



POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO
A.A. 2020/2021

Alterazioni ambientali su di un corso d'acqua
dovute alla modifica del campo di moto in seguito
all'inserimento di un impianto idroelettrico
Caso studio traversa a San Mauro Torinese (Iren Energia S.p.a)

RELATORI:

ALBERTO VIGLIONE

CLAUDIO COMOGLIO

RICCARDO VESIPA

CANDIDATA:

MIRIANA RAMAT

RINGRAZIAMENTI

Ho sempre pensato che ringraziare le persone sia davvero importante ed ho sempre cercato di farlo nel modo migliore, quindi i seguenti ringraziamenti sono per me davvero sentiti.

Ho avuto la fortuna di imparare molto da questo lavoro, ho conosciuto tre relatori che hanno saputo trasmettermi tante conoscenze e mi hanno permesso di sviluppare molti aspetti interessanti. Li ringrazio per avermi seguita in questo studio, nonostante le difficoltà dovute al momento particolare che stiamo attraversando. Ringrazio anche l'Ing. Brizzo per avermi dato la possibilità di svolgere prima, il tirocinio all'interno di una delle più importanti e dinamiche multiutility del panorama italiano quel è IREN S.p.A., e dopo per avermi dato la possibilità di svolgere questo lavoro su un loro impianto.

Grazie all'esperienza di tirocinio ho conosciuto un gruppo di lavoro davvero bello e professionale, ringrazio Vilmer, Mauro e Vincenzo per tutti i loro insegnamenti.

Ringrazio soprattutto la mia famiglia, i miei genitori in primis perché hanno sempre creduto nelle mie possibilità senza fare pressioni e permettendomi di frequentare le lezioni al Politecnico di Torino. Sono due persone davvero speciali, lo so che detto da una figlia sembra scontato, ma chi li conosce sono pronta a scommetterci che pensa la stessa cosa. Mi hanno cresciuto con i miei fratelli senza mai farci mancare nulla ed insegnandoci tutti i loro valori in particolare l'importanza della condivisione e del duro lavoro.

Voglio ringraziare mia sorella Je per ricordarmi ogni giorno che è importante divertirsi ed essere felici; mio fratello Andre per ricordarmi che anche gli ingegneri a volte, e ripeto a volte, sbagliano e a Ivan per aver avuto la pazzia di accettare di entrare a far parte della nostra famiglia.

Sono davvero fortunata ad avere una famiglia così, ma sono anche molto fortunata ad aver incontrato un ragazzo davvero unico e speciale, Matte mi sopporta da tanti anni e vi assicuro che non è una passeggiata. E' sempre riuscito a strapparmi un sorriso in ogni momento, amo la sua felicità contagiosa. Condividiamo tutti i nostri interessi è anche grazie a lui che durante gli anni universitari ho potuto continuare a fare atletica a livello agonistico. Ho conosciuto la sua famiglia, e mi hanno fin da subito fatto sentire a casa quindi un ringraziamento speciale va anche a loro.

Per me lo sport è fondamentale, per questo motivo devo ringraziare assolutamente anche tutta la squadra dell'Atletica Susa Adriano Aschieris. Il suo presidente ed allenatore Pablo, il super coach Agu, i quali ammiro per tutta la passione che trasmettono ogni giorno. A tutti i miei compagni di allenamento che non si risparmiano mai e tutti insieme ci divertiamo sempre nella fatica degli allenamenti e delle gare.

In questi cinque anni ho imparato molto, venendo da un piccolo paese di montagna i primi tempi al Politecnico di Torino non sono stati facili. Questo capita più o meno a tutti perché ti ritrovi catapultata in una realtà diversa da quella alla quale eri abituata.

Dopo poco tempo ti accorgi che non sei solo, che la tensione degli esami la sentono più o meno tutti e allora inizi a fare amicizia con qualche tuo collega. Questo per me è stato molto importante, per questo motivo ringrazio i miei amici che ho conosciuto al Politecnico: Francesca, Agnese, Martina, Maddalena, Marina, Giulio, Francesco Piovano e Francesco Palamara.

A luglio dello scorso anno ho iniziato a lavorare presso l'Unione Montana Comuni Olimpici Via Lattea e anche in questa occasione ho incontrato tante persone professionali con le quali ho instaurato un ottimo rapporto di amicizia, ringrazio anche tutti loro.

INDICE

RINGRAZIAMENTI	2
ELENCO FIGURE	7
ELENCO TABELLE	12
1 L'IMPIANTO PO/STURA-SAN MAURO TORINESE	13
1.1 LA TRAVERSA DI SBARRAMENTO	13
1.2 ARGINATURE	14
1.3 OPERE DI PRESA E CANALE MODERATORE	14
1.4 CANALE DERIVATORE	14
1.5 BACINO DI CARICO	15
1.6 CENTRALE DI PRODUZIONE	15
1.7 CANALE DI RESTITUZIONE.....	16
1.8 PORTATE TURBinate E DMV	16
2 NORMATIVE AMBIENTALI	17
3 ANALISI IDROLOGICA	21
3.1 CARATTERISTICHE DEL BACINO IDROGRAFICO	21
3.2 DATI UTILIZZATI	22
3.4 LE PORTATE E LE PRECIPITAZIONI	24
4 IMPIANTO PO/STURA SAN MAURO PORTATE TURBinate	27
5 MODELLAZIONE IDROLOGICA	28
5.1 EVAPOTRASPIRAZIONE.....	28
5.2 LA CURVA DI BUDYKO	30
5.3 MODELLI IDROLOGICI	32
5.3.1 <i>Modello Base</i>	33
5.3.2 <i>Fusione nivale e modello base</i>	35
5.3.3 <i>Calibrazione parametri: Nash Sutcliffe</i>	39
5.3.4 <i>Prelievi e modello base</i>	41
5.4 CAMBIAMENTI CLIMATICI	44
5.4.1 <i>Variazione dei regimi di temperatura e precipitazione</i>	45
5.4.2 <i>Climate Change Model</i>	46
6 CONSIDERAZIONI FINALI SULLA MODELLAZIONE IDROLOGICA	47
7 IL SOFTWARE BASEMENT	49
7.1 VALIDAZIONE DEL SOFTWARE BASEMENT	50
7.1.1 Elementi necessari al modello	50

7.1.1.1	Richiami caso studio	50
7.1.1.2	Elementi idraulici caratteristici	51
7.1.1.3	Modello per l'elemento idraulico Fiume Po: canale semplice ed a doppia pendenza.....	52
7.1.1.4	Modello per l'elemento idraulico traversa di sbarramento: stramazzo a soglia larga.....	52
7.1.1.5	Modello per l'elemento idraulico opera di presa: PID controlled weir.....	52
7.1.2	Validazione per singolo elemento.....	53
7.1.2.1	Risultati analitici	53
7.1.2.2	Risultati numerici.....	54
7.1.2.3	Confronto risultati analitici e numerici	56
8	DATI DI INPUT	57
8.1	COSTRUZIONE DELLA MESH	57
8.1.1	<i>modellazione mesh</i>	58
8.1.2	<i>Comandi per la modellazione della Mesh</i>	59
8.1.3	<i>Creazione modello di elevazione</i>	59
8.1.4	<i>Ottimizzazione numerica della mesh</i>	60
8.1.5	<i>Breaklines</i>	61
8.1.6	<i>Interpolazione delle quote</i>	62
8.1.7	<i>Visualizzazione 3D della Mesh</i>	63
8.1.8	<i>Esportazione Mesh</i>	63
8.2	CONDIZIONI AL CONTORNO	64
8.2.1	<i>Stringdef ingresso ed uscita</i>	64
8.2.2	<i>Idrogrammi in ingresso</i>	64
8.2.3	<i>Definizione tipologia di uscita</i>	65
8.2.4	<i>Coefficiente di attrito stimato</i>	65
8.2.5	<i>Morfologia: bed material, bedload, suspended load</i>	66
8.3	DEFINIZIONE DELLA CONDIZIONE INIZIALE.....	67
8.4	DEFINIZIONE TIME STEP SIMULAZIONE	67
8.5	DEFINIZIONE OUTPUT	67
8.6	CONTROLLER	68
9	RISULTATI	70
9.1	SCENARI ANALIZZATI	70
9.2	OUTPUT CALCOLATI E CONTROLLI	71
9.3	RISULTATI COMPARATIVI SIMULAZIONE IDRAULICA.....	72
9.3.1	<i>Gate in sinistra orografica</i>	72
9.3.2	<i>Simulazione idraulica Q180</i>	73
9.3.3	<i>Simulazione idraulica Q130</i>	75
9.3.4	<i>Simulazione idraulica Q77</i>	77
9.4	RISULTATI COMPARATIVI SIMULAZIONE MORFOLOGICA	78
9.4.1	<i>Simulazione morfologica Q180</i>	78

9.4.2 Simulazione morfologica Q130	85
9.4.3 Simulazione morfologica Q77	91
9.4 SIMULAZIONE IDRAULICA PIENA	97
9.5 CONCLUSIONI MODELLAZIONE IDROLOGICA	98
SOMMARIO	100
ALLEGATI	101
BIBLIOGRAFIA	112

ELENCO FIGURE

Figura 1: planimetria traversa opera di presa sul fiume Po a San Mauro.....	13
Figura 2: sezione trasversale della traversa di sbarramento.....	13
Figura 3: sezione trasversale canale derivatore.....	14
Figura 4: sezione trasversale centrale di produzione.....	16
Figura 5: sezione trasversale canale di restituzione.....	16
Figura 6: portate giornaliere misurate a SLATO, DRITO, POCA e POSMT.....	24
Figura 7: portate e precipitazioni a confronto del Po a San Mauro.....	25
Figura 8: portate e precipitazioni a confronto dello Stura di Lanzo a Torino.....	25
Figura 9: portate e precipitazioni a confronto della Dora Riparia a Torino.....	25
Figura 10: rappresentazione dei differenti bacini confrontati con la Curva di Budyko e i limiti di energia e acqua.....	31
Figura 11: esempio schema modello a serbatoi.....	33
Figura 12: modello con processi di fusione nivale: confronto fra la curva stimata non calibrata e la curva stimata calibrata. Dati riferiti alla sezione di Po a San Mauro Torinese POSMT.....	41
Figura 13: derivazioni dei sottobacini Po, Stura di Lanzo e Dora Riparia.....	42
Figura 14: tabella attributi dei dati del SIRI (Sistema Informativo Risorse Idriche).....	43
Figura 15: risultato della seconda calibrazione tenendo conto dei prelievi irrigui.....	43
Figura 16: rappresentazione delle curve di durata delle portate per il bacino POSMT tenendo conto della fusione nivale e dei prelievi irrigui a monte;.....	44
Figura 17: rappresentazione dell'evoluzione dei flussi all'interno del bacino POSMT considerando lo scenario RCP8.5.....	47
Figura 18: curva di durata delle portate confronto fra modello con cambiamento climatico e modello con fusione nivale e prelievi idrici senza cambiamento climatico.....	48
Figura 19: caso studio, a monte della traversa.....	51
Figura 20: geometria canale con cambio pendenza.....	52
Figura 21: geometria stramazzo soglia larga.....	52
Figura 22: esempio di paratoia a controllo sita in impianto a Serre La Voute (Iren Energia).....	53

Figura 23: andamento tirante idrico.....	54
Figura 24: profilo idraulico creato con BASEMENT caso canale semplice.....	54
Figura 25:profilo idraulico creato con BASEMENT caso canale doppia pendenza.....	55
Figura 26:profilo idraulico creato con BASEMENT caso soglia larga.	55
Figura 27: risultato PID controlled weir, andamento nel tempo del tirante a monte della traversa.	56
Figura 28:scheramata comando Elevation Meshing.	60
Figura 29: schermata comando Quality meshing.	61
Figura 30: differenti aree di discretizzazione, Area 1. Figura 31: differenti aree di discretizzazione, Area 2.	61
Figura 32: differenti aree di discretizzazione, Area 3.	62
Figura 33: schermata comando Interpolation.	62
Figura 34: Visualizzazione 3D della mesh con differenti colorazione in base al materiale di fondo.....	63
Figura 35: schermata comando Export Mesh.....	63
Figura 36: possibili configurazioni di installazione minihydro.....	70
Figura 37: velocità corrente, caso con gate in sinistra orografica e simulazione Q180.	72
Figura 38: particolare delle velocità a ridosso della presa di derivazione.....	73
Figura 39: andamento delle velocità lungo la presa di derivazione ed il gate dell'impianto minihydro.	73
Figura 40: velocità simulazione Q180 gate sx. Figura 41: velocità simulazione Q180 gate dx.....	74
Figura 42: velocità simulazione Q180 gate sx. Figura 43: velocità simulazione Q180 weir dx.	74
Figura 44: velocità simulazione Q130 gate sx. Figura 45: velocità simulazione Q130 gate dx.	76
Figura 46: velocità simulazione Q130 weir sx. Figura 47: velocità simulazione Q130 weir dx	76
Figura 48: velocità simulazione Q77 gate sx. Figura 49: velocità simulazione Q77 gate dx.	77
Figura 50: velocità simulazione Q77 weir sx. Figura 51: velocità simulazione Q77 weir dx.	77
Figura 52: sforzi di taglio simulazione morfologica Q180 gate sx. Figura 53: sforzi di taglio simulazione morfologica Q180 gate dx.	79
Figura 54: sforzi di taglio simulazione morfologica Q180 weir sx. Figura 55: sforzi di taglio simulazione morfologica Q180 weir dx.	79

Figura 56: concentrazioni simulazione morfologica Q180 gate sx.	Figura 57: concentrazioni simulazione morfologica Q180 gate dx.	80
Figura 58: concentrazioni simulazione morfologica Q180 weir dx.	Figura 59: concentrazioni simulazione morfologica Q180 weir sx.....	80
Figura 60: deposizione solidi sospesi totali Q180 gate sx.	Figura 61: deposizione solidi sospesi totali Q180 gate dx.....	81
Figura 62: deposizione solidi sospesi totali Q180 weir sx.	Figura 63: deposizione solidi sospesi totali Q180 weir dx.	81
Figura 64: variazione di quota simulazione Q180 gate sx.	Figura 65: variazione di quota simulazione Q180 gate dx.....	82
Figura 66: variazione di quota simulazione Q180 weir sx.	Figura 67: variazione di quota simulazione Q180 weir dx.	82
Figura 68: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q180 gate sx.	Figura 69: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q180 gate dx.....	83
Figura 70: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q180 weir sx.	Figura 71: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q180 weir dx.....	83
Figura 72: frazione percentuale fini simulazione Q180 gate sx.	Figura 73: frazione percentuale fini simulazione Q180 gate sx.....	84
Figura 74: frazione percentuale fini simulazione Q180 weir sx.	Figura 75: frazione percentuale fini simulazione Q180 weir dx.	84
Figura 76: sforzi di taglio simulazione morfologica Q130 gate sx.	Figura 77: sforzi di taglio simulazione morfologica Q130 gate dx.	85
Figura 78: sforzi di taglio simulazione morfologica Q130 weir sx.	Figura 79: sforzi di taglio simulazione morfologica Q130 weir dx.	85
Figura 80: concentrazioni simulazione morfologica Q130 gate sx.	Figura 81: concentrazioni simulazione morfologica Q130 gate dx.	86
Figura 82: concentrazioni simulazione morfologica Q130 weir sx.	Figura 83: concentrazioni simulazione morfologica Q130 weir dx.	86
Figura 84: deposizione solidi sospesi totali Q130 gate sx.	Figura 85: deposizione solidi sospesi totali Q130 gate dx.	87

Figura 86: deposizione solidi sospesi totali Q130 weir sx. Q130 weir dx.	Figura 87: deposizione solidi sospesi totali 87
Figura 88: variazione di quota simulazione Q130 gate sx. simulazione Q130 gate dx.	Figura 89: variazione di quota 88
Figura 90: variazione di quota simulazione Q130 weir sx. Q130 weir dx.	Figura 91: variazione di quota simulazione 88
Figura 92: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q130 gate sx. sospesi Q130 gate dx.....	Figura 93: tasso di ritiro totale dei solidi 89
Figura 94: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q130 weir sx. sospesi Q130 weir dx.	Figura 95: tasso di ritiro totale dei solidi 89
Figura 96: frazione percentuale fini simulazione Q130 gate sx. simulazione Q130 gate dx.	Figura 97: frazione percentuale fini 90
Figura 98: frazione percentuale fini simulazione Q130 weir sx. simulazione Q130 weir dx.	Figura 99: frazione percentuale fini 90
Figura 100: sforzi di taglio simulazione morfologica Q77 gate sx.	91
Figura 101: sforzi di taglio simulazione morfologica Q77 weir sx. morfologica Q77 weir dx.	Figura 102: sforzi di taglio simulazione 91
Figura 103: concentrazioni simulazione morfologica Q77 gate sx.....	92
Figura 104: concentrazioni simulazione morfologica Q77 weir sx. morfologica Q77 weir dx.	Figura 105: concentrazioni simulazione 92
Figura 106: deposizione solidi sospesi totali Q77 gate sx.	93
Figura 107: deposizione solidi sospesi totali Q77 weir sx. Q77 weir dx.	Figura 108: deposizione solidi sospesi totali 93
Figura 109: variazione di quota simulazione Q77 gate sx.	94
Figura 110: variazione di quota simulazione Q77 weir sx. Q77 weir dx.	Figura 111: variazione di quota simulazione 94
Figura 112: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q77 gate sx.	95
Figura 113: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q77 weir sx. sospesi Q77 weir dx.	Figura 114: tasso di ritiro totale dei solidi 95
Figura 115: frazione percentuale fini simulazione Q77 gate sx.	96

Figura 116: frazione percentuale fini simulazione Q77 weir sx. simulazione Q77 weir dx.	Figura 117: frazione percentuale fini 96
Figura 118: velocità simulazione Q50 gate sx.	Figura 119: : velocità simulazione Q50 gate dx..... 97
Figura 120: velocità simulazione Q50 weir sx.	Figura 121: velocità simulazione Q50 weir dx. 97

ELENCO TABELLE

Tabella 1: caratteristiche impianto.....	15
Tabella 2: problematiche a seguito della sedimentazione a monte delle traverse.	17
Tabella 3: dati dei bacini utilizzati con Rstudio per l'analisi delle precipitazioni e temperature.	23
Tabella 4: range per la calibrazione dei parametri utilizzati nel modello di fusione nivale.	40
Tabella 5: Risultati della calibrazione dei parametri del modello di fusione nivale per il bacino idrografico Po a San Mauro POSMT.....	40
Tabella 6: Representative Concentration Pathways, RCP per la valutazione dei cambiamenti climatici con forzante radiativa al 2100.....	45
Tabella 7: risultati validazione.	56
Tabella 8: portate per le varie simulazioni.	65
Tabella 9: variabili manipolate dei controller utilizzate sul codice di BASEMENT.	69
Tabella 10: scenari modellizzati con il software BASEMENT.....	71
Tabella 11: Q50 delle curve di durata delle portate dei vari fiumi interessati.....	97

1 L'IMPIANTO PO/STURA-SAN MAURO TORINESE

L'impianto idroelettrico PO/STURA-SAN MAURO, entrato in esercizio nel 1953, fa parte, con la derivazione La Loggia-Moncalieri, del sistema di impianti ad acqua fluente che AEM Torino ha studiato dopo l'ultima guerra per l'utilizzazione del fiume Po nel tratto che interessa l'abitato della città di Torino. Esso sbarrà le acque del fiume Po poco a valle della confluenza con lo Stura di Lanzo.

1.1 LA TRAVERSA DI SBARRAMENTO

Nota anche con il nome di diga del Pascolo, essa ha una lunghezza complessiva di circa 300 m, su undici luci, sei delle quali interessano l'alveo del fiume, munite di paratoie metalliche a settore cilindrico (cinque hanno larghezza 27,5 m e ritenuta 3,8 m, mentre la sesta, con funzione di sghiaiatore, ha larghezza 17,5 m e ritenuta 4,3 m).

La struttura della traversa è in cemento armato fondata su cassoni, sostenente una sede stradale (Via Agudio) con piano viabile della larghezza di 20 m.

Il rilascio del DMV/DE (Deflusso Minimo Vitale o Deflusso Ecologico) operato dalla traversa risulta pari a 21 m³/s, in riferimento a quanto prestabilito dalle Autorità di Bacino del Fiume Po.

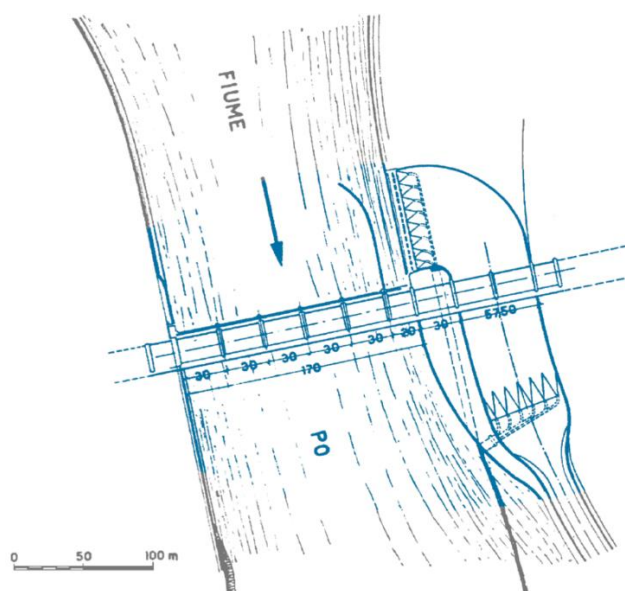


Figura 1: planimetria traversa opera di presa sul fiume Po a San Mauro.

Figura 2: sezione trasversale della traversa di sbarramento.

1.2 ARGINATURE

Atte a contenere l'invaso determinato dalla traversa di sbarramento (circa 1 milione di m³), sono realizzate mediante paratia subalvea sulla sponda destra del Po, per una lunghezza di 1917 m e sulla sponda sinistra del fiume Stura, per circa 707 m; i pali trivellati che costituiscono la paratia sono circa 5000.

1.3 OPERE DI PRESA E CANALE MODERATORE

L'opera di presa è ubicata in sponda sinistra, costituita da un canale sghiaiatore, da una soglia della lunghezza di 71 m munita di griglia metallica e sedici luci di presa della larghezza di 3,5 m, munite di paratoie e sgrigliatore.

Il canale moderatore è della lunghezza di 248 m e larghezza variabile da 71 a 55 m, è provvisto di una serie di sghiaiatori (otto tramogge) immediatamente a valle delle bocche di presa e di una serie di dissabbiatori al termine dello stesso (sei tramogge), dove inizia il raccordo con il canale derivatore. Lo scarico dei dissabbiatori avviene tramite appositi cunicoli regolati da paratoie piane. La velocità media dell'acqua non supera i 0,8 m/s, consentendo il deposito dei materiali solidi in sospensione.

1.4 CANALE DERIVATORE

Esso è a pelo libero, di lunghezza 1290 m, a sezione trapezoidale, interamente rivestito in calcestruzzo. La sezione del canale è larga sul fondo 12 m, in sommità circa 25 m; l'altezza normale d'acqua è di 4,6 m; il canale è dotato di sette valvole Clapét per l'abbattimento delle sottopressioni.

La pendenza è costante pari a 0,15 m per km e la portata massima risulta di 120 m³/s. Il canale è sovrappassato da tre ponti carrai e sottopassato da due sifoni per canali d'irrigazione.

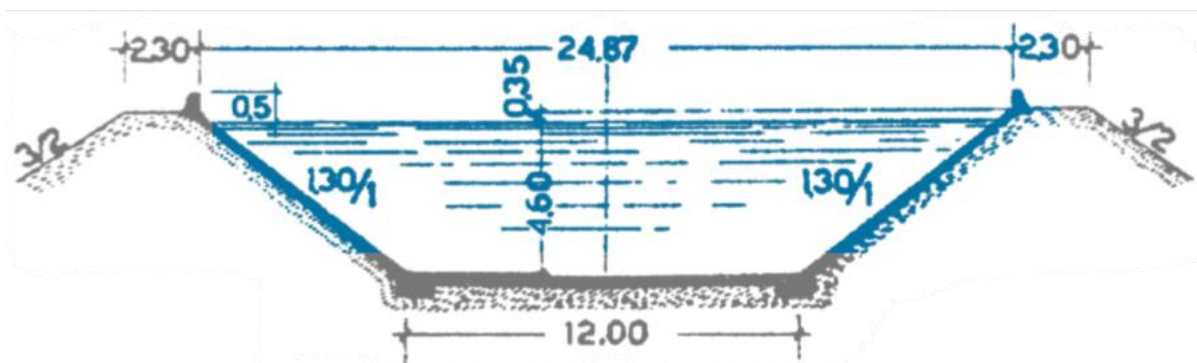


Figura 3: sezione trasversale canale derivatore.

1.5 BACINO DI CARICO

Con platea a quota 198,55 m s.l.m., costituito dalla parte terminale del canale di derivazione con larghezza massima di 42,9 m e profondità aumentate in cui l'altezza d'acqua raggiunge circa 11 m (quota di massima regolazione 209,55 m s.l.m.) Due sfioratori automatici a ventola immettono l'acqua di sfioro entro due rami di canale in galleria che costeggiano il fabbricato della centrale e che scaricano direttamente nel canale di restituzione.

Sulla testata del bacino di carico si apre la luce di immissione della turbina, munita di griglie a profilo idraulico con larghezza di 14,9 m ed altezza di 12 m; tre paratoie metalliche piane a sgancio automatico provvedono ad interrompere il flusso nella turbina.

I detriti presenti sulla griglia di imbocco turbina vengono sollevati mediante due sgrigliatori fissi a comando oleodinamico e convogliati in un apposito cassone.

1.6 CENTRALE DI PRODUZIONE

Ubicata immediatamente a valle del bacino di carico, impostata su di un unico cassone di 30 x 35 m in pianta, è in esercizio tra la quota di 209,55 m s.l.m. a monte (bacino di carico) e le quote 207 m s.l.m. (massimo livello) e 201,55 m s.l.m. (livello minimo) di restituzione, si ottiene così un salto di 8.0 m.

Vi è installato un gruppo turbina Kaplan-alternatore (Tosi-Savigliano), ad asse verticale, velocità 93,75 giri al minuto, per una potenza installata di 8 MW, alternatore trifase, potenza 10 MVA, tensione d'esercizio 6,6 kV, frequenza 50 Hz. Il peso dell'intero gruppo è di 520 t.

L'energia prodotta viene elevata a 27 kV ed immessa direttamente nella rete primaria di distribuzione cittadina. La centrale, che ha una producibilità media annua di 41 milioni kWh, è completamente automatizzata e telecomandata dal Centro del Martinetto.

Tabella 1: caratteristiche impianto.

Anno di inizio esercizio	1953
Bacino imbrifero sotteso	7.400 km ²
Salto massimo	7,95 m
Portata media di concessione	82,82 m ³ /s
Portata massima derivabile	120 m ³ /s
Potenza media di concessione	5.578 kW
Potenza installata	8.000 kW
Potenza efficiente massima	8.000 kW
Producibilità media annua	41.000.000 kWh
estiva	20.090.000 kWh
invernale	20.910.000 kWh

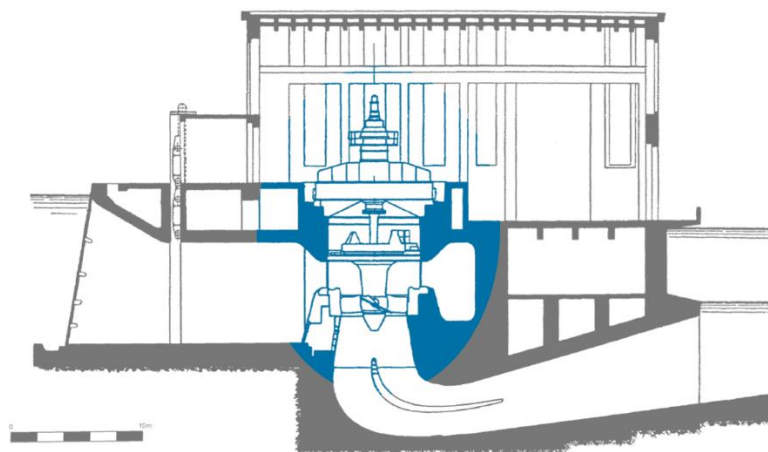


Figura 4: sezione trasversale centrale di produzione.

1.7 CANALE DI RESTITUZIONE

Esso è a sezione rettangolare, con pareti in calcestruzzo e platea in c.a. per un primo tratto ed in massi sciolti per il tratto terminale, avente lunghezza complessiva di 770 m, larghezza 55 m, altezza d'acqua 2,5 m, è ubicato a ridosso della sponda sinistra del Po in un braccio morto del fiume. La sponda destra è costituita da un muro in calcestruzzo sfiorabile dal fiume in caso di eventi di piena eccezionali. Il canale di restituzione convoglia le acque turbinate all'invaso formato dallo sbarramento dell'impianto ENEL di S. Raffaele Cimena (1).



Figura 5: sezione trasversale canale di restituzione.

1.8 PORTATE TURBinate E DMV

Per l'impianto Po/Stura – San Mauro, l'azienda Iren acquisisce indirettamente i dati di portata naturale ottenuti a partire dalla portata derivata dal canale, quella rilasciata dalla traversa che fluisce sotto battente ed eventuali portate rilasciate da organi accessori (dissabbiatori, sghiaiatori o altri impianti provvisti di sensoristica); tali valori rappresentano soltanto un dato indicativo e non reale.

Il DMV relativo a questo impianto risulta pari a $21 \text{ m}^3/\text{s}$, in conformità alle leggi vigenti.

2 NORMATIVE AMBIENTALI

Una traversa fluviale è definita come uno sbarramento che determina un rigurgito contenuto nell'alveo del corso d'acqua, con la finalità di innalzare il livello di monte per favorire la derivazione delle acque e dunque risulta soggetta alle disposizioni di legge sulla costruzione e sull'esercizio degli sbarramenti di ritenuta (2).

Tale opera deve essere redatta in modo da non modificare i fenomeni idraulici naturali e le caratteristiche di particolare rilevanza naturale dell'ecosistema fluviale che possono aver luogo nelle Fasce A e B (riferimento al Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico PAI), che non costituiscano significativo ostacolo al deflusso e non limitino in modo significativo la capacità di invaso, e che non concorrano ad incrementare il carico insediativo. Risulta fondamentale la presenza di uno studio di compatibilità da affiancare al progetto che documenti l'assenza dei suddetti fenomeni e delle eventuali modifiche alle suddette caratteristiche (3).

La costruzione di un'opera di sbarramento lungo un corso d'acqua altera profondamente il bilancio tra l'afflusso e il deflusso di sedimenti, creando un'area caratterizzata da basse velocità della corrente e da una elevata capacità di intercettazione dei sedimenti stessi. Risulta pertanto necessario che la sedimentazione negli invasi sia controllata e limitata, per non rischiare di perdere risorse di elevato interesse economico ed ambientale.

Le problematiche generate dall'interrimento e dalla conseguente diminuzione del volume di invaso (4) sono schematizzate nella seguente tabella:

Tabella 2: problematiche a seguito della sedimentazione a monte delle traverse.

Problemi economici e sociali	<ul style="list-style-type: none">• riduzione della vita utile della diga• riduzione quantitativa e qualitativa delle utilizzazioni (idroelettrica, irrigua, ecc.)• riduzione della possibilità di usi ricreativi di laghi e corsi d'acqua
Problemi idraulico-ambientali	<ul style="list-style-type: none">• diminuzione della capacità di regolazione dei deflussi e di laminazione delle piene• erosione dei litorali, dovuta alla modifica del bilancio dei sedimenti e conseguente riduzione di apporti solidi verso i litorali• abbassamento generalizzato dell'alveo a valle della diga con possibili erosioni localizzate, e pericoli per la stabilità delle infrastrutture quali ponti, arginature e opere di presa• riduzione battente idrico• modifiche dell'alveo a monte

	<ul style="list-style-type: none"> riduzione della pendenza della foce dell'immissario ed elevazione della superficie libera
Problemi energetici	<ul style="list-style-type: none"> riduzione producibilità dell'impianto idroelettrico eventualmente presente (proporzionale al prodotto tra il volume dei materiali depositi e il salto geodetico)
Problemi ecologici-ambientali	<ul style="list-style-type: none"> qualità dei sedimenti, presenza di possibili inquinanti impatto su flora e fauna effetti negativi sulla qualità delle acque dei corpi idrici danni agli ecosistemi acquatici quali le zone umide, che possono minacciare la produttività e la biodiversità (scomparsa di specie vegetali e riduzione del patrimonio faunistico)
Problemi geotecnici-strutturali	<ul style="list-style-type: none"> spinta dei materiali solidi accumulati contro il paramento di monte e conseguente aumento delle sollecitazioni sulla diga e possibili erosioni localizzate al piede della stessa modifica della risposta sismica della diga
Problemi gestionali	<ul style="list-style-type: none"> gestione operativa degli organi di scarico ostruzione e perdita di efficienza degli scarichi di fondo e degli organi di presa, filtraggio e derivazione abrasione delle opere civili (sfioratori, gallerie) e dispositivi elettromeccanici (turbine e paratoie) criteri e attuabilità del possibile riutilizzo dei materiali sedimentati

Fino all'entrata in vigore della *legge n. 319 del 1976 Legge Merli* il controllo dell'interrimento era normalmente effettuato dai gestori tramite rimobilizzazione dei sedimenti depositatisi ed il loro rilascio a valle diga (erosione, fluitazione e spurgo).

La Legge Merli fu emanata con l'obiettivo di porre un limite al crescente ed incontrollato inquinamento dei corpi idrici, legato soprattutto agli scarichi industriali, tramite l'imposizione di valori limite di concentrazione dei parametri caratterizzanti i liquidi scaricati nel corso d'acqua recettore. Tale normativa era però applicabile "...agli scarichi di qualsiasi tipo, pubblici e privati, diretti e indiretti, in tutte le acque superficiali e sotterranee.". In questo quadro erano pertanto compresi anche gli scarichi di fondo delle dighe che non potevano più essere azionati in quanto la torbidità dell'acqua ed i solidi sospesi non rispettavano, all'uscita dallo scarico, quasi mai i limiti molto cautelativi imposti dalla legge. Per la torbidità la legge fissava un valore limite del liquido allo

scarico di 80 mg/l che di fatto era incompatibile anche con i valori che solitamente si riscontrano durante le piene naturali dei corsi d'acqua.

L'interruzione delle pratiche di evacuazione dei depositi per non incorrere in sanzioni ha determinato danni notevoli sia in termini economici (perdita di capacità utile), sia in termini di sicurezza a causa della perdita di funzionalità degli organi di scarico che, in alcuni casi, ha indotto l'organo di vigilanza sulle grandi dighe (Registro italiano Dighe) ad imporre pesanti limitazioni alle quote di invaso.

Per diversi bacini, i grandi quantitativi di sedimenti depositati sono, pertanto, in buona parte frutto dell'applicazione restrittiva di una legge che è stata di cruciale importanza per la tutela delle acque.

La Legge 319/76 è stata abrogata dal D. Lgs. N. 152 del 1999 "Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento" in cui viene riconosciuto che gli scarichi delle dighe non devono essere assoggettati alla disciplina degli scarichi industriali e che le operazioni di svaso, sghiaimento e sfangamento sono finalizzate ad "assicurare il mantenimento della capacità di invaso". Ai Gestori viene attribuita la possibilità di evacuare i sedimenti anche attraverso gli organi di scarico sulla base di un "Progetto di Gestione" approvato dalle Regioni.

Attraverso il D.M. 30/06/2004 vengono emanati i "*Criteri per la redazione del Progetto di Gestione degli invasi...*". Il Progetto di Gestione (PG), predisposto dal gestore ed approvato dalle regioni, previo parere preventivo dell'amministrazione competente a vigilare sulla sicurezza dell'invaso e dello sbarramento.

Il progetto di gestione deve stabilire modalità e tempi per il ripristino della capacità utile del serbatoio; tali attività devono comunque concludersi entro la scadenza della concessione. Il gestore ha l'obbligo di prevedere nel progetto di gestione, e di attuare, tutte le operazioni di sfangamento necessarie a garantire la sicurezza dello sbarramento ed il corretto uso del serbatoio in relazione alle finalità per le quali è stata concessa l'utilizzazione dell'acqua pubblica.

Il Progetto di Gestione deve contenere informazioni anche su:

- quantitativi dei sedimenti (volume di materiale solido sedimentato nel serbatoio e volumi medi di sedimentazione annuale)
- caratteristiche qualitative fisiche e chimiche dei sedimenti, anche in termini di contenuto in sostanze inquinanti
- caratteristiche qualitative della colonna d'acqua sovrastante i sedimenti

- qualità delle acque a valle dello scarico

Per questi motivi è importante valutare preventivamente, già in fase di progettazione l'ordine di grandezza di deposito di sedimenti in quanto esso poi gioca un ruolo fondamentale nella gestione dell'impianto a regime.

Inoltre, data l'interruzione del normale deflusso delle acque visto l'installazione futura dell'impianto di minihydro, risulta necessario il ripristino della continuità fluviale attraverso la progettazione e costruzione di un passaggio per l'ittiofauna.

Devono essere eseguiti studi accurati per una corretta progettazione in modo da evitare la costruzione di opere inidonee. L'autorizzazione di queste opere spetta all'Autorità idraulica competente in collaborazione con gli Uffici Provinciali specializzati in materia di tutela della fauna acquatica.

3 ANALISI IDROLOGICA

Per quanto riguarda l'analisi idrologica essa è stata effettuata per costruire un modello semplice a due stadi che tenga conto della fusione nivale e delle derivazioni a monte e studiare così l'impatto del cambiamento climatico.

Si sono tenute in considerazione le aste fluviali principali che interessano l'area a monte della traversa, in modo da poter attuare un bilancio idrologico a scala annuale e a scala stagionale della situazione attuale, attraverso le precipitazioni e le portate.

3.1 CARATTERISTICHE DEL BACINO IDROGRAFICO

Il distretto idrografico del fiume Po è caratterizzato da una diversità territoriale e ambientale elevata e presenta, di conseguenza, anche differenze significative di distribuzione dei fattori socio-economici e culturali che nel corso del tempo si sono sviluppati sfruttando e adattandosi alle condizioni del contesto naturale presente, favorendo gli insediamenti e le attività antropiche odierne che nella realtà italiana hanno un ruolo importantissimo.

Il bacino è abitato da circa 17 milioni di persone (al 2007), costituisce la maggiore area agricola italiana con una produzione pari al 35% del totale nazionale, e in esso vi trova sede il 37% delle industrie nazionali, generando il 40% del PIL nazionale.

La densità abitativa media è superiore a quella nazionale e corrisponde ad un'intensa urbanizzazione del territorio, non solamente concentrata nelle grandi aree metropolitane ed industriali di Torino e Milano, ma organizzata, nell'ambito di pianura, secondo le due grandi direttrici della zona pedemontana alpina e della via Emilia(5).

La superficie del bacino, alla sezione di chiusura di Pontelagoscuro (FE), è pari a 74 940 km², mentre la lunghezza dell'asta principale, dalle origini fino al mare, è di 652 km. Il fiume Po nasce dal Pian del Re a 2020 m s.l.m., alle pendici del Monviso, e sfocia nel Mar Adriatico; lungo il suo corso è alimentato da 141 affluenti di cui 95 in sinistra idrografica e 46 in destra (6).

Per l'analisi effettuata in questo lavoro si considera come sezione di chiusura la traversa stessa a San Mauro, si è deciso inoltre, di suddividere il bacino idrico così individuato in sottobacini, tenendo conto delle altre due aste fluviali principali che lo influenzano: la Dora riparia a Torino e lo Stura di Lanzo sempre a Torino.

Il bacino idrografico complessivo presenta una superficie di 7682.2 km².

Gli eventi di piena più significativi sono rappresentati dall'alluvione dell'ottobre del 2000 con una portata di circa 2.300 m³/s e le acque del fiume Po sono esondate fino a 1,5 m (7) sul piano campagna e da quella del

novembre del 2016 con un'altezza idrica dell'asta pari a 7.41 m. Nel tratto fino a Torino i valori registrati sono del tutto simili a quelli osservati nell'alluvione dell'ottobre 2000 (8).

3.2 DATI UTILIZZATI

I dati sono stati reperiti dall'ARPA Piemonte e fanno riferimento a misure giornaliere di:

- Temperatura massima [K]
- Temperatura minima [K]
- Precipitazione cumulata [mm]
- Portata [m³/s]

Per le temperature e le precipitazioni si è usato il dataset su griglia NWIOI che fornisce 3 files (temperature massime giornaliere TX, temperature minime giornaliere TN, e precipitazioni cumulate giornaliere RR) calcolati ed interpolati su griglia regolare. Il dominio copre l'area: longitudine 6.5-9.5 W e latitudine 44.0-46.5 N, con una risoluzione di 0.125° (corrispondente circa a 10 km). I punti interni al dominio sono 480 (24x20) ma solo 297 sono inclusi nel territorio amministrativo piemontese.

Il dataset è il risultato di una metodologia statistica basata sulla tecnica dell'*optimal interpolation*: essa soddisfa la necessità di effettuare un processo di interpolazione spaziale, su griglia regolare, dei dati a disposizione, derivanti da stazioni di rilevamento appartenenti a differenti reti di misurazione, sia con diversa copertura temporale sia con una distribuzione spaziale arbitraria e variabile sul territorio regionale, sfruttando il principio che solo le osservazioni più vicine possono influenzare il valore finale sul punto griglia. Attraverso tale approccio, si rinuncia quindi ad avere un'informazione dettagliata sul singolo punto-stazione, ma si ottiene un campo di analisi su griglia, completo del maggior numero possibile di informazioni del passato, omogeneo ed integrabile con altri dati eventualmente disponibili in futuro.

Nel processo di interpolazione l'analisi è calcolata sulla base di un campo di appoggio denominato *campo di background*: esso rappresenta la miglior stima a priori prima dell'utilizzo delle osservazioni. Il campo di background delle temperature è un campo modellistico (*downscaling*) il quale considera le informazioni a grande scala per riportarle ad una scala locale, mentre quello delle precipitazioni si basa sulle osservazioni (*detrending*) per individuare eventuali correlazioni tra i valori osservati e i parametri del bacino (9, 10, 11).

I files sono in formato NetCDF e contengono tutte le giornate su cui viene fatta l'analisi oggettiva fino al giorno prima della data in cui vengono scaricati, la proiezione è WGS84 latlon (EPSG:4326).

Sono disponibili inoltre, nello stesso formato, i seguenti file:

- orografia: contiene per ciascun punto griglia del dominio analizzato i valori di latitudine, longitudine e quota;

- maschera: contiene per ciascun punto griglia del dominio analizzato i valori di latitudine, longitudine ed il valore '1' se il punto griglia appartiene alla regione Piemonte ed il valore '0' se il punto griglia cade al di fuori dei confini della regione.

E' importante utilizzare i dati forniti opportunamente 'mascherati': poiché al di fuori dei confini della regione suddetta non sono disponibili le informazioni relative alle stazioni meteorologiche, i valori che l'Optimal Interpolation assume su tali punti griglia sono frutto di pura interpolazione non supportata da misure realmente registrate, ne consegue che i dati di temperatura e precipitazione che il dataset assume su tali punti non sono affidabili.

Le portate giornaliere sono state ottenute invece dalla Banca Dati redatta dall'Arpa Piemonte (12), le aste fluviali analizzate sono la Dora Riparia, lo Stura di Lanzo e il Po a monte della traversa dell'impianto idroelettrico Po/Stura - San Mauro in diverse stazioni idrometriche.

Le stazioni di riferimento considerate sono: DRISU (Dora Riparia a Susa), DRITO (Dora Riparia a Torino), VARPO (Varaita a Polonghera), SLALA (Stura di Lanzo a Lanzo), SLATO (Stura di Lanzo a Torino), POCA (Po a Carignano), e POSMT (Po a San Mauro Torinese).

Si riportano sinteticamente le informazioni riguardanti i bacini di interesse alla sezione di chiusura in formato tabellare.

Tabella 3: dati dei bacini utilizzati con Rstudio per l'analisi delle precipitazioni e temperature.

Bacino	Quota massima (m s.l.m.)	Quota minima (m s.l.m.)	Quota media (m s.l.m.)	Area bacino (km ²)	Portata media annua (m ³ /s)	Portata minima (m ³ /s)
POSMT	3760	191	1083	7682	137.8	11.9
SLATO	3618	214	1368	880	23.1	0.02
SLALA	3618	455	1780	578	19.2	1.9
DRITO	3583	224	1655	1322	23.9	1.4
DRISU	3403	499	2042	694	12.5	0.02
POCA	3760	207	1101	3956	61.4	8.2
VARPO	3177	246	1389	577	5.8	0.01

A titolo esemplificativo si riportano di seguito alcuni dei dati estratti dalla banca dati Arpa Piemonte.

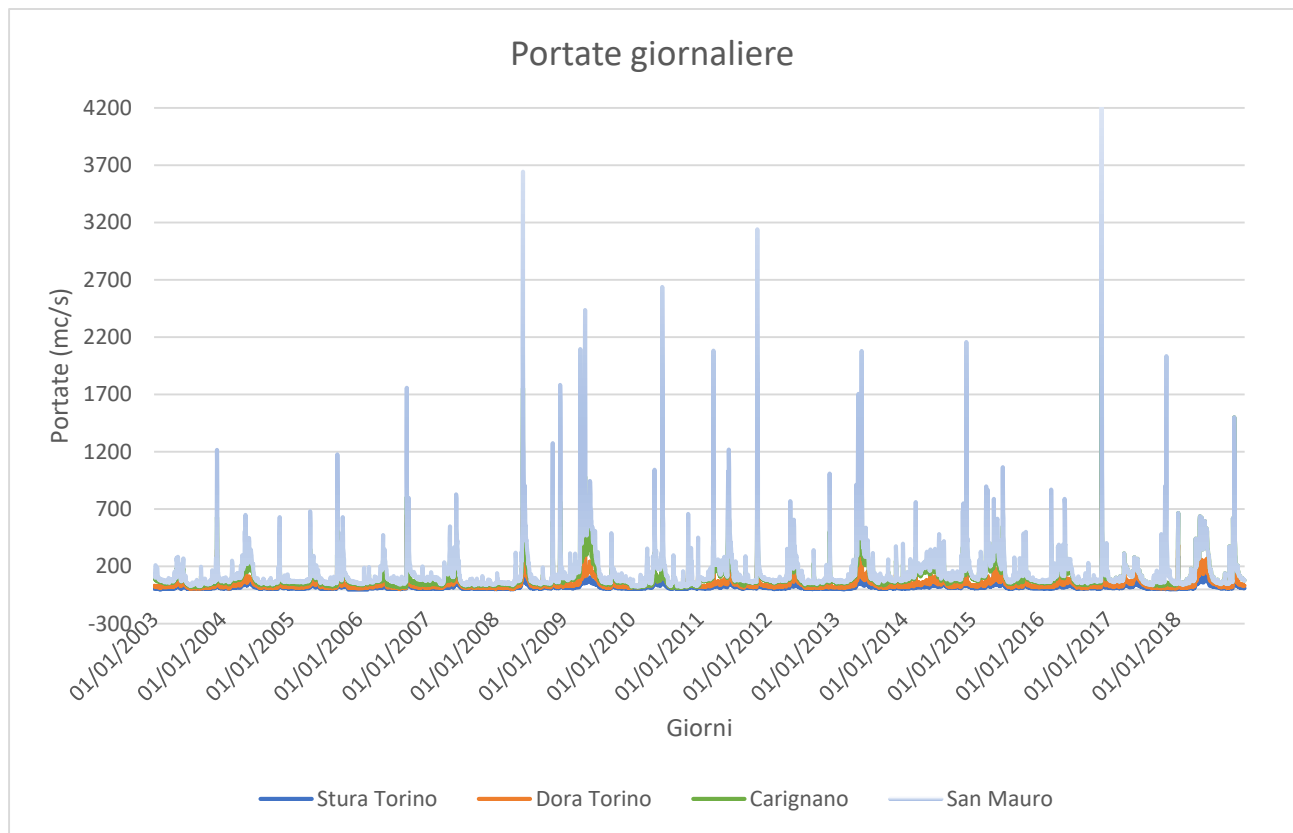


Figura 6: portate giornaliere misurate a SLATO, DRITO, POCA e POSMT.

Dal grafico precedente si evince come alla sezione corrispondente di POSMT vi sia la portata sommata fra le seguenti sezioni SLATO, DRITO, POCA come ci si aspettava.

3.4 LE PORTATE E LE PRECIPITAZIONI

Per far sì che l'analisi sia completa a seguire si sono plottate le portate annuali in modo da poterle confrontare con le precipitazioni, seguendo la seguente equazione in modo da ottenere le portate come mm/anno.

$$Q \left[\frac{\text{mm}}{\text{anno}} \right] = Q[\text{m}^3/\text{s}] \frac{86400 * 365 * 1000}{\text{Area bacino} [\text{m}^2]}$$

Equazione 1: trasformazione portate da m³/anno a mm/anno.

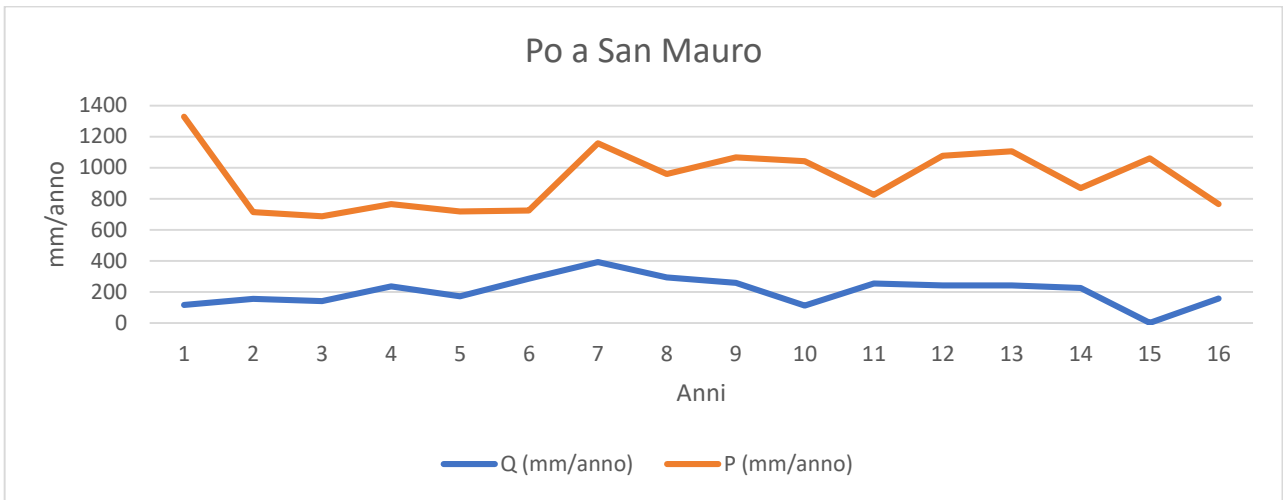


Figura 7: portate e precipitazioni a confronto del Po a San Mauro.

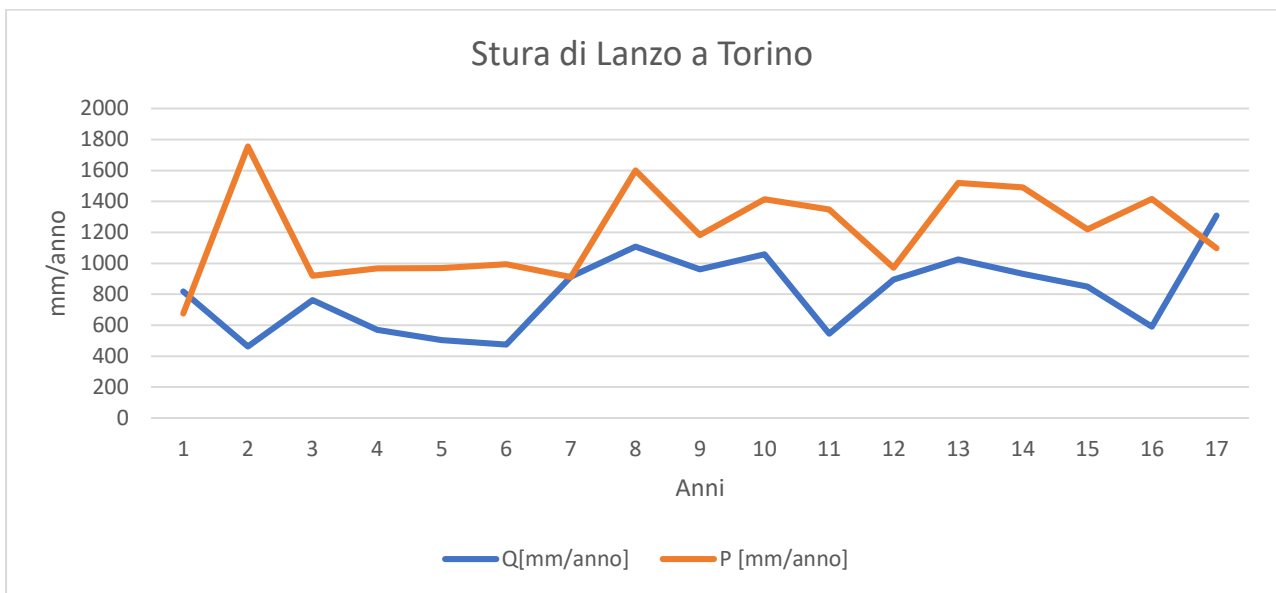


Figura 8: portate e precipitazioni a confronto dello Stura di Lanzo a Torino.

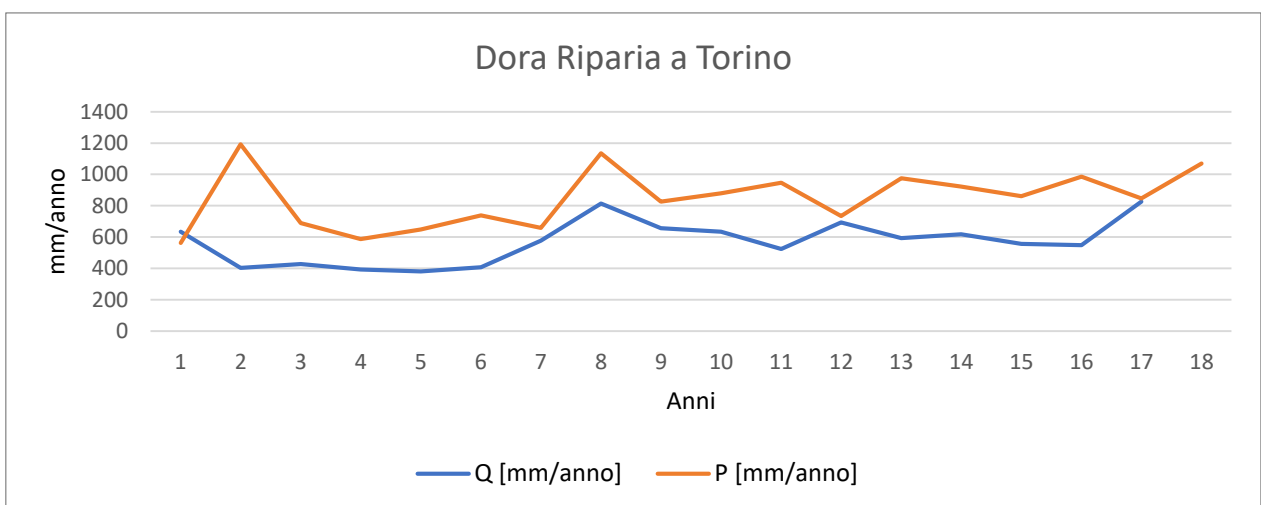


Figura 9: portate e precipitazioni a confronto della Dora Riparia a Torino.

Questi grafici ci fanno capire come le precipitazioni rispecchiano l'andamento delle portate, inoltre, per quanto riguarda la media totale la differenza fra le due è data dall'evapotraspirazione in accordo con la seguente equazione:

$$P = Q + E$$

Equazione 2: bilancio idrico.

Dove la P è riferita alle precipitazioni, la Q è la portata ed invece la E è l'evapotraspirazione.

Questa equazione è il risultato di un'assunzione importante e cioè che il bacino, se lo si studia con scale temporali lunghe (20 anni) può essere visto come una scatola chiusa e quindi può valere appunto l'equazione di bilancio appena vista.

Sono state ricostruite per tutti i bacini idrografici analizzati le curve di stagionalità delle portate (Regime Curve, RC) e le curve di durata delle portate (Flow Duration Curve, FDC): le prime consentono di valutare, su base mensile, l'andamento medio di portate e precipitazioni in riferimento all'arco temporale considerato; le seconde invece consentono di individuare, a scala giornaliera, i valori di portata estremi e le loro frequenze in un anno a scapito di una perdita di informazioni temporali. Entrambe le curve hanno consentito di far risaltare importanti aspetti quali le differenze nei processi dominanti nei diversi bacini: alcuni (e.g., regime delle piogge e accumulo/scioglimento delle nevi) sono individuabili maggiormente a partire dalle curve stagionali; altri (entità e frequenza degli estremi di piena e magra) sono individuabili a partire dalle curve di durata delle portate.

4 IMPIANTO PO/STURA SAN MAURO PORTATE TURBIMATE

L'azienda Iren acquisisce indirettamente i dati di portata naturale ottenuti a partire dalla portata derivata dal canale, quella rilasciata dalla traversa che fluisce sotto battente ed eventuali portate rilasciate da organi accessori (quali dissabbiatori, sghiaiatori o altri impianti provvisti di sensori). Di conseguenza, si sottolinea come tali valori rappresentino soltanto un dato indicativo e non reale.

Si hanno 21 anni di dati giornalieri dal 1999 al 2019. Dai dati grezzi acquisiti si attua un'elaborazione in modo da ottenere la misurazione giornaliera.

L'impianto idroelettrico a Po/Stura – San Mauro, attraverso le manovre delle opere di presa e delle paratoie, rilascia un DMV pari a $21 \text{ m}^3/\text{s}$, in conformità all'autorità di distretto idrografico del fiume Po. La portata massima assoluta individuata è pari a $3200 \text{ m}^3/\text{s}$, il minimo assoluto invece pari a $11.9 \text{ m}^3/\text{s}$. Fortunatamente solamente sette giorni in 21 anni di dati non si è garantito il DMV in quanto le portate non lo consentivano, questo ha fatto sì che l'impianto potesse turbinare praticamente sempre.

5 MODELLAZIONE IDROLOGICA

L'obiettivo è quello di realizzare uno studio per la valutazione della curva di durata delle portate in riferimento ai cambiamenti climatici, in particolare allo scenario peggiore, partendo dai dati di precipitazione e portate.

Si considera il bilancio idrologico sia a scala annuale sia a scala stagionale per i differenti bacini analizzati, determinando flussi entranti (precipitazioni) ed uscenti (portata nei corsi d'acqua, portata derivante da flussi sotterranei, evaporazione, evapotraspirazione, runoff di acque superficiali...).

Sono stati costruiti il diagramma e la Curva di Budyko, che permettono di confrontare l'evapotraspirazione effettiva rispetto a quella potenziale, attraverso le precipitazioni fornite dall'Arpa Piemonte. In questo modo si contestualizza il bilancio idrico medio di lungo periodo.

Dopo la verifica, si procede con la costruzione di un modello base per la simulazione dei flussi a scala giornaliera, mensile e annuale inserendo in seguito un modello per prendere in considerazione lo stoccaggio della neve e i processi di fusione nivale, svolta principalmente dalla collega Francesca Alpe, ed inoltre si sono aggiunti i prelievi a monte della traversa in esame.

Lo studio è stato eseguito attraverso RStudio, ovvero un linguaggio di programmazione per elaborazione statistica e grafica.

5.1 EVAPOTRASPIRAZIONE

Per evapotraspirazione si intende la combinazione di due processi separati per i quali l'acqua viene ceduta all'atmosfera dal suolo (evaporazione) e dalla vegetazione (traspirazione); essendo i due fenomeni simultanei, risulta molto difficile distinguerli, motivo per cui si parla generalmente di evapotraspirazione come di un singolo processo. L'evapotraspirazione è un importante parametro climatico del bilancio idrologico da prendere in considerazione per la costruzione dei modelli idrologici.

La conoscenza dell'entità dell'evapotraspirazione è necessaria per valutare la gestione delle risorse idriche e di conseguenza per le predizioni dell'impatto del cambiamento climatico.

Essa può essere misurata direttamente, tramite l'uso di lisimetri, o indirettamente tramite formule empiriche che permettono di ottenere un risultato su aree più vaste. Inizialmente si calcola l'evapotraspirazione potenziale ovvero quando il contenuto d'acqua nel terreno non costituisce un fattore limitante ed essa dipende solo dalle caratteristiche climatiche (temperatura, vento, umidità relativa, ecc.). Pertanto, l'evapotraspirazione potenziale rappresenta la massima quantità di acqua che può essere trasformata in

vapore dal complesso dei fattori atmosferici e dalla vegetazione. L'evapotraspirazione potenziale, quindi, è sempre maggiore o uguale all'evapotraspirazione effettiva.

L'evapotraspirazione potenziale verrà utilizzata come termine energetico nel modello idrologico, da cui si ricaverà una stima dell'evapotraspirazione effettiva dal territorio dei bacini considerati.

Si è scelto di calcolare l'evapotraspirazione secondo il metodo di Hargreaves [Hargreaves et al. 1982], quest'ultimo metodo segue la seguente equazione e prescinde dall'uso del suolo sottostante (13):

$$ET_{0HG} = 0.0023(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a$$

Equazione 3: evapotraspirazione secondo Hargreaves.

Dove:

- ET_{0HG} : è l'evapotraspirazione di riferimento;
- T_{mean} : è la temperatura media;
- T_{max} : è la temperatura massima;
- T_{min} : è la temperatura minima;
- R_a : è la radiazione extraatmosferica;

Questa equazione ha la tendenza a sottostimare ET_0 in condizioni di vento intenso e di sovrastimarla in condizioni di alta umidità relativa [Allen et al. 1998].

Per quanto riguarda invece il calcolo della radiazione solare extratmosferica R_a esso dipende della latitudine, della stagione e dell'ora, si ricava dalla seguente relazione:

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} \cdot R_o \cdot d_r \cdot (\omega_s \cdot \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}\varphi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{sen}\omega_s)$$

Equazione 4: calcolo della radiazione extraatmosferica.

Con:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \cdot \tan\delta)$$

- R_a (radiazione extratmosferica) è espressa in MJ/m²day;
- d_r è la distanza relativa Terra-Sole;
- δ è la declinazione solare [rad];
- φ è la latitudine [rad];
- ω_s è l'angolo orario al tramonto [rad];

- J è il numero del giorno nell'anno;

Nel nostro caso si è scelto di utilizzare questa formula empirica, ma ve ne sono anche altre presenti in letteratura, ad esempio Metodo di Thornthwa o il metodo di Penman-Mon: il primo di estrema semplicità ed il secondo invece necessita più parametri anche di tipo climatico e quindi risulta di più difficile applicazione.

5.2 LA CURVA DI BUDYKO

La disponibilità relativa di acqua ed energia può essere formalizzata sotto forma di indice di aridità (*Aridity Index*), indicato come E_p/P e definito pari al rapporto del potenziale annuale medio di evapotraspirazione, il quale rappresenta l'energia disponibile per l'evaporazione, e le precipitazioni annuali. Solitamente per bacini montani si osserva un *Aridity Index* inferiore all'unità, il quale implica che la precipitazione è maggiore rispetto all'energia disponibile per l'evaporazione. Tale parametro adimensionale rientra all'interno di relazioni empiriche al fine di confrontare bacini idrografici differenti analizzando la competitività fra pioggia ed energia: una delle formulazioni più usate è rappresentata dalla Curva di Budyko, la cui espressione, considerando l'approssimazione di Schreiber, è costituita da:

$$\frac{E}{P} = \frac{P - Q}{P} = 1 - \exp\left(-\frac{E_p}{P}\right)$$

dove:

- E/P è il rapporto di evaporazione effettiva media annua, valutata come $E=P-Q$, per precipitazione annuale media [-];
- E_p/P è l'indice di aridità [-];
- E_p è l'evapotraspirazione potenziale valutata con il metodo di Hargreaves [mm/anno];

Si assume che non esistano perdite d'acqua dal bacino idrografico o travasi; tutta l'acqua stoccata si ritroverà nel fiume con un determinato ritardo che verrà comunque considerato data la valutazione a lunga scala.

La Curva di Budyko permette di evidenziare come la disponibilità di acqua ed energia siano determinanti per definire le proprietà di un bacino idrografico. Questi fattori climatici (precipitazione per l'acqua ed evaporazione potenziale annuale per l'energia) determinano la risposta al deflusso all'interno del bacino ed è possibile individuare due casistiche estreme:

- in fase, dove i massimi in evaporazione potenziale (E_p) coincidono con i massimi annuali in precipitazione (P), rappresentati generalmente da valori al di sopra della Curva di Budyko;
- fuori fase, dove i massimi annuali in E_p coincidono con i minimi annuali in P , rappresentati generalmente da valori al di sotto della Curva di Budyko.

Nel primo caso si ha che l'evaporazione riduce l'accumulo d'acqua e dunque il deflusso (la maggior parte dei bacini analizzati si comporta così); nel secondo caso si ha un eccesso di acqua rispetto all'energia durante la stagione delle piogge, il quale comporta generazione di deflusso una volta superata la capacità di accumulo da parte del bacino. (13)

Quindi il bilancio idrico annuale e la variabilità del deflusso annuale sono governati dalla disponibilità di acqua sotto forma di precipitazione e dall'energia disponibile in termini di evapotraspirazione potenziale, il clima rappresenta il fattore forzante che modula la variabilità del deflusso annuale osservato in natura. (14)

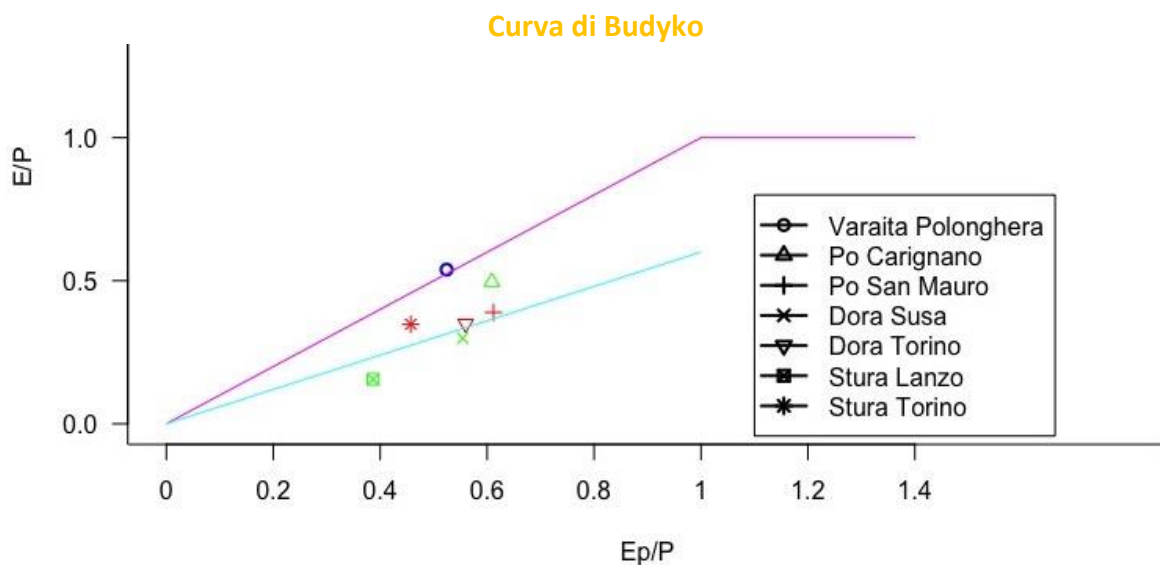


Figura 10: rappresentazione dei differenti bacini confrontati con la Curva di Budyko e i limiti di energia e acqua.

Si hanno inoltre, limiti di acqua ($E = P$) ed energia ($E = E_p$) essi rappresentano rispettivamente il caso in cui un sito non può essere al di sopra del *water limit* a meno che non vi sia un ulteriore ingresso di acqua oltre le precipitazioni e non può essere al di sopra dell'*energy limit* a meno che non si stia perdendo della precipitazione (ad esempio, l'acqua persa nel sistema delle acque sotterranee).

Si osserva che i valori Po a Carignano presentano i valori più alti di *Aridity Index* e E/P ; anche il Po a San Mauro Torinese presenta valori molto vicini a quelli appena descritti.

Infine, si osserva che un bacino ricade al di sopra della Curva di Budyko (Varaita a Polonghera) mentre altri ricadono al di sotto di essa; ciò implica una maggior portata rispetto a quella attesa nel caso dei punti al di sotto della linea e una portata inferiore per quelli al di sopra che potrebbe derivare da prelievi lungo il tragitto del corso d'acqua.

5.3 MODELLI IDROLOGICI

I modelli idrologici o anche detti di risposta idrologica sono necessari nello studiare le relazioni fra precipitazioni e portate alla sezione di interesse ed inoltre ci fanno capire quali fattori, fra i vari che lo influenzano, sono più rilevanti nel nostro caso studio.

La classificazione più utilizzata per questi modelli è riferita alla quantità di conoscenza a priori che si ha del sistema fisico che si vuole modellare, cioè se si conoscono le relazioni esistenti di causa-effetto o se invece l'impostazione è statistica e la relazione causa-effetto la si ricava.

- Black box (o empirici): l'unico obiettivo di questo tipo di modelli è riprodurre un output dato un input, non si acquisiscono informazioni sul sistema;
- Concettuali: nell'intento di riprodurre un output in base ad un input, si fanno delle assunzioni sul funzionamento del sistema;
- Fisicamente basati: la complessità del sistema viene rappresentata attraverso tutti i fenomeni fisici coinvolti, oltre a rappresentare la relazione input/output, sono riprodotte le relazioni interne fra le variabili.

I modelli concettuali in definitiva usano delle schematizzazioni dei fenomeni fisici presenti, esse possono essere:

- canali lineari per rappresentare solo il trasferimento temporale delle acque meteoriche, ovvero il ritardo fra ciò che entra nel modello e ciò che esce (esempio: modello della corrivazione);
- a serbatoi lineari per rappresentare i diversi meccanismi di immagazzinamento e rilascio dell'acqua per mezzo di uno o più serbatoi (esempio: modello di invaso);
- a serbatoi non-lineari per rappresentare con maggiore fedeltà processi con dinamiche più complesse.

Vi è inoltre, una distinzione in base a come si trattano i sottobacini:

- lumped model il quale considera i singoli sottobacini come una singola unità mediando le caratteristiche spaziali relative alla risposta al deflusso delle precipitazioni per l'intera area di un sottobacino analizzato;
- distributed model il quale suddivide ciascun sottobacino in celle più piccole analizzando esplicitamente la variabilità spaziale in riferimento ad un set di dati spaziali che descrivono il suolo, la vegetazione e l'uso del suolo; tale metodo permette di catturare la variabilità spaziale e temporale e instradare i flussi attraverso il sottobacino da cella a cella.

Ogni modello, in qualsiasi casistica ricada, deve avere una taratura, obbligato dalle complesse condizioni al contorno riscontrate in idrologia.

Per l'analisi del nostro caso studio si è scelto un modello idrologico concettuale lumped, semplificato e con pochi parametri.

5.3.1 Modello Base

Il bacino idrografico viene diviso verticalmente nei seguenti strati: uno strato superficiale di terreno, individuato in base alla profondità delle radici delle piante, ed uno strato profondo fino al substrato roccioso sottostante e si schematizzano i processi che avvengono per ogni strato.

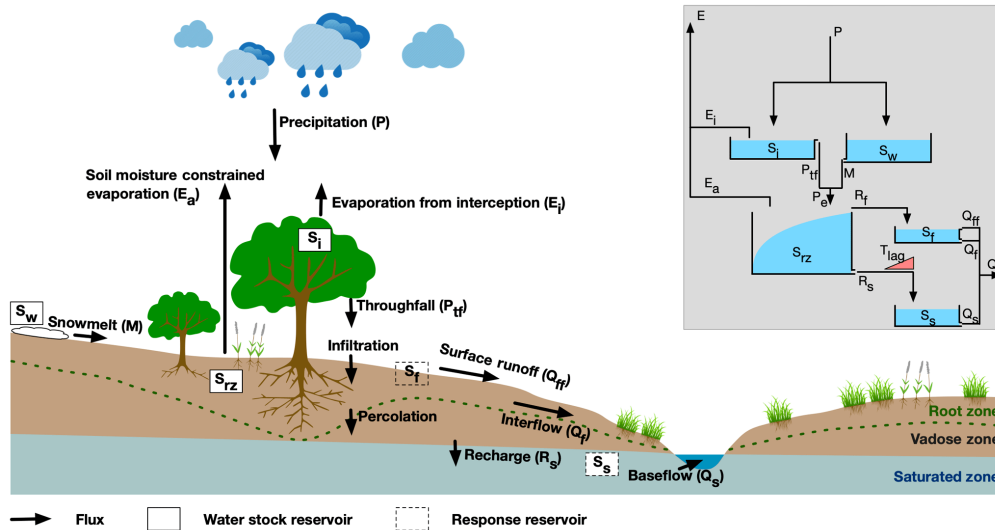


Figura 11: esempio schema modello a serbatoi.

Per la modellazione idrologica del nostro caso studio si fa riferimento ad un modello semplificato a scala giornaliera, *Two Steps Model*, dove il bacino di riferimento viene schematizzato attraverso dei serbatoi sollecitati da variabili in ingresso.

Le variabili di ingresso sono la precipitazione $P(t)$, tenendo conto dell'eventuale intercettazione, e l'evapotraspirazione potenziale $E_p(t)$ (valutata attraverso l'equazione di Hargreaves vista in precedenza) entrambe misurate in mm/giorno.

A seguire si considera una modellazione basata su quattro parametri:

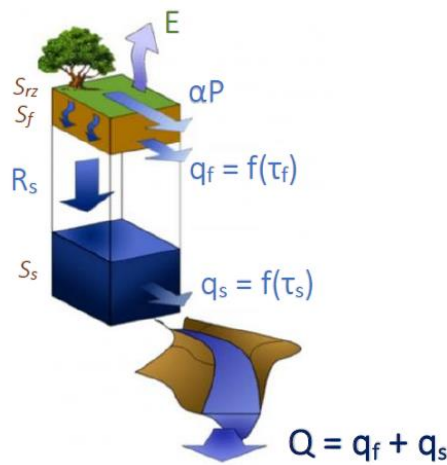
- α coefficiente adimensionale di ripartizione del deflusso superficiale, range di variabilità: 0 – 1;
- S_{CR} stoccaggio critico del suolo in mm, range di variabilità: 10 – 1000 mm;
- τ_s il tempo di risposta del flusso lento espresso in giorni, range di variabilità: 3 – 300 giorni;
- τ_f il tempo di risposta del flusso veloce espresso in giorni. range di variabilità: 0.1 – 3 giorni.

Il modello divide la precipitazione $P(t)$ in ingresso in due componenti del flusso di corrente, infiltrazione e deflusso superficiale, in base a differenti vie di flusso dominanti all'interno del bacino idrografico. Inoltre, si suddivide l'acqua infiltrata nel terreno in ricarica dell'acquifero ed evapotraspirazione.

Il deflusso sulla superficie e nel sottosuolo scorre lateralmente generando rispettivamente il flusso veloce e il flusso lento che sommati determinano il valore della portata stimata da confrontare con i valori di portata osservati.

Vengono considerati tre serbatoi principali:

- S_{rz} serbatoio nella zona delle radici; questo parametro determina la suddivisione dell'acqua che si infiltra in tale zona in evapotraspirazione, E , e ricarica delle acque sotterranee, R_s ;
- S_f serbatoio delle acque superficiali riferite al flusso;
- S_s serbatoio delle acque superficiali riferite al flusso lento.



Dal punto di vista matematico il modello è un sistema di tre equazioni differenziali ordinarie:

$$\frac{dS_{rz}}{dt} = (1 - \alpha) P - E - R_s$$

$$\frac{dS_f}{dt} = \alpha P - \frac{S_s}{\tau_s}$$

$$\frac{dS_s}{dt} = R_s - \frac{S_s}{\tau_s}$$

dove

- α è il coefficiente di ripartizione del deflusso;

- P è la precipitazione;

- E è l'evapotraspirazione effettiva ottenuta a partire dall'evapotraspirazione potenziale come $E = EP(S_{rz}/S_{cr})$;

- R_s è la ricarica delle acque sotterranee pari a $R_s = \begin{cases} 0 & , S_{rz} < S_{cr} \\ S_{rz} - S_{cr} & , S_{rz} > S_{cr} \end{cases}$

Fra due eventi di pioggia, terminata l'influenza del flusso superficiale, si presenta una decrescita monotona della portata interrotta dall'evento pluviometrico successivo; se si considera l'analisi dell'invaso lineare, è possibile definire questo tratto di curva monotona decrescente come curva di recessione delle portate la quale permette di determinare le tempistiche di drenaggio delle acque sotterranee immagazzinate nell'acquifero una volta che l'input di ricarica è terminato. Questo avviene a condizione che non vi sia evapotraspirazione all'interno dell'acquifero (ipotesi valida se non si ha la presenza di radici di elevata estensione fino a raggiungere la zona di stoccaggio delle acque) e non vi siano eventi parassiti che possano interferire con la decrescita della curva. (15,16)

Avendo ipotizzato l'invaso lineare si può utilizzare il Metodo di Maillet, ovvero ponendo le portate su scala logaritmica è possibile individuare i coefficienti di esaurimento k_s in funzione della pendenza delle curve di recessione; tale valore risulta correlato con i tempi di risposta dei differenti bacini caratterizzati da tale curva. Si possono avere le seguenti equazioni (16):

$$\ln q_s = \text{cost} - k_s t = -\frac{t}{\tau_s} \rightarrow q_s = q_0 \exp(-k_s t) = q_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right)$$

$$\frac{dS_s}{dt} = R_s - q_s \rightarrow q_s = k_s S_s = S_s \tau_s \quad (q_f = S_f \tau_f)$$

Anche per la portata q_f del deflusso superficiale si usa l'ipotesi di invaso lineare, con un tempo di risposta τ_f molto più veloce di τ_s . Il modello base restituisce i valori di portata totale sommando al flusso rapido e il flusso lento.

In aggiunta alle portate giornaliere simulate, vengono inoltre plottati i valori annuali e mensili, in modo da ricostruire eventuali variazioni stagionali e su lunga scala, e viene ricostruita la curva di durata delle portate ovvero la probabilità di superamento di una determinata portata.

5.3.2 Fusione nivale e modello base

Per quanto riguarda la fusione nivale essa è stata analizzata dalla collega Francesca Alpe nella sua Tesi di Laurea Magistrale: *"Cambiamenti climatici e tutela della biodiversità nella gestione di un impianto idroelettrico. Il caso studio della Diga del Pascolo a San Mauro Torinese (Iren Energia S.p.A.)"*

Visti i bacini idrografici analizzati prevalentemente montani, risulta necessario applicare una modifica al modello base in modo da tenere conto della fusione nivale.

L'accumulo nivale sui pendii montani crea un serbatoio temporaneo di acqua in fase solida, attraverso la fusione nivale, in un secondo momento, quest'acqua verrà rilasciata poco alla volta creando un deflusso con un certo ritardo rispetto alle nevicate avvenute in precedenza.

Vi sono molti modelli di elevata complessità che cercano di stimare la fusione nivale, complessità data dal fatto che vi sono pochi dati disponibili. Nel nostro studio, avendo scelto a priori un modello base semplice e non volendo stravolgere la sua semplicità appunto si è scelto di apportare poche modifiche a quest'ultimo nel tenere conto di questo fenomeno.

Per simulare la fusione nivale si è scelto di utilizzare il seguente modello *Degree Day Factor Model*, esso si basa sull'osservazione della proporzionalità tra il tasso di scioglimento della neve e la temperatura al di sopra del punto di congelamento per unità di tempo attraverso una costante di proporzionalità comunemente denominata fattore gradi-giorno, o *Degree Day Factor*; questo fattore definisce che per ogni 1°C oltre gli 0°C verrà sciolta una certa profondità di neve misurata in millimetri di acqua equivalente (17).

Le variabili di input sono P(t) e T(t) rappresentanti rispettivamente la precipitazione e la temperatura media valutate entrambi s scala giornaliera.

Si considera una modellazione con quattro parametri:

- DDF, *Degree Day Factor*, che valuta la quantità di neve sciolta per °C al di sopra dello zero stimato inizialmente attraverso l'equazione di Martinec (18)[mm/(°C giorno)]:

$$DDF = 11 \frac{\rho_{\text{snow}}}{\rho_{\text{water}}}$$

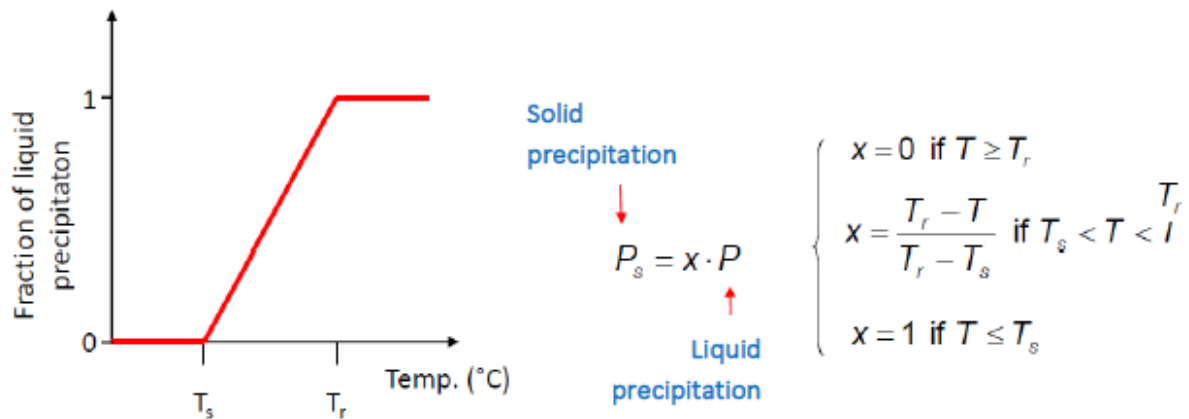
dove ρ_{snow} è la densità della neve presa pari a 100 kg/m³ e ρ_{water} è la densità dell'acqua pari a 997 kg/ m³;

- T_r temperatura al di sopra della quale tutta la precipitazione si trova allo stato liquido, espressa in °C;

- T_s temperatura al di sotto della quale tutta la precipitazione si trova allo stato solido sotto forma di neve, espressa in °C

- T_m temperatura di soglia per la fusione nivale espressa in °C.

Viene considerata una "funzione rampa" per la valutazione dell'accumulo di neve, che in base al valore della temperatura media giornaliera partiziona l'apporto derivante dalla precipitazione P in una componente solida P_s e in una componente liquida P_l= P - P_s:



- P_s è la precipitazione solida, parte di precipitazione liquida trasformata in neve in mm/giorno;
- P è la precipitazione totale (liquida e solida) in mm/giorno;
- X è il coefficiente di partizione della precipitazione adimensionale funzione delle differenti temperature;
- T è la temperatura media giornaliera in °C.

Se le temperature sono basse, inferiori a T_m , il contenuto d'acqua stoccato come neve aumenterà come:

$$SWE_{i+1} = SWE_i + (P_s) \Delta t$$

Il metodo dell'indice di temperatura, per definire l'evoluzione del manto nevoso, assume che la fusione nivale, P_m [mm/giorno], sia proporzionale alla temperatura dell'aria, T [°C], al di sopra di una temperatura di soglia predefinita, T_m [°C], attraverso un coefficiente di proporzionalità detto *Degree Day Factor*, DDF [mm/(°C giorno)]:

$$P_m = (T - T_m) DDF$$

La motivazione fisica è che l'energia disponibile per lo scioglimento della neve risulta generalmente proporzionale alla temperatura dell'aria. Inoltre, la fusione nivale avviene unicamente se è ancora presente della neve all'interno del serbatoio di stoccaggio, ovvero se $SWE > 0$, considerando l'accumulo di neve come:

$$SWE_{i+1} = SWE_i + (P_s - P_m) \Delta t$$

In sintesi, il modello per la simulazione della fusione nivale si esprime come:

$$P_m = \begin{cases} (T - T_m) DDF, & T \geq T_m \text{ e } SWE > 0 \\ 0, & T < T_m \text{ o } SWE = 0 \end{cases}$$

Il parametro che definisce la temperatura di soglia T_m varia da bacino a bacino per considerare le differenti caratteristiche locali.

Per correggere ulteriormente il modello vengono fatte variare le temperature T_s e T_r per ciascun bacino in modo da ottenere una simulazione il più possibile vicina alla realtà.

Si sottolinea come per la valutazione delle temperature e delle precipitazioni sia stato ottenuto un valore unico per l'intero bacino di interesse; questa condizione comporta un elevato grado di approssimazione sia per quanto riguarda lo stoccaggio della neve sia per la quantificazione del processo di fusione nivale. Nel primo caso si ha che la neve tende ad accumularsi solitamente in zone di alta quota quando la temperatura scende al di sotto degli 0°C ; all'interno del modello, considerando una temperatura mediata sull'intero bacino (zone di alta quota e zone di pianura), risulta molto efficace l'applicazione della "funzione rampa" che va a considerare un range di variazione delle temperature spostato al di sopra dello zero termico per simulare l'accumulo della neve. Questo significa che quando si ha una temperatura mediata al di sopra dello zero, si avrà comunque una parte di precipitazione, se non tutta, che sarà considerata sotto forma di neve e non contribuirà direttamente al deflusso da stimare. Nel secondo caso si ha che la neve inizia il processo di fusione una volta superato lo zero termico, ma non è detto che la temperatura mediata superiore allo zero corrisponda effettivamente ad un superamento per tutto il bacino idrografico; si presuppone dunque un valore adeguato al di sopra degli 0°C in modo che in parte o in tutto il bacino idrografico si verifichi la fusione nivale.

La portata derivante dalla fusione nivale entra all'interno del modello base come portata aggiuntiva al flusso rapido e al flusso lento per i quali sono stati calcolati precedentemente i parametri di interesse.

I tempi di arrivo delle portate derivanti dalla fusione nivale saranno maggiori, in quanto le precipitazioni nevose avvengono principalmente in montagna.

Per i bacini di piccole dimensioni (come VARPO, Varaita a Polonghera) il range di variazione delle temperature per definire lo stoccaggio della neve risulta più ristretto rispetto ai grandi bacini. La temperatura media di fusione, considerando tutti i bacini idrografici analizzati, si posiziona all'incirca intorno agli 8°C ; tale valore risulta coerente con le considerazioni fatte in precedenza: le dimensioni dei bacini idrografici e la differente morfologia devono necessariamente considerare una temperatura media al di sopra dello zero termico affinché sia possibile descrivere adeguatamente all'interno del modello il processo di fusione nivale.

5.3.3 Calibrazione parametri: Nash Sutcliffe

Si è scelto di fare un'analisi dei regimi stagionali rispetto a quelli annuali, per quanto riguarda la calibrazione dei vari parametri del modello; solo in un secondo momento, quando si sono individuati i parametri che meglio approssimano l'andamento stagionale, si è passati a verificare le simulazioni giornaliere ed annuali.

In prima battuta si è effettuata una calibrazione manuale per i parametri del modello base visti nel capitolo precedente ed essendo il fenomeno della fusione nivale un fenomeno rilevante per i bacini idrici analizzati, le portate osservate non combaciavano con le portate simulate. In questo modo i parametri ottenuti andranno a caratterizzare solo le parti di curva dove non vi sono processi di accumulo e scioglimento della neve.

Successivamente è stato utilizzato il pacchetto di R denominato "DEoptim" facente parte degli algoritmi genetici che utilizzano operazioni di crossover, mutazione e selezione ispirate dalla biologia su una popolazione al fine di minimizzare una funzione oggettiva nel corso delle generazioni successive. Il metodo risulta particolarmente adatto per trovare l'ottimo globale di una funzione con parametri a valori reali e non richiede che la funzione sia continua o differenziabile. (19)

L'abilità predittiva del modello idrologico, in seguito all'inserimento di ulteriori parametri legati al modello di fusione nivale, è stata valutata attraverso il coefficiente di efficienza di Nash–Sutcliffe (NSE) definito come (20):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \overline{Q_0})^2}$$

dove Q_0 è la portata osservata, $\overline{Q_0}$ è la media delle portate osservate e Q_m è la portata modellata; l'esponente t permette di individuare le portate ad un determinato tempo t .

L'efficienza di Nash–Sutcliffe è funzione del rapporto tra la varianza dell'errore delle serie temporali modellate e la varianza delle serie temporali osservate. Tanto più il coefficiente è vicino a 1 tanto più il modello è in grado di predire correttamente i dati osservati; quando il coefficiente risulta circa pari a 0 implica che il modello ha la stessa capacità predittiva della media delle serie temporali in termini di somma dell'errore al quadrato. Un'efficienza inferiore a zero ($NSE < 0$) si verifica quando la media osservata è in grado di predire meglio del modello.

I parametri vengono fatti variare tra un valore minimo e un valore massimo riportati nella Tabella 4.

Tabella 4: range per la calibrazione dei parametri utilizzati nel modello di fusione nivale.

PARAMETRI MODELLO		RANGE VARIAZIONE
Stoccaggio critico del suolo [mm]	S_{cr}	10 ÷ 500
Coefficiente di ripartizione del deflusso superficiale [-]	α	0.1 ÷ 0.9
Tempo di risposta del flusso veloce [giorni]	τ_f	1
Tempo di risposta del flusso lento [giorni]	τ_s	4 ÷ 200
Temperatura di fusione nivale [°C]	T_m	0 ÷ 10
Temperatura di neve [°C]	T_s	-5 ÷ 3
Temperatura di pioggia [°C]	T_r	3 ÷ 15
Degree Day Factor [mm/(°C giorno)]	DDF	0 ÷ 5

In seguito a differenti iterazioni per la funzione “DEoptim”, vengono individuati i parametri che meglio approssimano il modello, definendo valori ragionevolmente lontani dai limiti.

In seguito alla calibrazione dei parametri per il modello che considera la fusione nivale è possibile individuare una miglior rappresentazione della portata simulata (Q_{sim}) rispetto alla portata osservata (Q_{obs}).

Tabella 5: Risultati della calibrazione dei parametri del modello di fusione nivale per il bacino idrografico Po a San Mauro POSMT.

S_{cr}	35
α	0.27
τ_f	1
τ_s	40
T_m	7

T_s	0
T_r	6
DDF	0.88
NSE	0.4167

Di seguito si riportano i risultati della calibrazione, confrontati con la curva invece non calibrata. Si può notare bene come la Q estimated nel primo caso non segua in maniera precisa la curva delle Q observed, invece nella post calibrazione le due curve si seguono meglio l'una con l'altra.

Pre calibrazione dei parametri

Post calibrazione dei parametri

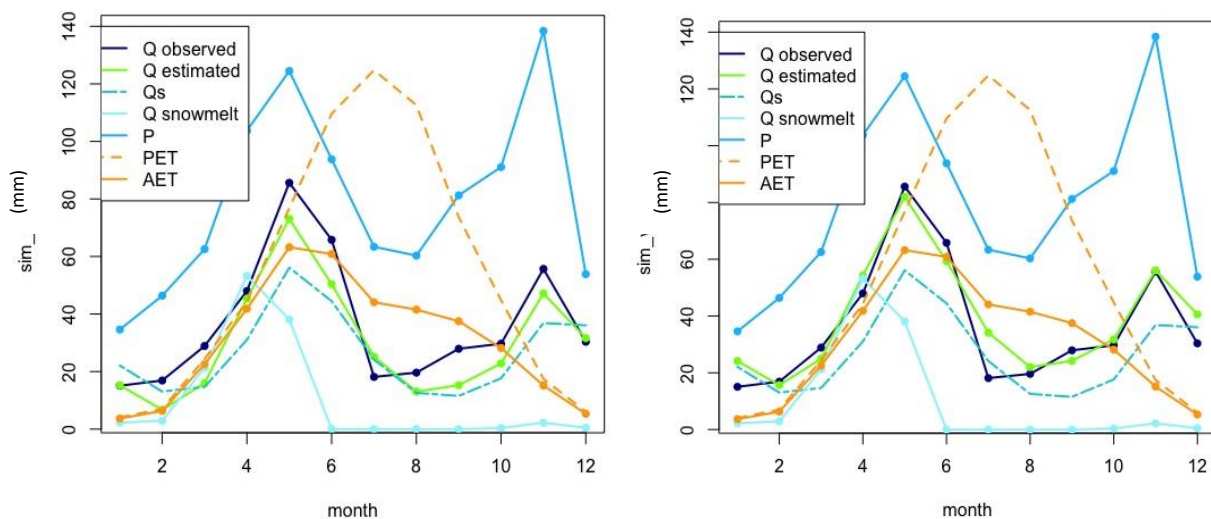


Figura 12: modello con processi di fusione nivale: confronto fra la curva stimata non calibrata e la curva stimata calibrata. Dati riferiti alla sezione di Po a San Mauro Torinese POSMT.

5.3.4 Prelievi e modello base

Per completare il modello base, oltre alla fusione nivale, si sono aggiunti i prelievi a monte della sezione d'interesse, principalmente riferiti all'irrigazione. Infatti, per quanto riguarda il Po, quest'ultimo fin dall'antichità venne utilizzato per far fronte al bisogno idrico delle varie colture della pianura. Negli ultimi decenni con l'aggravarsi della siccità nei mesi estivi i prelievi per l'uso irriguo sono diventati di notevole importanza.

Si è modificato il modello base andando a sottrarre alla portata ottenuta con le precipitazioni piovose e nivali la portata totale derivata a scopo irriguo, facendo l'ipotesi semplificativa che il volume derivato contribuisca all'evapotraspirazione delle colture (e solo in minima parte alla ricarica degli acquiferi connessi ai corsi d'acqua a monte di Torino).

Per quanto riguarda la portata totale prelevata si è scaricato dal SIRI (Sistema Informativo Risorse Idriche) della Regione Piemonte tutte le derivazioni massime ed i prelievi massimi del territorio regionale (21).

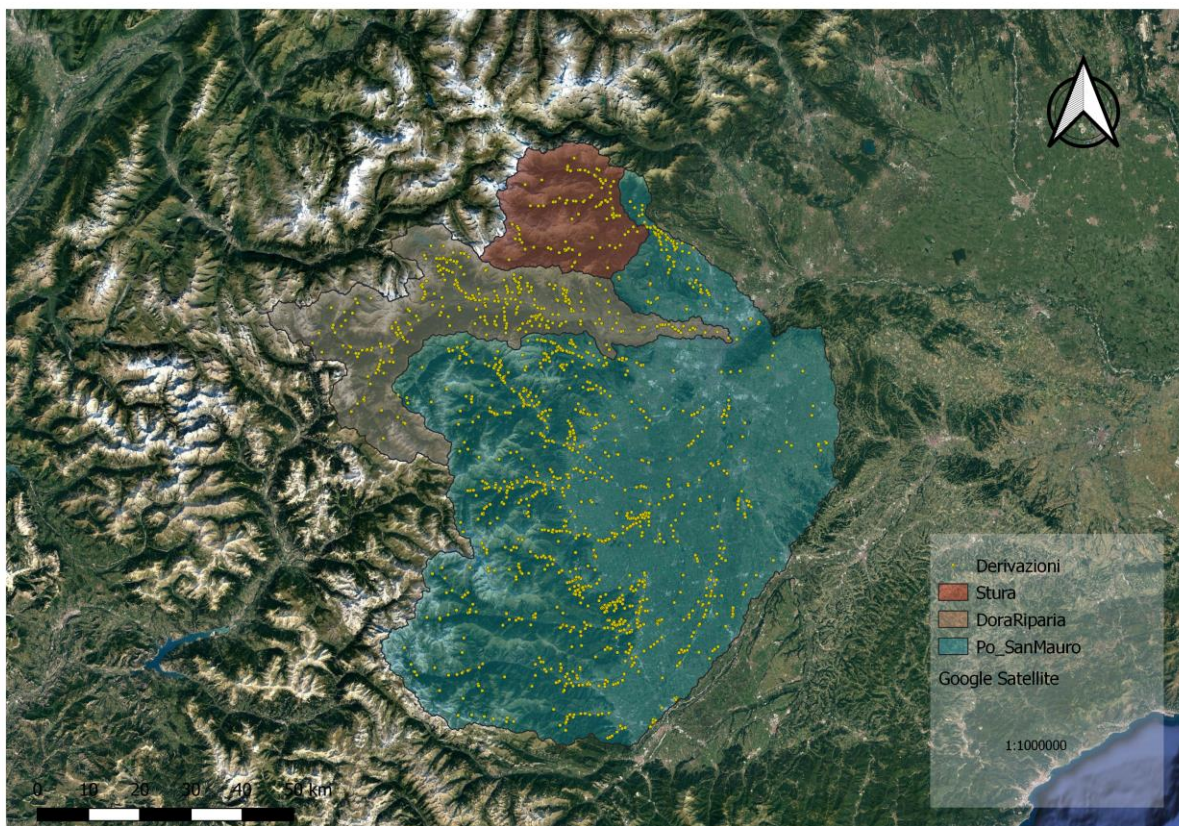


Figura 13: derivazioni dei sottobacini Po, Stura di Lanzo e Dora Riparia.

A seguire tramite QGis si sono isolati solo quelli ricadenti nei tre bacini idrici del nostro caso studio, ovvero a monte della sezione riferita alla traversa di San Mauro.

Essendo che la banca dati fornisce sia le derivazioni, ad esempio di impianti ad acqua fluente, e sia i prelievi irrigui si sono presi in considerazione quindi solo questi ultimi in quanto gli impianti rilasciano a valle la portata turbinata, perciò non sottraggono acqua al nostro sistema.

OBJECTID	CODICE_ROC	C_RILIEVO	S_PRATICA	TIPOLOGIA	PROVINCIA	COMUNE	C_IDRICO	SPONDA	PERIODO	Q_MAX	Q_MEDIA	D_RIL_DMV	
1	5296	CNA12051	CN02842PRN002	ISTANZA	PRESA	CUNEO	CRISSOLO	R. DEI QUARTI	NULL	DAL 01/06 AL 3...	0,2502	0,2502	SI
2	5295	CNA12050	CN02842PRN001	ISTANZA	PRESA	CUNEO	CRISSOLO	V. DEL TRUIN	NULL	DAL 01/06 AL 3...	0,2502	0,2502	SI
3	5318	CNA12053	CN02863PRN001	ISTANZA	PRESA	CUNEO	BRONDELLO	RIO TRAVERSERE	NULL	DAL 01/04 AL 3...	0,6	0,175	NULL
4	3788	NULL	TO10036PRS004	CONCESSA/AU...	PRESA	TORINO	GIAVENO	S.N.	NULL	DAL 01/01 AL 3...	6,00000000000000...	4,50000000000000...	NULL
5	4283	TOA10468	TO00724PRN010	CONCESSA/AU...	PRESA	TORINO	VILLAR FOCCHI...	R. CHIAPINETTO	DESTRA	DAL 01/01 AL 3...	20,000000000000...	10,000000000000...	NO
6	4279	TOA10465	TO00724PRN007	CONCESSA/AU...	PRESA	TORINO	VILLAR FOCCHI...	R. CHIAPINETTO	DESTRA	DAL 01/01 AL 3...	12,000000000000...	5,000000000000...	NULL
7	4276	TOA10467	TO00724PRN002	CONCESSA/AU...	PRESA	TORINO	VILLAR FOCCHI...	R. CHIAPINETTO	SINISTRA	DAL 01/01 AL 3...	8,00000000000000...	4,00000000000000...	NULL
8	3802	TOA10009	TO10064PRN001	CONCESSA/AU...	PRESA	TORINO	COAZZE	S.N.	DESTRA	DAL 01/01 AL 3...	10,000000000000...	2,40000000000000...	NULL
9	1861	TOA10124	TO00227PRN003	CONCESSA/AU...	PRESA	TORINO	BRICHERASIO	V. CHIAMOGR...	SINISTRA	DAL 01/04 AL 3...	NULL	NULL	NULL
10	5291	TOA10529	TO11383PRN001	CONCESSA/AU...	PRESA	TORINO	CHIOMONTE	R. SOUBEIRAN	DESTRA	DAL 01/01 AL 3...	10,000000000000...	7,04000000000000...	SI
11	4282	TOA10464	TO00724PRN006	CONCESSA/AU...	PRESA	TORINO	VILLAR FOCCHI...	R. CHIAPINETTO	SINISTRA	DAL 01/01 AL 3...	2,00000000000000...	2,00000000000000...	NULL
12	4281	TOA10469	TO00724PRN011	CONCESSA/AU...	PRESA	TORINO	VILLAR FOCCHI...	R. CHIAPINETTO	SINISTRA	DAL 01/01 AL 3...	8,00000000000000...	4,00000000000000...	NULL

PERIODO	Q_MAX	Q_MEDIA	D_RIL_DMV	P_RIL_DMV	PORT_DMV	MODULAZ	ITIOFAUNA	UTM_X	UTM_Y	Q_TOT
DAL 01/06 AL 3...	0,2502	0,2502	SI	DAL 1/6 AL 31/10	.1817	NULL	NULL	349827	4950377	1099046,241
DAL 01/06 AL 3...	0,2502	0,2502	SI	DAL 1/6 AL 31/10	.1817	NULL	NULL	348847	4952262	1099046,241
DAL 01/04 AL 3...	0,6	0,175	NULL	DAL 1/4 AL 30/9	.82	NULL	NO	372847	4938760	1099046,241
DAL 01/01 AL 3...	6,000000000000000...	4,500000000000000...	NULL	DAL / AL /	1.39	NULL	SI	362123	4987737	1099046,241
DAL 01/01 AL 3...	20,000000000000000...	10,000000000000000...	NO	DAL 25/3 AL 20/9	10	NULL	NO	360663	4996165	1099046,241
DAL 01/01 AL 3...	12,000000000000000...	5,000000000000000...	NULL	DAL 1/6 AL 20/9	10	NULL	NO	360242	4994928	1099046,241
DAL 01/01 AL 3...	8,000000000000000...	4,000000000000000...	NULL	DAL 1/1 AL 31/12	10	NULL	NO	360741	4996296	1099046,241
DAL 01/01 AL 3...	10,000000000000000...	2,400000000000000...	NULL	DAL / AL /	10	NULL	NO	356810	4988962	1099046,241
DAL 01/04 AL 3...	NULL	NULL	NULL	DAL / AL /	10	NULL	NULL	362915	4965211	1099046,241
DAL 01/01 AL 3...	10,000000000000000...	7,040000000000000...	SI	DAL 1/1 AL 31/12	10	NULL	NULL	342610	4994720	1099046,241
DAL 01/01 AL 3...	2,000000000000000...	2,000000000000000...	NULL	DAL 1/1 AL 31/12	10	NULL	NO	360129	4994665	1099046,241

Figura 14: tabella attributi dei dati del SIRI (Sistema Informativo Risorse Idriche).

Si è riscontrato un problema in quanto i prelievi secondo questa banca dati sono stati concessi in larga parte su tutto l'anno, quindi non si riscontra un aumento come ci si sarebbe aspettato nei mesi estivi caratterizzati da maggiore siccità e richiesta idrica per le coltivazioni. Per questo motivo si è fatta l'assunzione di tenere i prelievi massimi solo durante la stagione di coltura per antonomasia ovvero tra aprile e ottobre.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti, dopo la seconda calibrazione, effettuata in quanto necessaria visto che si è nuovamente modificato il modello per tenere conto dei prelievi irrigui.

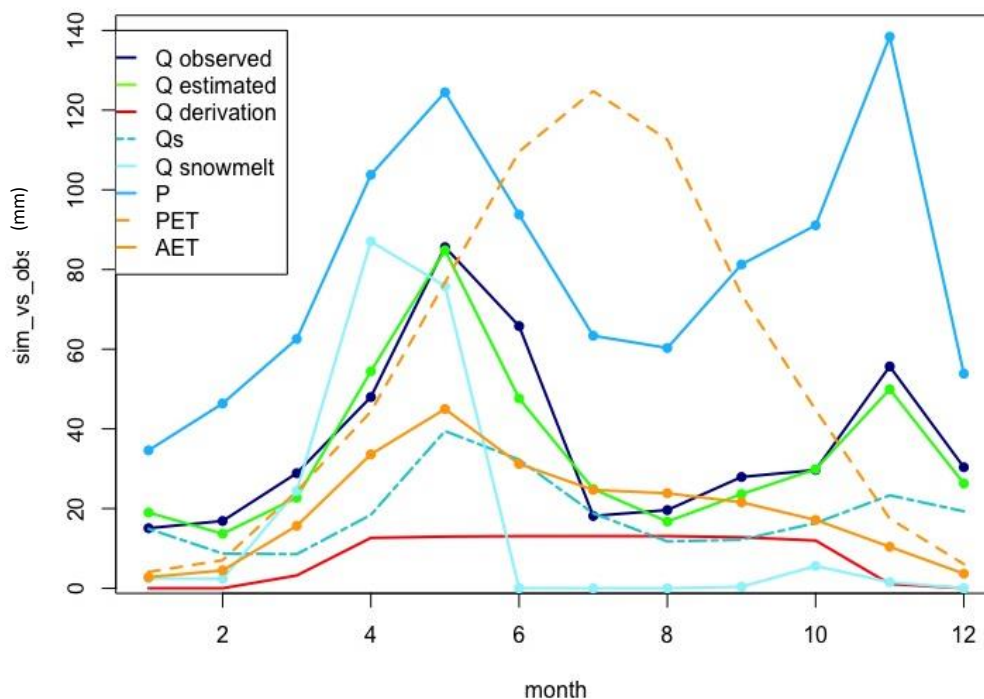


Figura 15: risultato della seconda calibrazione tenendo conto dei prelievi irrigui.

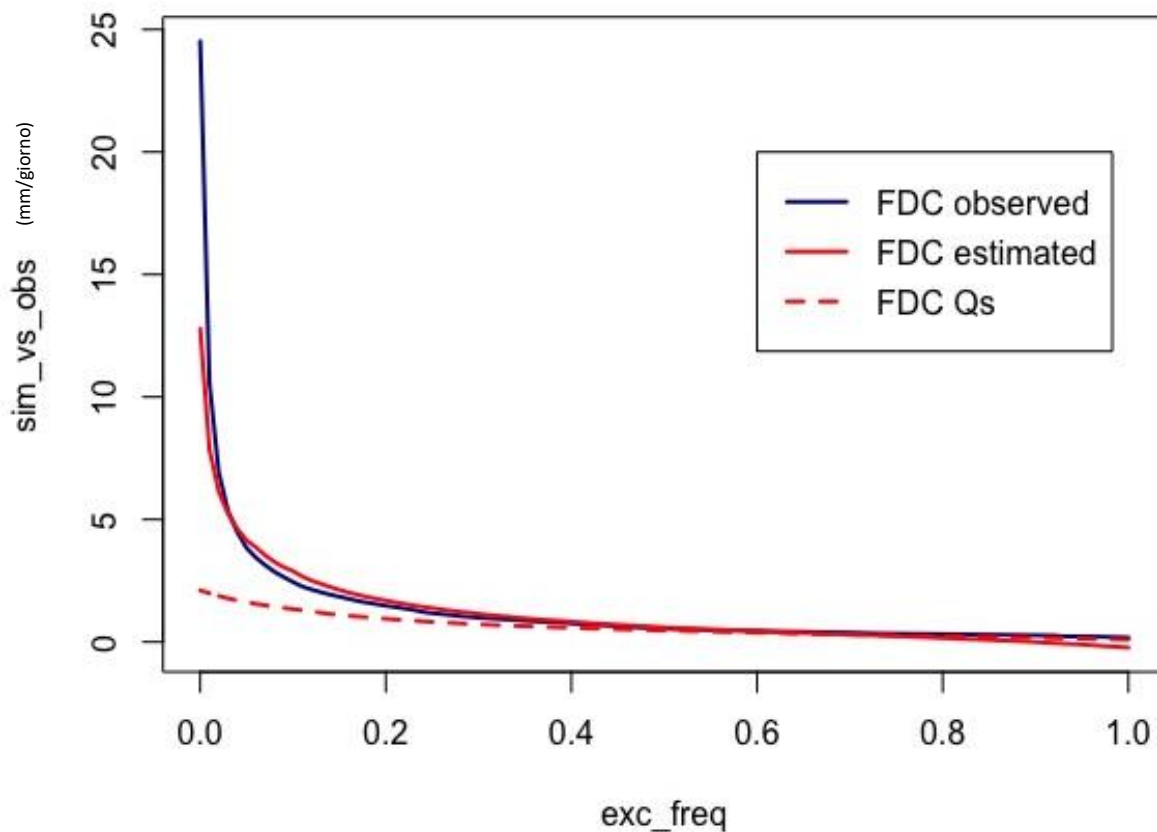


Figura 16: rappresentazione delle curve di durata delle portate per il bacino POSMT tenendo conto della fusione nivale e dei prelievi irrigui a monte;

Considerando l'ipotesi dell'invaso lineare e la semplicità del modello, si evidenzia la difficoltà nella rappresentazione delle portate di bassa intensità: per la stima delle portate che si trovano sulla coda della curva di durata delle portate cade l'assunzione di linearità delle curve di recessione e le portate simulate difficilmente riescono a riprodurre correttamente l'andamento di quelle reali.

5.4 CAMBIAMENTI CLIMATICI

In riferimento ai cambiamenti climatici futuri si è attuata una modellazione che si basa su scenari di emissione a scala globale, o *Representative Concentration Pathways (RCP)* redatti dall'*Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC)* (22), indicano un andamento rappresentativo delle concentrazioni dei gas a effetto serra e degli aerosol per un determinato obiettivo climatico (in termini di forzante radiativo nel 2100), che corrisponde a sua volta a un determinato andamento delle emissioni umane. L'entità delle future emissioni antropiche dipende fortemente dalle decisioni prese sul piano politico a livello internazionale, dall'evoluzione della popolazione e dal progresso tecnologico. Queste incertezze sono rappresentate attraverso diversi scenari di emissione.

I modelli climatici sono stati inizializzati con i diversi scenari per illustrare l'influsso delle decisioni politiche e di altri fattori sul futuro del clima. Gli scenari di emissione costituiscono pertanto delle opzioni di intervento. Essi consentono di quantificare le conseguenze climatiche di questi azioni, senza che si possa stabilire quale scenario sia il più probabile (23).

Tabella 6: Representative Concentration Pathways, RCP per la valutazione dei cambiamenti climatici con forzante radiativa al 2100.

Scenario	Scenario RCP	Caratteristiche
Nessuna protezione del clima	RCP8.5	Non viene preso alcun provvedimento in favore della protezione del clima. Le emissioni di gas a effetto serra aumentano in modo continuo. Rispetto al 1850, nel 2100 il forzante radiativo ammonterà a 8,5 W/m ² .
Limitata protezione del clima	RCP4.5	L'emissione di gas a effetto serra è arginata, ma le loro concentrazioni nell'atmosfera aumentano ulteriormente nei prossimi 50 anni. L'obiettivo dei "+2 °C" non è raggiunto. Rispetto al 1850, nel 2100 il forzante radiativo ammonterà a 4,5 W/m ² .
Consequente protezione del clima	RCP2.6	Vengono presi provvedimenti in favore della protezione del clima. L'aumento di gas ad effetto serra nell'atmosfera è arrestato entro 20 anni attraverso l'immediata riduzione delle emissioni. In tal modo è possibile raggiungere gli obiettivi dell'Accordo sul clima di Parigi del 2016. Rispetto al 1850, nel 2100 il forzante radiativo ammonterà a 2,6 W/m ² .

Per quanto riguarda questo lavoro si è scelto di utilizzare lo scenario RCP8.5 esso suppone che l'umanità continui come finora emettendo sempre più gas a effetto serra. Ciò corrisponde a un forzante radiativo di 8,5 W/m² alla fine del secolo. Inoltre, sono state considerate le analisi di proiezioni di modelli regionali descritte nel documento che definisce lo Stato dell'Ambiente 58/2015 redatto dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) (24). Essi sono modelli in grado di produrre proiezioni climatiche su una specifica area di interesse, ad una risoluzione più elevata (fino a una massima risoluzione orizzontale di 10-50 km), in questo modo si tiene conto della realtà locale (orografia).

5.4.1 Variazione dei regimi di temperatura e precipitazione

I dati di riferimento per la valutazione delle variazioni dei regimi delle temperature e delle precipitazioni sono stati ottenuti dall'analisi delle proiezioni dei modelli regionali in riferimento allo Stato dell'Ambiente 58/2015 (ISPRA).

La fonte più importante e aggiornata di proiezioni modellistiche per l'Italia è costituita da *Med-CORDEX*, studia il clima del Mediterraneo e analizza le proiezioni future in funzione degli scenari di emissione RCP4.5 e RCP8.5 utilizzando modelli *RCM (Regional Climate Models)* ad alta risoluzione.

Dall'insieme degli output dei modelli disponibili, sono state estratte e analizzate le proiezioni di temperatura (minima, massima e media) e precipitazione fino al 2100 negli scenari di emissione RCP8.5 per l'intero territorio nazionale.

I dati di seguito riportati fanno riferimento all'analisi dello Stato dell'Ambiente redatto da ISPRA. (25)

Temperatura

A scala nazionale, si prevede in un secolo:

- Temperatura massima: incremento compreso tra 3.4 e 5.7°C nello scenario RCP8.5.
- Temperatura minima: incremento compreso tra 3.4 e 5.1°C nello RCP8.5.
- Temperatura media: incremento compreso tra 3.5 e 5.4°C nello scenario RCP8.5.

Si è scelto di analizzare lo scenario peggiore ovvero l'aumento massimo di temperatura (massima, minima e media) fra il range proposto.

Precipitazione

Per le precipitazioni, sempre su scala nazionale, è possibile valutare un range delle proiezioni in percentuale:

- RCP8.5: range che va da una diminuzione del 15% a un aumento del 2%.

Anche qui si è scelto lo scenario peggiore prendendo il 15% di diminuzione delle precipitazioni.

Per tradurre i valori in percentuale si considera un valore medio della precipitazione cumulata annuale, per gli anni di cui sono disponibili i dati, per ciascun bacino di riferimento.

5.4.2 Climate Change Model

Il modello per la simulazione della variazione dei regimi stagionali di portata e precipitazione fa riferimento al modello base (*TwoStepModel*) con le modifiche che permettono di prendere in considerazione il processo della fusione nivale (*DegreeDayFactorModel*) e dei prelievi irrigui (*SIRI*).

Si inseriscono i valori di temperatura e precipitazione visti con l'RCP 8.5 per l'Italia fino al 2100.

Si è analizzato l'intero bacino a monte di San Mauro Torinese (POSMT) senza suddividerlo ulteriormente nei tre sottobacini che lo compongono (DRITO, SLATO ePOTO).

6 CONSIDERAZIONI FINALI SULLA MODELLAZIONE IDROLOGICA

Si è utilizzato un modello semplificato con pochi parametri e questo ha fatto sì che vi siano delle approssimazioni, ma in questo modo esso consente una comprensione migliore sia dei processi che avvengono al suo interno e sia della interpretazione dei parametri che lo caratterizzano.

In maniera analoga al range di variazione delle temperature si comporta la caratteristica del suolo: il parametro che definisce lo spessore critico del suolo risulta più elevato in caso di bacini di grosse dimensioni e minore per i bacini più piccoli.

Contrariamente agli altri parametri, i tempi caratterizzanti il deflusso veloce e lento, non sono di semplice valutazione in quanto considerano i vari deflussi all'interno del bacino idrografico. Per capire meglio questi valori si dovrebbe analizzare anche altri parametri come: la varietà litologica, morfologica, la spazialità delle precipitazioni e molti altri parametri. Si osserva come tempistiche elevate corrispondano ai bacini di maggiori dimensioni, ma per comprendere in modo adeguato tale affermazione sono necessari ulteriori approfondimenti sulle caratteristiche dei bacini idrografici analizzati.

Per quanto riguarda la valutazione dei cambiamenti climatici, sono stati considerati gli stessi parametri della modellazione che considera il processo di fusione nivale i prelievi irrigui, rappresentanti in modo appropriato la portata naturale attuale, e sono stati inseriti i valori di temperatura e precipitazione elaborati in riferimento allo scenario di proiezione climatica RCP8.5 nel caso più negativo possibile. Data la riduzione delle precipitazioni e l'incremento delle temperature, si osserva un minor apporto da parte della fusione nivale con una riduzione del picco di portata nei mesi caratteristici di tale processo.

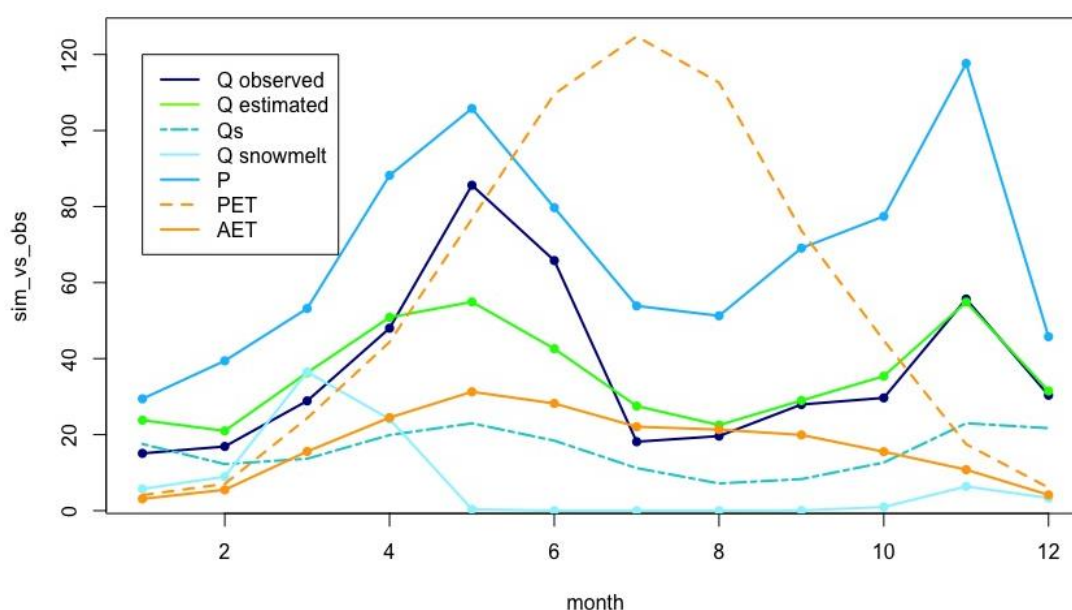


Figura 17: rappresentazione dell'evoluzione dei flussi all'interno del bacino POSMT considerando lo scenario RCP8.5.

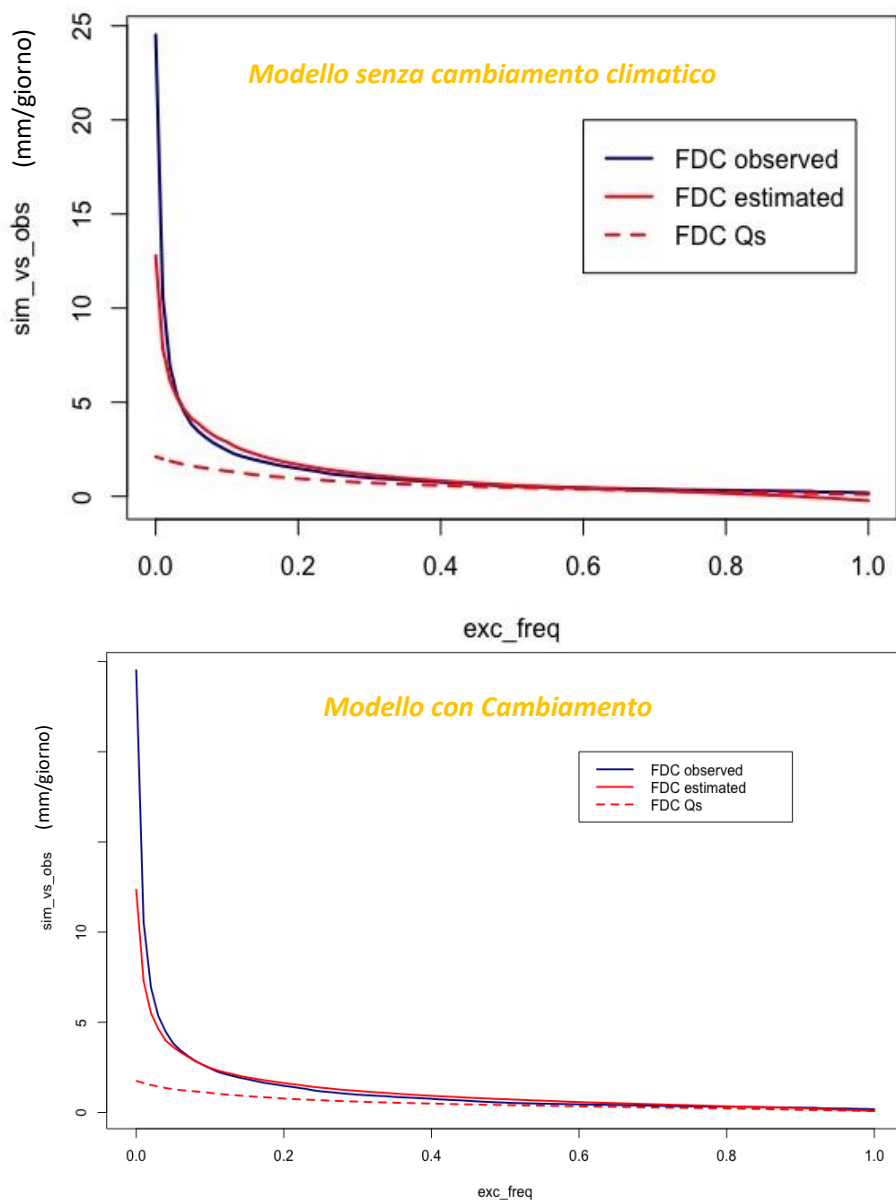


Figura 18: curva di durata delle portate confronto fra modello con cambiamento climatico e modello con fusione nivale e prelievi idrici senza cambiamento climatico.

Per la curva di durata delle portate in riferimento al cambiamento climatico si nota, come ci si aspettava, un decremento generale delle portate rispetto al modello privo delle modifiche RCP8.5.

Visto la previsione dell'installazione del nuovo impianto minihydro, da parte dell'azienda Iren, si può così recuperare parte della produzione elettrica persa per il cambiamento climatico. Inoltre, essendo che le portate minime che si prevedono con lo scenario peggiore RCP8.5, fanno sì che il DMV non sia sempre disponibile per tutto l'anno, si evidenzia l'importanza dell'installazione di un passaggio artificiale per l'ittiofauna. Quest'ultimo oltre ad essere un obbligo di legge risulterebbe anche necessario per consentire la continuità fluviale necessaria su tutto l'anno.

7 IL SOFTWARE BASEMENT

BASEMENT è un programma gratuito sviluppato nel 2002 dal laboratorio di ricerche idrauliche, idrologiche e glaciologiche (VAW) del Politecnico federale di Zurigo, a partire dalla risoluzione delle equazioni di Saint Venant per i modelli 1D e delle equazioni di deflusso in acque poco profonde (shallow water equations) per l'idrodinamica dei modelli 2D¹. Queste equazioni si basano sul presupposto di una ripartizione della pressione idrostatica e sono pertanto valide soltanto se la componente verticale della velocità può venir trascurata.

BASEMENT è un software per calcolare i processi nei corsi d'acqua, tenendo conto della corrente e del trasporto solido. I processi possono essere descritti con un modello monodimensionale, bidimensionale, tridimensionale o accoppiato. Anche gli effetti delle opere idrauliche possono venir presi in considerazione. Il trasporto dei sedimenti si distingue in trasporto solido di fondo e in trasporto in sospensione.

BASEMENT propone differenti condizioni di contorno per il calcolo del deflusso: idrogrammi d'entrata, deflusso normale e strutture idrauliche come sbarramenti e paratoie. Queste strutture possono essere utilizzate all'interno dell'area di calcolo. Il software permette anche di regolare automaticamente sbarramenti e altre opere, utilizzando criteri ben precisi.

Il risolutore del software consiste in un insieme di 3 sottosistemi numerici che possono essere utilizzati in modo indipendente o combinando più moduli tra loro. Lo strumento numerico monodimensionale denominato BASEchain consente di simulare la portata del fiume con la possibilità di integrare calcoli relativi ai fenomeni di trasporto dei sedimenti. Il corso d'acqua è ricostruito sulla base di sezioni. BASEplane è lo strumento di risoluzione numerica per sistemi bidimensionali che permette la simulazione del comportamento di torrenti e pianure alluvionali, sistemi più complessi i cui fenomeni idraulici e di trasporto solido non avrebbero una completa rappresentazione con un modello più semplice. È inoltre possibile accoppiare il modello 2D con uno o più modelli monodimensionali. Lo strumento numerico a tre dimensioni denominato BASEsub è destinato alla simulazione di campi di flusso di superficie sottostanti il pelo libero, basati sulla geometria spaziale. Il modulo è accoppiato con quello di flusso di superficie BASEplane.

¹ La distribuzione del flusso e di pressione nelle tre dimensioni è descritta in modo completo dalle equazioni di Navier-Stokes. Queste equazioni possono essere risolte numericamente, in quanto soluzioni analitiche esistono solo per problemi fortemente semplificati. L'approccio tridimensionale è adatto solo a studi locali, in cui i fenomeni di turbolenza e il flusso in tutte le direzioni sono essenziali per i risultati, ad esempio nel caso in cui si voglia valutare il campo di moto attorno alle pile di un ponte. Assumendo una distribuzione di pressione statica e trascurando le componenti di flusso lungo la verticale, le equazioni di Navier-Stokes sono ricondotte alle equazioni a due dimensioni che descrivono le acque poco profonde. Questo insieme di equazioni fornisce risultati accurati per il comportamento del profilo idrico e del campo delle velocità. Gli effetti legati alla turbolenza non possono essere direttamente risolti, ma sono considerati da un fattore di scabrezza artificiale nelle condizioni di chiusura, che stabilisce la relazione tra velocità di flusso e sforzo di taglio. Le equazioni delle acque basse (Shallow Water Equations) sono utilizzate per flussi bidimensionali come, ad esempio, la rottura delle dighe, il campo di moto in curva o in aree golenali estese. Riducendo la dimensione spaziale ancora una volta, si ottengono le equazioni 1D di De Saint Venant: i principali risultati di questo modello sono il tirante idrico e la velocità media nella direzione del flusso. Questo metodo è ancora in uso per il calcolo esteso di un sistema fluviale, mentre per analisi locali è preferibile ricorrere a un modello di studio più complesso.

Teoricamente, è possibile risolvere il problema matematico fino a fenomeni di piccola scala come le strutture di turbolenza. Tuttavia, in un problema naturale, è per lo più impossibile determinare tutti i limiti e le condizioni iniziali in maniera esatta. Inoltre, il tempo di calcolo necessario per risolvere il sistema completo di equazioni cresce vertiginosamente all'aumentare della risoluzione spaziale e temporale. Pertanto, a discrezione dell'ambito, vengono utilizzati modelli matematici semplificati.

7.1 VALIDAZIONE DEL SOFTWARE BASEMENT

I software moderni possono eseguire analisi complesse, simulando in maniera molto accurata l'area studio. Parallelamente però diventa più complesso eseguire un controllo dei risultati, per stabilire se questi siano attendibili o meno e se siano presenti errori nel modello di calcolo.

Per poter esprimere il giudizio motivato di accettabilità dei risultati, cioè per essere sicuri che non vi siano errori nel modello di calcolo, si possono effettuare semplici calcoli e valutazioni semplificate. Questi casi semplici vanno risolti mediante il calcolo manuale ovvero senza l'utilizzo di algoritmi di calcolo automatico, ma carta, penna e calcolatrice.

Uno scarto accettabile tra i risultati del software ed i calcoli manuali potrebbe essere una differenza del 5%. Se si va oltre il 10% potrebbe esserci qualche problema o nel modello di calcolo o nel calcolo manuale e quindi si ricontrollano entrambi.

In questo capitolo vedremo come si è cercato di validare il software BASEMENT in funzione del nostro caso studio.

7.1.1 *Elementi necessari al modello*

Per effettuare una corretta validazione si deve analizzare il caso studio vero e proprio e di conseguenza si devono individuare gli elementi idraulici caratteristici presenti che sicuramente verranno utilizzati per la creazione del modello finale.

7.1.1.1 *Richiami caso studio*

Per quanto riguarda il caso studio si può rimandare alla descrizione dell'impianto svolta in precedenza nel capitolo 01 L'IMPIANTO PO/STURA-SAN MAURO.

Si ricorda inoltre, che poco a monte dell'impianto si ha l'immissione dell'asta dello Stura di Lanzo nell'asta del Po, vedremo nei capitoli successivi come si è deciso di trattare e modellare questa caratteristica.



Figura 19: caso studio, a monte della traversa.

7.1.1.2 Elementi idraulici caratteristici

Per elementi idraulici caratteristici intendiamo tutte quelle componenti del nostro caso studio che si possono schematizzare e studiare in modo singolo, sono le nostre valutazioni semplificate che utilizzeremo per validare il software.

Partiamo dall'elemento essenziale, il fiume Po, questo può essere visto in maniera esemplificativa come un canale idraulico semplice; è il primo elemento idraulico che troviamo, infatti senza questo non ci sarebbe alcuna modellazione idraulica.

Inoltre, si può avere un cambio di pendenza all'interno di un tratto fluviale e questo sarà il nostro secondo elemento idraulico che andremo a modellare per validare il software.

Per quanto riguarda l'impianto vero e proprio troviamo i seguenti elementi idraulici principali:

- traversa di sbarramento
- opere di presa

A valle della traversa invece si ha lo sfioro con relativo risalto idraulico per passare da corrente veloce a corrente lenta, anche questo sarà un elemento idraulico che andremo ad analizzare.

Ora vedremo come si è deciso di modellare ogni singolo elemento idraulico caratteristico.

7.1.1.3 Modello per l'elemento idraulico Fiume Po: canale semplice ed a doppia pendenza

In riferimento al tratto fluviale del Po, a monte dell'immissione dello Stura di Lanzo, si è deciso di studiarlo in maniera semplificata come un semplice canale con il letto piatto largo 3.00 m e le sponde verticali ($K_s=65 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$), con una portata ipotetica di $7.45 \text{ m}^3/\text{s}$ e la pendenza del fondo pari a 3‰.

Inoltre, si è anche simulato il possibile cambio di pendenza, in questo caso invece si è cambiata la geometria del problema come rappresentato in Figura 20.

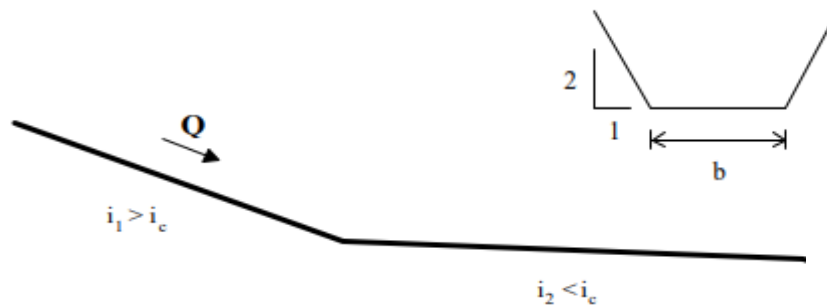


Figura 20: geometria canale con cambio pendenza.

Per questo caso si è utilizzata una geometria del canale con la base del letto larga 1 m e le sponde inclinate 2/1, il primo tratto con pendenza pari a 5‰ ed il secondo invece di 3‰ ($K_s=65 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$).

7.1.1.4 Modello per l'elemento idraulico traversa di sbarramento: stramazzo a soglia larga

In questo caso il modello idraulico scelto è rappresentato in Figura 21, abbiamo una soglia larga 40 m con un coefficiente di Poleni pari a 0.65. La portata scaricata è di $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

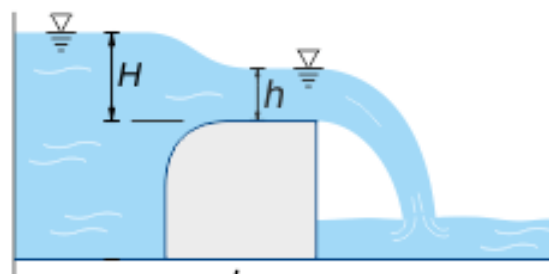


Figura 21: geometria stramazzo soglia larga.

7.1.1.5 Modello per l'elemento idraulico opera di presa: PID controlled weir

Per quanto riguarda l'opera di presa il software BASEMENT permette di implementare un pacchetto chiamato PID controlled weir. L'altezza dello sbarramento è controllata durante la simulazione dal controller PID ed è automaticamente aggiornato per mantenere il livello dell'acqua predefinito.

Si è utilizzato il caso test proposto dagli sviluppatori del software, in 2-D, la portata viene aumentata da 300 m³/s a 450 m³/s e poi abbassata in cinque minuti a 180 m³/s, prima di essere nuovamente impostato a 300 m³/s. Per la simulazione 2-D, il livello target non è costante, ma dipendente dall'attuale afflusso, misurato a monte.



Figura 22: esempio di paratoia a controllo sita in impianto a Serre La Voute (Iren Energia).

7.1.2 Validazione per singolo elemento

Come detto in precedenza la strategia di validazione nel nostro caso consiste nello svolgere analiticamente il calcolo senza l'ausilio del Software e in un secondo momento confrontare questi ultimi con i risultati ottenuti attraverso BASEMENT.

Tranne per quanto riguarda il caso in cui viene controllato il tirante idrico grazie alla paratoia in quanto il test era riferito a mantenere un prestabilito range di valori.

7.1.2.1 Risultati analitici

- canale semplice: tramite le formule si è in grado di ottenere un tirante idrico pari a 0.97 m.
- canale doppia pendenza: si ottiene anche in questo caso tramite il calcolo analitico il tirante idrico dopo il cambio di pendenza pari a 2.11 m.
- soglia larga: in questo caso si misura l'altezza idrica rispetto allo stramazzo a quota 109.5 m s.l.m. a monte, finita la zona di richiamo dello stramazzo stesso e dal calcolo analitico si ottiene 1.30 m.
- PID controlled weir: per questo esempio invece non si sono fatti calcoli analitici, in quanto si voleva mantenere un livello idrico prestabilito che nel nostro caso il range di variazione possibile è di $0 < h < 5.0$ m.

7.1.2.2 Risultati numerici

- canale semplice: si ottiene un tirante idrico di 0.97 m, il software permette anche di ottenere un andamento del tirante idrico su tutta la lunghezza del canale.

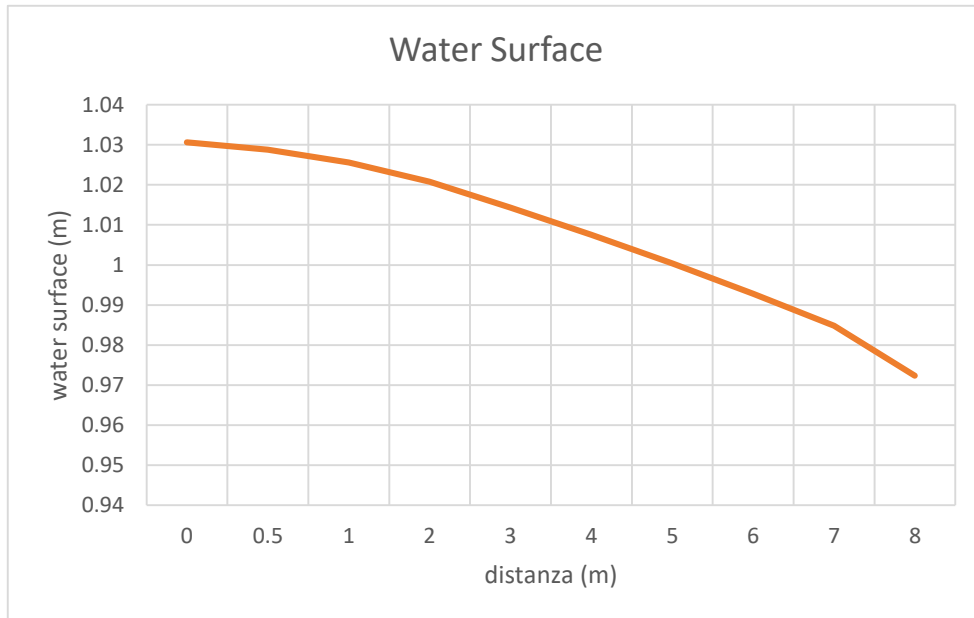


Figura 23: andamento tirante idrico.

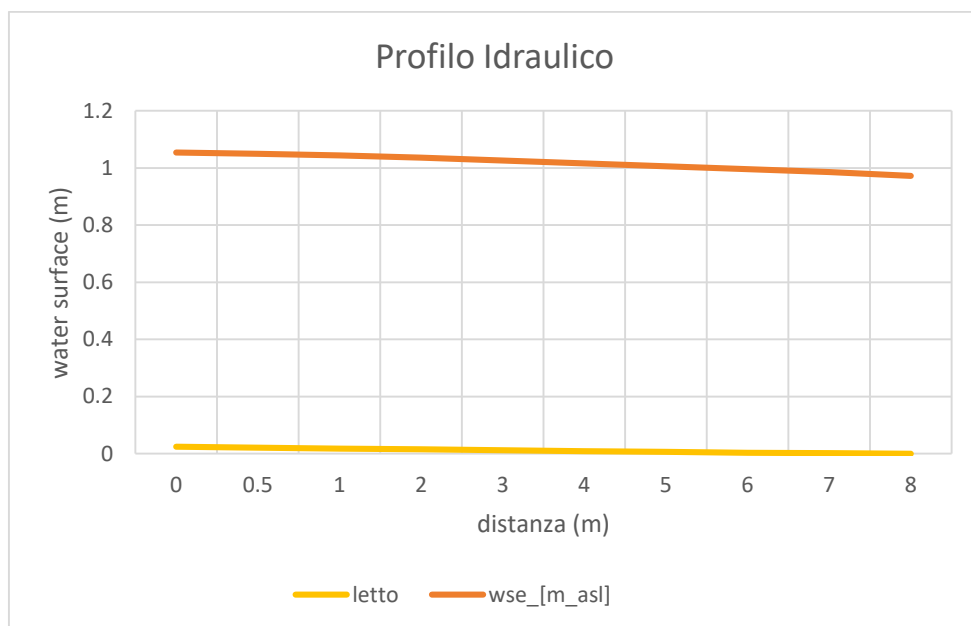


Figura 24: profilo idraulico creato con BASEMENT caso canale semplice.

- canale doppia pendenza: si ottiene un tirante idrico pari a 2.08.

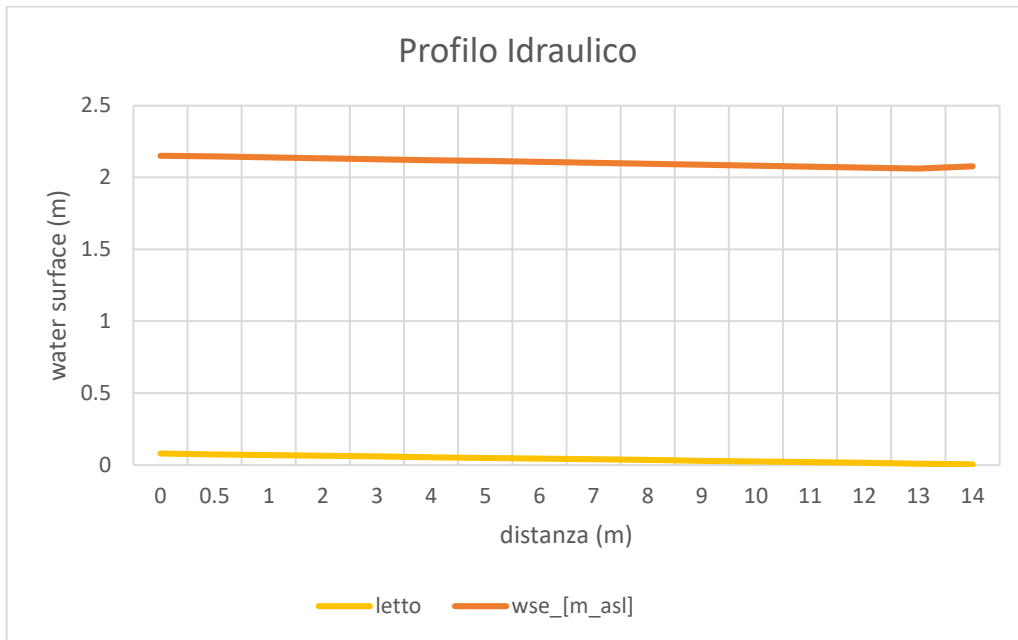


Figura 25:profilo idraulico creato con BASEMENT caso canale doppia pendenza.

- soglia larga: in questo caso si misura l'altezza idrica rispetto allo stramazzo a quota 109.5 m s.l.m. a monte, finita la zona di richiamo dello stramazzo stesso e dal calcolo numerico si ottiene 1.34 m.

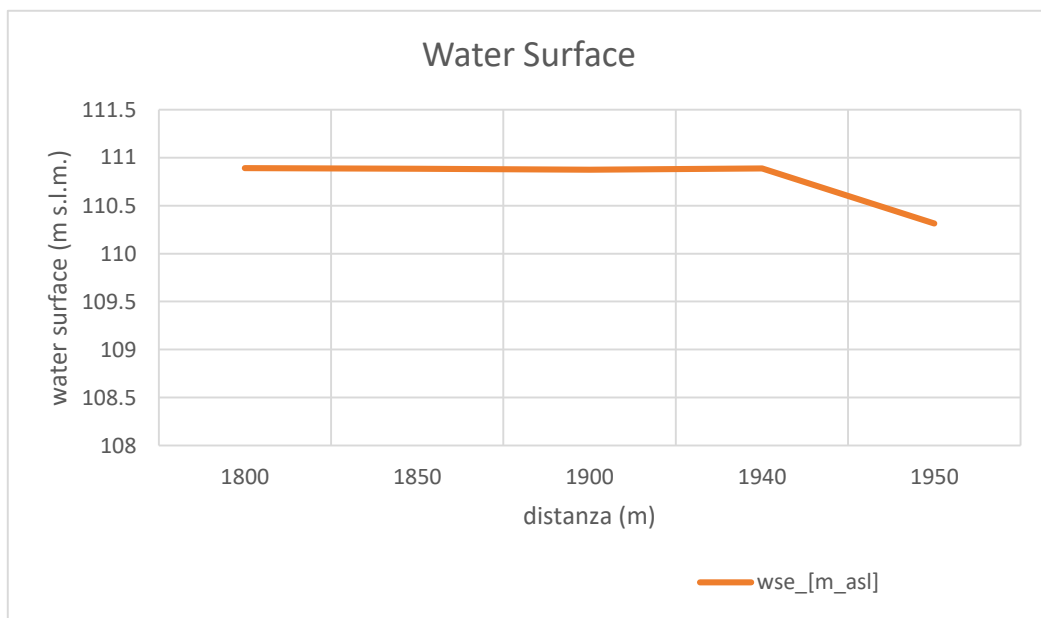


Figura 26:profilo idraulico creato con BASEMENT caso soglia larga.

- PID controlled weir: il risultato del test lo si vede nel grafico in Figura 27.

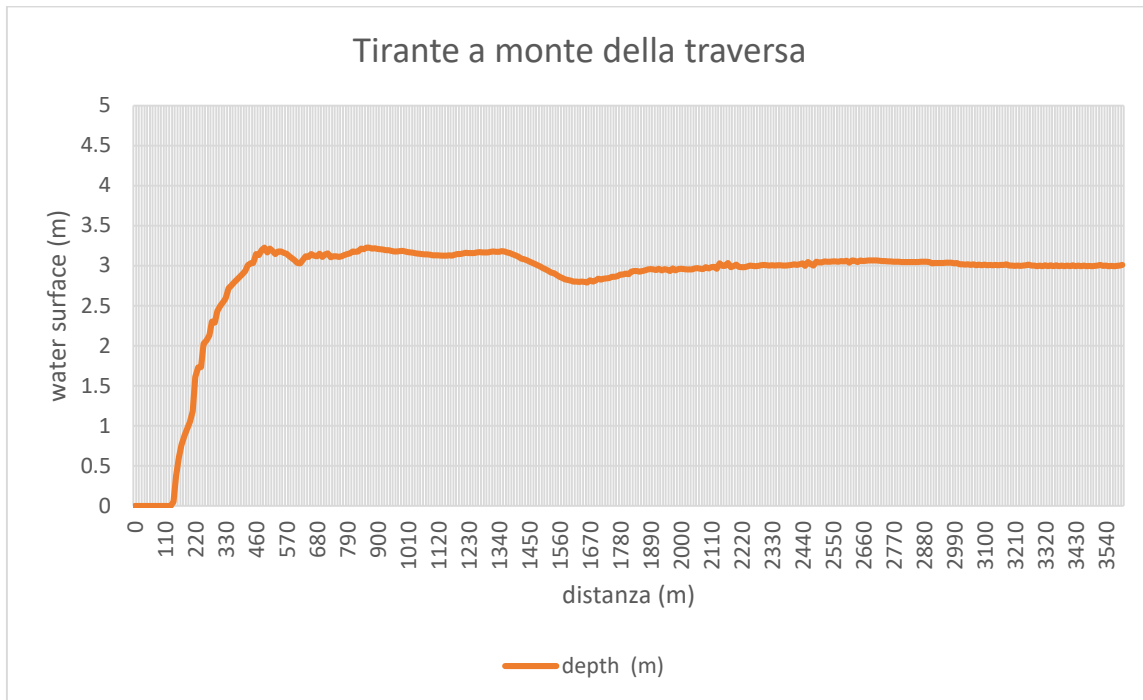


Figura 27: risultato PID controlled weir, andamento nel tempo del tirante a monte della traversa.

7.1.2.3 Confronto risultati analitici e numerici

Nella tabella seguente si riportano i vari risultati ottenuti dai calcoli analitici, dai calcoli numerici attraverso il software e relativo scarto fra i due.

Tabella 7: risultati validazione.

Geometria	Grandezza di confronto	Risultato analitico	Risultato numerico	Scarto
Canale semplice	Tirante idrico	0.97 m	0.97 m	0 %
Canale doppia pendenza	Tirante idrico	2.11 m	2.08 m	1.4 %
Stramazzo soglia larga	Altezza idrica rispetto allo stramazzo a monte	1.3 m	1.34m	3 %
PID controlled weir	Altezza idrica	$0 < h < 5.0$ m	$0 < h < 3.2$ m	0 %

8 DATI DI INPUT

La caratterizzazione idraulica del torrente Po nel tratto di riferimento, che va dall'immissione della Dora fino alla traversa della diga del Pascolo, richiede una simulazione numerica bidimensionale. La simulazione bidimensionale necessita la costruzione di una superficie di computazione (mesh) basata sui dati topografici dell'alveo. La mesh dovrà rappresentare l'alveo del torrente tenendo conto non soltanto della sua planimetria ma anche dell'attrito che esso esercita sulla corrente e di conseguenza si deve avere una differenza in termini di materiali presenti (vegetazione ed alveo). Inoltre, il metodo dei volumi finiti richiede l'inserimento di opportune condizioni al contorno della mesh. Le condizioni al contorno sono da applicare alle sezioni d'ingresso e di uscita del dominio computazionale in modo da poter calcolare la soluzione in tutti i nodi della mesh. Nello specifico, nel nostro caso studio, abbiamo tre sezioni di ingresso: Po, Dora e Stura di Lanzo, e tre sezioni di uscita: il canale derivatore, la traversa e l'installazione dell'impianto di minihydro. Sarà necessario definire gli idrogrammi d'ingresso nelle sezioni a monte ed il metodo di fuoriuscita del flusso dalle sezioni a valle. Le portate inserite nell'idrogramma sono state definite dallo studio idrologico effettuato nel capitolo 3.4.

Prima di effettuare la simulazione vera e propria si devono effettuare questi passaggi (26):

1. Costruzione della mesh;
2. Definizione delle condizioni al contorno;
3. Definizione della condizione iniziale;
4. Definizione del time step della simulazione;
5. Definizione dei dati da ottenere come output.

Nelle seguenti sezioni saranno discusse le analisi necessarie per determinare tutti i parametri della simulazione e verrà spiegato come sono stati ottenuti tali parametri a partire da un rilievo batimetrico effettuato dall'azienda IREN S.P.A.

8.1 Costruzione della mesh

BASEMENT richiede una superficie di computazione, cioè la mesh di calcolo, per effettuare la simulazione idraulica ovvero un insieme di dati geometrici che rappresentano l'alveo. Essa deve poter approssimare il più possibile l'alveo oggetto di studio. La mesh è un'entità geometrica formata da elementi puntuali, i nodi, e da poligoni ovvero gli elementi (26).

I nodi, che sono i vertici degli elementi, contengono le informazioni inerenti alla latitudine, longitudine e quota invece gli elementi, definiscono un volume di corrente e la scabrezza della superficie su cui essa scorre.

La mesh può essere realizzata con diversi programmi, in questo studio è stato utilizzato il metodo proposto dagli sviluppatori di BASEMENT tramite il programma QGIS. I programmatori di BASEMENT hanno sviluppato un plug-in, BASEmesh, il quale permette di generare una mesh triangolare partendo da un layer di punti misurati sul terreno. Si possono anche creare mesh di altre forme geometriche ma secondo lo User Manual V2.8 (26) si consiglia l'utilizzo della triangolazione.

Nel nostro caso studio si disponeva di una batimetria effettuata nel 2013 da HYDRODATA su commissione dell'azienda IREN ed è bastato riportare il dato da un ambiente Cad ad un ambiente Gis.

8.1.1 modellazione mesh

Dopo aver trattato i dati rilevati, si è passati alla creazione della superficie di calcolo. La mesh come detto in precedenza dovrà approssimare il più possibile l'alveo e tenere conto delle zone vegetate. Per ottenere una mesh affidabile è necessario che gli elementi siano piccoli (per seguire meglio il profilo del terreno) ma non troppo in quanto se no il programma aumenta notevolmente i tempi di calcolo. Inoltre, essi devono essere regolari e con le quote corrispondenti al terreno. In aggiunta la mesh dovrà tenere conto delle zone vegetate per considerare gli effetti che ha la vegetazione sulla corrente. Perciò durante la creazione della mesh si deve tenere conto sia della dimensione degli elementi della mesh, sia delle effettive quote del terreno che delle zone vegetate.

Seguendo la procedura descritta nel manuale d'utilizzo (26) del programma e riportate di seguito si è scaricato il plugin BASEmesh.

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

8.1.2 Comandi per la modellazione della Mesh

Il Plugin permette di modellare sia una mesh triangolare, sia di estrarre sezioni del terreno (stringdef) necessarie poi nell'utilizzo del codice di calcolo. Nel caso in esame verranno descritti i comandi necessari e la procedura eseguita per modellare la mesh utile alla simulazione bidimensionale.

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

8.1.3 Creazione modello di elevazione

Il poligono del modello, con i dati di elevazione del punto grezzo e le linee di discontinuità (opzionali), viene triangolato senza rispettare i criteri di qualità della mesh utilizzando il generatore di mesh "Triangle". Con il comando successivo si terranno conto dei criteri di qualità.

I punti dati con attributi di elevazione forniti come input sono collegati da una mesh triangolare. I dati di input sono quindi organizzati in una struttura geometrica ora e possono essere utilizzati come base per future interpolazioni di elevazione.

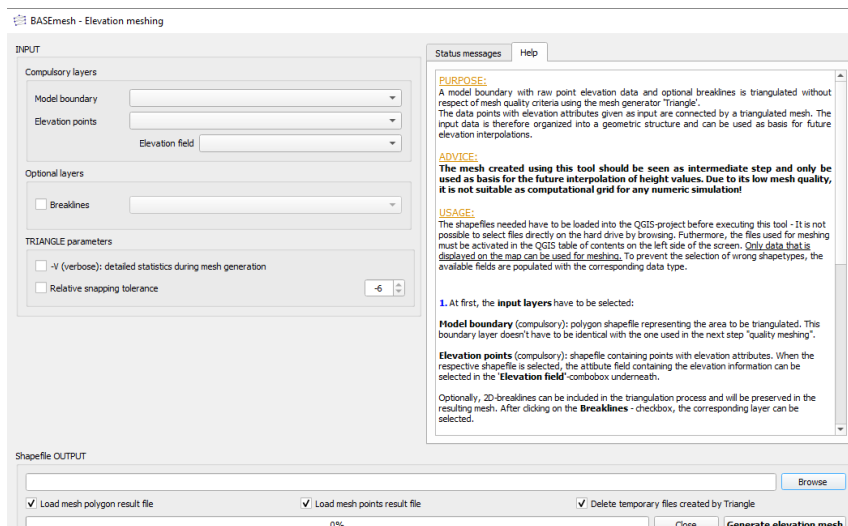


Figura 28: schermata comando Elevation Meshing.

8.1.4 Ottimizzazione numerica della mesh

L'utilizzo del comando Quality meshing permette di creare una mesh formata da nodi ed elementi dove gli elementi vengono calcolati solo sulle componenti spaziali di latitudine e longitudine senza tener conto delle quote, le quote verranno applicate in seguito ai nodi tramite il comando Interpolation.

Il comando è composto da due sezioni: Compulsory layer e Optional layer. All'interno del Compulsory layer fa parte l'input Model boundary, (layer formato poligono) il quale rappresenta il domino della mesh (area contenente tutti i punti del rilievo). Optional layer è formato da: Breaklines, o linee di break (layer formato linea) le quali impediscono al programma di generare elementi della mesh tra punti che si trovano in due regioni diverse (dato facoltativo) e Regions, (layer di tipo puntuale) i quali rappresentano il tipo di materiale per quella parte del boundary delimitata dalle breaklines.

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

Importante specificare che nel layer Regions vi sono i campi che definiscono il tipo di materiale "material index", dove nel nostro caso abbiamo il materiale presente in alveo con l'indice pari ad 1 e la zona vegetata presente alla confluenza dello Stura di Lanzo con indice pari a 2; inoltre, viene identificata anche l'area massima "maximum area" degli elementi, in base alla discretizzazione che si vuole avere in quella zona delimitata dalle breaklines.

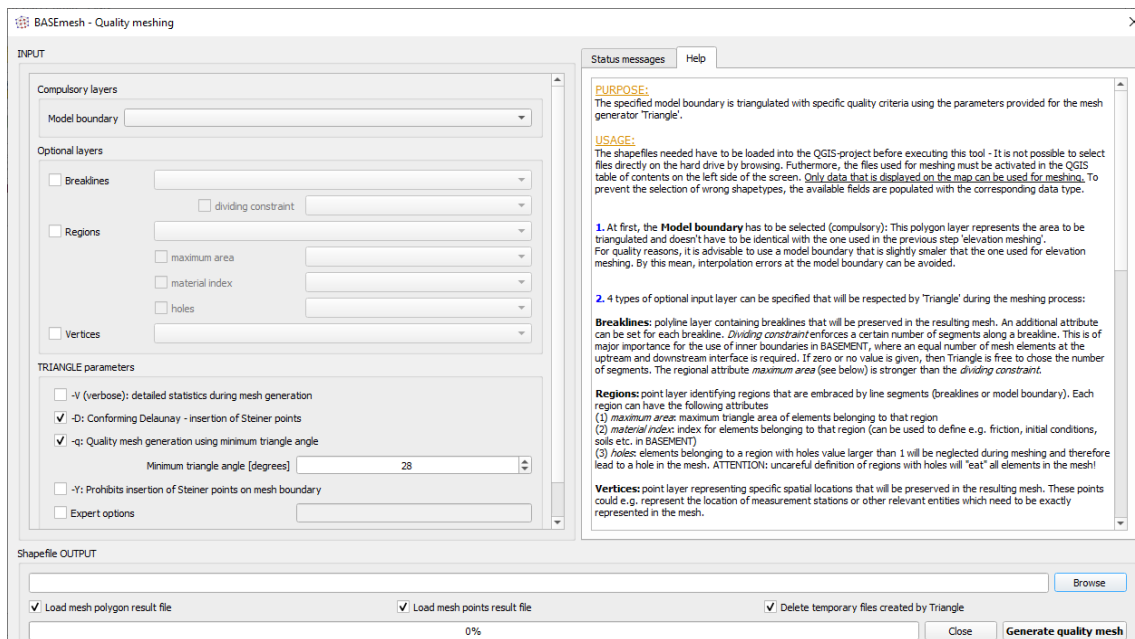


Figura 29: schermata comando Quality meshing.

8.1.5 Breaklines

Le breaklines sono linee tracciate dall'operatore per suddividere i punti misurati in regioni con omogenee caratteristiche. Le breaklines impediscono a BASEmesh di generare elementi tra punti di aree differenti, esse sono tracciate a mano, in modo soggettivo. Per ottenere le breaklines si è scelto di suddividere il rilievo in aree con la discretizzazione più o meno fitta a seconda dell'interesse della zona. Sono state individuate e tracciate tre aree di discretizzazione omogenea. Esse sono: Area 1, zona con alta discretizzazione a ridosso della traversa; Area 2, zona con media discretizzazione a monte dell'Area 1 ed infine l'Area 3 con una discretizzazione più bassa, infatti, essa è relativamente lontana dalla zona di più interesse ovvero il bacino di accumulo a monte della traversa.

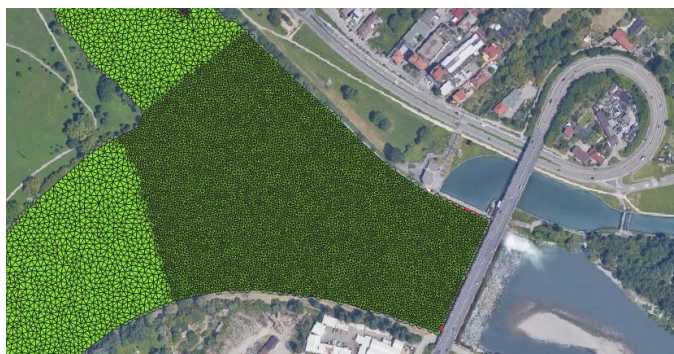


Figura 30: differenti aree di discretizzazione, Area 1.



Figura 31: differenti aree di discretizzazione, Area 2.



Figura 32: differenti aree di discretizzazione, Area 3.

Il risultato che si ottiene è una mesh formata da elementi triangolari piani e nodi con quote uguali a 0. Le quote verranno associate alla mesh nella fase successiva utilizzando i dati puntuali della batimetria.

8.1.6 Interpolazione delle quote

Il comando Interpolation associa le quote alla mesh, associando i valori dei punti misurati ai nodi della mesh. Se i nodi della mesh non coincidono con i punti misurati è prevista una interpolazione lineare tra i valori più prossimi. In questo modo le quote presenti nel layer della batimetria, creato in precedenza, sono state associate ai nodi della mesh.

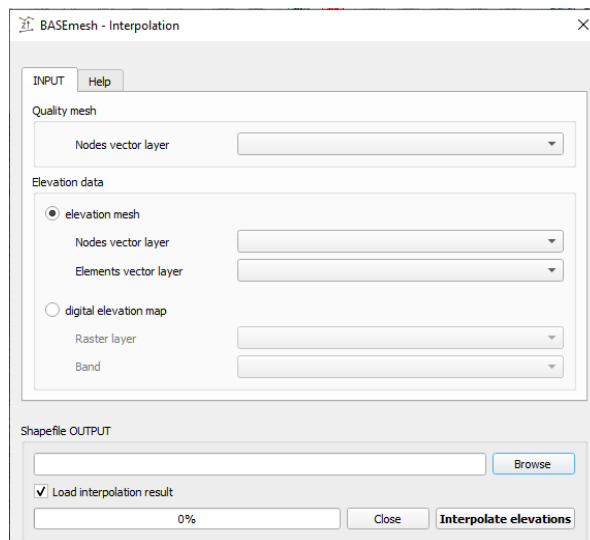


Figura 33: schermata comando Interpolation.

8.1.7 Visualizzazione 3D della Mesh

Dopo aver completato le operazioni necessarie alla realizzazione della mesh è possibile utilizzare il comando 3D view per avere una visualizzazione d'insieme della mesh e confermare che il lavoro effettuato sia coerente con i dati misurati. E' possibile visualizzare la mesh tenendo conto dei materiali (colori differenti) ed il fattore di scala sulle quote.

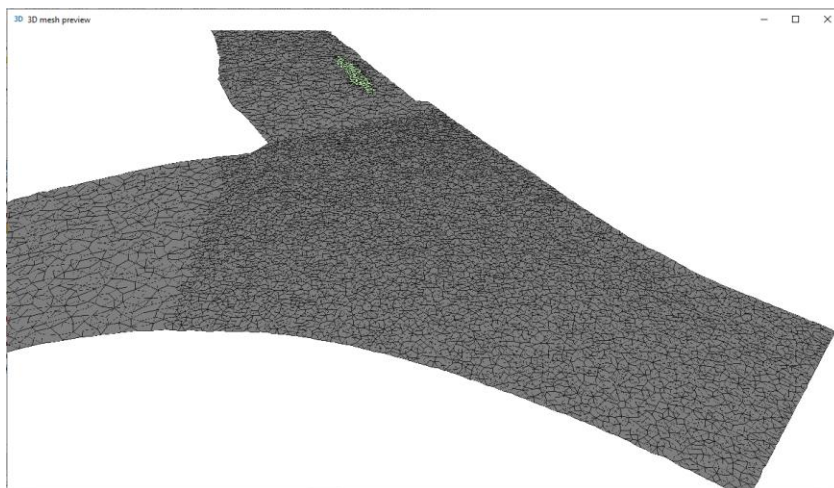


Figura 34: Visualizzazione 3D della mesh con differente colorazione in base al materiale di fondo.

In alto, all'altezza dell'immissione dello Stura di Lanzo, si nota il colore diverso del materiale ovvero dove è presente la vegetazione.

8.1.8 Esportazione Mesh

Per concludere la modellazione non resta che esportare la mesh in formato .2dm, unico formato letto da BASEMENT per effettuare l'analisi idraulica. Pertanto, con il comando Export meshing è possibile esportare la mesh all'esterno di QGIS con il formato .2dm.

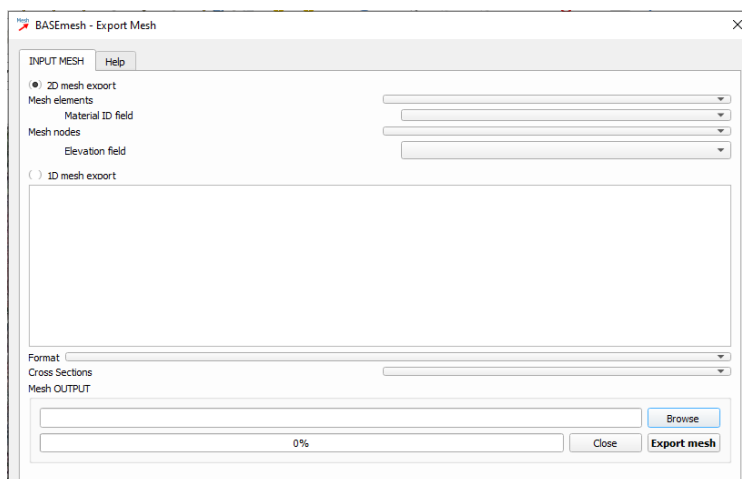


Figura 35: schermata comando Export Mesh.

8.2 CONDIZIONI AL CONTORNO

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

Per avere la soluzione delle equazioni differenziali di De Saint Venant, che descrivono le dinamiche dei fluidi, si richiede l'inserimento di un minimo di 3 condizioni al contorno. Le condizioni al contorno sono applicate alle sezioni d'ingresso, alle sezioni d'uscita e sul materiale della mesh. Nello specifico sono:

- 1 condizione sulle sezioni d'ingresso, definire la condizione di ingresso del flusso all'interno del dominio di simulazione;
- 1 condizione sulle sezioni d'uscita, definire il metodo di fuoriuscita del flusso dall'area di computazione
- i coefficienti di attrito, definizione dei coefficienti di Manning per ogni materiale identificato nella mesh.

8.2.1 Stringdef ingresso ed uscita

Le condizioni al contorno devono essere applicate a sezioni della mesh quindi alle così dette stringdef. Le due sezioni fondamentali sono la sezione d'ingresso e di uscita del dominio di computazione, ma nel nostro caso studio come detto in precedenza vi sono più sezioni di ingresso e più sezioni d'uscita. Generalmente le sezioni d'ingresso o di inflow sono le sezioni che si trovano a monte della mesh. Le sezioni d'uscita o di outflow sono le sezioni a valle della mesh. Nelle sezioni d'ingresso saranno applicati gli idrogrammi d'ingresso, uno per sezione, che riportano la portata da simulare. Nelle sezioni d'uscita saranno applicate le condizioni di fuoriuscita del flusso dall'area di computazione. Operativamente è necessario elencare i punti corrispondenti ai nodi della mesh rispetto alla sezione d'interesse all'interno di BASEMENT.

8.2.2 Idrogrammi in ingresso

Gli idrogrammi d'ingresso sono le condizioni che definiscono il volume in ingresso per ogni step di calcolo. Il volume in ingresso, viene calcolato ad ogni step temporale come la portata per il time step. Il time step verrà definito in seguito, mentre la portata per ogni sezione di ingresso è stata scelta utilizzando principalmente tre scenari Q180, Q130 e Q77 in riferimento alla curva di durata delle portate con i cambiamenti climatici secondo il caso RCP8.5. Il programma dovrà simulare il comportamento del torrente in regime stazionario, effettuando simulazioni a portata costante. Perciò sarà necessario eseguire una simulazione per ogni portata selezionata in precedenza.

Tabella 8: portate per le varie simulazioni.

FIUME	SIMULAZIONI	PORTATA (M³/S)
DORA RIPARIA	Q180	12.6
DORA RIPARIA	Q130	23.8
DORA RIPARIA	Q77	31.7
STURA DI LANZO	Q180	5.7
STURA DI LANZO	Q130	20.1
STURA DI LANZO	Q77	31.7
PO	Q180	45.8
PO	Q130	65.3
PO	Q77	76.5

L'idrogramma deve essere fornito sotto forma di file *.dat* e deve contenere il tempo totale della simulazione espressa in secondi e la portata in m³/s.

8.2.3 Definizione tipologia di uscita

Come per la definizione delle sezioni di ingresso è necessario definire anche le sezioni di uscita, si deve optare fra diverse opzioni possibili per calcolare il livello nella sezione finale.

Nel caso studio in esame si hanno ben otto stringdef in uscita da definire. Si è deciso di schematizzare l'impianto nel seguente modo:

- la presa del canale derivatore si è semplificata come gate unico (anche se presenta 16 paratoie da 3.5 m l'una);
- la traversa, essendo composta da sei paratoie metalliche a settore cilindrico, ognuna con una funzione specifica per quanto riguarda i controller, si sono mantenute separate inserendo sei gate diversi;
- l'impianto di minhydro posto in un caso in sinistra orografica e nell'altro in destra orografica, secondo le due ipotesi fornite dall'azienda.

Essendo tutte le uscite dall'area computazionale delle paratoie a settore cilindrico si è scelto di utilizzare l'opzione gate presente fra le varie tipologie già fornite da BASEMENT. Tranne per quanto riguarda la presa dell'impianto minhydro, in quanto non essendo ancora installato, si sono fatte le varie simulazioni sia come paratoie a settore cilindrico (gate che come weir.

8.2.4 Coefficiente di attrito stimato

Come già detto nel capitolo 8.1.5 si è scelto di suddividere l'area computazionale in due zone, dal punto di vista del materiale grazie all'attributo MATID. Quest'ultimo viene assegnato ad ogni elemento della mesh, in particolare l'indice pari ad 1 corrisponde all'alveo e l'indice pari a 2 alla zona vegetata presente nel tratto dello Stura di Lanzo. Non vi sono altre zone vegetate, in quanto il tratto analizzato del Po non presenta golene o strutture simili che permettono quindi la crescita di vegetazione.

Nello specifico, per quanto riguarda il materiale corrispondente all'alveo si è scelto di utilizzare un valore di scabrezza pari a 0.025 s/m^{1/3} come coefficiente di Manning. Questo valore è stato calcolato come media di diversi valori trovati in letteratura e progetti riferiti all'alveo del Po nei pressi della zona in esame. Per la zona

vegetata invece si è scelto un valore di scabrezza secondo il coefficiente di Manning pari a 0.1 in quanto l'area presenta un'alta vegetazione.

8.2.5 Morfologia: bed material, bedload, suspended load

La morfologia non è una condizione necessaria per la risoluzione per quanto riguarda la modellazione idraulica stretta, ovvero la definizione dei livelli idrici nei vari punti dell'area computazionale, ma è necessaria come condizione al contorno in quanto a noi interessa anche il trasporto solido, nello specifico il deposito e l'erosione del materiale presente a monte della traversa.

Per quanto riguarda BASEMENT si deve definire:

- il materiale di fondo (bed material) per il Po, la Dora Riparia e lo Stura di Lanzo nei tratti interessati dall'area di calcolo, ed inoltre la zona vegetata e la parte di solidi sospesi che ci si aspetta, si definiscono quindi le varie mixture (frazione in volume) per ognuno di essi partendo da una grain class unica per tutti.
- Il carico di fondo (bed load), cioè si definisce in che modo il materiale si comporta nelle varie sezioni in uscita ed in entrata dall'area computazionale, nello specifico per tutte le sezioni di ingresso si è scelto di utilizzare l'opzione di capacità di trasporto in base alla corrente in entrata appunto, invece per le sezioni in uscita l'unica opzione disponibile è la IODown. Inoltre, per il calcolo del trasporto all'interno dell'area computazionale si è utilizzata la formula di Meyer-Peter and Mueller estesa per le classi con multi-grani.
- Per quanto riguarda i solidi sospesi invece, si definiscono i parametri generali come il tipo di schema numerico da utilizzarsi per la computazione dei flussi convettivi (uwpind), se c'è o meno diffusione (off) e se c'è o meno uno scambio di sedimenti fra l'alveo e i solidi sospesi quindi erosione o deposito (on); anche qui inoltre, per ogni sezioni in ingresso si sceglie la tipologia (si è scelto di utilizzare suspension_discharge secondo un file di testo con le concentrazioni nel tempo) lo stesso per le sezioni in uscita (out_down).

8.3 DEFINIZIONE DELLA CONDIZIONE INIZIALE

Per poter risolvere un sistema di equazioni differenziali, oltre alle condizioni al contorno, è necessario fornire una condizione iniziale. La condizione iniziale può essere vista dal programma come la soluzione al tempo zero, se non si ha nessun dato al riguardo si può impostare la tipologia dry. Nel nostro caso si è scelto di impostare la tipologia continue, ovvero si è fatta partire la simulazione da un file di restart creato in precedenza con una simulazione base, più semplice senza la presenza della traversa, in questo modo si ha un tempo di calcolo minore.

8.4 DEFINIZIONE TIME STEP SIMULAZIONE

BASEMENT richiede come parametro fondamentale, per quanto riguarda il time step, la definizione del numero di Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), quest'ultimo definisce il rapporto fra la risoluzione spaziale ed il time step.

$$CFL = \frac{c + \sqrt{u^2 + v^2}}{L} \Delta t \leq 1$$

Dove u , v e c sono le velocità della corrente nell'elemento con $c = \sqrt{gh}$. Il numero CFL viene poi definito iterativamente dal programma utilizzando i valori delle velocità calcolate allo step precedente.

Diminuendo progressivamente il numero CFL sotto l'unità si ottiene un time step più basso ed una migliore stabilità nella simulazione ma anche un maggior tempo di computazione.

8.5 DEFINIZIONE OUTPUT

Il software BASEMENT permette anche di definire i risultati che si vogliono studiare a fine simulazione. In base alla tipologia di output che si desidera, rispetto ai nodi della mesh, allo storico degli elementi della mesh o delle sezioni in ingresso ed uscita.

In questo modo il programma calcola solo i parametri che servono agli output che si desiderano, in modo da avere una maggior velocità computazionale. Nel nostro caso si sono estratti:

- Element history: per l'elemento 1651 nello specifico la wse;
- Node centered: esportati in formato *.sms* in modo da poterli visualizzare su QGIS, le velocità, le profondità, l'elevazione della superficie idrica (WSE), gli sforzi tangenziali (τ), le concentrazioni, il deposito dei solidi sospesi totali, la differenza di quota (Δz), il bedload a 0.05 mm;
- Boundary history: su tutte le sezioni si monitora la portata.

8.6 CONTROLLER

I controller sono necessari in quanto a monte della traversa si deve mantenere il livello di normale ritenuta ed inoltre si deriva un massimo di 120 m³/s. Per quanto riguarda l'impianto considerato si deve mantenere il livello a 209.8 m s.l.m.

Per fare questo si necessita l'utilizzo dei controller, sia per le paratoie metalliche a settore cilindrico che compongono la traversa e sia per la presa di derivazione. Il sistema di supervisione dell'impianto opera con un'azione di pausa-lavoro sulle paratoie piane (su tutte e 16 in parallelo) per mantenere il livello del bacino tra le quote 209.76 e 209.78 m s.l.m. ed addurre alla centrale la maggior quantità d'acqua turbinabile.

Se le paratoie piane della derivazione raggiungono la completa apertura (ovvero si deriva 120 m³/s) e/o il livello del bacino raggiunge comunque la quota di 209.82 m s.l.m., intervengono le paratoie a settore secondo una legge PID con la seguente sequenza:

- PS1 a 1.00 m;
- PS5 e Ps6 a 1.00 m;
- PS2, Ps3 e PS4 a 1.00 m;
- PS5 e PS6 a 3.00 m;
- PS2, PS3 e PS4 a 3.00 m;
- PS2, PS3, PS4, PS5 e PS6 a 6.00 m.

Il controllo Proporzionale-Integrale-Derivativo, spesso abbreviato come PID, è un sistema in retroazione negativa ampiamente impiegato nei sistemi di controllo. Grazie a un input che determina il valore attuale, è in grado di reagire a un eventuale errore positivo o negativo tendendo verso il valore 0. La reazione all'errore può essere regolata e ciò rende questo sistema molto versatile. Il PID regola l'uscita in base a:

- il valore del segnale di errore (azione proporzionale);
- i valori passati del segnale di errore (azione integrale);
- quanto velocemente il segnale di errore varia (azione derivativa).

Le tre azioni di un PID vengono calcolate separatamente e semplicemente sommate algebricamente:

$$\mu(t) = \mu_p(t) + \mu_i(t) + \mu_d(t)$$

L'azione proporzionale è ottenuta moltiplicando il segnale d'errore "e" con un'opportuna costante:

$$\mu_p(t) = K_p e(t)$$

L'azione integrale è proporzionale all'integrale nel tempo del segnale di errore "e", moltiplicato per la costante:

$$\mu_I(t) = K_I \int_0^y e(t') dt'$$

Questa definizione dell'azione integrale fa sì che il controllore abbia memoria dei valori passati del segnale d'errore; in particolare, il valore dell'azione integrale non è necessariamente nullo se è nullo il segnale d'errore. Questa proprietà dà al PID la capacità di portare il processo esattamente al punto di riferimento richiesto, dove la sola azione proporzionale risulterebbe nulla.

Per migliorare le prestazioni del controllore si può aggiungere l'azione derivativa:

$$\mu_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt}$$

L'idea è compensare rapidamente le variazioni del segnale di errore: se vediamo che "e" sta aumentando, l'azione derivativa cerca di compensare questa deviazione in ragione della sua velocità di cambiamento, senza aspettare che l'errore diventi significativo (azione proporzionale) o che persista per un certo tempo (azione integrale).

BASEMENT permette di implementare i controller PID, nello specifico si definiscono variabili monitorate e quelle manipolate. Per quelle monitorate si può scegliere fra la portata o il livello di ritenuta a seconda del caso, per quanto riguarda la PS1, PS5 e PS6 si sceglie di monitorare il livello invece, per quanto riguarda la presa di derivazione, si monitora la portata.

Per le variabili manipolate nel nostro caso si intende l'altezza di apertura delle paratoie, nella seguente tabella si riassumono i valori a seconda delle paratoie.

Tabella 9: variabili manipolate dei controller utilizzate sul codice di BASEMENT.

PARATOIA	START VALUE	RANGE	MAX CHANGE RATE	VARIABILE MANIPOLATA	VARIABILE MONITORATA
PS1	209.0	208 - 210	0.01	Apertura sghiaiatore	WSE 209.8 m s.l.m.
PS5	206	206	0.01	Apertura PS5	WSE 209.82 m s.l.m.
PS6	206	206	0.01	Apertura PS6	WSE 209.82 m s.l.m.
PRESA	206.118	206 - 206.5	0.001	Apertura presa	Q 119 m ³ /s

9 RISULTATI

Nei capitoli successivi si riportano i risultati ottenuti dalle varie simulazioni, non prima di aver dettagliato i vari scenari analizzati ed i controlli effettuati.

9.1 SCENARI ANALIZZATI

L'azienda Iren S.p.A attualmente è in fase di progettazione preliminare per quanto riguarda l'installazione di un impianto minihydro. In questa fase ancora iniziale del progetto si hanno due possibili configurazioni, la prima risulta quella di installare la presa della turbina in sinistra orografica fra il canale di derivazione e la traversa stessa. Questa ipotesi risulta la più accreditata in quanto si ridurrebbero di molto i costi riguardanti il cantiere, infatti la zona risulta di proprietà dell'azienda ed inoltre la viabilità sarebbe molto più semplice essendo vicino all'impianto già in essere. Si dovrà tenere conto, comunque, dei servizi e sottoservizi esistenti.

La seconda possibile configurazione vede l'installazione della minihydro in destra orografica, questa ipotesi risulta più difficoltosa e dispendiosa in quanto si dovrà impegnare una parte della viabilità esterna all'area di pertinenza dell'impianto esistente (Strada del Meisino). In questo modo si dovrà creare una nuova luce al di sotto del rilevato stradale per permettere il transito alla viabilità pubblica, in quanto il nuovo impianto occuperebbe l'attuale ultima luce. Per questi motivi questa configurazione, in prima battuta, sembrerebbe essere la meno accreditata.



Figura 36: possibili configurazioni di installazione minihydro.

Oltre alla posizione dell'impianto di minihydro, si è scelto di ipotizzare anche il tipo di ingresso del flusso ovvero se utilizzare uno stramazzo (weir) o una paratoia a settore cilindrico (gate). In questo modo si hanno quattro possibili configurazioni.

Si riassumono nella seguente tabella i vari scenari modellati, in totale sono 12 in quanto vi sono anche le corrispondenti 3 portate della CDP.

Tabella 10: scenari modellizzati con il software BASEMENT.

PORTATA	TIPO	POSIZIONE
Q180	WEIR	SX
	WEIR	DX
	GATE	SX
	GATE	DX
Q130	WEIR	SX
	WEIR	DX
	GATE	SX
	GATE	DX
Q77	WEIR	SX
	WEIR	DX
	GATE	SX
	GATE	DX

9.2 OUTPUT CALCOLATI E CONTROLLI

Per ogni simulazione, idraulica e morfologica, si sono prodotti diversi output a seconda appunto dello scopo della simulazione.

Per quanto riguarda le simulazioni idrauliche si sono prodotti come output ad ogni step temporale prestabilito e per l'intera area computazionale:

- l'altezza in metri s.l.m. del pelo libero (WSE secondo la definizione di BASEMENT);
- la profondità;
- le velocità orizzontali.

Per le simulazioni morfologiche invece ci si è concentrati maggiormente sui seguenti output, sempre al variare nel tempo e per tutta l'area di calcolo:

- gli sforzi tangenziali (tau secondo la definizione BASEMENT);

- la concentrazione di sedimenti presenti nella corrente (concentrations);
- i solidi sospesi totali depositati (suspended total deposition);
- la variazione di quota (delta_z).

Ogni risultato è stato caricato su QGIS tramite il plug-in Crayfish che permette di visualizzare il formato .sol ad ogni step temporale.

Per verificare i risultati non si è svolta una vera e propria calibrazione, si è scelto di utilizzare i dati di output e confrontarli con dati certi che valessero per tutte le simulazioni. In particolare, si è verificato che l'altitudine del pelo libero non superi mai la quota di 209,8 m s.l.m. in quanto questa risulta la quota di ritenuta obbligatoria. Inoltre, si è verificato che non avvenissero variazioni fisicamente non basate ad esempio dei cumuli di materiale in posizioni nelle quali non ci si aspettava tale fenomeno ed infine si sono controllate le strutture mobili in modo tale che queste ultime lavorassero in maniera corretta senza variazioni repentine o altro.

9.3 RISULTATI COMPARATIVI SIMULAZIONE IDRAULICA

9.3.1 Gate in sinistra orografica

Di seguito si riportano i vari risultati per quanto riguarda la portata a Q180 con gate posto in sx orografica, per brevità e chiarezza successivamente si riporteranno parallelamente tutti e quattro i casi simulati con questa portata in modo da poterli comparare più facilmente.

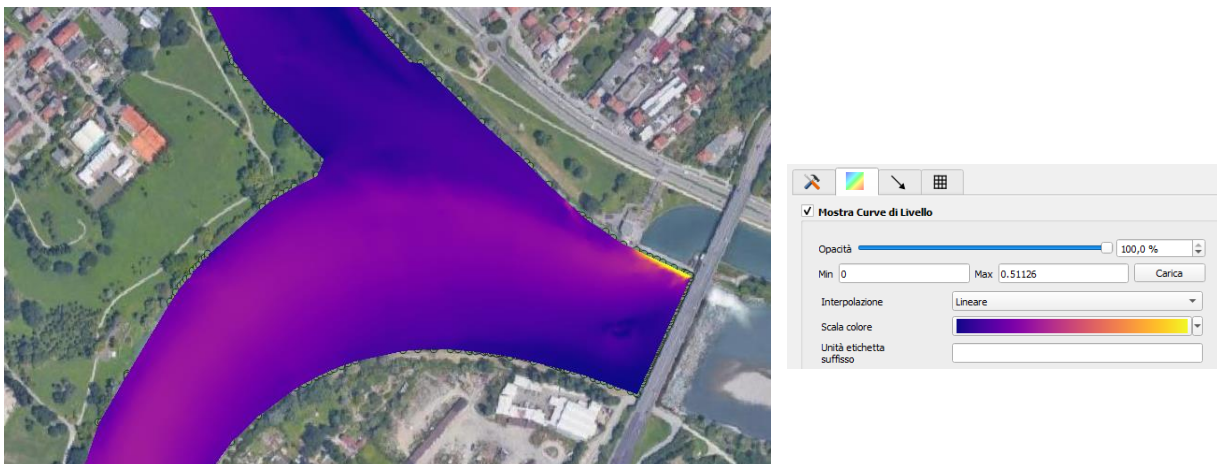


Figura 37: velocità corrente, caso con gate in sinistra orografica e simulazione Q180.

Sulla sponda opposta alla presa si hanno velocità tendenti allo zero avendo posto sia gate che canale di derivazione in sx orografica.

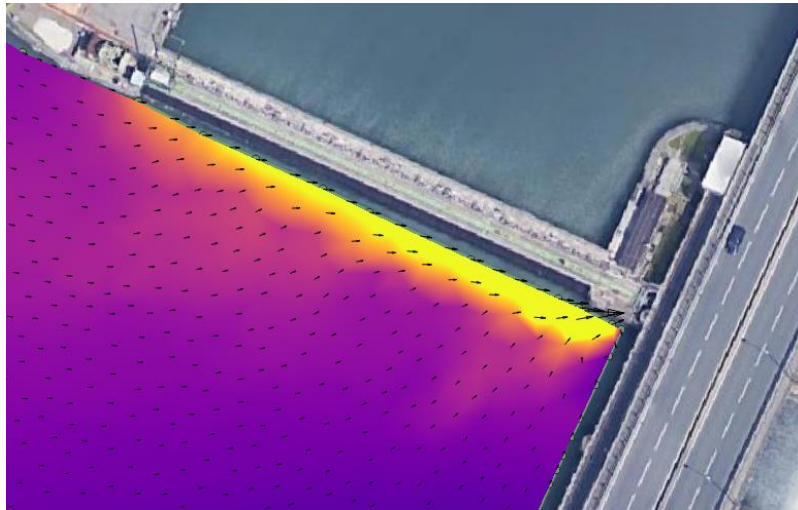


Figura 38: particolare delle velocità a ridosso della presa di derivazione.

Con questa configurazione, ovvero con il gate posto a seguire della presa di derivazione, si hanno velocità dello stesso ordine di grandezza su tutta la sezione come si nota dalla Figura 39.

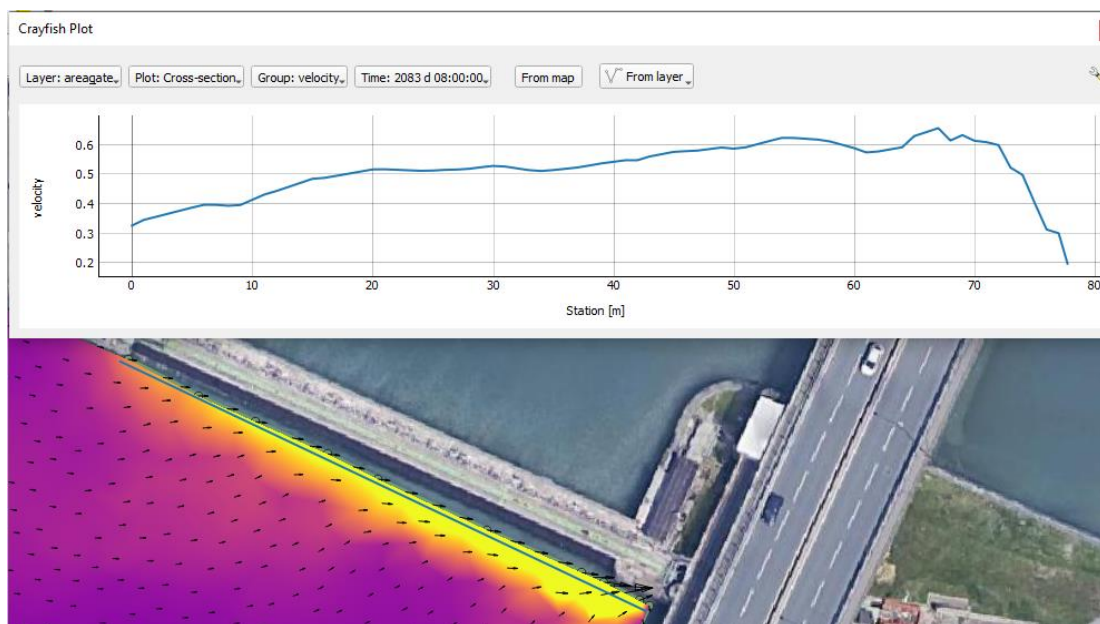


Figura 39: andamento delle velocità lungo la presa di derivazione ed il gate dell'impianto minihydro.

9.3.2 Simulazione idraulica Q180

Si riportano di seguito i vari risultati ottenuti con la portata corrispondente alla Q180 della CDP. Si è mantenuta, per chiarezza visiva, la stessa scala di colori.

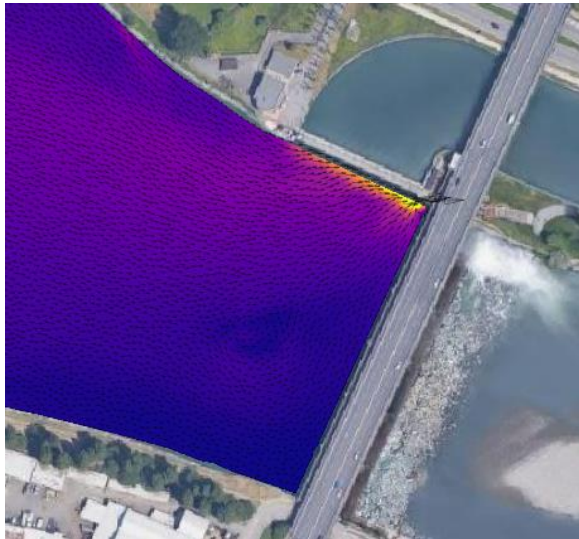
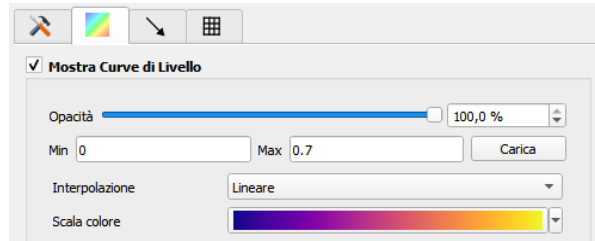


Figura 40: velocità simulazione Q180 gate sx.

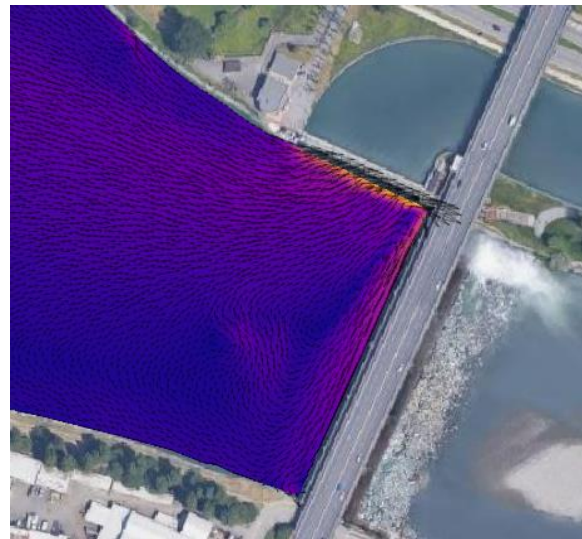


Figura 41: velocità simulazione Q180 gate dx.

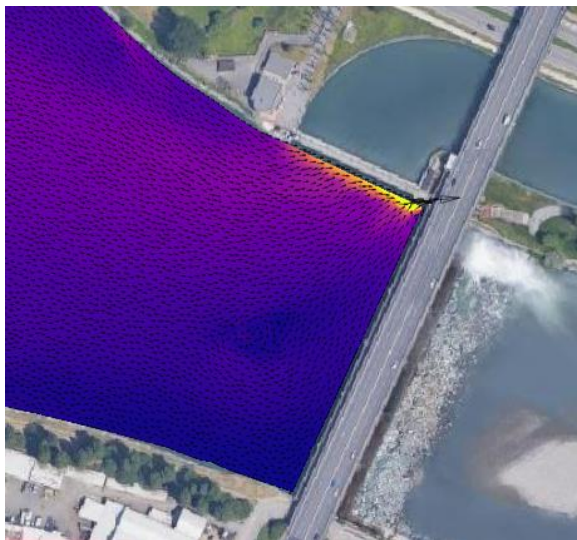


Figura 42: velocità simulazione Q180 gate sx.

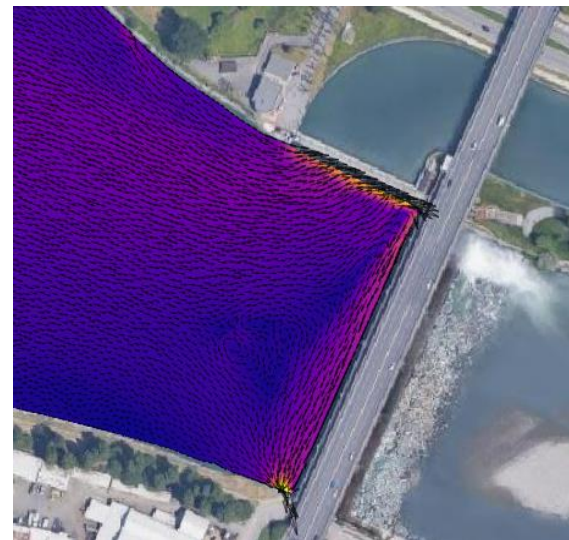


Figura 43: velocità simulazione Q180 weir dx.

Confrontando i casi in cui si ha il gate uno in sponda sinistra e l'altro in destra si nota come nel primo caso le velocità maggiori risultino a ridosso della presa di derivazione e proseguono nell'area del gate, invece nel secondo caso si hanno velocità alte sia a ridosso della presa di derivazione ma anche a monte della traversa all'altezza della PS1 per poi diminuire lungo la traversa stessa fino al gate in destra orografica. Nel caso di gate in sinistra, inoltre si crea una zona con basse velocità a ridosso della sponda in destra orografica con un vortice quasi al centro dell'alveo.

A livello idraulico, dal punto di vista delle velocità non varia se si installa un gate o un weir.

La scala delle velocità presenta come valore massimo 0.7 m/s, questo valore è un limite secondo i risultati ottenuti dalla collega Francesca Alpe (27), infatti se le velocità superano i 0.6 m/s nell'intorno del gate/weir si ha che le specie ittiche possono rimanere schiacciate dalla corrente contro le griglie della presa dell'impianto di minihydro ed inoltre. Esse sono presenti per evitare che questi ultimi vadano all'interno del condotto della minihydro e subire danni irreparabili o addirittura la morte.

9.3.3 Simulazione idraulica Q130

Si riportano di seguito i vari risultati ottenuti con la portata corrispondente alla Q130 della CDP.

La scala di rappresentazione è la medesima della simulazione precedente.

Con queste portate si nota come nel caso di weir o gate in destra orografica le velocità a ridosso delle paratoie aumentino su tutta l'intera sezione dell'alveo.

In generale, all'aumentare delle portate si ha un aumento delle zone ad elevata velocità. Infatti, le zone avente una velocità bassa cioè quelle tendenti al blu diminuiscono in favore di quelle viola o gialle.

Inoltre, se si installa l'impianto di minihydro in destra orografica con portate di questo ordine di grandezza si formano due vortici molto vicini ma con basse velocità all'altezza delle PS4 e PS5.

Questi vortici si formano perchè il flusso idrico viene prima attirato dal canale derivatore e poi la parte che non viene derivata prosegue lungo le paratoie della traversa fino ad arrivare in destra orografica e qui di nuovo in parte si turbina grazie alla minihydro ed in parte viene attirata dal flusso iniziale al centro alveo e torna al canale derivatore.

Questo vortice di grandi dimensioni si presenta anche nel caso di weir/gate in sinistra orografica ovviamente con intensità minori.

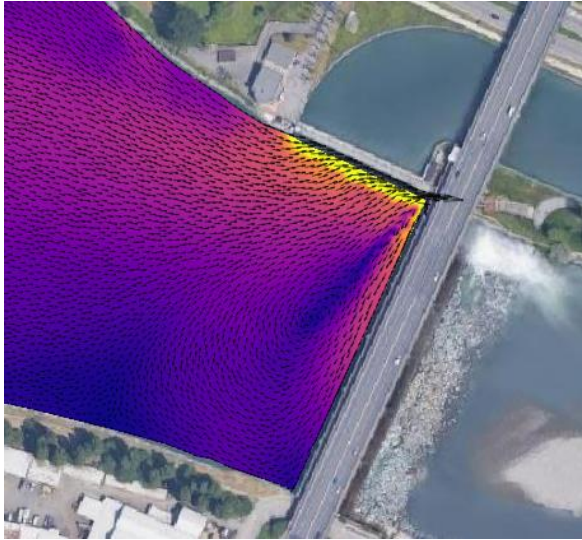
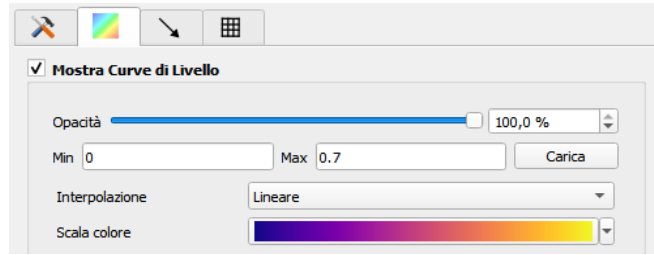


Figura 44: velocità simulazione Q130 gate sx.

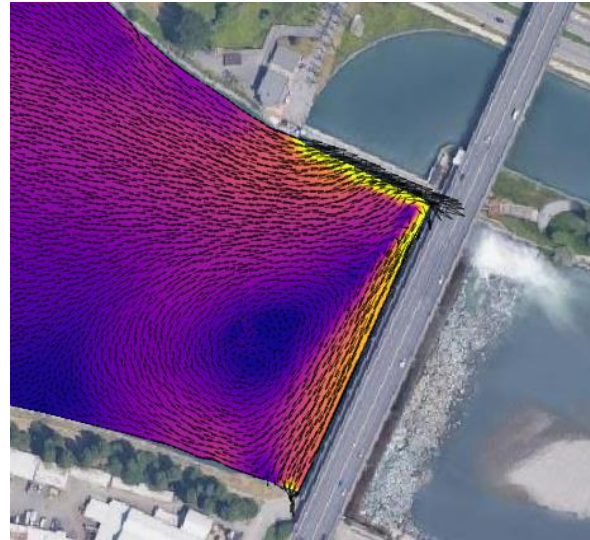


Figura 45: velocità simulazione Q130 gate dx.

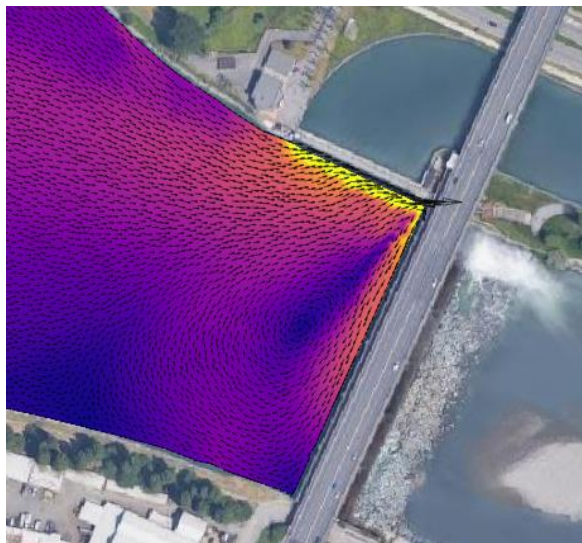


Figura 46: velocità simulazione Q130 weir sx.

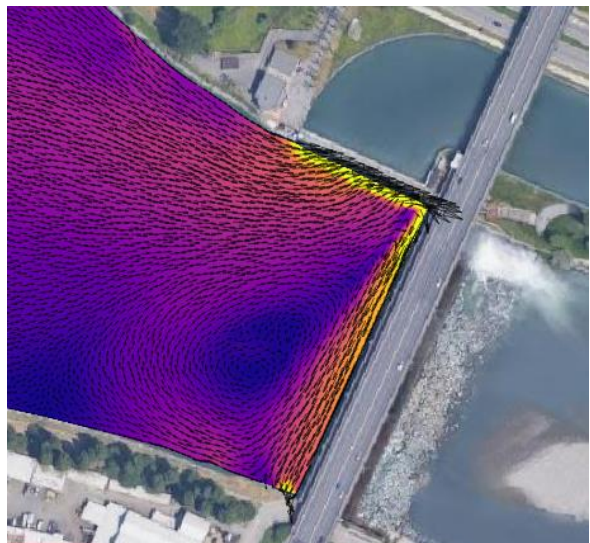


Figura 47: velocità simulazione Q130 weir dx

9.3.4 Simulazione idraulica Q77

Si riportano di seguito i vari risultati ottenuti con la portata corrispondente alla Q77 della CDP.

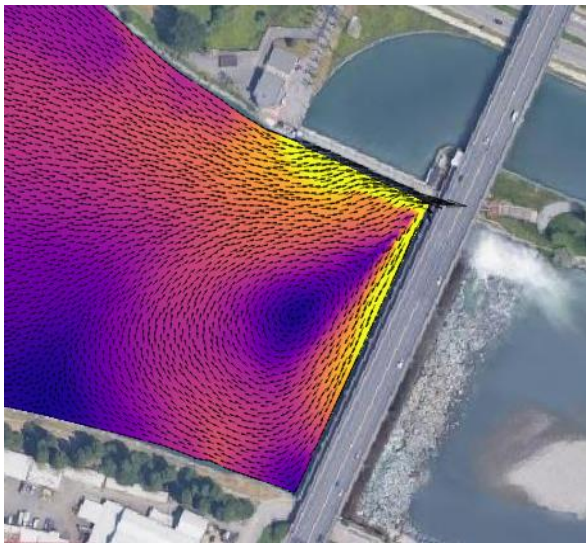
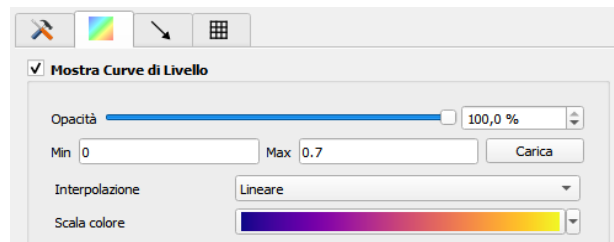


Figura 48: velocità simulazione Q77 gate sx.

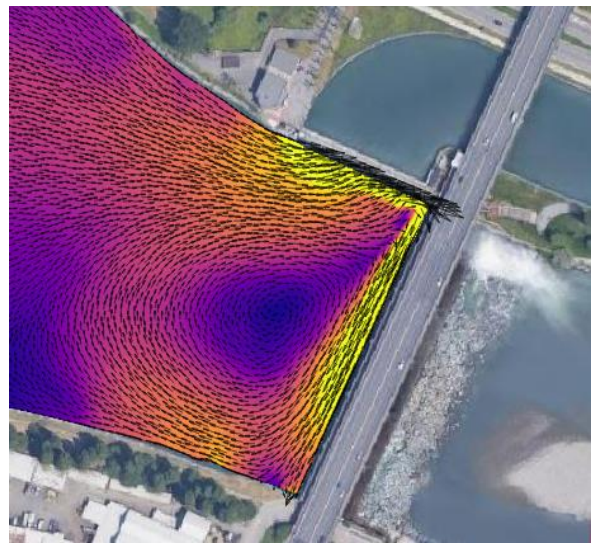


Figura 49: velocità simulazione Q77 gate dx.

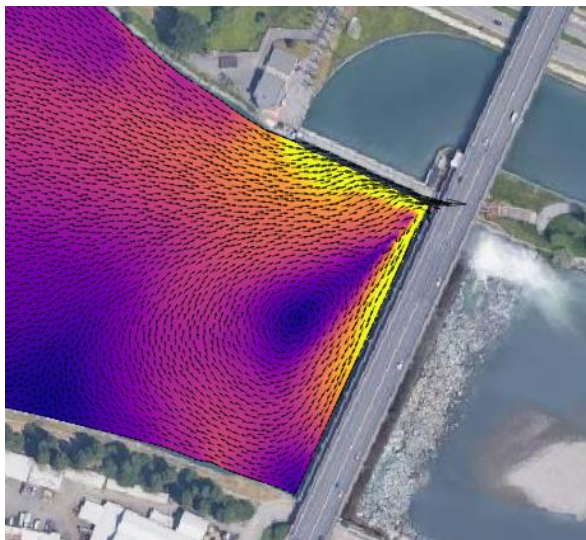


Figura 50: velocità simulazione Q77 weir sx.

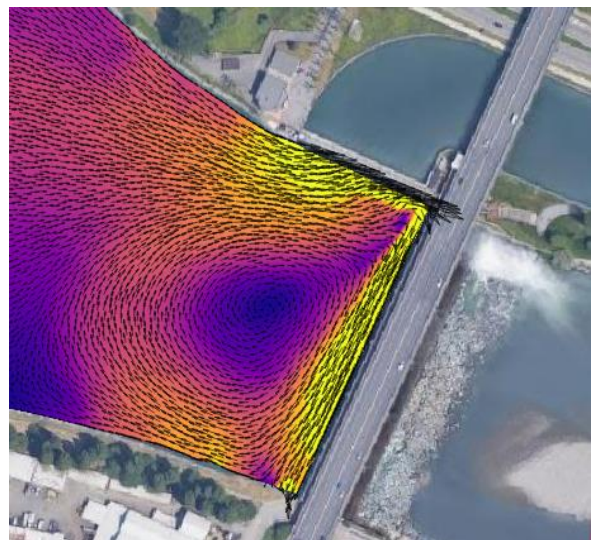


Figura 51: velocità simulazione Q77 weir dx.

Le portate utilizzate per la Q77 fanno sì che si arrivi al limite della derivazione concessa di $120 \text{ m}^3/\text{s}$.

Per portate maggiori si dovrà attivare il sistema di paratoie della traversa secondo quanto riportato al paragrafo relativo alla dinamica di apertura delle paratoie (8.6 CONTROLLER).

9.4 RISULTATI COMPARATIVI SIMULAZIONE MORFOLOGICA

Per quanto riguarda i sedimenti si è partiti dal codice idraulico, utilizzato appunto per simulare la parte di idraulica nel capitolo precedente, implementandolo con la parte morfologica analizzata nel paragrafo 8.2.5 Morfologia: bed material, bedload, suspended load.

Si analizzano, per ogni portata, vari risultati della modellazione morfologica:

- gli sforzi tangenziali (τ);
- le concentrazioni;
- il deposito dei solidi sospesi totali;
- la variazione di quota (Δz);
- tasso di ritiro totale dei solidi sospesi (susp_totale_pickup);
- il materiale di fondo con diametro 0.05 mm (bedload a 0.05 mm);

9.4.1 Simulazione morfologica Q180

Si riportano di seguito i vari risultati ottenuti con la portata corrispondente alla Q180 della CDP.

Analizzando gli sforzi tangenziali, si nota che vi è una correlazione positiva tra questi ultimi e le velocità. Infatti, dove si hanno sforzi tangenziali elevati si hanno anche velocità elevate.

Gli sforzi tangenziali ci forniscono un'indicazione di massima delle zone dove si ha maggiore erosione, infatti secondo la teoria di Shields il trasporto di fondo ha inizio quando τ oltrepassa lo sforzo resistente limite, τ_c , che dipende in larga misura dalle dimensioni dei grani posti sul fondo (oltre che dal campo di velocità, viscosità fluido, densità dei sedimenti e del fluido).

Di conseguenza nelle zone dove gli sforzi sono più elevati, nel nostro caso tendenti a 0.2 Pa, si avrà maggiore probabilità di erosione mentre dove gli sforzi tangenziali sono più bassi si avrà il fenomeno di deposizione.

Nei casi con installazione dell'impianto in sinistra idrografica si hanno gli sforzi tangenziali elevati in prossimità dell'impianto stesso e della presa di derivazione. Nel caso opposto invece, gli sforzi tangenziali aumentano anche a ridosso della traversa soprattutto nel caso in cui l'impianto è costituito da gate.

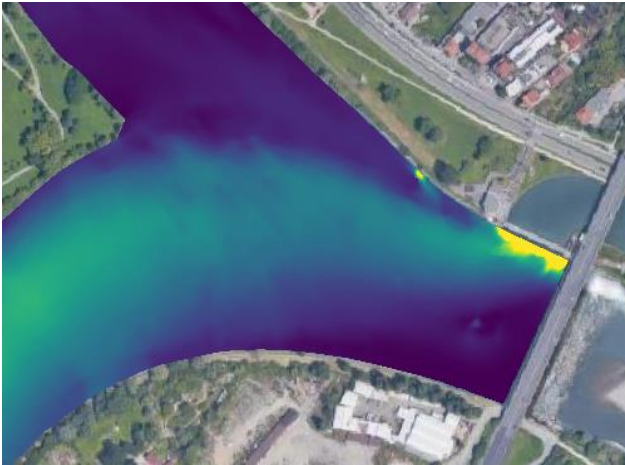
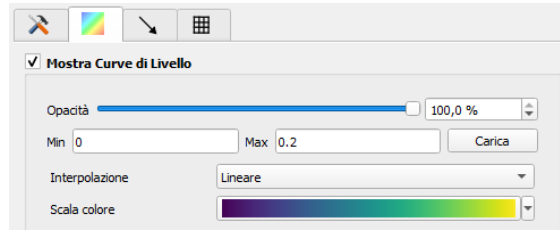


Figura 52: sforzi di taglio simulazione morfologica Q180 gate sx.

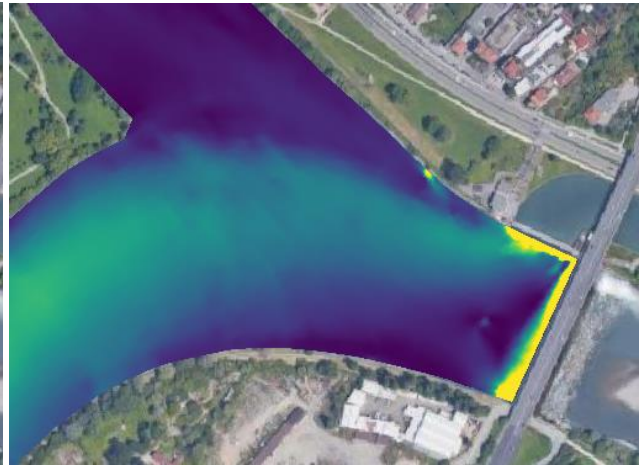


Figura 53: sforzi di taglio simulazione morfologica Q180 gate dx.



Figura 54: sforzi di taglio simulazione morfologica Q180 weir sx.

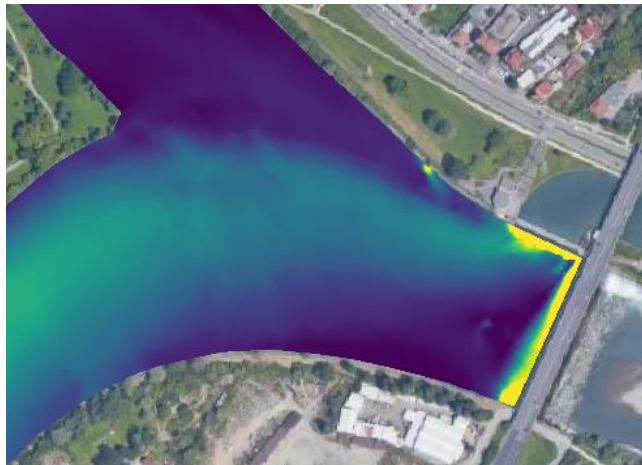


Figura 55: sforzi di taglio simulazione morfologica Q180 weir dx.

Dal punto di vista della concentrazione si ottiene a fine simulazione, ovvero dopo 5×10^4 secondi, i seguenti risultati. Dove vi sono le parti in blu si ha deposito, invece dove si nota il giallo si ha il materiale in sospensione che si muovono con la corrente.

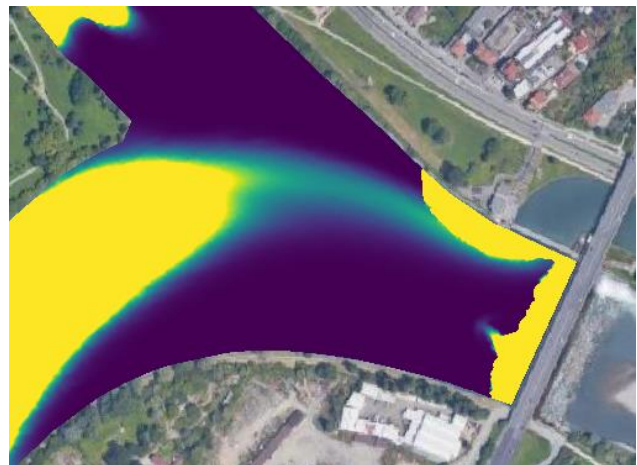
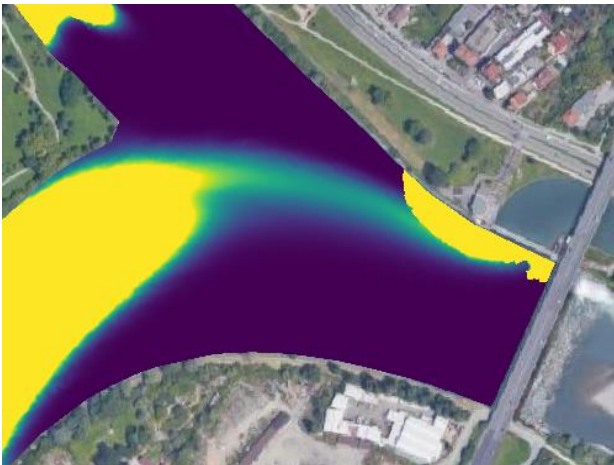
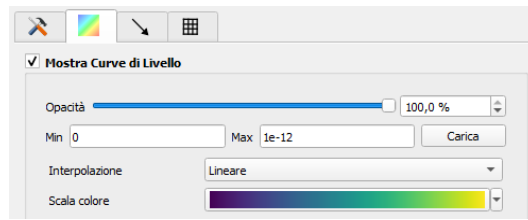


Figura 56: concentrazioni simulazione morfologica Q180 gate sx. Figura 57: concentrazioni simulazione morfologica Q180 gate dx.

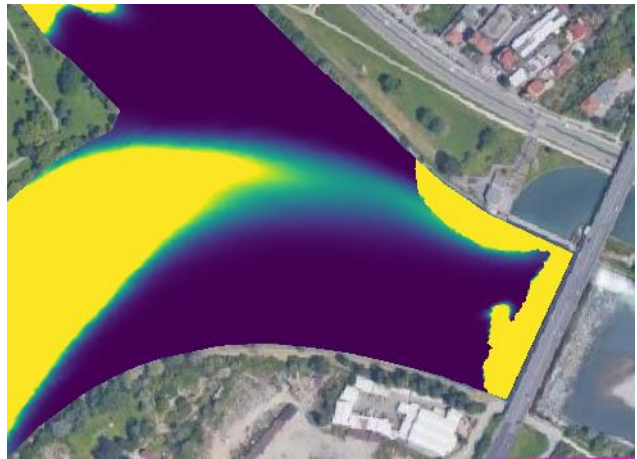
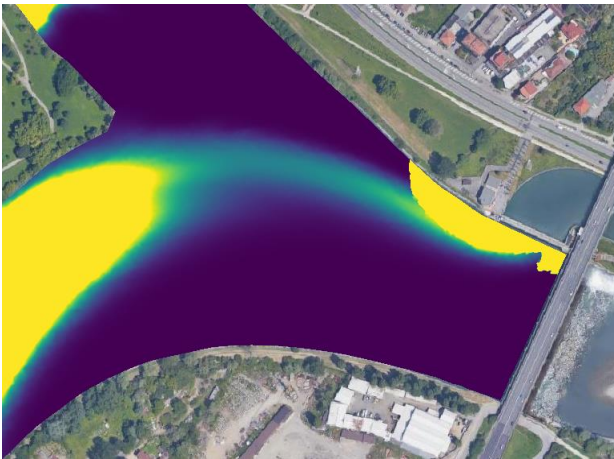


Figura 58: concentrazioni simulazione morfologica Q180 weir dx. Figura 59: concentrazioni simulazione morfologica Q180 weir sx.

Proseguendo si analizza la deposizione dei solidi totali sospesi misurati in m/s, a fine simulazione si ottiene un risultato complementare rispetto alle concentrazioni appena viste, ovvero dove si ha la deposizione più lenta si ha in maniera analoga una bassa concentrazione.

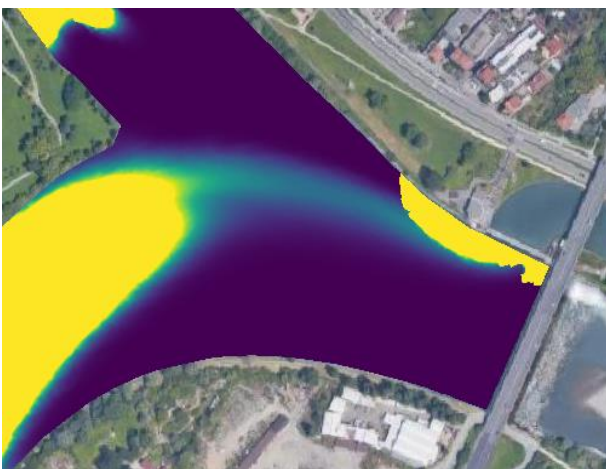
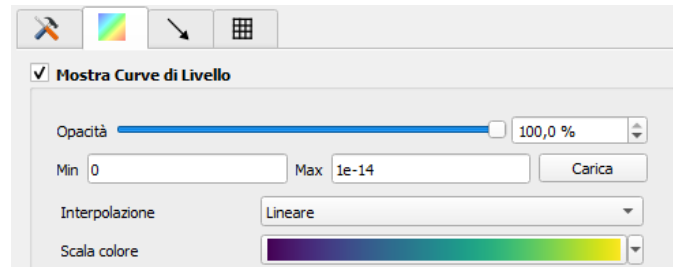


Figura 60: deposizione solidi sospesi totali Q180 gate sx.

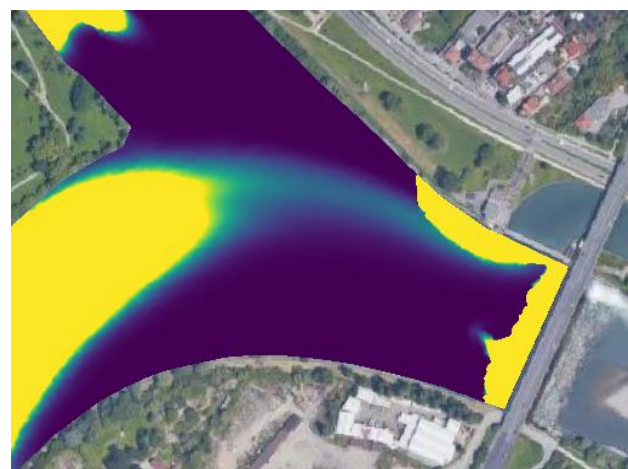


Figura 61: deposizione solidi sospesi totali Q180 gate dx.

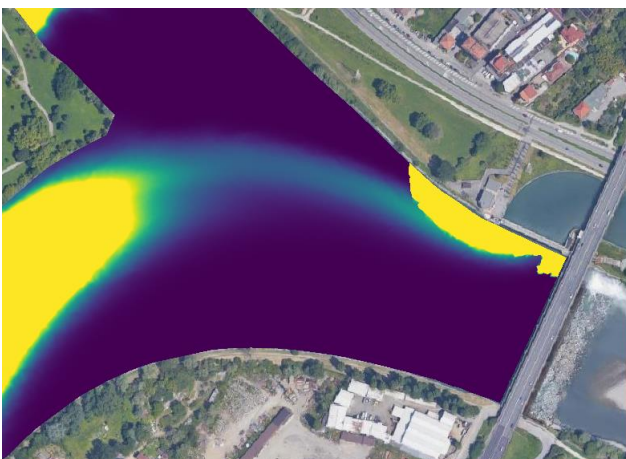


Figura 62: deposizione solidi sospesi totali Q180 weir sx.

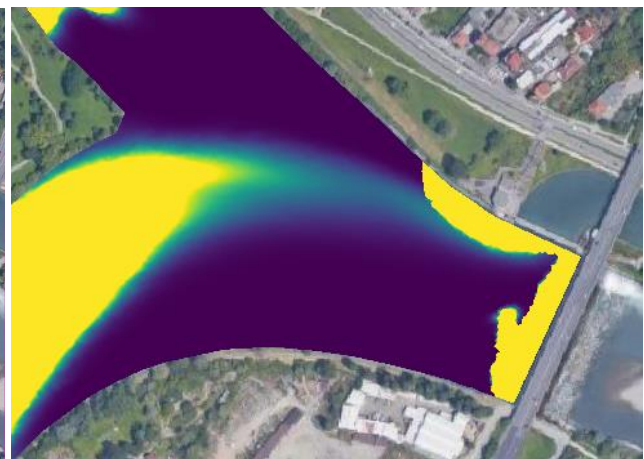


Figura 63: deposizione solidi sospesi totali Q180 weir dx.

Vi è inoltre, la possibilità attraverso BASEMENT, di calcolare la differenza di quota espressa in metri. Essendo una differenza essa può presentarsi sia con valori positivi che negativi, cioè si può avere il fenomeno di deposizione o quello di erosione. Si nota come il deposito avviene principalmente dove si ha la corrente con velocità più elevate.

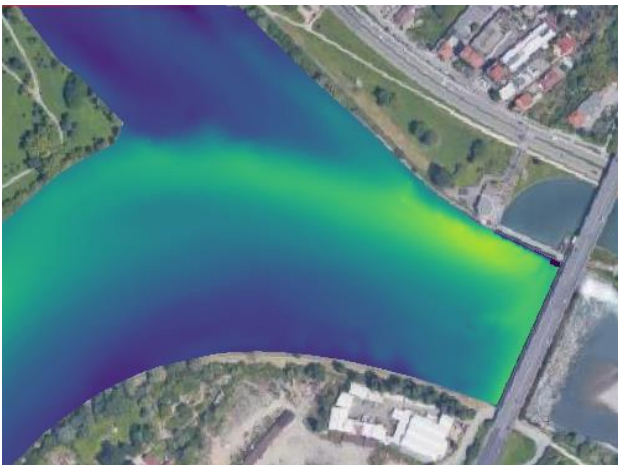
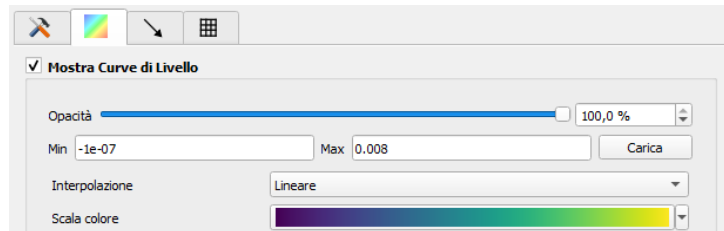


Figura 64: variazione di quota simulazione Q180 gate sx.

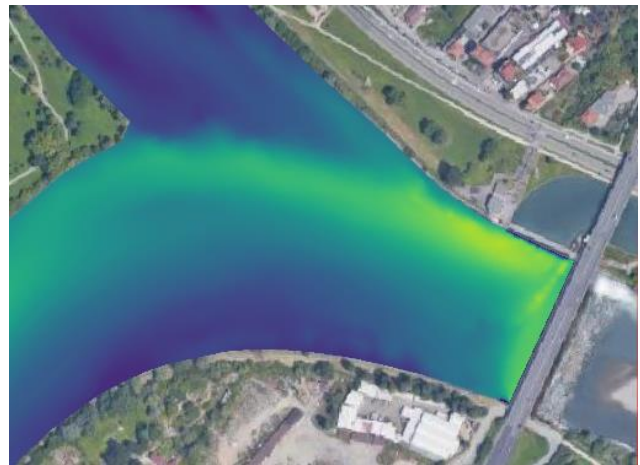


Figura 65: variazione di quota simulazione Q180 gate dx.

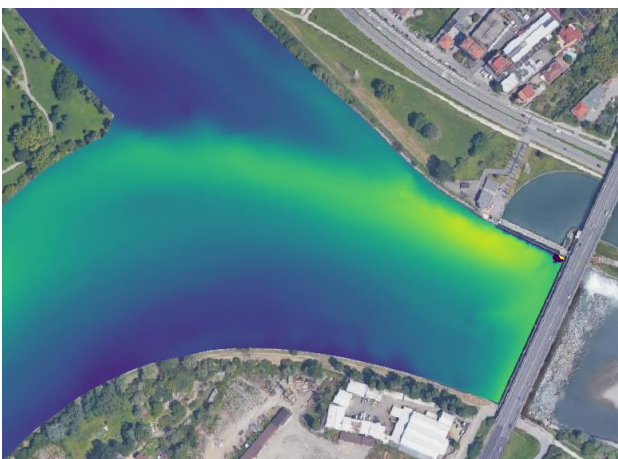


Figura 66: variazione di quota simulazione Q180 weir sx.

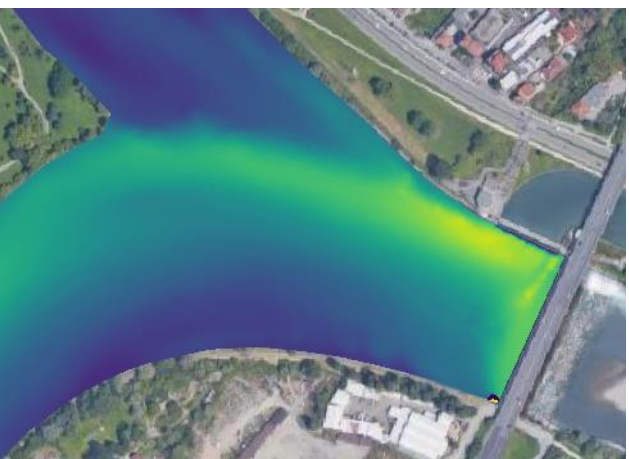


Figura 67: variazione di quota simulazione Q180 weir dx.

Un altro risultato interessante è il tasso di ritiro totale dei solidi sospesi espresso in m/s, esso ci permette di studiare in che porzioni dell'area di calcolo avviene il fenomeno dell'erosione in particolar modo per quanto riguarda le pezzature fini.

Il caso con una maggiore erosione dei fini si ha con il gate in destra idrografica, dove quest'ultima interessa l'intera lunghezza della traversa.

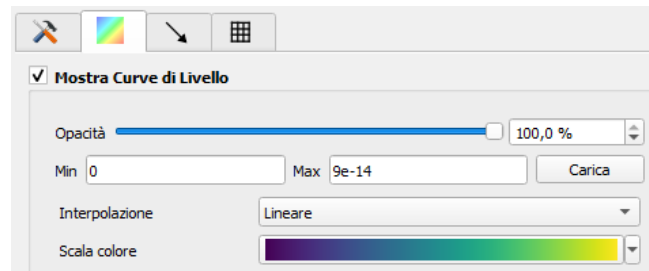


Figura 68: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q180 gate sx.



Figura 69: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q180 gate dx.



Figura 70: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q180 weir sx.



Figura 71: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q180 weir dx.

Infine, si analizza la classe granulometrica più fine corrispondente a 0.05 mm. Il software BASEMENT permette di calcolare, per ogni classe granulometrica, un dato scalare su ogni nodo dove si ha la frazione percentuale della classe corrispondente.

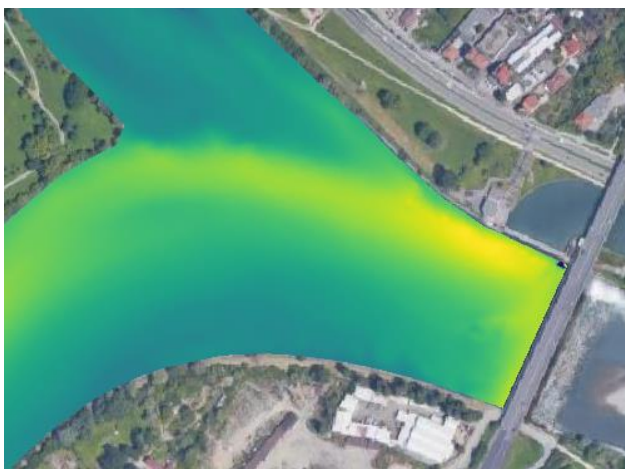
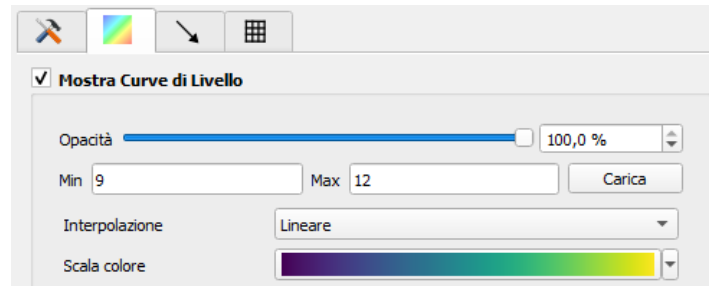


Figura 72: frazione percentuale fini simulazione Q180 gate sx.

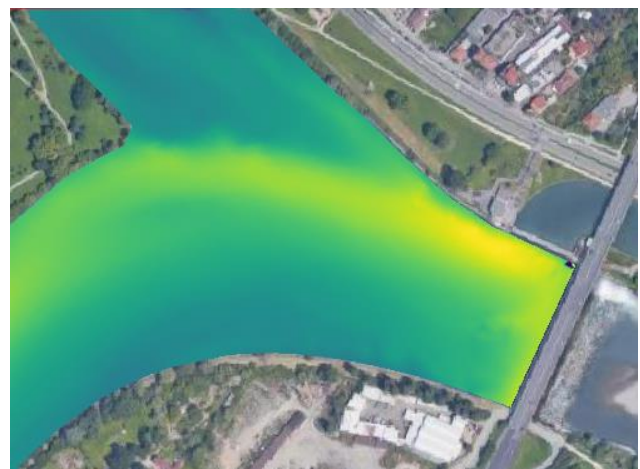


Figura 73: frazione percentuale fini simulazione Q180 gate dx.

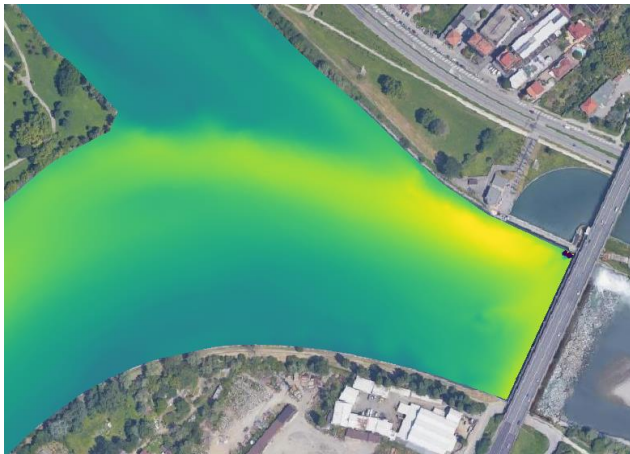


Figura 74: frazione percentuale fini simulazione Q180 weir sx.

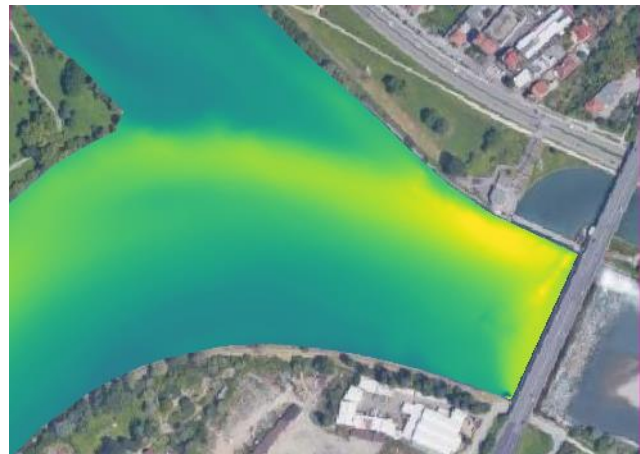


Figura 75: frazione percentuale fini simulazione Q180 weir dx.

9.4.2 Simulazione morfologica Q130

Si riportano di seguito i vari risultati ottenuti con la portata corrispondente alla Q130 della CDP. Con l'aumentare della portata si amplificano tutte le grandezze analizzate, per poter vedere qualche cambiamento nella scala dei colori si è dovuto infatti, in alcuni casi, cambiare gli estremi dell'intervallo di visualizzazione dei dati.

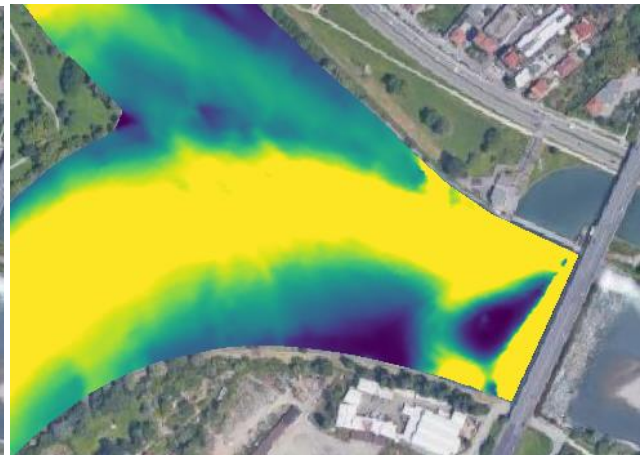
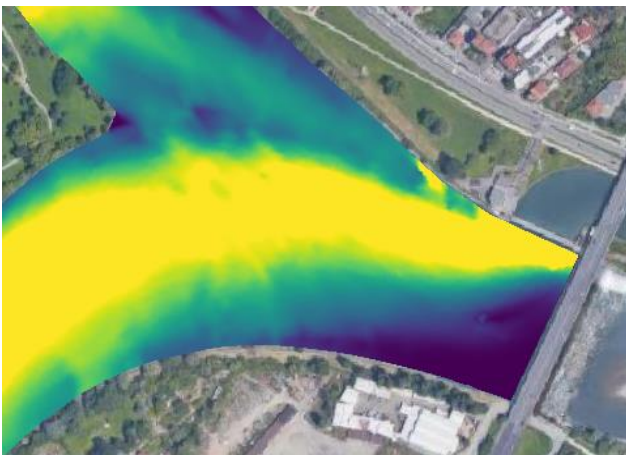
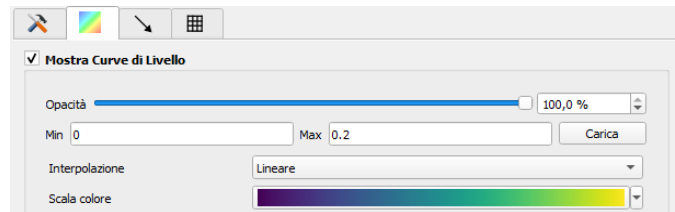


Figura 76: sforzi di taglio simulazione morfologica Q130 gate sx. Figura 77: sforzi di taglio simulazione morfologica Q130 gate dx.

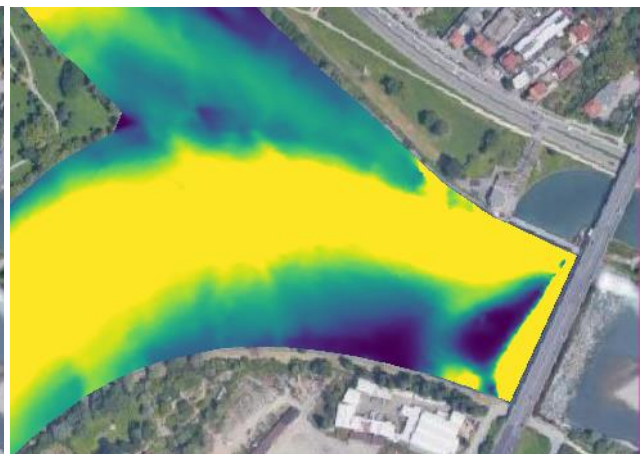
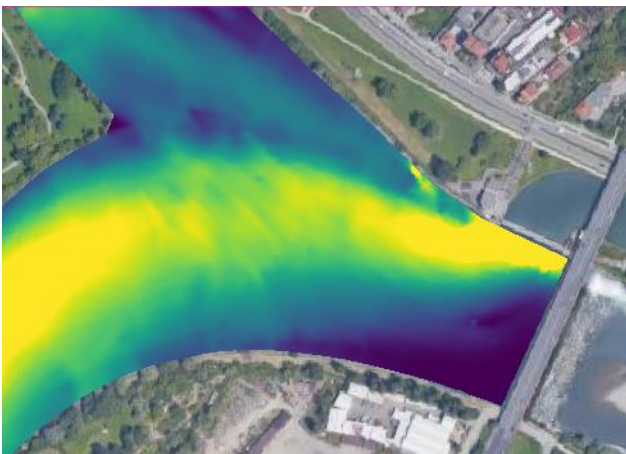


Figura 78: sforzi di taglio simulazione morfologica Q130 weir sx. Figura 79: sforzi di taglio simulazione morfologica Q130 weir dx.

Si nota, attraverso le seguenti immagini, come nel caso dell'installazione di uno stramazzo per l'impianto di minihydro in sinistra orografica, si abbia una concentrazione di trasporto solido nettamente inferiore. Inoltre, essa interessa poca parte del bacino a monte della traversa (rispetto alle altre casistiche).

Questo fa sì che si turbinino meno sedimenti e si preservi maggiormente le pale della turbina. Ma dall'altro lato si avrà più deposito a monte della traversa nell'area di bacino.

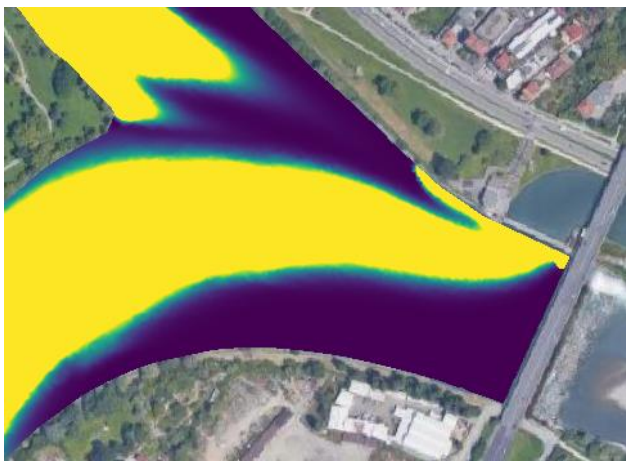
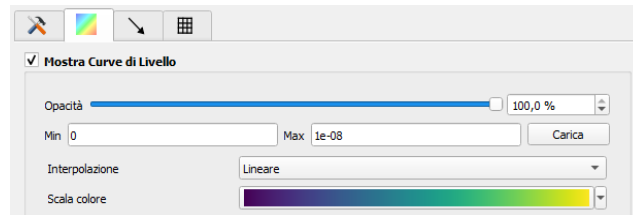


Figura 80: concentrazioni simulazione morfologica Q130 gate sx.

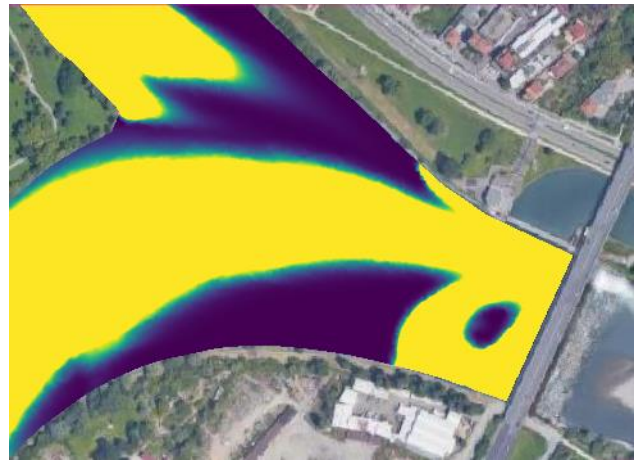


Figura 81: concentrazioni simulazione morfologica Q130 gate dx.

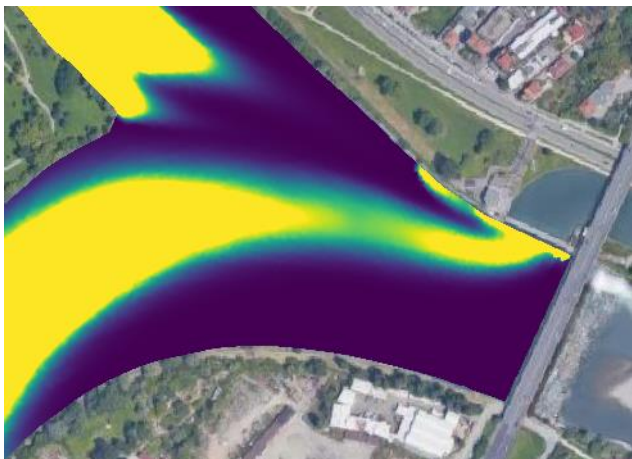


Figura 82: concentrazioni simulazione morfologica Q130 weir sx.

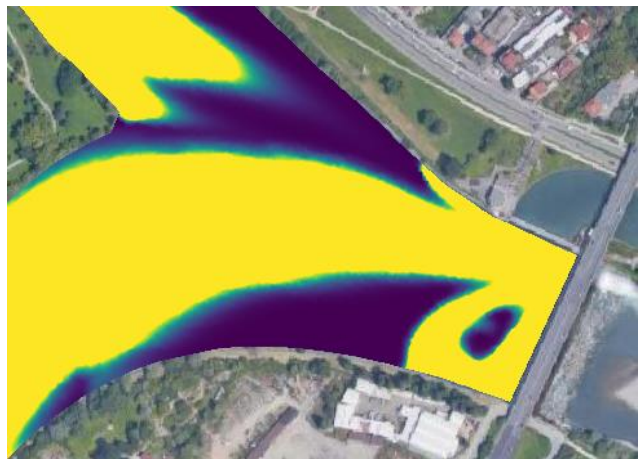


Figura 83: concentrazioni simulazione morfologica Q130 weir dx.

Come abbiamo visto per la portata riferita alla Q180, anche qui la velocità di deposizione dei solidi sospesi segue l'andamento visto in precedenza per le concentrazioni ovvero che nel caso di weir in sinistra orografica si ottiene poca erosione rispetto alle altre casistiche.

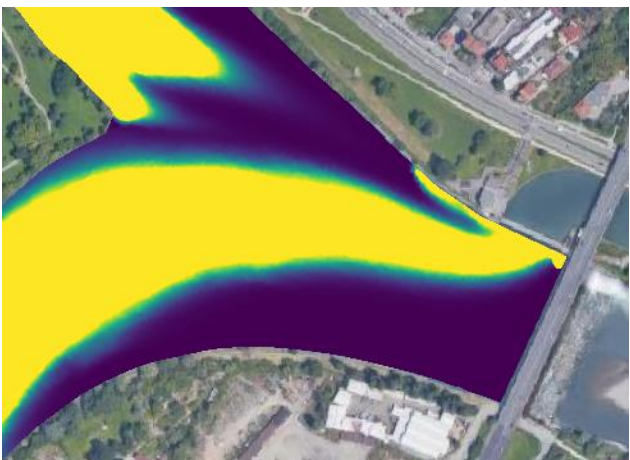
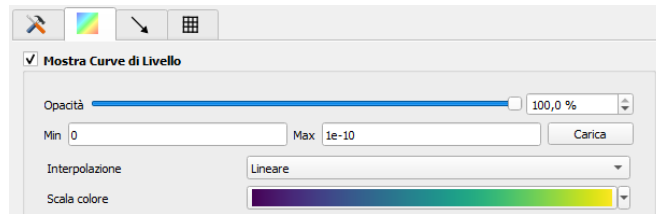


Figura 84: deposizione solidi sospesi totali Q130 gate sx.

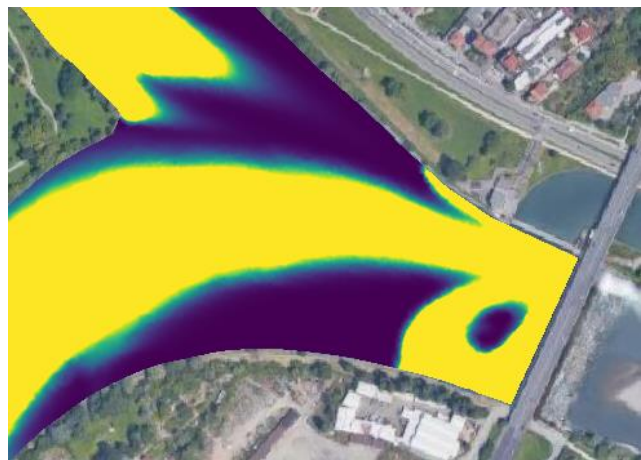


Figura 85: deposizione solidi sospesi totali Q130 gate dx.

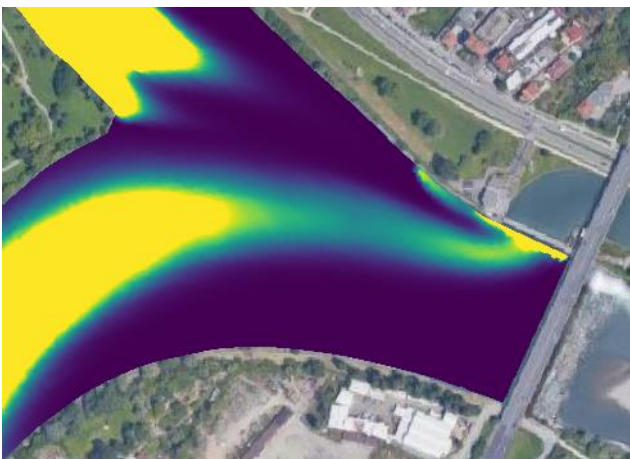


Figura 86: deposizione solidi sospesi totali Q130 weir sx.

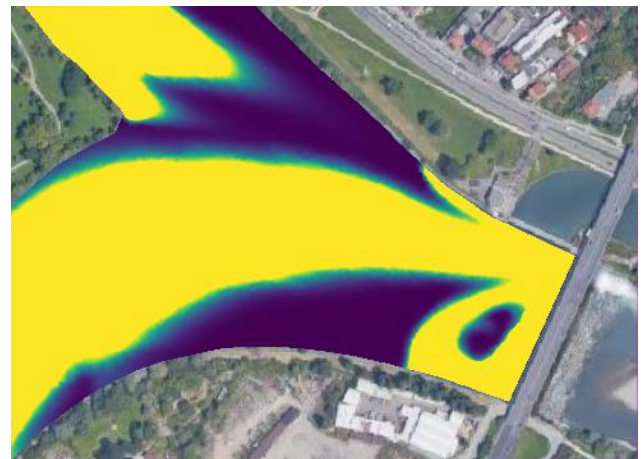


Figura 87: deposizione solidi sospesi totali Q130 weir dx.

Dallo studio della variazione di quota si nota come vi sia anche una zona di erosione nell'intorno della presa del canale derivatore ed anche nella zona dell'impianto di minihydro in tutte le casistiche analizzate.

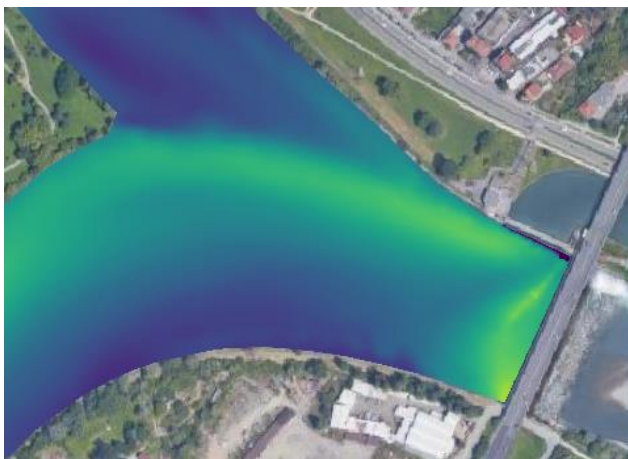
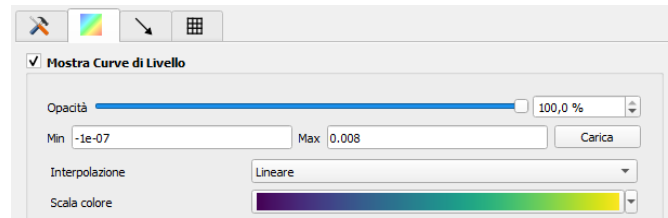


Figura 88: variazione di quota simulazione Q130 gate sx.



Figura 89: variazione di quota simulazione Q130 gate dx.

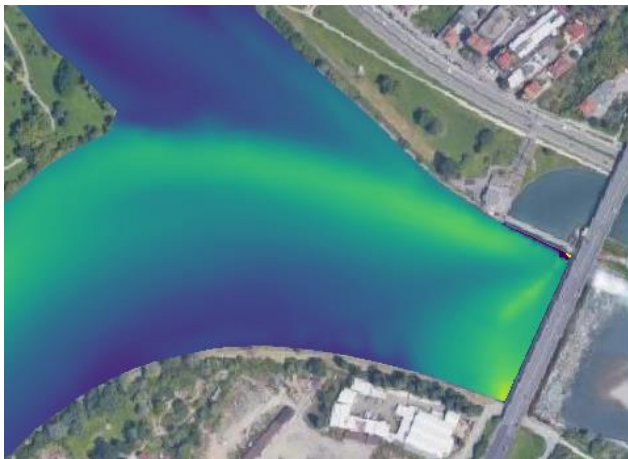


Figura 90: variazione di quota simulazione Q130 weir sx.

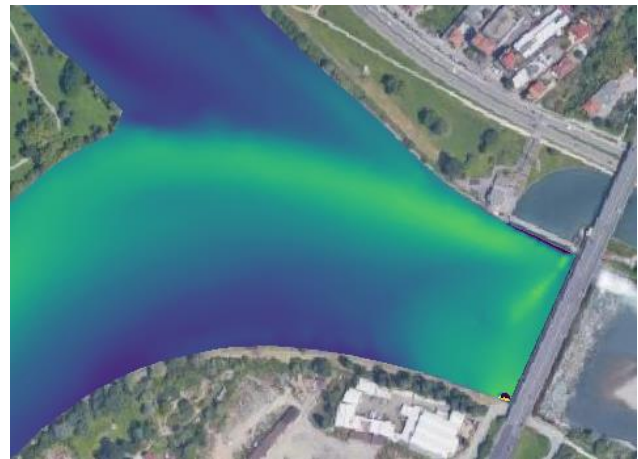


Figura 91: variazione di quota simulazione Q130 weir dx.

Anche nel caso del fenomeno di ritiro dei solidi totali sospesi la migliore ipotesi risulta quella avente un impianto composto da stramazzo in sinistra orografica.

Inoltre, se si pensa che in caso di piena interviene per prima la PS1 che ha la funzione di sghiaiatore avendo tutto l'impianto in sinistra orografica si può avere un maggiore effetto di questa paratoia.

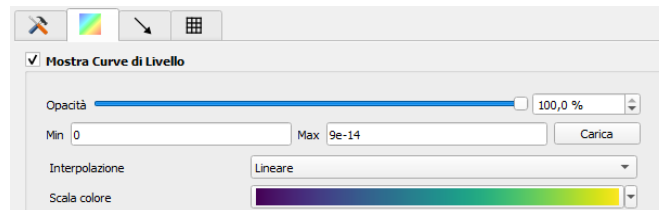


Figura 92: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q130 gate sx.



Figura 93: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q130 gate dx.



Figura 94: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q130 weir sx.



Figura 95: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q130 weir dx.

Per quanto riguarda la frazione percentuale dei fini presenti, non si ha una differenza sostanziale fra le varie simulazioni.

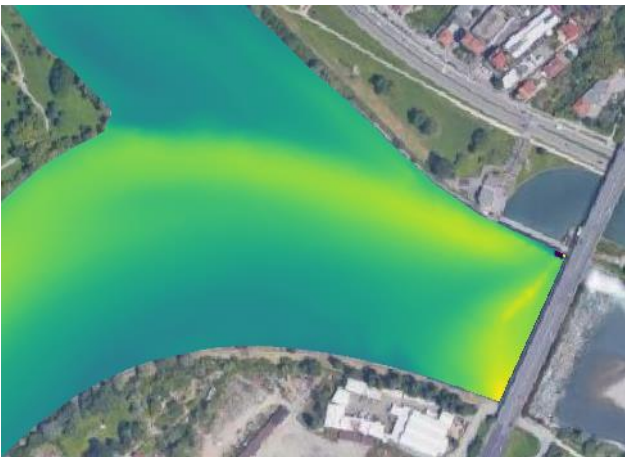
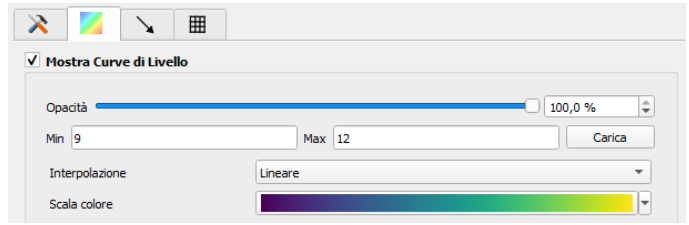


Figura 96: frazione percentuale fini simulazione Q130 gate sx.

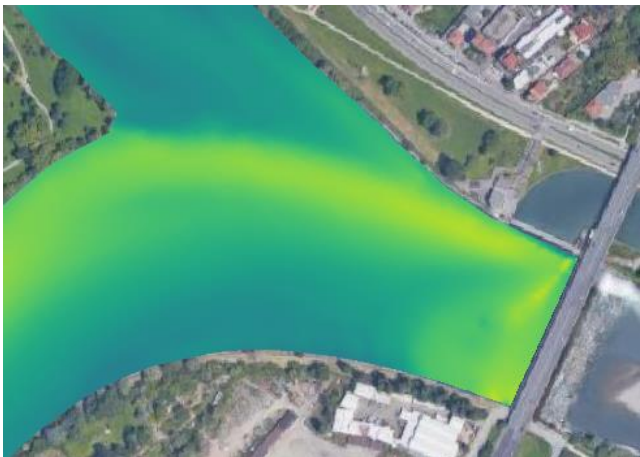


Figura 97: frazione percentuale fini simulazione Q130 gate dx.

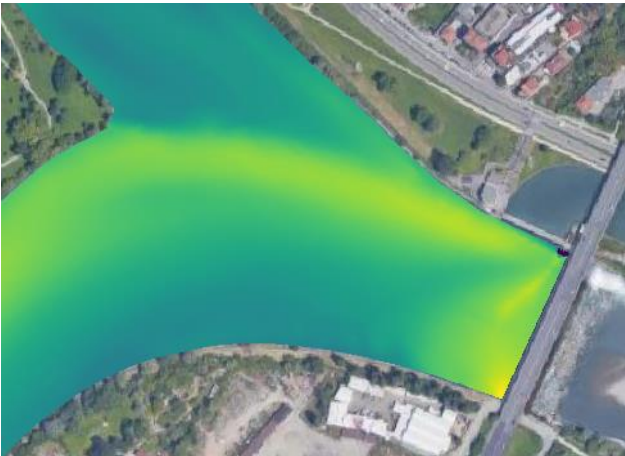


Figura 98: frazione percentuale fini simulazione Q130 weir sx.

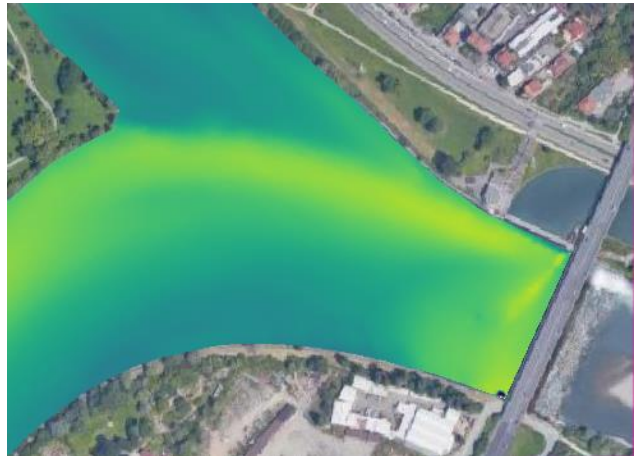


Figura 99: frazione percentuale fini simulazione Q130 weir dx.

9.4.3 Simulazione morfologica Q77

Si riportano di seguito i vari risultati ottenuti con la portata corrispondente alla Q77 della CDP.

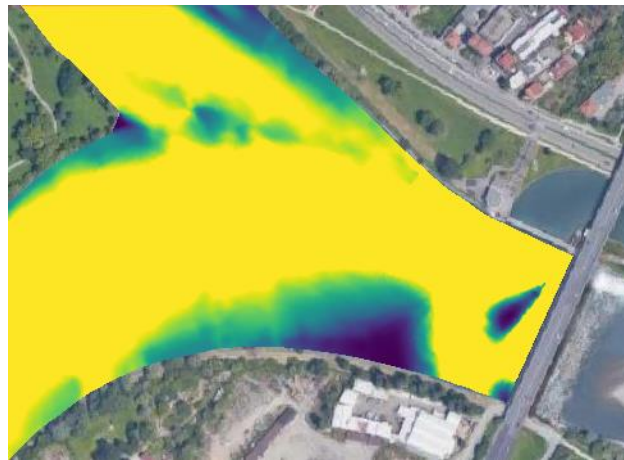
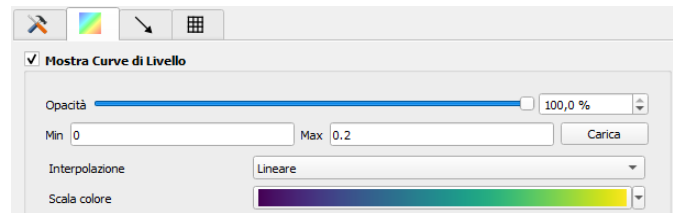


Figura 100: sforzi di taglio simulazione morfologica Q77 gate sx.

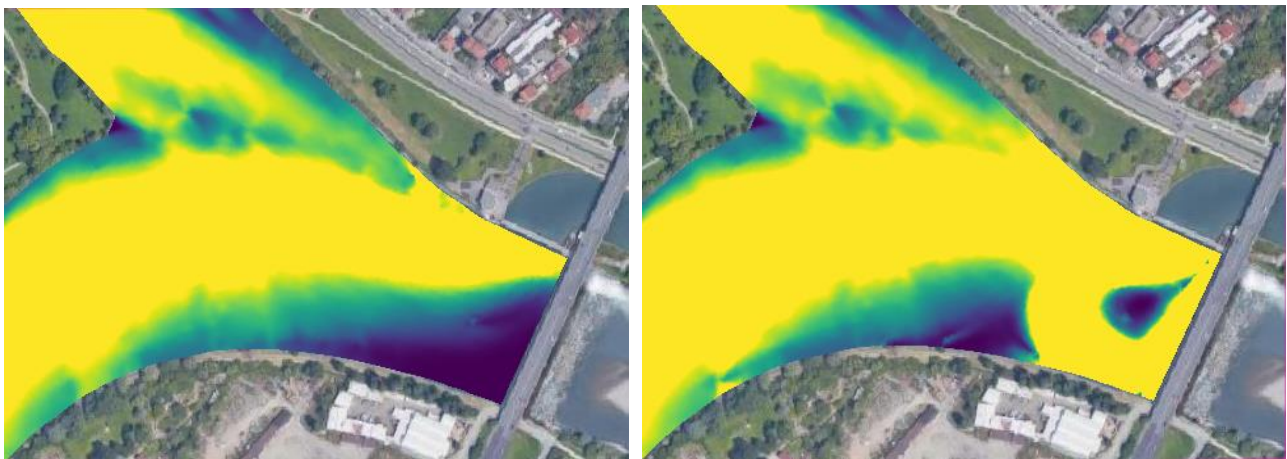


Figura 101: sforzi di taglio simulazione morfologica Q77 weir sx. Figura 102: sforzi di taglio simulazione morfologica Q77 weir dx.

Si nota come con l'aumentare della portata anche il caso di gate in sinistra idrografica risulti molto simile ai casi in cui l'impianto sia in destra idrografica. Si hanno infatti elevate concentrazioni per tutta la lunghezza della traversa.

Solo il caso in cui si abbia uno stramazzo in sinistra idrografica continua ad avere concentrazioni meno spiccate.

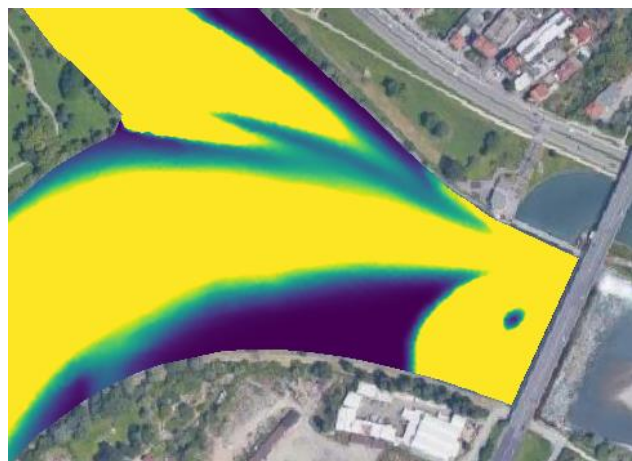
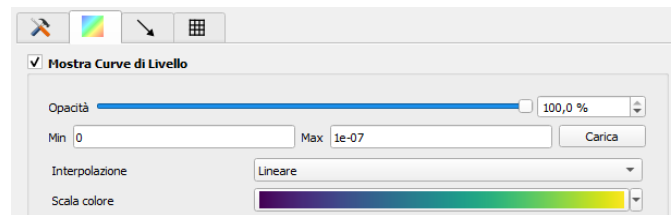


Figura 103: concentrazioni simulazione morfologica Q77 gate sx.

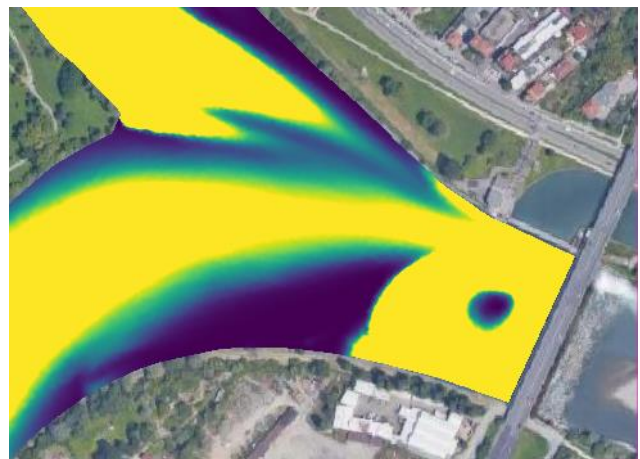
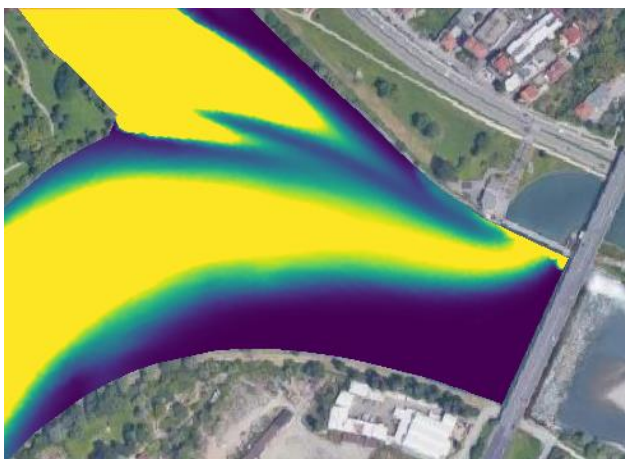


Figura 104: concentrazioni simulazione morfologica Q77 weir sx. Figura 105: concentrazioni simulazione morfologica Q77 weir dx.

Si ottiene il medesimo risultato della concentrazione anche per quanto riguarda la deposizione dei solidi sospesi. Solo il caso di stramazzo in sinistra idrografica vede una velocità di deposizione nettamente inferiore.

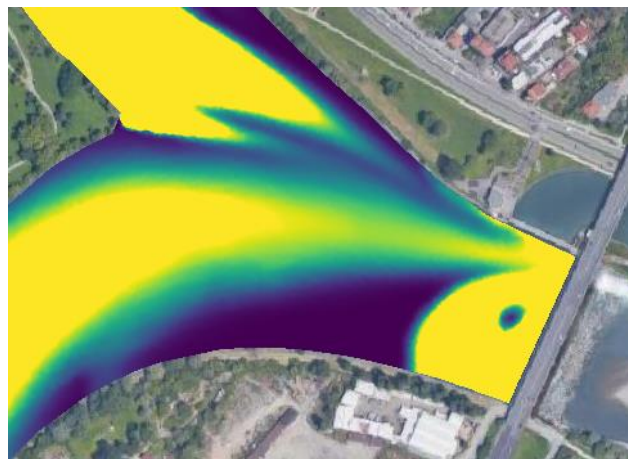
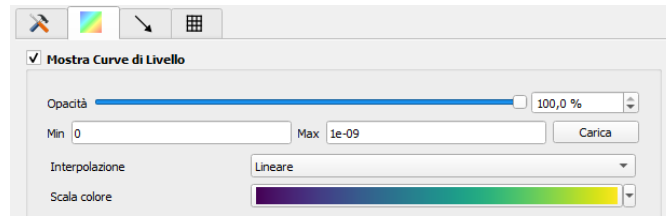


Figura 106: deposizione solidi sospesi totali Q77 gate sx.

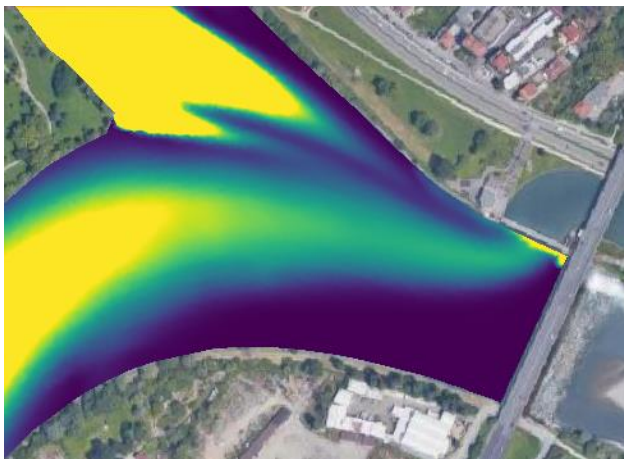


Figura 107: deposizione solidi sospesi totali Q77 weir sx.

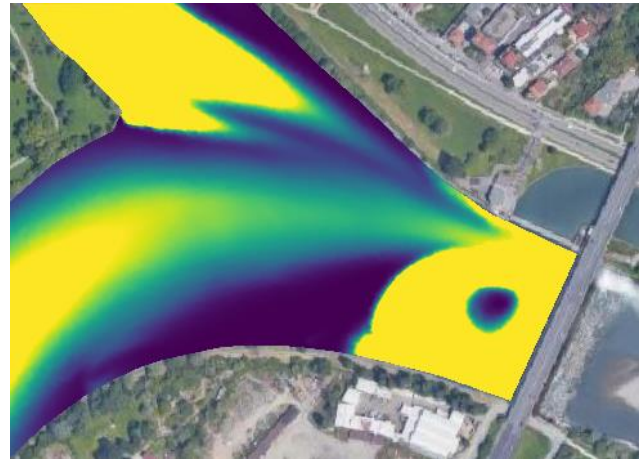


Figura 108: deposizione solidi sospesi totali Q77 weir dx.

Come per tutte le altre simulazioni, con portate minori, anche in questo caso la variazione di quota non vede grosse differenze fra le varie casistiche.

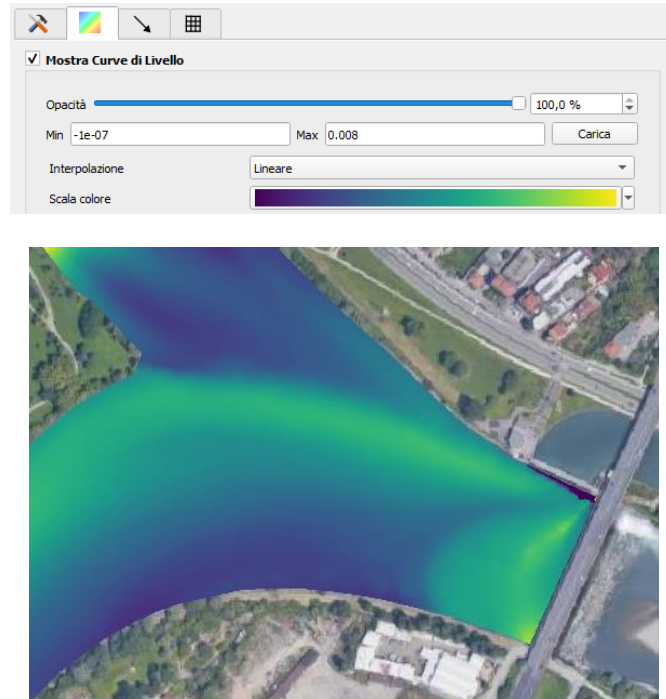


Figura 109: variazione di quota simulazione Q77 gate sx.

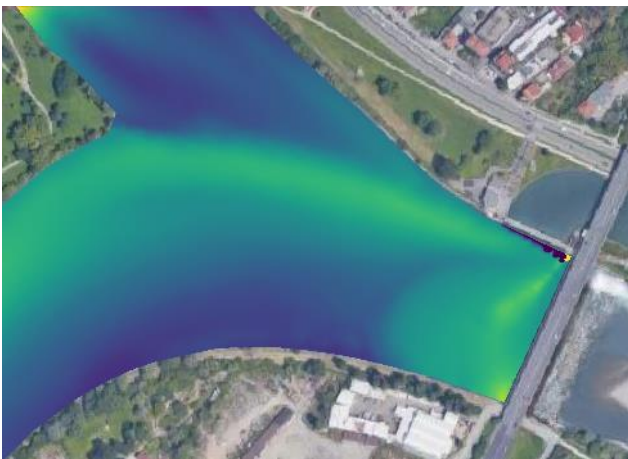


Figura 110: variazione di quota simulazione Q77 weir sx.



Figura 111: variazione di quota simulazione Q77 weir dx.

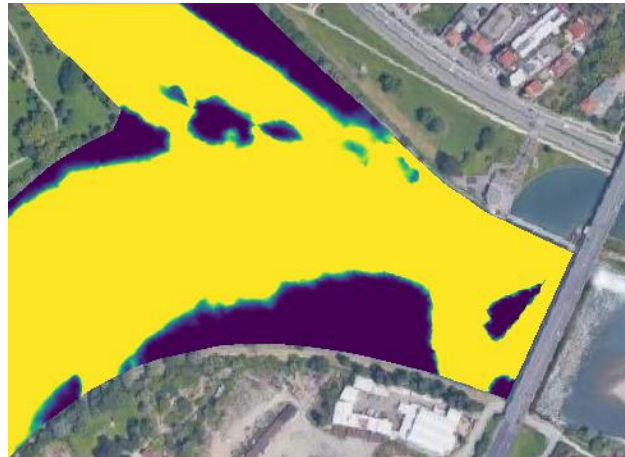
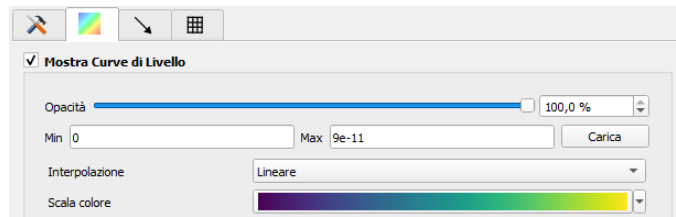


Figura 112: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q77 gate sx.

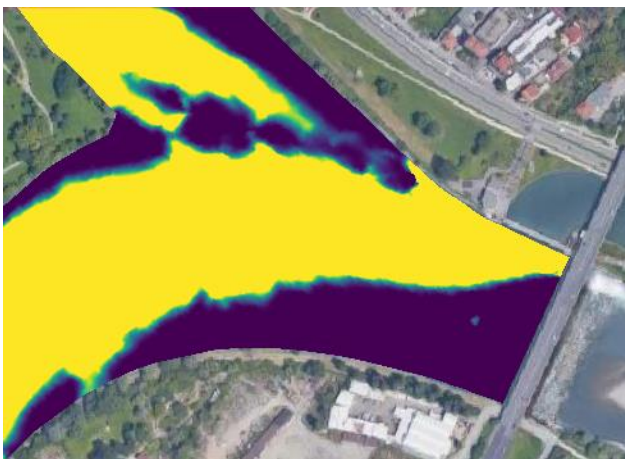


Figura 113: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q77 weir sx.

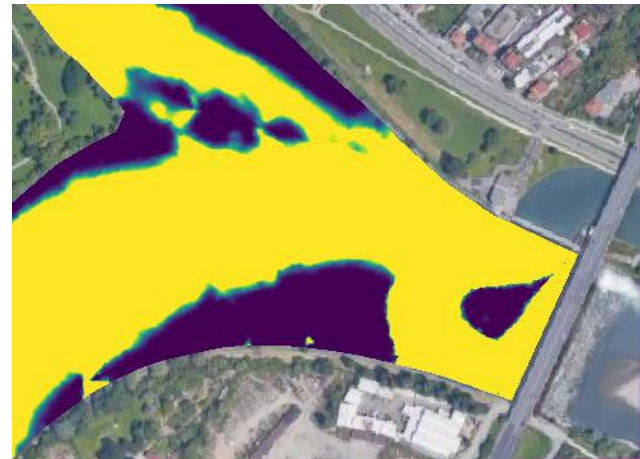


Figura 114: tasso di ritiro totale dei solidi sospesi Q77 weir dx.

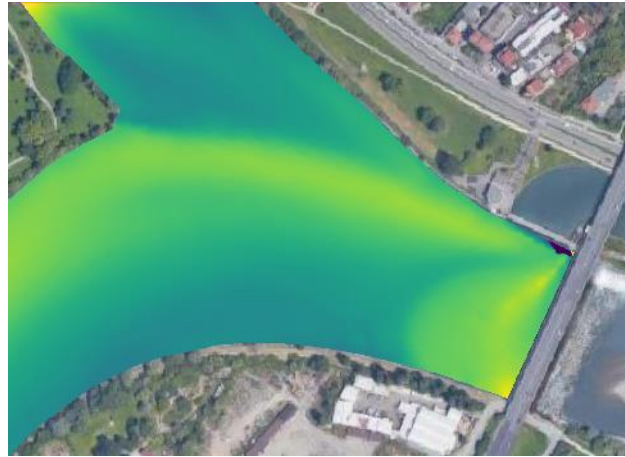
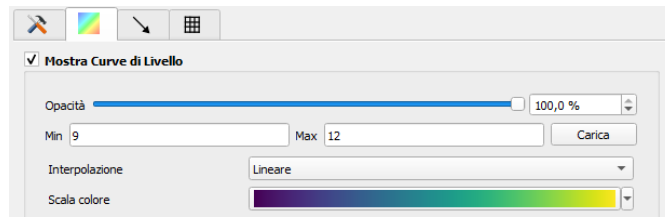


Figura 115: frazione percentuale fini simulazione Q77 gate sx.

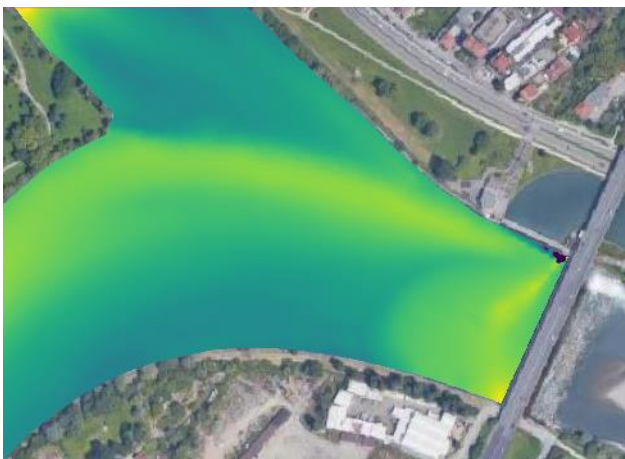


Figura 116: frazione percentuale fini simulazione Q77 weir sx.

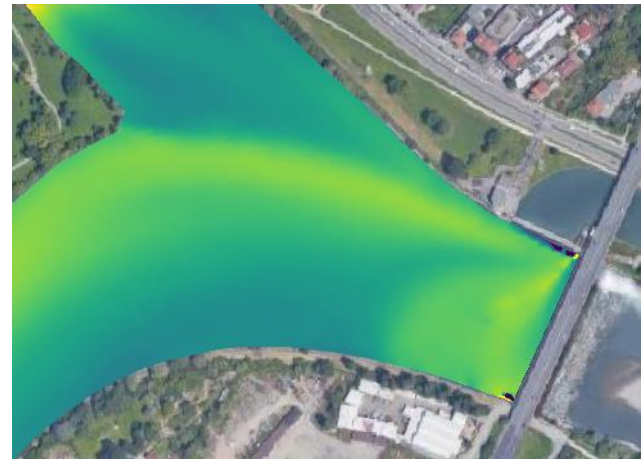


Figura 117: frazione percentuale fini simulazione Q77 weir dx.

9.4 SIMULAZIONE IDRAULICA PIENA

Di seguito si riportano i risultati per quanto riguarda il campo di moto in caso di piena. Le portate utilizzate sono quelle relative alla Q50 delle curve di durata delle portate, di seguito riportate in tabella.

Tabella 11: Q50 delle curve di durata delle portate dei vari fiumi interessati.

Fiume	Q50
Dora Riparia	39.3 m ³ /s
Stura di Lanzo	42.2 m ³ /s
Po	110.3 m ³ /s

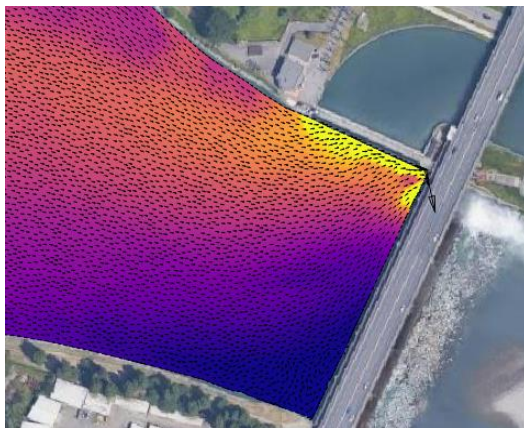
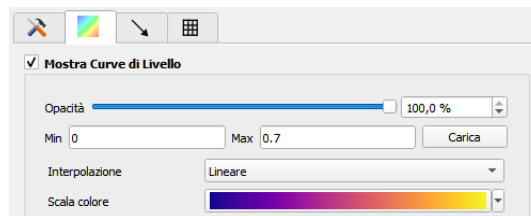


Figura 118: velocità simulazione Q50 gate sx.

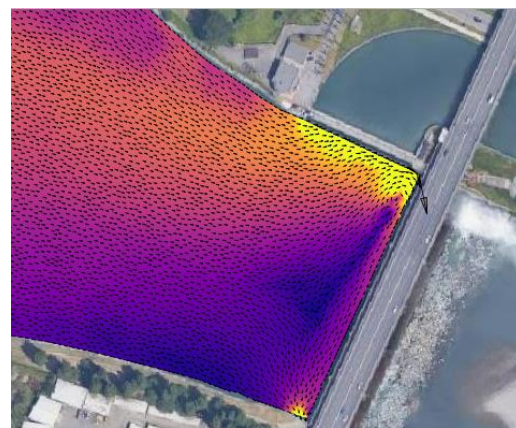


Figura 119: : velocità simulazione Q50 gate dx.

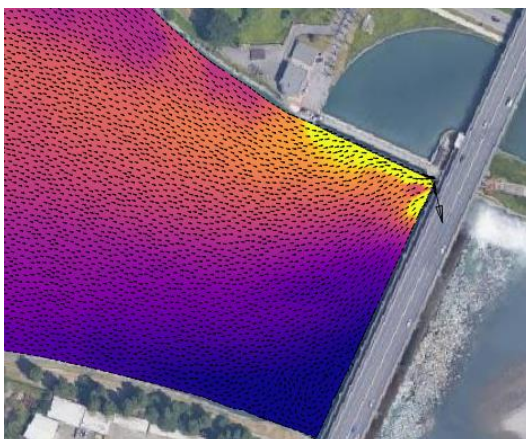


Figura 120: velocità simulazione Q50 weir sx.

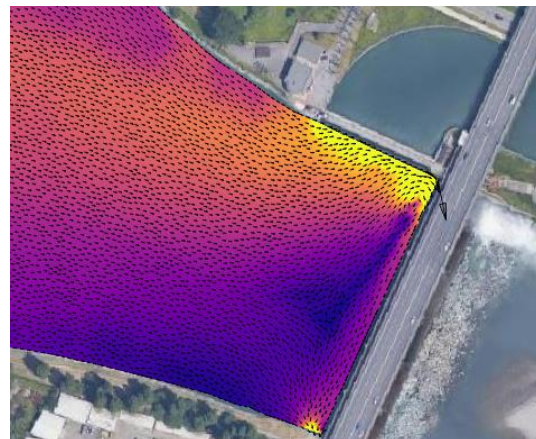


Figura 121: velocità simulazione Q50 weir dx.

9.5 CONCLUSIONI MODELLAZIONE IDROLOGICA

In questo lavoro si è studiato il campo di moto e la variazione morfologica a seguito dell'installazione di un impianto minihydro attraverso il software BASEMENT.

Si sono scelti diversi scenari tenendo conto delle diverse portate, della tipologia di installazione e della posizione rispetto all'alveo fluviale. In questo modo si possono fornire delle indicazioni di massima per puntare all'ottimo sotto diversi aspetti.

In primis attraverso il campo di moto si può notare come al variare della portata si ha un aumento delle zone con una velocità non consona alla discesa verso valle per la fauna ittica presente (tonalità gialla), secondo lo studio condotto dalla collega Francesca Alpe.

Sempre attraverso il campo di moto si evince che non vi è una differenza sostanziale fra la tipologia composta da paratoia a settore cilindrico e quella invece composta da stramazzo. Inoltre, per quanto riguarda la posizione ovvero in sinistra o in destra orografica si devono fare delle valutazioni in termini di velocità raggiunte, ovvero nel primo caso si ha che le velocità sono estremamente elevate in prossimità del nuovo impianto in quanto vi è il richiamo del flusso idrico congiunto fra il canale derivatore e l'impianto stesso.

Invece, nel caso in cui si scelga la posizione di destra orografica per l'installazione dell'impianto di minihydro, sempre dal punto di vista del campo di moto, si hanno velocità elevate su tutta la sezione dell'alveo a ridosso della traversa.

In ogni simulazione il flusso idrico viene prima attirato dal canale derivatore e poi la parte che non viene derivata prosegue lungo le paratoie della traversa fino ad arrivare in destra orografica e qui di nuovo in parte si turbinata grazie all'impianto di minihydro (se si tratta di una simulazione in destra idrografica) ed in parte viene attirata dal flusso iniziale al centro alveo e torna al canale derivatore. Si ha questo vortice di grosse dimensioni in ogni simulazione effettuata.

Per quanto riguarda invece la parte di simulazioni morfologiche si è mantenuto lo stesso impianto per la definizione degli scenari (ovvero differenziati in base alla portata, tipologia e posizione) ma si sono ovviamente analizzati diversi output in modo da ottenere un'idea, sempre indicativa, di come potrebbe variare la deposizione a monte e quindi di conseguenza il piano di gestione dei sedimenti e la quantità di sedimenti turbinata.

Nello specifico la condizione migliore, secondo i risultati ottenuti, è quella in cui si ha uno stramazzo in sinistra orografica, in questo caso si ha un doppio vantaggio ovvero:

- piano di gestione dei sedimenti più semplice e più efficace, in quanto si ha una minore deposizione a monte della traversa;

- minore usura della turbina, si turbinano meno sedimenti rispetto ad altre casistiche.

Si fa notare inoltre, il fatto che molto probabilmente le zone di accumulo e di erosione varieranno rispetto all'attuale disposizione dell'impianto. Infatti, attualmente la paratoia PS1 ha la funzione di sghiaiatore e questo porta ad avere un corridoio scavato in prossimità del canale derivatore fino alla PS1. Con la nuova disposizione invece vediamo come questo corridoio tenderà a ridursi.

Se si installa tutto l'impianto in sinistra idrografica, inoltre, si avrà il vantaggio che in caso di piena, essendo che si attiverà per prima la PS1, essa potrà continuare a svolgere il ruolo di sghiaiatore a ridosso del canale di presa e di conseguenza dell'impianto di minihydro.

Per quanto riguarda la simulazione idraulica svolta a simulare la Q50, si nota come entrando in attività la PS1 questo porta ad avere una differenza sostanziale fra caso in cui l'impianto sia installato in destra piuttosto che in sinistra idrografica. Nello specifico si ha una biforcazione del flusso idrico nel caso di destra, invece nel caso opposto il flusso viene interamente attratto in sinistra lasciando la sponda opposta praticamente a velocità nulla.

SOMMARIO

Scopo della presente tesi è lo studio del possibile effetto del cambiamento climatico sulla curva di durata delle portate e delle variazioni morfologiche in seguito all'installazione di un impianto minihydro e di un passaggio artificiale per l'ittiofauna nella traversa di sbarramento sul fiume Po dell'impianto idroelettrico Po/Stura-San Mauro di proprietà dell'IREN S.p.A.

Per quanto riguarda la prima parte, studio idrologico e cambiamento climatico, questa è stata svolta in parallelo con la collega Francesca Alpe e la sua Tesi Magistrale "*Cambiamenti climatici e tutela della biodiversità nella gestione di un impianto idroelettrico. Il caso studio della Diga del Pascolo a San Mauro Torinese (Iren Energia S.p.A.)*". Essa ha analizzato principalmente la componente della fusione nivale, invece per il presente lavoro si è svolta in aggiunta un'analisi delle derivazioni idriche a monte della traversa in esame.

Questo studio è stato svolto nell'ambito dei rapporti di collaborazione tra Politecnico di Torino e IREN, quest'ultima è una delle più importanti e dinamiche multiutility del panorama italiano attiva nei settori dell'energia elettrica, del gas, dell'energia termica per teleriscaldamento, della gestione dei servizi idrici integrati, dei servizi ambientali e dei servizi tecnologici.

L'impianto esistente vuole essere ampliato, con l'introduzione di una struttura di risalita dei pesci necessaria in quanto si vuole progettare ed installare un impianto mini idroelettrico sulla traversa di sbarramento nota anche come diga del Pascolo.

Si sono ricercati tutti i dati disponibili per l'analisi finalizzata ad approfondire i seguenti aspetti:

- studio dell'idrologia del bacino di interesse partendo dall'analisi dei dati disponibili e contestualizzazione attraverso la Curva di Budyko;
- costruzione di un modello a due stadi, modificato tenendo conto della fusione nivale e delle prese idriche a monte dell'impianto, per la determinazione della curva di durata;
- studio della curva di durata delle portate in relazione ai cambiamenti climatici;
- modellazione idraulica e morfologica a monte della traversa di sbarramento con il software BASEMENT;

Il risultato ottenuto dal presente studio può costituire per l'IREN S.p.A. la base per i futuri approfondimenti progettuali per l'installazione dell'impianto di minihydro, in particolare per il piano di gestione dei sedimenti e per il passaggio artificiale dell'ittiofauna.

ALLEGATI

SCRIPT BASEMENT GATE SX MORFOLOGIA: simulazione con la Q180.

```
//-----  
// BASEMENT file  
// generated by BASEview  
//-----  
  
PROJECT {  
  
    title = Traversa_San_Mauro  
  
    author = Miriana  
  
}  
  
DOMAIN {  
  
    PHYSICAL_PROPERTIES {  
  
        gravity = 9.81  
  
        viscosity = 1e-06  
  
        rho_fluid = 1000  
  
    }  
  
    PARALLEL {  
  
        number_threads = 4  
  
    }  
  
    BASEPLANE_2D {  
  
        region_name = sanmauro  
  
        GEOMETRY {  
  
            type = 2dm  
  
            file = area&gate.2dm  
  
            STRINGDEF {  
  
                name = presa  
  
                node_ids = (222 9335 9512 223 8366 224 8119 9283 225 8117 226 1597 1304 1305 227 8139 452 468 228 416 229)  
  
                upstream_direction = right  
  
            }  
  
            STRINGDEF {  
  
                name = inflowstura  
  
                node_ids = (163 451 467 472 162 161 450 160 13285 159 13184 158 10330 157 156 155 483 507 154 153 152 13141 151 150)  
  
                upstream_direction = right  
  
            }  
  
            STRINGDEF {  
  
                name = inflowdora  
  
                node_ids = (75 14206 14152 15149 477 13773 503 520 531 74)  
  
                upstream_direction = right  
  
            }  
  
            STRINGDEF {
```

```

        name      = inflowpo
        node_ids   = (73 72 71 15088 70 15100 13853 13870 69 68)
        upstream_direction = right
    }
STRINGDEF {
        name      = PS1
        node_ids   = (236 235 234 233 411 232)
        upstream_direction = right
    }
STRINGDEF {
        name      = PS2
        node_ids   = (237 238 239 240 241 242 243 244 245)
        upstream_direction = right
    }
STRINGDEF {
        name      = PS3
        node_ids   = (246 247 248 249 250 8053 251 252)
        upstream_direction = right
    }
STRINGDEF {
        name      = PS4
        node_ids   = (253 254 255 256 257 258 259 260 261 262)
        upstream_direction = right
    }
STRINGDEF {
        name      = PS5
        node_ids   = (263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273)
        upstream_direction = right
    }
STRINGDEF {
        name      = PS6
        node_ids   = (274 275 276 277 278 9265 407 408 409 1)
        upstream_direction = right
    }
STRINGDEF {
        name      = presa_sx
        node_ids   = (231 415 230)
        upstream_direction = right
    }
STRINGDEF {
        name      = presa_dx
        node_ids   = (3 425 2)

```

```

        upstream_direction = right
    }
}
TIMESTEP {
    CFL      = 0.9
    total_run_time = 50000
    initial_time_step = 0.001
    minimum_time_step = 0.001
}
HYDRAULICS {
    PARAMETER {
        simulation_scheme = exp
        riemann_solver    = exact
        minimum_water_depth = 0.01
        dynamic_depth_solver = on
    }
    FRICTION {
        type      = manning
        default_friction = 0.025
        wall_friction = off
    }
    INITIAL {
        type      = continue
        file      = sanmauro_restart_40000.cgns
        restart_solution_time = 40000
    }
    BOUNDARY {
        type      = hydrograph
        string_name = inflowstura
        slope     = 4
        precision = 0.1
        name      = stura
        file      = hydrographstura.txt
    }
    BOUNDARY {
        type      = hydrograph
        string_name = inflowdora
        slope     = 3
        precision = 0.1
        name      = dora
        file      = hydrographdora.txt
    }
}

```

```
BOUNDARY {  
  
    type = hydrograph  
  
    string_name = inflowpo  
  
    slope = 2.5  
  
    precision = 0.1  
  
    name = po  
  
    file = hydrographpo.txt  
  
}  
  
BOUNDARY {  
  
    type = gate  
  
    string_name = PS1  
  
    file = sghiaiatore.txt  
  
}  
  
BOUNDARY {  
  
    type = gate  
  
    string_name = PS2  
  
    file = S13.txt  
  
}  
  
BOUNDARY {  
  
    type = gate  
  
    string_name = PS3  
  
    file = S13.txt  
  
}  
  
BOUNDARY {  
  
    type = gate  
  
    string_name = PS4  
  
    file = S13.txt  
  
}  
  
BOUNDARY {  
  
    type = gate  
  
    string_name = PS5  
  
    file = S45.txt  
  
}  
  
BOUNDARY {  
  
    type = gate  
  
    string_name = PS6  
  
    file = S45.txt  
  
}  
  
BOUNDARY {  
  
    type = gate  
  
    string_name = presa  
  
    file = presa.txt  
  
}
```



```

}

BOUNDARY {

    name = presa_aggiuntiva

    string_name = presa_sx

    type = gate

    file = presa_aggiuntiva.txt

}

}

MORPHOLOGY {

    INITIAL {

        type = initial_mesh

    }

    PARAMETER {

        porosity = 37

        control_volume_type = constant

        density = 2650

        max_layer_thickness = 0.5

        create_new_layers = on

        control_volume_thickness_index = (1 2)

        control_volume_thickness = (0.2 0.2)

    }

    BEDMATERIAL {

        GRAIN_CLASS {

            diameters = (0.05 1 10 24 48 61 64 300)

        }

        MIXTURE {

            name = Po

            volume_fraction = (10 20 20 20 20 10 0 0)

        }

        MIXTURE {

            name = Stura

            volume_fraction = (10 20 10 10 10 30 0)

        }

        MIXTURE {

            name = Dora

            volume_fraction = (10 20 20 20 10 10 0)

        }

        MIXTURE {

            name = hole

            volume_fraction = (0 0 0 0 0 0 100)

        }

        SOIL_DEF {

```

```

        name = soil_Hole

        LAYER {

            mixture = hole

            bottom_elevation = -2

        }

    }

    SOIL_DEF {

        name = soil_Po

        LAYER {

            mixture = Po

            bottom_elevation = -2

        }

    }

    SOIL_DEF {

        name = soil_Stura

        LAYER {

            mixture = Stura

            bottom_elevation = -2

        }

    }

    SOIL_DEF {

        name = soil_Dora

        LAYER {

            mixture = Dora

            bottom_elevation = -2

        }

    }

    SOIL_ASSIGNMENT {

        type = index_table

        index = (1 2)

        soil = (soil_Po soil_Hole)

    }

    MIXTURE {

        name = sospeso

        volume_fraction = (100 0 0 0 0 0 0)

    }

}

BEDLOAD {

    FORMULA {

        bedload_formula = mpm_multi

    }

    PARAMETER {

```

```

}

DIRECTION {

    lateral_transport_type = lateral_bed_slope

    lateral_index    = (1 2)

}

BOUNDARY {

    name    = sed_BC_Po

    type    = transport_capacity

    string_name = inflowpo

    mixture = Po

}

BOUNDARY {

    name    = sed_BC_Stura

    type    = transport_capacity

    string_name = inflowstura

    mixture = Stura

}

BOUNDARY {

    name    = sed_BC_Dora

    type    = transport_capacity

    string_name = inflowdora

    mixture = Dora

}

BOUNDARY {

    name    = sed_BC_presa

    string_name = presa

    type    = IODown

}

BOUNDARY {

    name    = sed_BC_aggiuntiva

    type    = IODown

    string_name = presa_sx

}

}

SUSPENDED_LOAD {

    PARAMETER {

        scheme    = upwind

        diffusion  = off

        sediment_exchange = on

    }

    INITIAL {

        type    = index_table

    }

```

```

        index      = (1 2)

        concentration = (0.001 0.001)

        mixture     = (sospeso sospeso)
    }

    BOUNDARY {

        name      = Po_susp

        type      = suspension_discharge

        string_name = inflowpo

        mixture   = sospeso

        file      = sospesi.txt
    }

    BOUNDARY {

        type      = suspension_discharge

        name      = Dora_susp

        file      = sospesi.txt

        string_name = inflowdora

        mixture   = sospeso
    }

    BOUNDARY {

        name      = Stura_susp

        type      = suspension_discharge

        string_name = inflowstura

        file      = sospesi.txt

        mixture   = sospeso
    }

    BOUNDARY {

        name      = susp_Presa

        type      = out_down

        string_name = presa
    }

    BOUNDARY {

        name      = susp_S1

        type      = out_down

        string_name = PS1
    }

    BOUNDARY {

        name      = susp_S2

        type      = out_down

        string_name = PS2
    }

    BOUNDARY {

        name      = susp_S3

```

```

        type    = out_down
        string_name = PS3
    }
    BOUNDARY {
        name     = susp_S4
        type     = out_down
        string_name = PS4
    }
    BOUNDARY {
        name     = susp_S5
        type     = out_down
        string_name = PS5
    }
    BOUNDARY {
        name     = susp_S6
        type     = out_down
        string_name = PS6
    }
    BOUNDARY {
        name     = susp_agg
        type     = out_down
        string_name = presa_sx
    }
}
}
OUTPUT {
    console_time_step = 100
    restart_time_step = 1000
    SPECIAL_OUTPUT {
        type    = element_history
        output_time_step = 100.0
        element_ids  = (1651)
        element_values = (wse)
    }
    SPECIAL_OUTPUT {
        format    = sms
        type      = node_centered
        output_time_step = 100
        values    = (velocity depth wse z_node deltax bedload_vec grain_bedload tau theta_critical grain_size concentration susp_total_pickup
susp_total_deposition)
    }
    SPECIAL_OUTPUT {

```

```

        type      = boundary_history

        boundary_values = (Q Qsed)

        output_time_step = 10

        history_one_file = yes

    }

}

CONTROLLER {

    name      = controllo_sghiaiatore

    type      = PID

    output     = yes

    output_time_step = 10

    MONITORED_VARIABLE {

        name      = livello_invaso

        type      = wse

        root_value_type = fixed_value

        root_value  = 209.80

        position    = sanmauro.1651

        coefficients = apertura_sghiaiatore:(0.01 0.1 0)

    }

    MANIPULATED_VARIABLE {

        name      = apertura_sghiaiatore

        position   = sanmauro.presa_sx

        start_value = 206.111

        max_change_rate = 0.01

        range      = (206 207)

    }

}

CONTROLLER {

    name      = controllo_PS6

    type      = PID

    output     = yes

    output_time_step = 10

    MONITORED_VARIABLE {

        name      = livello_invasoPS6

        type      = wse

        root_value_type = fixed_value

        root_value  = 209.82

        position    = sanmauro.1651

        coefficients = apertura_PS6:(0.005 0.05 0)

        coefficients = apertura_PS5:(0.005 0.05 0)

    }

}

```

```

MANIPULATED_VARIABLE {
    name      = apertura_PS6
    position  = sanmauro.PS6
    start_value = 206
    max_change_rate = 0.01
    range     = (206 206)
}

MANIPULATED_VARIABLE {
    name      = apertura_PS5
    position  = sanmauro.PS5
    start_value = 206
    max_change_rate = 0.01
    range     = (206 206)
}

}

CONTROLLER {
    name      = controllo_presa
    type      = PID
    output_time_step = 10
    output    = yes
    MONITORED_VARIABLE {
        name      = portata_presa
        type      = Q
        root_value_type = fixed_value
        root_value  = 43.1
        position   = sanmauro.presa
        coefficients = apertura_presa:(-0.01 -0.1 0)
    }
    MANIPULATED_VARIABLE {
        name      = apertura_presa
        position  = sanmauro.presa
        start_value = 206.118
        max_change_rate = 0.001
        range     = (206 206.5)
    }
}

}
}

```

BIBLIOGRAFIA

1. *Impianto idroelettrico Po/Stura - San Mauro*. Iren Energia S.p.A.
2. *Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse) – Ministero delle infrastrutture e dei trasporti*.
3. Autorità di Bacino del Fiume Po, Parma. Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) - Interventi sulla rete idrografica e sui versanti. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*. 2014.
4. *CISL, 2008; Bazzoffi e Vanino, 2010; Di Silvio, 2004*.
5. Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po. Territorio <https://pianoacque.adbpo.it/caratteristiche-del-distretto-idrografico-del-fiume-po/>.
6. Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po. Territorio <https://adbpo.gov.it/territorio-di-competenza/>.
7. *Rapporto sull'evento alluvionale del 13 - 16 ottobre 2000. Effetti sulle aree antropizzate: quadro preliminare*. 2000.
8. Arpa Piemonte. Evento alluvionale 21-26 novembre 2016 – Pubblicato il rapporto preliminare. [Online] <http://www.arpa.piemonte.it/news/evento-alluvionale-21-26-novembre-2016-2013-pubblicato-il-rapporto-preliminare>.
9. Dataset su griglia NWIOI. <http://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/tematismi/clima/confrontistorici/dati/dati.html>.
10. Metodologia. <http://rsaonline.arpa.piemonte.it/meteoclima50/metodologia.htm>.
11. Arpa Piemonte e Rischi Naturali Piemonte. Il clima in Piemonte, metodologia. <https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/approfondimenti/clima/clima-piemonte/metodologia.html>.
12. ARPA Piemonte Banca Dati: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjahU24rztAhVJDewKHdNRBXwQFjAAegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Fwww.regione.piemont.it%2Fambiente%2Faria%2Ffrilev%2Fariaday%2Fannali%2Fidroweb.jnlp&usg=AOAOvV2g0JNPERb96I8skz1t-w-k>
13. *Stima dell'evapotraspirazione sul territorio Piemontese, Rapporto finale della ricerca: "Caratterizzazione fisica ed idrologica dei bacini idrografici del Piemonte"*: A. Viglione.
14. *Prediction of annual runoff in ungauged basins*. T. A. McMahon, G. Laaha, J. Parajka, M. C. Peel, H. G. Savenije, M. Sivapalan, J. Szolgay, S. E. Thompson, A. Viglione, R. A. Woods and D. Yang;
15. *Exploring the physical controls of regional patterns of flow duration curves – Part 2: Role of seasonality, the regime curve, and associated process controls*: S. Ye, M. Yaeger, E. Coopersmith, L. Cheng, and M. Sivapalan;
16. Viglione, Alberto. Two step partitioning of rainfall/snowmelt. *Applied hydrology/Environmental fluid mechanics*.

17. *Complexity and performance of temperature-based snow routines for runoff modelling in mountainous areas in Central Europe*. Marc Girons Lopez, Marc J. P. Vis, Michal Jenicek, Nena Griessinger, Jan Seibert. 2020.
18. Singh, P. Energy exchange processes. *Snow and Glacier Hydrology*.
19. David Ardia, Katharine Mullen, Brian Peterson, Joshua Ulrich, Kris Boudt. Package 'DEoptim'. *Global Optimization by Differential Evolution*. 2020.
20. Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. Wouter J. M. Knoben, Jim E. Freer, Ross A. Woods. 2019.
21. Consultazione dati di Derivazioni, Scarichi e Impianti di depurazione. <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/ambiente/acqua/consultazione-dati-derivazioni-scarichi-impianti-depurazione>.
22. ipcc. The Intergovernmental Panel on Climate Change. [Online] <https://www.ipcc.ch/>.
23. National Centre for Climate Services NCCS [https://www.nccs.admin.ch/nccs/it/home/cambiamenti-climatici-e-impatti/le-informazioni-di-base-sul-clima/cosa-sono-gli-scenari-di-emissione-.html#:~:text=L'ultima%20generazione%20di%20scenari,di%20forzante%20radiativo%20nel%202100\)%2C](https://www.nccs.admin.ch/nccs/it/home/cambiamenti-climatici-e-impatti/le-informazioni-di-base-sul-clima/cosa-sono-gli-scenari-di-emissione-.html#:~:text=L'ultima%20generazione%20di%20scenari,di%20forzante%20radiativo%20nel%202100)%2C).
24. ISPRA. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. [Online] <https://www.isprambiente.gov.it/it>.
25. Il clima futuro in Italia: analisi delle proiezioni dei modelli regionali - Stato dell'Ambiente 58/2015. 2015.
26. User Manual of BASEMENT V2.8 2006–2018 ETH Zurich / Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW);
27. *Francesca Tesi di Laurea Magistrale: “Cambiamenti climatici e tutela della biodiversità nella gestione di un impianto idroelettrico. Il caso studio della Diga del Pascolo a San Mauro Torinese (Iren Energia S.p.A.)”*.