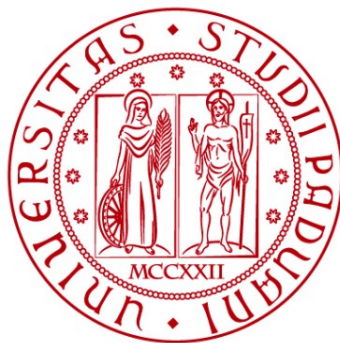


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
Curriculum Idraulica



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**LA CAPACITÀ DI DEFLUSSO DEL PO A VALLE DI PONTELAGOSCURO.
ANALISI NUMERICA DEGLI EFFETTI LEGATI ALLA MOBILITÀ
DEL FONDO.**

Relatore:

Chiar.mo Prof. DANIELE PIETRO VIERO

Laureando:

FEDERICA BALDASSO

Matr. 2022108

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Ringraziamenti

Vorrei dedicare questo spazio a tutte le persone che, con il loro supporto, mi hanno aiutato in questo importante percorso.

Un ringraziamento sentito va al Professor Viero, che in questi mesi di lavoro mi ha sempre seguito con grande disponibilità. I suoi numerosi consigli sono stati fondamentali per svolgere questo lavoro di tesi, ma anche per accrescere le mie conoscenze e competenze.

Ringrazio infinitamente i miei genitori per avermi permesso di intraprendere questo percorso di studio, per avermi sempre saputo sostenere e consigliare, per non avermi mai fatto mancare nulla. Se sono giunta a questo importante traguardo è merito vostro.

Un ringraziamento speciale va anche ai miei fratelli Enrico e Luca, da sempre fonte di ispirazione per me. So di poter sempre contare su di voi.

Grazie anche a mio zio Paolo, per avermi fatto avvicinare a questa interessante tematica e per essere sempre stato disponibile per consigli e informazioni.

Non posso poi dimenticare gli amici che mi sono stati vicini in questi anni, grazie per avermi fatto vivere dei bellissimi momenti di spensieratezza e grazie per avermi aiutato nei momenti di bisogno.

Un ringraziamento anche ai compagni di nuoto, con voi ho imparato a non mollare mai.

SOMMARIO

INDICE DELLE FIGURE	VII
INDICE DELLE TABELLE.....	XV
INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1. INQUADRAMENTO TERRITORIALE	5
1.1 Il fiume Po	5
1.2 Area di studio e dati utilizzati.....	6
CAPITOLO 2. MODELLAZIONE IDRODINAMICA A FONDO FISSO	11
2.1 Il modello di calcolo	11
2.2 Creazione del dominio di calcolo	12
2.3 Taratura del modello.....	15
2.3.1 <i>Evento del 2014</i>	18
2.3.2 <i>Evento del 2000</i>	26
2.4 Analisi dell’anomalia predittiva per le maggiori portate: cambio di regime.....	32
CAPITOLO 3. ANALISI DEGLI EFFETTI LEGATI ALLA MOBILITÀ DEL FONDO	37
3.1 Il trasporto solido.....	37
3.2 Effetti legati all’erosione e allo scavo del fondo	40
3.2.1 <i>Modello erosivo</i>	40
3.2.2 <i>Modello con trasporto solido in sospensione</i>	46
3.3 Forme di fondo: le dune.....	51
3.3.1 <i>Inquadramento teorico delle dune di fondo</i>	52
3.3.2 <i>Caratteristiche delle dune rilevate nella batimetria del 2005</i>	56
3.3.3 <i>Modellazione delle dune</i>	59
3.3.4 <i>Evoluzione delle dune durante la piena</i>	67
3.3.5 <i>Modellazione idrodinamica con calcolo dinamico della resistenza al fondo</i>	71
CONCLUSIONI.....	79
APPENDICE. MODELLO NUMERICO E CREAZIONE DEL RETICOLO DI CALCOLO	83
A.1 Il modello di calcolo 2DEF	83
A.1.1 <i>Le equazioni del moto</i>	83
A.1.2 <i>Il reticolo di calcolo</i>	85
A.1.3 <i>Le simulazioni numeriche</i>	86

A.2	Il software <i>Incidenze</i>	87
A.3	Creazione del dominio di calcolo	88
A.3.1	<i>Creazione Geo</i>	88
A.3.2	<i>Quotatura</i>	92
A.3.3	<i>Condizioni al contorno</i>	94
	BIBLIOGRAFIA	99

Indice delle figure

Figura 1.1: Bacino idrografico del fiume Po.....	5
Figura 1.2: Immagine satellitare del tratto di interesse del fiume Po, fra la sezione di Borgoforte e la foce nel Mare Adriatico. Nella foto sono indicate le posizioni delle stazioni di rilevamento AIPO per il monitoraggio idrografico.....	8
Figura 2.1: Il dominio di calcolo del tratto compreso fra Pontelagoscuro e la foce nel Mare Adriatico, sovrapposto all'ortofoto del territorio circostante. Il colore rappresenta la quota del fondo rispetto al livello del medio mare.....	12
Figura 2.2: Rappresentazione dell'intero dominio di calcolo, da Borgoforte alla foce. Mappa a colori della quota del fondo degli elementi di calcolo.	14
Figura 2.3: Vista aerea del tratto Borgoforte- Pontelagoscuro. I segnalini rossi indicano le stazioni di monitoraggio utilizzate per la taratura. I segnalini azzurri invece sono posti in corrispondenza della confluenza degli affluenti.	17
Figura 2.4: Propagazione della piena del 2014, andamento temporale dei livelli registrati durante l'evento nelle stazioni di Borgoforte, Sermide, Ficarolo e Pontelagoscuro.	19
Figura 2.5: Foto del ponte ferroviario a Pontelagoscuro durante l'evento del novembre 2014.	19
Figura 2.6: Nella tabella è indicato il livello di criticità segnalato nelle varie stazioni idrometriche per ciascuno dei tre eventi verificatisi nel novembre del 2014. Il colore giallo indica una condizione di criticità ordinaria, l'arancione moderato e il rosso elevato	20
Figura 2.7: Evento di piena del 2014: idrogramma di portata alla sezione di Borgoforte, ottenuto dalla scala delle portate AIPO e imposto come condizione al contorno di monte nelle simulazioni idrodinamiche.	21
Figura 2.8: Evento di piena del 2014: idrogrammi di portata degli affluenti Secchia e Panaro, stimati dalla catena modellistica in tempo reale di ARPA-Emilia-Romagna e imposti come condizione al contorno di portata in ingresso nelle simulazioni idrodinamiche.	22
Figura 2.9: Evento di piena del 2014. Confronto fra l'idrogramma di portata simulato (blu) e quello ricostruito con la scala delle portate sulla base dei livelli idrometrici registrati a Pontelagoscuro (giallo). Il pallino rosso indica la misura diretta effettuata da ARPA-Veneto il 20 novembre.	23
Figura 2.10: Evento di piena del 2014. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Borgoforte.	24

Figura 2.11: Evento di piena del 2014. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Sermide.....	24
Figura 2.12: Evento di piena del 2014. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Ficarolo.	25
Figura 2.13: Evento di piena del 2014. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Pontelagoscuro.....	25
Figura 2.14: Piena dell’ottobre 2000. Andamento temporale dei livelli registrati durante l’evento nelle stazioni di Borgoforte, Sermide, Ficarolo e Pontelagoscuro.	26
Figura 2.15: Evento alluvionale ottobre 2000: Po a Pontelagoscuro.....	27
Figura 2.16: Evento di piena dell’ottobre 2000. Idrogramma di portata a Borgoforte, ottenuto da scala delle portate e imposto come condizione al contorno di monte.....	28
Figura 2.17: Idrogrammi degli affluenti Secchia e Panaro simulati durante l’evento di piena del fiume Po dell’autunno del 2000.	28
Figura 2.18: Piena dell’ottobre 2000. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Borgoforte.	30
Figura 2.19: Piena dell’ottobre 2000. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Sermide.....	30
Figura 2.20: Piena dell’ottobre 2000. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Ficarolo.	31
Figura 2.21: Piena dell’ottobre 2000. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Pontelagoscuro.....	31
Figura 2.22: Cambio di regime idrodinamico nella piena del 2014. Livelli misurati e simulati nella sezione di Borgoforte mantenendo costante (linea blu) e variando il parametro di scabrezza per gli istanti successivi all’ostante critico (linea grigia verticale).	34
Figura 2.23: Cambio di regime idrodinamico nella piena del 2014. Livelli misurati e simulati nella sezione di Sermide mantenendo costante (linea blu) e variando il parametro di scabrezza per gli istanti successivi all’ostante critico (linea grigia verticale).	34
Figura 2.24: Cambio di regime idrodinamico nella piena del 2014. Livelli misurati e simulati nella sezione di Ficarolo mantenendo costante (linea blu) e variando il parametro di scabrezza per gli istanti successivi all’ostante critico (linea grigia verticale).	35
Figura 2.25: Cambio di regime idrodinamico nella piena del 2014. Livelli misurati e simulati nella sezione di Pontelagoscuro mantenendo costante (linea blu) e variando il parametro di scabrezza per gli istanti successivi all’ostante critico (linea grigia verticale).	35

Figura 3.1: Condizione di incipienza al trasporto, soglia critica secondo diverse formulazioni proposte in letteratura.....	39
Figura 3.2: Mappa a colori indicativa dello scavo previsto al termine della piena del 2014, nel tratto fra Sermide e Polesella. Si nota come i livelli di erosione maggiore si prevedono in corrispondenza di curve e restringimenti. Nel tratto di valle lo scavo risulta significativo in maniera più diffusa.	42
Figura 3.3: Profondità dello scavo simulato con il modello erosivo al termine della piena del 2014, dettaglio della porzione di fiume in corrispondenza della sezione di Pontelagoscuro, evidenziata nell'immagine.	42
Figura 3.4: Risultati forniti dal modello erosivo nella sezione di Pontelagoscuro per la piena del 2014. Sono riportati l'entità dell'erosione e la portata transitante in questa sezione durante l'intero evento.....	43
Figura 3.5: Andamento temporale del livello nella stazione di Borgoforte durante la piena del 2014. Nel grafico sono messi a confronto i valori misurati (rosso), quelli simulati dal modello a fondo fisso (blu) e quelli ottenuti con il modello erosivo (tratteggio verde).	44
Figura 3.6: Andamento temporale del livello nella stazione di Sermide durante la piena del 2014. Nel grafico sono messi a confronto i valori misurati (rosso), quelli simulati dal modello a fondo fisso (blu) e quelli ottenuti con il modello erosivo (tratteggio verde).	44
Figura 3.7: Andamento temporale del livello nella stazione di Ficarolo durante la piena del 2014. Nel grafico sono messi a confronto i valori misurati (rosso), quelli simulati dal modello a fondo fisso (blu) e quelli ottenuti con il modello erosivo (tratteggio verde).	45
Figura 3.8: Andamento temporale del livello nella stazione di Pontelagoscuro durante la piena del 2014. Nel grafico sono messi a confronto i valori misurati (rosso), quelli simulati dal modello a fondo fisso (blu) e quelli ottenuti con il modello erosivo (tratteggio verde).	45
Figura 3.9: Rappresentazione del profilo di concentrazione dei sedimenti secondo Rouse $c(y)$ e del profilo di velocità $u(y)$ in un canale a pelo libero. y_a individua lo straterello all'interno del quale si ha trasporto al fondo.	47
Figura 3.10: Andamento temporale del livello nella sezione di Pontelagoscuro. Confronto fra valori misurati (rosso), modello a fondo fisso (linea blu continua) e modello con trasporto in sospensione (linee tratteggiate) considerando diverse ipotesi con riferimento all'intensità del deposito.	51
Figura 3.11: Evoluzione delle forme di fondo al crescere della portata, schema dei possibili regimi di fondo.....	52

Figura 3.12: Diagramma che mostra l'andamento del parametro di Shields τ_0 (somma del contributo di grano τ_{0g} e delle forme di fondo τ_{0f}) all'aumentare della velocità U della corrente. È riportato inoltre l'andamento del coefficiente di friction C_f , pari a $C - 2$	54
Figura 3.13: Schema della generazione di dissipazioni aggiuntive in caso di presenza di dune sul fondo, dovute al distacco dello strato limite e alla formazione di zone di ricircolo a valle di ciascuna duna.....	54
Figura 3.14: Diagramma di Van Rijn per la caratterizzazione del fondo alveo. In funzione del parametro delle particelle D^* (o del diametro dei sedimenti d_{50}) e del parametro T è possibile classificare la tipologia di forme di fondo che si instaura in un corso d'acqua.....	56
Figura 3.15: Rilievo ombreggiato a scala di colore di alcune porzioni del dominio a valle di Pontelagoscuro. Si nota la presenza diffusa delle dune di fondo.	57
Figura 3.16: Esempio di un segmento estratto dal DEM. La linea blu rappresenta l'andamento delle quote, lungo la quale si sono identificati creste e cavi, contrassegnati dai pallini colorati.	59
Figura 3.17: Andamento dell'ampiezza media delle dune rilevate nel DEM del tratto compreso fra Pontelagoscuro e l'incile del Po di Goro.	59
Figura 3.18: Andamento dell'ampiezza delle dune per una portata variabile da 400 a 1000 m^3/s in un punto del dominio (punto 4 della Figura 3.27). Confronto fra l'utilizzo della soglia critica proposta da Brownlie e da Van Rijn.	61
Figura 3.19: Distribuzione spaziale del parametro T , per un valore di portata di 600 m^3/s , nel "tratto 1" da Pontelagoscuro a Polesella.	62
Figura 3.20: Distribuzione spaziale del parametro T , per un valore di portata di 600 m^3/s , nel "tratto 2" da Polesella all'incile del Po di Goro.	62
Figura 3.21: Distribuzione spaziale dell'ampiezza delle dune calcolate, per un valore di portata di 600 m^3/s , nel "tratto 1" da Pontelagoscuro a Polesella.....	63
Figura 3.22: Confronto tra ampiezza delle dune estratte del rilievo e simulata per una portata di 600 m^3/s lungo l'intero tratto 1.	63
Figura 3.23: Zoom di una curva presente nel tratto 1. Il colore delle maglie triangolari indica l'ampiezza media delle dune da modello, mentre il colore dei segmenti indica quella estratta dal DTM.....	64
Figura 3.24: Distribuzione spaziale dell'ampiezza delle dune calcolate, per un valore di portata di 800 m^3/s , nel "tratto 2" da Polesella all'incile del Po di Goro.....	65

Figura 3.25: Confronto dell'ampiezza delle dune estratte del rilievo e quelle simulate con una portata di 800 m ³ /s lungo l'intero tratto 2.	65
Figura 3.26: Zoom su una porzione del tratto 2. Ampiezza delle dune calcolate (mappa a colori di sfondo) e di quelle rilevate (colore delle linee) per tre diversi valori di portata, (a) 600 m ³ /s, (b) 800 m ³ /s, (c) 1000 m ³ /s. È evidente come per il valore di portata minore le dune calcolate siano troppo piccole, per la portata maggiore sovrastimino invece quelle estratte dal DTM. La migliore corrispondenza si verifica per la portata di 800 m ³ /s, caso (b).	66
Figura 3.27: In figura sono evidenziati i quattro punti presi in considerazione per l'analisi dell'andamento temporale delle dune.	68
Figura 3.28: Andamento temporale dell'ampiezza delle dune per i 4 punti scelti durante l'evento di piena del 2014. È riportato inoltre l'idrogramma di portata fluente a Pontelagoscuro (linea tratteggiata arancione) ed evidenziato l'istante di cambio regime individuato nel capitolo precedente.	70
Figura 3.29: Andamento temporale della lunghezza delle dune per i 4 punti scelti durante l'evento di piena del 2014. È riportato inoltre l'idrogramma di portata fluente a Pontelagoscuro (linea tratteggiata arancione) ed evidenziato l'istante di cambio regime individuato nel capitolo precedente.	70
Figura 3.30: Andamento temporale del coefficiente di Gauckler-Strickler per i 4 punti scelti durante l'evento di piena del 2014. È riportato inoltre l'idrogramma di portata fluente a Pontelagoscuro (linea tratteggiata arancione) ed evidenziato l'istante di cambio regime individuato nel capitolo precedente.	70
Figura 3.31: Andamento temporale del livello nella sezione di Pontelagoscuro per la piena del 2014. Confronto fra valori misurati (rosso), modello a fondo fisso (linea blu continua) e modello con calcolo dinamico della resistenza al moto (linee tratteggiate) considerando diverse ipotesi con riferimento alla conduttanza irrisolta C_u	74
Figura 3.32: Andamento temporale del livello nella sezione di Polesella per la piena del 2014. Confronto fra valori misurati (rosso), modello a fondo fisso (linea blu continua) e modello con calcolo dinamico della resistenza al moto (linee tratteggiate) considerando diverse ipotesi con riferimento alla conduttanza irrisolta C_u	75
Figura 3.33: Diagramma dell'andamento del coefficiente di Strickler durante l'evento di piena secondo il modello che aggiorna dinamicamente il coefficiente di resistenza. Sono riportati i valori nei 4 punti già individuati al paragrafo 3.3.4. Sono inoltre evidenziati i due istanti temporali in cui si verificano il massimo e il minimo, illustrati poi nelle figure seguenti.	76

Figura 3.34: Diagramma dell'andamento dell'ampiezza delle dune durante l'evento di piena secondo il modello che aggiorna dinamicamente il coefficiente di resistenza. Sono riportati i valori nei 4 punti già individuati al paragrafo 3.3.4. Sono inoltre evidenziati i due istanti temporali in cui si verificano il massimo e il minimo, illustrati poi nelle figure seguenti..... 76

Figura 3.35: distribuzione spaziale dell'ampiezza delle dune (a) e del coefficiente di resistenza (b) al tempo $t=180$ h della simulazione della piena del 2014, effettuata con il calcolo dinamico della resistenza. In tale istante le dune hanno sviluppato un'ampiezza elevata e il coefficiente di Strickler stimato dal modello per ciascuna maglia è fra i minimi valori assunti all'interno dell'intera simulazione. 77

Figura 3.36: distribuzione spaziale dell'ampiezza delle dune (a) e del coefficiente di resistenza (b) al tempo $t=380$ h della simulazione della piena del 2014, effettuata con calcolo dinamico della resistenza. In questo istante, l'ampiezza delle dune è sensibilmente ridotta in buona parte del dominio e il coefficiente di Strickler stimato dal modello per ciascuna maglia risulta sensibilmente incrementato laddove le dune sono maggiormente ridotte. 77

Figura 3.37: A sinistra è possibile vedere i diversi tipi di efflusso, determinati dal confronto dell'energia della corrente a monte e a valle del tronco: efflusso nullo, efflusso libero o rigurgitato. A destra sono raffigurati dei tronchi speciali, elementi unidimensionali inseriti nel dominio schematizzato con elementi bidimensionali..... 86

Figura 3.38: Porzione del dominio di calcolo poco a monte della stazione di rilievo di Sermide, con il DTM sullo sfondo. Nella figura (a) è possibile vedere le polilinee preliminari tracciate in AutoCAD Map. In particolare, il poligono verde identifica il contorno esterno del dominio, le polilinee azzurre seguono l'andamento dell'alveo principale, i poligoni chiusi rossi delimitano gli argini, le linee fucsia sono presenti laddove ci siano delle disomogeneità in termini di quote. Nella figura (b) si vede il risultato finale della triangolazione operato da Incidenze, con una mappa a colori rappresentativa delle quote del fondo. Le polilinee nell'alveo preliminarmente tracciate portano alla creazione di file di maglie nell'alveo che seguono la direzione principale del moto. 89

Figura 3.39: Porzione del dominio di calcolo in corrispondenza della confluenza degli affluenti Mincio e Secchia. Nella figura (a) è possibile vedere le polilinee preliminari tracciate distinguendo le aree con scabrezza differenti, sulla base dell'ortofoto usata come sfondo. Nella figura (b) si vede invece la mesh triangolare ottenuta a partire dalle polilinee. Il colore associato alle maglie è rappresentativo della classe di scabrezza assegnata a ciascuna di esse..... 91

Figura 3.40: Rappresentazione di una porzione di argini presenti nel dominio. I tronchi speciali sono rappresentati dai segmenti gialli. Per ciascuno di essi è raffigurata una fascia colorata che indica la lunghezza di sfioro di quell'elemento, il colore invece è indice la quota sommitale di sfioro. 94

Figura 3.41: Porzione del dominio raffigurante il Delta del Po e le sue bocche. I pallini giallo-rossi indicano a quali nodi è stata imposta la condizione al contorno sui livelli. 96

Indice delle tabelle

Tabella 2.1: Coefficienti di scabrezza secondo Strickler, di primo tentativo, per le quattro categorie di maglie individuate.....	16
Tabella 2.2: Tabella relativa ai principali eventi storici registrati fra il 1994 e il 2014. Per ciascun evento sono riportati i livelli misurati h [m sullo zero idrometrico], la portata Q [m^3/s] e tempi di ritorno T [anni] relativi ai colmi registrati lungo l'asta principale.	18
Tabella 2.3: Coefficienti di scabrezza secondo Strickler assegnati alle maglie del reticolo di calcolo, ottenuti dal processo di taratura sull'evento di piena del 2014. Sono distinti in base alle categorie di maglie (alveo di magra, alveo, aree golenali e ponti) e alla collocazione geografica delle maglie all'interno del reticolo di calcolo.	22
Tabella 2.4: Livelli idrometrici, per le diverse stazioni di monitoraggio, al di sopra dei quali il modello manifesta una evidente sovrastima dei livelli, a suggerire un cambio di regime idrodinamico.	32
Tabella 2.5: In tabella è riportato, per l'alveo di magra, il valore di taratura (iniziale) del coefficiente di Gauckler-Strickler e quello modificato affinché i livelli di picco simulati risultino comparabili a quelli registrati. Nella colonna di destra è indicata la variazione assoluta e percentuale di ciascun tratto.	33
Tabella 3.1: Valori del coefficiente di erosione c e del valore soglia dello sforzo al fondo, τ_s , del modello erosivo per simulare un livello massimo a Pontelagoscuro comparabile a quello misurato.	41
Tabella 3.2: Riepilogo dei principali parametri necessari per lo studio delle forme di fondo nel caso di studio.	61
Tabella 3.3: la tabella riporta la radice dell'errore quadratico medio (RMSE) calcolato per l'ampiezza delle dune calcolate e registrate al variare della portata fluente nel corso d'acqua. In giallo sono evidenziate le condizioni di minimo per il tratto 1 e per il tratto 2.....	67

Tabella 3.4: Per ciascun punto è indicato il valore minimo e massimo del coefficiente di Strickler calcolato tenendo conto dell'evolversi delle dune. È indicata anche la variazione in termini assoluti..... 71

Introduzione

Negli ultimi decenni, grazie ai progressi della ricerca e alla sempre maggiore potenza di calcolo disponibile, sono stati sviluppati modelli e soluzioni sempre più accurati per studiare i problemi idraulici. Nell'ambito dell'idraulica fluviale, oltre ai classici modelli unidimensionali, sono disponibili numerosi modelli idrodinamici bidimensionali in grado di simulare con grande accuratezza e precisione la propagazione delle piene. Alcuni di questi modelli, grazie alla particolare efficienza numerica o alla capacità di sfruttare le potenzialità del calcolo parallelo, possono addirittura trovare applicazione nella previsione delle piene in tempo reale.

Con riferimento allo studio della propagazione delle piene, l'ipotesi di lavoro tutt'ora consolidata è quella di considerare un flusso di acqua pulita (cioè senza la presenza di solidi sospesi) su fondo fisso. In altre parole, il problema idrodinamico della propagazione delle piene nei corsi d'acqua è trattato senza considerare i fenomeni morfodinamici che possono avvenire nel corso di eventi di piena e che sono legati alle dinamiche di trasporto solido e alle variazioni morfologiche di fondo alveo. Questa assunzione risulta valida nel caso di corsi d'acqua con alvei relativamente stabili, per i quali l'uso di modelli a fondo fisso conduce effettivamente a risultati affidabili. D'altra parte, precedenti studi hanno evidenziato come, per esempio nel caso di portate rapidamente variabili e in presenza di un significativo trasporto solido, alcuni meccanismi morfodinamici possono diventare rilevanti e strettamente legati a quelli idrodinamici (Cao, et al., 2017). In questi casi, la simulazione della propagazione delle piene a fondo fisso non risulta in grado di descrivere fedelmente il fenomeno reale, e risulta necessario includere nella modellazione i principali effetti morfodinamici che si verificano nel corso degli eventi di piena.

È il caso, ad esempio, del tratto vallivo del fiume Po, con riferimento al quale i modelli idrodinamici a fondo fisso per la propagazione delle piene mostrano un'accuratezza ridotta nel simulare il reale legame tra portate fluenti e livelli idrometrici (Dazzi, et al., 2021) Ciò è particolarmente evidente nella sezione di Pontelagoscuro, dove è presente una storica stazione idrometrica per il monitoraggio del livello del fiume. Per i maggiori eventi di piena, come quella

dell'ottobre del 2000, le previsioni modellistiche mostrarono (e tutt'ora mostrano) una significativa sovrastima dei livelli di massima piena rispetto a quanto poi misurato dall'idrometro.

La sovrastima dei livelli di massima piena alla sezione di Pontelagoscuro è un aspetto di primaria importanza con riferimento alla gestione delle piene e alle operazioni di protezione civile. Nel corso dell'evento di piena dell'ottobre 2000, infatti, sulla base delle previsioni di piena, le autorità competenti hanno deciso di operare un intervento di emergenza sul ponte ferroviario di Pontelagoscuro. Infatti, le previsioni di piena disponibili indicavano come del tutto probabile che l'acqua arrivasse a lambire tale ponte, con il rischio di intasamento, di sormonto degli argini e di allagamento del territorio ferrarese. L'innalzamento di circa un metro delle travate centrali del ponte, effettuato nella notte del 19 ottobre 2000, si è poi rivelato inutile perché i livelli reali al colmo sono stati significativamente più bassi di quelli previsti.

Ciò che emerge da questo quadro è che, per valori di portata molto elevati, le resistenze al moto nel tratto terminale del Po sembrano ridursi rispetto alle previsioni modellistiche, con un conseguente aumento della capacità di deflusso del fiume. La spiegazione di questo cambio di regime è probabilmente da attribuire ad alcuni fenomeni legati alla movimentazione e al trasporto di particelle solide che compongono il letto del fiume e all'evoluzione del fondo alveo.

Uno dei fenomeni che potrebbe spiegare la ridotta accuratezza delle previsioni modellistiche a fondo fisso è l'erosione del fondo, che può interessare tratti più o meno estesi di alveo e sponde, oltre che i tratti in curva. In caso di regimi eccezionali, l'azione erosiva può risultare notevolmente maggiore rispetto alle condizioni di deflusso ordinarie e potrebbe condurre ad un significativo cambio di conformazione della sezione dell'alveo, con un aumento della sezione liquida e, dunque, della capacità di deflusso del corso d'acqua. L'eventuale abbassamento del fondo, che potrebbe verificarsi durante il transito dei colmi di piena, potrebbe poi essere colmato nella fase calante dell'onda di piena, eludendo la possibilità di trovarne riscontro nelle batimetrie disponibili, che sono tipicamente rilevate durante le fasi di magra.

Un altro aspetto rilevante per giustificare il cambio di regime potrebbe essere legato all'evoluzione delle forme di fondo. L'interazione fra la corrente, i sedimenti da essa trasportati e la morfologia dell'alveo può condurre alla formazione delle dune fluviali, strutture morfologiche di fondo che si ripetono regolarmente sul letto del fiume. La loro presenza influenza notevolmente l'andamento della corrente in termini di resistenza, e quindi di livello idrometrico, dal momento che la presenza di dune può generare separazione della corrente e dissipazioni di energia localizzate (Paarlberg, et al., 2009). L'ampiezza delle dune, per valori di

portata crescenti, può incrementare fino a raggiungere anche un'altezza pari ad un terzo del tirante idrico (o profondità della corrente). Tuttavia, oltre un certo regime di portata, per la quale le dune raggiungono la massima ampiezza, può instaurarsi una fase di transizione che vede la progressiva riduzione della loro dimensione fino ad eventualmente un ritorno a condizioni di letto piano (Naqshband & Hoitnik, 2020). Il possibile abbattimento delle forme di fondo per i massimi valori di portata potrebbe spiegare la riduzione della resistenza al moto e l'incremento di capacità di deflusso. La corretta previsione dell'andamento delle forme di fondo al variare del regime idrometrico del fiume può essere quindi un aspetto fondamentale per una corretta descrizione di eventi di piena.

La mancata descrizione dei fenomeni morfodinamici nei modelli idraulici di propagazione delle piene è probabilmente legata anche a difficoltà di tipo pratico. Si pensi ad esempio all'evoluzione delle forme di fondo in un alveo naturale a seconda del regime idraulico. La descrizione di questo fenomeno è strettamente legata al processo di trasporto solido, che è caratterizzato da grande variabilità spaziale e temporale e fortemente stocastico. Sono state per questo sviluppate negli anni diverse formule empiriche, basate ad esempio sul superamento di una soglia critica (Van Rijn, 1984) (Brownlie, 1981), ma non c'è piena coerenza tra i diversi approcci proposti, per cui il fenomeno rimane complesso da modellare. Aumentare il numero di processi descritti da un modello porta inevitabilmente all'introduzione di un maggior numero di parametri, quindi a una maggiore difficoltà di taratura e di verifica del modello stesso. A differenza degli esperimenti di laboratorio, nel caso di fiumi naturali un'altra difficoltà sta nel fatto di dover considerare scale spaziali e temporali molto diverse. Il risultato è il significativo aumento dell'onere computazionale necessario per descrivere tratti estesi di un corso d'acqua.

Questo lavoro di tesi si propone di analizzare gli effetti di alcuni fenomeni legati alla mobilità del fondo nel tratto di Po a valle di Pontelagoscuro, mediante l'utilizzo di un modello idro-morfo dinamico bidimensionale. Con i dati a disposizione si cercherà di valutare l'importanza relativa di alcuni dei diversi processi citati in precedenza.

La struttura della tesi è così articolata:

- Capitolo 1: contiene un inquadramento territoriale dell'area di studio. È realizzata una breve descrizione delle caratteristiche generali del fiume Po nel suo complesso, successivamente un'analisi più dettagliata dell'area di interesse e dei dati a disposizione per questo lavoro.
- Capitolo 2: riporta la modellazione idrodinamica a fondo fisso. È descritto il modello di calcolo bidimensionale usato, il processo di creazione del dominio di calcolo,

nonché la sua quotatura e taratura rispetto a degli eventi di riferimento. La simulazione a fondo fisso porterà a delle discrepanze, evidenziate alla fine di questo capitolo.

- Capitolo 3: dopo un breve inquadramento teorico sul trasporto solido, vengono presi in considerazione, singolarmente, alcuni dei processi morfodinamici che potrebbero essere coinvolti nell'apparente cambio di regime idrodinamico nel fiume Po. Sono valutati per via modellistica gli effetti sul regime idrodinamico causati dal possibile approfondimento dell'alveo come conseguenza dall'azione erosiva della corrente, e quelli legati alla variazione delle forme di fondo, in particolare delle dune di fondo
- Conclusioni: sono riportate le considerazioni finali evinte dalle analisi effettuate nei capitoli precedenti. Sono inoltre suggerite delle altre possibili future analisi utili per una comprensione più approfondita del problema analizzato.
- Appendice: contiene una descrizione più dettagliata del modello numerico impiegato. È inoltre descritto in maniera più approfondita il procedimento di creazione del dominio di calcolo

Capitolo 1. Inquadramento territoriale

1.1 Il fiume Po

Il fiume Po, con i suoi 652 *km* di lunghezza, è il più lungo corso d'acqua italiano. Nasce dal Monviso in Piemonte, attraversa l'intera Pianura Padana toccando le regioni Lombardia, Emilia-Romagna e Veneto, per poi sfociare nel Mar Adriatico con un ampio delta. Il suo bacino idrografico (circa 74'000 *km*²) è il più esteso in Italia: copre infatti un quarto dell'intero territorio italiano. Le aree ad esso afferenti includono i versanti meridionali delle Alpi, i versanti settentrionali degli Appennini e buona parte della Pianura Padana: oltre alle già citate regioni italiane, la sua area di affluenza comprende anche Liguria, Val d'Aosta, Provincia autonoma di Trento e alcuni territori francesi e svizzeri. Complessivamente l'area del bacino comprende oltre 3200 comuni, per un totale di circa 16 milioni di persone residenti.

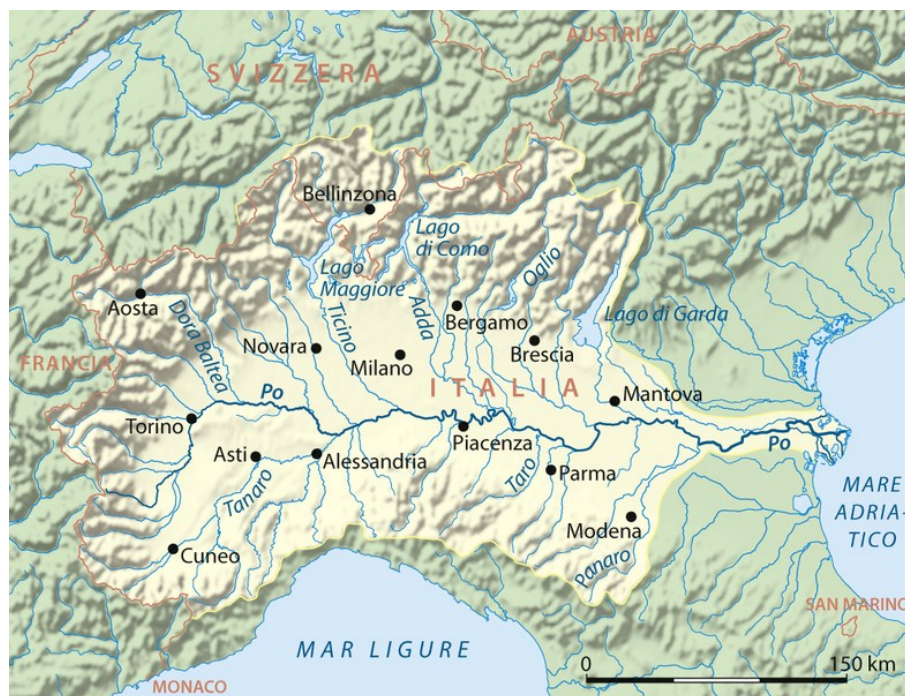


Figura 1.1: Bacino idrografico del fiume Po.

Lungo il suo percorso, fra sorgente e foce, il fiume Po vanta di ben 141 affluenti, oltre a coinvolgere alcuni dei grandi laghi dell'Italia settentrionale: Lago di Garda, Lago Maggiore, Lago di Como e Lago d'Iseo.

Il corso del Po viene comunemente suddiviso in quattro tratti principali (Marchi, 1984):

- Alto Po: il tratto compreso fra le sorgenti e la confluenza con il Ticino;
- Medio Po: la porzione che si estende fra la confluenza con il Ticino e quella del Mincio;
- Basso Po: la parte delimitata dalla confluenza del Mincio e l'incile con il Po di Goro, a Serravalle;
- Delta: il tratto finale, da Serravalle allo sbocco in mare.

Il delta del Po è costituito da sei rami: Po di Maistra, Po di Venezia, Po di Pila, Po di Tolle, Po di Gnocca e Po di Goro.

Per quanto riguarda i deflussi, alla sezione di Pontelagoscuro, sezione strumentata che caratterizza il tratto di Basso Po, la portata media stimata si aggira attorno ai $1'500 \text{ m}^3/\text{s}$, con un minimo annuale medio di $600 \text{ m}^3/\text{s}$ e un massimo annuale medio di $5'800 \text{ m}^3/\text{s}$. Il picco massimo storico invece supera i $10'000 \text{ m}^3/\text{s}$.

1.2 Area di studio e dati utilizzati

Il lavoro di tesi ha come obiettivo l'analisi del singolare comportamento idraulico del tratto di Basso Po a valle della sezione di Pontelagoscuro, sezione che prende il nome da una frazione del comune di Ferrara. L'affidabilità di qualsiasi analisi e la possibilità di giungere a conclusioni fondate, dipendono ovviamente dalla quantità e dalla qualità di dati a disposizione. Le attività di gestione e di monitoraggio del Fiume Po non sono poche ma, considerando l'importanza di tale corso d'acqua, sono probabilmente insufficienti, soprattutto con riferimento al tratto di Basso Po e del Delta.

Tra gli enti coinvolti nelle attività di monitoraggio, l'agenzia Interregionale per il fiume Po (AIPo) cura la gestione del bacino idrografico principale, occupandosi dunque di sicurezza idraulica, demanio idrico e navigazione fluviale. Importante è il suo ruolo nella gestione degli eventi di piena, per i quali si occupa delle attività di previsione e di monitoraggio. AIPo gestisce infatti la maggior parte delle stazioni di rilevamento presenti lungo l'intera lunghezza del fiume, che garantiscono una misurazione regolare dei livelli idrometrici in continuo (Figura 1.2). Per quanto riguarda il tratto terminale del Po, le sezioni di maggiore interesse sono quelle di Pontelagoscuro e di Polesella, mentre le stazioni di Ariano, Cavanella e Pila sono collocate

all'interno del delta. A monte di Pontelagoscuro si contano le stazioni idrometriche di Ficarolo, Sermide e Borgoforte.

In prossimità di alcune delle sezioni dotate di stazione idrometrica, sono occasionalmente effettuate misurazioni di portata, sulla base delle quali AIPo elabora le cosiddette scale delle portate (o scale di deflusso); per scala delle portate si intende una relazione biunivoca che associa ai livelli misurati una stima della portata fluente nella stessa sezione. L'applicazione della scala delle portate ai valori di livello misurati nel corso di eventi di piena fornisce una stima dell'idrogramma di portata transitato in tale sezione. Purtroppo, AIPo non mette a disposizione di enti esterni i dati di portata ottenuti per misura diretta.

Occorre subito segnalare un grosso limite di tale procedura. Infatti, durante il transito di un'onda di piena in tratti di fiume caratterizzati da pendenze modeste, gli effetti del moto vario influenzano significativamente la relazione che lega il livello con la portata fluente. Tipicamente, nella fase crescente della piena, ad un dato livello è associata una portata maggiore rispetto a quella associata allo stesso livello idrometrico durante la fase discendente della piena. Infatti, nella fase crescente della piena, il gradiente del livello idrometrico nella direzione del moto (ossia la pendenza motrice) è maggiore rispetto a quanto si verifica nella fase decrescente, quando il colmo, situato a valle della sezione stessa, riduce il valore di tale gradiente. Questo effetto del moto vario si traduce in una relazione non più biunivoca tra livello e portata, generando il cosiddetto "cappio di piena" sul grafico livello-portata associato.

Poiché nelle sezioni del tratto vallivo del Po, e in particolare a Pontelagoscuro, gli effetti del moto vario non sono trascurabili, non è possibile ottenere stime di portata accurate mediante applicazione della scala delle portate. Di conseguenza, per poter analizzare con maggiore accuratezza l'idrodinamica di tale tratto di fiume, è stato necessario analizzare mediante modello idrodinamico non solo il tratto a valle di Pontelagoscuro, ma anche una porzione più a monte, così da aumentare il numero di misure di livello e stime di portata da usare come base di studio, e di aumentare di conseguenza l'affidabilità del modello stesso. Complessivamente, si è analizzato la porzione del corso d'acqua compresa fra Borgoforte, in provincia di Mantova, e la foce nel Mare Adriatico, quindi di fatto l'intero tratto di Basso Po e il Delta. Alla sezione di Borgoforte, infatti, i fenomeni di moto vario sono meno significativi e le stime di portata più affidabili.

L'estensione dell'area di studio a monte della sezione di Pontelagoscuro comporta la necessità di conoscere i contributi di portata dei diversi affluenti presenti nel tratto. I dati degli idrogrammi di portata di Secchia e Panaro sono quelli stimati da una delle catene modellistiche

idrologico-idrauliche che, presso ARPA Emilia-Romagna, simulano la formazione e la propagazione delle piene nell'intero bacino del Po in tempo reale. Il Mincio, in caso di piena, viene disconnesso dal sistema Po in corrispondenza del manufatto di Governolo, per cui non convoglia in Po alcuna portata.



Figura 1.2: Immagine satellitare del tratto di interesse del fiume Po, fra la sezione di Borgoforte e la foce nel Mare Adriatico. Nella foto sono indicate le posizioni delle stazioni di rilevamento AIPO per il monitoraggio idrografico.

L'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po (ADBPO) è l'ente pubblico responsabile della pianificazione del corso d'acqua. ADBPO ha messo a disposizione diversi dati necessari per l'allestimento del modello idrodinamico, in particolare: il rilievo batimetrico a risoluzione di 2 m commissionato da ADBPO nel 2004-2005 (dalla confluenza con il fiume Ticino all'incile del Po di Goro); il modello digitale del terreno (DTM) commissionato da AIPO nel 2015, a risoluzione di 1 m, relativo alle aree emerse contenute all'interno degli argini maestri; le sezioni batimetriche rilevate da AIPO tra il 2004 e il 2005 (da Moncalieri al mare) e nel 2017 (delta).

Al fine di garantire una corretta manutenzione dell'alveo fluviale e pianificare una gestione dei suoi sedimenti, ADBPO ha effettuato delle analisi granulometriche sull'asta fluviale principale e su alcuni dei suoi principali affluenti appenninici (ADBPO, 2007a). Ha quindi stilato una relazione suddividendo l'asta fluviale del basso Po in cinque tronchi, aventi caratteristiche dal punto di vista geomorfologiche differenti:

- a) "Tronco A", compreso fra confluenza Arda e confluenza Enza;
- b) "Tronco B", compreso fra confluenza Enza e confluenza Oglio;
- c) "Tronco C", compreso fra confluenza Oglio e confluenza Mincio;
- d) "Tronco D", compreso fra confluenza Mincio e Pontelagoscuro;
- e) "Tronco E", compreso fra Pontelagoscuro e la diramazione del Po di Goro.

I tronchi che ricadono nella zona di studio sono il Tronco D ed E.

Il “Tronco D” è caratterizzato da un alveo di magra da monocursale a pluricursale, da rettilineo a sinuoso, localmente meandriforme. Sono presenti in questo tratto barre longitudinali (isole) relativamente ben sviluppate. L'alveo e le barre sono costituiti prevalentemente da sabbie e limi sabbiosi, le sponde sono invece impostate in depositi sabbiosi molto fini, limose o in limi sabbiosi. Questo tratto è caratterizzato da golene pensili relativamente ristrette fra gli argini maestri. La pendenza media dell'alveo è di 0.011%.

Il “Tronco E” ha un alveo da monocursale da rettilineo a sinuoso, relativamente canalizzato. L'alveo di magra e le forme di fondo sono costituite prevalentemente da sabbie molto fini e limi sabbiosi, le sponde sono impostate in depositi limosi o sabbiosi molto fini, limosi. Qui le golene sono pensili e molto strette fra gli argini, localmente in frodo. In questo tratto la pendenza media dell'alveo è dell'ordine dello 0.002%, molto inferiore a quella della pianura circostante, che si attesta attorno allo 0.012%.

Capitolo 2. Modellazione idrodinamica a fondo fisso

2.1 Il modello di calcolo

Per questo studio si sono effettuate delle simulazioni idrodinamiche nel tratto di corso d'acqua d'interesse utilizzando il modello matematico 2DEF, sviluppato dal dipartimento ICEA dell'Università di Padova. Tale modello risolve, con una tecnica agli elementi finiti, una versione modificata delle equazioni di *De Saint Venant*, che permette di descrivere la propagazione bidimensionale delle onde lunghe in acque basse all'interno di domini parzialmente asciutti.

L'area di studio del modello è discretizzata attraverso un reticolo di calcolo non strutturato, a maglie triangolari, per le quali lo schema numerico è bidimensionale mediato sulla verticale. È tuttavia possibile inserire nel reticolo di calcolo anche elementi unidimensionali, eventualmente accoppiati agli elementi triangolari, per riprodurre ad esempio una rete di canali minori presente nel dominio. Per questi elementi vengono risolte delle equazioni del moto di tipo unidimensionale. Inoltre, il modello consente di introdurre diversi tipi di «tronchi speciali 1D», particolari elementi unidimensionali che permettono la riproduzione di alcuni specifici effetti idraulici quali:

- soglie e traverse;
- condotti in pressione;
- paratoie per la regolazione di portate e livelli;
- impianti idrovori;
- porte vinciane.

I tronchi speciali 1D, in questo lavoro, sono stati impiegati per rappresentare le arginature presenti all'interno delle aree golenali. Gli argini sono stati in questo caso assimilati a delle soglie sfioranti: qualora il livello in alveo, nel corso della simulazione, superi la quota sommitale dell'argine, i tronchi speciali 1D simulano la tracimazione verso le cosiddette "golene chiuse".

Una descrizione più approfondita del modello 2DEF e del suo funzionamento è riportata in Appendice A.1.

2.2 Creazione del dominio di calcolo

Per studiare la propagazione di alcuni eventi di piena che si sono verificati nel tratto di Po di interesse è innanzitutto necessario definire il dominio da rappresentare nel modello. Devono essere schematizzate nel modello stesso tutte quelle aree coinvolte nella propagazione dell'onda di piena. Si è deciso di concentrare l'analisi sull'alveo principale e sulle aree golenali racchiuse all'interno degli argini maestri, avendo questi ultimi delle quote sommitali sufficientemente alte da impedire l'allagamento delle zone circostanti anche nelle condizioni più gravose. Ai fini della presente analisi, non è previsto dunque che il fiume possa esondare.

All'interno degli argini maestri sono presenti degli altri argini minori. Questi ultimi delimitano delle porzioni di golene chiuse, caratterizzate da superfici anche piuttosto estese, in grado di invasare volumi notevoli in caso di eventi di piena del Po. In condizioni ordinarie il corso d'acqua si mantiene all'interno dell'alveo principale e con gli eventi di piena va a bagnare le golene più prossime, ma qualora si instaurino dei livelli maggiori la portata transitante nel fiume va ad invadere anche queste zone, che contribuiscono quindi alla laminazione dell'onda di piena. La rappresentazione nel modello di queste aree è quindi necessaria per una fedele riproduzione dei fenomeni di propagazione delle piene nel tratto di basso Po.

Il modello del tratto vallivo del Po, a valle di Pontelagoscuro, era già disponibile, realizzato nell'ambito di studi precedenti finalizzati alla redazione del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) dell'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po. Da questo modello, che comprendeva le aree esterne al fiume e potenzialmente allagabili, si è estratta la parte di dominio relativa all'alveo principale, comprensiva dei rami principali costituenti il Delta del Po: Po di Pila, Po di Tolle, Po di Maistra, Po di Gnocca, Po di Goro.

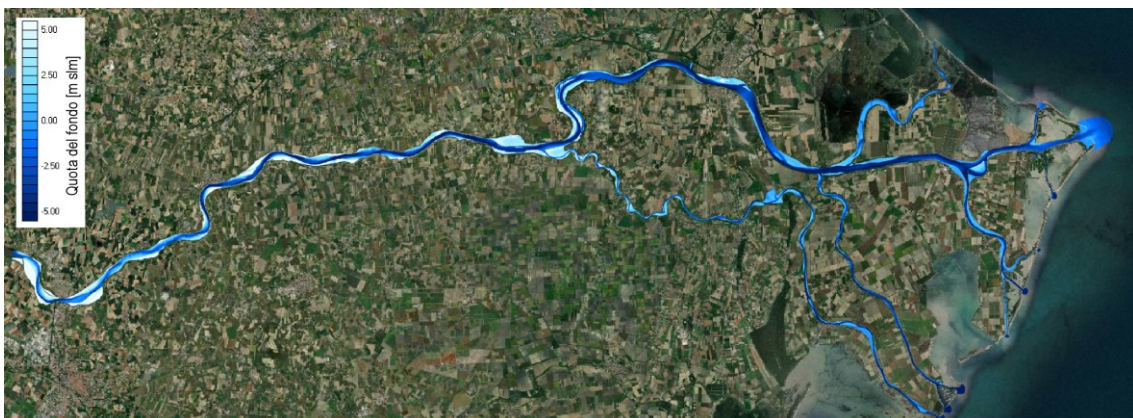


Figura 2.1: Il dominio di calcolo del tratto compreso fra Pontelagoscuro e la foce nel Mare Adriatico, sovrapposto all'ortofoto del territorio circostante. Il colore rappresenta la quota del fondo rispetto al livello del medio mare.

Come riportato nel Paragrafo 1.2, per ottenere una migliore taratura del modello e stime più robuste e accurate della portata transitante nel tratto vallivo del Po, si è ritenuto necessario estendere il dominio di calcolo a monte di Pontelagoscuro, fino a Borgoforte. All'interno di questo tratto sono presenti tre affluenti: il Mincio in sinistra idrografica, il Secchia e il Panaro in destra idrografica. Il tratto terminale di questi corsi d'acqua è stato anch'esso inglobato nel dominio di calcolo.

Dopo aver schematizzato l'area con una opportuna mesh triangolare e aver generato i tronchi speciali per la schematizzazione degli argini golenali, si è provveduto a quotare tutte le maglie e i tronchi speciali impiegati nella descrizione del dominio. Per il processo di quotatura si sono utilizzati i dati forniti da AIPo, che nel 2005 ha realizzato un modello digitale dell'alveo e del terreno, a maglia 2 m, ottenuto abbinando rilievi batimetrici per la parte sommersa e rilievi laser-scanner per la parte emersa.

Infine, la simulazione di eventi di piena mediante modello idrodinamico necessita dell'imposizione di un'opportuna condizione iniziale e delle condizioni al contorno. Le condizioni al contorno richieste in questo caso sono tre: delle condizioni al contorno a monte, a valle e in corrispondenza degli affluenti. Il modello 2DEF consente di assegnare a specifici nodi del dominio di calcolo una delle seguenti condizioni:

- andamento temporale della portata;
- andamento temporale del livello;
- scala delle portate.

Per il caso di studio, si è assegnato un'idrogramma di portata in ingresso nella sezione di monte a Borgoforte (derivato dalla scala delle portate ufficiale di AIPo), e nella sezione di monte degli affluenti Secchia e Panaro (derivato dal modello di previsione piene in uso presso ARPA-Emilia-Romagna), mentre si sono imposti i livelli di marea in corrispondenza delle bocche del Delta (sezioni di valle).

La descrizione più approfondita della creazione del dominio di calcolo, della sua quotatura e dell'imposizione delle condizioni al contorno è riportata in Appendice, al paragrafo A.3.

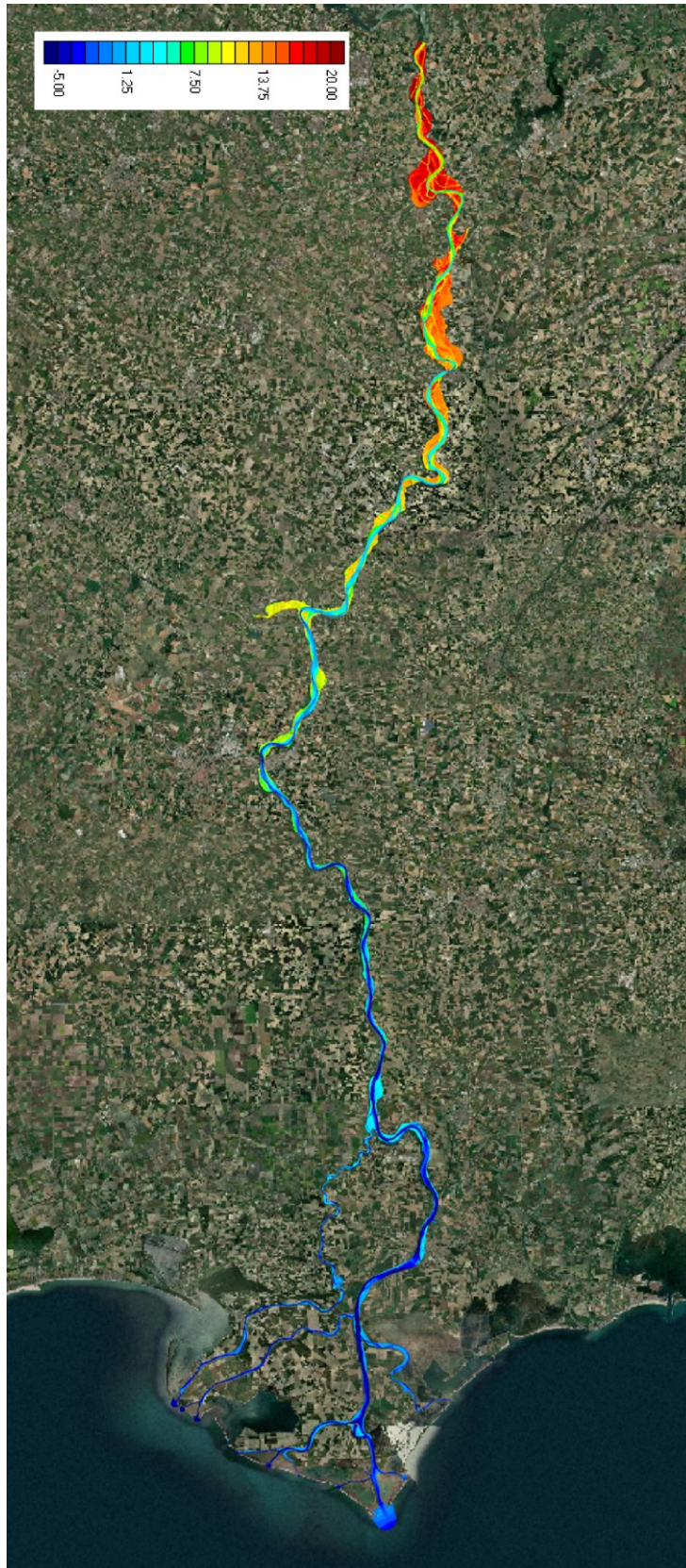


Figura 2.2: Rappresentazione dell'intero dominio di calcolo, da Borgoforte alla foce. Mappa a colori della quota del fondo degli elementi di calcolo.

2.3 Taratura del modello

Oltre alla creazione del reticolo di calcolo, all'assegnazione delle quote del terreno agli elementi che lo compongono, e all'assegnazione delle condizioni al contorno, la simulazione idrodinamica di eventi di piena richiede di specificare, per ogni elemento di calcolo, un parametro di resistenza necessario, appunto, per la stima delle resistenze al moto.

Nel modello 2DEF, la resistenza al moto è espressa secondo la formulazione di Gauckler-Strickler:

$$q = K_S \cdot Y^{5/3} \cdot j^{1/2} \quad (2.1)$$

dove $q [m^2/s]$ è la portata specifica (per unità di larghezza), $Y [m]$ è la profondità della corrente (in ipotesi di sezione larga, il tirante rappresenta anche il raggio idraulico, rapporto fra area e perimetro bagnato), $j [-]$ è la pendenza della linea dell'energia, $K_S [m^{1/3}/s]$ è il coefficiente di scabrezza secondo Strickler.

Per poter ottenere dal modello risultati affidabili, è necessario operare in primo luogo un processo di taratura del modello, ossia identificare la distribuzione spaziale dei coefficienti di scabrezza, da assegnare alle maglie del reticolo di calcolo, che ben rappresenti le reali resistenze al moto, in modo tale che la propagazione dell'onda di piena riprodotta dal modello sia fedele a quella reale.

All'interno del dominio sono presenti zone che forniscono resistenze al moto molto differenti. Sono state perciò definite diverse classi di scabrezza, assegnate a diversi elementi di calcolo sulla base della porzione di dominio rappresentate dalle singole maglie. Ad ogni classe di scabrezza è associato un valore del coefficiente di Strickler. Le categorie identificate sono:

- alveo di magra: a questo gruppo appartengono tutte le maglie che compongono quella porzione di alveo sempre bagnata, anche per valori di portata molto esigua;
- alveo: rientrano in questa categoria aree che in condizioni di magra possono risultare asciutte, ma non appena i livelli salgono diventano parte del corso principale. Sono aree prevalentemente non vegetate, o in maniera limitata.
- aree golenali: sono le aree esterne all'alveo, invase solo occasionalmente, in concomitanza di piene significative. Sono aree vegetate, molto irregolari. Soprattutto le aree delle golene chiuse sono spesso adibite alla coltivazione o ad altre attività agricole.
- ponti: sono costituiti dalle maglie poste in corrispondenza di attraversamenti stradali o ferroviari. La presenza di pile in alveo costituisce un ostacolo alla corrente, che è stato in questo modello schematizzato attribuendo un valore di scabrezza ridotto a queste aree.

Alle diverse classi, sono stati assegnati dei valori di scabrezza di primo tentativo, come riportato nella seguente tabella.

Gruppo di maglie	$K_S [m^{1/3}/s]$
Alveo di magra	40
Alveo	35
Aree Golenali	30
Ponti	13

Tabella 2.1: Coefficienti di scabrezza secondo Strickler, di primo tentativo, per le quattro categorie di maglie individuate.

La procedura di taratura è la seguente. Per un dato evento di piena, si è imposta come condizione al contorno l'idrogramma di portata relativo alla sezione di Borgoforte, come descritto precedentemente, e si è cercato di individuare la combinazione di parametri di scabrezza tale per cui i livelli simulati dal modello in corrispondenza delle sezioni strumentate siano il più possibile coerenti con quelli registrati dai diversi idrometri. In questa prima fase, si è fatto riferimento alla serie oraria dei livelli misurati da quattro stazioni idrometriche: Borgoforte, Sermide, Ficarolo e Pontelagoscuro.

Nel tratto di Po in analisi, caratterizzato da pendenza ridotte, transita una corrente lenta, ossia in regime sub-critico. Per questo tipo di corrente, l'idrogramma di portata rappresenta un'onda che si propaga da monte verso valle; i parametri di resistenza ne influenzano essenzialmente la velocità di propagazione. Al contrario, i livelli in una data sezione e per una data portata sono determinati dalla geometria e dalle condizioni di deflusso nel tratto a valle della sezione di interesse. Per tarare il modello si è quindi partiti analizzando la prima sezione a monte, quella di Borgoforte, dove l'idrogramma di portata è noto, e dove i livelli simulati dipendono dalla configurazione dei parametri di resistenza del tratto a valle di Borgoforte. Variando i coefficienti di scabrezza delle categorie di maglie dell'intero tratto a valle di questa sezione, si è trovata la combinazione di valori di K_S che permette la migliore riproduzione dei livelli nella sezione in analisi. Si è passati quindi alla sezione successiva, quella di Sermide. Variando le scabrezze a valle di Sermide si è ottenuta una buona corrispondenza anche per i livelli di questa sezione. La calibrazione è stata condotta con lo stesso procedimento per l'intero dominio di calcolo.



Figura 2.3: Vista aerea del tratto Borgoforte- Pontelagoscuro. I segnalini rossi indicano le stazioni di monitoraggio utilizzate per la taratura. I segnalini azzurri invece sono posti in corrispondenza della confluenza degli affluenti.

Il criterio con cui variare i coefficienti di scabrezza tiene conto di alcune ulteriori considerazioni. L'aumento del valore del coefficiente secondo Strickler in un tratto equivale ad attribuirle una maggiore capacità di deflusso; dunque, la pendenza della superficie sarà inferiore e inferiore sarà anche il livello a monte di questo tratto. Viceversa, ridurre K_S aumenta la resistenza al moto calcolata dal modello e comporta maggiori livelli simulati. Inoltre, il contributo fornito dalle diverse categorie di maglie varia nel tempo. Quando nell'asta fluviale transitano portate esigue, le uniche porzioni di dominio bagnate sono quelle identificate come alveo di magra. Dunque, la scelta del valore ottimale per questa classe di scabrezza è effettuata facendo in modo che il modello riproduca correttamente i livelli (e portate) più piccoli, di magra. Per regimi di portata superiori, inizia ad esserci il contributo delle maglie delle zone individuate come "alveo". Infine, le aree golenali intervengono nel processo di taratura solo dall'istante in cui comincia a scorrere in essa una quantità di portata non trascurabile, per livelli molto alti. Visualizzando i risultati del modello in termini di aree allagate e di profondità della corrente mediante il software di pre- e post-processing denominato *Incidenze*, è possibile individuare le soglie che individuano i diversi cambi di regime, e capire quindi qual è l'intervallo temporale dell'evento di piena in cui è da attendersi che la variazione di scabrezza delle golene produca una variazione dei livelli simulati.

Per il processo di taratura si è fatto riferimento ai due eventi di piena di maggiore rilevanza registrati nell'asta del Po negli ultimi anni (Tabella 2.2). La taratura del modello, ossia

l'assegnazione della scabrezza ottimale alle maglie del reticolo di calcolo, è stata dapprima basata sull'evento di piena verificatosi nel 2014. Successivamente, si è preso in considerazione un secondo evento, la piena del 2000, con il quale è stata verificata la taratura così effettuata.

		Sezioni idrometriche 2/2 (valle)											
		Casalmaggiore			Boretto			Borgoforte			Pontelagoscuro		
Evento		h	Q	T	h	Q	T	h	Q	T	h	Q	T
1994		7.64	11300	-	8.42	10300	31.8	9.35	10800	42.2	3.04	8700	15.1
2000		8.01	12000	-	9.06	11800	76.4	9.92	11800	78.0	3.66	9600	27.6
2002		6.63	8300	-	7.75	8600	11.9	8.64	9200	16.0	2.61	8100	10.1
2009		6.47	8200	-	7.41	8100	9.0	8.07	8200	8.8	2.46	7700	7.8
2014 (13- 16 novembre)		6.34	-	-	7.54	8200	9.5	8.12	8300	9.4	2.70	7850	8.6
2014 (16 -23 Novembre)	Oss	7.01	-	-	8.18	9100	15.7	8.83	9300	16.7	3.00	8350	11.7
	Data	18/11			18/11			19/11			19/11		
	Ora	7:30			20:30			04:00			09:30		

Tabella 2.2: Tabella relativa ai principali eventi storici registrati fra il 1994 e il 2014. Per ciascun evento sono riportati i livelli misurati h [m sullo zero idrometrico], la portata Q [m^3/s] e tempi di ritorno T [anni] relativi ai colmi registrati lungo l'asta principale.

2.3.1 Evento del 2014

Nell'autunno del 2014 si è verificata una piena significativa per il fiume Po, la maggiore osservata dopo quella dell'ottobre 2000. Si tratta in realtà di tre colmi di piena consecutivi, che si sono verificati fra il 5 e il 24 novembre (Zanichelli, et al., 2015).

La prima piena, sviluppatasi fra il 5 e il 10 novembre, è la minore e non particolarmente gravosa. La seconda invece ha interessato l'asta principale del Po dal 13 al 16 e ha portato a stimare una portata al colmo a Pontelagoscuro di $7'900 m^3/s$. Mentre questa ancora si esauriva, si è verificata la terza, fra il 16 e il 24 novembre, con portata al colmo stimata in $8'400 m^3/s$ a Pontelagoscuro e livelli che hanno superato la soglia di criticità elevata in diverse aree.

Nella sezione di Pontelagoscuro è stata effettuata una misura diretta della portata il giorno 20 novembre, dato importante per verificare il modello. È stata effettuata dai tecnici del Servizio Idrologico del Dipartimento Regionale Sicurezza del Territorio di ARPAV, mediante l'utilizzo di un ADCP, uno strumento di misura ad ultrasuoni basato su una tecnologia che sfrutta l'effetto Doppler. In questa occasione, ad un'altezza idrometrica di $2.6 m$ rispetto allo zero idrometrico di Pontelagoscuro (ossia alla quota di riferimento locale dell'idrometro) è stata associata una portata di $8'223 m^3/s$.

La formazione di una piena così rilevante è legata alle significative precipitazioni che si sono verificate in maniera diffusa all'interno dell'intero bacino idrografico del fiume, iniziate il 3 e terminate il 17 novembre. La precipitazione cumulata areale alla sezione di Pontelagoscuro è

stata stimata pari a 290 mm. Anche le piogge, come le piene, si sono verificate in tre occasioni distinte.

Significativo è stato anche il contributo degli affluenti. Il contributo più rilevante per il primo picco è stato quello degli affluenti lombardi, il secondo invece è frutto dell'intero bacino: anche gli affluenti emiliani hanno registrato infatti dei livelli di criticità moderati. Infine, il terzo picco è principalmente imputabile ai corsi d'acqua piemontesi-lombardi.

L'evoluzione della piena è stata tale che le situazioni più gravose si sono registrate nella parte medio-bassa del fiume, a valle di Cremona. Dal Bollettino Po (Figura 2.6) si può vedere come i livelli di criticità elevati sono stati raggiunti infatti in tutte le stazioni di monitoraggio di valle per il secondo e terzo evento.

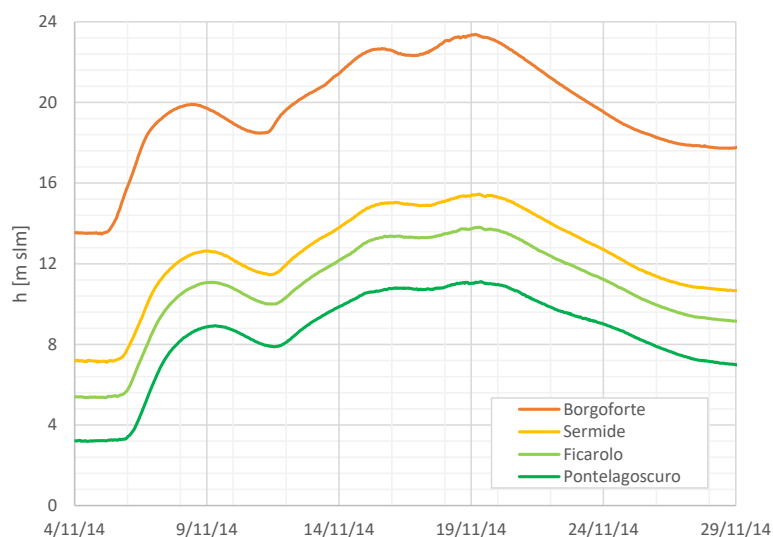


Figura 2.4: Propagazione della piena del 2014, andamento temporale dei livelli registrati durante l'evento nelle stazioni di Borgoforte, Sermide, Ficarolo e Pontelagoscuro.



Figura 2.5: Foto del ponte ferroviario a Pontelagoscuro durante l'evento del novembre 2014.

STAZIONE	EVENTO		
	1	2	3
Carignano			
Torino Murazzi			
S. Sebastiano			
Crescentino			
Casale Monferrato			
Ponte Valenza			
Isola S. Antonio			
Ponte Becca			
Spessa Po			
Piacenza			
Cremona			
Isola Pescaroli			
Casalmaggiore			
Boretto			
Borgoforte			
Sermide			
Pontelagoscuro			
Polesella			
Cavanella			
Ariano			

Figura 2.6: Nella tabella è indicato il livello di criticità segnalato nelle varie stazioni idrometriche per ciascuno dei tre eventi verificatisi nel novembre del 2014. Il colore giallo indica una condizione di criticità ordinaria, l'arancione moderato e il rosso elevato

Nel complesso, l'evento ha determinato l'invaso della maggior parte delle golene chiuse non abitate da nuclei di persone significativi. Il riempimento di questi volumi è stato determinato in alcuni casi dal sormonto degli argini golenali, mentre in altri si sono verificate delle rotture arginali a seguito di intensi effetti erosivi legati al sifonamento, probabilmente aggravati anche dalla presenza di numerose tane di animali. L'invaso delle golene chiuse è in generale avvenuto con un certo anticipo rispetto al colmo di piena. Questo ha ridotto l'efficacia di effetto di laminazione che questi volumi sarebbero in grado di fornire. La condizione ottimale sarebbe infatti che l'invaso avvenga solo in concomitanza del picco di portata.

Le simulazioni dell'evento effettuate per questo studio riproducono un arco temporale più ampio di quello strettamente legato ai tre picchi di piena descritti fino ad ora. Si è deciso di considerare il periodo compreso fra il 04 novembre e il 14 dicembre. In questo modo è descritta anche tutta la fase discendente della piena, fino a dei valori di regime normale. Prima che ciò avvenga, si è verificato un ulteriore modesto picco di piena, che ha portato a raggiungere un valore di portata massima di circa $5'500 \text{ m}^3/\text{s}$ alla sezione di Borgoforte.

2.3.1.1 Condizioni iniziali e al contorno

Come specificato in precedenza, per simulare la propagazione di una piena è necessario imporre una condizione iniziale e delle condizioni al contorno. La condizione iniziale è stata ottenuta mediante una simulazione preliminare che ha portato il sistema ad una condizione di moto permanente con una portata di $953 \text{ m}^3/\text{s}$.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, a monte, in corrispondenza della sezione di Borgoforte, è stato imposto l'andamento della portata nel tempo ricostruita da AIPO a partire dai livelli misurati (Figura 2.7). In questa sezione il valore di portata massimo si raggiunge il 19 novembre e supera i $9'400 \text{ m}^3/\text{s}$. Considerando che, in regime di morbida o piena, i livelli imposti a mare non influenzano i livelli alla sezione di Pontelagoscuro, si è supposto per semplicità che il livello in tutte le bocche del delta si mantenga costante e pari a 0 m s. l. m. per l'intera simulazione.

Le condizioni al contorno per gli affluenti corrispondono invece agli idrogrammi della portata convogliata da Secchia e Panaro (Figura 2.8). Il fiume Secchia mostra i tre colmi nel mese di novembre, anche se il loro andamento è un po' irregolare, per effetto del rigurgito a cui è soggetto il tratto terminale dell'affluente. Il picco massimo raggiunto è pari a circa $220 \text{ m}^3/\text{s}$. Per quasi l'intera durata della simulazione la portata rimane comunque al di sotto dei $150 \text{ m}^3/\text{s}$. L'affluente Panaro contribuisce invece con un picco massimo di portata pari a $230 \text{ m}^3/\text{s}$. Anche l'andamento del Panaro risulta molto irregolare, risentendo dei livelli sempre crescenti nel Po.

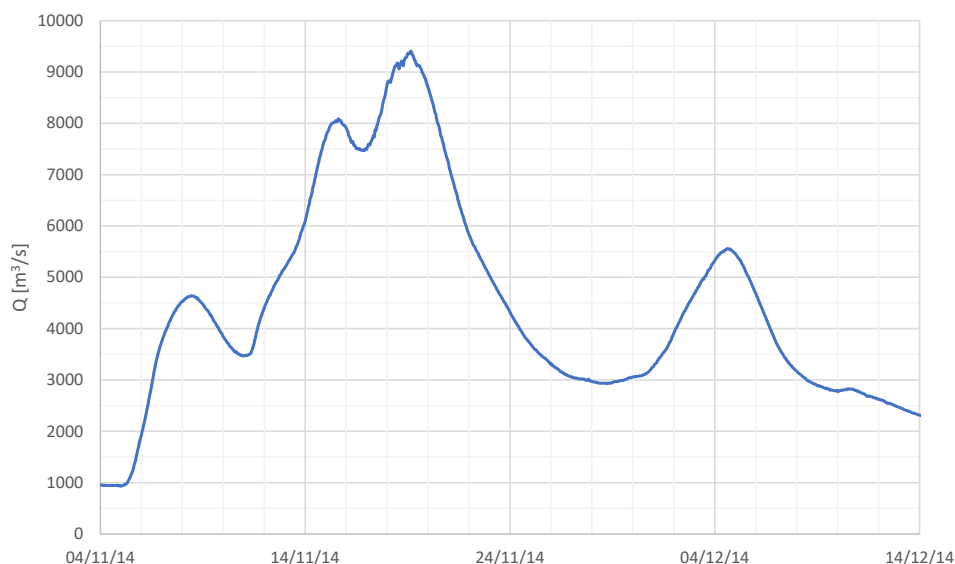


Figura 2.7: Evento di piena del 2014: idrogramma di portata alla sezione di Borgoforte, ottenuto dalla scala delle portate AIPO e imposto come condizione al contorno di monte nelle simulazioni idrodinamiche.

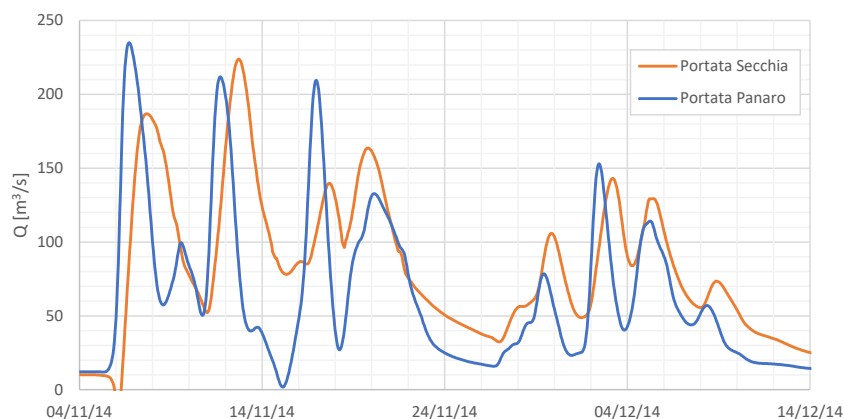


Figura 2.8: Evento di piena del 2014: idrogrammi di portata degli affluenti Secchia e Panaro, stimati dalla catena modellistica in tempo reale di ARPA-Emilia-Romagna e imposti come condizione al contorno di portata in ingresso nelle simulazioni idrodinamiche.

2.3.1.2 Risultati della taratura

I valori ottimali di scabrezza, per categoria e per tratto geografico, ottenuti mediante taratura del modello idrodinamico, sono riportati nella tabella sottostante.

COEFFICIENTI DI SCABREZZA K_S [$m^{1/3}/s$]:				
Da	Borgoforte	Sermide	Ficarolo	Pontelagoscuro
a	Sermide	Ficarolo	Pontelagoscuro	Foce
Alveo magra	27	27	25	30
Alveo	25	50	50	30
Aree golenali	23	50	50	50
Ponti	13	13	13	13

Tabella 2.3: Coefficienti di scabrezza secondo Strickler assegnati alle maglie del reticolo di calcolo, ottenuti dal processo di taratura sull'evento di piena del 2014. Sono distinti in base alle categorie di maglie (alveo di magra, alveo, aree golenali e ponti) e alla collocazione geografica delle maglie all'interno del reticolo di calcolo.

Nelle pagine seguenti sono riportati i confronti fra i livelli simulati (blu) e i livelli registrati (rosso) in ciascuna delle quattro sezioni idrometriche utilizzate per la calibrazione del reticolo di calcolo.

A Borgoforte (Figura 2.10), dove è stata imposta la condizione al contorno sulla portata, la corrispondenza tra livelli simulati e misurati è ottima. La coerenza tra livelli misurati e modellati conferma l'assunzione che la scala delle portate biunivoca, ricavata sperimentalmente per la

sezione di Borgoforte, possa ben descrivere il reale legame tra livelli e portate in tale sezione, e che gli effetti del moto vario (cappio di piena) siano trascurabilmente piccoli.

Nella sezione di Sermide (Figura 2.11) il modello riproduce bene i livelli misurati durante il transito del primo picco, ma si comincia a notare una sovrastima dei livelli nel secondo e soprattutto nel terzo picco, per il quale la discrepanza massima fra livelli simulati e registrati è di 1.1 m. La fase discendente torna ad essere riprodotta in maniera accurata.

Le considerazioni valide per la sezione di Sermide possono essere applicate anche per la stazione di Ficarolo (Figura 2.12). Qui però i livelli simulati risultano maggiori di quelli registrati anche per il primo picco, di circa 0.2 m. La discrepanza di livelli per il terzo picco invece risulta più accentuata, raggiungendo un valore massimo di oltre 1.3 m.

Nella sezione di Pontelagoscuro (Figura 2.13), il modello simula molto bene la fase ascendente iniziale, così come tutto il tratto terminale della simulazione, dopo il 25 novembre. Per le maggiori portate, invece, si osserva la maggiore sovrastima dei livelli: i livelli al colmo del terzo evento sovrastimano quelli registrati di oltre 1.7 m.

Per quanto riguarda i valori di portata alla sezione di Pontelagoscuro, in Figura 2.9 è riportato l'idrogramma di portata nella sezione di Pontelagoscuro ottenuto dalla simulazione numerica (blu), quello ricostruito a partire dai livelli con la scala delle portate formulata da ARPAE (giallo) e la misura diretta effettuata con ADCP in corso di evento. Le differenze sono modeste ed essenzialmente contrate nella fase discendente della piena dopo il picco di maggiore entità.

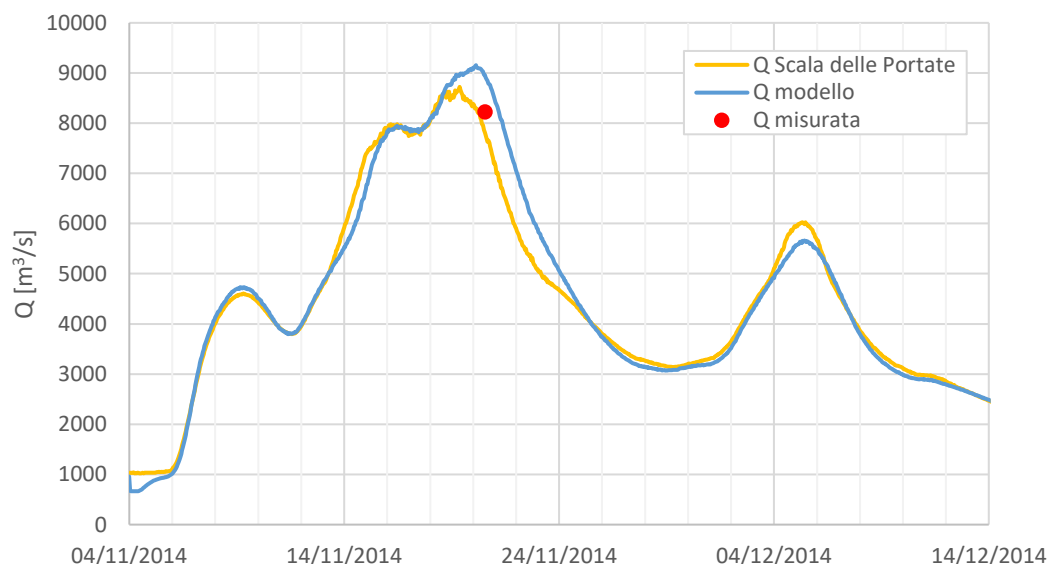


Figura 2.9: Evento di piena del 2014. Confronto fra l'idrogramma di portata simulato (blu) e quello ricostruito con la scala delle portate sulla base dei livelli idrometrici registrati a Pontelagoscuro (giallo). Il pallino rosso indica la misura diretta effettuata da ARPA-Veneto il 20 novembre.

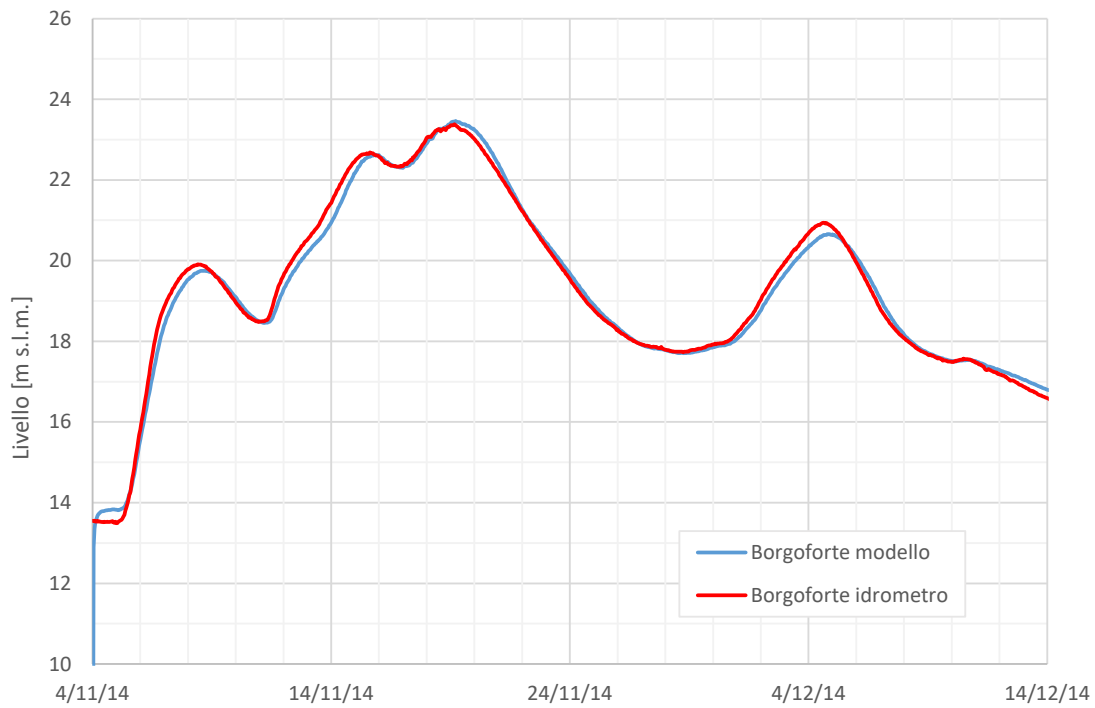


Figura 2.10: Evento di piena del 2014. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Borgoforte.

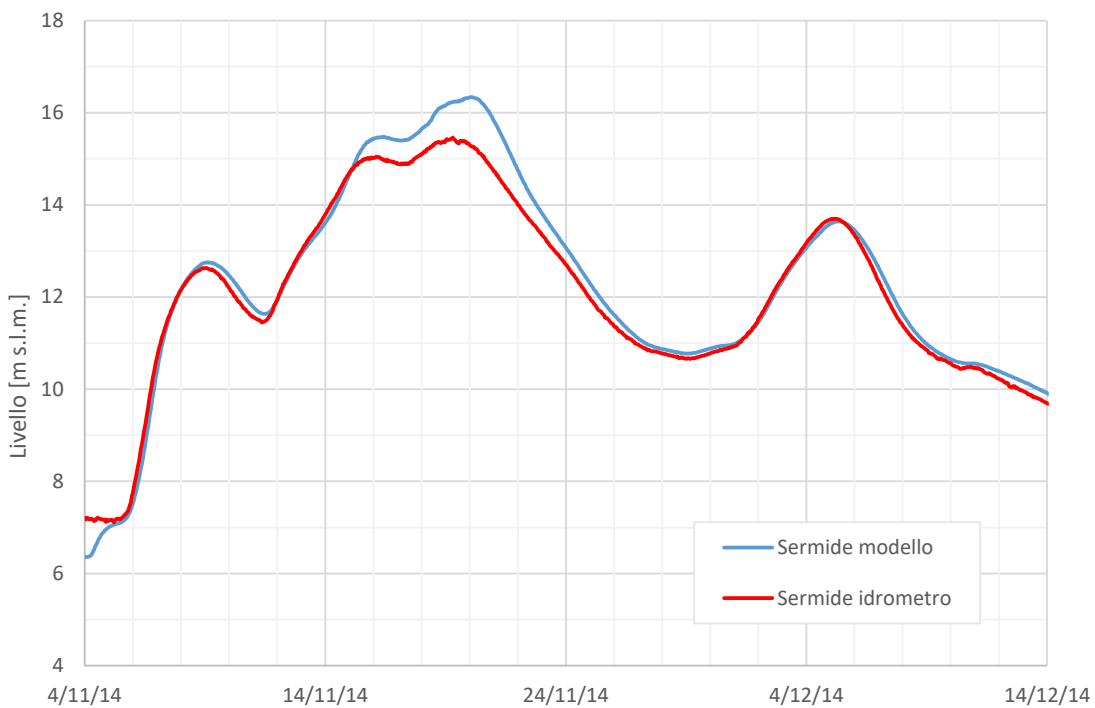


Figura 2.11: Evento di piena del 2014. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Sermide.

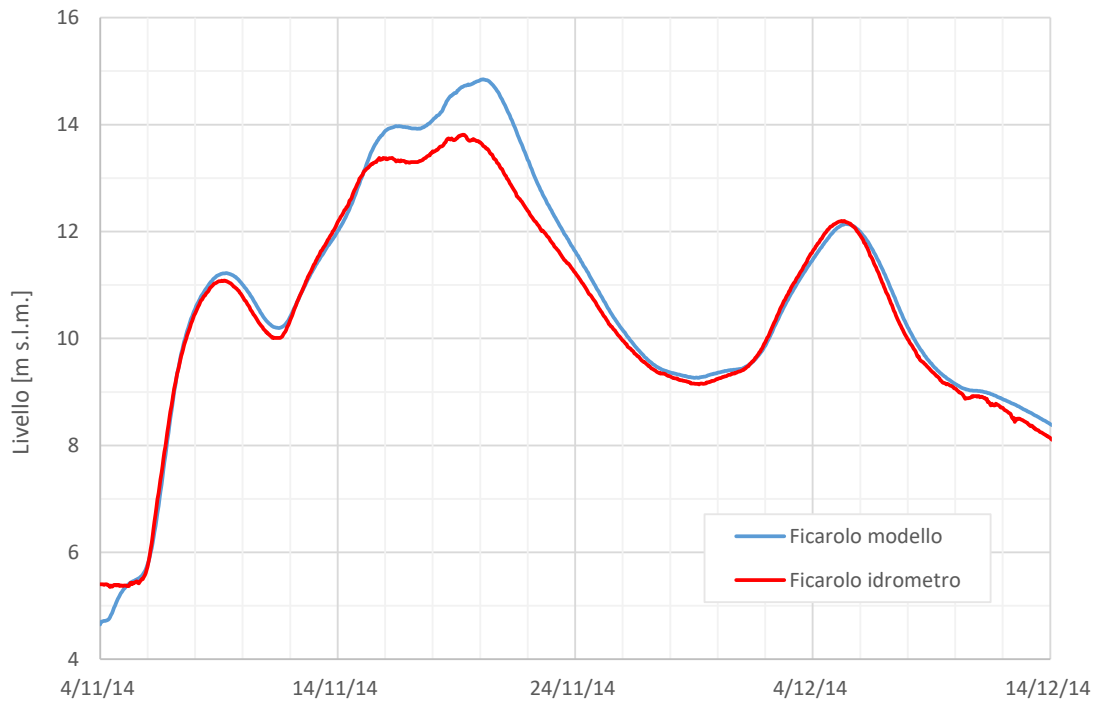


Figura 2.12: Evento di piena del 2014. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Ficarolo.

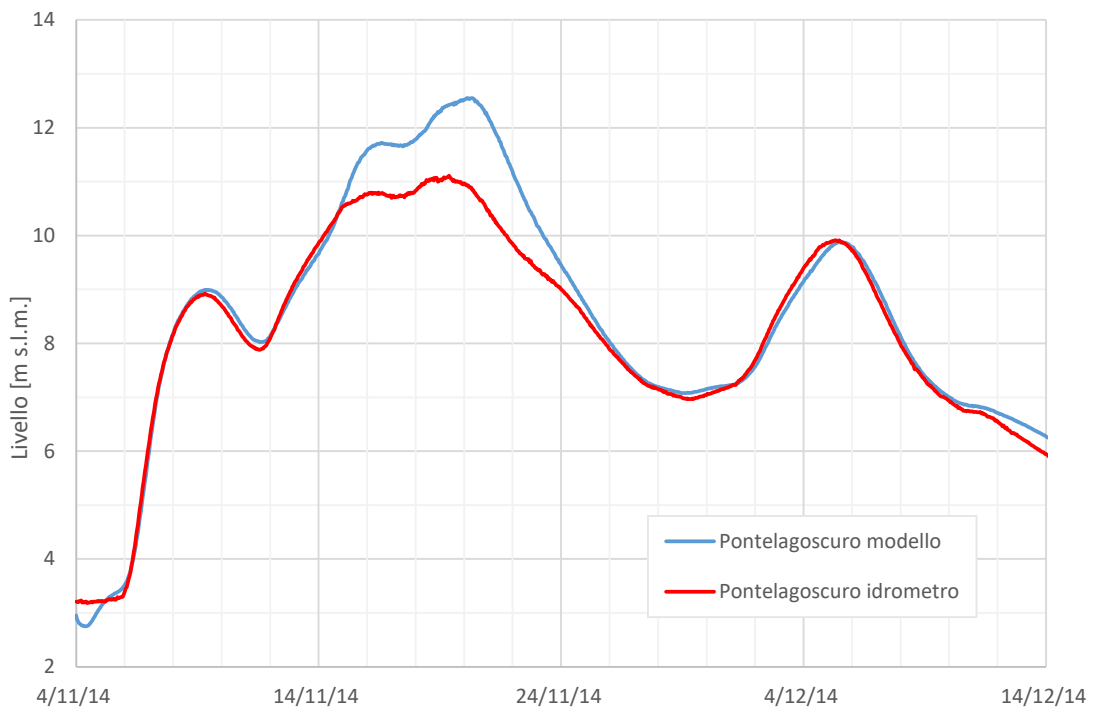


Figura 2.13: Evento di piena del 2014. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Pontelagoscuro.

2.3.2 Evento del 2000

L'evento alluvionale lungo l'asta del Po dell'ottobre 2000 ha avuto carattere di eccezionalità in tutto il suo corso, da Torino al Delta. L'onda di piena si è sviluppata nel mese di ottobre e ha raggiunto il suo colmo a Pontelagoscuro il 20 ottobre, con una portata stimata di oltre $9'600 \text{ m}^3/\text{s}$.

Come accennato nell'introduzione, emblematico è stato l'intervento di emergenza effettuato sul ponte ferroviario a Pontelagoscuro. Sulla base delle previsioni di piena disponibili, nella notte del 19 ottobre le travate centrali del ponte sono state innalzate provvisoriamente di circa un metro, per scongiurare che la corrente arrivasse a interessare l'impalcato del ponte, con il conseguente rischio di intasamento e di sormonto degli argini, con conseguente allagamento del territorio ferrarese. L'onda di piena, in realtà, è risultata inferiore a quella prevista dai modelli idraulici e il dispendioso intervento di emergenza al ponte ferroviario si è di fatto rivelato inutile.

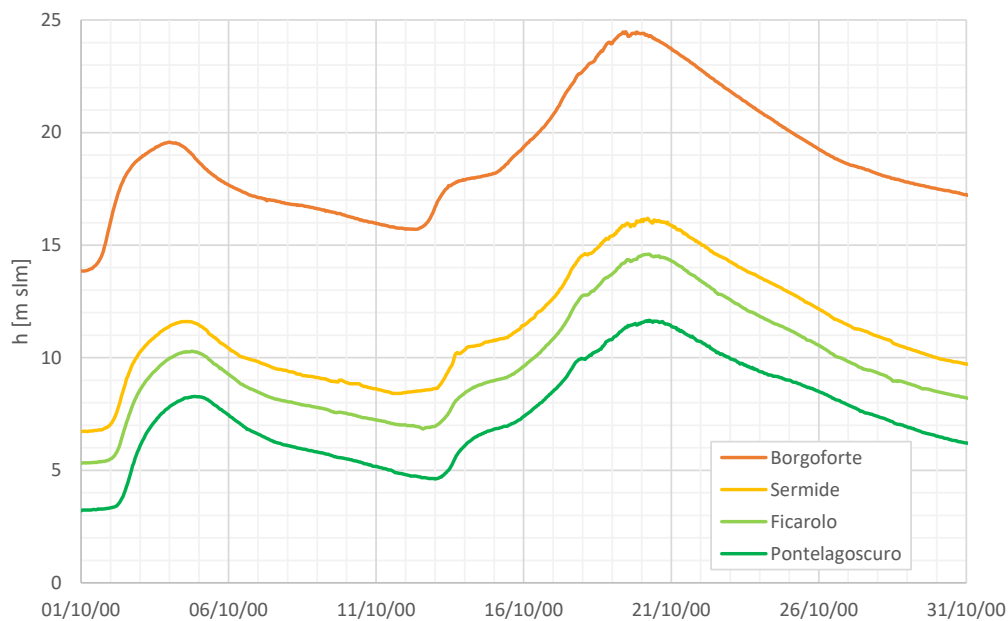


Figura 2.14: Piena dell'ottobre 2000. Andamento temporale dei livelli registrati durante l'evento nelle stazioni di Borgoforte, Sermide, Ficarolo e Pontelagoscuro.

Durante questo evento, la maggior parte delle golene chiuse sono state allagate, contribuendo alla laminazione della piena. In particolare, vista l'entità dell'evento e gli ingenti danni potenziali, si decise di rompere l'argine piccolo di San Benedetto, che proteggeva una golena dove erano presenti anche alcune case ed aziende. La rottura dell'argine ha poi indotto un franamento maggiore e il riempimento di una superficie di circa 800 ha e un volume invasato di oltre $32'000'000 \text{ m}^3$.

La simulazione realizzata ha coperto l'intero mese di ottobre, riproducendo un primo picco di piena con portata al colmo modesta, e l'evento maggiore verificatosi nella seconda parte del mese. Anche di questo secondo picco è stata riprodotta l'intera fase discendente.



Figura 2.15: Evento alluvionale ottobre 2000: Po a Pontelagoscuro.

2.3.2.1 Condizioni al contorno

Come per l'evento precedente, le condizioni iniziali sono state ottenute mediante una simulazione preliminare che ha portato il sistema ad una condizione di moto permanente con una portata di $983 \text{ m}^3/\text{s}$.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, a monte, in corrispondenza della sezione di Borgoforte, è stato imposto l'andamento della portata nel tempo ricostruita a partire dai livelli misurati (Figura 2.16). L'idrogramma mostra che, in corrispondenza del colmo della piena, la portata ha sfiorato i $12'000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Per le condizioni al contorno a valle, come nel caso precedente, è stato imposto un livello pari a 0 m s. l. m. in tutte le bocche del delta per l'intera durata della simulazione.

Le condizioni al contorno per gli affluenti corrispondono invece agli idrogrammi della portata convogliata da Secchia e Panaro (Figura 2.17). Il fiume Secchia risente molto dei livelli nell'asta principale, e il suo moto risulta rigurgitato, con valori di portata negativi. La portata massima si attesta attorno ai $150 \text{ m}^3/\text{s}$. L'affluente Panaro contribuisce invece con un picco massimo di portata di circa $160 \text{ m}^3/\text{s}$. Anche l'andamento del Panaro risulta molto irregolare, risentendo dei livelli sempre crescenti nel Po. Si osserva che i contributi di portata di tali affluenti sono assai modesti rispetto alla portata transitata in Po.

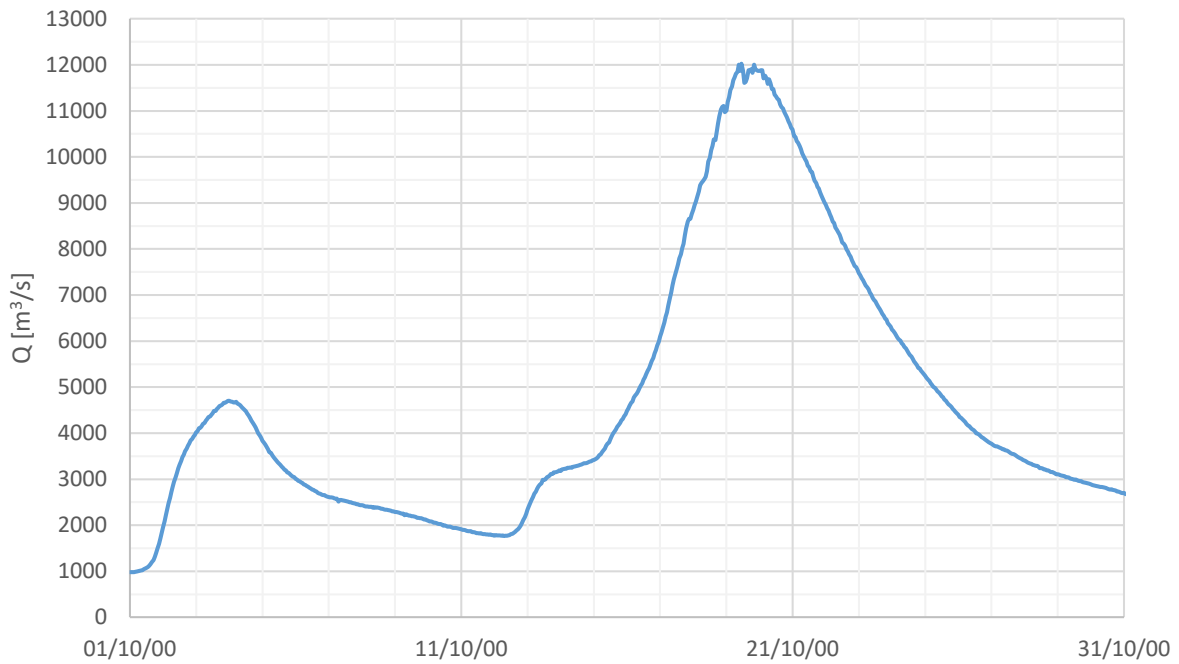


Figura 2.16: Evento di piena dell'ottobre 2000. Idrogramma di portata a Borgoforte, ottenuto da scala delle portate e imposto come condizione al contorno di monte.

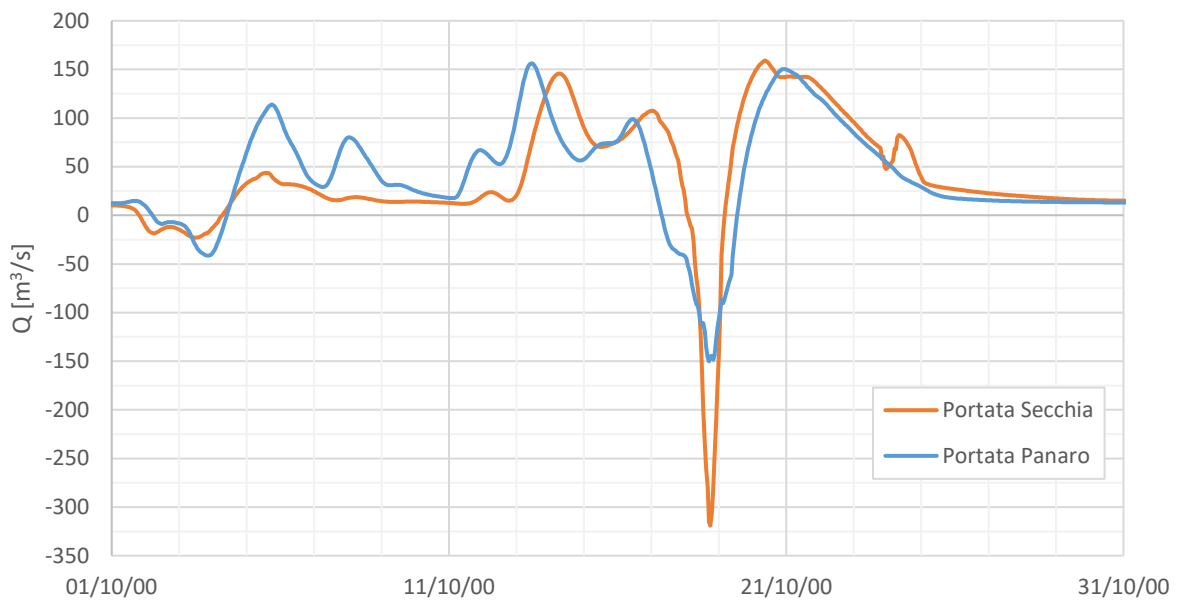


Figura 2.17: Idrogrammi degli affluenti Secchia e Panaro simulati durante l'evento di piena del fiume Po dell'autunno del 2000.

2.3.2.2 Verifica del modello tarato

Di seguito sono riportati i confronti fra i livelli registrati e quelli simulati nelle quattro stazioni di controllo, ottenuti con il modello idrodinamico nel quale i valori di scabrezza sono quelli ottenuti dalla calibrazione effettuata sulla base dell'evento di piena del 2014.

In questo caso, nella sezione di Borgoforte (Figura 2.18) è riprodotto bene l'evento di piena minore e tutta la fase ascendente del secondo massimo; tuttavia, il colmo principale risulta leggermente sovrastimato e ritardato nel tempo. Tale comportamento del modello suggerisce che, per i maggiori valori della portata, l'effetto del moto vario (cappio di piena) non sia del tutto trascurabile. Infatti, a parità di livello, mentre la scala delle portate biunivoca non può che fornire il medesimo valore di portata, è ragionevole supporre che la portata sia inferiore durante la fase calante che non nella fase crescente; ne consegue che la portata stimata è leggermente inferiore a quella effettivamente transitata nella fase crescente della piena o, alternativamente (e più verosimilmente), leggermente sovrastimata nella fase discendente della piena.

Nella sezione di Sermide (Figura 2.19), già al primo colmo di piena, il livello misurato risulta sovrastimato di circa 1 m, e di 2 m in corrispondenza del colmo principale.

Procedendo verso valle, la corrispondenza tra livelli simulati e misurati si riduce ulteriormente, con una discrepanza massima in corrispondenza del colmo e nella sezione di Pontelagoscuro pari a 2.8 m. L'errore si riduce nella fase discendente della piena, ma il modello non riesce a tornare a riprodurre correttamente i livelli misurati, come invece accadeva per l'evento del 2014 (ciò può essere in parte dovuto anche alla sovrastima della portata nella fase discendente dell'idrogramma di piena).

La maggiore discrepanza ottenuta nella simulazione di questo evento di piena, rispetto a quello del 2014, è in parte imputabile alla maggiore entità della piena del 2000, e in parte imputabile alla batimetria. È ragionevole assumere che un evento di piena eccezionale come quello verificatosi nell'autunno del 2000 possa aver modificato significativamente la conformazione dell'alveo. I dati batimetrici utilizzati per ricreare il dominio di calcolo sono dell'anno 2005, dunque successivi rispetto a questo evento di piena. Considerando che fra il 2005 e il 2014 non si sono verificati altri eventi di piena altrettanto importanti, è ragionevole supporre che la batimetria del 2005 offra una buona descrizione della configurazione dell'alveo per l'evento del 2014, ma che possa essere meno rappresentativa della configurazione geometrica dell'alveo sul quale è transitata la piena del 2000.

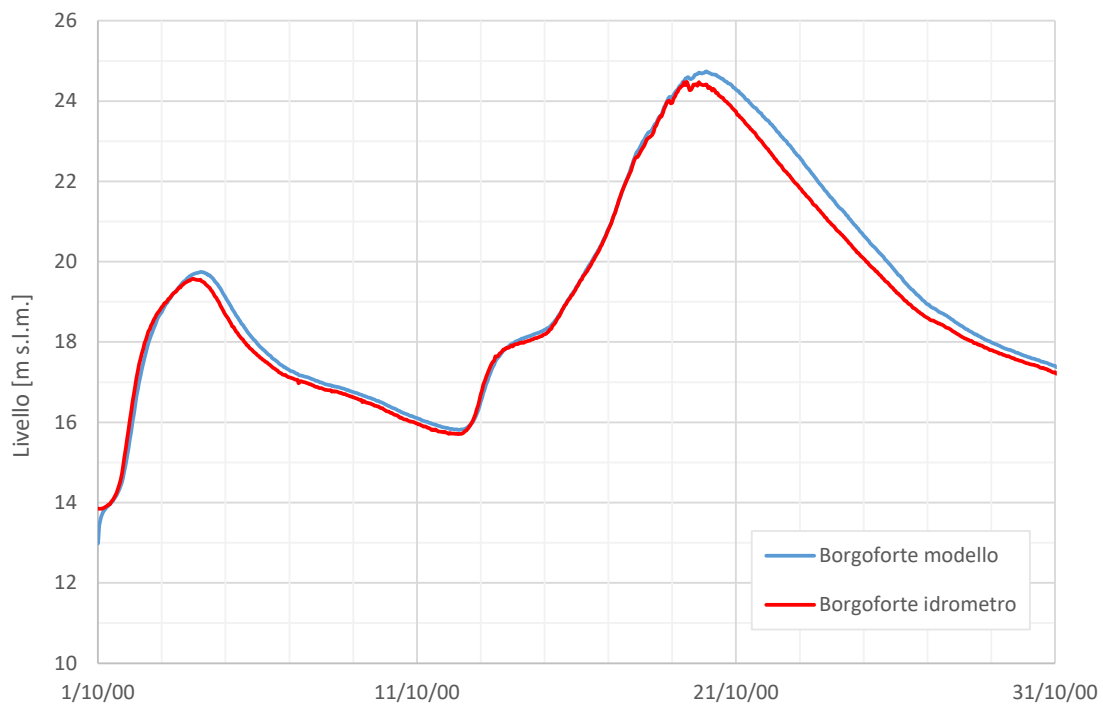


Figura 2.18: Piena dell'ottobre 2000. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Borgoforte.

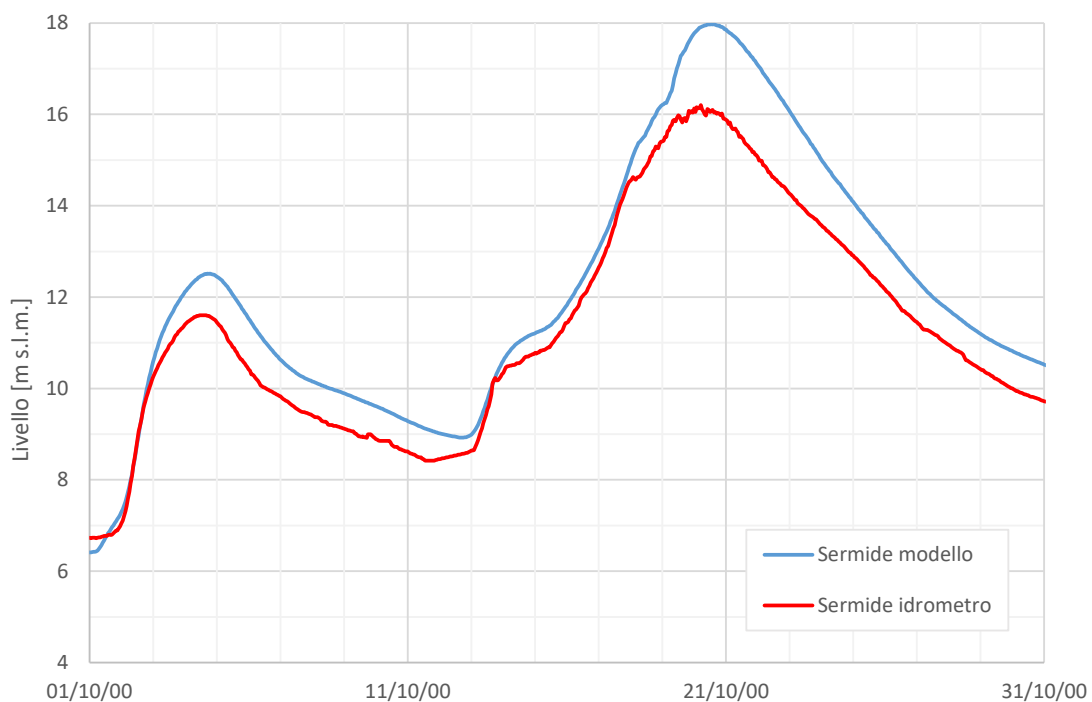


Figura 2.19: Piena dell'ottobre 2000. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Sermide.

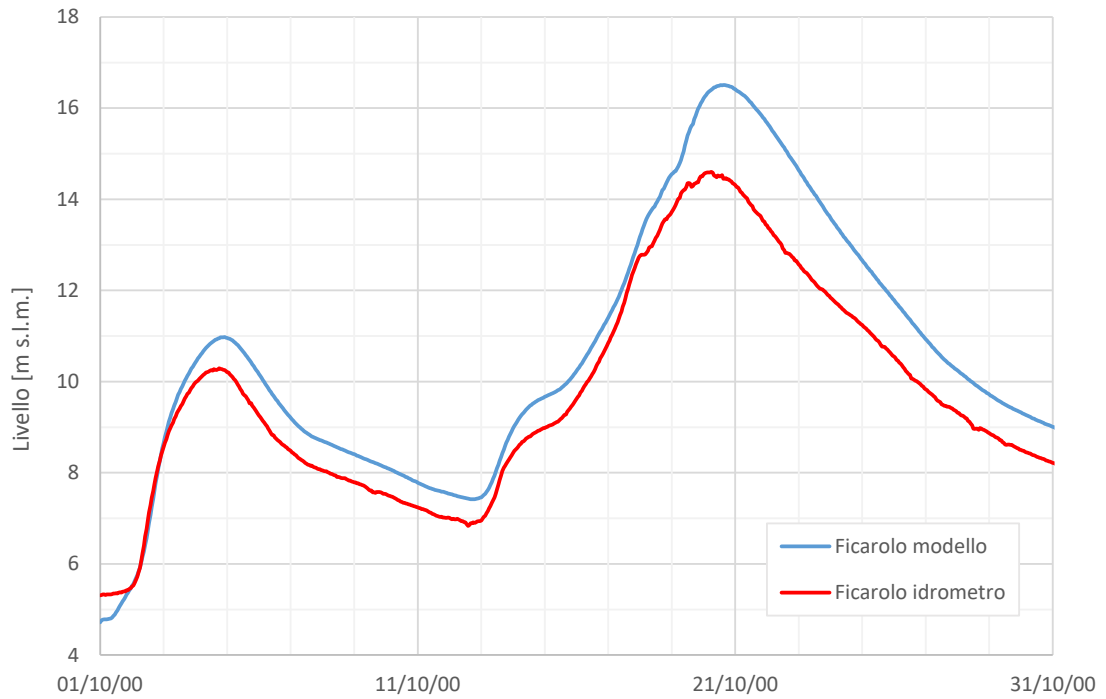


Figura 2.20: Piena dell'ottobre 2000. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Ficarolo.

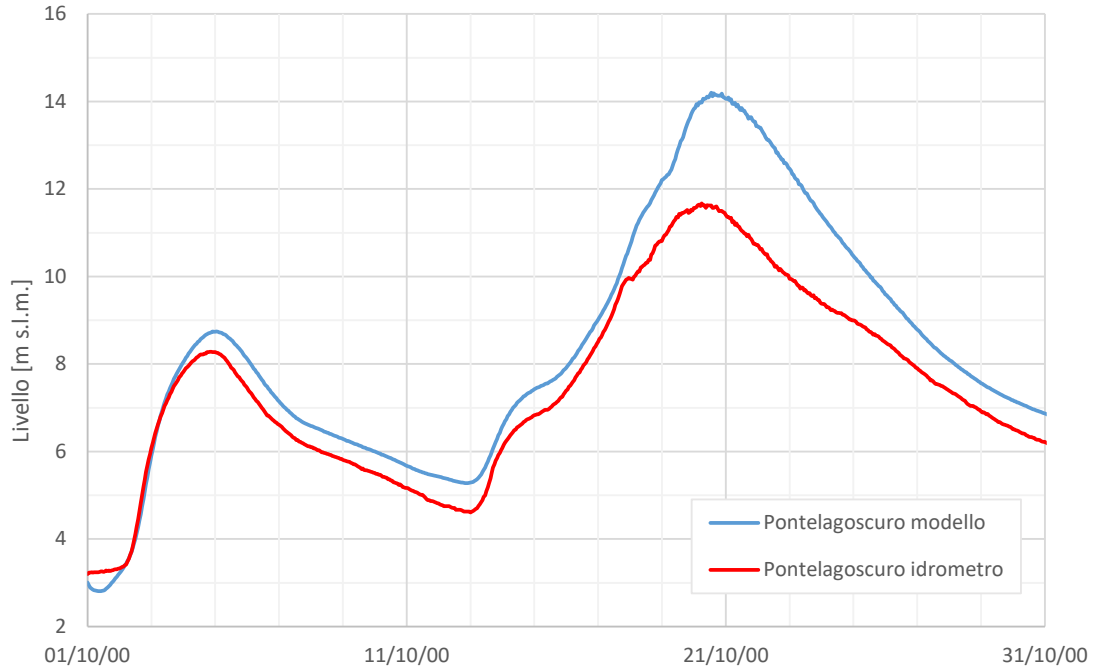


Figura 2.21: Piena dell'ottobre 2000. Confronto grafico dei livelli simulati dal modello (linea blu) e i livelli misurati (linea rossa) nella stazione idrometrica di Pontelagoscuro.

2.4 Analisi dell'anomalia predittiva per le maggiori portate: cambio di regime

Con riferimento agli eventi di piena del 2014 e del 2000, si è osservato che in tutte le sezioni strumentate a valle di Borgoforte il modello fornisce ottimi risultati, in termini di livelli previsti, al di sotto di una soglia di livello, specifica per ogni sezione. Al di sopra di tale soglia, la discrepanza tra dati simulati e misurati, con il modello che sovrastima il livello in modo coerente per tutte le stazioni, sembra suggerire un cambio di regime idrodinamico del fiume Po.

Facendo riferimento all'evento del 2014, si è individuato un particolare istante, qui definito per semplicità *istante critico*, in cui i risultati della simulazione cominciano a divergere significativamente, e piuttosto repentinamente, da quelli registrati (linea verticale in Figura 2.22 e seguenti). Questa deviazione si manifesta in momenti temporalmente molto vicini in tutte le stazioni idrometriche a valle di Borgoforte. Tale istante critico è stato identificato nella notte del 15 novembre 2014 e i livelli misurati nelle diverse sezioni sono riportate nella tabella seguente.

Stazione idrometrica	Livello [m slm] 15/11/2014 03:00
Sermide	14.8
Ficarolo	13.1
Pontelagoscuro	10.5

Tabella 2.4: Livelli idrometrici, per le diverse stazioni di monitoraggio, al di sopra dei quali il modello manifesta una evidente sovrastima dei livelli, a suggerire un cambio di regime idrodinamico.

Superata la soglia appena identificata, ossia nelle fasi successive all'*istante critico*, la capacità di portata del fiume sembra aumentare. Mantenendo fissa la batimetria del fiume, affinché il modello possa simulare correttamente i livelli idrometrici reali oltre tale stato critico, si renderebbe necessaria una modifica dei parametri di scabrezza. Come analisi preliminare, è interessante quantificare la variazione di resistenza che sarebbe necessario apportare nel modello per simulare correttamente i livelli al picco di piena.

Per fare ciò, si sono realizzate delle ulteriori simulazioni con il modello numerico nelle quali, a partire dall'*istante critico*, si è variata istantaneamente la scabrezza associata alle classi di maglie. Come per il processo di taratura, si sono distinte quattro porzioni all'interno del tratto del dominio, ciascuna compresa tra stazioni idrometriche successive. Agendo singolarmente su ciascun tratto, a partire da monte verso valle, si è ottenuta una nuova distribuzione spaziale del coefficiente di scabrezza secondo Strickler in modo tale che il modello ben riproduca il valore di

livello al colmo effettivamente misurato. Poiché non si ritiene ragionevole che le aree golenali possano modificare in modo significativo la loro resistenza al moto durante il transito della piena, sono stati rivalutati i soli parametri di scabrezza delle maglie relative all'alveo di magra, ossia la parte più profonda dell'alveo stesso.

COEFFICIENTI DI SCABREZZA K_S DELL'ALVEO DI MAGRA				
Da	K_S [$m^{1/3}/s$] iniziale	K_S [$m^{1/3}/s$] modificato	Δ [-] variazione	Δ [-] variazione
Da Borgoforte A Sermide	27	27	0	0
Da Sermide A Ficarolo	27	32	+5	+18.5
Da Ficarolo A Pontelagoscuro	25	32	+7	+28
Da Pontelagoscuro Alla Foce	30	45	+15	+50

Tabella 2.5: In tabella è riportato, per l'alveo di magra, il valore di taratura (iniziale) del coefficiente di Gauckler-Strickler e quello modificato affinché i livelli di picco simulati risultino comparabili a quelli registrati. Nella colonna di destra è indicata la variazione assoluta e percentuale di ciascun tratto.

Si nota dalla Tabella 2.5 che la variazione del coefficiente di scabrezza necessario per riprodurre correttamente il massimo livello della piena è via via maggiore da monte verso valle, raggiungendo un incremento pari al 50% nella porzione di dominio a valle di Pontelagoscuro, indice che il possibile cambio di regime idrodinamico, probabilmente legato a fenomeni di trasporto solido, è più accentuato in tale tratto.

Nei grafici seguenti (Figura 2.22, Figura 2.23, Figura 2.24, Figura 2.25) è messo in evidenza il cambio di regime che si verifica durante la piena del 2014 nelle diverse sezioni di controllo. Le rette verticali e orizzontali identificano rispettivamente l'istante critico e il livello oltre i quali l'andamento dei livelli ottenuto dal modello (curva blu) si discosta da quello registrato (curva rossa). La linea verde tratteggiata mostra l'andamento simulato nel caso in cui la scabrezza delle maglie dell'alveo di magra venga aumentato a partire dall'istante di cambio regime.

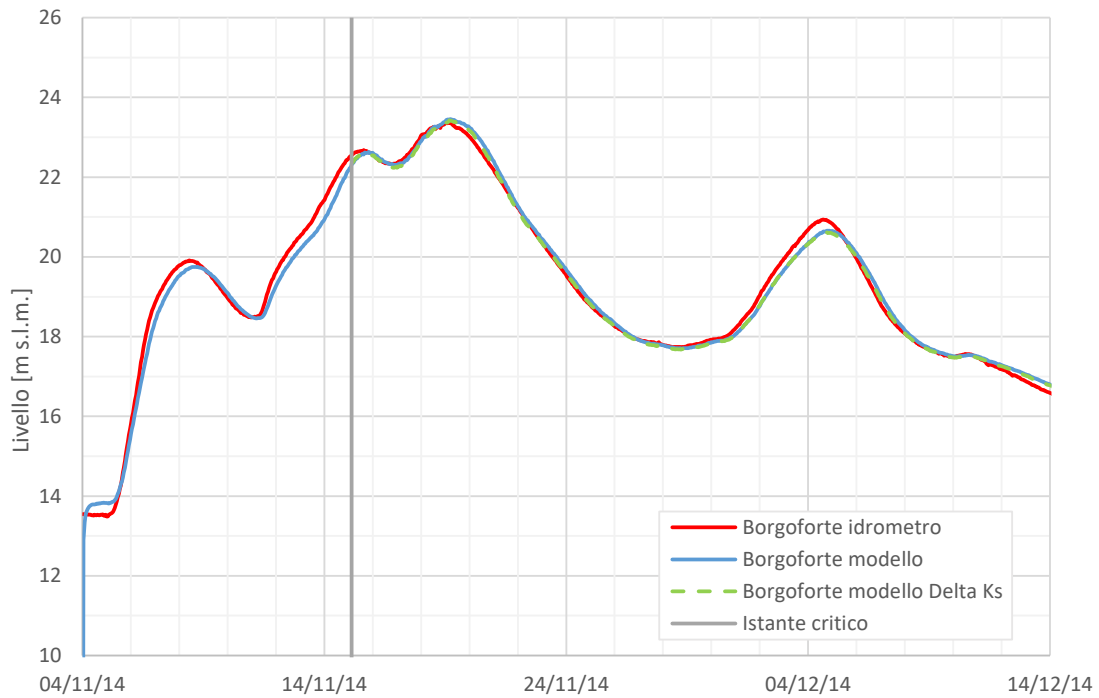


Figura 2.22: Cambio di regime idrodinamico nella piena del 2014. Livelli misurati e simulati nella sezione di Borgoforte mantenendo costante (linea blu) e variando il parametro di scabrezza per gli istanti successivi all'ostante critico (linea grigia verticale).

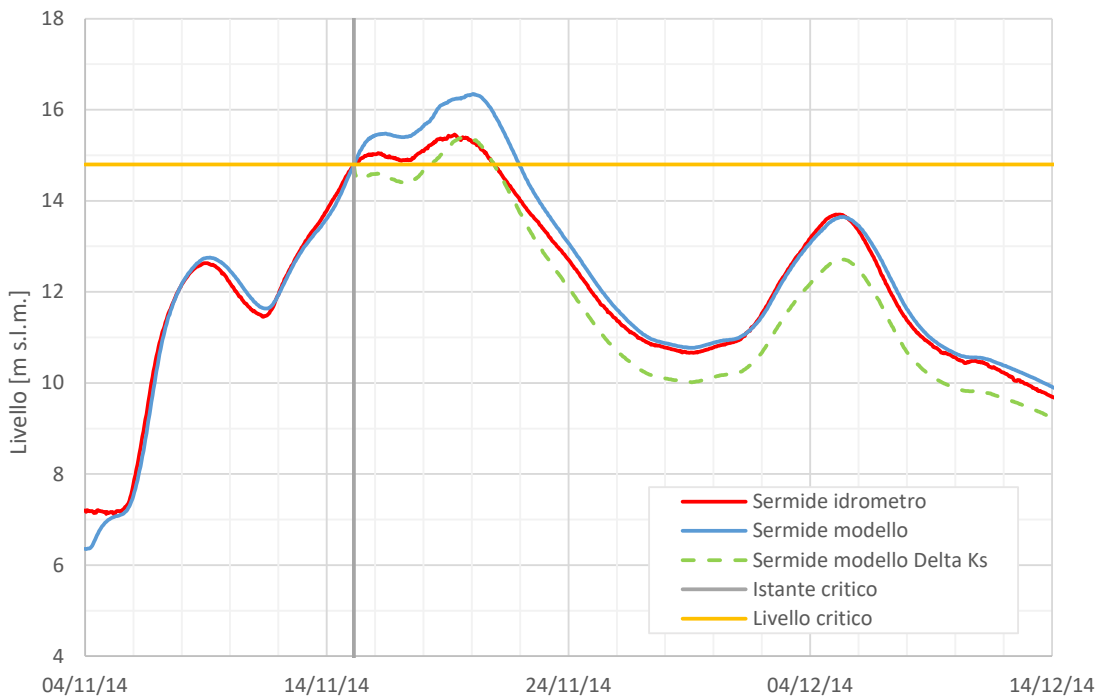


Figura 2.23: Cambio di regime idrodinamico nella piena del 2014. Livelli misurati e simulati nella sezione di Sermide mantenendo costante (linea blu) e variando il parametro di scabrezza per gli istanti successivi all'ostante critico (linea grigia verticale).

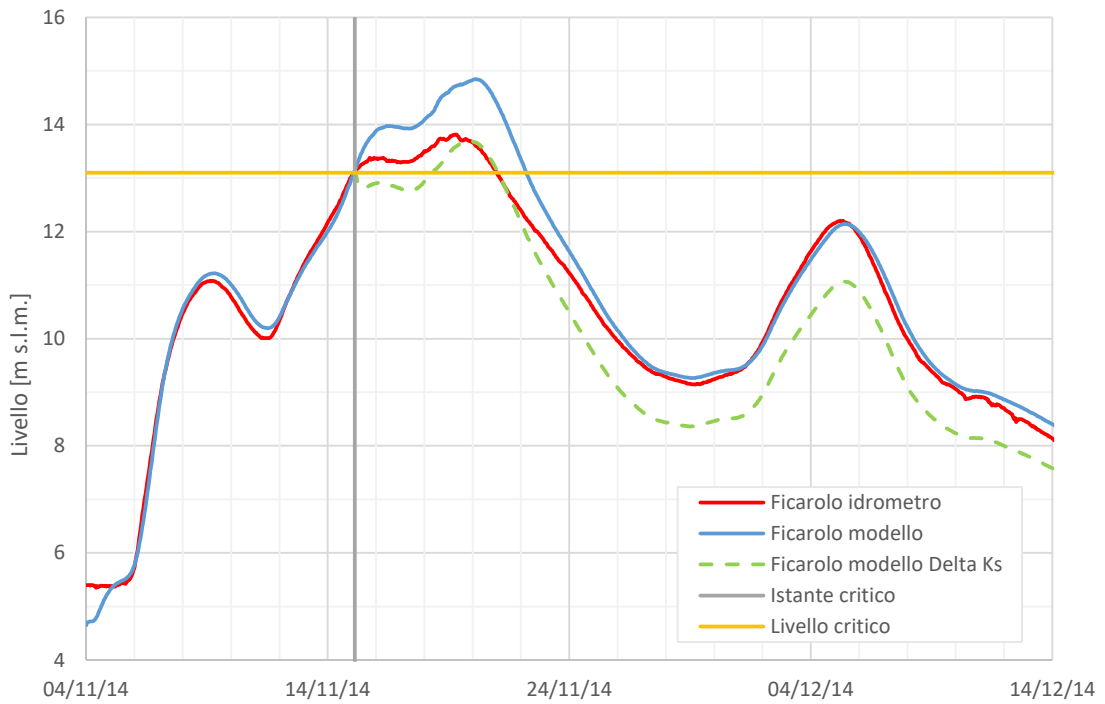


Figura 2.24: Cambio di regime idrodinamico nella piena del 2014. Livelli misurati e simulati nella sezione di Ficarolo mantenendo costante (linea blu) e variando il parametro di scabrezza per gli istanti successivi all'ostante critico (linea grigia verticale).

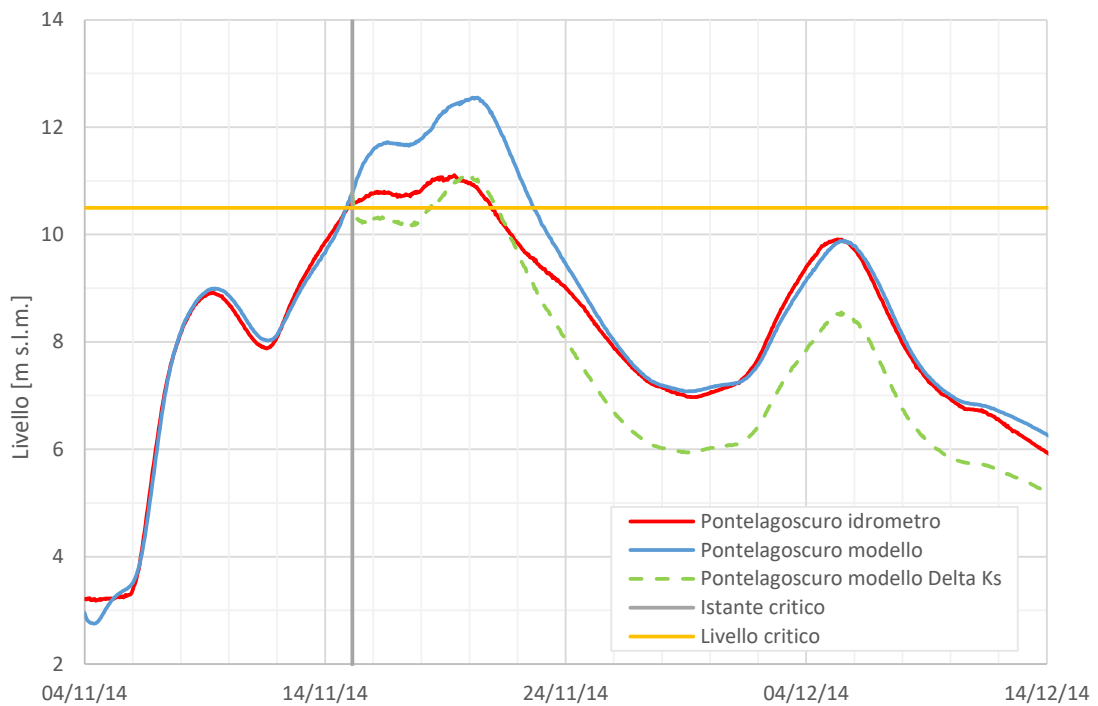


Figura 2.25: Cambio di regime idrodinamico nella piena del 2014. Livelli misurati e simulati nella sezione di Pontelagoscuro mantenendo costante (linea blu) e variando il parametro di scabrezza per gli istanti successivi all'ostante critico (linea grigia verticale).

Dalle figure precedenti si evince come l'aumento del coefficiente di Strickler permette di riprodurre in maniera più corretta il massimo valore del livello della piena. D'altra parte, la sottostima dei livelli nella fase appena successiva al cambio di scabrezza suggerisce che nella realtà i fenomeni che inducono una diversa capacità di deflusso del Po si sviluppano in maniera graduale nel tempo. Inoltre, l'analisi della fase discendente della piena ottenuta con i parametri di scabrezza modificati presenta livelli ben inferiori a quelli registrati, a suggerire che il cambio di regime idrodinamico è reversibile e che la capacità di portata del fiume, nelle fasi terminali della piena, torna ad essere praticamente analoga a quella precedente. La simulazione originale, infatti, riproduceva già in maniera corretta la fase terminale dell'evento di piena.

Capitolo 3. Analisi degli effetti legati alla mobilità del fondo

Nel presente capitolo sono presi in considerazione, singolarmente, alcuni dei processi morfodinamici che potrebbero giustificare un cambio di regime idrodinamico del fiume Po. In particolare, dopo una breve introduzione sul fenomeno del trasporto solido, saranno valutati per via modellistica gli effetti sul regime idrodinamico causati dal possibile approfondimento dell'alveo come conseguenza dall'azione erosiva della corrente, e quelli legati alla variazione delle forme di fondo, in particolare delle dune di fondo.

3.1 Il trasporto solido

Il fondo e le sponde dei corsi d'acqua naturali sono tipicamente costituiti da materiale privo o parzialmente dotato di coesione. I sedimenti naturali sono suddivisi in diverse categorie in base alla loro dimensione: argille, limi, sabbie e ghiaie. Gli alvei naturali possono tuttavia essere un miscuglio di sedimenti caratterizzati da un ampio spettro di distribuzione di dimensioni caratteristiche, per cui risulta opportuno descriverli in termini statistici. Da campionamenti dei sedimenti è possibile costruire una scala granulometrica del diametro d . Del parametro d risulta in genere significativo il diametro medio d_{50} e il d_{90} , ovvero il diametro tale per cui, rispettivamente il 50% e il 90% del campione di miscuglio è più fine di quella dimensione.

Sotto l'azione della corrente fluida, il materiale costituente il fondo e le sponde può essere distaccato e iniziare il suo trasporto idrodinamico. Il trasporto del materiale può manifestarsi in due modalità: trasporto al fondo o trasporto in sospensione (Seminara & Tubino, 1996).

Nel caso di trasporto al fondo, i sedimenti sono mobilitati dallo sforzo tangenziale agente sul letto del fiume e vengono trasportati dalla corrente fluida per rotolamento, slittamento e saltellamento. Questo moto avviene all'interno di uno strato di estensione tipicamente modesta rispetto al tirante del moto, di estensione dell'ordine di $2 \div 3 d$, dal quale la denominazione *trasporto al fondo*.

Il trasporto in sospensione invece riguarda una porzione più estesa del dominio fluido. Le particelle solide vengono infatti sollevate e poi trascinate secondo il profilo di velocità della

corrente, a questo moto si oppone la velocità di sedimentazione a cui naturalmente le particelle sono soggette per effetto del loro peso.

Ci sono condizioni per cui, nonostante l'azione della corrente turbolenta, un numero trascurabile di granuli è in movimento ed è quindi considerato nullo il trasporto solido ai fini pratici. L'inizio di trasporto di sedimenti è definito sulla base del superamento di una soglia critica da parte dello sforzo tangenziale al fondo, τ_0 . In letteratura si fa riferimento allo sforzo al fondo nella sua versione adimensionale, definita anche parametro di Shields:

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho)gd_s} \quad (3.1)$$

Questo parametro va confrontato con i valori soglia di incipienza al movimento, per stabilire se ci sia trasporto o meno, e in quale modalità il trasporto avvenga.

È utile definire il numero di Reynolds delle particelle R_p e il diametro caratteristico D_* :

$$R_p = \frac{\sqrt{\Delta g d_s^3}}{\nu} \quad (3.2)$$

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (3.3)$$

$$D_* = R_p^{2/3} \quad (3.4)$$

con ρ_s e ρ rispettivamente la densità dei sedimenti e la densità del fluido, ν è la viscosità cinematica del fluido.

Le condizioni limite critiche per il trasporto al fondo proposte in letteratura sono svariate; se ne riportano qui alcune prese in considerazione per questo lavoro.

Secondo la formulazione di Brownlie (Brownlie, 1981):

$$\tau_{*c} = 0.22 \cdot R_p^{-0.6} + 0.06 \cdot e^{-17.77 \cdot R_p^{-0.6}} \quad (3.5)$$

Van Rijn propone invece le seguenti espressioni (Van Rijn, 1984), al variare del parametro dei sedimenti D_* :

$$\begin{cases} \tau_{*c} = 0.24 \cdot D_*^{-1} & \text{se } 1 < D_* \leq 4 \\ \tau_{*c} = 0.14 \cdot D_*^{-0.64} & \text{se } 4 < D_* \leq 10 \\ \tau_{*c} = 0.04 \cdot D_*^{-1} & \text{se } 10 < D_* \leq 20 \\ \tau_{*c} = 0.013 \cdot D_*^{0.29} & \text{se } 20 < D_* \leq 150 \\ \tau_{*c} = 0.55 & \text{se } D_* > 150 \end{cases} \quad (3.6)$$

Il determinarsi di trasporto in sospensione può invece essere valutato confrontando il parametro di Shields con il valore critico τ_{*c_susp} .

$$\tau_{*c_susp} = \frac{w_s^2}{\Delta g d_s} N_s^2 \quad (3.7)$$

in cui w_s è la velocità di sedimentazione delle particelle solide e può essere stimata con la formula di Dietrich:

$$w_s = \frac{v}{d_s} 10^{-c_1 + c_2 \log d_* - c_3 (\log d_*)^2 - c_4 (\log d_*)^3 - c_5 (\log d_*)^4} \quad (3.8)$$

con

$$c_1 = 1.25572; \quad c_2 = 2.92944; \quad c_3 = 0.29445; \quad c_4 = 0.05175; \quad c_5 = 0.01512.$$

Il parametro N_s assume diverse espressioni a seconda della formulazione:

$N_s = 1$		Baynold
$N_s = 1.25$		Engelund & Fredsoe
$N_s = 4R_p^{-2/3}$	se $1 < R_p \leq 31.62$	Van Rijn
$N_s = 0.4$	se $R_p > 31.62$	Van Rijn

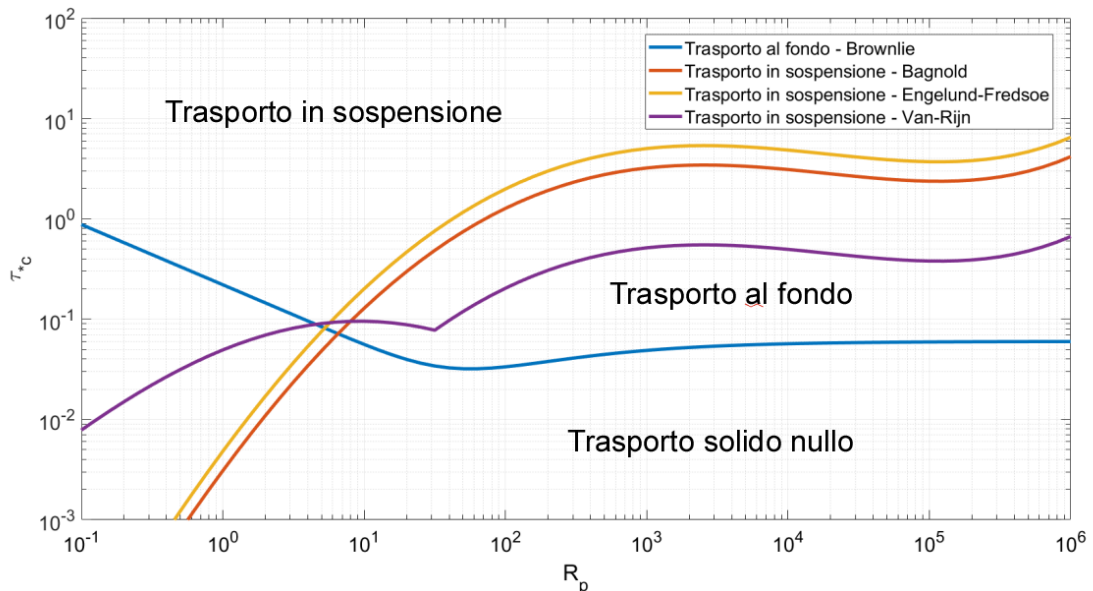


Figura 3.1: Condizione di incipienza al trasporto, soglia critica secondo diverse formulazioni proposte in letteratura.

3.2 Effetti legati all'erosione e allo scavo del fondo

Qualora il trasporto solido sia piuttosto intenso, può prodursi nell'alveo un'attività erosiva non trascurabile per la sezione liquida. Questo fenomeno è in genere accentuato laddove le tensioni al fondo sono maggiori, ad esempio nel caso di un restringimento che fa accelerare la corrente, o all'estradosso delle curve, dove interviene anche la forza centrifuga e la creazione di moti secondari (moto elicoidale). Tuttavia, in caso di portata al colmo molto elevata, il fenomeno erosivo può verificarsi anche ad una scala più diffusa, in larga porzione dell'asta fluviale, determinando un abbassamento temporaneo del fondo, eventualmente colmato durante regimi di portata calanti dal deposito di materiale solido proveniente da monte.

Una variazione della conformazione dell'alveo per effetto di fenomeni erosivi durante una piena può ovviamente influire sul comportamento idrodinamico della corrente. La presenza di scavi, a parità di livello, fa aumentare la sezione liquida e quindi ridurre le velocità e le dissipazioni di energia; alternativamente, a parità di cadente piezometrica, l'approfondimento del fondo si traduce in una riduzione di livello idrometrico. Perciò, l'abbassamento del fondo potrebbe spiegare l'apparente aumento di capacità di deflusso registrata nella sezione di Pontelagoscuro. Si vuole quindi indagare nel seguente paragrafo l'effetto, e la plausibilità, di tale fenomeno nel fiume Po a valle di Pontelagoscuro.

3.2.1 Modello erosivo

Per valutare l'effetto legato agli scavi in alveo è stato realizzato un modello che permette di stimare l'effetto erosivo della corrente in maniera semplificata. Per valutare in maniera rigorosa il fenomeno sarebbe necessario implementare un modello a fondo mobile, che simuli l'evoluzione del fondo tenendo conto del trasporto al fondo e in sospensione, riproducendo quindi fenomeni di erosione e deposito e le conseguenti variazioni di quota del fondo. Tuttavia, questo tipo di calcoli richiede l'uso di griglie di calcolo ad alta risoluzione e, di conseguenza, un onere computazionale molto più elevato.

In una prima fase, si è implementato un modello erosivo semplificato per valutare quale entità di scavi al fondo sarebbero necessarie affinché il modello idrodinamico sia in grado di simulare correttamente il valore di livello al colmo di piena. Il modello erosivo è ottenuto implementando una relazione che determina l'entità dello scavo che si crea per effetto dello sforzo della corrente, senza risolvere il bilancio di sedimenti, ossia immaginando che il materiale solido rimosso dal fondo sia istantaneamente rimosso (e non più depositato) dalla corrente.

Ad ogni passo temporale di calcolo, dt , il modello erosivo valuta la variazione di quota del fondo, dz , con la seguente espressione:

$$dz = c \cdot \frac{(\tau - \tau_s)}{\rho} \cdot dt \quad (3.9)$$

dove ρ [kg/m^3] è la densità dell'acqua, c [s/m] è un coefficiente di erosione, τ [Pa] è lo sforzo al fondo dovuto alla sola componente di grano, τ_s [Pa] è lo sforzo soglia, al di sopra del quale la corrente inizia ad erodere il fondo.

Con questa espressione, fissato un valore soglia, τ_s , e un coefficiente di erosione, c , si può ottenere una stima al rialzo dello scavo che si potrebbe realizzare in tutti i punti del dominio per effetto dell'azione erosiva della corrente durante una piena. Come già anticipato, questo approccio semplificato tiene conto della sola erosione, non di deposito e trasporto delle particelle solide. Può essere tuttavia efficace per individuare quale deve essere l'entità del fenomeno erosivo affinché si riescano a riprodurre correttamente i livelli misurati durante l'evento di riferimento, per capire se questo processo può e in quale misura giustificare il cambio di regime a Pontelagoscuro.

Si sono effettuate diverse prove, variando il valore attribuito al coefficiente di erosione c e alla soglia τ_s , fino a trovare la combinazione che ha permesso di ottenere livelli simulati al colmo simili a quelli misurati nella sezione di Pontelagoscuro nell'evento di piena del 2014.

c [s/m]	τ_s [Pa]
$1 \cdot 10^{-3}$	1.0

Tabella 3.1: Valori del coefficiente di erosione c e del valore soglia dello sforzo al fondo, τ_s , del modello erosivo per simulare un livello massimo a Pontelagoscuro comparabile a quello misurato.

Con questi valori, al termine della piena, si prevede uno scavo di almeno un metro in tutto l'alveo principale, e che supera i cinque metri in diverse parti del fiume, in particolare in corrispondenza di restringimenti e curve, dove le velocità della corrente, e quindi le tensioni al fondo, sono maggiori. Le zone caratterizzate da maggiori profondità di scavo sono effettivamente collocate in corrispondenza di Pontelagoscuro e nel tratto collocato a valle di questo.

La sezione di Pontelagoscuro è una delle zone in cui l'entità dello scavo previsto a fine piena è fra le maggiori (Figura 3.3). Qui l'erosione massima supera addirittura i 6 m. Si può vedere in

Figura 3.4 come l'azione erosiva della corrente sia nulla inizialmente, il fenomeno di scavo inizia a manifestarsi solo per regimi di portata un po' superiori.

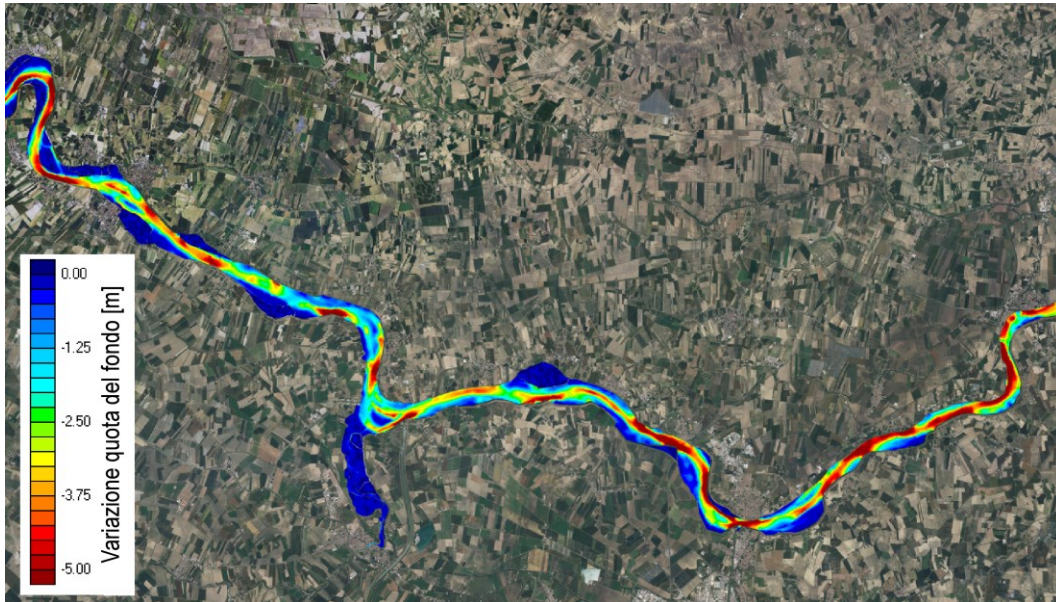


Figura 3.2: Mappa a colori indicativa dello scavo previsto al termine della piena del 2014, nel tratto fra Sermide e Polesella. Si nota come i livelli di erosione maggiore si prevedono in corrispondenza di curve e restringimenti. Nel tratto di valle lo scavo risulta significativo in maniera più diffusa.

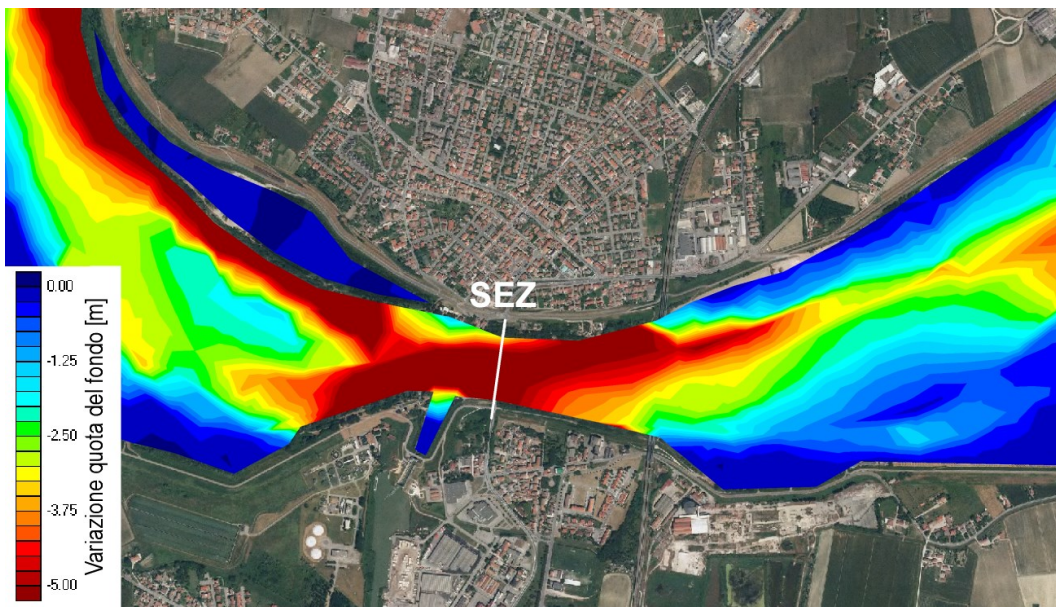


Figura 3.3: Profondità dello scavo simulato con il modello erosivo al termine della piena del 2014, dettaglio della porzione di fiume in corrispondenza della sezione di Pontelagoscuro, evidenziata nell'immagine.

L'evoluzione dello scavo è legata alla portata transitante, in prossimità del secondo e terzo picco l'effetto erosivo si intensifica e la progressione dello scavo procede più rapidamente. Il fenomeno rallenta verso durante la fase discendente della piena, torna a crescere quando la portata superare nuovamente i $4'000 \text{ m}^3/\text{s}$. Infine, rallenta nel tratto finale della simulazione fino quasi ad azzerarsi, come dimostra la curva pressoché orizzontale.

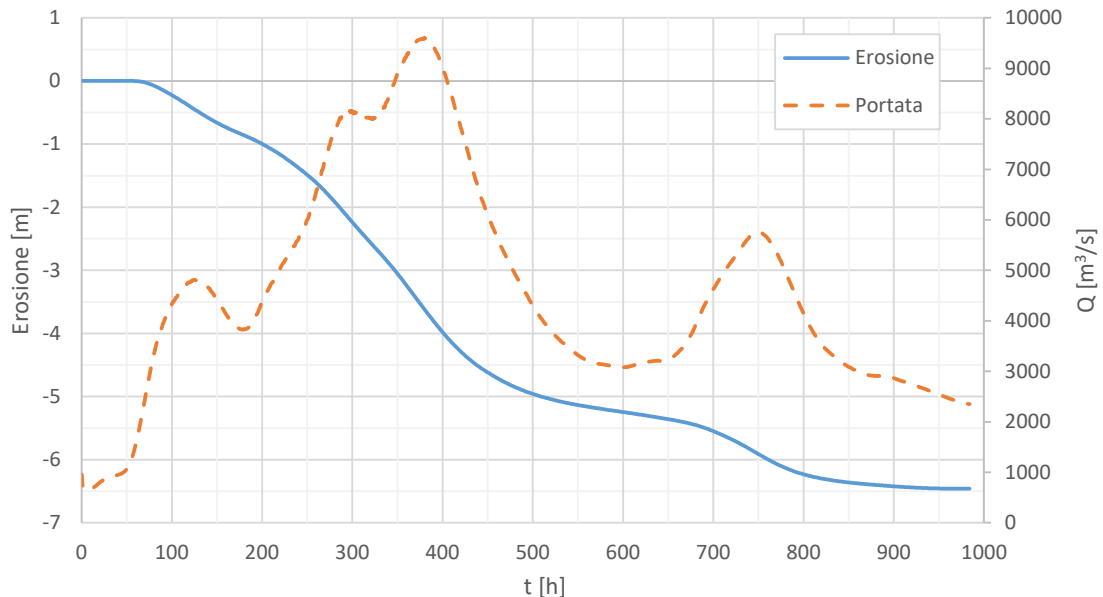


Figura 3.4: Risultati forniti dal modello erosivo nella sezione di Pontelagoscuro per la piena del 2014. Sono riportati l'entità dell'erosione e la portata transitante in questa sezione durante l'intero evento.

Di seguito sono riportati gli andamenti nel tempo dei livelli nelle quattro stazioni idrometriche di riferimento, forniti dal modello idrodinamico accoppiato con il modello erosivo e tenendo conto dell'effetto dello scavo. Si può vedere come l'erosione del fondo, secondo i valori dei parametri adottati, permette di riprodurre correttamente i livelli massimi nella stazione di Pontelagoscuro, mentre tali livelli sono un po' sottostimati nelle sezioni di Sermide e Ficarolo, ed eccessivamente ridotti nella sezione di Borgoforte. Nella fase calante della piena, lo scavo dell'alveo comincia ad arrestarsi, ma i livelli simulati non riproducono più correttamente quelli registrati. Quando la portata e la velocità della corrente si riducono, si riduce anche lo sforzo al fondo e il trasporto solido associato, con una diminuzione dell'erosione a favore di processi di deposito; tuttavia, bisogna tenere a mente che il modello adottato non è in grado di valutare questo secondo fenomeno, in quanto simula il solo processo di erosione.

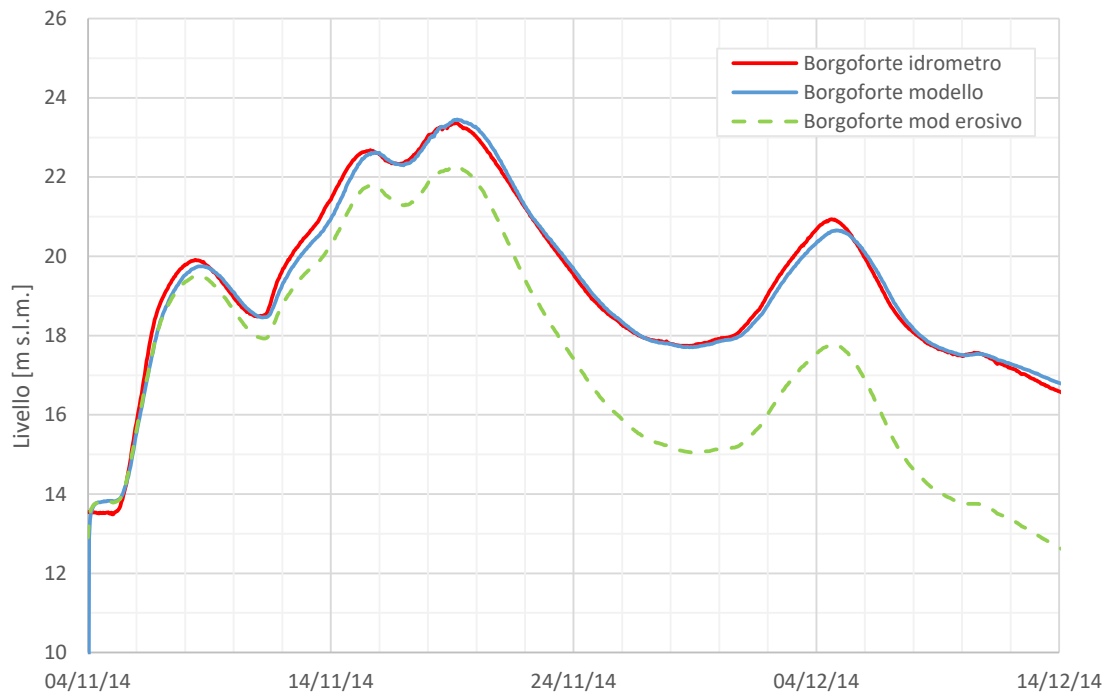


Figura 3.5: Andamento temporale del livello nella stazione di Borgoforte durante la piena del 2014. Nel grafico sono messi a confronto i valori misurati (rosso), quelli simulati dal modello a fondo fisso (blu) e quelli ottenuti con il modello erosivo (tratteggio verde).

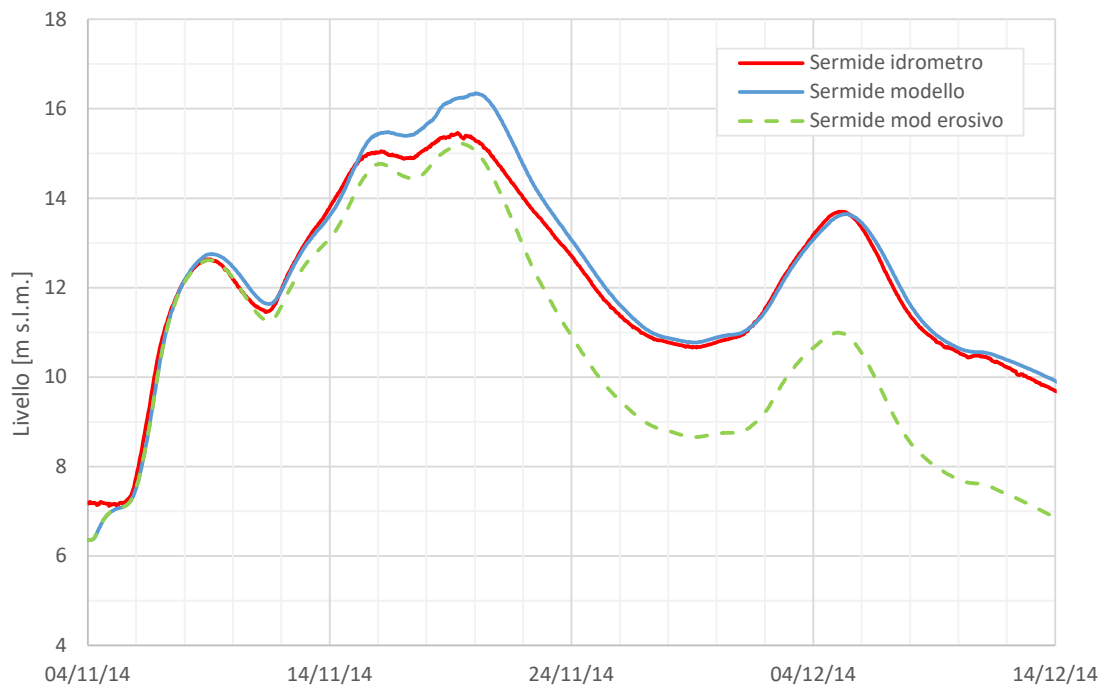


Figura 3.6: Andamento temporale del livello nella stazione di Sermide durante la piena del 2014. Nel grafico sono messi a confronto i valori misurati (rosso), quelli simulati dal modello a fondo fisso (blu) e quelli ottenuti con il modello erosivo (tratteggio verde).

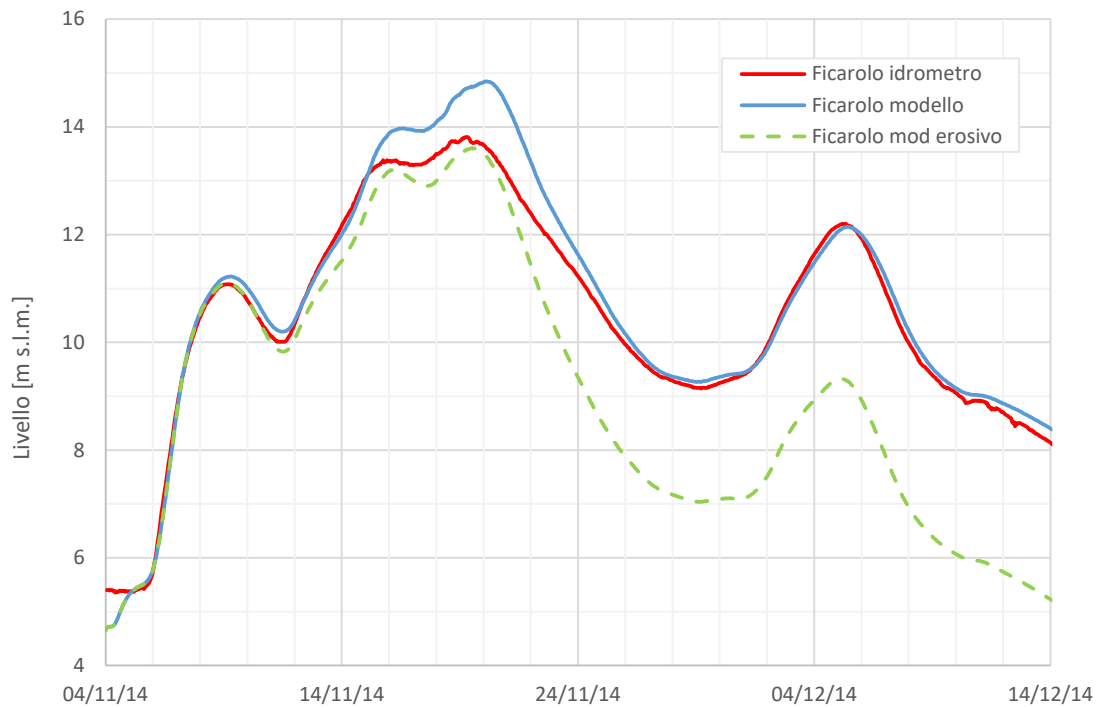


Figura 3.7: Andamento temporale del livello nella stazione di Ficarolo durante la piena del 2014. Nel grafico sono messi a confronto i valori misurati (rosso), quelli simulati dal modello a fondo fisso (blu) e quelli ottenuti con il modello erosivo (tratteggio verde).

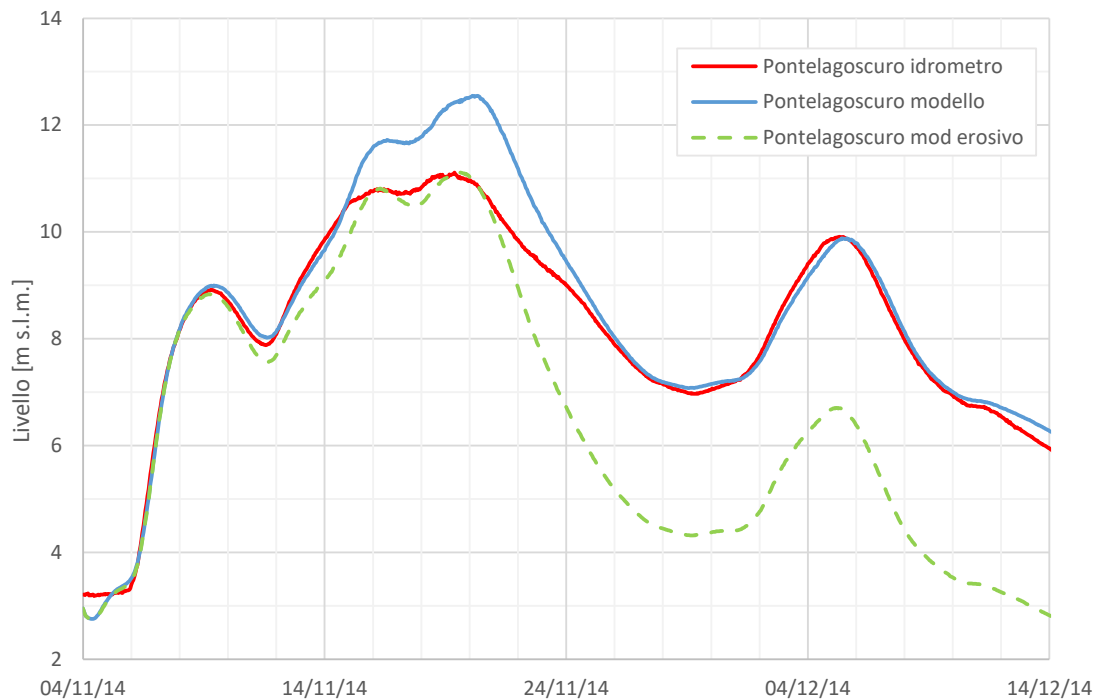


Figura 3.8: Andamento temporale del livello nella stazione di Pontelagoscuro durante la piena del 2014. Nel grafico sono messi a confronto i valori misurati (rosso), quelli simulati dal modello a fondo fisso (blu) e quelli ottenuti con il modello erosivo (tratteggio verde).

Un'analisi attenta dei risultati forniti dall'applicazione del modello erosivo suggerisce che la possibile formazione di scavi di fondo produce un cambio di regime idrodinamico più graduale rispetto a quello suggerito dalle analisi a fondo fisso. Nelle figure precedenti, infatti, si nota che i livelli idrometrici riprodotti con il modello erosivo mostrano una sottostima di quelli misurati nelle fasi che precedono il picco di piena.

Il secondo aspetto importante è che, affinché le dinamiche di scavo del fondo possano giustificare il cambio transitorio di regime idrodinamico del Po, si debbano generare scavi di grande entità, localizzati soprattutto nelle curve e nei tratti più stretti dell'alveo, e che tali scavi si debbano poi riempire quasi completamente nella fase poco successiva al picco.

Tale comportamento del fondo non sembra compatibile con le dinamiche di trasporto solido al fondo, che difficilmente può spiegare fenomeni di erosione diffusa dell'alveo, né tantomeno una fase di scavo generalizzato a cui segue una fase di deposito generalizzato. Infatti, come tendenza generale, il trasporto solido al fondo tende a generare approfondimenti locali in tratti in cui la capacità di portata solida aumenta, e depositi appena a valle, nei tratti in cui tale trend si inverte.

Una dinamica del fondo più compatibile con quella che sembrerebbe necessaria per ottenere una buona stima dei livelli idrometrici misurati potrebbe essere legata al trasporto solido in sospensione, che potrebbe essere in grado di rimuovere dal fondo un significativo volume di sedimenti, per poi depositarne altri in arrivo da monte. Nel trasporto solido in sospensione, infatti, la velocità con cui si muovono i sedimenti lungo il fiume è comparabile con quella dell'acqua che li trasporta, e in generale maggiore rispetto alla velocità effettiva con cui si spostano i grani nel trasporto di fondo. Per questo motivo, il trasporto solido in sospensione potrebbe generare variazioni generalizzate nello spazio, e variabili nel tempo, come appunto una erosione generalizzata in prossimità del picco di piena e un deposito generalizzato nella fase decrescente della piena.

3.2.2 Modello con trasporto solido in sospensione

Alla luce delle conclusioni suggerite dall'applicazione del modello erosivo, per valutare la plausibilità delle variazioni di quota del fondo come spiegazione del cambio di regime idrodinamico del tratto vallivo del Po, sono state effettuate alcune simulazioni speditive considerando il trasporto solido in sospensione. Tali simulazioni sono da considerarsi preliminari in quanto si è utilizzato il medesimo reticolo di calcolo usato in precedenza, che non possiede una risoluzione sufficiente a descrivere con precisione la distribuzione spaziale della

concentrazione di solidi sospesi. D'altra parte, l'applicazione modellistica consente comunque di giungere ad alcune indicazioni interessanti.

Il modello erosivo prevedeva l'azione di scavo realizzata dalla corrente, senza però tenere in conto del trasporto solido, ovvero il materiale asportato dal fondo non veniva più considerato presente nel dominio. In realtà, l'erosione è determinata dalla rimozione di sedimenti dell'alveo che vengono movimentati dalla corrente e trasportati sul fondo o in sospensione. Nel caso di trasporto in sospensione le particelle sono mosse dalla corrente secondo il profilo di distribuzione della velocità lungo la verticale. Il profilo di Rouse permette di descrivere la concentrazione media di sedimenti lungo la verticale secondo la seguente espressione:

$$c = c_a \left(\frac{1 - \xi}{\xi} \cdot \frac{\xi_a}{1 - \xi_a} \right)^{Z_R} \quad (3.10)$$

$$Z_R = \frac{w_s}{ku_*} \quad (3.11)$$

dove c è la concentrazione media alla generica quota z , c_a è la concentrazione media alla quota a , pari allo spessore di spazio adiacente al fondo all'interno del quale si sviluppa il trasporto al fondo, ξ è la generica quota z adimensionalizzata, $\xi = z/Y$, ξ_a è la quota a adimensionalizzata, $\xi_a = a/Y$, Z_R è il numero di Rouse, w_s è la velocità di sedimentazione delle particelle sospese, k è la costante di Von Karman, u_* è la velocità di attrito, che misura l'entità dello sforzo tangenziale al fondo.

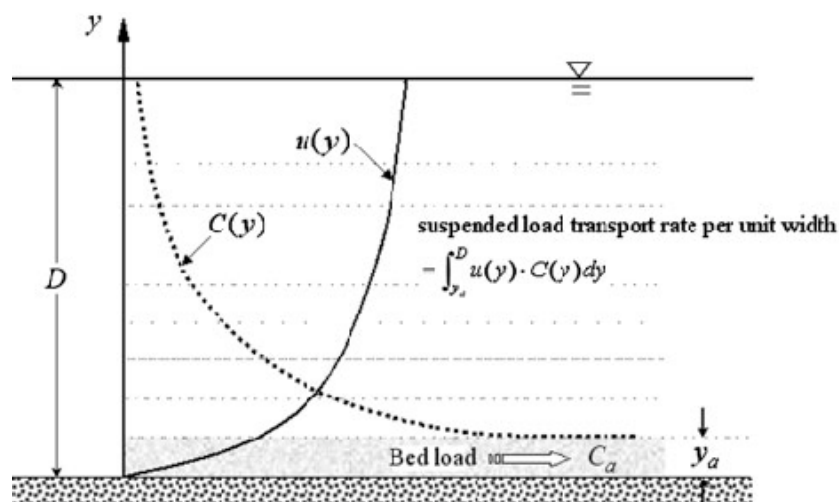


Figura 3.9: Rappresentazione del profilo di concentrazione dei sedimenti secondo Rouse $c(y)$ e del profilo di velocità $u(y)$ in un canale a pelo libero. y_a individua lo straterello all'interno del quale si ha trasporto al fondo.

Per valori piccoli del numero di Rouse, Z_R , il profilo di concentrazione tende a diventare più uniforme lungo la verticale; in questo modo si prevede un trasporto solido in sospensione importante e ben distribuito su tutta la colonna d'acqua. Se invece Z_R è elevato, le concentrazioni maggiori di sedimenti tendono ad essere localizzate in prossimità del fondo, mentre sarà modesta la quantità di materiale sospeso nella parte superiore della colonna d'acqua. In questo caso si sperimenta un minore trasporto in sospensione, dal momento che in prossimità del fondo le velocità della corrente fluida sono più limitate e contribuiscono meno a trascinare le particelle solide.

Per simulare il trasporto solido in sospensione, il modello risolve una equazione di trasporto e diffusione con termini sorgente nella seguente forma:

$$\frac{\partial CY}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{q}C) - \nabla \cdot (\mathbf{D}\nabla C) = E - D(C) \quad (3.12)$$

nella quale $C [m^3/m^3]$ è la concentrazione, media sulla verticale, dei sedimenti in sospensione, $\mathbf{q} [m^2/s]$ è la portata specifica, $\mathbf{D} [m/s]$ il tensore della diffusione, mentre E e D sono i flussi di materiale eroso e depositato. Il primo termine rappresenta la variazione locale di volume di particelle solide sospese sulla colonna d'acqua, il secondo rappresenta il flusso avvevativo, il terzo quello diffusivo e, a destra del segno di uguale, sono riportati i termini sorgente.

Considerando che il reticolo grossolano utilizzato nel calcolo produce una significativa entità di diffusione numerica, il tensore della diffusione è stato assunto identicamente nullo. Il flusso di materiale eroso viene espresso come

$$E = w_s c_a \quad (3.13)$$

La concentrazione di sedimento all'altezza di riferimento, c_a , nota anche come erosione specifica dimensionale, è calcolata mediante l'espressione suggerita da *Van Rijn*:

$$c_a = 0.015 \frac{d_{50} T^{1.5}}{y_a D_*^{0.3}} \quad (3.14)$$

nella quale $T = (\tau/\tau_{*c} - 1)$ è il parametro di trasporto (τ_{*c} è calcolato secondo l'eq. (3.5)).

Il flusso di deposito è calcolato come

$$D(C) = f_D w_s R_D C \quad (3.15)$$

nella quale R_D è il rapporto tra la concentrazione al fondo e quella mediata sulla verticale e f_D è un coefficiente moltiplicativo che consente all'utente di modificare arbitrariamente l'entità del flusso di deposito.

in cui w è la velocità di caduta in acqua ferma dei sedimenti e il parametro R è il rapporto tra la concentrazione al fondo e quella media, $R_D = c_a^{DEP} / C$. Il fattore R_D viene stimato sulla base di un profilo di Rouse semplificato (Boudreau & Hill, 2020):

$$c(z) = c_a \left(\frac{z}{y_a} \right)^{-Z_R} \quad (3.16)$$

Nota la concentrazione media sulla verticale, il numero di Rouse e l'altezza di riferimento, il modello calcola la concentrazione di riferimento per il deposito come

$$R_D = \frac{c_a^{DEP}}{C} = \frac{(Y - y_a)}{y_a^{Z_R} [Y^{(1-Z_R)} - y_a^{(1-Z_R)}]} \quad \text{se } Z_R < 1$$

$$R_D = \frac{c_a^{DEP}}{C} = 21.5 \quad \text{se } Z_R \geq 1 \quad (3.17)$$

I risultati dell'applicazione del modello con il trasporto solido in sospensione alla porzione di dominio a valle di Pontelagoscuro, per l'evento di piena del 2014, sono riportati in Figura 3.10. Si nota come i livelli simulati alla sezione di Pontelagoscuro non si modificano in modo sostanziale rispetto alla simulazione a fondo fisso. Ciò è dovuto al fatto che non si realizzano, nel modello, scavi e approfondimenti generalizzati del fondo. Analizzando i principali parametri del modello di trasporto solido, emerge che il parametro di Rouse è relativamente piccolo e i profili verticali di concentrazione sono caratterizzati da grandi concentrazioni in prossimità del fondo e piccole nel resto della colonna d'acqua. Di conseguenza, il rapporto R_D tende ad assumere valori relativamente grandi, che aumentano l'intensità del flusso di deposito; in questo modo, il trasporto solido in sospensione si comporta in modo simile al trasporto di fondo, producendo erosioni localizzate e il deposito quasi immediato del materiale solido nelle sezioni appena a valle. In altre parole, il fenomeno sembra avere carattere locale, con variazioni spaziali ma senza quella forte variazione temporale (erosione al colmo della piena e deposito nella fase calante) che potrebbe giustificare il cambio di regime idrodinamico del fiume.

In una serie di ulteriori simulazioni, è stato ridotto il flusso di deposito verso il fondo assegnando valori inferiori a 1 al coefficiente f_D nell'eq. (3.21). I risultati, sempre riportati in Figura 3.10, mostrano che, riducendo l'entità del deposito al 10% e all'1% rispettivamente, il modello con trasporto solido in sospensione mostra un comportamento via via più simile al

modello erosivo descritto nel capitolo precedente, ma non congruente con la dinamica suggerita dalle misure di livello alla sezione di Pontelagoscuro. Infatti, l'abbassamento delle quote del fondo risulta una condizione che permane nel tempo, senza che il modello preveda un successivo riempimento degli scavi prodotti e un ritorno ad una condizione di deflusso comparabile a quella iniziale. In questo caso i livelli sono simulati correttamente solo fino al colmo, e nelle fasi successive notano forti sottostime per effetto di questi scavi significativi e permanenti.

È da sottolineare che il fenomeno reale del trasporto solido è significativamente più complesso di quanto qui modellato. Un primo aspetto riguarda la distribuzione dei flussi di materiale solido lungo il fiume; nelle simulazioni qui discusse, si è supposto che la sezione di monte della griglia di calcolo, poco a monte della strettoia di Pontelagoscuro, sia in equilibrio morfodinamico, ossia che le sue quote del fondo non si modifichino nel tempo. Ciò comporta che la portata solida in ingresso nel modello aumenti e poi diminuisca in fase con l'intensità dell'azione erosiva della corrente. Questa assunzione può limitare eventuali sfasamenti temporali tra colmo di portata liquida e colmo di portata solida; d'altra parte, significativi sfasamenti sono poco verosimili, poiché nei tratti più a monte la dimensione delle particelle solido aumenta progressivamente, privilegiando il trasporto al fondo sul trasporto in sospensione. Un secondo aspetto riguarda l'effetto dei moti secondari in curva, con la componente di moto elicoidale che, da una parte, può aumentare significativamente lo sforzo tangenziale al fondo e, dall'altra, tende a rimuovere sedimento dall'esterno della curva per portarlo verso l'interno, accentuando quindi l'azione erosiva della corrente soprattutto nella parte esterna delle curve. Nella versione semplificata del modello qui impiegata, questi fenomeni non sono considerati e lo scavo prodotto in curva, essenzialmente legato al restringimento di sezione che tipicamente caratterizza le anse del Po, risulta generalizzato e non concentrato all'esterno della curva stessa.

Nonostante i limiti del modello qui richiamati, l'effetto di scavo al fondo come conseguenza del trasporto solido in sospensione, secondo le analisi condotte, non sembra giustificare un cambio di regime in concomitanza di regimi di portata importanti. Sembra un processo che può verificarsi in maniera diffusa e modesta nell'intera asta fluviale, ma senza accentuare il suo effetto in maniera significativa in corrispondenza delle maggiori portate.

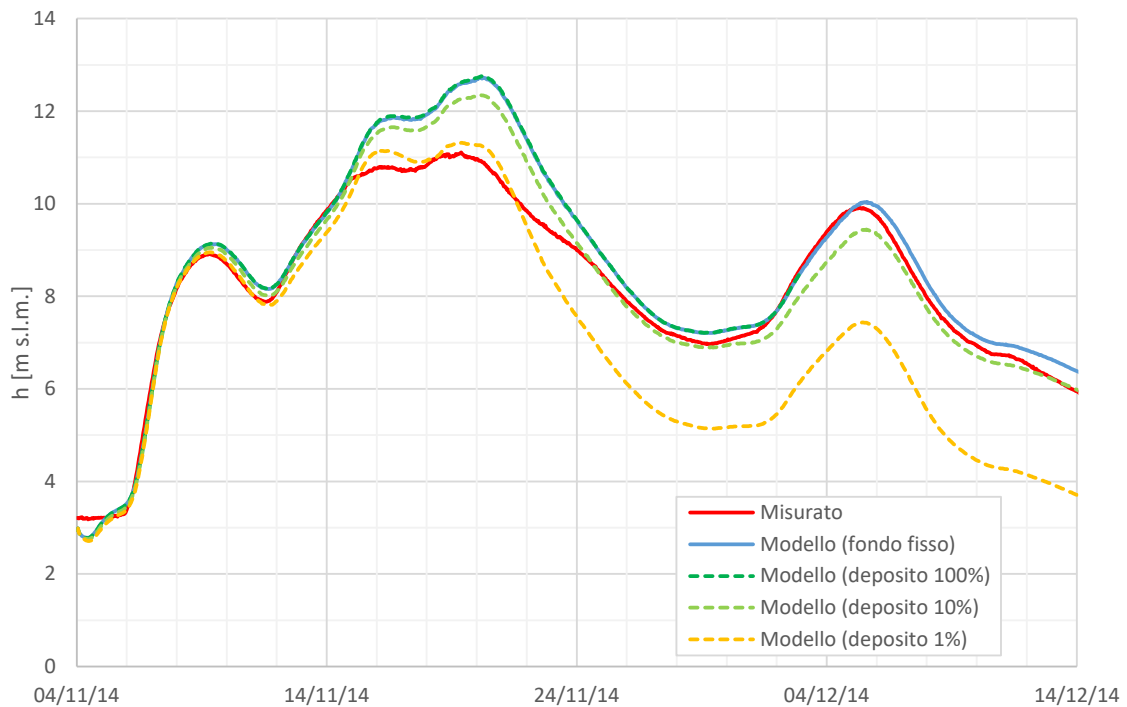


Figura 3.10: Andamento temporale del livello nella sezione di Pontelagoscuro. Confronto fra valori misurati (rosso), modello a fondo fisso (linea blu continua) e modello con trasporto in sospensione (linee tratteggiate) considerando diverse ipotesi con riferimento all'intensità del deposito.

3.3 Forme di fondo: le dune

Per effetto della corrente e della sua interazione con il materiale incoerente del fondo, l'alveo fluviale raramente si mantiene piano; si instaurano infatti dei processi di trasporto solido che portano alla comparsa di forme di fondo. La comparsa o meno delle forme di fondo comporta una serie di importanti effetti sulla corrente stessa, in particolare con riferimento all'entità delle resistenze al moto.

Nello specifico, per alvei in sabbia con granulometria uniforme e $d < 0.6 \text{ mm}$, al crescere della portata si presentano i seguenti regimi:

- assenza di trasporto;
- trasporto di fondo modesto, letto piano;
- fondo caratterizzato dalla presenza di ripples, piccole ondulazioni del fondo di forma pressoché triangolare simmetrica che possono raggiungere una lunghezza massima di 0.3 m e altezza 3 cm , che si propagano verso valle;

- fondo caratterizzato dalla presenza di dune, ondulazioni del fondo di forma asimmetrica, lunghezza molto variabile ($2 \div 25 Y$) e altezza massima di circa $Y/6$, che si propagano verso valle;
- transizione: in questo regime il fondo è pressoché piano a seguito dello spianamento delle dune;
- fondo caratterizzato dalla presenza di antidune, ondulazioni del fondo di forma sinusoidale, che possono essere stazionarie o propagarsi verso monte o valle a seconda del numero di Froude della corrente.

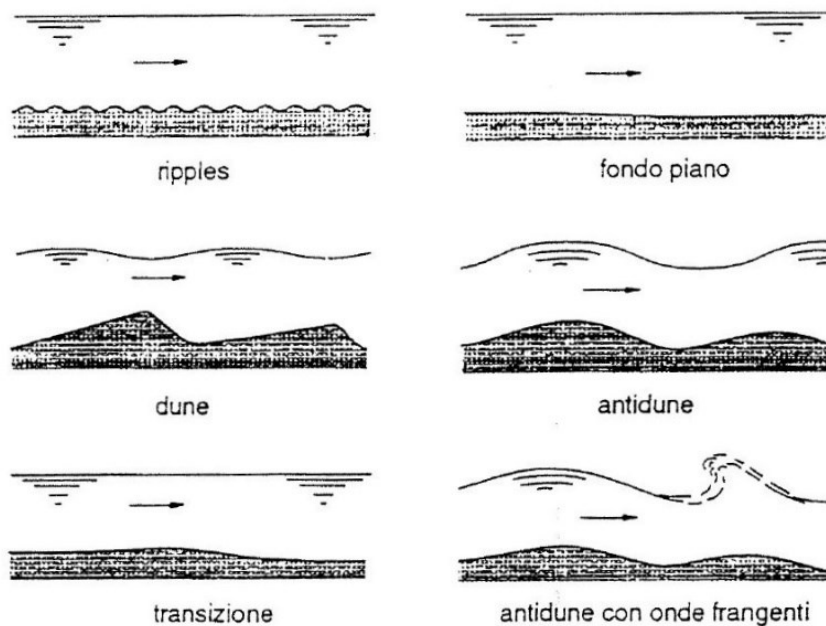


Figura 3.11: Evoluzione delle forme di fondo al crescere della portata, schema dei possibili regimi di fondo.

Negli alvei costituiti da sabbia più grossolana ($d > 0.6 \text{ mm}$) scompare il regime caratterizzato dalla presenza di ripples, e la presenza di fondo piano persiste fino al raggiungimento del regime successivo, quello delle dune. Negli alvei in ghiaia più grossa ($d > 5 \text{ mm}$) scompare anche il regime a dune.

3.3.1 Inquadramento teorico delle dune di fondo

La presenza di forme di fondo è in grado di influenzare la resistenza al moto della corrente e l'entità del trasporto solido. Questo effetto è meno rilevante nel caso di fondo a ripples e antidune, ma può diventare significativo nel caso di fondo a dune.

Nel caso di fondo piano, le resistenze al fondo possono essere determinate sulla base delle classiche equazioni delle correnti a superficie libera valide per il regime di parete scabra, usando ad esempio la relazione di Chezy. Utile è la definizione della conduttanza, C , ovvero il coefficiente di Chezy nella sua forma adimensionale:

$$C = \frac{\chi}{\sqrt{g}} \quad (3.18)$$

in cui χ è il classico coefficiente di Chezy.

In condizioni di fondo piano, la conduttanza risulta legata alla sola scabrezza di grano, e_s :

$$C_{90} = 5.75 \cdot \log_{10} \left(\frac{12 \cdot Y}{e_s} \right) \quad (3.19)$$

$$e_s = 3 \cdot d_{90} \quad (3.20)$$

Nel caso di fondo a dune, la resistenza al moto è da attribuire non solo alla resistenza d'attrito presente nel caso di fondo piano, ma anche alla resistenza di forma indotta dalle ondulazioni del fondo, che determinano nella corrente delle dissipazioni localizzate, generate dal distacco dello strato limite e dalla formazione di zone di ricircolo a valle di ciascuna di esse. Secondo la formulazione di Einstein (Einstein, 1950), lo sforzo tangenziale al fondo può essere quindi decomposto nei due differenti contributi appena citati:

$$\tau_0 = \tau_{SF} + \tau_D \quad (3.21)$$

in cui τ_0 è lo sforzo al fondo complessivo, τ_{SF} è il contributo dell'attrito dei grani (*skin friction*), τ_D è il contributo legato alle forme di fondo (*form drag*).

Lo sforzo al fondo può essere considerato in forma adimensionale: ne risulta una relazione analoga, espressa in termini di parametro di Shields:

$$\tau_{*0} = \tau_{*SF} + \tau_{*D} \quad (3.22)$$

La presenza di forme di fondo fa sì che il parametro di Shields complessivo, τ_{**} , sia maggiore del solo contributo dei grani τ_{*SF} , in quanto la resistenza complessiva al moto è risultato di un ulteriore contributo.

Allo stesso modo, anche la conduttanza totale C deve essere riformulata, in modo tale da tenere conto dei due contributi di resistenza. L'aumentato sforzo al fondo è tenuto in conto

mediante l'introduzione di una scabrezza equivalente, $e_{s\ eq}$, che è funzione delle caratteristiche delle dune di fondo (ampiezza A e lunghezza L):

$$e_{s\ eq} = 3 \cdot d_{90} + 1.1 \cdot A \cdot (1 - e^{-25 \cdot \frac{A}{L}}) \quad (3.23)$$

Con la scabrezza equivalente si determina la conduttanza C totale:

$$C = 5.75 \cdot \log_{10} \frac{12Y}{e_{s\ eq}} \quad (3.24)$$

e infine il coefficiente di Strickler equivalente:

$$K_S = \frac{C \cdot \sqrt{g}}{Y^{1/6}} \quad (3.25)$$

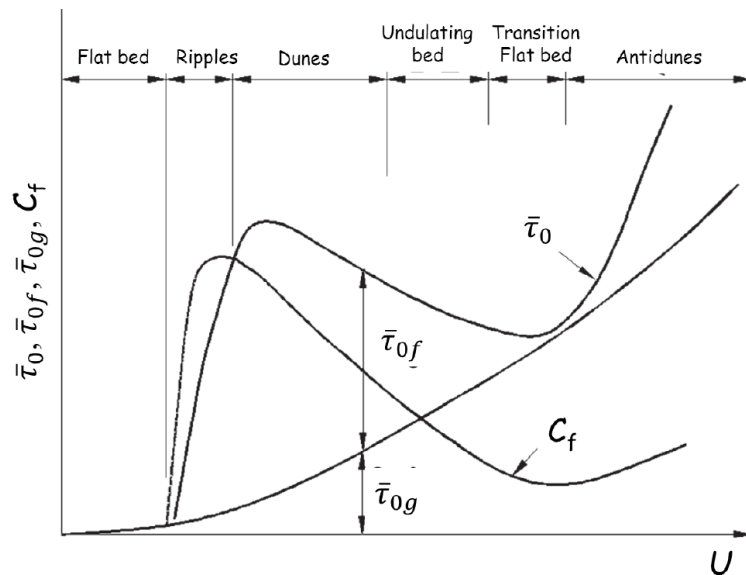


Figura 3.12: Diagramma che mostra l'andamento del parametro di Shields τ_0 (somma del contributo di grano τ_{0g} e delle forme di fondo τ_{0f}) all'aumentare della velocità U della corrente. È riportato inoltre l'andamento del coefficiente di friction C_f , pari a C^{-2} .

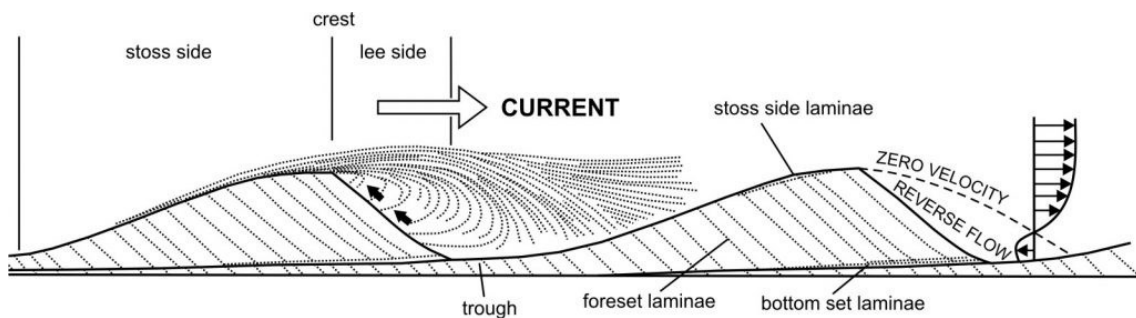


Figura 3.13: Schema della generazione di dissipazioni aggiuntive in caso di presenza di dune sul fondo, dovute al distacco dello strato limite e alla formazione di zone di ricircolo a valle di ciascuna duna.

Un metodo classico per la stima delle caratteristiche delle forme di fondo è quello suggerito da Van Rijn (Van Rijn, 1984). È innanzitutto necessario stimare la conduttanza C_{90} legata alla sola scabrezza di grano, e_s , come riportato nella (3.19), e la relativa velocità di attrito, u_* :

$$u_* = \frac{U}{C_{90}} \quad (3.26)$$

Il parametro di Shields dovuto alla sola resistenza di grano (*skin friction*) risulta

$$\tau_{*SF} = \frac{u_*^2}{\Delta \cdot g \cdot d_{50}} \quad (3.27)$$

Con questi dati è possibile calcolare il parametro di trasporto, T :

$$T = \frac{\tau_{*SF} - \tau_{*c}}{\tau_{*c}} \quad (3.28)$$

Se tale parametro è compreso nell'intervallo $0 < T < 25$, l'ampiezza A e la lunghezza L delle dune può essere determinata con le seguenti espressioni:

$$A = 0.11 \cdot Y \cdot \left(\frac{d_{50}}{Y}\right)^{0.3} \cdot (1 - e^{-0.5 \cdot T}) \cdot (25 - T) \quad (3.29)$$

$$L = 7.3 \cdot Y \quad (3.30)$$

Il parametro di trasporto, T , è un utile strumento per individuare l'effettivo regime di fondo. Da analisi sperimentali risulta infatti che, per valori $1 \leq D_* \leq 10$, il fondo è descritto dai seguenti regimi:

- mini ripples se $0 \leq T \leq 3$
- mega ripples e dune se $3 \leq T \leq 15$
- transizione e fondo piano se $15 \leq T \leq 25$
- fondo piano e antidune se $T \geq 25$

Nel grafico sottostante è immediato individuare, per via grafica, le zone corrispondenti alle condizioni necessarie per la formazione delle diverse forme di fondo prima elencate.

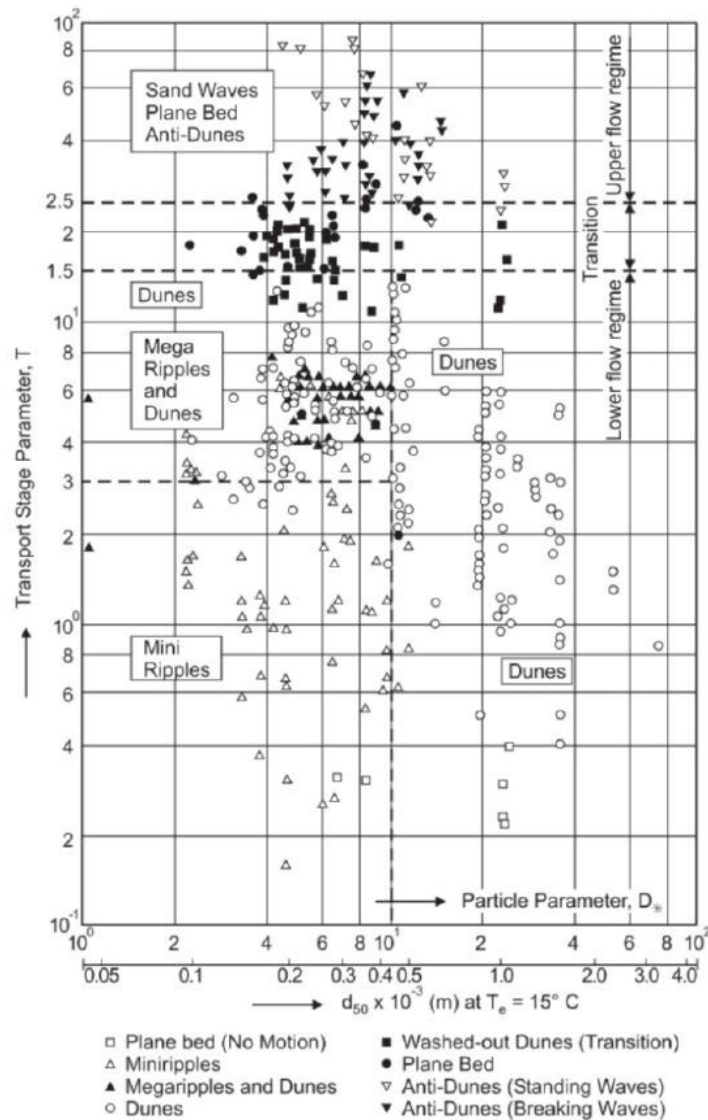


Figura 3.14: Diagramma di Van Rijn per la caratterizzazione del fondo alveo. In funzione del parametro delle particelle D^* (o del diametro dei sedimenti d_{50}) e del parametro T è possibile classificare la tipologia di forme di fondo che si instaura in un corso d'acqua.

3.3.2 Caratteristiche delle dune rilevate nella batimetria del 2005

La presenza di forme di fondo nel tratto di Po in analisi è testimoniata dal rilievo batimetrico disponibile. Nel modello digitale del fondo alveo, a risoluzione 2 m, è infatti possibile vedere che in alcune porzioni di alveo le quote presentano un andamento ondulato e talvolta regolare. Si tratta effettivamente di dune di fondo, presenti principalmente all'interno dell'alveo di magra, anche se in alcuni tratti coprono l'intera larghezza della sezione. Anche visivamente si nota come la loro estensione sia variabile a seconda della zona. Lo studio delle dune presenti in alveo si è focalizzato nel tratto di corso d'acqua compreso fra Pontelagoscuro e l'incile di Po di Goro.

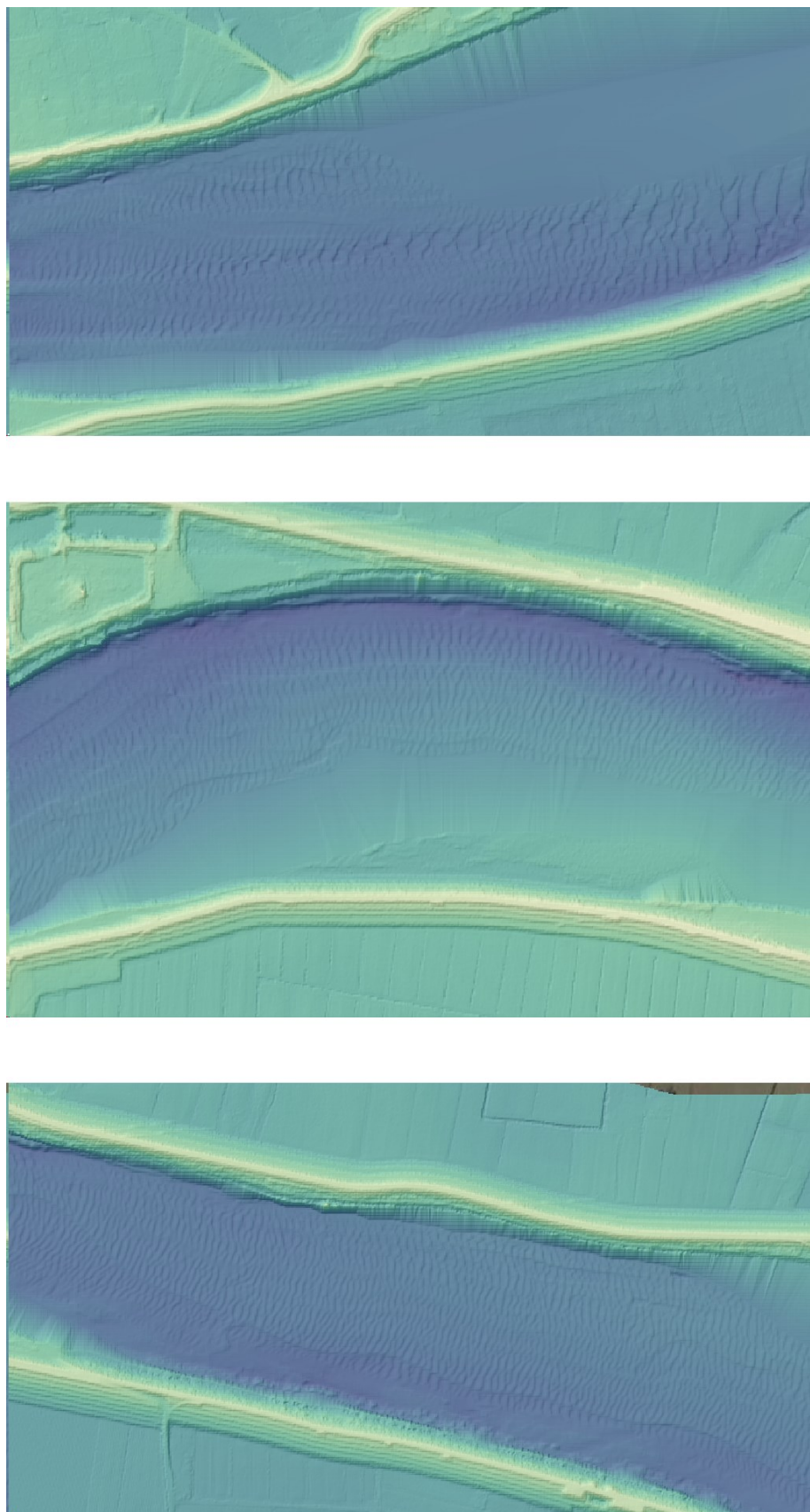


Figura 3.15: Rilievo ombreggiato a scala di colore di alcune porzioni del dominio a valle di Pontelagoscuro. Si nota la presenza diffusa delle dune di fondo.

È interessante riuscire ad analizzare le caratteristiche delle dune registrate dal rilievo batimetrico. Conoscere la loro ampiezza e lunghezza può permettere di stimare quanto esse influiscano nel moto, e consente inoltre di verificare l'affidabilità e l'applicabilità a tale caso studio della trattazione teorica prima esposta.

Per poter fare questa analisi, è stata elaborata una procedura che, mediante l'ausilio dei software QGIS e MATLAB, ha permesso di estrarre dalla batimetria e di elaborare le caratteristiche delle dune in maniera agevole.

Per prima cosa, si è usato QGIS per visualizzare il DEM dell'area di studio; da questo si è realizzato un REM (relative elevation model), ovvero un raster che trascura le variazioni di quote legate alla topografia di larga scala: tipicamente un corso d'acqua ha quote più elevate a monte, le quale decrescono gradualmente avvicinandosi alla foce, secondo un trend decrescente. Il REM è ottenuto dal DEM sottraendo questa variazione legata alla pendenza media con cui si sviluppa il corso d'acqua, così da rendere più facile apprezzare forme di fondo e conformazioni morfologiche presenti nel letto dell'alveo (Figura 3.15). Si sono quindi tracciate delle linee lungo l'alveo, allineate alla direzione della corrente, laddove erano visibili delle dune nel fondo. Le linee e i segmenti che le compongono sono di lunghezza molto variabile, con quello principale che si sviluppa per l'intero tratto compreso fra la sezione Pontelagoscuro e l'incile del Po di Goro. Lungo questi segmenti, si sono campionati dei punti a intervallo regolare di 2 m, ciascuno dei quali è identificato da una coordinata x e y e dalla quota z estratta dal DEM.

La lista di informazioni relative ai punti relativi a ciascun segmento è stata poi elaborata mediante l'utilizzo di MATLAB. Per ciascun segmento, sulla base dell'andamento delle quote, si sono individuate le creste e i cavi delle dune presenti lungo tale linea (Figura 3.16), ovvero i massimi e i minimi locali. Una cresta e un cavo successivi devono essere tali da individuare un dislivello non troppo ridotto, per non rischiare di considerare come duna delle semplici irregolarità del fondo alveo.

Individuati creste e cavi, è stato possibile calcolare l'ampiezza di ciascuna duna e la sua lunghezza, come differenza fra quote o coordinate longitudinali.

Procedendo in questo modo, a ciascun segmento è stata associata anche l'informazione relativa all'ampiezza delle dune presenti in quell'intervallo spaziale. Tale valore è stato poi filtrato applicando una media mobile. Questi risultati sono stati stampati in un file di formato .cnt, file di testo importabile nel software *Incidenze*, che consente di visualizzare i valori di ampiezza delle dune in scala a colori.

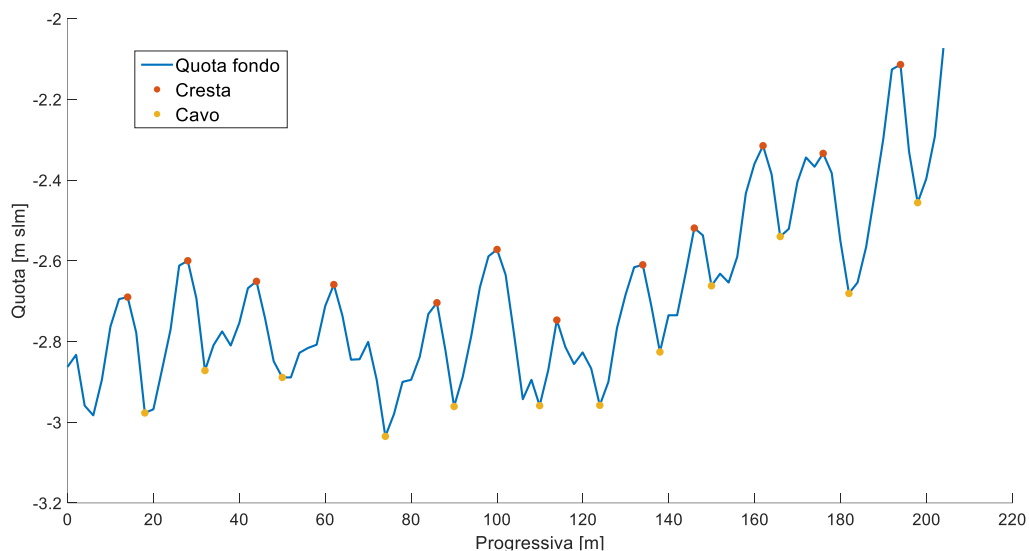


Figura 3.16: Esempio di un segmento estratto dal DEM. La linea blu rappresenta l'andamento delle quote, lungo la quale si sono identificati creste e cavi, contrassegnati dai pallini colorati.

Da questa analisi è emerso che il fondo del Po a valle della sezione di Pontelagoscuro è caratterizzato dalla diffusa presenza di dune. Nel periodo in cui è stato effettuato il rilievo, esse avevano un'ampiezza variabile, compresa fra poche decine di centimetri, fino ad un massimo di oltre 80 cm.

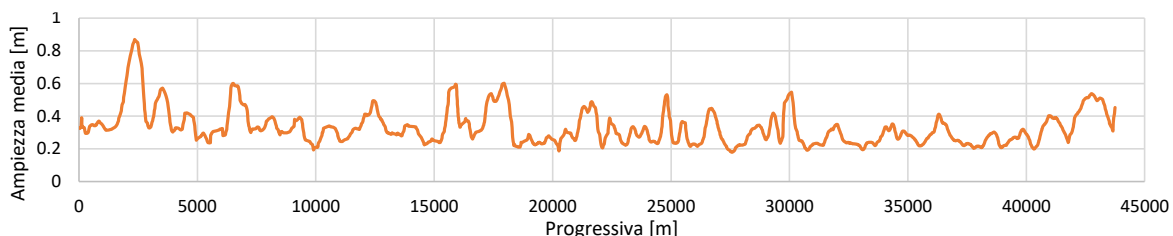


Figura 3.17: Andamento dell'ampiezza media delle dune rilevate nel DEM del tratto compreso fra Pontelagoscuro e l'incile del Po di Goro.

3.3.3 Modellazione delle dune

Il rilievo batimetrico nel tratto di studio è stato effettuato nel periodo compreso fra la fine di luglio e i primi giorni di settembre dell'anno 2005, in un regime di magra: la portata registrata a Pontelagoscuro in questo arco temporale è stata spesso al di sotto dei $500 \text{ m}^3/\text{s}$, con un minimo di $220 \text{ m}^3/\text{s}$ e un massimo di $1'200 \text{ m}^3/\text{s}$. Per portate esigue, lo sforzo al fondo esercitato dalla corrente è molto ridotto e, verosimilmente, non sufficiente a generare variazioni delle forme di fondo presenti. È quindi ragionevole pensare che, in condizioni di magra il corso d'acqua presenti un fondo le cui dune siano state modellate dall'ultima morbida transitata nel fiume, e che esse siano rimaste "congelate" nel tempo. Le dune registrate durante il rilievo sono dunque il

risultato di un regime idraulico sperimentato precedentemente. L'evoluzione delle dune è legata al valore di portata fluente, ma anche al tempo scala con cui essa varia: le dune non riescono a seguire l'andamento della portata se quest'ultima varia troppo rapidamente.

Si è quindi voluto indagare quale fosse il valore di portata che, secondo la teoria di Van Rijn, ha determinato le dune presenti nel rilievo batimetrico. La presenza di trasporto solido al fondo non giustifica necessariamente l'evolvere delle dune, se è troppo esiguo non è tale da apportare un contributo consistente alla modellazione del fondo. Superare la soglia di incipienza al movimento delle particelle solide al fondo non è quindi una condizione sufficiente affinché le dune subiscano un'evoluzione significativa. Secondo il modello di Van Rijn, nel letto del fiume si sviluppano delle dune solo se il parametro T risulta superiore a 3 (Figura 3.14). Si è tenuto quindi conto di questa condizione nel valutare la portata che ha formato le dune. Si sono realizzate delle simulazioni a fondo fisso con portata variabile, a partire da un valore molto esiguo, fino ad un massimo di $1'200 \text{ m}^3/\text{s}$. Dai risultati idrodinamici di queste si è determinato lo sforzo al fondo adimensionalizzato τ_{*SF} e il parametro T . Si è notato che il corso d'acqua sperimenta valori di sforzo al fondo sensibilmente diversi nel tratto compreso fra Pontelagoscuro e l'incile del Po di Goro. In particolare, la porzione di dominio più a monte registra sforzi maggiori rispetto a quello a valle, probabilmente dovuto al maggior confinamento del corso d'acqua, con sezioni di alveo ridotte e andamento più meandriforme. Si sono quindi distinti due tratti:

- Tratto 1: da Pontelagoscuro a Polesella;
- Tratto 2: da Polesella all'incile del Po di Goro.

Il tratto 1 esclude in realtà i primi 3 km a valle della sezione di Pontelagoscuro: in questa porzione il DTM registra la presenza di dune solo nel lato destro dell'alveo. Il modello simula invece sforzi al fondo maggiori nel lato sinistro e dunque la formazione di dune da questo lato, dove però il DTM riporta delle quote interpolate, dalle quali non è possibile osservare forme di fondo. Il confronto non risulta dunque fattibile.

È possibile scegliere quale soglia critica impiegare nella Eq. (3.28) per lo sforzo al fondo, se la formulazione proposta da Brownlie, Eq. (3.5), o quella di Van Rijn, Eq. (3.6). Il calcolo dell'ampiezza delle dune considerando la soglia critica τ_{*cVR} conduce a stime leggermente maggiori rispetto a quelle che si ottengono usando la soglia τ_{*cBR} . (Figura 3.18). Nel seguito si farà riferimento alla formulazione proposta da Van Rijn, che si è attestata fornire risultati più simili a quelli rilevati.

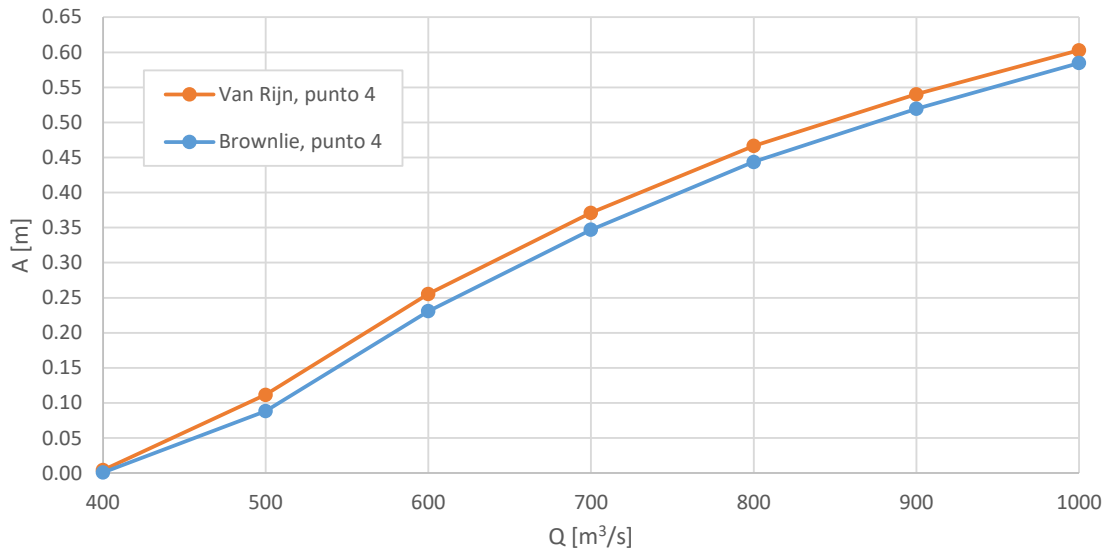


Figura 3.18: Andamento dell'ampiezza delle dune per una portata variabile da 400 a 1000 m³/s in un punto del dominio (punto 4 della Figura 3.27). Confronto fra l'utilizzo della soglia critica proposta da Brownlie e da Van Rijn.

Per il tratto di Po in esame, i principali parametri impiegati per studiare le dune sono i seguenti:

Grandezza	Valore	Unità di misura	Descrizione
d_{90}	0.25	mm	Novantesimo percentile del diametro dei sedimenti.
d_{50}	0.20	mm	Diametro medio dei sedimenti.
ρ	1'000	kg/m ³	Densità dell'acqua.
ρ_s	2'650	kg/m ³	Densità dei sedimenti.
g	9.81	m/s ²	Accelerazione di gravità.
ν	10 ⁻⁶	m ² /s	Viscosità cinematica dell'acqua.
R_p	11.40	-	Numero di Reynolds delle particelle.
D_*	5.06	-	Parametro dei sedimenti.
$\tau_{*c BR}$	0.0512	-	Sforzo critico secondo Brownlie.
$\tau_{*c VR}$	0.0496	-	Sforzo critico secondo Van Rijn.

Tabella 3.2: Riepilogo dei principali parametri necessari per lo studio delle forme di fondo nel caso di studio.

Nel tratto 1, il parametro T supera la soglia di 3 nella maggior parte del dominio per una portata di $600 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre si attesta su valori inferiori nel tratto 2.



Figura 3.19: Distribuzione spaziale del parametro T , per un valore di portata di $600 \text{ m}^3/\text{s}$, nel "tratto 1" da Pontelagoscuro a Polesella.



Figura 3.20: Distribuzione spaziale del parametro T , per un valore di portata di $600 \text{ m}^3/\text{s}$, nel "tratto 2" da Polesella all'incile del Po di Goro.

Le caratteristiche delle dune nel tratto 1, determinate con l'approccio di Van Rijn (descritto nel paragrafo 3.3.1) per il valore di portata di $600 \text{ m}^3/\text{s}$, mostrano una buona corrispondenza con quelle rilevate. L'aspetto più significativo su cui è incentrato il confronto riguarda l'ampiezza delle dune.

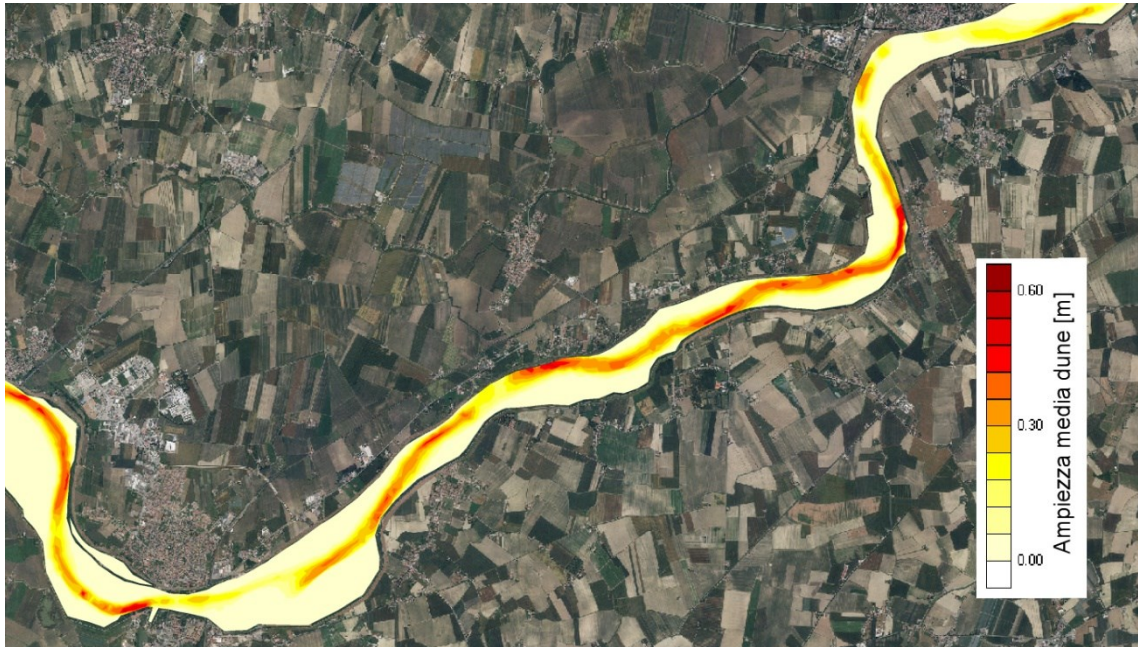


Figura 3.21: Distribuzione spaziale dell'ampiezza delle dune calcolate, per un valore di portata di $600 \text{ m}^3/\text{s}$, nel "tratto 1" da Pontelagoscuro a Polesella.

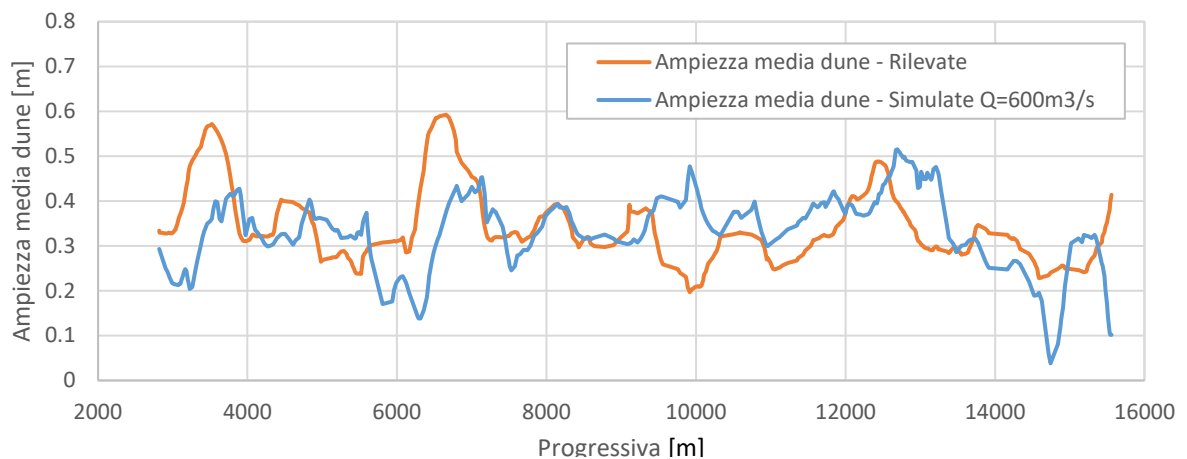


Figura 3.22: Confronto tra ampiezza delle dune estratte del rilievo e simulata per una portata di $600 \text{ m}^3/\text{s}$ lungo l'intero tratto 1.

Si è osservato che, in presenza di curve, le dune presenti nel rilievo sono di entità generalmente maggiore rispetto a quelle calcolate; in alternativa, il picco di ampiezza delle dune simulate tende a collocarsi più a valle del picco rilevato. È da tenere conto che le formule

utilizzate per la determinazione dei parametri che conducono alla determinazione delle caratteristiche delle dune sono di carattere sperimentale: fanno riferimento a condizioni di canale rettilineo e non tengono conto di ulteriori fenomeni che si possono innescare in presenza di curve, quali la formazione di correnti secondarie. Un'ulteriore motivazione di questa discrepanza può essere legata alla presenza di scavi localizzati all'estradosso delle curve, che possono aver portato a una non corretta identificazione delle creste e dei cavi delle dune, determinando una sovrastima del dislivello associato alle dune.

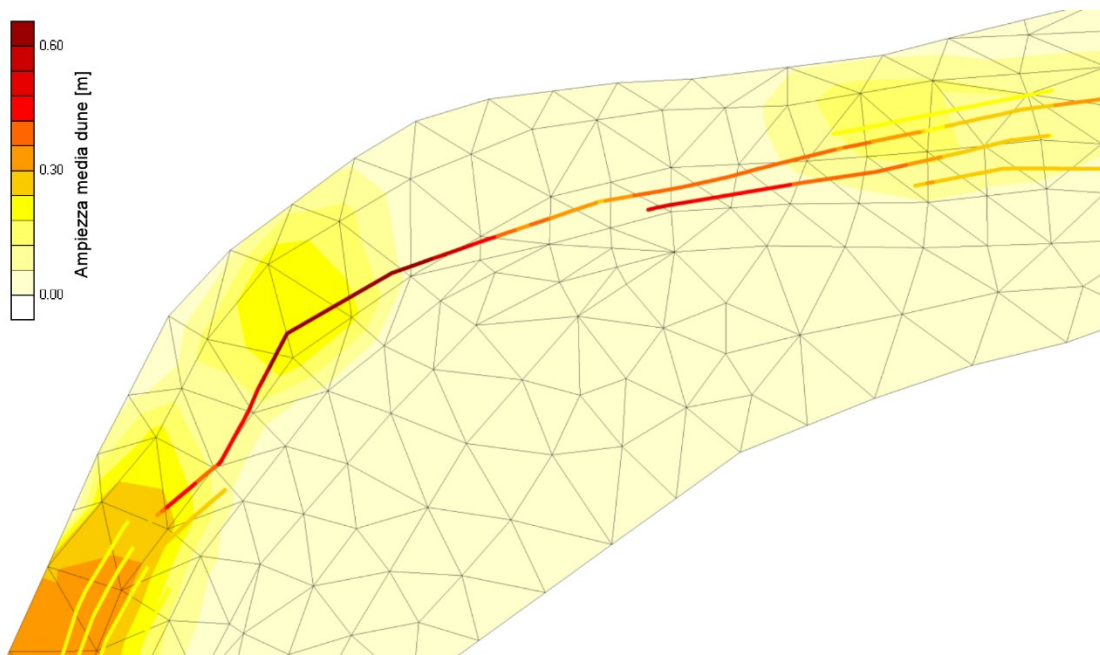


Figura 3.23: Zoom di una curva presente nel tratto 1. Il colore delle maglie triangolari indica l'ampiezza media delle dune da modello, mentre il colore dei segmenti indica quella estratta dal DTM.

Nel tratto 2, il moto della corrente determina degli sforzi al fondo inferiori rispetto che nel tratto di monte. Di conseguenza, è necessaria una portata maggiore per entrare in un regime idraulico in grado di formare e modellare le forme di fondo in quel tratto di alveo.

Si è identificato il valore di $800 \text{ m}^3/\text{s}$ come valore soglia di portata in corrispondenza del quale il parametro T supera il valore minimo necessario per la formazione di dune in buona parte del dominio. Per questo valore di portata, sono state ricavate le caratteristiche teoriche delle dune anche in questo tratto, e sono state confrontate con le caratteristiche estratte dal rilievo batimetrico.



Figura 3.24: Distribuzione spaziale dell'ampiezza delle dune calcolate, per un valore di portata di $800 \text{ m}^3/\text{s}$, nel "tratto 2" da Polesella all'incile del Po di Goro.

Il confronto fra l'ampiezza delle dune simulata e stimata dal rilievo batimetrico dell'intero tratto è riportato in Figura 3.25. Si nota una buona aderenza fra i due profili, in termini di ampiezza. Anche in questo caso, si segnala una non perfetta corrispondenza spaziale, con un leggero sfasamento (ritardo) del picco simulato rispetto a quello misurato.

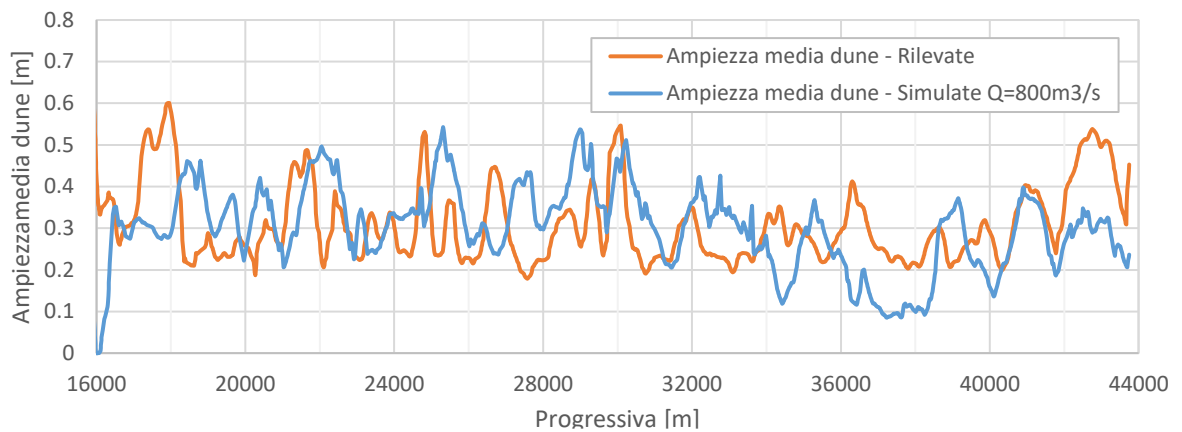


Figura 3.25: Confronto dell'ampiezza delle dune estratte del rilievo e quelle simulate con una portata di $800 \text{ m}^3/\text{s}$ lungo l'intero tratto 2.

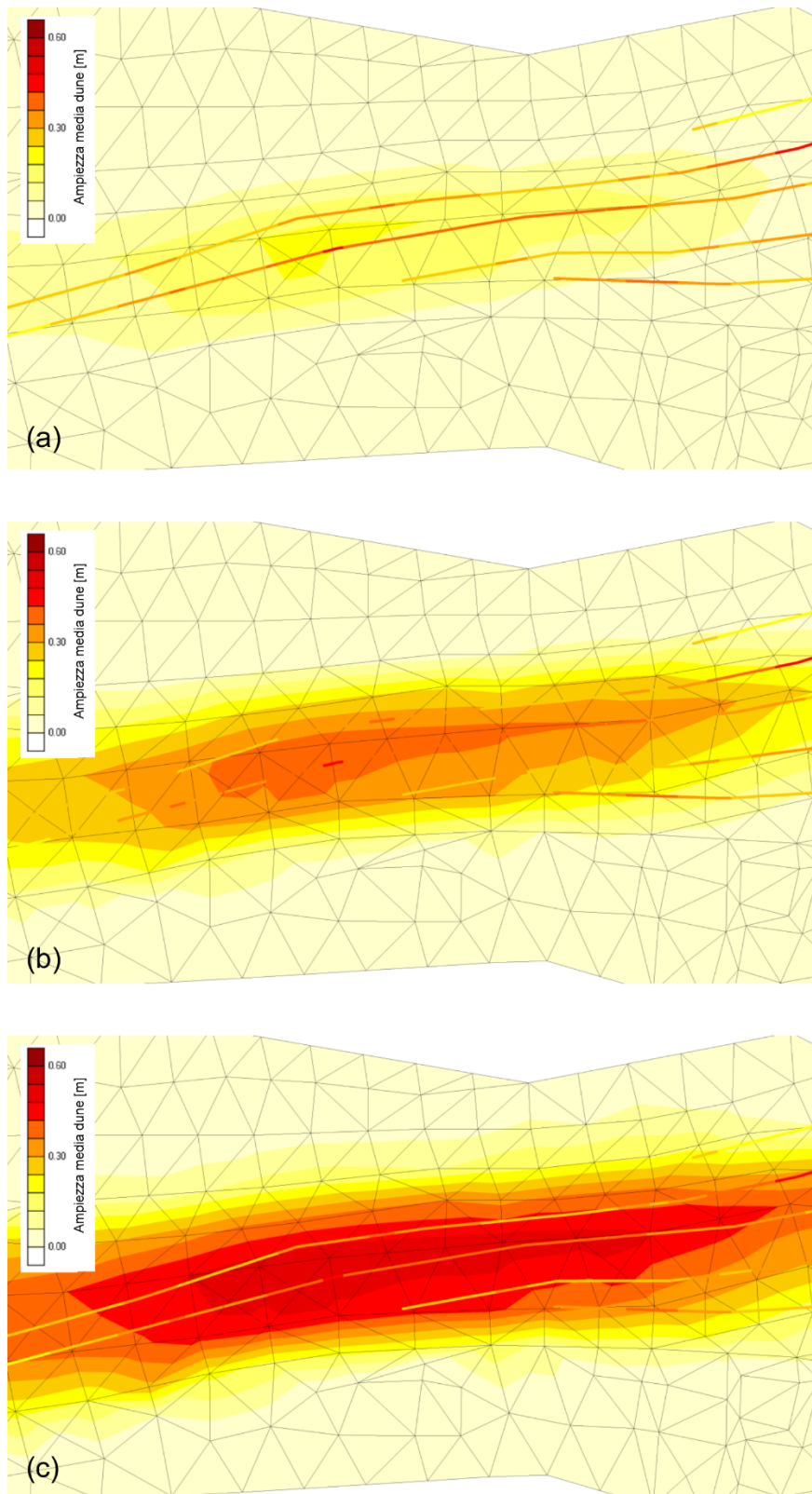


Figura 3.26: Zoom su una porzione del tratto 2. Ampiezza delle dune calcolate (mappa a colori di sfondo) e di quelle rilevate (colore delle linee) per tre diversi valori di portata, (a) $600 \text{ m}^3/\text{s}$, (b) $800 \text{ m}^3/\text{s}$, (c) $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. È evidente come per il valore di portata minore le dune calcolate siano troppo piccole, per la portata maggiore sovrastimino invece quelle estratte dal DTM. La migliore corrispondenza si verifica per la portata di $800 \text{ m}^3/\text{s}$, caso (b).

I valori di portata di 600 m³/s e 800 m³/s risultano i migliori per descrivere le dune rilevate rispettivamente nel tratto 1 e nel tratto 2. Ciò è stato confermato anche mediante di un indicatore statistico: si è calcolata la radice dell'errore quadratico medio (RMSE) fra ampiezza simulata ed estratta, per valori di portata compresi fra 300 m³/s e 1'200 m³/s, per ciascun tratto. Tale parametro assume il valore minimo proprio per i valori di portata di 600 m³/s e 800 m³/s.

PORTATA [m ³ /s]	RMSE [-]	
	Tratto 1	Tratto 2
300	0.222	0.315
400	0.153	0.307
500	0.111	0.272
600	0.104	0.217
700	0.126	0.165
800	0.151	0.137
900	0.175	0.147
1'000	0.196	0.176
1'100	0.213	0.210
1'200	0.229	0.243

Tabella 3.3: la tabella riporta la radice dell'errore quadratico medio (RMSE) calcolato per l'ampiezza delle dune calcolate e registrate al variare della portata fluente nel corso d'acqua. In giallo sono evidenziate le condizioni di minimo per il tratto 1 e per il tratto 2.

3.3.4 Evoluzione delle dune durante la piena

Nel paragrafo precedente si è analizzata la configurazione delle forme di fondo in un preciso istante, ossia nel momento in cui è stato effettuato il rilievo batimetrico. Tuttavia, si è visto come le caratteristiche delle dune siano strettamente legate alle condizioni idrodinamiche presenti nel corso d'acqua. Durante un evento di piena, la loro conformazione può variare sensibilmente: le dune crescono in ampiezza con la portata, ma esiste un valore massimo raggiungibile oltre il quale si passa nel regime di transizione e le dune si riducono fino ad eventualmente scomparire totalmente. Poiché lo sforzo al fondo, come visto in precedenza, è la somma del contributo legato all'attrito di parete (determinato dal diametro dei sedimenti) e del contributo delle forme

di fondo (3.22), l'abbattimento di queste ultime o la loro riduzione porterebbe a una diminuzione della resistenza al fondo, con conseguente aumento della capacità di deflusso del fiume. Questo fenomeno potrebbe giustificare i livelli registrati nel basso Po in caso di portate molto alte, che risultano molto inferiori rispetto a quelli simulati numericamente da modelli idrodinamici a fondo fisso.

A titolo esemplificativo, per mostrare l'andamento temporale delle forme di fondo, sono stati identificati quattro punti nel dominio, di seguito identificati con numeri da 1 a 4, dove 1 identifica un punto poco a valle della sezione di Pontelagoscuro e i successivi sono collocati progressivamente verso valle. I punti sono stati scelti in zone in cui la variabilità temporale delle dune durante l'evento di piena risultava più rilevante.

Dalla simulazione dell'evento di piena del 2014 si sono ricavati i parametri idraulici necessari a calcolare i parametri descrittivi delle dune, come già descritto in precedenza. Ad ogni istante temporale dell'evento alluvionale si sono quindi stimati ampiezza e lunghezza delle dune che, secondo il modello teorico di Van Rijn, si verrebbero a creare in quelle particolari condizioni.



Figura 3.27: In figura sono evidenziati i quattro punti presi in considerazione per l'analisi dell'andamento temporale delle dune.

Nei grafici seguenti è riportato l'andamento temporale di A e L , insieme all'idrogramma di portata di Pontelagoscuro e all'istante temporale identificato al capitolo precedente come l'istante in cui inizia il cambio regime idrodinamico del tratto vallivo di Po.

L'andamento dell'ampiezza A delle dune (Figura 3.28) è molto simile per tutti e quattro i punti: mostra una crescita iniziale, fino al raggiungimento di un massimo che si verifica quasi contemporaneamente in tutti i punti, poi inizia una fase di decrescita. Quando la portata fluente comincia a calare, le dune tornano a crescere.

L'istante critico è pressoché lo stesso momento in cui si ha l'abbattimento totale delle dune nel punto 1, quello in prossimità di Pontelagoscuro. Negli altri punti la riduzione delle dune non è così accentuata, ma comunque evidente.

La lunghezza L delle dune presenta andamenti diversi a seconda del punto considerato (Figura 3.29). Per alcuni di essi è crescente per tutta la fase ascendente della piena, e diminuisce solo nella fase calante (è proporzionale al tirante idraulico). Per i punti 1 e 2 viene però raggiunto un massimo prima del colmo di portata e c'è una riduzione in concomitanza della portata massima.

Come descritto nel paragrafo 3.3.1, è possibile calcolare in via teorica la variazione dei parametri di resistenza al moto come conseguenza della variazione di ampiezza delle dune nel corso della piena. È stato perciò calcolato il coefficiente di Gauckler-Strickler per tutto l'alveo del Po a valle di Pontelagoscuro e per l'intero evento di piena del 2014, in modo da evidenziarne la variazione nel tempo in dipendenza del regime di portata e delle conseguenti caratteristiche delle dune (Figura 3.30).

Nella Tabella 3.4 è indicata la variazione massima sperimentata da ciascuno dei quattro punti. Tale variazione è significativa per i punti 1 e 2, più contenuta per i punti 3 e 4. Per i primi due punti la variazione massima è addirittura superiore a quella che risultava necessaria dalle analisi condotte al paragrafo 2.4 a spiegare l'incongruenza dei livelli misurati e simulati. In quel caso si era imposto un incremento di 15 per tutte le maglie dell'alveo principale a valle di Pontelagoscuro e questo nuovo valore assegnato di scabrezza si manteneva costante per tutta la durata della piena, a partire dall'istante di cambio regime. Qui invece la variazione del coefficiente è graduale nel tempo e variabile nello spazio, ciascuna maglia del dominio registra un proprio andamento, con variazioni più o meno significative a seconda dell'evoluzione locale delle forme di fondo.

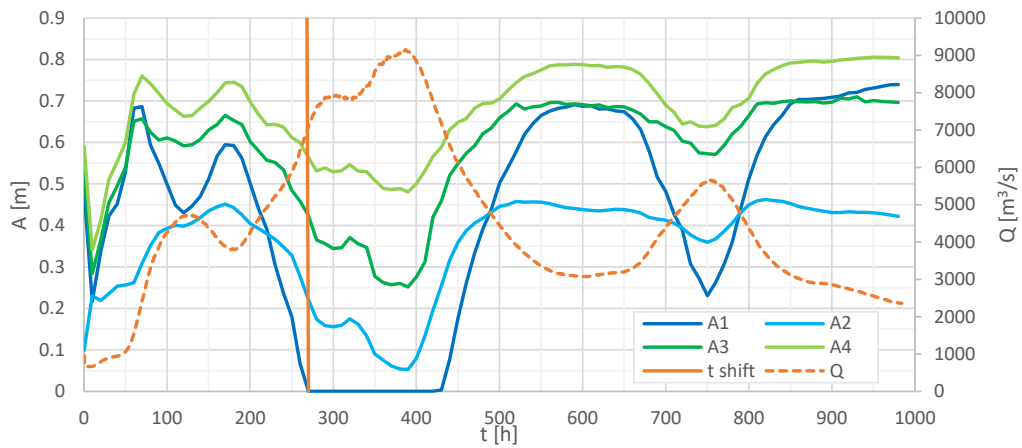


Figura 3.28: Andamento temporale dell'ampiezza delle dune per i 4 punti scelti durante l'evento di piena del 2014. È riportato inoltre l'idrogramma di portata fluente a Pontelagoscuro (linea tratteggiata arancione) ed evidenziato l'istante di cambio regime individuato nel capitolo precedente.

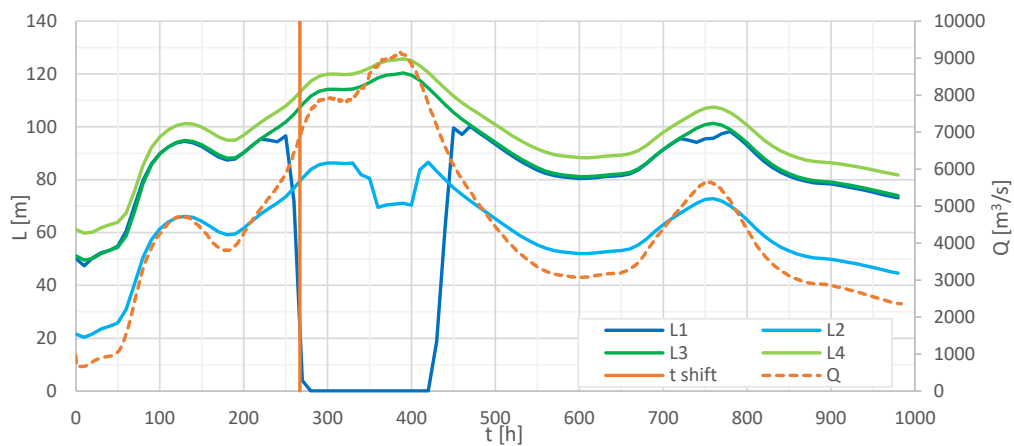


Figura 3.29: Andamento temporale della lunghezza delle dune per i 4 punti scelti durante l'evento di piena del 2014. È riportato inoltre l'idrogramma di portata fluente a Pontelagoscuro (linea tratteggiata arancione) ed evidenziato l'istante di cambio regime individuato nel capitolo precedente.

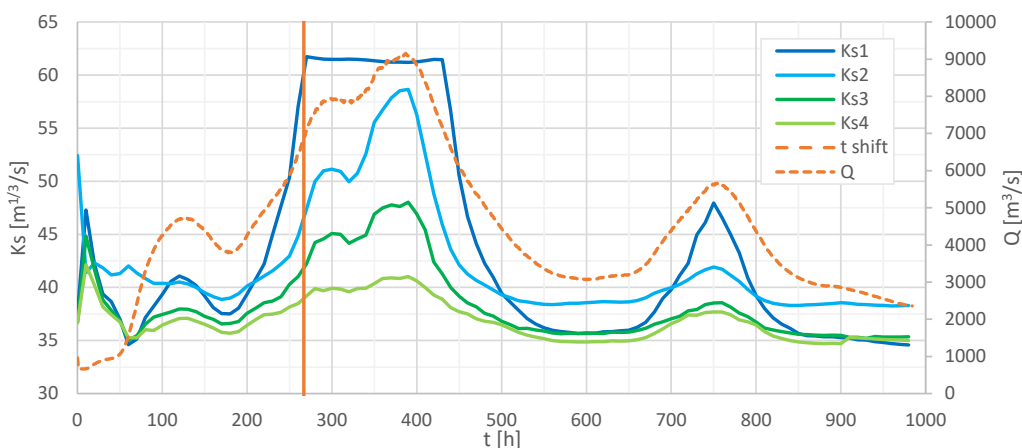


Figura 3.30: Andamento temporale del coefficiente di Gauckler-Strickler per i 4 punti scelti durante l'evento di piena del 2014. È riportato inoltre l'idrogramma di portata fluente a Pontelagoscuro (linea tratteggiata arancione) ed evidenziato l'istante di cambio regime individuato nel capitolo precedente.

Punto	1	2	3	4
$K_{S_min} [m^{1/3}/s]$	34.6	38.3	35.2	34.7
$K_{S_max} [m^{1/3}/s]$	61.7	58.6	48.0	41.0
$\Delta K_S [m^{1/3}/s]$	27.2	20.4	12.8	6.3

Tabella 3.4: Per ciascun punto è indicato il valore minimo e massimo del coefficiente di Strickler calcolato tenendo conto dell'evolversi delle dune. È indicata anche la variazione in termini assoluti.

3.3.5 Modellazione idrodinamica con calcolo dinamico della resistenza al fondo

Si è visto al paragrafo precedente come il regime idraulico della piena del 2014 preveda un'evoluzione temporale delle dune che, in alcuni punti del dominio, risulta particolarmente significativo. L'incremento dell'ampiezza delle dune e il loro eventuale abbattimento hanno delle ripercussioni sulla resistenza del moto, come evidenziato dalla variazione temporale del coefficiente di resistenza nelle diverse fasi della piena, con verosimili ripercussioni sulla propagazione della piena stessa e sull'andamento dei livelli. La stima teorica della variazione del coefficiente K_S , d'altra parte, non è un risultato direttamente utilizzabile nella modellazione bidimensionale del tratto di Po in esame. Infatti, le resistenze che nel modello idrodinamico sono rappresentate con la formula di Gauckler-Strickler non sono esclusivamente legate all'attrito di parete. Esistono infatti molti altri fenomeni dissipativi che l'approccio bidimensionale, con le sue ipotesi semplificative di fondo, e la discretizzazione piuttosto grossolana del dominio di calcolo, non possono rappresentare. Alcuni esempi sono le resistenze di forma (distacco dello strato limite e formazione di zone di separazione), i moti secondari che si sovrappongono al moto principale (es. il moto elicoidale in curva, ma anche le correnti secondarie del II tipo), l'increspatura della superficie libera, l'energia assorbita dalla movimentazione del materiale di fondo, gli scambi di quantità di moto tra alveo e golena, ecc. Tali meccanismi dissipativi, legati a fenomeni e caratteristiche del campo di moto non risolte esplicitamente, vengono concettualizzati e inglobati nel coefficiente di resistenza secondo Strickler, che necessita infatti di essere ottenuto per taratura mediante confronto con dati idrodinamici misurati.

Tenendo conto di questo quadro, si è voluto implementare nel modello un algoritmo che permetta di calcolare i coefficienti di resistenza del modello bidimensionale in maniera dinamica, tenendo in conto della componente di sforzo, variabile nel tempo, legata alle forme di fondo. L'idea di fondo è che, per le maglie della griglia di calcolo che rappresentano l'alveo

principale, il modello calcoli ad ogni passo temporale la resistenza del moto legata alla resistenza di parete (*skin friction*) e alle caratteristiche istantanee delle dune (*form drag*).

Lo sforzo della corrente è in generale proporzionale al quadrato della velocità e al reciproco del quadrato della conduttanza. Lo sforzo al fondo, che rappresenta la resistenza totale al moto, può quindi essere espresso come somma di due contributi:

$$\tau = \tau_{bed} + \tau_u \quad (3.31)$$

$$\tau = \frac{\rho U^2}{C_{bed}^2} + \frac{\rho U^2}{C_u^2} \quad (3.32)$$

in cui τ è lo sforzo al fondo complessivo, ρ è la densità dell'acqua, U è la velocità della corrente fluida, τ_{bed} e C_{bed} sono rispettivamente lo sforzo al fondo e la conduttanza associati all'attrito di grano e alla presenza di forme di fondo, come definito dalle equazioni (3.21) e (3.24), τ_u e C_u sono rispettivamente lo sforzo e la conduttanza che inglobano i fenomeni dissipativi non esplicitamente risolti dal modello (*unresolved*).

Considerando la relazione di Chezy

$$U = \chi \cdot (R_H j)^{1/2} \quad (3.33)$$

e l'espressione dello sforzo τ

$$\tau = \gamma R_H j \quad (3.34)$$

è possibile esprimere il coefficiente di scabrezza χ in funzione dello sforzo

$$\chi = \frac{U}{(\tau/\gamma)^{1/2}} \quad (3.35)$$

nella quale χ è il parametro di scabrezza secondo Chezy, R_H è il raggio idraulico della sezione, j è la pendenza della linea dell'energia, γ è il peso specifico dell'acqua.

Tuttavia, il modello esprime la scabrezza di maglia attraverso il coefficiente di Strickler, che è legato al parametro di Chezy dalla seguente:

$$K_s = \frac{\chi}{Y^{1/2}} \quad (3.36)$$

Ricordando infine l'Eq (3.32), il coefficiente secondo Strickler può essere determinato ad ogni passo temporale con l'espressione:

$$K_S = \frac{\sqrt{g}}{Y^{1/6}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{C_{bed}^2} + \frac{1}{C_u^2}}} \quad (3.37)$$

in cui C_{bed} è determinabile mediante l'Eq. (3.24), mentre C_u costituisce un parametro da determinare mediante taratura.

L'obiettivo dell'analisi è quello di indagare se, assegnando un opportuno valore alla conduttanza C_u , il modello sia effettivamente in grado fornire stime di livelli al colmo più vicine alla realtà che non nel caso di coefficienti di resistenza costanti. Il calcolo dinamico della resistenza è applicato alle sole maglie costituenti l'alveo del fiume in questo tratto, in quanto nelle aree esterne ad esso, pur venendo allagate, non si sviluppano forme di fondo e il computo dinamico di tale parametro non è necessario. Nelle aree golenali si è mantenuto, costante nel tempo, il coefficiente di Strickler determinato nella precedente fase di taratura del modello.

Per determinare il valore da attribuire a C_u , si è tenuto conto dei seguenti criteri. Assegnare a questo termine un valore ridotto significa assumere che la resistenza al moto prodotta dai meccanismi dissipativi non esplicitamente risolti sia molto elevata; dunque, diventerà trascurabilmente piccolo l'effetto dinamico legato alla presenza di forme di fondo e alla loro evoluzione in funzione della portata fluente. Il contributo dinamico avrà poca rilevanza e il valore del coefficiente secondo Strickler usato nelle simulazioni sarà scarsamente variabile, riportando quindi i risultati ad una condizione simile a quella di scabrezza costante vista fino ad ora. D'altra parte, assegnare a C_u un valore troppo elevato condurrebbe ad una situazione opposta. La resistenza al moto legata a questo contributo diventerebbe modesta, a favore di una variabilità significativa legata alle dune e a una ragionevole sottostima delle resistenze complessive (che si tradurrebbe in una sottostima generalizzata dei livelli).

Considerando ancora il tratto di Po a valle di Pontelagoscuro, si sono effettuate alcune simulazioni variando il valore attribuito a C_u , e verificando la bontà delle previsioni modellistiche confrontando i livelli calcolati con quelli misurati nelle stazioni idrometriche di Pontelagoscuro e di Polesella (Figura 1.2).

Si è osservato come, assegnando al parametro C_u un valore pari a 30, in corrispondenza del colmo, dove il modello in precedenza produceva la massima discrepanza con i livelli misurati, la riduzione dei livelli al colmo è tale da predire dei livelli molto più prossimi a quelli registrati (Figura 3.31 e Figura 3.32). Tuttavia, il modello sottostima leggermente i livelli degli istanti precedenti il colmo.

I risultati più interessanti sono forse quelli ottenuti attribuendo al parametro C_u un valore di 25. In questo caso si ottiene una riduzione dei livelli in corrispondenza del colmo più ridotta, non sufficiente da permettere una fedele riproduzione dei livelli massimi, ma è localizzata solo per i valori di livello in corrispondenza del colmo massimo. I livelli nella restante parte della piena rimangono infatti praticamente inalterati, ben riproducendo l'andamento reale come già in precedenza. Sia la sezione di Pontelagoscuro che quella di Polesella sperimentano la stessa entità di variazione, per cui i precedenti commenti di fatto per tutto il tratto di Po compreso tra Pontelagoscuro e l'incile del Po di Goro.

L'andamento ottenuto con $C_u = 25$ sembra quindi a favore dell'ipotesi che l'evoluzione delle forme di fondo giochi un ruolo importante per regimi di portata di massima piena, e che possa almeno in parte giustificare il cambio di regime idrodinamico che si manifesta in questo tratto vallivo del fiume Po. La sola variazione delle dune presenti nel fondo non è tuttavia sufficiente a riprodurre in modo del tutto fedele le reali resistenze al moto, in quanto al colmo i livelli simulati rimangono ancora superiori a quelli registrati nelle due stazioni idrometriche.

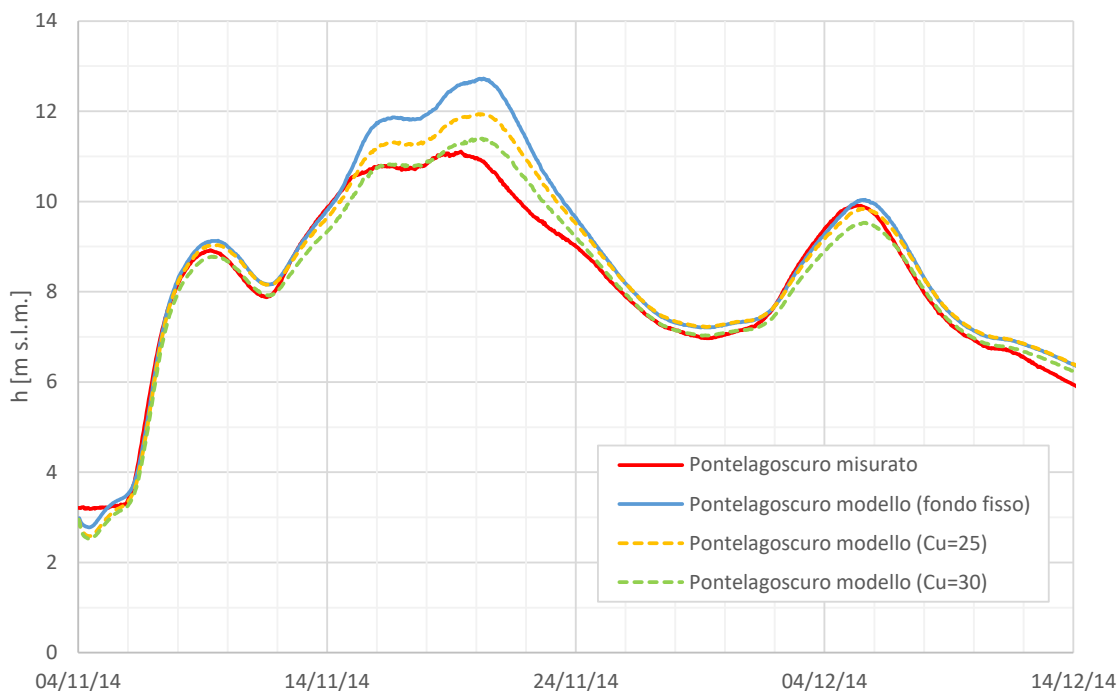


Figura 3.31: Andamento temporale del livello nella sezione di Pontelagoscuro per la piena del 2014. Confronto fra valori misurati (rosso), modello a fondo fisso (linea blu continua) e modello con calcolo dinamico della resistenza al moto (linee tratteggiate) considerando diverse ipotesi con riferimento alla conduttanza irrisolta C_u .

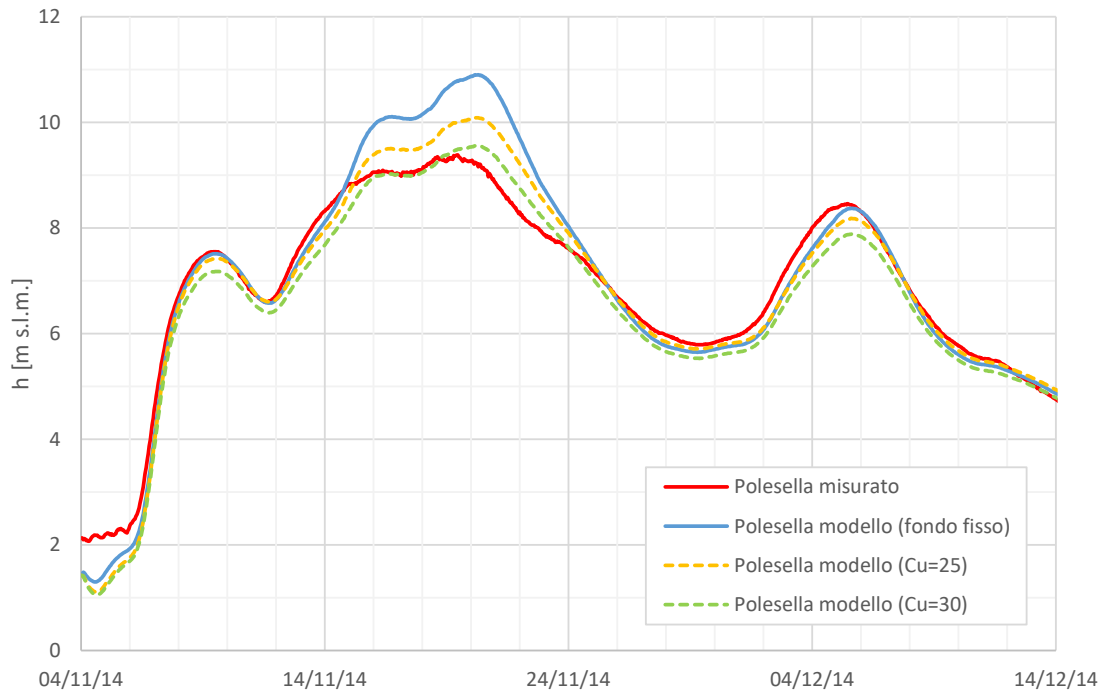


Figura 3.32: Andamento temporale del livello nella sezione di Polesella per la piena del 2014. Confronto fra valori misurati (rosso), modello a fondo fisso (linea blu continua) e modello con calcolo dinamico della resistenza al moto (linee tratteggiate) considerando diverse ipotesi con riferimento alla conduttanza irrisolta C_u .

È anche interessante osservare come varia il coefficiente di scabrezza secondo Strickler con questa formulazione del modello che ne aggiorna il valore numerico in maniera dinamica durante la simulazione. Prendendo in considerazione gli stessi quattro punti del dominio usati anche al paragrafo precedente (Figura 3.27), si osserva, come è logico aspettarsi, che la variabilità del coefficiente di scabrezza è più limitata rispetto a quanto visto in precedenza, per il fatto che la componente di resistenza al moto descritta dalla conduttanza irrisolta rimane sempre costante nel tempo e quindi la variabilità delle dune ha un peso minore nella stima complessiva del K_s .

Il punto 4, rispetto alle analisi preliminari svolte al 3.3.4, è caratterizzato da un coefficiente di scabrezza inferiore, poiché con la simulazione dinamica anche la configurazione delle dune varia (dipende infatti dalle caratteristiche locali del moto) e la loro ampiezza in quella posizione si attesta attorno a dei valori mediamente elevati, che non subiscono una significativa riduzione di entità durante l'evento di riferimento.

Di seguito sono infine riportate delle istantanee raffiguranti una porzione del dominio in corrispondenza di Pontelagoscuro in due istanti temporali differenti. È messa in evidenza la diversa distribuzione spaziale dell'ampiezza delle dune e il relativo coefficiente di Strickler stimato.

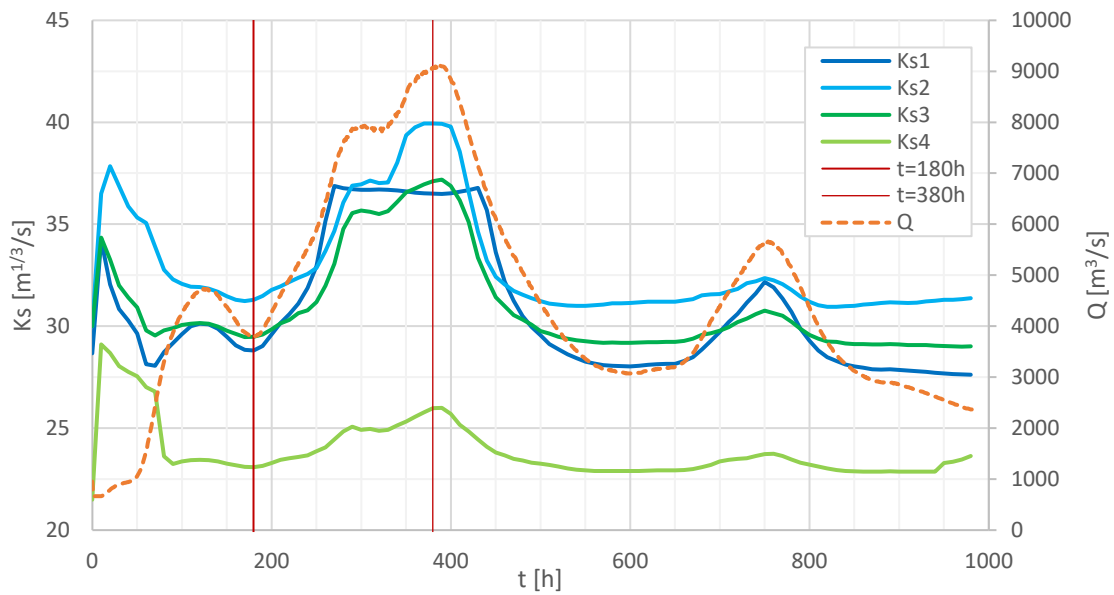


Figura 3.33: Diagramma dell'andamento del coefficiente di Strickler durante l'evento di piena secondo il modello che aggiorna dinamicamente il coefficiente di resistenza. Sono riportati i valori nei 4 punti già individuati al paragrafo 3.3.4. Sono inoltre evidenziati i due istanti temporali in cui si verificano il massimo e il minimo, illustrati poi nelle figure seguenti.

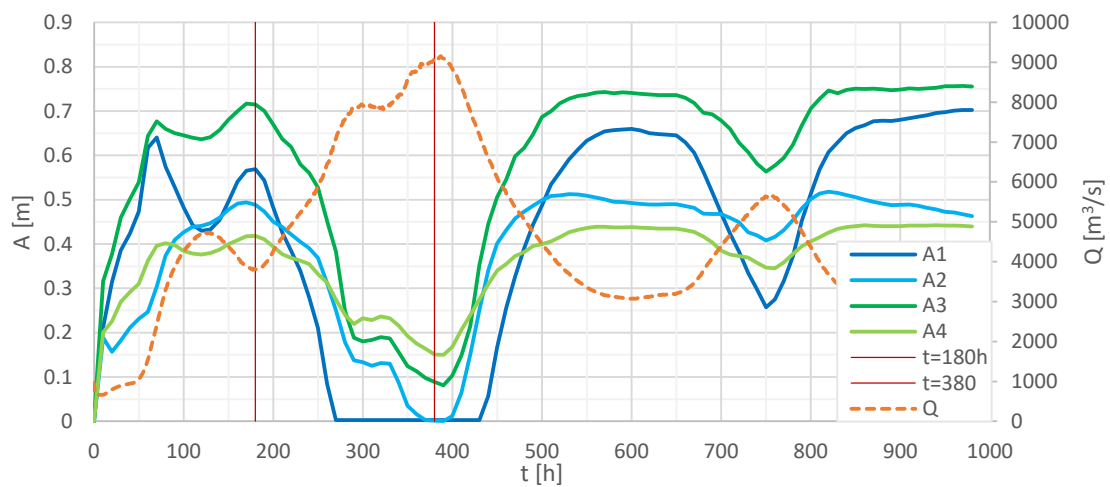


Figura 3.34: Diagramma dell'andamento dell'ampiezza delle dune durante l'evento di piena secondo il modello che aggiorna dinamicamente il coefficiente di resistenza. Sono riportati i valori nei 4 punti già individuati al paragrafo 3.3.4. Sono inoltre evidenziati i due istanti temporali in cui si verificano il massimo e il minimo, illustrati poi nelle figure seguenti.

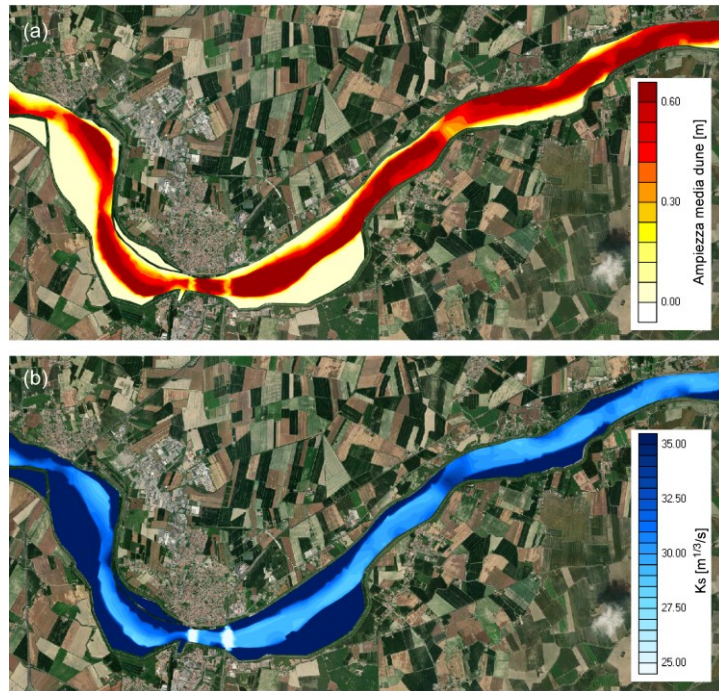


Figura 3.35: distribuzione spaziale dell'ampiezza delle dune (a) e del coefficiente di resistenza (b) al tempo $t=180$ h della simulazione della piena del 2014, effettuata con il calcolo dinamico della resistenza. In tale istante le dune hanno sviluppato un'ampiezza elevata e il coefficiente di Strickler stimato dal modello per ciascuna maglia è fra i minimi valori assunti all'interno dell'intera simulazione.

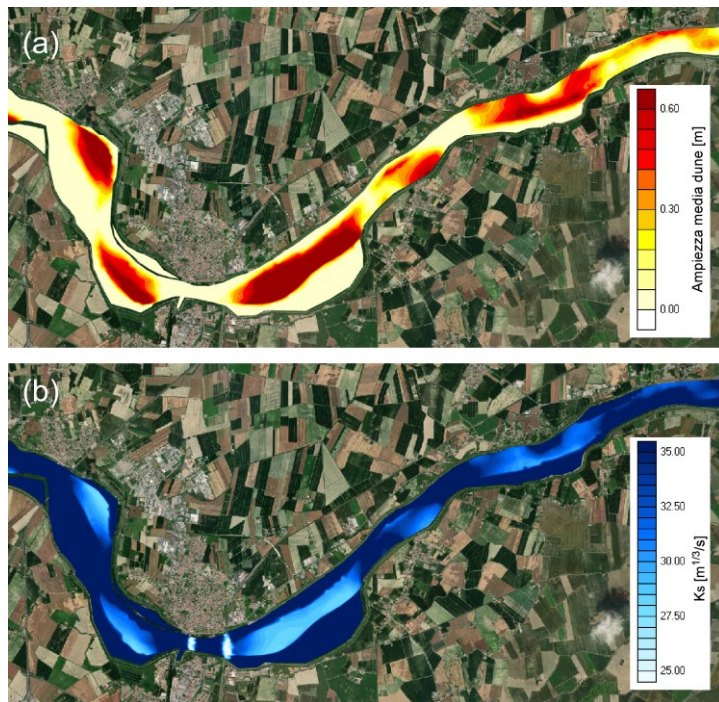


Figura 3.36: distribuzione spaziale dell'ampiezza delle dune (a) e del coefficiente di resistenza (b) al tempo $t=380$ h della simulazione della piena del 2014, effettuata con calcolo dinamico della resistenza. In questo istante, l'ampiezza delle dune è sensibilmente ridotta in buona parte del dominio e il coefficiente di Strickler stimato dal modello per ciascuna maglia risulta sensibilmente incrementato laddove le dune sono maggiormente ridotte.

Conclusioni

Con questo lavoro di tesi si è voluto analizzare l'esistenza e le possibili cause di una sorta di anomalia nelle condizioni di deflusso del tratto di Basso Po durante i maggiori eventi di piena. La sezione strumentata di Pontelagoscuro è nota per avere un legame tra portata e livello che le previsioni modellistiche usualmente impiegate per studiare la propagazione delle piene non sono in grado di riprodurre correttamente. Nello specifico, come successo in occasione della piena del 2000, i modelli idraulici sovrastimano significativamente i livelli di massima piena, con conseguenze negative importanti sulla gestione delle emergenze. Le cause di questa ridotta accuratezza previsionale sono probabilmente da ricercarsi in specifiche dinamiche di trasporto che si instaurano nell'alveo fluviale. Le analisi modellistiche condotte e descritte in questo lavoro di tesi hanno cercato di fare luce sul ruolo di alcune di queste dinamiche.

Per condurre queste analisi è stato impiegato un modello idro-morfodinamico bidimensionale che ha permesso di simulare la propagazione di onde di piena nel tratto di Po compreso tra Borgoforte e la foce in Adriatico. La scelta di estendere il dominio a monte di Pontelagoscuro fino alla sezione di Borgoforte è stata dettata dalla necessità di ottenere una stima delle portate più affidabile possibile, e ciò grazie al fatto che la scala delle portate di Borgoforte è più accurata rispetto a quella delle sezioni del tratto vallivo (non è infatti caratterizzata da un significativo cappio di piena).

Una volta tarato sui livelli misurati nelle 4 sezioni strumentate di Borgoforte, Sermide, Ficarolo e Pontelagoscuro, il modello si è mostrato in grado di simulare in modo molto preciso le piene del 2000 e del 2014, tranne che in prossimità dei colmi di piena, per i quali ha effettivamente evidenziato delle sovrastime significative rispetto ai livelli registrati. È stato possibile identificare un istante in cui i livelli simulati iniziano a divergere in modo repentino e significativo da quelli misurati. I risultati modellistici suggeriscono la presenza di un cambio di regime idrodinamico per i maggiori livelli idrometrici: un aumento di capacità di deflusso che determina livelli inferiori rispetto a quelli simulati dal modello. Simulazioni aggiuntive hanno permesso di stimare la variazione di scabrezza che sarebbe necessario assegnare al modello per

riprodurre correttamente l'andamento dei livelli durante il transito del colmo di piena, inquadrando così l'ordine di grandezza degli effetti dei fenomeni che si vogliono indagare.

L'analisi delle possibili cause di questo singolare andamento del legame tra portate e livelli è stata condotta con riferimento al solo tratto di Po da Pontelagoscuro alla foce. Inizialmente si è scelto di analizzare le possibili variazioni morfologiche di fondo alveo, ossia le dinamiche di scavo e deposito legate al trasporto solido. Infatti, il materiale incoerente costituente il fondo fluviale può essere movimentato sotto l'azione della corrente fluida e innescare così dei processi erosivi. Il fenomeno è legato allo sforzo indotto dalla corrente sui sedimenti ed è dunque proporzionale alla portata fluente. Si è quindi indagato se, per portate elevate, questo processo possa rendersi responsabile di un abbassamento del fondo tale da giustificare il cambio di regime idrodinamico osservato. Mediante un modello erosivo semplificato, che tiene conto della sola erosione senza risolvere effettivamente il successivo trasporto e deposito del materiale solido, è stato possibile stimare l'entità dello scavo in alveo necessario per simulare correttamente i livelli al colmo della piena. Risulta necessario un abbassamento del fondo alveo significativo in tutto il dominio, che supera i 5 m in alcune porzioni di fiume. Tuttavia, un effetto erosivo di questa entità non sembra risultare compatibile con il trasporto solido a cui è soggetto il fiume Po in questo tratto. Si è provato infatti ad implementare un modello, pur grossolano, che tenesse simulasse il trasporto solido in sospensione. In questo modo si è cercato di indagare la plausibilità che in una fase successiva all'erosione, che si realizza al colmo della piena, possa verificarsi una fase di deposito generalizzato, durante la fase calante della piena, in grado di colmare gli scavi realizzati in precedenza e di riportare il fiume alla sua originaria capacità di portata. Una variazione morfologica della sezione così significativa non viene però compensata dal materiale trasportato dalla corrente e la morfologia dell'alveo risulta irreversibilmente modificata, tanto da non permettere più la corretta simulazione dei livelli nella fase discendente della piena. Le analisi condotte, con i dati a disposizione, non sembrano quindi indicare lo scavo del fondo alveo come un processo che gioca un ruolo importante nella spiegazione dell'aumento di capacità di deflusso del Po in regimi eccezionali.

Il secondo fenomeno analizzato in questo studio è stata l'evoluzione delle forme di fondo. L'alveo di un corso d'acqua naturale è composto principalmente da materiale non coeso, che difficilmente si mantiene piano e, sotto l'azione della corrente fluida, tende a modellarsi e creare diverse strutture morfologiche di fondo quali ripples, dune e antidune. Il tipo di forme di fondo e le loro dimensioni dipendono dalle caratteristiche idrodinamiche locali e possono evolvere nel tempo, adattandosi ai diversi regimi idraulici sperimentati durante gli eventi di piena. La loro

presenza, d'altra parte, influenza significativamente le resistenze al moto, e quindi anche il livello idrometrico.

Nel caso del fiume Po, i rilievi batimetrici testimoniano la presenza di dune nel fondo nel suo tratto vallivo. Nel rilievo batimetrico, realizzato in condizioni di magra quando il trasporto solido e l'evoluzione delle dune sono praticamente nulli, le dune visibili sono probabilmente il retaggio di portate maggiori fluite in precedenza. Mediante la teoria delle dune sviluppata da Van Rijn, si sono fatte alcune simulazioni per stabilire quale fosse il valore di portata necessario per l'instaurarsi delle dune rilevate. È emerso come all'interno del dominio si sviluppino resistenze al moto molto variabili spazialmente, e che quindi le dune rilevate siano frutto di istanti temporali e di regimi idraulici differenti. Tuttavia, distinguendo due tratti nel dominio (a monte e a valle di Polesella), si sono individuati due valori di portata che sembrano ben riprodurre l'ampiezza media delle forme di fondo, e che risultano compatibili con le portate registrate nel periodo precedente al rilievo.

Dunque, si è proceduto con l'applicazione della teoria di Van Rijn per valutare l'evoluzione delle dune in caso di un evento di piena. La teoria prevede che l'ampiezza delle dune aumenti al crescere del parametro di trasporto, che a sua volta cresce al crescere della portata, ma che esista un valore massimo oltre il quale, pur aumentando la portata, l'ampiezza delle forme di fondo comincia a ridursi fino eventualmente ad azzerarsi. Si parla in questo caso di regime di transizione del fondo e si ha il passaggio ad una configurazione di letto piano. Secondo la formulazione di Einstein, lo sforzo al fondo può essere interpretato come somma di due contributi: una resistenza dovuta ai grani costituenti l'alveo e una resistenza aggiuntiva legata alla presenza di dune che, causando il distacco dello strato limite, determinano l'insorgenza di importanti resistenze di forma. Qualora queste ultime vengano a scomparire, la resistenza al moto sarebbe sensibilmente ridotta e la capacità di deflusso del corso d'acqua incrementata.

Inizialmente si sono fatte delle analisi processando i risultati forniti dal modello a fondo fisso, per la piena del 2014. Da queste prime analisi è emerso che in alcune porzioni del dominio, per valori di portata elevati, si possa effettivamente raggiungere il regime di transizione, con la riduzione dell'ampiezza delle dune e anche il loro completo abbattimento. Sempre dai risultati ottenuti a fondo fisso, si è stimato come varierebbe in questi casi la conduttanza complessiva del corso d'acqua, che tiene conto della resistenza di grano e di forma. La variazione di scabrezza teorica è apparsa comparabile con quella necessaria a spiegare il cambio di regime registrato a Pontelagoscuro e a permettere una simulazione più corretta dell'andamento dei livelli.

Per cercare di confermare l'attendibilità di questa ipotesi, si è implementato nel modello la stima dinamica della scabrezza delle maglie del dominio durante l'evolversi della piena. Per le

sole maglie dell'alveo (golene escluse), la resistenza al moto è calcolata come somma della resistenza di grano, della resistenza di forma e di una componente di resistenza aggiuntiva legata ai fenomeni dissipativi che il modello, per ragioni di scala spaziale e di ipotesi semplificative che ne stanno alla base, non è in grado di descrivere esplicitamente. In questa versione del modello, l'unico parametro di taratura è proprio il coefficiente che rappresenta la componente di resistenza non esplicitamente risolta. Mediante opportuna calibrazione di tale parametro, si è riusciti a simulare un andamento dei livelli della piena del 2014 che si avvicina maggiormente a quelli realmente registrati rispetto a tutti i tentativi precedenti. Tenere conto dell'evoluzione delle dune con la teoria di Van Rijn ha permesso infatti di ridurre i livelli simulati proprio in prossimità del colmo di piena, dove le simulazioni a fondo fisso mostravano la maggiore discrepanza, mantenendo però dei livelli corretti nella fase ascendente e discendente dell'onda di piena. L'effetto di questo fenomeno sembra manifestarsi infatti solo per regimi di portata significativi, andando a costituire una possibile spiegazione del cambio di regime idrodinamico del tratto di basso Po.

Tuttavia, è da osservare che l'inclusione delle dinamiche delle forme di fondo nel calcolo delle resistenze idrodinamiche non è ancora sufficiente a permettere una riproduzione accurata del legame tra portate e livelli di massima piena nel tratto a valle di Pontelagoscuro. I livelli simulati al colmo di piena continuano a sovrastimare quelli reali, suggerendo che la riduzione dell'ampiezza delle forme di fondo non sia l'unico processo responsabile del temporaneo aumento di capacità di deflusso del Po.

Un altro possibile fenomeno, legato alle dinamiche di trasporto solido e che può portare alla riduzione delle resistenze al moto, è l'abbattimento della resistenza al fondo per effetto della concentrazione di materiale in sospensione. Qualora la corrente movimenti un gran numero di sedimenti di piccola dimensione, la concentrazione di tali particelle aumenta sensibilmente in prossimità del fondo, con la conseguente formazione di uno strato di fluido via via più denso all'aumentare della profondità. Un gradiente di densità in direzione verticale tenderebbe a smorzare i vortici e le strutture turbolente che nei moti turbolenti pienamente sviluppati determina l'entità della resistenza di parete. Questo fenomeno è stato analizzato nella letteratura scientifica recente sulla base di esperimenti di laboratorio semplificati e il suo inquadramento teorico risulta assai complesso (Van Rijn, 2007). Non esistono modelli semplici e affidabili applicabili a casi di studio reali come quello del Po. Perciò, tale fenomeno non è stato analizzato nel presente studio di tesi, e richiederebbe di essere attentamente analizzato in studi futuri.

Appendice. Modello numerico e creazione del reticolo di calcolo

A.1 Il modello di calcolo 2DEF

Lo strumento matematico impiegato per questo lavoro di tesi è stato 2DEF, un modello idrodinamico bidimensionale sviluppato dal dipartimento ICEA dell'Università di Padova.

Tale modello permette di descrivere la propagazione bidimensionale delle onde lunghe in acque basse all'interno di un dominio discretizzato agli elementi finiti mediante maglie triangolari, andando a risolvere una versione modificata delle equazioni di *De Saint Venant*.

A.1.1 Le equazioni del moto

Un qualsiasi campo di fluido tridimensionale può essere descritto dalle equazioni di *Navier-Stokes*. Quest'ultime, associate all'equazione di continuità, formano un sistema di quattro equazioni differenziali in quattro incognite che costituisce un problema ben posto e, in via teorica, permette di descrivere in maniera istantanea e puntuale tutto il campo di moto.

Tuttavia, per i problemi di idraulica fluviale ci si trova a studiare dei moti a pelo libero di natura turbolenta, caratterizzati da numeri di Reynolds molto elevati. La risoluzione numerica delle equazioni sopra citate richiederebbe un onere computazionale non perseguibile. Si abbandona quindi l'idea di risolvere tali equazioni e si determina invece una soluzione mediata sulla turbolenza. Il moto turbolento può essere infatti considerato come la sovrapposizione di un moto medio e di un moto fluttuante nel tempo. Integrando su un intervallo temporale sufficientemente piccolo rispetto ai fenomeni da studiare ma sufficientemente grande rispetto ai disturbi della turbolenza si ottengono quelle che sono note come equazioni di *Reynolds*. L'operazione di media, per la presenza di termini non lineari, porta alla nascita di termini aggiuntivi incogniti legati alle fluttuazioni turbolente. Per risolvere il problema è quindi necessario adottare un modello di "chiusura della turbolenza", che permetta di descrivere tali grandezze aggiuntive non note mediante altre grandezze note.

Un'ulteriore semplificazione tipicamente adottata è quella di assumere che il moto sia prevalentemente orizzontale. Nella maggior parte dei problemi naturali risulta infatti che le componenti della velocità orizzontale siano molto maggiori di quelle verticali e che le variazioni di velocità siano lente. Ciò accade per le onde lunghe, in questo caso è possibile trascurare l'accelerazione e gli sforzi in direzione verticale rispetto all'accelerazione di gravità e, quindi, l'equazione lungo la direzione verticale si può ricondurre alla classica equazione dell'idrostatica.

Le equazioni di *De Saint Venant* si ottengono integrando lungo la verticale le equazioni ottenute fino ad ora, con le opportune condizioni al contorno al fondo e alla superficie libera. Si tratta dunque di una descrizione bidimensionale del campo di moto, nel quale le grandezze risultano uniformemente distribuite nella direzione verticale.

Il modello adottato, 2DEF, risolve le sopra citate equazioni bidimensionali di *De Saint Venant*, le quali sono state modificate per risolvere numericamente in maniera efficace il problema della transizione asciutto-bagnato nelle maglie del dominio. È stato introdotto un modello di sottogriglia per poter tenere conto delle irregolarità del terreno ad una scala inferiore a quella delle maglie costituenti il reticolo di calcolo.

Le equazioni assumono quindi la seguente forma:

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{q_x |\vec{q}|}{K_s^2 H^{10/3}} - \frac{\tau_{wx}}{\gamma Y} - Re_x - f \frac{v}{g} = 0 \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{q_y |\vec{q}|}{K_s^2 H^{10/3}} - \frac{\tau_{wy}}{\gamma Y} - Re_y - f \frac{u}{g} = 0 \quad (3.39)$$

$$\eta \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (3.40)$$

Dove h è livello idrometrico;

Y è il volume d'acqua per unità di superficie;

H è la profondità d'acqua equivalente;

$U = (u, v)$ è la velocità mediata in fase;

$q = (q_x, q_y)$ è la velocità mediata in fase ed integrata sulla verticale;

K_s è il coefficiente di scabrezza secondo Strickler;

Re_x, Re_y sono i termini di Reynolds nelle direzioni x e y ;

$f = 2\omega \sin\phi$ è il parametro di Coriolis;

η è la porzione di area bagnata per unità di superficie.

A.1.2 Il reticolo di calcolo

Affinché il modello possa risolvere numericamente dei problemi idrodinamici, il dominio di calcolo deve essere opportunamente discretizzato.

Il modello permette di accoppiare la risoluzione di uno schema bidimensionale e unidimensionale allo stesso tempo. L'area di studio può essere riprodotta attraverso un reticolo di maglie triangolari, risolte mediante uno schema bidimensionale. È tuttavia possibile inserire anche elementi unidimensionali, per riprodurre ad esempio una rete minore presente nel dominio. Per questi elementi vengono risolte delle equazioni del moto di tipo unidimensionale.

Esistono inoltre dei particolari elementi unidimensionali, i «Tronchi speciali 1D». Questi ultimi sono degli specifici elementi monodimensionali che permettono la riproduzione di alcuni particolari effetti idraulici quali:

- soglie e traverse;
- condotti in pressione;
- paratoie per la regolazione di portate e livelli;
- impianti idrovori;
- porte vinciane.

In questo lavoro è stato utile usare i tronchi speciali per rappresentare nel dominio le arginature presenti nelle aree golenali. Gli argini sono stati in questo caso assimilati a delle traverse: qualora il livello in alveo superi la quota sommitale dell'argine ci sarà una tracimazione verso l'area golenale esterna.

Il modello risolve uno schema semi - implicito per determinare la portata che attraversa i tronchi speciali:

$$Q^e = a_1 h_{n1} + a_2 h_{n2} + a_3 \quad (3.41)$$

Dove Q^e è la portata fluente nel tronco;

h_{n1}, h_{n2} sono le quote idrometriche nel nodo iniziale e finale del tronco;

a_1, a_2 sono i parametri relativi al nodo iniziale e finale del tronco.

Il funzionamento è regolato dal confronto tra le energie della corrente a monte e a valle della traversa) e per ciascun tronco speciale può avvenire:

- | | |
|------------------------|------------------------------------|
| • deflusso nullo | se $H_1 < H_{sf}$ e $H_2 < H_{sf}$ |
| • deflusso libero | se $H_1 > H_{sf}$ e $H_2 < H_{sf}$ |
| • deflusso rigurgitato | se $H_1 < H_{sf}$ e $H_2 > H_{sf}$ |

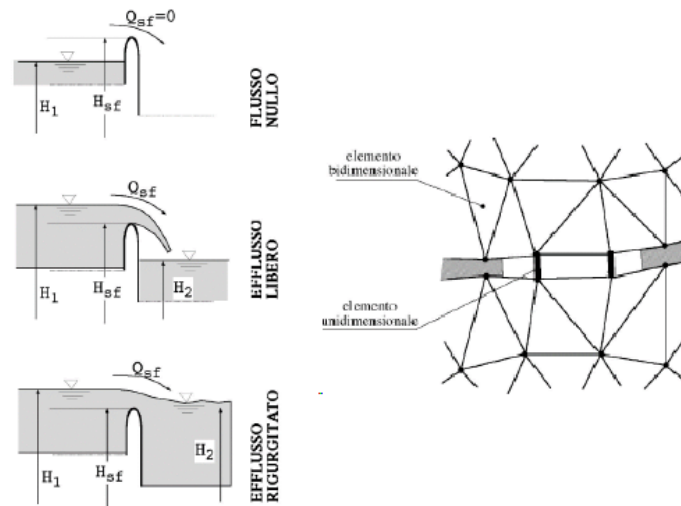


Figura 3.37: A sinistra è possibile vedere i diversi tipi di efflusso, determinati dal confronto dell'energia della corrente a monte e a valle del tronco: efflusso nullo, efflusso libero o rigurgitato. A destra sono raffigurati dei tronchi speciali, elementi unidimensionali inseriti nel dominio schematizzato con elementi bidimensionali.

A.1.3 Le simulazioni numeriche

Per poter utilizzare il software 2DEF per delle simulazioni numeriche è necessario preparare degli appositi file che descrivano il dominio e contengano le caratteristiche della simulazione da effettuare. I file sono:

- file della geometria (.geo);
- file della simulazione (.sim);
- file di restart (.bup).

Il file della geometria è un file di estensione .geo. In esso è descritto in termini geometrici il dominio di calcolo sul quale si vuole effettuare uno studio idrodinamico. Il file contiene l'elenco di tutti gli elementi necessari a descrivere il dominio: nodi, maglie, tronchi speciali. Per ciascun nodo sono riportate le sue coordinate x , y e la quota z . Le maglie sono invece identificate specificando i tre nodi afferenti, la quota media del fondo e Y_{lim} , un parametro che rappresenta l'altezza delle asperità presenti all'interno della maglia. Nel file .geo è inoltre specificato il coefficiente di scabrezza secondo Strickler di ogni maglia. Per la descrizione di tronchi speciali di tipo traversa, il file della geometria riporta il nodo iniziale e finale di questo elemento 1D. È poi specificato il coefficiente di portata con cui è calcolata la portata sfiorata, la larghezza dello sfioro e la quota del ciglio sfiorante.

Il file della simulazione è un file di estensione .sim e descrive la simulazione idrodinamica che si vuole computare. Esso contiene infatti la durata della simulazione, il time step di calcolo da

utilizzare, il passo temporale di stampa dei risultati, la lista di variabili da stampare, le condizioni iniziali degli elementi del dominio. Per effettuare la simulazione è necessario fissare delle condizioni al contorno per il dominio, che possono essere: livello assegnato, portata assegnata, scala delle portate. Nel file della simulazione sono quindi riportate delle tabelle contenenti l'andamento temporale di livelli, portate o scala delle portate. Vengono inoltre identificati gli elementi del dominio ai quali vengono imposte tali condizioni.

Il file di restart è un file di estensione .bup ed è facoltativo. Esso contiene le informazioni per effettuare una simulazione con condizioni iniziali assegnate, provenienti ad esempio da una simulazione precedente. È spesso utile generare una simulazione ad hoc che porti il sistema ad un regime di moto permanente ed estrarre da questa un file di restart da usare successivamente. Il file .bup contiene quindi i valori relativi a: livelli nodali, portate bidimensionali e portate nei tronchi speciali in un preciso istante.

Con questi tre file si può procedere con le simulazioni, al termine delle quali viene creato un file dei risultati di estensione .out. In esso è riportata la stampa delle variabili ad ogni passo temporale Δt , come specificato nel file della simulazione.

A.2 Il software *Incidenze*

Per creare il dominio di calcolo è stato utilizzato *Incidenze*, un software grafico che svolge la funzione di pre e post processore, utile per creare e gestire il reticolo di calcolo, nonché per visualizzare ed elaborare i risultati delle simulazioni effettuate con il modello matematico 2DEF. In particolare, con *Incidenze*, è possibile:

- inserire, modificare o eliminare elementi del reticolo, ovvero nodi, maglie, canali e tronchi speciali;
- creare automaticamente triangolazioni ad elementi finiti a partire da poligoni georeferenziati;
- visualizzare elementi grafici georeferenziati, per esempio da files .dxf, .shp o immagini raster;
- quotare gli elementi del dominio a partire da punti sparsi o poligoni georeferenziati;
- inserire, modificare o eliminare le condizioni al contorno associate ad una simulazione;

Dopo aver effettuato una simulazione è inoltre possibile caricare i risultati del file .out e analizzarne i contenuti mediante diverse modalità:

- visualizzare numericamente e tramite mappe a colori o mappe a curve di livello i valori nodali o di maglia delle variabili calcolate dal modello (livello, tirante, velocità, sforzo al fondo, portata specifica, energia, numero di Froude);
- visualizzare tramite mappe a vettori le variabili puntuali calcolate dal modello (velocità, portata, sforzo al fondo);
- visualizzare mediante sequenze animate l'andamento nel tempo di una variabile;
- visualizzare i risultati relativi ad un parametro in forma di diagramma con l'andamento temporale o come profilo longitudinale.

Sfruttando queste funzionalità del software *Incidenze* è stato possibile creare il dominio di calcolo del tratto di basso Po necessario per lo studio.

A.3 Creazione del dominio di calcolo

A.3.1 Creazione Geo

Per creare la parte di dominio mancante, quella fra Borgoforte e Pontelagoscuro, si è deciso di sfruttare la triangolazione automatica che il software *Incidenze* realizza a partire da poligoni georeferenziati. I poligoni sono stati preliminarmente tracciati con l'ausilio di AutoCAD Map 3D.

Il criterio con cui disegnare i poligoni deve tenere a mente che questi costituiscono la base della futura mesh triangolare. Ciascuna linea costituente i poligoni andrà necessariamente a costituire il lato di una o più maglie, così come ciascun vertice sarà un nodo nel reticolo di calcolo. È opportuno quindi non tracciare vertici troppo ravvicinati, per evitare la creazione di maglie molto piccole e fitte che potrebbero richiedere un passo temporale di calcolo piuttosto ridotto. Uno step di calcolo eccessivamente breve fa aumentare notevolmente il tempo e l'onere computazionale delle simulazioni; d'altra parte, assumere un passo di calcolo non sufficientemente piccolo porterebbe invece al rischio di far saltare il modello numerico. Fissata una misura rappresentativa delle maglie che si vogliono realizzare, è bene non tracciare vertici posizionati fra loro ad una distanza inferiore ad essa. Per questo modello la lunghezza caratteristica delle maglie si attesta attorno ai 100 m.

Vale un ragionamento differente per la schematizzazione dell'alveo di magra. Qui la direzione del moto è ragionevolmente nota ed è conveniente realizzare delle maglie triangolari che siano allungate nella direzione in cui si muove la corrente. Nella direzione trasversale è possibile invece avere una larghezza minore senza creare problemi al modello numerico, dal momento

che le componenti delle velocità avente quell'orientazione sono modeste. Per creare il reticolo di calcolo si sono tracciati, all'interno della zona che schematizza l'alveo, delle polilinee che seguono l'andamento del corso d'acqua, andando a creare più "filoni" paralleli (Figura 3.38).

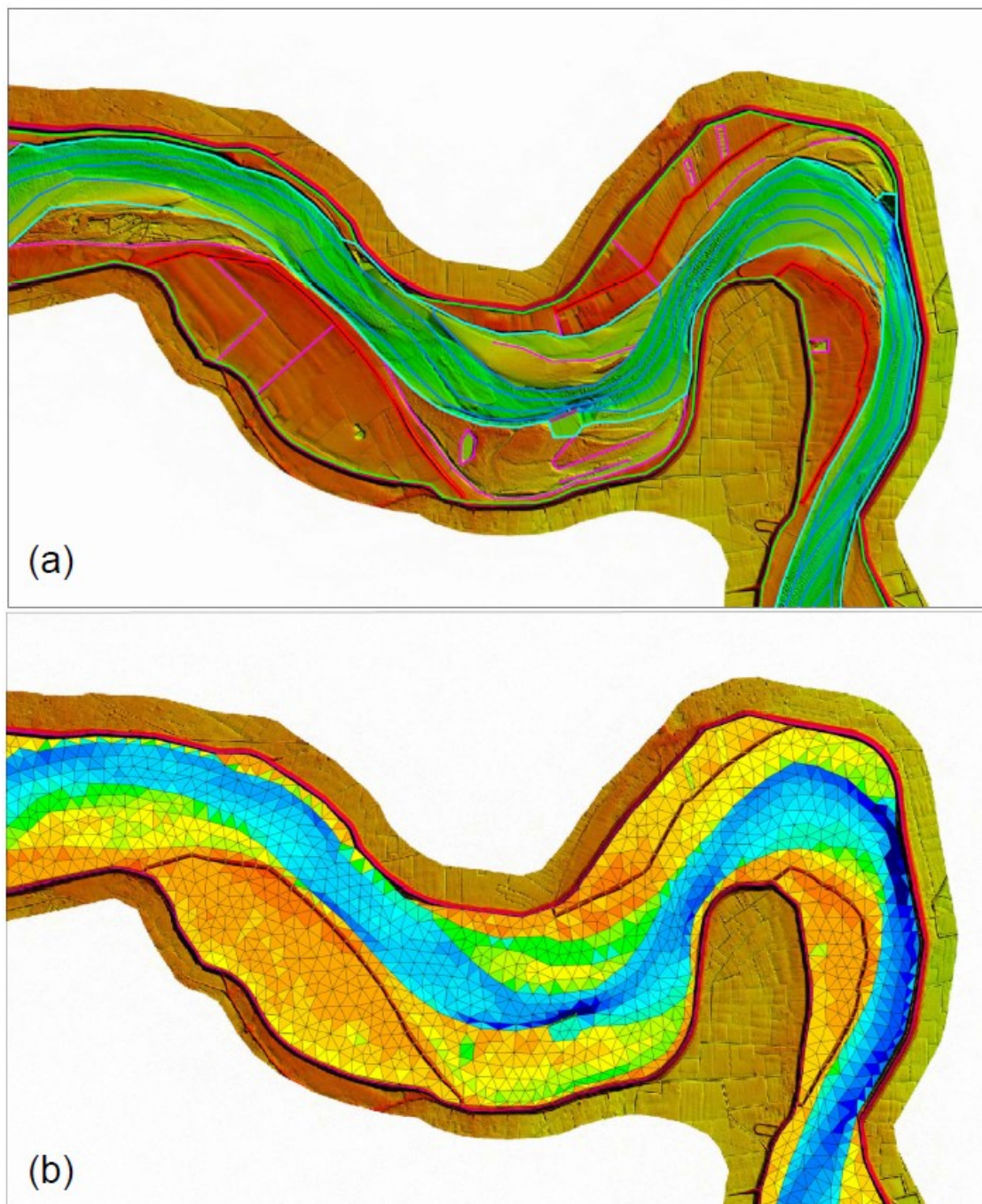


Figura 3.38: Porzione del dominio di calcolo poco a monte della stazione di rilievo di Sermide, con il DTM sullo sfondo. Nella figura (a) è possibile vedere le polilinee preliminari tracciate in AutoCAD Map. In particolare, il poligono verde identifica il contorno esterno del dominio, le polilinee azzurre seguono l'andamento dell'alveo principale, i poligoni chiusi rossi delimitano gli argini, le linee fucsia sono presenti laddove ci siano delle disomogeneità in termini di quote. Nella figura (b) si vede il risultato finale della triangolazione operato da Incidenze, con una mappa a colori rappresentativa delle quote

del fondo. Le polilinee nell'alveo preliminarmente tracciate portano alla creazione di file di maglie nell'alveo che seguono la direzione principale del moto.

All'interno di ciascun filone si creerà una fila di maglie: avere delle maglie più strette permette di discretizzare l'alveo in un numero di "filoni" maggiore. Dal momento che il calcolo di molti parametri idraulici avviene nel modello a livello di maglie, la descrizione complessiva di ciascuna sezione sarà più accurata se rappresentata da un maggior numero di elementi.

Un altro aspetto fondamentale da tenere in conto nella creazione della mesh è l'andamento delle quote del terreno che si sta schematizzando. A ciascuna maglia viene assegnata la quota media della porzione in essa contenuta quindi, per ottenere una quotatura ottimale, ogni maglia deve collocarsi in una regione con andamento planimetrico il più omogeneo possibile. È da evitare la creazione di maglie che si collocano a cavallo di zone con brusche variazioni di quote. Nel tracciare le polilinee, si è cercato quindi di separare zone con quote eterogenee tracciando delle linee di separazione in corrispondenza di cambi di quota significativi. Per fare questo tipo di valutazioni si è sfruttato il rilievo digitale del terreno a disposizione, relativo all'anno 2005. Caricando la resa grafica del DTM in AutoCAD Map 3D e utilizzandola come sfondo è stato possibile tracciare delle polilinee che seguissero l'andamento del terreno.

È stato utile caricare nel foglio di lavoro anche un layer contenente l'ortofoto del tratto di interesse. Dalla foto satellitare del terreno si deducono infatti le caratteristiche morfologiche: è possibile distinguere in maniera chiara l'alveo di magra, le aree golenali, le arginature, eventuali barre emerse all'interno dell'alveo... Sono aree idraulicamente differenti fra loro, caratterizzate da scabrezze diverse. I poligoni tracciati tengono conto di queste differenti caratteristiche e distinguono le diverse aree, in modo che le future maglie contengano aree di scabrezza omogenea (Figura 3.39).

Gli argini presenti nel dominio da discretizzare sono stati schematizzati mediante l'utilizzo di tronchi speciali, degli elementi unidimensionali che congiungono due nodi del reticolo di calcolo. In una fase iniziale si sono tracciati dei poligoni chiusi che delimitano la superficie occupata dai rilievi arginali. All'interno di questi poligoni chiusi si sono inserite delle maglie su cui poi si sono creati i tronchi speciali.

Nel tratto di studio sono presenti tre affluenti: Mincio, Secchia e Panaro. Per ciascun affluente, si è schematizzato anche un tratto di alcuni chilometri del corso d'acqua secondario, a monte della sua immissione nel fiume Po. Queste porzioni di dominio sono state schematizzate utilizzando una mesh con triangolazione più grossolana, essendo queste aree meno rilevanti nella simulazione delle piene nel fiume Po. L'estensione del reticolo anche in questa direzione è

tuttavia necessaria per poter successivamente considerare il contributo in termini di portata dovuto agli affluenti.

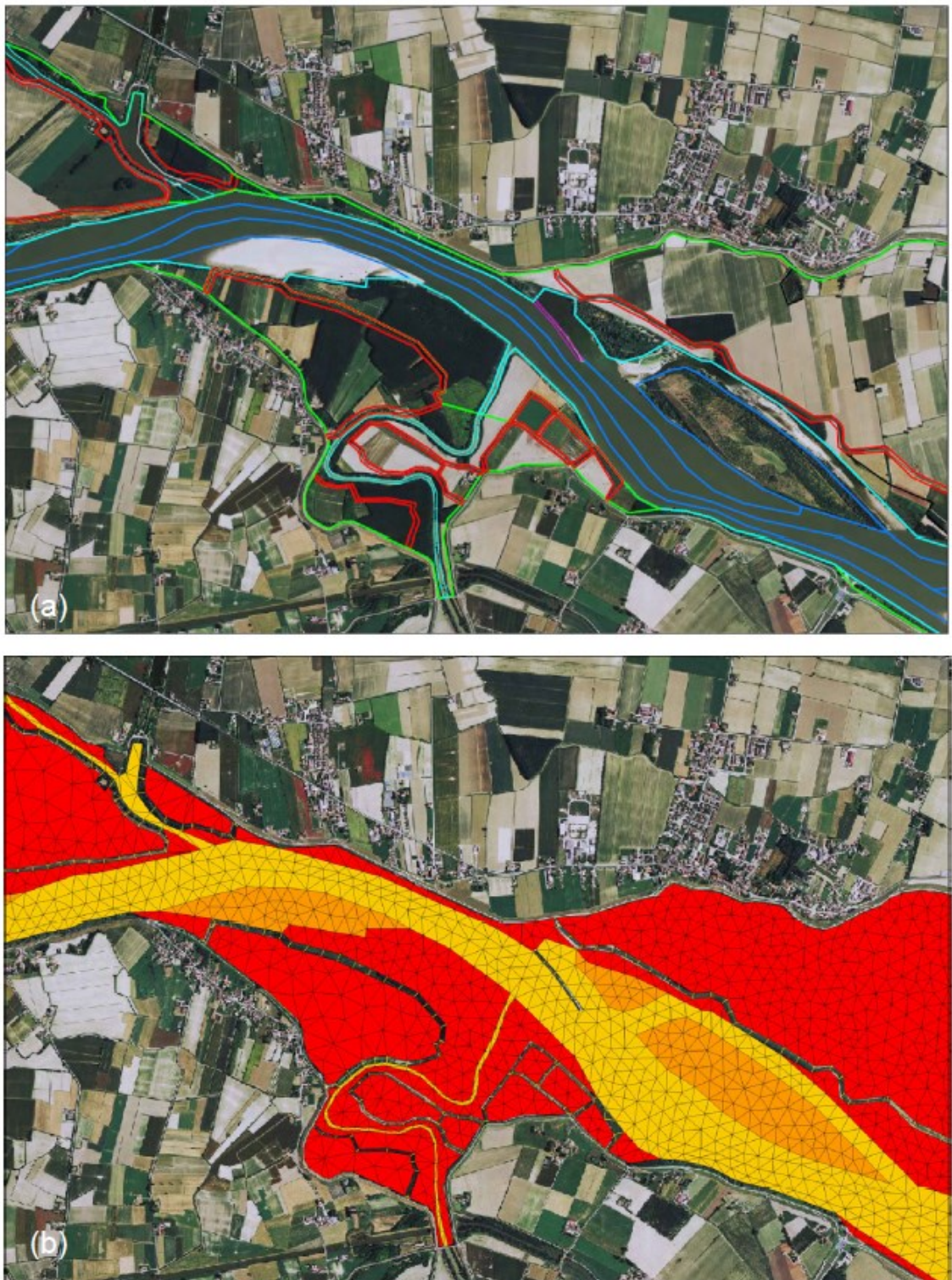


Figura 3.39: Porzione del dominio di calcolo in corrispondenza della confluenza degli affluenti Mincio e Secchia. Nella figura (a) è possibile vedere le polilinee preliminari tracciate distinguendo le aree con scabrezza differenti, sulla base dell'ortofoto usata come sfondo. Nella figura (b) si vede invece la mesh

triangolare ottenuta a partire dalle polilinee. Il colore associato alle maglie è rappresentativo della classe di scabrezza assegnata a ciascuna di esse.

Una volta concluso di tracciare tutti i poligoni si è salvato il file in formato vettoriale .dxf. È possibile importare un file con questa estensione in *Incidenze* e trasformarne il contenuto in contorni cnt, all'interno dei quali viene creata una triangolazione provvisoria in formato .tin. Tale configurazione, quando si ritiene soddisfare le esigenze di studio, può essere trasformata in un file geometria e salvato.

La geometria così creata è composta da nodi e maglie. I tronchi speciali sono stati inseriti successivamente: le maglie create automaticamente all'interno dei poligoni chiusi appositamente tracciati sono state rimosse e sostituite dagli elementi unidimensionali.

Una volta definiti tutti gli elementi uni- e bi-dimensionali necessari per una corretta rappresentazione del dominio è stato necessario assegnare a ciascuno le proprietà fondamentali per poter fare le simulazioni idrauliche. A questo punto ciascun elemento è infatti solo georeferenziato: alle maglie deve essere associata anche una quota di fondo e una scabrezza idraulica; ai tronchi speciali, affinché possano schematizzare un argine, deve essere assegnata la quota e la larghezza di sfioro e il coefficiente di portata C_Q .

Il coefficiente di portata C_Q è stato assegnato uguale a tutti i tronchi speciali presenti nel dominio e pari a 0.40, in quanto un argine è assimilabile ad uno sfioratore in parete grossa, dunque simile al valore 0.385 usato in letteratura per lo sfioratore Belanger.

Il processo di quotatura di maglie è descritto nei paragrafi successivi.

L'assegnazione dei coefficienti di scabrezza necessita invece un processo di taratura che è descritto nel capitolo seguente.

A.3.2 Quotatura

Quando si crea un file di geometria in *Incidenze*, a tutti gli elementi viene automaticamente assegnata una quota del fondo pari a -999 m s. l. m. . È necessario assegnare un valore reale sulla base dei dati a disposizione.

Per l'intero tratto di interesse è presente il modello digitale dell'alveo e del terreno a risoluzione 2 m , realizzato da AIPO nel 2005. Esso è ottenuto abbinando rilievi batimetrici per le parti sommerse e rilievi laser-scanner per la parte emersa. L'intera mesh è stata quindi quotata sulla base di queste informazioni.

Sono state seguite delle procedure leggermente diverse per quotare le maglie, che coprono tutte le aree con quote inferiori, e i tronchi speciali, che rappresentano gli argini e dunque le porzioni con quote maggiori.

A.3.2.1 Quotatura delle maglie

Per quotare le maglie è stato utile avere il contorno cnt del dominio. Con questo, mediante l'utilizzo di un eseguibile, è possibile estrarre dal file delle quote tutti e i soli punti interni a tale perimetro.

Grazie ad un ulteriore programma si è compiuta l'operazione di quotatura delle maglie dell'intero dominio.

Per ciascuna maglia si sono considerati tutti i punti che ricadono all'interno della sua area: la quota assegnata non è altro che il risultato di un'operazione di media fra questi valori. Se la maglia copre una superficie pianeggiante il risultato costituisce una buona approssimazione, altrimenti il valore medio potrebbe risultare poco rappresentativo della realtà. Per questo motivo si è prestata particolare attenzione nella generazione delle maglie.

A.3.2.2 Quotatura dei tronchi speciali

Anche per quotare i tronchi speciali si estraggono i punti dal DTM della porzione interna ai contorni cnt in cui si sviluppano gli argini. Serve in questo caso un passaggio intermedio: si procede inizialmente con la quotatura delle maglie contenute nei cnt. Da queste maglie si procede con la quotatura dei tronchi speciali, che andranno a sostituire le maglie quotate.

Tuttavia, in questo caso non è corretto assegnare agli elementi la quota media. I tronchi speciali si sviluppano infatti nella porzione di terreno occupata dall'intera impronta dell'argine, che comprende le scarpate e la porzione sommitale. Bisogna assegnare ai tronchi speciali la quota di sfioro, ovvero la quota massima, quella che deve essere superata dal livello in alveo affinché la portata cominci a sfiorare. Usando il valore medio dei punti racchiusi nell'area si otterrebbe un valore sottostimato. In questo caso quindi la quotatura è stata fatta considerando solo il 5% dei punti caratterizzati da quote più elevate. Questa assunzione in genere ben approssima la quota sfiorante reale.

La lunghezza di sfioro di ciascun tronco speciale è ottenuta suddividendo la lunghezza del tratto arginale fra i tronchi presenti in quella porzione. La lunghezza media si attesta attorno ai 100 m, così come le maglie ad essi adiacenti.

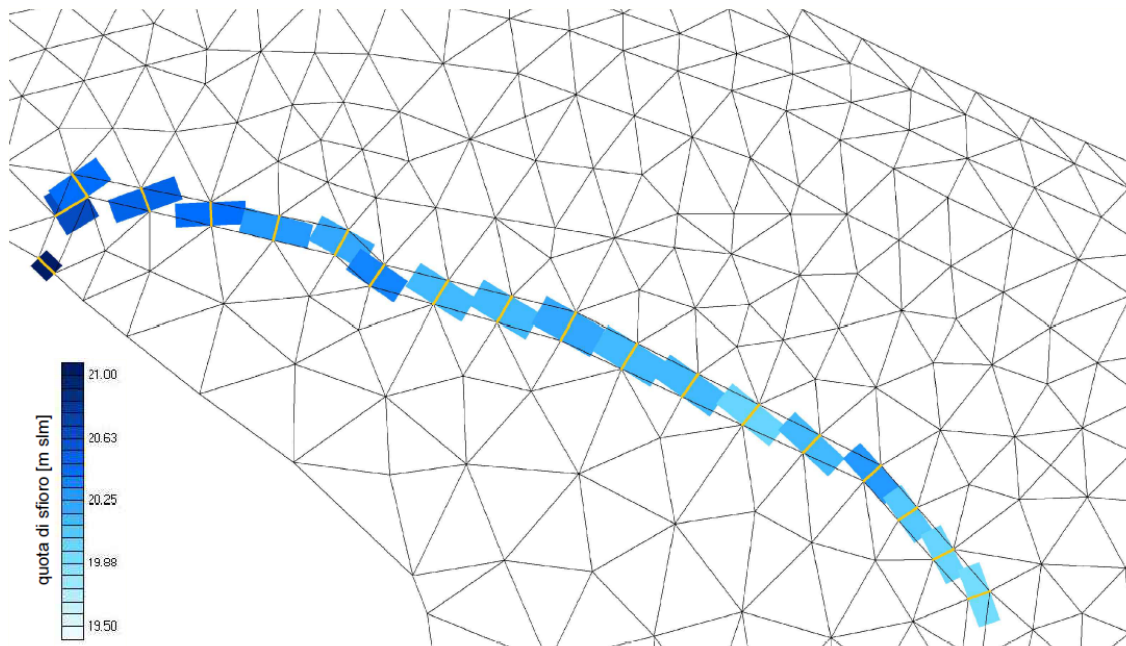


Figura 3.40: Rappresentazione di una porzione di argini presenti nel dominio. I tronchi speciali sono rappresentati dai segmenti gialli. Per ciascuno di essi è raffigurata una fascia colorata che indica la lunghezza di sfioro di quell'elemento, il colore invece è indice la quota sommitale di sfioro.

Complessivamente, il reticolo di calcolo necessario a schematizzare il tratto di fiume Po compreso fra Borgoforte e la foce ha necessitato di:

- 32541 nodi;
- 56908 maglie;
- 1055 tronchi speciali.

A.3.3 Condizioni al contorno

Per poter risolvere le equazioni del moto del modello e simulare degli specifici eventi di riferimento è necessario assegnare al dominio delle condizioni al contorno.

In particolare, serve imporre:

- una condizione iniziale al sistema, che sia il più possibile equilibrata;
- una condizione al contorno a monte, che corrisponde all'imposizione dell'idrogramma di piena che si vuole simulare;
- una condizione al contorno a valle, che può essere invece soddisfatta fornendo l'andamento dei livelli o la scala delle portate;
- una condizione al contorno in corrispondenza degli affluenti, associando un idrogramma di portata.

A.3.3.1 Condizione iniziale

Il campo di moto (livello idrometrico e le due componenti coordinate della portata specifica) deve essere definito in ogni suo punto nell'istante iniziale delle simulazioni. Per le simulazioni di piena a moto vario, è preferibile imporre una condizione iniziale equilibrata e coerente, tipicamente relativa ad una condizione di moto permanente con un valore di portata pari a quello dell'istante iniziale della simulazione a moto vario. Tale condizione iniziale si ottiene tipicamente mediante una simulazione preliminare, che inizia da una condizione di acqua ferma e un livello iniziale pari a quello del medio mare imposto nella sezione di valle (si veda il paragrafo A.3.3.3), ed evolve nel tempo imponendo nella sezione di monte un idrogramma di portata con valore iniziale nullo, una crescita graduale fino a raggiungere il valore con cui avrà inizio la simulazione dell'evento di piena scelto e infine un tratto a portata costante per un tempo sufficientemente lungo da permettere al sistema di raggiungere una condizione di moto permanente. Al termine di questa simulazione preliminare, il modello produce un file di estensione .bup, che rappresenta un'istantanea delle condizioni instauratesi nel dominio. Questa è la condizione che può essere imposta come condizione iniziale nelle successive simulazioni a moto vario.

Per questa simulazione preliminare è possibile supporre nullo il contributo da parte degli affluenti e un livello costante a valle, alla foce, pari al livello del medio mare.

A.3.3.2 Condizione al contorno di monte

A monte, in corrispondenza della sezione di Borgoforte, è necessario imporre l'andamento della portata nel tempo.

A Borgoforte è presente una stazione di monitoraggio idraulico, dove il livello idrometrico è misurato ad intervalli regolari nel tempo. Sono effettuate anche occasionalmente delle misure di portata. Sulla base di numerose osservazioni e analisi è stata formulata da AIPO una scala della portata in questa sezione, che lega univocamente il livello e la portata. A partire dai livelli registrati durante un evento di piena è dunque possibile ricostruire anche l'idrogramma della portata.

A.3.3.3 Condizioni al contorno a valle

A valle, in corrispondenza del Delta del fiume, è opportuno imporre una condizione sui livelli. Trattandosi di una foce, il livello è legato alle condizioni del mare in termini di maree, condizioni del vento, presenza di celle di bassa pressione...

Tuttavia, essendo questa condizione molto a valle rispetto alla zona di interesse (la sezione di Pontelagoscuro è oltre 80 km a monte), si è deciso di imporre in tutte le simulazioni un livello costante e pari al livello del medio del mare. A tutti i nodi delle bocche del Delta del Po si è quindi imposto un livello di 0 m s. l. m.



Figura 3.41: Porzione del dominio raffigurante il Delta del Po e le sue bocche. I pallini giallo-rossi indicano a quali nodi è stata imposta la condizione al contorno sui livelli.

A.3.3.4 Condizioni al contorno per gli affluenti

Un'altra condizione al contorno da imporre è quella relativa agli affluenti. Per la simulazione di eventi di piena è bene considerare anche il contributo dei tre affluenti presenti nel dominio di calcolo. La condizione al contorno da imporre è la portata transitata in ciascun affluente in corrispondenza della confluenza con il fiume Po.

Nel dominio di calcolo è stato schematizzato solo la porzione terminale di ciascun affluente. Nelle maglie più a monte di questi tratti si è imposto quindi l'idrogramma della portata relativo al corso d'acqua minore, che si immetterà poi nell'alveo principale del Po.

L'idrogramma adottato per i fiumi Secchia e Panaro è quello fornito da un modello 1D sviluppato in un diverso contesto per degli studi relativi al fiume Po.

Un discorso diverso va fatto per l'affluente Mincio. Questo corso d'acqua è un emissario del lago di Garda, dove è stato realizzato uno sbarramento che regola le portate defluenti in relazione alla laminazione degli efflussi di monte operata dal lago. In corrispondenza di Mantova,

il Mincio si immette nel sistema di laghi di Mantova (Superiore, di Mezzo e Inferiore), i cui livelli sono regolati da tre manufatti di regolazione. Lungo il suo percorso sono presenti numerose altre opere di regolazione per permettere la navigabilità del tratto di valle. La sua immissione nel fiume Po avviene a Governolo, regolata da un sistema di dighe. In caso di eventi di piena questo sistema di organi di regolazione permette di disconnettere idraulicamente i due corsi d'acqua. Non è necessario dunque imporre una condizione al contorno per il Mincio, in quanto non interagisce con l'asta principale del fiume durante la piena.

Bibliografia

- ADBPO, A. d. b. d. f. P., 2007a. *Programma generale di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po. Stralcio confluenza Arda-incile Po di Goro.*
- Boudreau, B. P. & Hill, P. S., 2020. Rouse revisited: The bottom boundary condition for suspended sediment profiles. *Marine Geology*, Volume 419.
- Brownlie, W. R., 1981. *Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels.*
- Cao, Z., Xia, C., Pender, G. & Liu, Q., 2017. Shallow Water Hydro-Sediment-Morphodynamic Equations for Fluvial Processes. *J Hydraul Eng* 143.
- Dazzi, S. et al., 2021. Comparison of two modelling strategies for 2D large-scale flood simulations. *Environmental Modelling & Software*, Volume 146.
- Einstein, H. A., 1950. *The bed-load function fro sediment transportation inopen channel flows.* Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service.
- Marchi, E., 1984. *Introduzione ai problemi del Po.* Roma, Acc. Nazionale Lincei.
- Naqshband, S. & Hoitnik, A. J. F., 2020. Scale-Dependent Evanescence of River Dunes During Discharge Extremes. *Geophysical Research Letter*, Volume 47.
- Paarlberg, A. J., Dohmen-Janssen, C. M., Hulscher, S. J. M. H. & Termes, P., 2009. Modelling river dune evolution using a parametrization of flow separation. *Journal of geophysical research*, Volume 114.
- Seminara, G. & Tubino, M., 1996. *Trasporto solido fluviale.* Roma: Edizioni Cremonese.
- Van Rijn, L., 1984. Sediment transport, part III: Bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(12), pp. 1773-1754.
- Van Rijn, L. C., 1984. Sediment Transport. Part I: Bedload transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), pp. 1431-1456.
- Van Rijn, L. C., 2007. Unified view of sediment transport by currents and waves. II: Suspended transport. *Jpurnal of Hydraulic Engineering*, 133(6), pp. 668-689.

Zanichelli, G., Pavan, S., Pecora, S. & Ricciardi, G., 2015. Gli eventi di piena del Po del novembre 2014: un approfondimento.