra 20 cm e 40 cm;
- 4. Mesolithal: detriti con dimensione compresa tra 6 cm e 20 cm;
- 5. *Microlithal*: detriti con dimensione compresa tra 2 cm = 6 cm;
- 6. Akal: ghiaia;
- 7. Psammal: sabbia;
- 8. Xylal: detriti di legno o radici;
- 9. Phytal: piante/vegetazione sommersa.

In immagine 6.7 è rappresentata la distribuzione dei punti dove sono state definite le classi di substrato. Si può notare che i punti sono stati distribuiti in modo uniforme e casuale, andando a coprire tutta l'area bagnata simulata a portata  $75 m^3/s$ .

## 6.3 Individuazione delle specie target

In base al contesto ecologico, alla morfologia del tratto e alla valenza eco-sistemica nella gestione ambientale del corso d'acqua, sono state selezionate quattro specie ittiche tra quelle descritte all'interno della Parte B dell'allegato 1 alla parte III del D.Lgs 152/2006, che caratterizzano naturalmente la Dora Baltea nei pressi di Nus. Le singole specie sono state considerate a diversi stadi vitali:

- Trota Fario (Salmo Trutta) stato vitale adulto e giovane;
- Trota Marmorata (Salmo Marmoratus) stato vitale adulto e giovane;
- Vairone (*Telestes muticellus*) stato vitale adulto e giovane;
- Scazzone (*Cottus gobio*) stato vitale adulto;

Di seguito si riporta una breve descrizione delle specie scelte come target. In allegato E sono riportati i modelli statistici *Random Forest* **Presenza/Assenza** utilizzati dal software *SimStream* per la definizione delle mappe di idoneità di habitat.

#### 6.3.1 Trota Fario (Salmo Trutta)

La **Trota Fario** (*Salmo Trutta*) è un tipico Salmonide autoctono delle acque di montagna. Ha una lunghezza tra i 25 e i 35 cm e un peso di circa 3-4 chilogrammi. La dieta è composta soprattutto da macroinvertebrati, ma può comprendere anche piccoli vertebrati, tra cui pesci e anfibi. Predilige corsi d'acqua caratterizzati da acque fredde ed elevate concentrazioni di ossigeno.



**Figura 6.8:** Esemplare di Trota Fario (*Salmo Trutta*) allo stato vitale adulto (*Fonte: Associazione sportiva pescatori solandri, Web*)

Nonostante la specie non sia a rischio estinzione, la sua presenza è fortemente condizionata da fattori di stress di origine antropica: inquinamento, captazione di acque, costruzione di briglie, estrazione di materiale litoide lungo gli alvei e taglio della vegetazione ripariale. Inoltre la specie è soggetta a ingenti prelievi da parte della pesca sportiva.

Per tutti questi motivi, al fine di prevenire la riduzione della popolazione, si interviene con massicci ripopolamenti di pesci provenienti da allevamento. [Regione Emilia Romagna, 1992]

Salmo Trutta è classificata a Rischio minimo (LC) nella Lista Rossa dei Vertebrati italiani [Rondinini et al., 2013].

#### 6.3.2 Trota Marmorata (Salmo Marmoratus)

La **Trota Marmorata** (*Salmo Marmoratus*) è un Salmonide endemico dei principali corsi d'acqua che sfociano nell'alto Mare Adriatico. Predilige acque limpide e fresche (temperatura inferiore ai 18°C), bene ossigenate e con corrente sostenuta, che scorrono su fondi sassosi dove abbondano nascondigli e buche profonde.

Le principali minacce per la *S. Marmoratus* vengono dall'artificializzazione degli alvei, costruzione di sbarramenti, prelievi irrigui ed idroelettrici, inquinamento delle acque, ibridazione con la *S. Trutta* e predazione da parte di aironi e cormorani. [Provincia Autonoma di Trento, 2019]

Per questi motivi, negli ultimi 50 anni il suo areale ha subito una forte riduzione. La Trota Marmorata è stata, quindi, inserita tra le specie minacciate elencate all'appendice II della direttiva Habitat 92/43/CEE ed è



(b) Stato vitale adulto

**Figura 6.9:** Esemplare di Trota Marmorata (*Salmo Marmoratus*) a diversi stati vitali (*Fonte: Associazione sportiva pescatori solandri, Web*)

considerata a Rischio Critico (RC) nella Lista Rossa dei Vertebrati italiani [Rondinini et al., 2013].

#### 6.3.3 Vairone (*Telestes muticellus*)

Il **Vairone** (*Telestes muticellus*) è un piccolo Ciprinide di lunghezza massima 15-20 cm. Predilige acque fresche e ben ossigenate, condivide parzialmente l'habitat con i Salmonidi dei quali ne è una preda.

A causa dell'elevata presenza di briglie e sbarramenti, lavori in alveo, riduzione delle portate e della massiccia introduzione di Salmonidi, la



**Figura 6.10:** Esemplare di Vairone (*Telestes muticellus*) allo stato vitale adulto (*S. Porcellotti, Web*)

#### CAPITOLO 6. APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA MESOHABSIM

specie è attualmente in via di rarefazione all'interno di tutto il suo areale. [Regione Emilia Romagna, 1992]

Nonostante il *Telestes muticellus* sia classificato a Rischio minimo (LC), all'interno della Lista Rossa dei Vertebrati italiani [Rondinini et al., 2013], poichè è una delle specie maggiormente sensibili alla qualità delle acque, la specie va opportunamente tutelata anche dove non si riscontra riduzione della popolazione. In particolar modo è necessario prestare maggiore attenzione nei mesi estivi, quando le eccessive captazioni idriche interrompono la continuità dei corsi d'acqua secondari dove il pesce è maggiormente presente.

#### 6.3.4 Scazzone (Cottus gobio)



**Figura 6.11:** Esemplari di Scazzone (*Cottus gobio*) allo stato vitale adulto (*Hans Hillewaert, Wikipedia*)

Lo **Scazzone** (*Cottus gobio*) è l'unico pesce della famiglia dei Cottidi presente nelle acque dolci italiane. Si tratta di un pesce di fondo, poco resistente al nuoto. Predilige le acque correnti, fresche e ossigenate, con fondali sabbiosi ricchi di ghiaia.

Data la sua elevata esigenza ambientale, è considerato un buon indicatore biologico della qualità delle acque. A causa del peggioramento delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque, ad interventi antropici di vario tipo (modifica della composizione del fondo e del regime idrologico) e all'introduzione massiccia di Salmonidi (predano gli esemplari più giovani ed entrano in competizione alimentare con gli adulti), negli ultimi decenni si è registrato un costante peggioramento dello stato delle popolazioni in tutto l'areale italiano.

La specie è stata inserita nell'allegato II della Direttiva 92/43 Habitat ed è stata classificata a Rischio minimo (LC) nella Lista Rossa dei Vertebrati italiani [Rondinini et al., 2013].

# 6.4 Definizione dei dati idro-morfologici puntuali all'interno delle UMI

A questo punto si procede con la definizione dei dati idro-morfologici puntuali che caratterizzano le singole UMI. Come descritto nel Manuale LG ISPRA 154/2017 [Vezza et al., 2017], è necessario individuare un minimo di 15 punti per ogni Unità e comunque non scendere al di sotto di una densità di  $2 punti/m^2$ . Ogni punto individuato deve contenere tre diversi parametri:

- 1. Profondità dell'acqua: classificata in 9 classi, ognuna definita da un intervallo di 15 cm fino a profondità  $\geq 120 \, cm$ ;
- 2. Velocità della corrente: classificata in 9 classi, ognuna definita da un intervallo di 15 cm/s fino a velocità  $\geq 120 cm/s$ ;
- 3. Substrato: classificato in 12 classi (vedasi capitolo 6.2).

Per estrarre ed assegnare in ogni condizione di deflusso e ad ogni UMI i dati di velocità, profondità e substrato è stato utilizzato lo strumento **Zonal Histogram** di **ArcMap**.

Innanzitutto è necessario andare a definire i parametri di input necessari allo strumento per estrarre i dati idro-morfologici:

- Lo *shapefile* contenente la mappa delle Unità Morfologiche Idrauliche individuate per una data condizione di deflusso;
- I *raster* delle distribuzioni di velocità o profondità simulate o dei substrati individuati, classificati come descritto nel Manuale *MesoHABSIM* [Vezza et al., 2017].

Zonal Histogram, per ogni UMI individuata, estrae il numero di celle appartenenti ad ogni classe di profondità, velocità e substrato descritte all'interno del Manuale LG ISPRA 154/2017. Lo strumento genera due output:

- 1. Una **tabella** in cui si riportano, per ogni UMI individuata, il numero di celle appartenenti alle singole classi;
- 2. Per ogni UMI individuata, un **istogramma** permette di visualizzare la distribuzione di frequenza delle classi.

A titolo di esempio in figura 6.12 sono riportatati gli istogrammi, generati da Zonal Histogram di ArcMap, per la UMI numero 15 (Glide) individuata alla portata di  $6.2 m^3/s$ . Sulle ascisse sono riportate le classi di profondità (istogramma 6.12a), velocità (istogramma 6.12b) e substrato (istogramma

#### CAPITOLO 6. APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA MESOHABSIM



(a) Istogramma di distribuzione delle classi di profondità



(b) Istogramma di distribuzione delle classi di velocità



(c) Istogramma di distribuzione delle classi di substrato

**Figura 6.12:** Istogrammi di distribuzione delle classi di profondità, velocità e substrato, individuati all'interno dell'UMI numero 15 per la portata di  $6.2 m^3/s$  (Elaborazione propria con lo strumento Zonal Histogram di ArcMap)

 $6.12\mathrm{c}),$ mentre sulle ordinate è riportata la frequenza di ogni classe all'interno della UMI.

Dopo aver estratto i dati idro-morfologici puntuali è possibile procedere alla costruzione del file di testo MEAS.

Per poter essere accettato da SimStream il file deve rispettare rigidamente alcune regole. Si tratta di un file di testo delimitato da tabulazioni (formato .txt) formato da cinque colonne:

- 1.  $HMU_NUM$  indica il numero progressivo della UMI individuata per quella data condizione di deflusso;
- 2. *HMU\_TYPE* indica la tipologia con cui è stata classificata la UMI;
- 3. *PNTNUM* è il numero progressivo del punto di misura all'interno di ogni UMI individuata;
- 4. *DEPTH* è la classe di profondità dell'acqua simulata in quel punto specifico;
- 5. *VELOCITY* è la classe di velocità dell'acqua simulata in quel punto specifico;
- 6. *SUBSTRATE* è il substrato individuato in quel punto specifico all'interno di quelli descritti nel Manuale ISPRA [Vezza et al., 2017];

In appendice F è riportato il codice *MatLab* che è stato utilizzato per costruire il file di testo *MEAS*, contenente i dati estratti dallo strumento *Zonal Histogram* di *ArcMap*, per poter essere accettato dal servizio *SimStream* Web.

# 6.5 Verifica della coerenza dei dati di distribuzione di velocità e profondità simulate

Prima di andare a valutare la variazione di habitat disponibile con SimStream, è necessario verificare la coerenza delle distribuzioni di velocità e profondità simulate. Lo scopo della verifica è quello di accertare che, all'aumentare della portata, si abbia un incremento di profondità e velocità simulate.



**Figura 6.13:** Distribuzione cumulate di frequenza delle classi di profondità (*Elaborazione propria tramite* MatLab)

A tal fine, si sono costruite le distribuzioni cumulate di frequenza delle classi di profondità e di velocità per ogni condizione di deflusso simulata.



**Figura 6.14:** Distribuzione cumulate di frequenza delle classi di velocità (*Elaborazione propria tramite* MatLab)

In figura 6.13 e figura 6.14 sono rappresentate la distribuzioni cumulate di frequenza delle classi di profondità e delle classi di velocità. Entrambe le distribuzioni presentano risultati confrontabili:

- All'aumentare della portata, si nota un aumento della frequenza delle classi caratterizzate da profondità o velocità maggiore e una conseguente riduzione di quelle caratterizzate da valori più bassi;
- Non sono presenti intersezioni tra le diverse distribuzioni. Pertanto le velocità e profondità simulate con *HEC-RAS* sono coerenti: all'aumentare della portata si ha sempre un aumento sia di profondità che velocità.

In conclusione, i dati di profondità e velocità simulati ed estratti per le singole Unità Idro-morfologiche, sono coerenti e possono essere utilizzati per il calcolo della variazione di habitat disponibile utilizzando il servizio *SimStream* Web.
## 6.6 Risultati del software

Verificata la coerenza delle profondità e velocità simulate con *HEC-RAS*, è possibile procedere con il calcolo della variazione di habitat disponibile per le specie target selezionate (vedasi capitolo 6.3) alle diverse condizioni di deflusso.

Il servizio *SimStream* Web, grazie ai modelli biologici *Random Forest* implementati per le specie target individuate (vedasi allegato E), classifica ogni UMI in tre diverse categorie di idoneità di habitat: *Non idoneo, Idoneo o Ottimale.* 

### 6.6.1 Mappe di idoneità di habitat

Il servizio, grazie all'assegnazione di uno specifico colore per ogni classe di idoneità: *Non idoneo* in rosso, *Idoneo* in giallo e *Ottimale* in verde, è in grado di generare una mappa di idoneità per tutte le specie target in ogni condizione di deflusso simulata.

A titolo di esempio, si riportano le mappe di idoneità del **Vairone** (*Telestes Muticellus*) allo stato vitale adulto (figura 6.15) e allo stato giovane (figura 6.16) ottenute per ogni condizione di deflusso simulata.

Come si può vedere dalle immagini, il tratto di Dora Baltea analizzato è caratterizzato da una maggiore idoneità di habitat per lo stato vitale adulto del *Telestes Muticellus* (figura 6.15).

Lo stato vitale adulto è caratterizzato dalla presenza di UMI classificate come *Ottimale* anche a porta di  $75 m^3/s$ . Inoltre, le Unità Morfologiche Idrauliche classificate come *Ottimale* sono la prevalenza fino a  $6.2 m^3/s$ . Per quanto riguarda la classificazione *Non idoneo* inizia a diventare prevalente a partire dai  $50 m^3/s$ .

D'altra parte, per lo stato vitale giovane (figura 6.15) si nota l'assenza di Unità Morfologiche Idrauliche *Ottimale* a qualsiasi condizione di deflusso e, già a partire da  $20 m^3/s$ , la quasi totalità dei mesohabitat sono classificati come *Non idoneo*.

In entrambi i casi, all'aumentare della portata, si riscontra una riduzione dell'idoneità ad ospitare la fauna ittica. Per le condizioni di maggior portata, si nota che le UMI classificate come *Idoneo* o *Ottimali* sono limitate a canali secondari formatesi solo in seguito all'aumento dell'area bagnata della Dora Baltea.



**Figura 6.15:** Distribuzione di idoneità di habitat per il Vairone (*Telestes Muticellus*) allo stato vitale adulto (*Elaborazione propria tramite* QGIS)



**Figura 6.16:** Distribuzione di idoneità di habitat per il Vairone (*Telestes Muticellus*) allo stato vitale giovane (*Elaborazione propria tramite* QGIS)

### 6.6.2 Habitat disponibile

Dopo aver assegnato una classe di idoneità di habitat ad ogni Unità Morfologica Idraulica si procede con la definizione dell'habitat totale disponibile  $(H_d)$ . A tal fine, il servizio *SimStream* Web applica la relazione 6.1 per tutte le specie target e in ogni condizione di deflusso:

$$H_d = H_I * 0.25 + H_O * 0.75 \tag{6.1}$$

Dove  $H_I$  è la somma delle aree delle UMI classificate come *Idoneo*, mentre e  $H_O$  è la somma delle aree delle UMI classificate *Ottimale*.

Le tabelle 6.1 (Salmo Trutta e Salmo Marmoratus) e 6.2 (Telestes Muticellus e Cottus gobio) contengono l'habitat totale disponibile, alle diverse condizioni di deflusso considerate (3.8, 6.2, 10, 20, 50, 75  $m^3/s$ ), espresso in  $m^2$  e come percentuale sull'area bagnata totale.

In conclusione, all'aumentare della portata simulata, si nota una riduzione della percentuale di habitat totale disponibile rispetto all'area bagnata per tutte le specie target considerate.

**Tabella 6.1:** Habitat totale disponibile per *S. Trutta* e *S. Marmoratus* allo stato vitale adulto e giovane alle diverse condizioni di portata considerata, espresso in  $m^2$  e in percentuale sull'area totale

Portata $[m^3/s]$	$\begin{array}{c} \mathbf{Area} \\ \mathbf{bagnata} \\ [m^2] \end{array}$	$\begin{vmatrix} \mathbf{Trot} \\ (Salme) \\ [m^2] \end{vmatrix}$	a fario o Trutta) [%]	$\begin{vmatrix} \mathbf{Trota} \\ (Salmo \\ [m^2] \end{vmatrix}$	marmorata Marmoratus) [%]	$\begin{vmatrix} \mathbf{Tro} \\ \mathbf{stato} \\ [m^2] \end{vmatrix}$	ta allo giovane [%]
3.8 6.2 10 20 50 75	28094 32987 36301 41187 48704 51348	4846 6295 6634 6736 8502 6246	$\begin{array}{c} 9.4 \ \% \\ 12.3 \ \% \\ 12.9 \ \% \\ 13.1 \ \% \\ 16.6 \ \% \\ 12.2 \ \% \end{array}$	$5841 \\ 5076 \\ 4519 \\ 5401 \\ 7013 \\ 5452$	$\begin{array}{c} 11.4 \ \% \\ 9.9 \ \% \\ 8.8 \ \% \\ 10.5 \ \% \\ 13.7 \ \% \\ 10.6 \ \% \end{array}$	8681 6347 6637 4095 604 82	$\begin{array}{c} 16.9 \ \% \\ 12.4 \ \% \\ 12.9 \ \% \\ 8.0 \ \% \\ 1.2 \ \% \\ 0.2 \ \% \end{array}$

**Tabella 6.2:** Habitat totale disponibile per *Telestes Muticellus* allo stato vitale adulto e giovane e *Cottus gobio* allo stato vitale adulto alle diverse condizioni di portata considerata, espresso in  $m^2$  e in percentuale sull'area totale

Portata $[m^3/s]$	$\begin{array}{c} \mathbf{Area} \\ \mathbf{bagnata} \\ [m^2] \end{array}$	$\begin{vmatrix} \mathbf{Vairo} \\ (Teleste) \\ [m^2] \end{vmatrix}$	$\begin{array}{c} \textbf{ne adulto} \\ s \ muticellus) \\ [\%] \end{array}$	$\begin{vmatrix} Vairo \\ (Teleste \\ [m^2] \end{vmatrix}$	$\begin{array}{c} \mathbf{ne \ giovane} \\ es \ muticellus) \\ [\%] \end{array}$	$\begin{vmatrix} \mathbf{Sca} \\ (Cott) \\ [m^2] \end{vmatrix}$	zzone us gobio) [%]
3.8 6.2 10 20 50 75	$\begin{array}{c} 28094\\ 32987\\ 36301\\ 41187\\ 48704\\ 51348 \end{array}$	$\begin{array}{c} 14071 \\ 14525 \\ 11521 \\ 9137 \\ 4272 \\ 2609 \end{array}$	$\begin{array}{c} 27.4 \ \% \\ 28.3 \ \% \\ 22.4 \ \% \\ 17.8 \ \% \\ 8.3 \ \% \\ 5.1 \ \% \end{array}$	$5043 \\ 5047 \\ 3343 \\ 650 \\ 408 \\ 248$	$\begin{array}{c} 9.8 \ \% \\ 9.8 \ \% \\ 6.5 \ \% \\ 1.3 \ \% \\ 0.8 \ \% \\ 0.5 \ \% \end{array}$	7389 6830 7584 5498 2208 903	$\begin{array}{c} 14.4 \ \% \\ 13.3 \ \% \\ 14.8 \ \% \\ 10.7 \ \% \\ 4.3 \ \% \\ 1.8 \ \% \end{array}$

### 6.6.3 Verifica coerenza idoneità di habitat

La classificazione dell'idoneità delle singole Unità Morfologiche Idrauliche è basata sui modelli biologici di **Presenza/Assenza** e **Abbondanza**, tarati su scala regionale, costruiti con la tecnica statistica ad apprendimento automatico *Random Forest*.

In particolar modo, il modello *Presenza/Assenza* calcola una probabilità di presenza della specie nell'Unità considerata a partire da: gradiente, distribuzione di profondità, velocità, substrato e presenza di zone rifugio.

Tuttavia, la probabilità calcolata da *SimStream* è affetta da alcune incertezze che possono causare incongruenze alla classe di idoneità assegnata al mesohabitat in diverse condizioni di flusso. In particolar modo, è necessario verificare:

- Il raggiungimento delle *Boundary Condition* (BC) del modello biologico: *SimStream* indica con la probabilità **0.572** il raggiungimento della BC superiore, mentre **0.233** il raggiungimento della BC inferiore;
- La coerenza della distribuzione di velocità e profondità simulate da *HEC-RAS* alle diverse condizioni di portata;
- Il substrato identificato grazie all'osservazione delle ortofoto ad alta risoluzione rilevate per mezzo di aerei a pilotaggio remoto APR.





Per questo motivo, si è deciso di eseguire una verifica di coerenza della probabilità di presenza calcolata da *SimStream* in alcune UMI significative.

In particolar modo, sono state scelte una *Pool* e una *Glide* adiacenti e presenti ad ogni condizione di portata. In figura 6.17 è riportata la numerazione delle Unità Morfologiche Idrauliche identificate alla condizione di deflusso presente al momento del rilievo  $(6.2 m^3/s)$ , nella quale le UMI utilizzate per la verifica sono la *Pool* numero 13 e la *Glide* numero 14.

A titolo di esempio si riportano i valori di probabilità di presenza calcolati dal modello biologico della Trota Marmorata (*Salmo Marmoratus*) e la Trota Fario (*Salmo Trutta*) allo stato vitale adulto. Data la tipologia di UMI considerata, ci si aspetta, per entrambe le trote allo stato adulto, un classificazione *Idoneo* per entrambe le UMI in tutte le condizioni di deflusso considerate.

#### Trota Marmorata (Salmo Marmoratus

In tabella 6.3 si riportano le probabilità calcolate per tutti i parametri considerati nel modello *Random Forest* per la Trota Marmorata (*Salmo Marmoratus*) nella *Pool* numero 13, mentre in tabella 6.4 sono riportati i valori ottenuti per la *Glide* numero 14.

Pool numero 13						
Portata	$3.8 \ m^3/s$	$6.2  m^3/s$	$10  m^3/s$	$20  m^3/s$	$50  m^3/s$	$75  m^3/s$
Idoneità	Non idoneo	Non idoneo	Non idoneo	Non idoneo	Non idoneo	Non idoneo
Probabilità	0.233	0.233	0.233	0.233	0.233	0.233
Gradiente	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002
$D_{-}15$	0.090	0.080	0.060	0.080	0.070	0.030
D30_45	0.080	0.070	0.060	0.070	0.040	0.080
D45_60	0.070	0.070	0.060	0.060	0.090	0.070
$D60_75$	0.070	0.060	0.070	0.060	0.070	0.060
D75_90	0.090	0.070	0.060	0.060	0.050	0.100
$CV45_{-}60$	0.020	0.070	0.160	0.130	0.070	0.060
Akal	0.110	0.130	0.110	0.140	0.190	0.210
Macrolithal	0.100	0.110	0.090	0.130	0.110	0.090
Megalithal	0.070	0.060	0.080	0.060	0.060	0.050

**Tabella 6.3:** Probabilità di presenza calcolata dal modello biologico per la Trota Marmorata (*Salmo Marmoratus*) per la *Pool* numero 13

Confrontando i dati in tabella 6.3 e 6.4 con i modelli biologici della *Salmo Marmoratus*, riportatati in appendice E, si osservano alcune discrepanze nella classificazione di idoneità:

• La *Pool* numero 13 è classificata *Non idoneo*, per tutte le condizioni di portata analizzate. Si è quindi proceduto ad analizzare i valori di probabilità calcolati dal modello biologico. In tabella 6.3 si può notare che la probabilità calcolata è pari a **0.233** (BC inferiore del modello RF).

Glide numero 14						
Portata	$3.8 \ m^3/s$	$6.2 \ m^3/s$	$10  m^3/s$	$20  m^3/s$	$50 \ m^{3}/s$	$75 \ m^3/s$
Idoneità	Idoneo	Idoneo	<b>Idoneo</b>	<b>Idoneo</b>	<b>Idoneo</b>	Idoneo
Probabilità	0.743	0.754	0.648	0.585	0.653	0.607
Gradiente	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
D_15	0.090	0.070	0.060	0.040	0.020	0.020
D30_45	0.100	0.090	0.070	0.040	0.040	0.020
D45_60	0.110	0.090	0.070	0.050	0.060	0.030
D60_75	0.100	0.100	0.080	0.060	0.060	0.050
D75_90	0.100	0.090	0.100	0.080	0.060	0.060
$CV45_{-60}$	0.000	0.000	0.130	0.260	0.090	0.070
Akal	0.060	0.060	0.050	0.070	0.100	0.110
Macrolithal	0.210	0.200	0.210	0.220	0.190	0.180
Megalithal	0.100	0.110	0.100	0.090	0.120	0.120

**Tabella 6.4:** Probabilità di presenza calcolata dal modello biologico per la Trota Marmorata (*Salmo Marmoratus*) per la *Glide* numero 14

• La *Glide* numero 14 è classificata *Idoneo*, per tutte le condizioni di portata analizzate. Pertanto l'idoneità ottenuta è congruente con le esigenze della *Salmo Marmoratus*;

In conclusione, la non idoneità osservata per la Trota Marmorata (Salmo Marmoratus) nella Pool numero 13 è dovuta al raggiungimento della Boundary Condition inferiore del modello Random Forest. Pertanto l'idoneità di habitat calcolata è ritenuta coerente con le distribuzioni di profondità e velocità simulate e non si è ritenuto necessario eseguire ulteriori approfondimenti.

### Trota Fario (Salmo Trutta)

In tabella 6.5 si riportano le probabilità calcolate per tutti i parametri considerati nel modello *Random Forest* per la Trota Fario (*Salmo Trutta*) nella *Pool* numero 13, mentre in tabella 6.6 sono riportati i valori ottenuti per la *Glide* numero 14.

Come osservato per la *Salmo Marmoratus*, anche nel caso della *Salmo Trutta* è necessario fare delle considerazioni sulla probabilità calcolata da *SimStream*, a partire dai modelli biologici utilizzati:

- La *Pool* numero 13, ad esclusione della portata di  $75 m^3/s$ , è sempre classificata come *Idoneo*. Tuttavia la probabilità restituita dal modello è pari a **0.572** (BC superiore del modello RF). Il cambiamento di idoneità, osservato per il massimo deflusso simulato, è principalmente dovuto alla variazione di frequenza osservata per le classi di profondità  $D_{-15}$  e  $D30_{-45}$ .
- La *Glide* numero 14 è classificata *Idoneo*, per tutte le condizioni di portata analizzate. Anche in questo caso, ad esclusione della portata  $10 m^3/s$ , la probabilità restituita dal modello è pari a **0.572**.

Pool numero 13						
Portata	$3.8 \ m^3/s$	$6.2 \ m^3/s$	$10  m^3/s$	$20  m^3/s$	$50 \ m^3/s$	$75  m^3/s$
Idoneità	Idoneo	Idoneo	<b>Idoneo</b>	<b>Idoneo</b>	Idoneo	Non idoneo
Probabilità	0.572	0.572	0.572	0.572	0.572	0.302
Gradiente	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002
Boulder	1	1	1	1	1	1
D_15	0.090	0.080	0.060	0.080	0.070	0.030
D15_30	0.070	0.090	0.060	0.080	0.070	0.030
D30_45	0.080	0.070	0.060	0.070	0.040	0.080
D45_60	0.070	0.070	0.060	0.060	0.090	0.070
CV45_60	0.020	0.070	0.160	0.130	0.070	0.060
Macrolithal	0.100	0.110	0.090	0.130	0.110	0.090
Mesolithal	0.160	0.160	0.170	0.180	0.140	0.120
Gigalithal	0.020	0.020	0.020	0.010	0.010	0.010

**Tabella 6.5:** Probabilità di presenza calcolata dal modello biologico per la Trota Fario (Salmo Trutta) per la Pool numero 13

**Tabella 6.6:** Probabilità di presenza calcolata dal modello biologico per la Trota Fario (*Salmo Trutta*) per la *Glide* numero 14

Glide numero 14						
Portata	$3.8 \ m^3/s$	$6.2 \ m^3/s$	$10  m^3/s$	$20  m^3/s$	$50 \ m^{3}/s$	$75 m^3/s$
Idoneità	Idoneo	Idoneo	<b>Idoneo</b>	<b>Idoneo</b>	<b>Idoneo</b>	<b>Idoneo</b>
Probabilità	0.572	0.572	0.526	0.572	0.572	0.572
Gradiente	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
Boulder	1	1	1	1	1	1
$D_{-}15$	0.090	0.070	0.060	0.040	0.020	0.020
$D15_{-}30$	0.090	0.090	0.060	0.030	0.030	0.020
$D30_{-}45$	0.100	0.090	0.070	0.040	0.040	0.020
D45_60	0.110	0.090	0.070	0.050	0.060	0.030
$CV45_{-60}$	0.000	0.000	0.130	0.260	0.090	0.070
Macrolithal	0.210	0.200	0.210	0.220	0.190	0.180
Mesolithal	0.150	0.150	0.160	0.150	0.130	0.130
Gigalithal	0.020	0.020	0.020	0.000	0.020	0.020

In conclusione, il calcolo di idoneità per la Trota Fario (*Salmo Trutta*) è condizionata dal raggiungimento della *Boundary Condition* superiore del modello biologico utilizzato. Pertanto l'idoneità di habitat calcolata alle distinte condizioni di deflusso è ritenuta consistente con le anomalie osservate e non è stato ritenuto necessario eseguire ulteriori analisi.

### 6.6.4 Curve Habitat-Portata

Dopo aver verificato la coerenza dell'idoneità di habitat calcolata è possibile analizzare le **Curve Habitat-Portata** per le quattro specie target e i diversi stadi vitali individuati.

In particolar modo, le curve sono definite mettendo in relazione la percentuale di habitat totale disponibile e la portata alla quale è stato calcolato (vedasi dati raccolti in tabella 6.1 e 6.2).

In figura 6.18 sono rappresentate le sei curve Habitat-Portata generate dal servizio *SimStream* Web. A questo punto è possibile fare alcune considerazioni sull'andamento delle curve a partire dalle esigenze ecologiche delle diverse specie target selezionate [Negro et al., 2021].



Habitat-flow rating curves

**Figura 6.18:** Curve Habitat-Portata calcolate nel tratto a valle della presa di Nus per le quattro specie target selezionate: *Salmo Trutta, Telestes Muticellus* e *Salmo Marmoratus* (stato vitale adulto e giovane) e *Cottus Gobio* (stato vitale adulto),

#### Vairone (Telestes Muticellus) allo stato vitale adulto

Il Telestes Muticellus allo stato vitale adulto è un un piccolo pesce che predilige corsi d'acqua con profondità da moderate a elevate (da 30 a 120 cm) e velocità moderate (da 15 a 75 cm/s). Inoltre, privilegia un substrato grossolano (Akal, Microlithal e Mesolithal) e la presenza di detriti legnosi come zona rifugio. [Negro et al., 2021]

Pertanto, coerentemente con le esigenze di habitat del *T. muticellus* adulto la curva Habitat-Portata mostra un massimo ben definito a portata  $6.2 m^3/s$  di circa il 30 % dell'area bagnata totale del canale. In seguito si nota un graduale e progressivo calo di idoneità di habitat, dovuta all'aumento di profondità e velocità simulata al crescere del deflusso, fino a raggiungere il 5 % dell'area bagnata idonea a  $75 m^3/s$ .

#### Vairone (Telestes Muticellus) allo stato vitale giovane

Lo stato giovane del *Telestes Muticellus*, a differenza dello stato adulto, predilige corsi d'acqua poco profondi (fino ad un massimo di 45 cm) e basse velocità (inferiore a 45 cm/s). Anche in questo caso privilegia un substrato grossolano (*Akal, Microlithal* e *Mesolithal*) e la presenza di detriti legnosi come zona rifugio. [Negro et al., 2021]

Come per lo stato vitale adulto, il massimo della curva Habitat-Portata è a  $6.2 m^3/s$  e raggiunge il 10 % dell'area bagnata totale. Coerentemente con le esigenze di profondità e velocità allo stato vitale giovane, a seguito dell'aumento di portata, si ha una brusca riduzione dell'idoneità di habitat. Per questo motivo, si osserva una percentuale di area idonea prossimo allo zero già per una portata di  $20 m^3/s$ .

#### Scazzone (Cottus gobio) allo stato vitale adulto

Il Cottus gobio allo stato vitale adulto è un piccolo pesce (lunghezza massima di 15 cm) che predilige corsi d'acqua con profondità (da 15 a 30 cm) e velocità moderate (da 30 a 45 cm/s). Inoltre, privilegia un substrato grossolano con dimensione compresa tra i 6 e i 40 cm: Mesolithal e Macrolithal e la presenza di canopy shading come zona rifugio. [Vezza et al., 2013]

La curva Habitat-Portata del *C. gobio* ottenuta rispecchia le necessità di habitat. Infatti, si può notare un massimo di idoneità di habitat di circa il 14 % dell'area bagnata totale a portata di  $12.5 m^3/s$ . A seguito dell'aumento della portata in alveo e, di conseguenza, della profondità e velocità simulata, si osserva un graduale e progressivo calo di idoneità di habitat. Inoltre, per portate superiori a  $50 m^3/s$  la percentuale di area idonea è inferiore al 5 %.

#### Trota Fario (Salmo Trutta) allo stato vitale adulto

La Salmo Trutta allo stato vitale adulto è un pesce che può raggiungere i 35 cm di lunghezza e un peso fino a 4 chilogrammi. La Trota Fario predilige corsi d'acqua caratterizzati da profondità elevate (da 45 a 75 cm) e da bassa velocità (tra 15 e 30 cm/s). Dal punto di vista del substrato con dimensione compresa tra i 6 e i 40 cm (*Mesolithal* e *Macrolithal*), inoltre predilige la *Pool* come UMI in cui vivere. [Alcaraz-Hernández et al., 2016] [Gentili et al., 2004]

La curva Habitat-Portata è coerente con le necessità della *S. Trutta*: all'aumentare della portata in alveo si ha un aumento della profondità simulata e quindi un aumento dell'idoneità di habitat. Il massimo di habitat disponibile è superiore al 16 % dell'area portata totale a portata 50  $m^3/s$ . In seguito si osserva un leggero calo di disponibilità fino al 12 % di area bagnata a 75  $m^3/s$ .

#### Trota marmorata (Salmo Marmoratus) allo stato vitale adulto

La Salmo Marmoratus allo stato vitale adulto è un pesce che può raggiungere e superare i 50 cm di lunghezza e un peso di 20 kg. Per quanto riguarda le caratteristiche idro-morfologiche sono simili a quelle osservate per la Salmo Trutta. La Trota Marmorata predilige corsi d'acqua con profondità elevate (da 60 a 105 cm) e acque ferme (velocità inferiore a 15 cm/s). Inoltre, preferisce un substrato costituito da massi (Macrolithal) ed elementi di cover di grandi dimensioni. [Gentili et al., 2004]

In generale, il massimo gradimento di habitat della *S. Marmoratus* si sposta con l'aumentare della taglia verso valori più elevati di profondità, substrato e *cover* di dimensioni maggiori.

Coerentemente con le necessità di habitat della Trota Marmorata, l'idoneità di habitat aumenta all'aumentare della profondità simulata. Per questo motivo si nota un progressivo aumento di disponibilità di habitat fino al 14 % dell'area bagnata totale alla portata di  $50 m^3/s$ . In seguito si osserva una riduzione di habitat fino al 10 % osservato per portata  $75 m^3/s$ .

#### Stato vitale giovane della trota

Lo stato vitale giovane di *Salmo Trutta* e *Salmo Marmoratus* mostrano le stesse necessità idraulico-morfologiche. A differenza degli adulti, predilige corsi d'acqua caratterizzate da basse profondità (da 15 a 30 cm), mentre sopporta bene correnti elevate fino a 100 cm/s. Inoltre preferisce un substrato costituito da ghiaia (*Akal*) e zone prive di *cover*. [Gentili et al., 2004]

La curva Habitat-Portata dello stato giovane della trota è coerente con le esigenze di habitat. A differenza dello stato vitale adulto, il massimo di idoneità è posto a  $6.2 m^3/s$  per un totale del 12 % dell'area bagnata totale. In seguito si rileva una brusca riduzione dell'idoneità di habitat, causata dal

aumento di profondità simulata. Per questo motivo la percentuale di area totale disponibile arriva a zero per portate superiori a $50\,m^3/s$ 

In figura 6.18 si osserva che, per le condizioni di bassa portata ( $Q < 10 \, m^3/s$ ), le sei curve sono molto vicine e si sovrappongono, rendendo complicata la lettura del grafico.

Per questo motivo, è stato deciso di eseguire una nuova simulazione con SimStream sul sottotratto idromorfologicamente omogeneo della Dora Baltea a valle della presa di Nus. In questo caso sono state considerate solo alcune specie target (Salmo Trutta, Salmo Marmoratus e Cottus Gobio) e una portata inferiore a  $10 m^3/s$ .

### 6.6.5 Evoluzione habitat alle basse portate

Si riportano le curve Habitat-Portata e le mappe di idoneità di habitat calcolate dal servizio *SimStream* Web per le condizioni di bassa portata  $(Q < 10 m^3/s)$  sul tratto di Dora Baltea a valle delle presa della centrale idroelettrica di Saint-Clair per tre specie target:

- Trota Fario (Salmo Trutta): stato vitale giovane e adulto;
- Trota Marmorata (Salmo Marmoratus): stato vitale giovane e adulto;
- Scazzone (Cottus Gobio): stato vitale adulto.



### Habitat-flow rating curves

**Figura 6.19:** Curve Habitat-Portata calcolate nel tratto a valle della presa di Nus per tre specie target: Salmo Trutta e Salmo Marmoratus (stato vitale adulto e giovane) e Cottus Gobio (stato vitale adulto), in condizioni di bassa portata ( $Q < 10 m^3/s$ )

In figura 6.19 sono rappresentate le curve Habitat-Portata ottenute per condizioni di bassa portata. Come è stato osservato per la simulazione precedente, anche in questo caso è possibile fare alcune considerazioni sulle curve Habitat-Portata:

- Lo Stato Giovane della Trota raggiunge il massimo di idoneità (circa il 21 % dell'area bagnata totale) a  $4 m^3/s$  per poi calare e stabilizzarsi al 18 % dell'area bagnata.
- La Salmo Marmoratus allo stato vitale adulto raggiunge il massimo di idoneità di circa il 16 % dell'area bagnata totale per portata di  $4 m^3/s$ . Anche in questo caso si nota un successivo calo di idoneità fino a circa il 12 % dell'area bagnata.
- L'idoneità di habitat del *Cottus Gobio* continua a crescere per tutte le portate considerate. Raggiunge un massimo relativo di idoneità pari a circa il 21 % dell'area bagnata totale a portata di  $10 m^3/s$ .
- Anche l'idoneità di habitat di **Salmo Trutta** allo stato vitale adulto continua a crescere per tutte le condizioni di portata simulate, raggiungendo un massimo relativo di circa il 18 % dell'area bagnata totale a portata di  $10 m^3/s$ .

In figura 6.20 e 6.21 sono riportate, a titolo di esempio, le mappe di idoneità di habitat per *Cottus Gobio* e *Salmo Trutta* allo stato vitale adulto per portata compresa tra 3.8 e 10  $m^3/s$ .

Le mappe di idoneità di entrambe le specie sono congruenti con l'aumento di habitat disponibile che è stato evidenziato dalle curve Habitat-Portata in figura 6.19. In generale, all'aumentare della portata, si nota una riduzione delle Unità Morfologiche Idrauliche classificate come *Ottimale* e un aumento di quelle classificate *Idoneo* e *Non idoneo*.

Per quanto riguarda *Cottus Gobio* (figura 6.20) si può notare una generale una riduzione di idoneità sul ramo principale del corso d'acqua. Tuttavia, le UMI che costituiscono il canale secondario, formatosi a partire da  $6.2 m^3/s$ , mostrano un aumento di superficie e idoneità.



**Figura 6.20:** Distribuzione di idoneità di habitat per lo Scazzone (*Cottus Gobio*) allo stato vitale adulto per portata compresa tra 3.8 e 10  $m^3/s$  (*Elaborazione propria tramite* QGIS)



**Figura 6.21:** Distribuzione di idoneità di habitat per la Trota Fario (*Salmo Trutta*) allo stato vitale adulto per portata compresa tra 3.8 e 10  $m^3/s$  (*Elaborazione propria tramite* QGIS)

# 7 Conclusioni

Nel presente elaborato è stata applicata la metodologia *MesoHABSIM* (MesoHABitat SIMulation model) [Vezza et al., 2017], al caso studio relativo ad un sottotratto idro-morfologicamente omogeneo sotteso all'opera di presa sulla Dora Baltea, nei pressi di Nus (AO), della centrale idroelettrica di Saint-Clair.

Per ovviare alla difficoltà che possono incontrare gli operatori ad eseguire il rilievo in campo in condizioni di deflusso elevate, si è seguita una procedura in cui è stato eseguito un solo rilievo idro-morfologico attraverso aerei a pilotaggio remoto APR.

Successivamente, utilizzando il software *HEC-RAS*, è stato possibile costruire un modello idrodinamico bidimensionale che ha permesso di simulare le condizioni idrodinamiche (profondità e velocità) a diverse condizioni di portata.

L'utilizzo di modelli idraulici ha permesso la ricostruzione delle caratteristiche idromorfologiche del tratto in esame per un range di portate molto ampio anche in assenza di rilievi in campo. Per questo motivo, la procedura si è dimostrata sufficientemente flessibile e idonea nel ricostruire la distribuzione di profondità e velocità anche in caso di torrenti non guadabili e fiumi di media grandezza, come la Dora Baltea.

Le curve Habitat-Portata, ottenute per tutte le specie target e gli stati vitali selezionati, mostrano un andamento coerente con le esigenze di habitat (in termini di velocità, profondità, substrato e zone rifugio) descritte in letteratura [Negro et al., 2021]:

- Salmo Trutta e Salmo Marmoratus allo stato vitale adulto mostrano il massimo di idoneità in condizioni di portata elevata  $(50 m^3/s)$ . In queste condizioni sono presenti le condizioni di profondità elevate (fino a 105 cm), che costituiscono l'habitat adatto alle trote adulte.
- Cottus gobio, Telestes muticellus (a entrambi gli stati vitali) e lo stato vitale giovane della Trota mostrano il massimo di idoneità in condizioni di bassa portata (tra  $6.2 m^3/s$  e  $12.5 m^3/s$ ). In questo range di portata si rilevano classi di profondità e velocità più basse e idonee alle esigenze di questi piccoli pesci.

In conclusione, il modello si è mostrato sufficiente robusto per simulare efficacemente le condizioni di habitat per diverse specie, sia allo stato vitale giovane sia adulto, su un range di portate molto ampio (da 3.8 a 75  $m^3/s$ ). Inoltre, l'applicazione della metodologia *MesoHABSIM*, si è dimostrata adatta a legare l'habitat disponibile in alveo alla portata rilasciata a valle delle derivazioni idroelettriche del gruppo *C.V.A. S.p.A.*.

Ulteriormente, la ricostruzione della portata liquida naturale della Dora Baltea in arrivo alla presa della centrale idroelettrica di Quincinetto (TO), considerando le portate registrate dall'idrometro di Tavagnasco e conoscendo l'acqua turbinata dalla centrale, si è dimostrata adatta al calcolo dell'Indice di Integrità Habitat (*IH*), come descritto nel Manuale LG ISPRA 154/2017. [Vezza et al., 2017]

# Ringraziamenti

Il presente lavoro di tesi è stato utile per comprendere la complessità e la multidisciplinarietà delle competenze necessarie per gestire al meglio la risorsa idrica. Ho inoltre avuto modo di toccare con mano le difficoltà che possono incontrare i tecnici nell'adeguamento del Deflusso Ecologico per via dei numerosi portatori di interesse presenti.

Per questo motivo si ringraziano per la disponibilità e l'aiuto fornito:

- il professor Paolo Vezza per avermi avvicinato al mondo dell'eco-idraulica e alle metodologie oggi utilizzate (MesoHABSIM) per la definizione dei Deflussi Ecologici, come descritto nella Water Framework Directive;
- l'ingegner Giovanni Negro per avermi pazientemente seguito e aiutato nella definizione dei modelli idrodinamici su HEC-RAS e nella scrittura dei codici MatLab utilizzati per la validazione dei modelli e la ricostruzione delle portate;
- la Funzione QSA (Qualità Sicurezza Ambiente) del gruppo C.V.A. S.p.A. per avermi accolto durante il tirocinio curricolare e per avermi aiutato a conoscere il territorio e la realtà del caso studio della presa di Nus su cui è stato applicata la metodologia MesoHABSIM nel presente elaborato.

# Indice dei simboli

ADP	Acoustic Doppler Profiler
APR	Arei a Pilotaggio Remoto
ARPA	Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale
BC	Boundary Condition
BHD	Bird Habitat Directives <sup>1</sup>
CDP	Curve di Durata delle Portate
CDS	Curve Durata Sotto-soglia
Curve H-P	Curve Habitat-Portata
d	Indice di corrispondenza
DE	Deflusso Ecologico
DMV	Deflusso Minimo Vitale
DSM	Digital Surface Model
DPSIR	Analisi Determinanti Pressioni Stato Impatti Risposte
DTM	Digital Terrain Model
E-Flow	Ecological Flow
GEP	Good Ecological Potential (Potenziale Ecologico Buono)
GES	Good Environmental Status (Stato Ambientale Buono)
GIS	Geographic Information System
GNSS	Global Navigation Satellite System
HSMs	Habitat Suitability Models
HMU	HydroMorphologic Unit
IH	Indice di integrità dell'Habitat fluviale
ISH	Indice di disponibilità Spaziale dell'Habitat fluviale
ITH	Indice di disponibilità Temporale dell'Habitat fluviale
MAE	Errore Assoluto Medio
MATTM	Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del
	Mare
MesoHABSIM	MesoHABitat SIMulation model
MiTE	Ministero della Transizione Ecologica
NSE	Nash and Sutcliffe Efficiency
OBS	Dati Osservati all'idrometro

<sup>1</sup>[European Commision, 2009] e [European Commision, 1992]

PBIAS	Percentuale BIAS
PC	Protezione Civile
PDP	Partial Dependance Plot
PHABSIM	Physical HABitat SIMulation model
$R^2$	Indice di determinazione
RBMPs	River Basin Managment Plans
RC	Rischio Critico
RF	Random Forest
RMSE	Errore Quadratico Medio
SIM	Dati Simulati
SUM	Sistema di rilevamento e classificazione delle
	Unità Morfologiche dei corsi d'acqua
TUA	Testo Unico Ambientale (D. Lgs. $152/2006)^2$
UCUT	Uniform Continuous Under Threshold curves
UMI	Unità Morfologiche Idrauliche
WFD	Water Flood Directive, Directiva quadro delle acque <sup>3</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>[Repubblica italiana, 2006] <sup>3</sup>[European Commision, 2000]

# Bibliografia

- [Alcaraz-Hernández et al., 2016] Alcaraz-Hernández, J., Muñoz-Mas, R., Martinez-Capel, F., Garófano Gómez, V., and Vezza, P. (2016). Generalized additive models to predict adult and young brown trout (salmo trutta linnaeus, 1758) densities in mediterranean rivers. *Journal of Applied Ichthyology*, 32:217–228.
- [Bain and Meixler, 2008] Bain, M. B. and Meixler, M. S. (2008). A target fish community to guide river restoration. *River Research and Applications*, 24(4):453–458.
- [Bovee et al., 1998] Bovee, K., Lamb, B., Bartholow, J., Stalnaker, C., and Taylor, J. (1998). Methow River Basin Fish Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology. US Geological Survey.
- [Brunner, 2016] Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River Analysis System User's Manual. US Army Corps of Engineer - Hydrologic Engineer Center (HEC), Davis, California (USA), version 5.0 edition.
- [Compagnia Valdostana delle Acque, 2001] Compagnia Valdostana delle Acque (2001). Cima research foundation. https://www.cvaspa.it/. Ultimo accesso, Settembre 2021.
- [European Commission, 1992] European Commission (1992). Directive 92 /43 /eec oon the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora. Official Journal of the European Community No L 206/7.
- [European Commision, 2000] European Commision (2000). Directive 2000/60/ec of the european parlament and of the council: Water framework directive. Official Journal of the European Community L327:1-72. Directiva che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque.
- [European Commision, 2009] European Commision (2009). Directive 2009/147/ec of the european parlament and of the council: on the conservation of wild birds. Official Journal of the European Community No L 20/7.
- [European Commision, 2014] European Commision (2014). La direttiva quadro sulle acque dell'UE. Directorate-General for Environment (European Commision). Pubblication Office of the European Union, DOI: 10.2779/75916.

- [European Commision, 2015] European Commision (2015). Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive. Common Implementation Strategy (CIS) - Guidance Document n° 31. Luxembourg: European Union. DOI: 10.2779/775712.
- [Fondazione Cima, 1995] Fondazione Cima (1995). Cima research foundation. https://www.cimafoundation.org/. Ultimo accesso, Luglio 2021.
- [Gentili et al., 2004] Gentili, G., Romanò, A., Maran, S., and Bosi, R. (2004). Preferenze ambientali dei salmonidi nei corsi d'acqua alpini (environmental preferences of salmonidae in alpine rivers). *L'acqua*, 2004:35.
- [Gupta et al., 2009] Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and nse performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1):80–91.
- [Halwas and Church, 2002] Halwas, K. L. and Church, M. (2002). Channel units in small, high gradient streams on vancouver island, british columbia. *Geomorphology*, 43(3):243–256.
- [Hwang et al., 2012] Hwang, S. H., Ham, D. H., and Kim, J. H. (2012). A new measure for assessing the efficiency of hydrological data-driven forecasting models. *Hydrological Sciences Journal*, 57(7):1257–1274.
- [Krause et al., 2005] Krause, P., Boyle, D. P., and Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Advances in Geosciences, 5:89–97.
- [Legates and McCabe, 1999] Legates, D. and McCabe, G. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35:233–241.
- [Moriasi et al., 2007] Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions* of the ASABE, 50(3):885–900.
- [Negro et al., 2021] Negro, G., Fenoglio, S., Quaranta, E., Comoglio, C., Garzia, I., and Vezza, P. (2021). Habitat preferences of italian freshwater fish: A systematic review of data availability for applications of the mesohabsim model. *Frontiers in Environmental Science*, 9:305.
- [Parasiewicz, 2001] Parasiewicz, P. (2001). Mesohabsim: A concept for application of instream flow models in river restoration planning. *Fisheries*, 26:6–13.
- [Parasiewicz, 2007] Parasiewicz, P. (2007). The mesohabsim model revisited. River Research and Applications, 23(8):893–903.

- [Parasiewicz et al., 2013] Parasiewicz, P., Rogers, J., Vezza, P., Gortazar, J., Seager, T., Pegg, M., Wiśniewolski, W., and Comoglio, C. (2013). Applications of mesohabsim simulation model. *Ecohydraulics - an integrated approach*, pages 109–124.
- [Poff et al., 1997] Poff, N., Allan, J. D., Bain, M., Karr, J., Prestegaard, K., Richter, B., Sparks, R., and Stromberg, J. (1997). The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *Bioscience*, 47.
- [Poff and Zimmerman, 2010] Poff, N. and Zimmerman, J. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, 55:194 – 205.
- [Provincia Autonoma di Trento, 2019] Provincia Autonoma di Trento, Servizio Foreste e Fauna, U. f. (2019). Zona della trota marmorata in Provincia Autonoma di Trento. Provincia Autonoma di Trento, Trento. Aggiornamento.
- [Regione Emilia Romagna, 1992] Regione Emilia Romagna, A. A. e. A. (1992). Elementi di base per la predisposizione della carta ittica regionale. Tipografia Moderna. Revisione ed aggiornamento nel 2011.
- [Repubblica italiana, 2006] Repubblica italiana (2006). Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 Testo Unico Ambientale. GU n.88 del 14/04/2006 Suppl. Ordinario n. 96. Entrata in vigore del decreto 29/04/2006.
- [Rinaldi et al., 2016] Rinaldi, M., Belletti, B., Comiti, F., Nardi, L., Mao, L., and M., B. (2016). Sistema di rilevamento e classificazione delle Unità Morfologiche dei corsi d'acqua (SUM). Versione aggiornata 2016. ISPRA – Manuali e Linee Guida 132/2016, Roma.
- [Rondinini et al., 2013] Rondinini, C., Battistoni, A., Peronace, V., and Teofili, C. c. (2013). Lista Rossa IUCN dei Vertebrati Italiani. Comitato Italiano IUCN e Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Roma.
- [Shahram et al., 2020] Shahram, S., Masoud, A., and Fisaha, U. (2020). Signature-based multi-modelling and multi-objective calibration of hydrologic models: Application in flood forecasting for canadian prairies. *Journal of Hydrology*, 588:125095.
- [Vezza et al., 2013] Vezza, P., Parasiewicz, P., Calles, O., Spairani, M., and Comoglio, C. (2013). Modelling habitat requirements of bullhead (cottus gobio) in alpine streams. *Aquatic Sciences*, 76.
- [Vezza et al., 2012] Vezza, P., Parasiewicz, P., Rosso, M., and Comoglio, C. (2012). Defining minimum environmental flows at regional scale: Application of mesoscale habitat models and catchments classification. *River Research* and Applications, 28(6):717–730.

- [Vezza et al., 2014] Vezza, P., Parasiewicz, P., Spairani, M., and Comoglio, C. (2014). Habitat modeling in high-gradient streams: the mesoscale approach and application. *Ecological Applications*, 24(4):844–861.
- [Vezza et al., 2017] Vezza, P., Zanin, A., and Parasiewicz, P. (2017). Manuale tecnico-operativo per la modellazione e la valutazione dell'integrità dell'habitat fluviale. ISPRA – Manuali e Linee Guida 154/2017, Roma.
- [Willmott, 1981] Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. Physical Geography, 2(2):184–194.

# Appendice A

# Principali Unità Morfologiche Idrauliche di canale

Nel Manuale LG ISPRA 132/2016 [Rinaldi et al., 2016] sono accuratamente descritte tutte le principali Macro-unità, Unità e Sub-unità sia di canale che di pianura alluvionale in termini di forma e posizione nell'alveo.

In tabella A.1 sono descritte le principali **Unità Morfologiche Idrauliche** (UMI) presenti negli alvei ad elevata pendenza tipiche del contesto italiano.

**Tabella A.1:** Descrizione delle principali Unità Morfologiche Idrauliche per alvei ad elevata pendenza tipici del contesto alpino e appenninico italiano [Rinaldi et al., 2016]

## Principali unità idromorfologiche

### Pothole "Marmitta"

Unità erosiva tipica di alvei in roccia. Si tratta di unità spesso alquanto incise, di forma circolare, scavate nella roccia, in zone dove il flusso è caratterizzato da elevata energia. Sono scavate con processi di cavitazione e abrasione da parte del materiale trasportato. Sono comunemente associate a livelli litologici meno resistenti o alla presenza di discontinuità strutturali.

### Pool "Pozza"

Sono principalmente di origine erosiva, si presentano come depressioni del fondo dell'alveo con pendenza inversa nella porzione più a valle, occupano l'intera sezione trasversale. Sono caratterizzate da tiranti elevati e velocità ridotte, ma anche da caratteristiche idrodinamiche complesse (fluttuazioni turbolente). In caso vi sia stata sedimentazione, il sedimento appare spesso più fine delle unità adiacenti.

Possono trovarsi, in corsi d'acqua a pendenza elevata con alvei di massi e ciottoli oppure ghiaiosi, alternate a *Step* e *Riffle*, ma anche in corsi d'acqua a fondo sabbioso associate ai meandri. I processi alla base della loro formazione generano diversi sottotipi.

Continua nella prossima pagina

Continua dalla pagina precedente

### Principali unità idromorfologiche

### Riffle "Raschio"

Unità caratterizzate da flusso meno profondo e più veloce rispetto alle unità contigue. Sono costituite da sedimento relativamente uniforme (ghiaia, piccoli ciottoli) che raramente emergono dall'acqua. Le differenze di profondità e velocità con le unità adiacenti (*Pool* e *Glide*), diminuiscono con l'aumentare delle portate. I *Riffle* si formano nei punti di inflessione tra le sponde in corsi d'acqua alluvionali di tipo sinuoso, dove l'alveo è costituito da una sequenza di barre alternate.

### Step "Gradino"

Unità tipiche dei corsi d'acqua alluvionali a elevata pendenza, semialluvionali e in roccia. Si tratta di salti verticali o fortemente inclinati, che occupano l'intera sezione dell'alveo, formati in diversi materiali: roccia, sedimento, legno o combinazioni. Tali salti sono più alti della profondità del flusso in condizioni di piene rive, non vengono sommersi in condizioni di piene ordinarie. Gli *Step* determinano un accelerazione e convergenza del flusso, che portano a limitate fluttuazioni turbolente e un pelo libero piuttosto regolare.

### Glide "Scivolo"

Unità caratterizzate da un profilo longitudinale del fondo e del pelo libero piuttosto regolare. Il pelo libero può presentarsi leggermente increspato ma è quasi parallelo al fondo dell'alveo e visivamente poco turbolento ed areato. In alvei ghiaiosi relativamente pendenti, queste unità presentato sedimento non uniforme, spesso corazzato, mentre negli alvei a maggiore pendenza possono anche essere presenti sedimenti molto grossolani (ciottoli e massi) che emergono però solo localmente dalla superficie dell'acqua. Le *Glide* sono anche comuni in corsi d'acqua ghiaiosi di bassa pendenza così come in corsi d'acqua a fondo sabbioso, dove sono tipicamente localizzate a valle di *Pool* o a monte di *Riffle*.

### Cascade "Rapida a Gradino"

Unità alluvionali o semi-alluvionali costituite principalmente da massi e/o ciottoli di grandi dimensioni. I sedimenti non sono organizzati in linee (*ribs*) laterali né longitudinali e sono trasportati solo da piene intense e poco frequenti. Le piccole zone di pozza situate tra i massi sono poco profonde e con flusso molto turbolento, e presentano dimensioni inferiori rispetto alla larghezza dell'alveo (sono sub-unità definite *pocket pool*). Per tutti i livelli idrometrici si ha una diffusa presenza di risalti idraulici che dominano la dissipazione dell'energia della corrente, derivante dalla turbolenza di scia indotta dagli elementi più grandi. Queste unità sono tipiche di alvei confinati a forte pendenza (S > 7%).

 $Continua\ nella\ prossima\ pagina$ 

Continua dalla pagina precedente

### Principali unità idromorfologiche

### Rapid "Rapida a Scivolo"

Unità di alvei alluvionali caratterizzate da massi e ciottoli di grandi dimensioni parzialmente organizzati in linee irregolari orientate perpendicolarmente od obliquamente all'alveo, lunghe circa quanto la larghezza dell'alveo (*transverse rib*). Gli elementi di dimensione maggiore sono visibili solamente in condizioni di portata medio-bassa, e risultano sommersi in condizioni di portata a piene rive. Le aree apparentemente simili a pozze visibili in condizioni di magra sono poco profonde e scarsamente sviluppate, pertanto non sono classificabili come unità morfologiche distinte

Si conclude dalla pagina precedente

# Appendice B

# Codice per la ricostruzione delle portate in condizioni di riferimento

Si riportata il codice *MatLab* utilizzato per ricostruire la portata liquida naturale della Dora Baltea in arrivo alla presa della centrale idroelettrica di Quincinetto 2 (TO) nel periodo compreso tra il 2008 e il 2020. Nel codice si sono considerate la massima portata derivabile dall'opera di presa  $(Q_{max})$ , la portata rilevata dall'idrometro di Tavagnasco  $(Q_{Tavagnasco})$  e la portata turbinata, a cui si è stato sommato il DMV rilasciato  $(Q_{turb-DMV})$ .

Nella seconda parte del codice si è corretta la portata naturale ricostruita  $(Q_{Reference})$  considerando gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria eseguiti da C.V.A.~S.p.A.. In questa maniera la serie ricostruita risulta più rappresentativa del naturale regime idrologico.

## B.1 Ricostruzione della portata naturale

```
Qref_mod = [1:length(Qaltered)]';
for i=1:length(Qaltered);
    if Qaltered (i) <= Qmax;
        Qref_mod (i) = Qturb_DMV(i);
    else
        Qref_mod (i) = Q_ref (Qaltered (i));
    end
    %dati mancanti sulla Qaltered 18-20/01/2019
    k = find (Date==(datetime (2019, 01, 18)));
    for i = 0:2;
    Qref_mod (k) = Qturb_DMV(k);
    end</pre>
```

## B.2 Correzione della portata considerando gli interventi di manutenzione

```
\%\, per un intervento di durata di un solo giorno, si va a fare l'
         interpolazione lineare tra i due valori, per un periodo di durata
         maggiore vado a prendere Qaltered
   Qreference\_corretta\_mod = zeros (length(Qref\_mod), 1);
   Qreference\_corretta\_mod (:,1) = Qref\_mod(:,1);
5
  % 2008
  k = find (Date==(datetime (2008, 10, 3))); %limitazione potenza 3/10/2008
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
10 % 2009
  k = find (Date==(datetime (2009, 02, 10)); %fermo impianto 10/02/2009
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
  k = find (Date==(datetime (2009, 03, 02))); %fermo impianto 2-31/03/2009
   for i = 0:29;
       Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
15
   end
  k1 = find (Date==(datetime (2009, 04, 01))); %limitazione potenza
         01 - 02/04/20009
  20 Qreference_corretta_mod (k2) = Q_ref(Qaltered(k2));
  k1 = find (Date==(datetime (2009, 08, 21))); %fermo impianto 21-22/08/2009
k2 = find (Date==(datetime (2009, 08, 22)));
   Qreference\_corretta\_mod (k1) = Q\_ref (Qaltered(k1));
 \begin{array}{l} Qreference\_corretta\_mod (k2) = Q\_ref(Qaltered(k2)); \\ 25 \ k = \ find \ (Date==(datetime \ (2009, \ 08, \ 28))); \ \% limitazione \ potenza \ 28/08/2009 \end{array} 
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2009, 08, 31))); %limitazione potenza 31/08/2009
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2009, 09, 19))); %fermo impianto 19/09/2009
30 \operatorname{Qreference\_corretta\_mod}(k) = (\operatorname{Qref\_mod}(k-1)+\operatorname{Qref\_mod}(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2009, 09, 21))); %fermo impianto 21/09/2009
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
  k = find (Date==(datetime (2009, 09, 25))); %fermo impianto 25/09/2009
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
35 \text{ k} = \text{find} (\text{Date} = = (\text{datetime} (2009, 09, 29))); \% \text{fermo impianto} 29/09/2009
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2009, 10, 01))); %fermo impianto 01/10/2009
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
  k = find (Date==(datetime (2009, 10, 08))); %fermo impianto 8-10/10/2009
40 for i = 0:2;
       Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
   end
  k1 = find (Date==(datetime (2009, 12, 14))); %fermo impianto 14-15/12/2009
  k2 = find (Date==(datetime (2009, 12,
                                            (15)));
45 Qreference_corretta_mod (k1) = Q_ref(Qaltered(k1));
   Qreference\_corretta\_mod (k2) = Q\_ref(Qaltered(k2));
  \% 2010
  k = find (Date==(datetime (2010, 02, 05))); %limitazione potenza 05/02/2010
50 Qreference_corretta_mod(k) = (\operatorname{Qref}_{-mod}(k-1)+\operatorname{Qref}_{-mod}(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2010, 02, 15))); %limitazione potenza 15/02/2010
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
  k = find (Date==(datetime (2010, 03, 08))); %fermo impianto 8-26/03/2010
   for i = 0:19;
55
       Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
  end
  k = find (Date==(datetime (2010, 08, 03))); %fermo impianto 03/08/2010
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
  k = find (Date==(datetime (2010, 09, 19))); %fermo impianto 19/09/2010
60 Qreference_corretta_mod(k) = (\operatorname{Qref}_{mod}(k-1)+\operatorname{Qref}_{mod}(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2010, 11, 30))); %fermo impianto 30/11/2010
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
```

```
% 2011
65 k = find (Date==(datetime (2011, 02, 07))); %fermo impianto 7-26/02/2011
   for i = 0:19;
       Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
   end
   k = find (Date==(datetime (2011, 04, 08))); %fermo impianto 08/04/2011
70 Qreference_corretta_mod(k) = (\operatorname{Qref_mod}(k-1)+\operatorname{Qref_mod}(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2011, 04, 13))); %fermo impianto 13/04/2011
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2011, 09, 21))); %fermo impianto 21/09/2011
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
75 k = find (Date==(datetime (2011, 11, 04))); %fermo impianto 04-07/11/2011:
basta correggere il 04 con Qaltered corretta
   Qreference\_corretta\_mod(k) = Q\_ref(Qaltered(k));
   k = find (Date==(datetime (2011, 11, 09))); %limitazione potenza 09/11/2011
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
80 % 2012
   k = find (Date==(datetime (2012, 02, 06))); %fermo impianto 6-17/02/2012
   for i = 0:11;
       Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
   end
85 k1 = find (Date==(datetime (2012, 11, 28))); %limitazione potenza
         28 - 29/11/2012
   k2 = find (Date = (datetime (2012, 11, 29)));
   Qreference\_corretta\_mod (k1) = Q\_ref(Qaltered(k1));
   Qreference\_corretta\_mod (k2) = Q\_ref(Qaltered(k2));
   k = find (Date==(datetime (2012, 12, 10))); %limitazione potenza 10/12/2012
90 Qreference_corretta_mod(k) = (\text{Qref_mod}(k-1)+\text{Qref_mod}(k+1))/2;
   \%2013
   k = find (Date==(datetime (2013, 02, 04))); %fermo impianto 4-15/02/2013
   for i = 0:11;
       Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
95
   end
   k = find (Date==(datetime (2013, 02, 24))); %limitazione potenza 24/02/2013
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2013, 03, 05))); %limitazione potenza 05/03/2013
100 Qreference_corretta_mod(k) = (\text{Qref_mod}(k-1)+\text{Qref_mod}(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2013, 09, 25))); %limitazione potenza 25-27/09/2013
   for i = 0:2:
       Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
   end
105 k = find (Date==(datetime (2013, 10, 22))); %limitazione potenza 22/10/2013
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2013, 11, 25))); %limitazione potenza 25/11/2013
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2013, 11, 29))); %limitazione potenza 29/11/2013
110 Qreference_corretta_mod(k) = (\operatorname{Qref_mod} (k-1)+\operatorname{Qref_mod} (k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2013, 12, 04)));%limitazione potenza 04/12/2013
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2013, 12, 06))); %limitazione potenza 06/12/2013
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
115 k1 = find (Date==(datetime (2013, 12, 12))); %limitazione potenza
         12 - 13/12/2013
   k2 = find (Date==(datetime (2013, 12, 13)));
   Qreference\_corretta\_mod (k1) = Q\_ref(Qaltered(k1));
   Qreference_corretta_mod (k2) = Q_ref(Qaltered(k2));
   k = find (Date==(datetime (2013, 12, 18))); %limitazione potenza 18/12/2013
120 \operatorname{Qreference\_corretta\_mod}(k) = (\operatorname{Qref\_mod}(k-1)+\operatorname{Qref\_mod}(k+1))/2;
   %2014
   k = find (Date==(datetime (2014, 02, 24))); %fermo impianto 24/02-07/03/2014
   for i = 0:11;
       Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
125
   end
   k = find (Date==(datetime (2013, 11, 06))); %limitazione potenza 06/11/2014
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2013, 12, 09))); %limitazione potenza 09/12/2014
130 Qreference_corretta_mod(k) = (\operatorname{Qref_mod} (k-1) + \operatorname{Qref_mod} (k+1))/2;
```

```
%2015
   k = find (Date==(datetime (2015, 02, 25)));%limitazione potenza 25/02/2015
    Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
135 k = find (Date==(datetime (2015, 03, 02))); %fermo impianto 02-24/03/2015
    for i = 0:22;
         Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
    end
    k1 = find (Date==(datetime (2015, 04, 03))); %limitazione potenza
           03 - 04/04/2015
140 k2 = find (Date==(datetime (2015, 04, 04)));
    Qreference\_corretta\_mod (k1) = Q\_ref(Qaltered(k1));
Qreference\_corretta\_mod (k2) = Q\_ref(Qaltered(k2));
    k1 = find (Date==(datetime (2015, 09, 25))); %limitazione potenza
           25 - 26/09/2015
k2 = find (Date==(datetime (2015, 09, 26)));
145 Qreference_corretta_mod (k1) = Q_ref(Qaltered(k1));
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
150 \%2016
    k = find (Date==(datetime (2016, 01, 29))); %limitazione potenza 29/01/2016
    Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
    k = find (Date==(datetime (2016, 02, 03))); %limitazione potenza 03/02/2016
    Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
155 k = find (Date==(datetime (2016, 02, 29))); %fermo impianto 29/02-18/03/2016
    for i = 0:18;
         Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
    end
    k = find (Date==(datetime (2016, 03, 21))); %limitazione potenza 21/03/2016
160 Qreference_corretta_mod(k) = (\operatorname{Qref_mod}(k-1)+\operatorname{Qref_mod}(k+1))/2;
    k1 = find (Date==(datetime (2016, 03, 30))); %limitazione potenza
           30 - 31/03/2016
     \begin{array}{ll} k2 = find & (Date == (datetime \ (2016, \ 03, \ 31))); \\ Qreference_corretta_mod & (k1) = Q_ref(Qaltered(k1)); \end{array} 
    Qreference\_corretta\_mod (k2) = Q\_ref(Qaltered(k2));
165 k = find (Date==(datetime (2016, 04, 05))); %limitazione potenza 05/04/2016
    Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
    \mathbf{k} = \text{find} (\text{Date} = (\text{datetime} (2016, 04, 12))); \%limitazione potenza 12/04/2016
    Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
    k = find (Date==(datetime (2016, 04, 16))); %limitazione potenza 16/04/2016
170 Qreference_corretta_mod(k) = (\operatorname{Qref_mod}(k-1)+\operatorname{Qref_mod}(k+1))/2;
    k = find (Date==(datetime (2016, 04, 19))); %limitazione potenza 19/04/2016
    Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
    k = find (Date==(datetime (2016, 09, 14))); %limitazione potenza 14/09/2016
    Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
175 k = find (Date==(datetime (2016, 09, 17))); %limitazione potenza 17/09/2016
    \label{eq:Qreference_corretta_mod(k)} \mbox{Qreference_corretta_mod(k)} \ = \ (\mbox{Qref_mod}\ (\mbox{k-1}) + \mbox{Qref_mod}\ (\mbox{k+1}) ) \ / \ 2;
    k = find (Date==(datetime (2016, 10, 03))); %limitazione potenza 03/10/2016
    \begin{array}{l} \operatorname{Qreference\_corretta\_mod}\left(k\right) = \left(\operatorname{Qref\_mod}\left(k-1\right) + \operatorname{Qref\_mod}\left(k+1\right)\right)/2; \\ k = \operatorname{find}\left(\operatorname{Date==}(\operatorname{datetime}\left(2016, 11, 09\right)\right)); \\ \end{array} 
180 Qreference_corretta_mod(k) = (\operatorname{Qref_mod}(k-1)+\operatorname{Qref_mod}(k+1))/2;
    k = find (Date==(datetime (2016, 11, 11))); %limitazione potenza 11/11/2016
    Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   % 2017
185 k = find (Date==(datetime (2017, 02, 12))); %limitazione potenza 12/02/2017
    Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
    k1 = find (Date==(datetime (2017, 02, 16))); %limitazione potenza
           16 - 17/02/2017
    k2 = find (Date==(datetime (2017, 02, 17)));
\begin{array}{l} \text{Qreference\_corretta\_mod} \quad (k1) = \text{Q\_ref(Qaltered(k1));} \\ \text{190 } \text{Qreference\_corretta\_mod} \quad (k2) = \text{Q\_ref(Qaltered(k2));} \\ \text{k = find} \quad (\text{Date==(datetime (2017, 02, 20))); \% fermo impianto 20/02-11/03/2017} \end{array}
    for i = 0:19;
         Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
    end
195 k = find (Date==(datetime (2017, 03, 14))); %limitazione potenza 14/03/2017
    \label{eq:Qreference_corretta_mod(k)} \mbox{Qreference_corretta_mod(k)} = (\mbox{Qref_mod(k-1)} + \mbox{Qref_mod(k+1)}) \mbox{$/2$;}
    k = find (Date==(datetime (2017, 03, 23))); %limitazione potenza 23/03/2017
```
```
Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2017, 04, 01))); %limitazione potenza
          01/04 - 12/06/2017
200 for i = 0:72;
        Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
   end
   k = find (Date==(datetime (2017, 10, 10))); %fermo impianto 9-10/10/2017:
          media solo il 10
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
205 k = find (Date==(datetime (2017, 10, 16))); %limitazione potenza 16/10/2017
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2017, 10, 31))); %fermo impianto 31/10/2017
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2017, 11, 17))); %fermo impianto 17/11/2017
210 Qreference_corretta_mod(k) = (\operatorname{Qref_mod}(k-1)+\operatorname{Qref_mod}(k+1))/2;
   k1 = find (Date==(datetime (2017, 11, 19))); %fermo impianto 19-20/11/2017
k2 = find (Date==(datetime (2017, 11, 20)));
   Qreference\_corretta\_mod (k1) = Q\_ref(Qaltered(k1));
 \begin{array}{l} Qreference\_corretta\_mod (k2) = Q\_ref(Qaltered(k2)); \\ 215 \ k = find \ (Date==(datetime \ (2017, \ 11, \ 22))); \ \% fermo \ impianto \ 22/11/2017 \end{array} 
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   %2018
   k = find (Date==(datetime (2018, 01, 07))); %fermo impianto 7-9-01/2018: Qalt
          solo il 07
220 Qreference\_corretta\_mod(k) = Q\_ref(Qaltered(k));
   k = find (Date==(datetime (2018, 02, 18))); %limitazione potenza 18/02/2018
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2018, 03, 05))); %fermo impianto 05-29/03/2018
   for i = 0:24:
        Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
225
   end
   k = find (Date==(datetime (2018, 04, 11))); %fermo impianto 11/04/2018
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2018, 14, 19))); %fermo impianto 19/04/2018
230 Qreference_corretta_mod(k) = (\operatorname{Qref_mod} (k-1)+\operatorname{Qref_mod} (k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2018, 12, 11))); %fermo impianto 11-13/12/2018
   for i = 0:2;
        Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
   end
235
   %2019
   k1 = find (Date==(datetime (2019, 02, 11))); %limitazione potenza
         11 - 12/02/2019
   k2 = find (Date==(datetime (2019, 02, 12)));
   Qreference_corretta_mod (k1) = Q_{ref}(Qaltered(k1));
240 Qreference_corretta_mod (k2) = Q_ref(Qaltered(k2));
   k = find (Date==(datetime (2019, 02, 18))); %fermo impianto 18/02-01/03/2019
   for i = 0:11;
        Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
   end
245 k = find (Date==(datetime (2019, 03, 20))); %limitazione potenza 20-24/03/2019
   for i = 0:4;
        \label{eq:Qreference_corretta_mod} $ (k+i) = Q_ref(Qaltered(k+i)); $ \\ \end{cases}
   end
   k1 = find (Date==(datetime (2019, 10, 01))); %fermo impianto 0102/10/2019
250 k2 = find (Date==(datetime (2019, 10, 02)));
   Qreference\_corretta\_mod (k1) = Q\_ref(Qaltered(k1));
   \hat{Q}reference_corretta_mod (k2) = \hat{Q}_ref(\hat{Q}altered(k2));
   k = find (Date==(datetime (2019, 11, 28))); %limitazione potenza 28/11/2019
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
255
   %2020
   k = find (Date==(datetime (2020, 02, 06))); %limitazione potenza 06/02/2020
   Qreference\_corretta\_mod(k) = (Qref\_mod(k-1)+Qref\_mod(k+1))/2;
   k = find (Date==(datetime (2020, 03, 02))); %fermo impianto 02-16/03/2019
260 \text{ for } i = 0:14;
        Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));
   end
   k = find (Date==(datetime (2020, 10, 08))); %fermo impianto 02-08/10/2020
   Qreference\_corretta\_mod(k) = Qaltered(k) * 0.98;
```

- 265 k = find (Date==(datetime (2020, 10, 14))); %fermo impianto 14-16/10/2020 for i = 0:2; $Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));$  $\operatorname{end}$
- k = find (Date==(datetime (2020, 12, 26))); %fermo impianto 26-29/12/2020270 for i = 0:3;

 $Qreference\_corretta\_mod (k+i) = Q\_ref(Qaltered(k+i));$ end

k = find (Date==(datetime (2020, 12, 31))); %fermo impianto 31/12/2020Qreference\_corretta\_mod(k) = Q\_ref(Qaltered(k));

### Appendice C

# Validazione modello idrologico CONTINUUM - Fondazione CIMA

Si riportata, a titolo di esempio, il codice *MatLab* utilizzato per la validazione del modello *CONTINUUM* di Fondazione CIMA nei pressi dell'opera di presa della centrale di Champagne 2.

Dopo aver importato i dati si è andati ad ordinare le portate e definire i quantili. A questo punto è stato possibile dividere la serie in condizioni di piena  $(Q < Q_{50})$  e condizioni di magra  $(Q > Q_{50})$ . Si sono quindi calcolati gli indici di performance e si sono generati gli scatter plot per le due condizioni.

```
% ordino le portate, cancello valori NaN
  Qmod_sort = sort (Qmod, 'descend');
  Qobs_sort = sort (Qobs, 'descend');
  Qmod_sort(isnan (Qmod_sort)) = []; %cancello valori NaN
5 Qobs_sort(isnan (Qobs_sort)) = []; %cancello valori NaN
  % Calcolo dei quantili: portata osservata
  ind = 1:1: length (Qobs_sort);
  ind = ind':
  ind = ind/length (Qobs_sort)*100;
10 ind = round (ind, 1);
  for i = 1:100:
       Qquant_obs (i,1) = mean (Qobs\_sort (find(ind=i)));
  end
  Qquant_obs = round (Qquant_obs, 2);
15 % Calcolo dei quantili: portata modellata
  ind = 1:1: length (Qmod_sort);
  ind = ind';
  ind = ind/length (Qmod_sort) *100;
  ind = round (ind, 1);
20 for i = 1:100;
      Qquant_mod (i, 1) = mean (Qmod_sort (find(ind=i)));
  end
  Qquant_mod = round (Qquant_mod, 2);
25 % scatter plot portate piena e indicatori di performance
  for i = 1:50;
      Qmod50\_sup (i,1) = Qquant\_mod (i,1);
       Qobs50\_sup (i,1) = Qquant\_obs (i,1);
  end
30 \text{ obs_mean_sup} = \text{mean} (\text{Qobs50_sup});
```

```
mod\_mean\_sup = mean (Qmod50\_sup);
       for i = 1: length (Qmod50_sup);
                                                                                                           %coefficiente di efficienza: NSE
                  num (i,1) = (Qobs50\_sup (i,1) - Qmod50\_sup (i,1))^2;
                  den (i,1) = (Qobs50\_sup (i,1) - obs\_mean\_sup)^2;
35
       end
       NSE_{sup} = 1 - sum(num) / sum(den);
                 for i = 1: length (Qmod50_sup);
40
                  den (i,1) = (abs(Qmod50\_sup(i,1) - obs\_mean\_sup)+abs(Qobs50\_sup(i,1) - obs\_mean\_sup(i,1) - obs\_maan\_sup(i,1) - obs\_maan\_sup(i,1) - obs\_maan\_sup(i,1)
                                   obs_mean_sup))^2;
       end
       d_sup = 1 - sum(num) / sum(den);
45 for i = 1: length (Qmod50_sup);
                                                                                                            %radice dell'errore quadratico medio: RMSE
                  num (i,1) = (Qmod50\_sup (i,1) - Qobs50\_sup (i,1))^2;
       end
       RMSE_sup = sqrt(sum(num)/length(Qmod50_sup));
50 testo_sup={sprintf('NSE = %.3f', NSE_sup), sprintf('d = %.3f', d_sup), ...
                 sprintf('RMSE = %.3f', RMSE_sup)};
        figure (1)
       scatter (Qmod50_sup, Qobs50_sup, 15, '*b')
       hold on
55 plot ([9, 17], polyval ([1 0], [9, 17]), '-r')
       hold off
       xlabel('Portata_{modellata} (m^3/s)')
       ylabel('Portata_{osservata} (m^3/s)')
       title ('Scatter plot di piena (Q>Q50): Champagne 2')
60 annotation('textbox', [0.2, 0.8, 0.1, 0.1], 'String', testo_sup);
       grid on
      % scatter plot con portate di magra e indicatori di performance
       for i = 50.100;
                   Qmod50\_inf (i-49,1) = Qquant\_mod (i,1);
65
                   Qobs50\_inf (i-49,1) = Qquant\_obs (i,1);
       end
       obs_mean_inf = mean (Qobs50_inf);
       mod_mean_inf = mean (Qmod50_inf);
70
       for i = 1: length (Qmod50_inf);
                                                                                                            %coefficiente di efficienza: NSE
                 num (i,1) = (Qobs50_inf(i,1) - Qmod50_inf(i,1))^2;
                  den (i,1) = (Qobs50_inf (i,1) - obs_mean_inf)^2;
       end
75 NSE_inf = 1 - \operatorname{sum}(\operatorname{num}) / \operatorname{sum}(\operatorname{den});
       for i = 1: length (Qmod50_inf);
                                                                                                           %inidice di corrispondenza: d
                  num (i,1) = (Qobs50_{inf} (i,1) - Qmod50_{inf} (i,1))^2;
                  den (i,1) = (abs(Qmod50_inf(i,1) - obs_mean_inf)+abs(Qobs50_inf(i,1) - obs_mean_inf)+abs(Qobs60_inf(i,1) - obs_mean_inf)+abs(Qobs60_inf(
                                   obs_mean_inf))^2;
80 end
       d_{-inf} = 1 - \frac{sum(num)}{sum(den)};
       for i = 1: length (Qmod50_inf);
                                                                                                        %radice dell'errore quadratico medio: RMSE
                 num (i,1) = (Qmod50_inf (i,1) - Qobs50_inf (i,1))^2;
85 end
       RMSE_inf =sqrt( sum(num)/length (Qmod50_inf));
       testo_inf={sprintf('NSE = %.3f', NSE_inf), sprintf('d = %.3f', d_inf), ...
                sprintf('RMSE = %.3f',RMSE_inf);
90 figure (2)
       scatter (Qmod50_inf, Qobs50_inf, 15, **b')
       hold on
       plot ([1,10], polyval ([1 0], [1, 10]), '-r')
       hold off
95 xlabel('Portata_{modellata} (m^3/s)')
       ylabel('Portata_{osservata} (m^3/s)')
       title ('Scatter plot di magra (Q<Q50): Champagne 2')
       annotation('textbox', [0.2,0.8,0.1,0.1], 'String', testo_inf);
       grid on
```

### Appendice D

# Calcolo del coefficiente di Manning

Si riporta il codice *MatLab* utilizzato per estrarre i valori di portata e area bagnata registrati da *RiverSurveyor M9* durante il rilevamento del 26 gennaio 2021. Il codice è in grado di calcolare analiticamente l'area e il perimetro bagnato partendo dai dati di profondità misurata lungo il transetto.

```
%% selezione dati interesse
   dati = [System.Step, Summary.Track, Summary.Depth];
   q = Summary. Total_Q;
  \mathbf{Q} = \mathbf{q} \left( \, \texttt{length} \left( \, \mathbf{q} \, \right) \, \right) \, ;
5 Area_software = Summary. Area;
  95% eliminazione valori step diverso da 3 e definizione variabili
   dati_cor = dati (dati (:,1) == 3, :);
   depth = dati_cor (:, 4);
10 % differenze
  dx = diff (dati_cor (:,2)); 
dy = diff (dati_cor (:,3));
   d_{-}depth = diff (depth);
15 dx = [0; dx];
   dy = [0; dy];
   d_depth = [0; d_depth];
  % spostamento
20 s = sqrt (dx.^2+dy.^2);
   spostamento_cumulato = cumsum (s);
  %% Calcolo perimetro bagnato
   d_{\text{-}}fondo = \text{sqrt} (s.^2 + d_{\text{-}}depth.^2);
25 \text{ perimetro} = \text{sum} (d_{\text{-}}fondo);
  %% Calcolo area bagnata
   for i = 1: length (depth)-1
      area (i) = ((depth (i)+depth (i+1))*s (i+1))/2;
30 end
   Area_bagnata = sum (area);
   sprintf('Portata estratta da RiverSurveyor = %.8f',Q)
   sprintf ('Area bagnata da RiverSurveyor = %.8f', Area_software)
35 sprintf ('Area bagnata calcolata = %8f', Area_bagnata)
   sprintf ('Perimetro bagnato = %8f', perimetro)
```

## Appendice E

## Modelli di habitat per la fauna ittica

All'interno del capitolo 6.3 sono state descritte le quattro specie ittiche e i relativi stati vitali scelte come target per la definizione del modello di idoneità di habitat in *SimStream*:

- 1. Trota Fario (Salmo Trutta) stato vitale adulto e giovane;
- 2. Trota Marmorata (Salmo Marmoratus) stato vitale adulto e giovane;
- 3. Scazzone (*Cottus gobio*) stato vitale adulto;
- 4. Vairone (*Telestes muticellus*) stato vitale adulto e giovane.

Per stabilire i criteri di idoneità di habitat per le diverse specie target, ai diversi stadi vitali, ci si basa su dati biologici raccolti in campo, a livello regionale, a scala di Unità Morfologica Idraulica.

Attraverso l'applicazione della tecnica statistica ad apprendimento automatico *Random Forest* (RF), si possono costruire i modelli biologici su scala regionale, necessari per la definizione dell'idoneità di habitat.

All'interno di *SimStream* sono presenti due diverse tipologie di di modelli statistici che valutano la probabilità di *Presenza* o *Abbondanza* di una data specie.

A titolo di esempio, di seguito si riportano i modelli *Random Forest* **Pre-senza/Assenza** delle specie target presenti in *SimStream*. Poiché il modello utilizzato per lo stato giovane della *Salmo Trutta* e della *Salmo Marmoratus* è lo stesso, si è riportato solo quello della *Salmo Trutta* (vedasi figura E.1).

#### E.1 Trota Fario (Salmo Trutta)



(b) Stato vitale giovane

**Figura E.1:** Modello RF Presenza/Assenza della Trota Fario (*Salmo Trutta*) allo stato vitale adulto e giovane

#### E.2 Trota Marmorata (Salmo Marmoratus)



**Figura E.2:** Modello RF di Presenza/Assenza della Trota Marmorata (*Salmo Marmoratus*) allo stato vitale adulto

#### E.3 Scazzone (Cottus Gobio)



### **Figura E.3:** Modello RF Presenza/Assenza dello Scazzone (*Cottus gobio*) allo stato vitale adulto

#### E.4 Vairone (Telestes Muticellus)



**Figura E.4:** Modello RF di Presenza/Assenza del Vairone (*Telestes muticellus*) allo stato vitale adulto e giovane

### Appendice F

# Definizione del file di testo MEAS delle misure puntuali

Si riporta il codice *MatLab* utilizzato per costruire il file di testo *MEAS*, contenente i dati puntuali di profondità, velocità e substrato, tale da rispettare tutti i parametri richiesti da *SimStream*.

```
90% Apertura file zonal histogram: velocita, profondita e substrato
  fiume='Dora_Nus';
  portata='3.8'; %cambio a seconda della portata
5 folder='D:\OneDrive\ARCH_MATTEO\_POlITO\tesi\analisi_Dora_Nus\QGIS\HMU\
        tabelle_riassunto';
  filename='3.8_HMU_depth_vel_substrates.xlsx'; %cambio a seconda della portata
  [n, t, r] = xlsread(fullfile(folder, filename));
  numero_HMU=unique(n(:,2));
10 HMU_TIPO=r (2: \text{end}, 3):
  HMU_TIPO_OK=strrep(HMU_TIPO,'ISOLATED_POND','POOL');
  DEPTH_freq=n(:, 5:13)./n(:, 14);
  VEL_freq=n(:, 15:23)./n(:, 24);
  SUBSTRATE_freq=n(:, 25:36)./n(:, 37);
15 DEPTH_PERC_freq=round (DEPTH_freq *100);
  VEL_PERC_freq=round(VEL_freq*100)
  SUBSTRATE_PERC_freq=round(SUBSTRATE_freq*100);
  val_zero = 0.14;
20 %% Frequenza profondita: 100
  for i=1:length (numero_HMU)
       if sum(DEPTH_PERC_freq(i,:))~=100
           new_max(i, 1) = max(DEPTH_PERC_freq(i, :)) - (sum(DEPTH_PERC_freq(i, :)) - 100)
       else
           new_max(i,1)=max(DEPTH_PERC_freq(i,:));
25
      end
  end
    [, ix] = \max(DEPTH_PERC_{freq}, [], 2);
  DEPTH_PERC_freq(sub2ind(size(DEPTH_PERC_freq), [1: length(numero_HMU)].', ix))=
        new_max;
30
  for i=1:length (numero_HMU)
       if sum(DEPTH_PERC_freq(i,:))~=100
           error('NO');
```

```
end
35 end
   97% Frequenza velocita: 100
   for i=1:length(numero_HMU)
        if sum(VEL_PERC_freq(i,:))~=100
            new_max(i, 1) = max(VEL_PERC_freq(i, :)) - (sum(VEL_PERC_freq(i, :)) - 100);
40
        else
            new_max(i,1)=max(VEL_PERC_freq(i,:));
        end
   \operatorname{end}
45
   [~,ix]=max(VEL_PERC_freq,[],2);
VEL_PERC_freq(sub2ind(size(VEL_PERC_freq),[1:length(numero_HMU)].',ix))=
         new_max;
   for i=1:length(numero_HMU)
50
        if sum(VEL_PERC_freq(i,:))~=100
            error('NO');
        end
   end
55 %% Frequenza substrato: 100
   for i=1:length (numero_HMU)
        if sum(SUBSTRATE_PERC_freq(i,:))~=100
            new_max(i,1)=max(SUBSTRATE_PERC_freq(i,:))-(sum(SUBSTRATE_PERC_freq(i
                   (,:)) -100);
        else
            new_max(i,1)=max(SUBSTRATE_PERC_freq(i,:));
60
        end
   end
     , ix] = \max(\text{SUBSTRATE}_{\text{PERC}_{\text{freq}}}, [], 2);
65 SUBSTRATE_PERC_freq(sub2ind(size(SUBSTRATE_PERC_freq),[1:length(numero_HMU)]
          ].', ix))=new_max;
   for i=1:length (numero_HMU)
        if sum(SUBSTRATE_PERC_freq(i,:))~=100
            error('NO');
        end
70
   \operatorname{end}
   %% Colonna HMUNUM
   \texttt{HMU}\texttt{NUM} = \texttt{repmat}([1:1:length(\texttt{numero}\texttt{HMU})]', 1, 100);
75 HMU.NUM=reshape(HMU.NUM', [length(numero_HMU)*100,1]);
   %% Colonna HMU_TYPE
   HMU_TYPE=repmat(HMU_TIPO_OK, 1, sum(SUBSTRATE_PERC_freq(1,:)));
   HMU_TYPE=reshape(HMU_TYPE', [length(numero_HMU)*100,1]);
80
   % Colonna PNTNUM
   PNINUM=repmat([1:1:sum(SUBSTRATE_PERC_freq(1,:))]', length(numero_HMU), 1);
   %% Colonna DEPTH
85 for j=1:1:length (numero_HMU)
        non_zeros_DEPTH=nonzeros(DEPTH_PERC_freq(j,:))';
        non_zeros_DEPTH_index=find (DEPTH_PERC_freq(j,:)) ';
        for i=1:1:length(non_zeros_DEPTH)
            depth_cell{j,i}=repmat(non_zeros_DEPTH_index(i),[non_zeros_DEPTH_index
                   (1),non_zeros_DEPTH(i)]);
90
       {\bf end}
   end
   for j=1:1:length (numero_HMU)
        depth_1 { j,:} = unique ( cell2mat ( depth_cell ( j,:) ), 'rows', 'stable' );
95 end
   colonna_DEPTH=reshape(cell2mat(depth_1)', [length(numero_HMU)*100,1]);
   colonna_DEPTH_ok=colonna_DEPTH.*val_zero;
   %% Colonna VELOCITY
100 for j=1:1:length (numero_HMU)
```

```
non_zeros_VEL=nonzeros(VEL_PERC_freq(j,:))';
        non_zeros_VEL_index=find (VEL_PERC_freq(j,:)) ';
        for i=1:1:length(non_zeros_VEL)
            vel_cell{j,i}=repmat(non_zeros_VEL_index(i), [non_zeros_VEL_index(1),
                   non_zeros_VEL(i)]);
105
        end
   end
   for j=1:1:length(numero_HMU)
        velocity_1 { j,:}=unique (cell2mat (vel_cell (j,:)), 'rows', 'stable');
110 end
   colonna_VELOCITY=reshape(cell2mat(velocity_1)',[length(numero_HMU)*100,1]);
   colonna_VELOCITY_ok=colonna_VELOCITY.*val_zero;
   %% Colonna SUBSTRATE
115 Classi_substrato={'GIGALITHAL';'MEGALITHAL';'MACROLITHAL';'MESOLITHAL';'
          MICROLITHAL'; 'AKAL'; 'PSAMMAL'; 'PELAL'; 'DETRITUS'; 'XYLAL'; 'SAPROPEL'; '
          PHYTAL ' };
   indice_classe_substrato = [1:1:length(Classi_substrato)]';
   for j=1:1:length (numero_HMU)
        non_zeros_SUBSTRATE=nonzeros(SUBSTRATE_PERC_freq(j,:))';
        non_zeros_SUBSTRATE_index=find (SUBSTRATE_PERC_freq(j,:)) ';
120
        for i = 1:1: length (non_zeros_SUBSTRATE)
            substrate_cell{j,i}=repmat(non_zeros_SUBSTRATE_index(i),[
                   non_zeros_SUBSTRATE_index(1), non_zeros_SUBSTRATE(i)]);
       end
   end
       j = 1:1: length (numero_HMU)
125 for
        substrate_1 { j ,: } = unique (cell2mat (substrate_cell (j ,: )), 'rows', 'stable');
   end
   colonna_SUBSTRATE=reshape(cell2mat(substrate_1)', [length(numero_HMU)*100,1]);
130 %% Definizione colonne:
   colonna_SUBSTRATE_ok=cell(size(colonna_SUBSTRATE));
   colonna_SUBSTRATE_ok(colonna_SUBSTRATE==1)={'GIGALITHAL'};
   colonna_SUBSTRATE_ok(colonna_SUBSTRATE==2)={ 'MEGALITHAL '};
colonna_SUBSTRATE_ok (colonna_SUBSTRATE==3)={'MACROLITHAL'};
135 colonna_SUBSTRATE_ok (colonna_SUBSTRATE==4)={'MESOLITHAL'};
   colonna_SUBSTRATE_ok(colonna_SUBSTRATE==5)=\{, MICROLITHAL, \}
   colonna_SUBSTRATE_ok(colonna_SUBSTRATE==6)={'AKAL'};
   colonna_SUBSTRATE_ok(colonna_SUBSTRATE==7)={'PSAMMAL'};
   colonna_SUBSTRATE_ok(colonna_SUBSTRATE==8)={'PELAL'};
140 colonna_SUBSTRATE_ok(colonna_SUBSTRATE==9)={'DETRITUS'};
   colonna_SUBSTRATE_ok(colonna_SUBSTRATE==10)={'XYLAL'};
   colonna_SUBSTRATE_ok(colonna_SUBSTRATE==11)={'SAPROPEL'};
   colonna_SUBSTRATE_ok (colonna_SUBSTRATE==12)={`PHYTAL'};
145 % Generazione matrice MEAS (.txt) per SimStream
   INDICI_COLONNE={'HMU_NUM', 'HMU_TYPE', 'PNTNUM', 'DEPTH', 'VELOCITY', 'SUBSTRATE'};
matrice=[num2cell(HMU.NUM), HMU_TYPE, num2cell(PNINUM), num2cell(colonna_DEPTH_ok
          ), num2cell(colonna_VELOCITY_ok), colonna_SUBSTRATE_ok];
   file_output=sprintf('meas_%s_%s_HMU.xls',fiume,portata);
150 xlswrite (file_output, INDICL_COLONNE, 1, 'A1');
```

xlswrite(file\_output, matrice, 1, 'A2');