

*"Per dominare la natura,
prima dobbiamo imparare ad obbedirle".*

G. da Baskerville

UMBERTO ECO - IL NOME DELLA ROSA

Sommario

Nella presente tesi si analizzano gli effetti degli di eventi di inondazione prodotti a seguito di sormonti o rotte arginali in contesti fluviali. Il problema è di rilevante interesse economico, sociale ed ambientale soprattutto nell'ottica della pianificazione volta a ridurre la pericolosità idraulica: le onde di sommersione che si generano in seguito all'insufficienza o al cedimento delle strutture arginali possono infatti causare perdite di vite umane, ingenti danni alle proprietà e agli ecosistemi interessati. Lo studio è condotto sulla base di un modello idrodinamico uni-bidimensionale agli elementi finiti che risolve le equazioni delle onde lunghe in acque basse, modificate in modo opportuno al fine di trattare in modo agevole ed efficace i processi di transizione asciutto-bagnato su terreni irregolari. Il modello, a fondo fisso, consente di simulare il cedimento di una struttura arginale attraverso la formazione e l'evoluzione di una breccia causata da sifonamento o sormonto. Le indagini sono condotte nell'ottica di un'analisi congiunta tra modellazione matematica e analisi geofisiche di dati acquisiti sul Canale Roncajette (PD) sia precedentemente sia nell'ambito della presente tesi. La presenza di tratti arginali con proprietà fisiche che evidenziano aspetti di possibile debolezza del tratto arginale, suggeriscono che nel caso in cui si manifestasse un evento di piena analogo all'evento del Novembre 2010, l'argine del Canale Roncajette potrebbe essere incline a raggiungere condizioni idrauliche critiche, provocando inoltre la formazione di breccie arginali. Le indagini condotte hanno permesso di produrre una serie di carte tematiche nelle quali si sono evidenziati la posizione e l'estensione delle aree a rischio di allagamento a causa dei fenomeni indagati.

Abstract

In this thesis we analyze the flood effects produced as a result of flooding overtopping or levee breaching in river contexts. The problem is of considerable economic, social and environmental interest, especially in prospect of planning to reduce hydraulic hazard: the submersion waves that arise due to insufficiency or collapse of levee structures can in fact cause the lost of human lives, huges damages to the affected properties and ecosystems. The study is conducted on the basis of a one-dimensional hydrodynamic model of finite elements that solves the equations of long waves in low waters, modified appropriately in order to treat the dry-wet transition processes on irregular soils. The fixed-bottom model allows to simulate the collapse of a levee structure through the formation and evolution of a breach caused by siphoning or overtopping. The surveys are conducted in the context of a joint analysis of mathematical modeling and geophysical analysis of data acquired on the Roncajette Canal (PD), both previous and in the context of this thesis. The presence of levee segments with physical properties that reveals aspects of a possible weakness of the levee section suggests that in a flood event similar to the one November 2010, the Roncajette Canal could be inclined to reach conditions causing the formation of levee breaching. The conducted surveys made it possible to produce a series of thematic maps in which the location and extension of flood risk areas were highlighted due to the phenomenon investigated.

Elenco dei simboli

Sezione	Simbolo	Unità	Grandezza fisica
§ 5.1	A	$[m^2]$	Area della sezione trasversale
	a_r	$[m]$	Indice delle asperità
	B	$[m]$	Larghezza dello sfioro
	C_q		Coefficiente di portata
	c_d		Coefficiente di resistenza
	D	$[m]$	Profondità media
	g	$[m/s^2]$	Accelerazione di gravità
	h	$[m]$	Quota della superficie libera
	h_f	$[m]$	Elevazione locale del fondo
	η		Frazione locale di dominio allagato
	ϑ		Densità di probabilità
	k_s	$[m^{1/3}/s]$	Coefficiente di scabrezza secondo Strickler
	Q	$[m^3/s]$	Portata
	Re		Numero di Reynolds
	R_H	$[m]$	Raggio idraulico
	ρ	$[kg/m^3]$	Densità del fluido
	σ		Deviazione standard
	t	$[s]$	Tempo
	τ_b	$[Pa]$	Sforzo tangenziale al fondo
	τ_w	$[Pa]$	Sforzo tangenziale dell'azione del vento
	U_{wind}	$[m/s]$	Velocità del vento
	Y	$[m^3]$	Volume d'acqua
§ 5.4	H	$[A/m]$	Campo magnetico
	H_p	$[A/m]$	Campo magnetico primario
	H_s	$[A/m]$	Campo magnetico secondario
	I	$[A]$	Intensità di corrente
	L	$[m]$	Lunghezza del conduttore cilindrico
	μ_o	$[H/m]$	Permeabilità magnetica del vuoto
	R	$[\Omega]$	Resistenza elettrica
	ρ	$[\Omega \cdot m]$	Resistività elettrica

Continua nella pagina successiva

Continua dalla pagina precedente

Sezione	Simbolo	Unità	Grandezza fisica
	S	$[m^2]$	Sezione trasversale del conduttore cilindrico
	σ	$[\Omega^{-1}/m^{-1}]$	Conduttività elettrica
	ΔV	[V]	Differenza di potenziale
	ω	[rad/s]	Frequenza angolare
§ 7.2 – 7.3			
	α	$[\circ]$	Pendenza interna dell'argine
	β	$[\circ]$	Pendenza esterna dell'argine
	B_f	[m]	Erosione della breccia al fondo
	B_t	[m]	Erosione della breccia alla sommità
	D_{50}	[mm]	Diametro della frazione passante al 50 %
	D_{90}	[mm]	Diametro della frazione passante al 90 %
	k_{er}	[s/m]	Coeff. erosione del suolo
	n		Porosità
	Q_{max}	$[m^3/s]$	Portata massima
	R_0	[m]	Raggio iniziale del tubo di flusso
	ρ_s	$[kg/m^3]$	Densità del suolo
	S_{allag}	$[km^2]$	Superficie allagata
	t	[ore/min]	Tempo
	t_c	[ore/min]	Tempo in cui collassa la breccia
	τ_{cr}	[Pa]	Sforzo di taglio critico
	τ_{max}	[Pa]	Sforzo di taglio massimo
	V_t	$[10^6 m^3]$	Volume transitato dalla breccia
	W_0	[m]	Larghezza iniziale dell'argine
	ϕ	$[\circ]$	Angolo di resistenza al taglio
	Z_0	[m]	Altezza iniziale dell'argine

Indice

1	Introduzione	1
2	Le intense alluvioni del Veneto	7
3	Inquadramento geografico e geologico	9
3.1	Il Fiume Bacchiglione	12
4	Arginatura dei corsi d'acqua	15
4.1	Descrizione e caratteristiche	15
4.2	Interventi di manutenzione	18
4.3	Il problema delle nutrie	19
5	Materiali e metodi	21
5.1	Modello di propagazione delle piene	21
5.1.1	Il modello bidimensionale	21
5.1.2	Gli elementi monodimensionali	27
5.1.3	Il modello di formazione e di evoluzione della breccia .	35
5.1.4	Condizioni al contorno	40
5.2	Incidenze	41
5.3	Reticolo di calcolo e condizioni al contorno per la piena del 2010	43
5.4	Metodi geofisici	47
5.4.1	Metodo geoelettrico	47
5.4.2	Tomografia elettrica di resistività	48
5.4.3	Metodo elettromagnetico induttivo nel dominio della frequenza	50

6	Risultati delle prove geofisiche	53
6.1	Metodi utilizzati	53
6.1.1	Electrical resistivity tomography	53
6.1.2	Multidepth Electromagnetic Conductivity Meters	54
6.2	Risultati delle indagini	56
6.2.1	Tomografia Elettrica	56
6.2.2	CMD Explorer	58
7	Risultati delle simulazioni	65
7.1	Simulazione condotta in assenza di rotte arginali	67
7.2	Simulazioni condotte in presenza di breccie arginali	71
7.3	Simulazione con formazione della breccia N°1	73
7.3.1	Evoluzione della breccia arginale N°1.	73
8	Conclusioni	81
A	Risultati per la breccia N° 2	83
B	Risultati per le breccie N° 6 e 7	87
C	Risultati per le breccie N° 8 e 9	93
D	Tavole delle anomalie geogisiche. Studio dell'OGS	99
E	Tavole del Piano di Gestione per il Rischio Alluvioni 2015 - 2021.	
	Aree allagabili - Altezze idriche	103
F	Chronostratigraphic chart	107

Elenco delle figure

3.1	Estrapolazione dell'area di studio dalla Carta Geologica di Padova Sud, Foglio 147.	10
3.2	Reticolo idrografico del Fiume Bacchiglione.	12
4.1	Struttura dell'argine.	16
4.2	Overtopping o sormonto dell'argine.	17
4.3	Levee breach o rotta arginale.	18
4.4	Fenomeni erosivi e sfiancamento in (a), seepage e sifonamento in (b).	19
5.1	Percentuale di area bagnata η in funzione della quota della superficie libera.	25
5.2	Schema di calcolo dell'elemento monodimensionale "canale".	28
5.3	Schema di inserimento dei tronchi speciali soglia.	32
5.4	Efflusso al di sopra di una soglia: (a) libero e (b) rigurgitato.	33
5.5	Le diverse fasi di evoluzione della breccia per sormonto arginale da: [Viero D.P. et al.,2013].	37
5.6	Rappresentazione a scala di colori dell'altimetria del territorio schematizzato nel modello matematico del tratto del Fiume Bacchiglione compreso tra il manufatto di Voltabarozzo e Bovolenta.	44
5.7	position=left	46
5.8	Quadripolo ERT.	49
5.9	Rappresentazione schematica del FDEM, da: [Boaga J., 2016].	51

6.1	IRIS Syscal Pro.	53
6.2	CMD Explorer (a), CMD control unit (b).	55
6.3	Immagine satellitare Google Earth dell'area di campionamento dei dati ERT nelle vicinanze di Voltabarozzo (PD)	56
6.4	Sezione della tomografia elettrica di resistività trasversale all'argine.	57
6.5	Risultati del CMD Explorer per l'argine destro nei pressi della frazione di Voltabarozzo (PD).	59
6.6	Risultati del CMD Explorer per l'argine sinistro in località Ponte San Nicolò.	61
6.7	Risultati del CMD Explorer per l'argine destro nella località Roncajette.	63
7.1	Immagine satellitare Google Earth 3D del tratto iniziale del Canale Roncajette, con la localizzazione e il numero corrispondente della simulazione delle rotte arginali.	67
7.2	Reticolo geometrico di calcolo con alla base una Ortofoto satellitare dell'area.	68
7.3	Inviluppo dei massimi livelli idrometrici (a) e inviluppo dei franchi arginali (b) per un evento analogo all'evento di piena del Novembre 2010, calcolati a ridosso dell'argine destro del Canale Roncajette da Voltabarozzo a Bovolenta, in assenza di breccie arginali	69
7.4	Inviluppo dei massimi livelli idrometrici (a) e inviluppo dei franchi arginali (b) per un evento analogo all'evento di piena del Novembre 2010, calcolati a ridosso dell'argine sinistro del Canale Roncajette da Voltabarozzo a Bovolenta, in assenza di breccie arginali.	70
7.5	Esempio di un tratto di canale con tronchi speciali e nodi.	71

7.6	Andamento nel tempo dello sforzo tangenziale lungo la parete del condotto, τ , posto a confronto con il corrispondente valore di soglia, τ_c , per l'inizio del processo erosivo.	74
7.7	Andamento nel tempo dei livelli idrometrici raggiunti a ridosso della breccia arginale, nella parte lato fiume (H1) e lato campagna (H2), durante la fase di piping e durante la fase di sormonto ($H1_{sor}$ e $H1_{sor}$) con l'aggiunta della curva dell'andamento delle portate.	75
7.8	Diametro del tubo di flusso, larghezza erosa dalla breccia nella parte sommitale dell'argine Bt e larghezza erosa dalla breccia alla base dell'argine Bf.	75
7.9	Andamento nel tempo della portata transitata attraverso la breccia arginale sviluppata sull'argine sinistro del Canale Roncajette nel tratto di monte (poi intermedio e valle).	76
7.10	Volume d'acqua transitato nel tempo dalla breccia N°1.	76
7.11	Risultati complessivi delle superfici allagate e dei volumi transitati in funzione della breccia simulata. L'area rosa comprende le breccie in sinistra idrografica, l'area blu le breccie in destra idrografica.	77
7.12	Risultati delle simulazioni per la Breccia N°1, distribuzione dei valori dei tiranti e delle velocità.	78
7.13	Mappa delle superfici complessive allagate risultanti dalle simulazioni di rotta arginale elaborata con AutoCad ® 2016.	80
A.1	Risultati ottenuti per la simulazione della rotta arginale N° 2.	84
A.2	Risultati delle simulazioni per la Breccia N° 2, distribuzione dei valori dei tiranti e delle velocità.	85
B.1	Risultati ottenuti per la simulazione della rotta arginale N° 6.	88
B.2	Risultati delle simulazioni per la Breccia N° 6, distribuzione dei valori dei tiranti e delle velocità.	89

B.3	Risultati ottenuti per la simulazione della rotta arginale N° 7. .	90
B.4	Risultati delle simulazioni per la Breccia N° 7, distribuzione dei valori dei tiranti e delle velocità.	91
C.1	Risultati ottenuti per la simulazione della rotta arginale N° 8. .	94
C.2	Risultati delle simulazioni per la Breccia N° 8, distribuzione dei valori dei tiranti e delle velocità.	95
C.3	Risultati ottenuti per la simulazione della rotta arginale N° 9. .	96
C.4	Risultati delle simulazioni per la Breccia N° 9, distribuzione dei valori dei tiranti e delle velocità.	97

Elenco delle tabelle

5.1	Principali coefficienti di scabrezza utilizzati nella geometria del modello di calcolo.	43
6.1	Profondità nominali raggiunte dal Cmd Explorer in cui viene acquisita la conducibilità elettrica apparente per le configurazioni High e Low.	55
7.1	Dati iniziali dell'argine per ogni simulazione di rotta.	73
A.1	Risultati delle simulazioni per le Breccia N° 2 in prossimità della frazione di Voltabarozzo.	83
B.1	Risultati delle simulazioni per le Breccie in prossimità di Ponte San Nicolò.	87
C.1	Risultati delle simulazioni per le Breccie in prossimità di Roncayette.	93

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. Andrea D'Alpaos per gli insegnamenti, la disponibilità e per l'oggetto di studio che ho trattato in questa tesi. Ringrazio il Dott. Daniele Pietro Viero per le spiegazioni sulla realizzazione delle simulazioni delle brecce arginali e il Prof. Giorgio Cassiani e il Dott. Jacopo Boaga per la fase di acquisizione e l'elaborazione dei dati di geofisica. Ringrazio l'Ing. Tessarollo dell'Ufficio del Genio Civile di Padova per avermi fornito dei dati utili alla realizzazione di questo studio. Ringrazio i miei genitori, mia sorella Giulia e la mia ragazza Silvia per il costante supporto che mi conferiscono. Infine ringrazio chi in questi due anni mi ha dispensato idee, riflessioni, e consigli utili che hanno contribuito ad ampliare le mie conoscenze.

MARIO CUSUMANO

Capitolo 1

Introduzione

Lo studio della condizione di stabilità degli argini fluviali e della eventuale diffusione sul territorio circostante delle onde di sommersione, per effetto sia del sormonto delle difese arginali stesse sia dei loro cedimenti strutturali con la eventuale formazione di brecce, è un problema di rilevante interesse ambientale, sociale ed economico, soprattutto nell'ottica della pianificazione volta a ridurre la pericolosità idraulica. Infatti, le onde di sommersione generate da insufficienza o crollo delle arginature possono causare perdite di vite umane, ingenti danni alle proprietà e agli ecosistemi interessati [e.g., Viero D.P. et al., 2013 [28]].

Lo studio degli eventi di inondazione a seguito di sormonti o rotte arginali in contesti fluviali è quindi argomento importante e attuale, con pesanti riflessi sulla sicurezza idraulica di molti fiumi veneti, lunghi tratti dei quali hanno carattere pensile e sono caratterizzati da quote idrometriche permanentemente o temporaneamente superiori a quelle del territorio attraversato, disponendo peraltro di sezioni spesso sottodimensionate rispetto ai massimi eventi di piena. Inoltre, la maggior parte delle difese arginali è stata costruita e modificata, negli anni, con rialzi e ringrossi successivi, utilizzando materiali con caratteristiche geotecniche non sempre adatte per le funzioni cui erano destinati, nonostante la normativa vigente (norma CNR-UNI 10006 "Costruzione e manutenzione delle strade. Tecniche di impiego delle terre", 2002) fornisca prescrizioni sulle "tecniche di impiego delle terre per la costruzione e la manutenzione delle

opere di difesa dalle acque". In molti casi, quindi, è concreto il pericolo che queste le strutture arginali, poste a difesa del territorio, siano esposte a sormonti e a pericolosi fenomeni di filtrazione e sifonamento in occasione del passaggio delle piene. Il controllo delle condizioni di stabilità degli argini fluviali, per gli aspetti sopra citati, riveste pertanto una importanza fondamentale nella gestione dei corsi d'acqua.

Gli intensi eventi di inondazione che si sono verificati nel territorio italiano, e in particolare nella Regione Veneto, come conseguenza degli eventi di precipitazione verificatisi nel Novembre 2010, hanno messo in evidenza la vulnerabilità degli argini fluviali e la necessità di un sistema efficace per il monitoraggio e la sistemazione di queste strutture. I danni provocati dall'esondazione del Fiume Bacchiglione in diverse zone, hanno di fatto risollevato le problematiche relative alla pericolosità idraulica nella regione Veneto, poiché un evento pluviometrico di entità inferiore a quello che ha caratterizzato l'evento alluvionale del novembre 1966 (le portate del Bacchiglione durante l'evento del 2010 sono state stimate come poco meno che centenarie) ha seriamente messo in crisi il territorio veneto.

Una piena è rappresentata da un forte e generalmente rapido aumento della portata di un corso d'acqua, all'origine del quale c'è un evento di precipitazione consistente o un fenomeno importante di fusione di uno spesso manto nevoso, aumento che è generalmente seguito da una fase di esaurimento con una diminuzione continua ma più lenta delle portate fluenti, fino al raggiungimento delle precedenti condizioni. Nel corso di una piena, il contributo più rilevante è generalmente quello legato al deflusso superficiale, mentre il contributo del deflusso di base è spesso trascurabile.

Le aree che costituiscono il bacino imbrifero agiscono da conche di raccolta d'acqua piovana e la convogliano verso i corsi d'acqua con un moto controllato dalla gravità attraverso la pendenza del terreno e dall'attrito [Gisotti C. et al, 2000 [20]]. Durante gli eventi di piena, molti dei collegamenti dei reticoli fluviali in aree pianeggianti sono comunemente caratterizzati da livelli idrome-

trici elevati rispetto alle aree adiacenti, e le sezioni trasversali dei corsi d'acqua, purtroppo, non sono spesso in grado di convogliare i colmi di piena (ancorché non eccezionali), con conseguente possibile sormonto dei rilevati arginali o loro cedimento per effetto delle condizioni idrauliche che si verificano nel corso d'acqua.

Negli ultimi anni si sono verificate quattro rotte arginali che hanno interessato i principali fiumi che attraversano la provincia di Padova: il Muson de Sassi a Loreggia nel 2009, il Frassine a Saletto, il Bacchiglione a Veggiano e a Ponte San Nicolò nel 2010. Durante questi eventi sono state inondate vaste aree agricole e abitate, per un totale di 5000 persone sfollate e danni superiori a 300 milioni di euro [Viero D.P. et al., 2013 [28]]

La capacità di prevedere l'evoluzione delle esondazioni nel tempo e nello spazio ha un ruolo determinante nella predisposizione di piani di gestione delle emergenze e nella pianificazione del territorio. In questo ambito, un importante contributo deriva dalla modellazione matematica idrodinamica per simulare gli scenari di propagazione delle onde di piena nel dominio bidimensionale, in concomitanza di possibili esondazioni dei corsi d'acqua. Negli ultimi anni, del resto, l'interesse verso modelli matematici bidimensionali per la propagazione delle onde lunghe in acque basse, e delle onde di piena in particolare, è progressivamente cresciuto, così come è cresciuto, nelle indagini rivolte alle valutazioni sul rischio idraulico, l'interesse verso la possibilità di simulare gli effetti sul territorio circostante di eventuali esondazioni causate da sormonti delle difese arginali o dalla formazione di rotte [D'Alpaos et al., 1994 [13]; Bates et al., 1995 [4]; Horritt e Bates, 2001 [21]].

Nell'ambito di questa tesi, lo studio della propagazione delle onde di piena è condotto sulla base di un modello idrodinamico uni-bidimensionale agli elementi finiti [Defina, 2000 [16]] che risolve le equazioni delle onde lunghe in acque basse, modificate in modo opportuno al fine di trattare in modo agevole ed efficace i processi di transizione asciutto-bagnato su terreni irregolari. Il modello, a fondo fisso, consente inoltre di simulare il cedimento di una

struttura arginale attraverso la formazione e l'evoluzione di una breccia causata da cedimento arginale per sifonamento o sormonto.

Un aspetto fondamentale, nel caso in cui si vogliano sfruttare i vantaggi la modellazione matematica in senso predittivo, riguarda l'individuazione dei tratti arginali caratterizzati da specifiche criticità. La adeguata caratterizzazione geologica dei rilevati arginali assieme alla loro periodica manutenzione sono le attività essenziali che devono essere condotte nell'ottica della prevenzione, con lo scopo di ridurre il rischio di inondazione. La presenza di eterogeneità granulometriche può generare delle vie preferenziali per l'infiltrazione dell'acqua attraverso il corpo arginale, causando l'erosione interna del corpo arginale e riducendo la resistenza degli argini stessi. Se le eterogeneità del sistema non sono correttamente identificate si può incorrere in una sottostima del rischio idraulico [Busato et al., 2016 [7]].

Tuttavia, la maggior parte dei problemi concernenti condizioni di criticità per gli argini fluviali si manifestano in corrispondenza a discontinuità che difficilmente possono essere individuate mediante tradizionali indagini dirette. Problemi relativi a sifonamento e formazione di fontanazzi, che si manifestano in corrispondenza di fratture, cavità e zone caratterizzate da diversi gradi di compattazione, non possono essere analizzati sulla base di metodi distruttivi, che forniscono informazioni dettagliate ma puntuali. Al contrario, metodi geofisici non invasivi, come ad esempio la tomografia elettrica (ERT), i metodi elettromagnetici nel dominio della frequenza (FDEM), e il georadar (GPR), possono essere utilizzati per il riconoscimento e la valutazione dei parametri necessari per controllare le condizioni di stabilità delle difese arginali e dei loro terreni di fondazione.

Le indagini relative alla presente tesi sono state condotte nell'ottica di un'analisi congiunta tra modellazione matematica e analisi geofisiche di dati acquisiti sul Canale Roncajette (PD), sia precedentemente sia nell'ambito della stessa tesi.

La presenza di tratti arginali con proprietà fisiche che evidenziano aspetti di

possibile debolezza del tratto arginale, suggeriscono che nel caso in cui si manifestasse un evento di piena analogo all'evento del Novembre 2010 (con tempo di ritorno poco meno che centenario), l'argine del Canale Roncajette potrebbe essere incline a raggiungere condizioni idrauliche critiche, provocando inoltre la formazione di brecce arginali. I risultati delle indagini condotte sono stati sintetizzati in una serie di carte tematiche nelle quali si sono evidenziati la posizione e l'estensione delle aree a rischio di allagamento a causa dei fenomeni indagati. Sono stati considerati diversi scenari di rottura, così da ottenere una migliore definizione delle carte tematiche sul rischio idraulico, generalmente basate sull'analisi di eventi storici e sulla simulazione di fenomeni di esondazione prodotti unicamente da tracimazioni per sormonto delle difese arginali. Le mappe contengono informazioni riguardanti l'estensione degli allagamenti, le altezze locali della lama d'acqua e le velocità del flusso.

La presente tesi è strutturata come segue:

- Il Capitolo 2 ricorda alcune delle intense alluvioni del Veneto assieme ai loro effetti sul territorio;
- Il Capitolo 3 fornisce l'inquadramento geografico e geologico del dominio di studio, che appartiene al bacino idrografico del fiume Bacchiglione;
- Il Capitolo 4 tratta delle arginature dei corsi d'acqua;
- Il Capitolo 5 presenta i metodi utilizzati (modellazione matematica bidimensionale e analisi geofisiche non invasive). Con riferimento alla modellazione matematica, viene descritto il modello idrodinamico unidimensionale agli elementi finiti accoppiato con il modello di cedimento della struttura arginale, fornendo qualche cenno sulla teoria alla base del suo funzionamento e presentando le sue caratteristiche principali;
- Il Capitolo 6 mostra i risultati ottenuti dalle analisi geofisiche;
- Il Capitolo 7 illustra i risultati ottenuti dalle simulazioni, considerando diversi scenari quali l'assenza di brecce arginali e la presenza di brec-

ce nella parte settentrionale, centrale, e meridionale del tratto fluviale indagato;

- Il Capitolo 8 riporta le conclusioni più importanti alla luce di quanto emerso dalle simulazioni eseguite, insieme a proposte su eventuali sviluppi del lavoro.

Capitolo 2

Le intense alluvioni del Veneto

Tra gli eventi alluvionali documentati che nel passato hanno interessato il bacino idrografico del Brenta-Bacchiglione, i più critici per altezza del livello idrico e durata dell'evento sono quelli del Settembre 1882 e del Novembre 1966.

L'evento di piena del Settembre 1882 provocò gravi danni nel bacino del Brenta, sia nel tratto montano fino a Bassano, che nel tratto in pianura dove si verificarono i danni maggiori per l'altezza raggiunta dai livelli idrici e per la durata dell'intumescenza.

In provincia di Padova, in particolare, si ebbero due rotte per sormonto dell'argine: in sponda destra a Limena e a Boion; crollò il ponte di Curtarolo, vennero danneggiati i due ponti a Ponte di Brenta e fu gravemente lesionata la briglia di Strà. La rotta di Limena provocò l'allagamento di circa 2.000 ettari di campagna, quella di Boion di circa 13.000 ettari. L'Agno-Guà allagò la valle di Recoaro e ruppe a Sarego, inondando circa 17.000 ettari di campagna. Altre rotte di minore gravità si verificarono a Bagnolo, a Zimella e a valle di Caselle. L'esondazione del Bacchiglione e dei suoi affluenti, infine, provocò l'allagamento della città di Vicenza e di vaste zone di pianura situate a settentrione, fino a Thiene. A sud di Vicenza, invece, venne allagata la fascia di pianura compresa tra Marola e Cervarese S. Croce. Esondate furono anche le zone più depresse della città di Padova, mentre rotte e straripamenti vi verificarono ad opera dei torrenti Astico e Leogra [PAI, 2012 [1]].

L'evento alluvionale che si è verificato dal 3 al 5 Novembre 1966 è stato provocato dal verificarsi contemporaneo di piogge intense ed alta marea dopo un lungo periodo di piogge continue. Le precipitazioni, che si riversarono su tutto il territorio dei bacini dei fiumi Brenta e Bacchiglione durante il mese di Ottobre, determinarono la saturazione dei terreni, l'innalzamento della falda freatica e caricarono la rete idrografica capillare. Nei primi giorni di Novembre, le intense precipitazioni che si riversarono negli stessi bacini, trovarono il terreno già saturo e non in grado di allontanare velocemente il surplus di deflusso, incrementato tra l'altro dal contemporaneo scioglimento delle nevi, precocemente cadute, da parte del vento di scirocco [PAI, 2012 [1]].

Dal 31 Ottobre al 2 Novembre 2010 l'alta pianura dei bacini dell'Adige, Brenta - Bacchiglione, Piave e Livenza è stata investita da una perturbazione di origine atlantica in approfondimento sul bacino del Mediterraneo che ha convogliato un intenso e persistente flusso di correnti sciroccali caldo-umide e determinato precipitazioni intense che si sono concentrate sulle zone prealpine e pedemontane. In tali aree si sono infatti superati diffusamente i 300 mm di precipitazione complessivamente caduta nei tre giorni, con punte massime locali anche superiori ai 500 mm. La persistenza di venti di scirocco sia sulla costa che in quota, con un significativo innalzamento del limite della neve a quote superiori ai 2000 m, ha comportato la fusione della neve preesistente in montagna specie sulle Prealpi occidentali. Tali eventi hanno generato fenomeni di dissesto sia sulla rete idraulica del Veneto che lungo i versanti. Per quanto riguarda i corsi d'acqua, alcuni di essi, soprattutto nei bacini dell'Adige e del Bacchiglione come l'Alpone, l'Aldegà, il Chiampo, il Tramigna, il Timonchio-Bacchiglione e il Tesina Padovano, sono stati interessati da piene eccezionali e repentine, in alcuni casi con conseguenti fenomeni di tracimazione e/o cedimenti arginali [PAI, 2012 [1]].

Capitolo 3

Inquadramento geografico e geologico

La pianura veneto-friulana rappresenta la superficie del riempimento di età terziaria e quaternaria di un bacino deposizionale che è situato all'estremità nord-orientale della microplacca adriatica. Si tratta dell'avampese condiviso fra il settore orientale delle Alpi meridionali e gli Appennini settentrionali. La prima corrisponde a una catena a thrust sudvergenti sviluppatesi a partire dal Paleogene, mentre la seconda è una catena a thrust con vergenza nordorientale formatesi dal Neogene ¹ [Fontana A., 2006 [18]].

L'aspetto attuale della pianura veneto-friulana è fortemente legato all'evoluzione tardo pleistocenica e olocenica dei fiumi alpini Isonzo, Tagliamento, Piave, Brenta e Adige. Essi hanno infatti ripetutamente cambiato percorso a valle del loro sbocco montano interessando aree molto ampie, fino a coprire migliaia di km^2 . Si sono così formati sistemi sedimentari, allungati fino al mare, che in pianta presentano una morfologia a ventaglio, mentre nelle tre dimensioni possiedono una forma simile a un cono appiattito. Tali sistemi, un tempo genericamente descritti come conoidi, ora sono definiti come megafan alluvionali [Mozzi P., 2005 [23]; Fontana A., 2006 [18]].

Nell'area veneta e friulana, soprattutto a est del Naviglio Brenta, i diversi tratti di pianura costruiti dai maggiori fiumi sono ben distinguibili anche

¹Per avere un riferimento immediato alle Epoche e ai Periodi della storia geologica è presente la International Chronostratigraphic Chart nell'Allegato F.

nella bassa pianura, dove i sedimenti sono essenzialmente fini e il gradiente topografico è compreso tra 3 – 0,5‰.

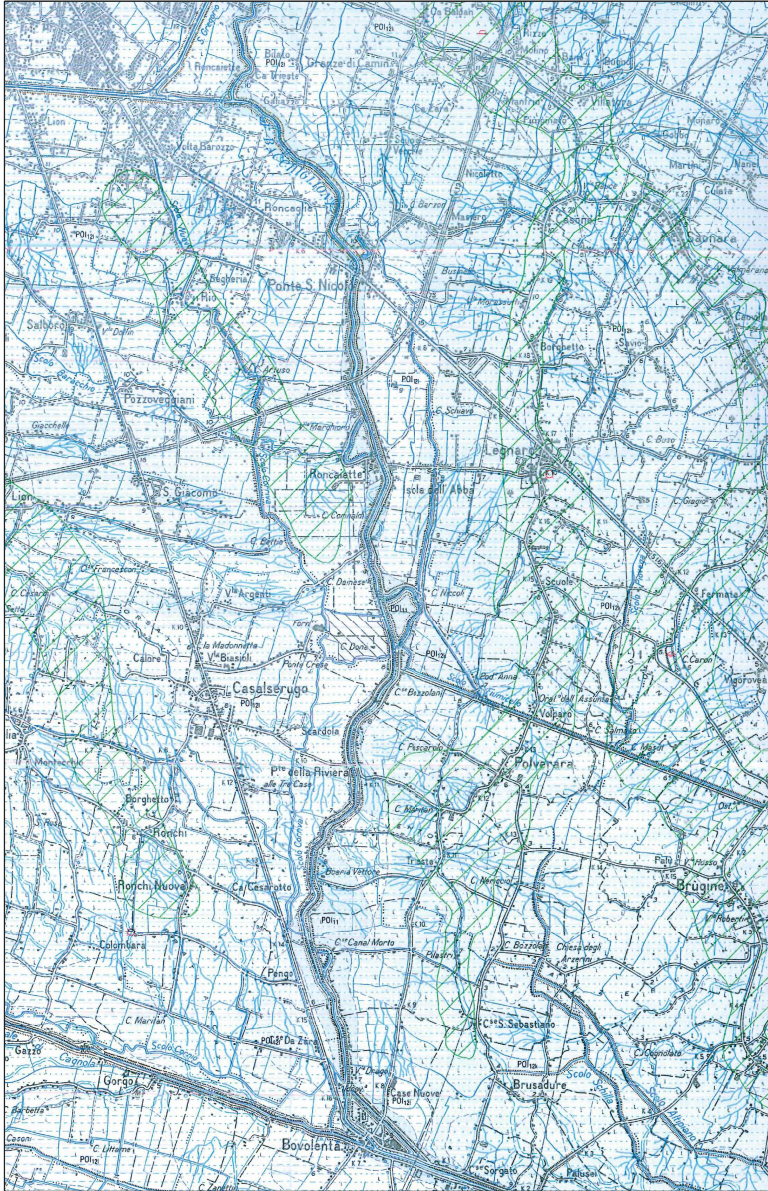


Fig. 3.1: Estrapolazione dell'area di studio dalla Carta Geologica di Padova Sud, Foglio 147.

La pianura ha avuto una importante evoluzione morfogenetica a partire da 160.000 anni fa e in particolar modo durante l'Ultimo Massimo Glaciale (*Last Glacial Maximum*) compreso fra 30.000 e 17.000 anni fa. Il periodo LGM corrisponde all'intervallo durante il quale si è verificato l'ultimo avanzamento

dei ghiacciai pleistocenici che ricoprirono le principali valli alpine e raggiunsero la pianura con le loro fronti. I depositi correlabili con l'ultimo evento glaciale locale fanno parte del *megafan* alluvionale del Brenta, alimentato dai deflussi fluvio-glaciali provenienti dalla valle del Brenta, che all'epoca si estendevano sino a comprendere la bassa pianura padovana [Fontana et alii, 2004 [17]].

L'area di studio è situata a Sud-Est di Padova, comprende il tratto del Fiume Bacchiglione lungo il Canale Roncayette da Ponte San Nicolò a Bovolenta e presenta i depositi alluvionali del megafan del Brenta. Il sito è raffigurato nel Foglio 147 Padova Sud [25] del Progetto CARG (CARtografia Geologica) in Figura 3.1 e indica la presenza di depositi appartenenti al:

- **Subsistema di Selvazzano** (POI_{11}) [Olocene superiore - Attuale]

Si tratta di limo e sabbia, sabbia di colore bruno (depositi alluvionali di canale fluviale, argine e ventaglio di rotta). Gli spessori sono compresi tra 1 m e 6 m.

- **Subsistema di Padova** che include:

- *Unità di Saonara* (POI_{12k}) [Olocene superiore]
- *Unità di Mezzavia* (POI_{12l}) [Olocene medio - Pleistocene superiore]

Si tratta di sabbia, limo e sabbia a stratificazione orizzontale o incrociata (depositi alluvionali di canale fluviale, argine e ventaglio di rotta); limo ed argilla a stratificazione orizzontale (depositi di piana alluvionale). Lo spessore varia da 1 m a circa 10 metri.

3.1 Il Fiume Bacchiglione

Il Fiume Bacchiglione costituisce il collettore finale di una vasta rete idrografica che si estende su gran parte delle zone montana e pedemontana del territorio della provincia di Vicenza. Nasce a nord di Vicenza dalla confluenza di un corso d'acqua di risorgiva, il Bacchiglioncello, con il Leogra-Timonchio recante i contributi di un bacino montano piuttosto limitato e di una vasta area di pianura attorno a Schio; nel successivo tratto fino a Longare riceve una serie di affluenti che convergono a ventaglio e che completano gli apporti della zona montana. Il Bacchiglione si estende per 118 *km* con un bacino di raccolta di 1.400 *km*².

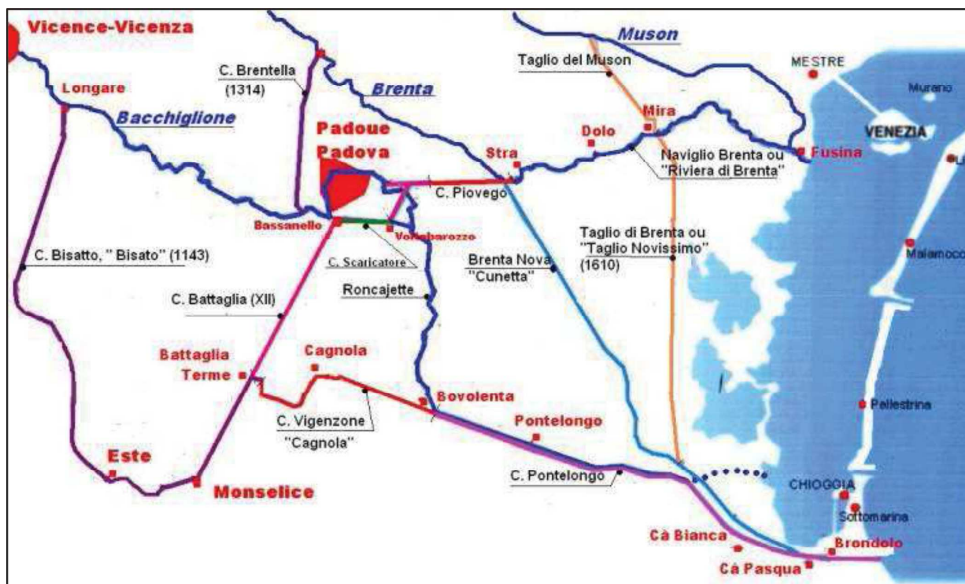


Fig. 3.2: Reticolo idrografico del Fiume Bacchiglione.

Nella zona di pianura l'idrografia del Bacchiglione possiede dei collegamenti con il Brenta, e delle diramazioni in prossimità della città di Padova. Alla chiusura del bacino montano del Bacchiglione, presso Longare, ha origine il canale Bisatto, come derivazione dal fiume principale. Quest'ultimo è un canale incassato che scorre verso sud nella pianura compresa tra i Colli Berici ed Euganei ricevendo i contributi in destra di piccoli torrenti ed in sinistra di alcuni scoli di bonifica minori. Proseguendo il suo percorso nella pianura

padovana il corso d'acqua raggiunge Este e a valle di questo nodo il canale prosegue con il nome di canale Este-Monselice in direzione est verso Monselice dove, mutato il nome in canale Battaglia, piega verso nord dove si unisce al ramo del canale che discende da Padova. [PAI,2012 [1]].

Il Fiume Bacchiglione è caratterizzato da un percorso in parte meandri-forme ed in parte rettilineo in quanto rettificato dall'uomo. La deviazione di parte del tracciato è molto antica e la rettifica delle numerose anse accanto al percorso attuale, risale al 1800. All'entrata di Padova il fiume è artificialmente suddiviso in tre rami. Il più meridionale è il Canale di Battaglia, scavato tra il 1189 ed il 1201. La seconda diramazione è il canale Tronco Maestro, che entra a Padova da Sud e attraversa il centro storico collegandosi al Canale Piovego. La terza è costituita dal Canale Scaricatore, costruito a sud di Padova nel 1863, il quale si collega al Canale Roncajette, proveniente da nord, dove è unito al Canale del Piovego presso il lato più orientale della cinta murata. [Cucato M.,et al., 2012 [10]].

Il Roncajette inferiore rappresenta il corso principale del Bacchiglione che si dirige prima verso sud e poi, presso Bovolenta, si diparte in direzione est verso la foce in un alveo regolarizzato che costituisce il canale di Pontelongo. Quindi, in località Ca' Pasqua, il Roncajette si unisce al Brenta e sfocia nell'Adriatico con una forma ad estuario a Brondolo di Chioggia.

Il corso del Bacchiglione presenta tratti naturali, con una morfologia ricca di meandri e anse nel tratto vicentino, e tratti artificiali, come ad esempio quello padovano in cui sono state eseguite molte opere di canalizzazione con andamento sommariamente rettilineo.

Il bacino idrografico del Brenta – Bacchiglione presenta alcuni nodi principali tra i quali troviamo quelli di Castelfranco, Camposanpiero e Padova. Tali nodi ospitano manufatti di regolazione delle portate che possono essere convogliate in altri bacini o essere ripartite internamente ad un determinato bacino. Il nodo idraulico di Padova, che rispecchia il progetto di sistemazione *Fossombroni-Paleocapa*, ha come scopo quello di evitare il passaggio delle piene nell'area

urbana e la sua gestione è affidata all'ufficio regionale del Genio Civile di Padova, che procede alle manovre di regolazione delle paratoie presenti nel nodo stesso dal momento in cui alla sezione di Longare l'acqua raggiunge il livello di "attenzione".

La regolazione prevede di far defluire la portata in arrivo attraverso il canale Scaricatore per poi ripartirla nel Roncajette inferiore, rimanendo quindi nel corso d'acqua di provenienza, e nel canale San Gregorio. La biforcazione di Voltabarozzo è presidiata da manufatti quali il *Sostegno Regolatore*, all'incile del Roncajette Inferiore, e il *Sostegno Scaricatore*, all'imbocco del San Gregorio, realizzati con paratoie Stoney i cui organi di regolazione sono posti sulle quattro luci della galleria soprastante, nel primo, mentre nel secondo le luci ospitanti gli impianti sono due.

Capitolo 4

Arginatura dei corsi d'acqua

4.1 Descrizione e caratteristiche

L'argine è una struttura artificiale progettata e costruita per controllare il flusso dell'acqua e fornire protezione dalle piene temporanee. La frequenza delle piene attese e la loro durata determinano l'impegno della struttura arginale e della sua esposizione in relazione ai problemi dell'infiltrazione e quindi della sua stabilità.

Per evitare le esondazioni di un corso d'acqua si provvede alla realizzazione degli argini, come evidenziato nella Figura 4.1 nella pagina seguente. Se il fiume è già arginato, ed è necessario controllare una portata maggiore di quella massima consentita, si provvede al suo sovrizzo e ringrosso nei tratti maggiormente esposti.

L'arginatura viene generalmente eseguita con un rilevato di terra omogenea. Il materiale è solitamente terra omogenea limosa e argillosa compresa tra il tipo A-6 della classificazione *CNR-UNI 10006*, con contenuto minimo di sabbia del 15% e il tipo A-4 con contenuto massimo di sabbia del 50% [Da Deppo L. et al., 2016 [14]].

Gli argini riducono il rischio di inondazione, ma nessun sistema di argini può eliminare totalmente il rischio di alluvione, c'è sempre una possibilità che una inondazione ecceda la capacità dell'argine [American Society of Civil Engineers, 2010 [2]].

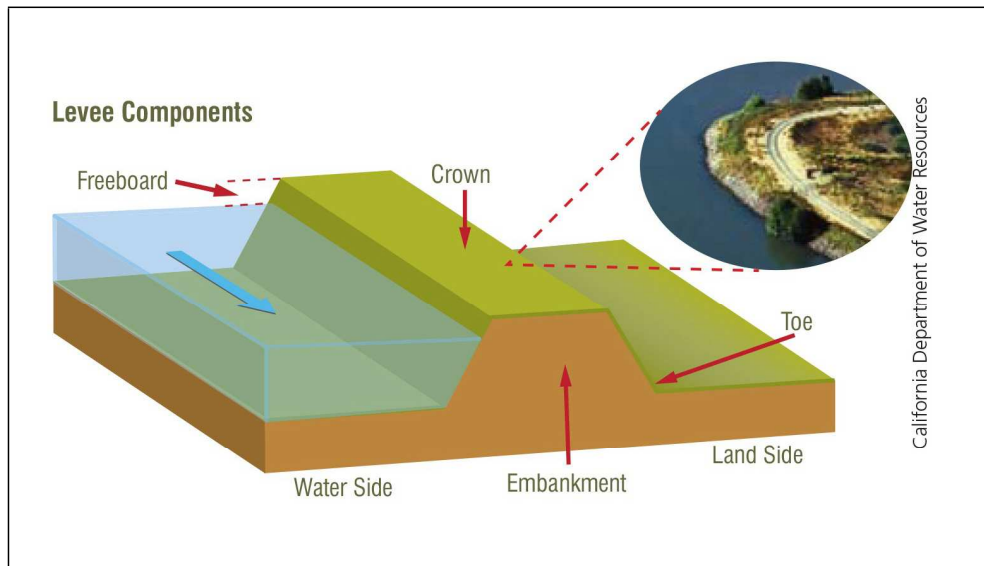


Fig. 4.1: Struttura dell'argine.

Quando le acque di inondazione superano l'altezza di un argine e scorrono sulla sua corona si verifica il fenomeno di *sormonto* o **overtopping**, si veda la Figura 4.2.

Il flusso dell'acqua che tracima l'argine con una bassa quota può erodere e causare potenzialmente una rotta arginale, in Figura 4.3, altrimenti detta *levee breach*. Questa si verifica quando una parte dell'argine viene erosa inizialmente creando un'apertura attraverso la quale possono defluire le acque straripanti.

Le rotte arginali più pericolose si verificano rapidamente quando i tiranti sono elevati. Il fiume può rapidamente sommergere una vasta area oltre la breccia, anche senza nessun segno di avvertimento. Esistono diversi modi in cui gli argini in terra possono essere danneggiati. Per esempio:

- Le forti correnti del fiume e le onde possono erodere la corona arginale;
- I sedimenti trasportati dalle acque e grandi oggetti come i tronchi degli alberi possono provocare fenomeni erosivi in corrispondenza all'argine;
- Gli alberi che crescono sull'argine possono essere sradicati dal vento e lasciare delle cavità, che diventano delle zone critiche per la stabilità dell'argine;

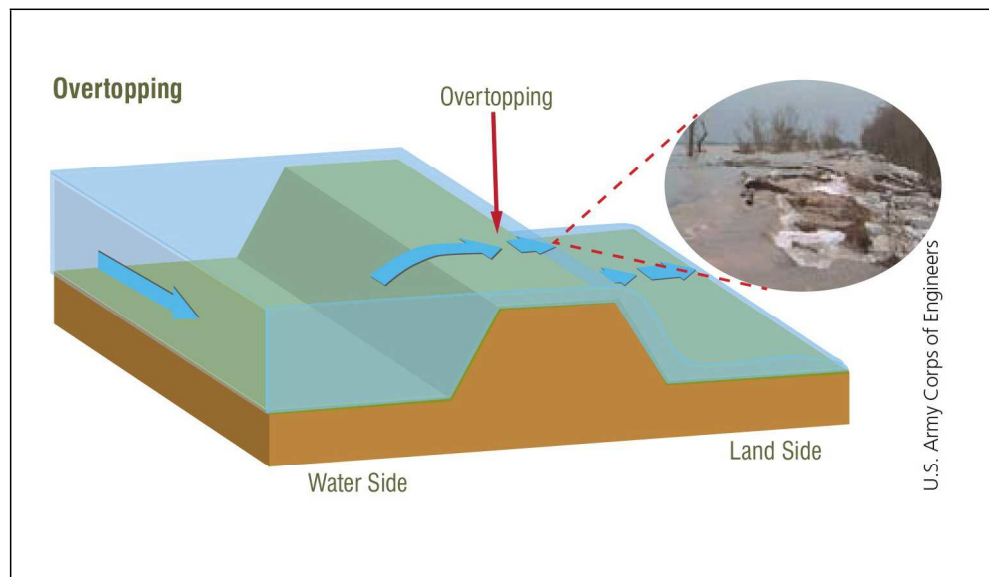


Fig. 4.2: *Overtopping o sormonto dell'argine.*

- Le radici delle piante costituiscono la via preferenziale della diffusione del fluido all'interno del rilevato.

Altre problematiche da tenere in considerazione sono lo **sfiancamento** si veda la Figura 4.4(a), il **Piping** e il **Seepage**, si veda la Figura 4.4(b).

Lo Sfiancamento per la troppa imbibizione è dovuto a una piena prolungata. La modifica delle proprietà meccaniche della terra può fare smottare specialmente la spalla dell'argine.

Il Seepage è il movimento del flusso d'acqua per filtrazione all'interno o alla base dell'argine. La parte di suolo che viene coinvolta diventa instabile e potrebbe collassare. Se il moto di filtrazione prosegue verso la superficie e il suolo non è in grado di opporsi alla pressione del fluido verificando il sifonamento e in casi di entità superiore si producono i cosiddetti *fontanazzi*.

Il Piping è il processo di erosione interna all'argine causata dal seepage.

Qualora la persistenza di una qualsiasi di queste cause sia prolungata, si possono creare delle zone di debolezza che potrebbero evolvere in una breccia arginale.

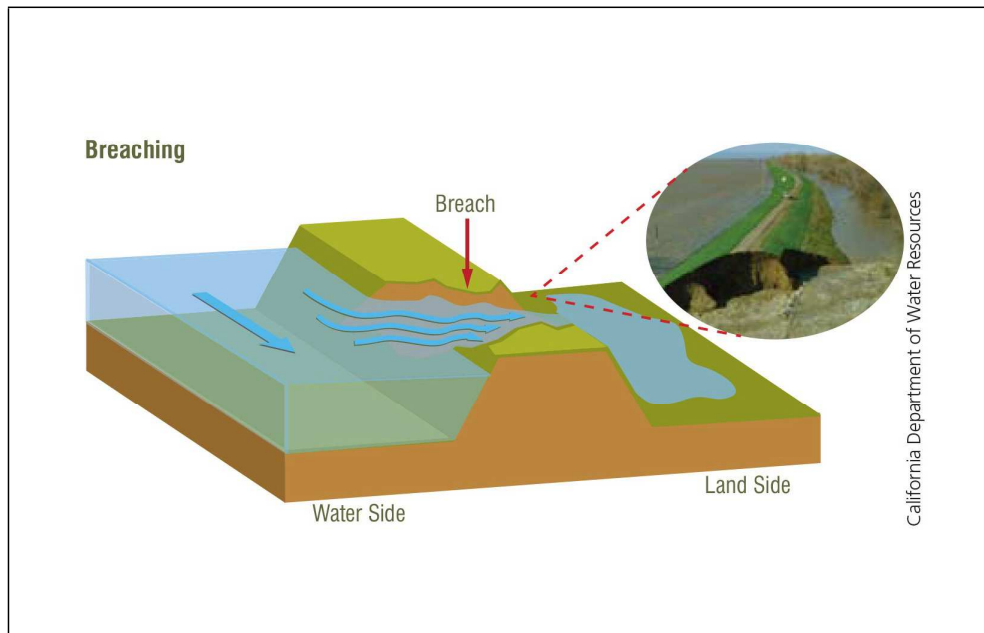


Fig. 4.3: Levee breach o rotta arginale.

4.2 Interventi di manutenzione

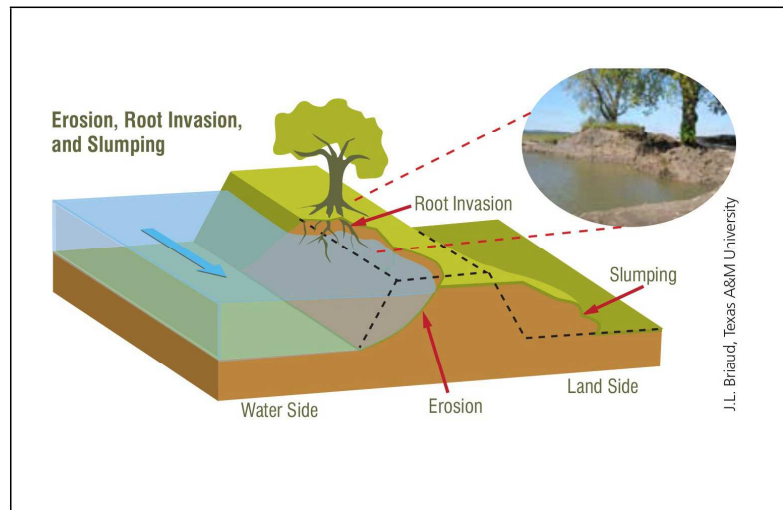
"Le misure di manutenzione determinano una sistematica sorveglianza del comportamento del fiume. Così ove il livello idrometrico superi il livello di guardia, deve iniziare il servizio di vigilanza delle arginature" [Da Deppo et alii, 2016 [14]]. La manutenzione può essere ordinaria o straordinaria.

La manutenzione ordinaria consiste in:

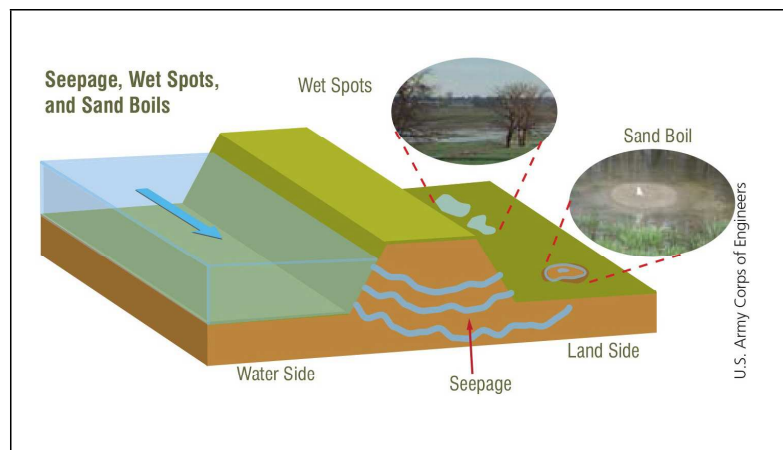
- sfalci arginali;
- manutenzione della strada arginale;
- taglio di arbusti e alberi nati a meno di 4 m del piede arginale;
- esame visivo per localizzare l'eventuale avvio di fontanazzi ecc.

La manutenzione straordinaria riguarda:

- il sopralzo arginale nei tratti con franco insufficiente;
- l'esecuzione di rinfianchi per eliminare il pericolo di sfiancamento;
- la gettata di massi per la protezione del piede a fiume.



(a)



(b)

Fig. 4.4: Fenomeni erosivi e sfiancamento in (a), seepage e sifonamento in (b).

4.3 Il problema delle nutrie

La nutria (*Myocastor Coypus*) è nativa del Sud America ed è considerata una delle peggiori specie invasive in Europa che causa danni agli argini, alla vegetazione e alle piantagioni prossime ai corsi d'acqua.

In Italia è stata importata negli anni '30 e negli ultimi anni la densità della popolazione e la distribuzione della Coypu è incrementata notevolmente stimando 8 - 14.9 animali ogni 100 metri di argine in alcune regioni [Giulia Sofia et alii, 2017 [27]].

I danni includono l'erosione e/o le variazioni di pendenza degli argini

dei canali stessi, la subsidenza al top dell'argine e la degradazione dei campi coltivati e delle strade vicine agli argini.

La presenza di superfici erose può ridurre significativamente la integrità degli argini, causando in alcuni casi il collasso dell'argine attraverso la combinazione di forze gravitazionali e idrauliche.

Il 19 Gennaio 2014 si è verificata una rotta arginale lungo il Fiume Secchia a San Matteo. La breccia ha rilasciato nella piana circostante un volume d'acqua di circa $36 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ con una portata massima di circa $434 \text{ m}^3/\text{s}$. L'ultima stima complessiva dell'area che è stata inondata è di circa 52 km^2 con danni superiori a 500 Milioni di euro.

Dalle analisi di fotografie aeree con una risoluzione di 10 centimetri scattate tra il 2010 e il 2012 è stata notata l'influenza della fauna selvatica. Le ispezioni sul Fiume Secchia hanno confermato le evidenze e rivelato la presenza di animali scavatori tra i quali porcospini, volpi e nutrie. Questi animali sono stati trovati in corrispondenza dei punti in cui si è originata la breccia [Orlandini S. et alii, 2015 [24]].

Alla difesa contro l'azione di questi animali si provvede con la pulizia degli argini e delle golene e quindi stendendo, dopo la riprofilatura, sulla scarpata sul lato fiume una rete di lega Zn-Al, o di acciaio inox con maglia 6×6 o $8 \times 8 \text{ cm}^2$ ben ancorata in testa e al piede. La rete è posta lato fiume per la difesa principale dalle tane delle nutrie; situazioni particolari possono consigliare la stesa della rete anche sul lato campagna [Da Deppo et al., 2011 [15]].

Capitolo 5

Materiali e metodi

5.1 Modello di propagazione delle piene

La propagazione di un'onda di piena in un alveo caratterizzato da tratti con dimensioni trasversali molto ampie, nei quali non è prevedibile a priori la direzione del flusso, può essere affrontata con sufficiente attendibilità utilizzando schemi di calcolo di tipo bidimensionale a fondo fisso. Su tali schemi ci si può basare anche per descrivere la propagazione sul territorio adiacente di eventuali onde di sommersione generate da sormonti o cedimenti arginali, purché le equazioni del moto siano opportunamente adattate e la modellazione delle aree destinate ad essere sommerse sia condotta tenendo conto degli effetti non trascurabili che le diverse strutture presenti sul terreno esercitano sulla propagazione dei fronti di allagamento.

Ciò premesso, nell'allestimento del modello propagatorio si è proceduto alla messa a punto di uno schema uni-bidimensionale a fondo fisso con il quale è possibile simulare il comportamento idraulico dell'intero territorio modellato, considerando le diverse strutture presenti (argini, rilevati stradali, opere di regolazione, idrovore, ecc...) e anche il reticolo idrografico minore.

5.1.1 Il modello bidimensionale

Equazioni bidimensionali del moto

Il modello matematico, ampiamente descritto in numerosi contributi scientifici [D'Alpaos L., Defina A., Matticchio B., 1994 [12], Defina A., 2000 [16]]

e che ha trovato in questi anni altrettanto numerose applicazioni, si basa sulla soluzione delle equazioni di De Saint Venant, che, come noto, descrivono il moto bidimensionale di una corrente a superficie libera nelle ipotesi di distribuzione idrostatica delle pressioni, di velocità uniformemente distribuite lungo la verticale e di fondo inderodibile. Tali equazioni sono risolte adottando uno schema numerico agli elementi finiti su di una griglia triangolare, che viene utilizzata per schematizzare l'area oggetto dello studio.

Come già accennato, il modello risolve le equazioni del moto mediate sulla verticale nelle direzioni orizzontali x e y e l'equazione di continuità, esprimibili rispettivamente come:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{Y} \right) - \left(\frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{\tau_{wx}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{Y} \right) - \left(\frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{\tau_{wy}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

nelle quali h indica la quota della superficie libera, x e y sono le ascisse spaziali orizzontali correnti, g è l'accelerazione di gravità, ρ è la densità del fluido, t è il tempo, \vec{q} è la velocità integrata sulla verticale con componenti q_x e q_y secondo le due direzioni orizzontali, R_{ij} sono gli sforzi turbolenti (o di Reynolds) nel piano orizzontale in cui i e j indicano le direzioni x o y , $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ è lo sforzo tangenziale al fondo espresso dall'equazione (5.2) e $\tau_w = (\tau_{wx}, \tau_{wy})$ è lo sforzo prodotto dall'azione del vento sulla superficie libera espresso dall'equazione (5.3).

$$\frac{\tau_b}{\rho} = gY \left(\frac{|\mathbf{q}|}{k_s^2 H^{10/3}} \right) \mathbf{q} \quad (5.2)$$

$$\tau_w = \rho_a c_d U_{wind}^2 \quad (5.3)$$

Nelle equazioni (5.2) e (5.3) sono indicati con k_S il coefficiente di scabrezza secondo Strickler, con U_{wind} la velocità del vento e con c_d il coefficiente di resistenza, espresso nel modello mediante la relazione semiempirica:

$$c_d = c_{d0} (1 - e^{-\epsilon_W U_{wind}}) \quad (5.4)$$

in cui c_{d0} e ϵ_W sono costanti scelte opportunamente.

I termini η , Y e H che compaiono nelle equazioni (5.1)-(5.2), indicano rispettivamente, nel tempo generico e per ciascun elemento, la frazione locale di dominio allagato, il volume d'acqua per unità di superficie e una profondità d'acqua equivalente, introdotta per descrivere l'effetto dei termini dissipativi quando il tirante si riduce e diventa confrontabile con le dimensioni delle irregolarità del terreno.

Transizione asciutto-bagnato: la media di fase

Pensando alla propagazione di una lama d'acqua sottile su di un terreno naturale, l'esperienza mette in evidenza l'importanza delle irregolarità della superficie che comportano l'esistenza di un transitorio nel quale, all'interno dell'area in esame, coesistono porzioni di suolo asciutte e altre già sommerse.

Il contributo più innovativo fornito dal Dipartimento ICEA nella risoluzione delle equazioni descritte al Paragrafo 5.1.1 consiste nell'introduzione di due parametri, η e H , mediante i quali vengono modificate rispettivamente le equazioni di continuità e del moto. Entrambi i parametri sono dipendenti da una grandezza caratteristica a_r , avente dimensioni di una lunghezza, che è direttamente legata all'altezza e alla distribuzione delle irregolarità presenti sulla superficie dei singoli elementi con cui è schematizzato il campo di moto.

Al riguardo si osserva che abitualmente la superficie del dominio di calcolo è topograficamente caratterizzata attraverso la quota media degli elementi che lo compongono, trascurando, quindi, il ruolo delle irregolarità del terreno come conseguenza di questa operazione di media. Tale semplificazione è accettabile per tiranti d'acqua elevati rispetto alle irregolarità della superficie, ma

è certamente non veritiera per tiranti d'acqua modesti, a causa essenzialmente di una non corretta valutazione delle resistenze al moto e del volume d'acqua contenuto nell'elemento al generico istante di calcolo t .

Se si mantenesse la rappresentazione di superficie piana per ogni singolo elemento del reticolo di calcolo si avrebbe una istantanea transizione asciutto-bagnato, che comporta tutta una serie di problemi numerici ben noti in letteratura, che affliggono i classici schemi bidimensionali a griglia fissa.

Per rimuovere questi limiti, nello schema proposto si è ipotizzato che esista un intervallo di profondità all'interno del quale, durante l'evolversi della piena, si verificano condizioni variabili, comprese tra le due situazioni limite di elementi completamente asciutti e/o completamente bagnati.

L'idea che sta alla base dell'approccio proposto consente di tradurre concettualmente il transitorio asciutto-bagnato, facendo in modo che la capacità di invaso del singolo elemento (vale a dire la possibile estensione della superficie libera al variare della quota sul singolo elemento in rapporto alla superficie totale dell'elemento stesso) vari con continuità da un valore pressoché nullo, quando la quota idrometrica dell'elemento è inferiore alla quota minima delle irregolarità del terreno, al valore che compete all'intera estensione dell'elemento, quando la quota idrometrica è maggiore o uguale alla quota massima del terreno. Come indice dell'ampiezza delle irregolarità si introduce un parametro denominato a_r , pari alla differenza tra la quota della più alta asperità e la quota media \bar{h}_f , assunta come quota dell'elemento stesso (Figura 5.1).

Dal punto di vista matematico, per applicare una operazione di media alle equazioni del moto si può utilizzare la funzione di fase:

$$\varphi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & z > h_f \\ 0 & z \leq h_f \end{cases} \quad (5.5)$$

dove h_f è l'elevazione locale del fondo e $\mathbf{x} = (x, y, z)$ è il vettore delle coordinate spaziali.

Denotando con $\langle \rangle$ il processo di media di fase, ad una generica variabile del campo di moto $f(\mathbf{x}, t)$ corrisponde una $F(\mathbf{x}, t) = \langle \varphi(\mathbf{x})f(\mathbf{x}, t) \rangle$ mediata

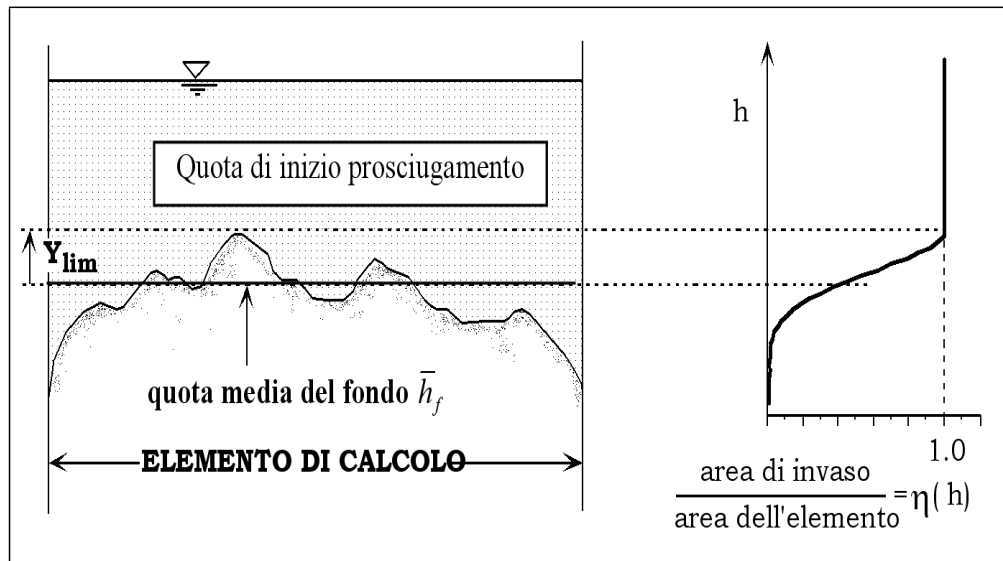


Fig. 5.1: Percentuale di area bagnata η in funzione della quota della superficie libera.

in fase con il seguente significato:

$$F(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{A} \int_A \varphi(\mathbf{x}) f(\mathbf{x}, t) dA \quad (5.6)$$

essendo A l'area dell'elemento di calcolo.

A questo punto, si definiscono le funzioni $\vartheta(\mathbf{x})$ e η :

$$\vartheta(\mathbf{x}) = \langle \varphi(\mathbf{x}) \rangle \quad (5.7)$$

$$\eta = \vartheta(x, y, h) \quad (5.8)$$

che rappresentano rispettivamente, la frazione di area A che giace sopra la superficie del terreno e la frazione bagnata di A , indicando con h la quota della superficie libera. Data la difficoltà che si incontra nella pratica nell'attribuire un valore al parametro a_r si è cercata, per esso, un'interpretazione diversa: la funzione $\vartheta(\mathbf{x})$ può essere considerata come la probabilità P che l'elevazione locale del fondo h_f all'interno di A non ecceda la generica elevazione z :

$$\vartheta(\mathbf{x}) = P(h_f \leq z) \quad (5.9)$$

In questo modo $\partial\vartheta(\mathbf{x})/\partial z$ è la funzione densità di probabilità dell'elevazione del fondo all'interno dell'area A e una possibile misura delle irregolarità del terreno è data dalla deviazione standard dell'elevazione del fondo in A :

$$a_r = 2\sigma_b \quad (5.10)$$

Assumendo che in prima approssimazione l'andamento delle asperità del terreno sia esprimibile con una gaussiana, in queste ipotesi è possibile ricavare un plausibile valore per il parametro a_r in assenza di stime specifiche.

È interessante notare che il significato della lunghezza caratteristica a_r può essere fortemente concettualizzato al punto da descrivere anche gli effetti di irregolarità molto profonde del terreno, tali da formare una vera e propria rete di canali minori, che contribuiscono in modo rilevante al convogliamento delle acque e ad incrementare la celerità di avanzamento di eventuali fronti di sommersione.

Studi specifici svolti al riguardo hanno dimostrato come, in alcuni casi, raddoppiare il valore di a_r porti anche a quintuplicare la celerità media di avanzamento del fronte e come, al contrario, tale celerità risulti fortemente ridotta nel caso di elementi caratterizzati da modeste asperità ($a_r = 0.01$ m), sui quali con rapidità si passa dalla condizione di superficie asciutta a quella di superficie bagnata.

Sulla base di queste sintetiche considerazioni è immediato comprendere come l'ipotesi di terreno sostanzialmente piatto, adottata dalla quasi totalità dei modelli bidimensionali proposti in letteratura, dia risultati inattendibili riguardo alla velocità di avanzamento dei fronti di allagamento, non appena le irregolarità del terreno assumano un ruolo di una certa importanza sul fenomeno. Di conseguenza, risultano non realistiche le stime fornite da questi schemi relativamente ai tempi caratteristici di avanzamento dell'onda di sommersione in un terreno inizialmente asciutto, soprattutto nelle prime fasi dell'allagamento.

Alla luce di quanto esposto, i termini η , Y e H che compaiono nelle equazioni (5.1)-(5.2) sono esprimibili come [Defina A.,2000 [16]]:

$$\eta = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{2D}{a_r} \right) \right] \quad (5.11)$$

$$Y = \int_{-\infty}^h \eta dz = a_r \left(\eta \frac{D}{a_r} + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} e^{-4(D/a_r)^2} \right) \quad (5.12)$$

$$H \cong Y + 0.27\sqrt{Y}a_re^{-2Y/a_r} \quad (5.13)$$

nelle quali $\operatorname{erf}()$ è la funzione errore e $D = h - z_f$ è una profondità media data dalla differenza tra la quota della superficie libera e quella del fondo.

5.1.2 Gli elementi monodimensionali

Elementi monodimensionali “canale”

La rete idrografica minore, oltre ad esercitare un ben definito ruolo nel drenaggio del territorio posto in adiacenza alla rete idrografica principale, rappresenta, nel caso di esondazione, una vera e propria via preferenziale per la propagazione dei fronti di allagamento, verso la quale le acque esondate tendono a confluire, accelerando sensibilmente la velocità di avanzamento dei fronti stessi.

La schematizzazione con elementi bidimensionali della rete idrografica minore presenterebbe non poche difficoltà, poiché da una parte porterebbe all'utilizzo di elementi di dimensioni così piccole da rendere assai onerosa la fase di costruzione del reticolo, dall'altra potrebbe generare l'insorgere di problemi di stabilità ed accuratezza della soluzione numerica, a meno che non si adottino passi di integrazione temporale particolarmente ridotti. Per questa ragione il modello consente l'impiego accoppiato di elementi bidimensionali ed unidimensionali, utilizzando questi ultimi per descrivere il funzionamento dei canali della rete minore che drena porzioni di territorio soggette a prosciugamento o per simulare piccole incisioni profonde in un dominio sostanzialmente bidimensionale come la rete minore di canali di una laguna a marea.

In particolare, nello schema adottato, gli elementi unidimensionali funzionano come canali “in pressione” a sezione costante, fino a quando le zone laterali che li fiancheggiano sono ricoperte dalle acque, e come canali a pelo libero quando il livello scende al di sotto della quota delle zone laterali.

In queste ipotesi una schematizzazione verosimile del campo di moto è quella illustrata nello schema A) di Figura 5.2, ove per semplicità si è supposta per il canale una sezione rettangolare. Una schematizzazione alternativa a questa e di più semplice implementazione è quella illustrata nello schema B) della stessa Figura 5.2. Qui il canale è egualmente considerato, conglobandone però la parte superiore negli adiacenti elementi bidimensionali (estesi fino al suo asse) ed introducendo, per tenere conto della parte inferiore, un elemento unidimensionale destinato a funzionare come un “canale in pressione” a sezione liquida costante nel caso in cui le superfici laterali siano inondate.

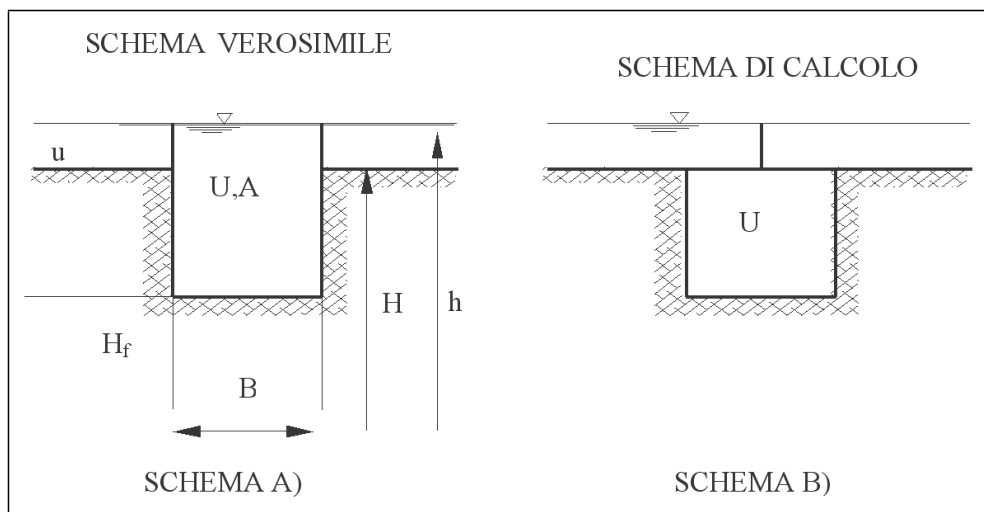


Fig. 5.2: Schema di calcolo dell'elemento monodimensionale “canale”.

Nello schema proposto, se gli elementi bidimensionali seguono in parte o in toto il contorno della rete di canali che li solcano, questi ultimi, descritti con elementi di tipo monodimensionale, possono essere introdotti o eliminati senza apportare modifiche alla struttura del reticolo di calcolo bidimensionale.

Le equazioni del modello, in questo caso, si semplificano ulteriormente: si assume innanzitutto che l'inerzia convettiva sia trascurabile (scompaiono nelle

equazioni di partenza i termini di accelerazione convettiva) e si considerano solo sezioni trasversali compatte per le quali sia possibile assumere velocità praticamente uniforme sulla sezione. Sotto queste ipotesi l'equazione del moto e l'equazione di continuità diventano:

$$\frac{\partial h}{\partial s} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q|Q|}{k_S^2 R_H^{4/3} A^2} = 0 \quad (5.14)$$

$$\eta(h) \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (5.15)$$

dove s è l'ascissa curvilinea che descrive planimetricamente l'andamento dell'asse del canale, A è l'area della sezione trasversale, Q è la portata che transita attraverso la sezione del canale, R_H è il raggio idraulico.

Il modello si fonda sulla coesistenza di elementi bidimensionali ed unidimensionali che, in alcune zone, possono entrare in sovrapposizione; per tale motivo nello scrivere il bilancio di massa per ciascun nodo è necessario considerare che parte della portata che fluisce lungo gli elementi unidimensionali è già stata considerata nel calcolo degli elementi bidimensionali (Figura 5.2).

In particolare la frazione di portata ΔQ coinvolta può essere espressa dalla seguente relazione:

$$\Delta Q = B [Y_L (v_L \cdot s) + Y_R (v_R \cdot s)] / 2 \quad (5.16)$$

nella quale B è la larghezza del canale in superficie, v è il vettore velocità relativo agli elementi bidimensionali adiacenti, Y è il volume d'acqua per unità di superficie, s è il versore che individua la direzione dell'asse del canale e i pedici L ed R individuano, rispettivamente, gli elementi bidimensionali a sinistra e a destra del canale.

La portata che deve essere considerata nel bilancio di massa nodale è pertanto la frazione $Q_a = Q - \Delta Q$ e l'equazione di continuità assume la seguente espressione:

$$\left(1 - \frac{\eta_L + \eta_R}{2}\right) B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q_a}{\partial s} = 0 \quad (5.17)$$

in cui η rappresenta la frazione bagnata del generico elemento bidimensionale adiacente.

Si noti come se $\eta_L = \eta_R = 0$ (cioè gli elementi bidimensionali adiacenti sono asciutti o assenti) la portata Q_a è proprio uguale a Q e l'equazione di continuità assume la sua forma consueta.

Se invece η_L e η_R sono prossimi ad uno, viene di fatto inibito l'effetto di invaso, che resta confinato alla parte bidimensionale sovrastante. In questo caso dovrebbe comparire nell'equazione di continuità un termine addizionale che descrive il flusso che dal canale entra (o esce) nella parte bidimensionale sovrastante. Analogamente lo stesso flusso dovrebbe essere sottratto agli elementi bidimensionali adiacenti. Con riferimento alla soluzione numerica, che prevede di fatto bilanci di massa nodali, questi contributi, uguali ed opposti, si elidono. Per questo motivo non vengono qui esplicitamente considerati.

Elementi monodimensionali “speciali”

Per il territorio adiacente alla rete idrografica principale non meno importante dei canali minori è il ruolo che assumono, nella propagazione, i rilevati (stradali, ferroviari o di altra natura), gli argini e le strutture di regolazione di diverso tipo presenti sul territorio stesso. Nella fase iniziale dell'allagamento gli argini e i rilevati fungono, infatti, da barriere di contenimento, ritardando l'espansione delle acque sul terreno circostante. Una volta sormontati essi funzionano, invece, come delle vere e proprie soglie e, non infrequentemente, possono cedere creando delle brecce attraverso le quali le acque possono più facilmente e in quantità rilevante lasciare gli alvei principali per alimentare ulteriormente l'onda di sommersione.

Per simulare con buona approssimazione la presenza di elementi morfologici particolari (quali argini, rilevati stradali o manufatti che possono modificare apprezzabilmente l'evoluzione del fenomeno) il modello uni-bidimensionale descritto nei paragrafi precedenti prevede l'inserimento di una serie di elementi unidimensionali (tronchi) speciali, che consentono di descrivere correttamente

i fenomeni locali e anche le conseguenze di una manovra di regolazione o di un eventuale cedimento del sistema delle numerose opere di difesa presenti.

Mediante l'inserimento di tali elementi è così possibile simulare, in particolare, il funzionamento delle arginature, che non potrebbero diversamente essere descritte correttamente utilizzando soli elementi bidimensionali, a meno di non appesantire considerevolmente gli oneri di calcolo. I rilevati arginali sono perciò schematizzati come soglie sfioranti, per le quali è sufficiente assegnare le caratteristiche geometriche e il valore del coefficiente di portata perché il modello determini, al variare delle quote idrometriche, l'andamento della portata che eventualmente tracima la soglia, considerando condizioni sia di efflusso libero sia di efflusso rigurgitato. Utilizzando queste strutture è egualmente possibile simulare gli effetti di un eventuale cedimento, che apra sul corpo arginale o sul rilevato stradale una breccia, che si va progressivamente ampliando per l'azione erosiva della corrente effluente.

Altri tronchi speciali inseriti nello schema di calcolo consentono di simulare il funzionamento di soglie o salti di fondo, di brevi tratti di canale in pressione, come sottopassi o botti a sifone; altri elementi ancora permettono di simulare il funzionamento di paratoie, che possono operare automaticamente comandate dai livelli o dalla direzione del flusso (porte vinciane). Sempre mediante questi elementi speciali è possibile, infine, simulare il funzionamento degli impianti idrovori presenti all'interno del dominio di calcolo. Ciò consente di semplificare notevolmente la fase di assegnazione delle condizioni al contorno del problema, poiché tali dispositivi, che sono trattati dal modello come condizioni al contorno interne, si attivano automaticamente nel corso della simulazione quando i livelli idrometrici locali superano le quote di attacco previste per le pompe; si disattivano quando gli stessi livelli scendono al di sotto delle quote di stacco.

Lo schema implementato permette, infine, di tener conto, volendo, delle portate dovute agli apporti meteorici diretti al suolo, introducendo il relativo idrogramma di piena in corrispondenza ai nodi del reticolo di calcolo deputati

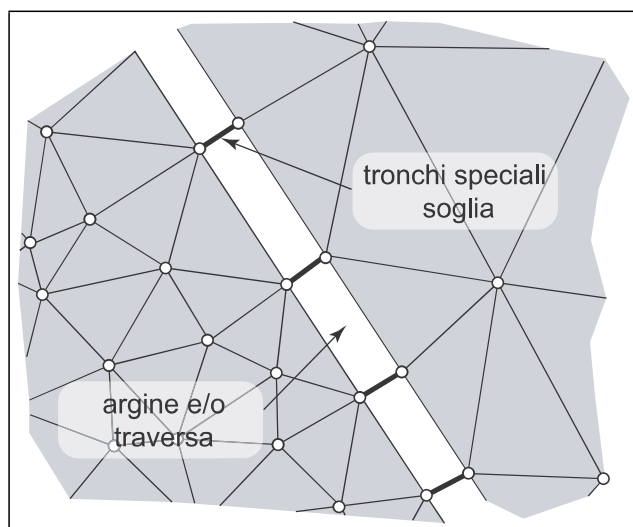


Fig. 5.3: Schema di inserimento dei tronchi speciali soglia.

a tal fine.

I valori dei parametri che caratterizzano tutti i dispositivi considerati devono essere inseriti nel file dei dati associato a ciascuna simulazione. Gli stessi parametri possono, peraltro, essere fatti variare durante la sessione di calcolo, in modo tale da rendere possibile la simulazione interattiva di situazioni particolari che possono verificarsi nel corso dell'evento simulato, quali i già ricordati eventuali cedimenti di corpi arginali, l'interruzione del funzionamento di impianti idrovori o altro.

Tronchi speciali soglia

I tronchi speciali soglia consentono di schematizzare mediante degli elementi monodimensionali il funzionamento di un argine e/o di una traversa.

In particolare ogni tronco speciale connette tra loro due nodi del reticolo bidimensionale (Figura 5.3) e la portata che sfiora al di sopra del tronco è determinata dalle quote idrometriche dei nodi situati a monte e a valle del tronco stesso. Questi elementi speciali possono, pertanto, congiungere o disgiungere le due parti del dominio, a seconda che al di sopra della soglia si instaurino condizioni di flusso nullo, libero o rigurgitato (Figura 5.4).

Il tronco speciale soglia è caratterizzato alle sue estremità da due nodi,

n_1 e n_2 . Nell'ipotesi in cui l'efflusso avvenga dal nodo n_1 verso il nodo n_2 , per continuità la portata uscente dal nodo n_1 deve essere uguale alla portata entrante nel nodo n_2 ($Q_1 = -Q_2$).

Supponendo di trascurare i carichi cinetici, l'energia specifica a monte e a valle della soglia può essere determinata considerando solamente il carico gravitazionale h . In questo caso la portata che sfiora al di sopra della soglia dipende solamente dal coefficiente di portata C_q della soglia stessa e dalla larghezza B dello sfioro.

L'efflusso al di sopra della soglia può essere libero oppure rigurgitato (Figura 5.4). Affinchè l'efflusso sia libero il livello liquido a valle deve essere inferiore alla quota di sfioro del tronco speciale incrementata di $2/3$ del valore del carico idraulico istantaneo. Nel caso contrario l'efflusso risulta rigurgitato.

Nel caso di efflusso libero (Figura 5.4a), la portata specifica sfiorata è espressa dalla relazione:

$$q_L = C_{qL} B \sqrt{2g} \Delta h^{3/2} \quad (5.18)$$

mentre nel caso di efflusso rigurgitato (Figura 5.4b) la portata specifica si può esprimere come:

$$q_R = C_{qR} B \sqrt{2g} \Delta h \left[\max(\Delta h_R, 0) + \frac{2}{3} \Delta h \right] \quad (5.19)$$

nelle quali q_L e q_R rappresentano la portata per unità di larghezza e C_{qL} e C_{qR} sono i coefficienti di portata della soglia nel caso, rispettivamente, di efflusso libero e rigurgitato.

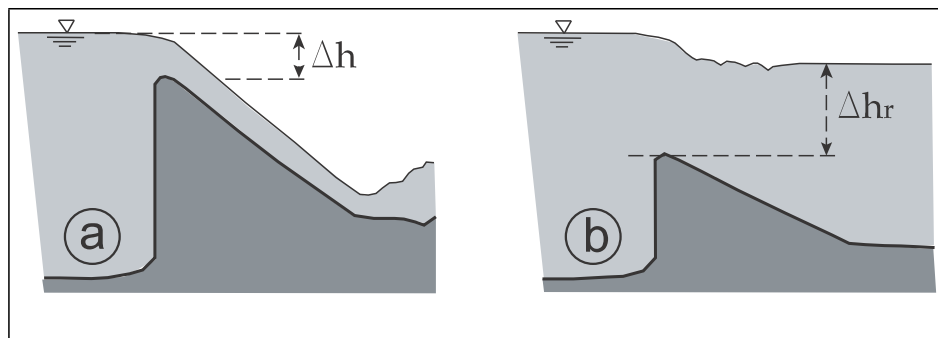


Fig. 5.4: Efflusso al di sopra di una soglia: (a) libero e (b) rigurgitato.

Agli elementi speciali soglia, infine, può essere associato un valore della quota di sfioro h_{tr} costante nel tempo oppure variabile. In questo modo il modello consente di simulare la formazione di eventuali brecce in corrispondenza degli argini, una volta associata al tronco speciale una tabella che descrive l'andamento di h_{tr} nel tempo.

Tronchi speciali idrovora

Un impianto idrovoro altro non è che una stazione di sollevamento il cui scopo è quello di riprendere le acque raccolte in bacini la cui quota media è sensibilmente inferiore alla quota idrometrica del corpo idrico ricettore ed introdurvele. Il modello, in particolare, prevede la possibilità di inserire nel dominio di calcolo appositi “tronchi speciali idrovora”, che permettono di descrivere in maniera estremamente verosimile il funzionamento di questi dispositivi.

In particolare l'elemento speciale idrovora collega due nodi del dominio, appartenenti indifferentemente alla parte bidimensionale o a quella unidimensionale del reticolo di calcolo. Il tronco è quindi caratterizzato da un nodo di monte n_1 e da un nodo di valle n_2 e il sollevamento avviene dal nodo n_1 verso il nodo n_2 . Ad ogni tronco speciale idrovora corrispondono un numero di pompe equivalente a quello dell'impianto di sollevamento che si vuole simulare e, ad ogni pompa, sono associati la portata sollevabile Q_p , la sua quota di attacco h_a e la sua quota di stacco h_s . In pratica, il funzionamento della pompa è simulato sottraendo la portata Q_p al nodo di monte n_1 , la quale viene poi fornita al nodo di valle n_2 .

Tali dati costituiranno delle condizioni al contorno interne, direttamente legate ai livelli idrometrici dei nodi collegati tramite l'idrovora, la quale entrerà in funzione automaticamente non appena la soluzione, ad un dato istante, produrrà, per il nodo di monte collegato all'idrovora, un livello superiore a quello di attacco della prima pompa.

Il funzionamento di attacco-stacco delle pompe è stabilito dal modello sulla base delle seguenti condizioni:

- se la pompa è a riposo, il livello h del nodo di monte viene confrontato con la quota di attacco h_a della pompa; se $h < h_a$ la pompa viene mantenuta a riposo, altrimenti comincia a funzionare con le modalità descritte.
- se la pompa è in funzione, il livello h del nodo di monte viene confrontato con la quota di stacco h_s della pompa; se $h < h_s$ la pompa viene arrestata, altrimenti continua a funzionare con le modalità descritte.

È inoltre prevista la possibilità di introdurre o di emungere semplicemente della portata da un nodo non recapitandola ad alcun altro nodo della griglia, circostanza che si verifica quando un'idrovora scarica direttamente le sue portate all'esterno del dominio di calcolo in un corpo idrico. È sufficiente, a tal fine, attribuire al nodo di valle un numero convenzionale superiore al numero di nodi della mesh.

5.1.3 Il modello di formazione e di evoluzione della breccia

Negli ultimi 50 anni sono stati sviluppati molti modelli in grado di simulare i processi di formazione ed evoluzione di breccie. Tali modelli possono essere divisi in due classi principali: *i*) modelli parametrici, statisticamente basati, per la stima delle caratteristiche finali della breccia e della portata massima, e *ii*) modelli fisicamente basati che cercano di descrivere il processo su basi fisiche pur adottando ipotesi semplificative e schematizzazioni della geometria e della sua evoluzione. I modelli di quest'ultima classe si basano su formule di trasporto solido e la loro maggiore o minore complessità dipende dalle ipotesi semplificative assunte e dalla schematizzazione delle varie fasi dell'intero processo di formazione e di evoluzione della breccia.

Una ulteriore classificazione può essere operata in funzione dei meccanismi che conducono al collasso del rilevato arginale: *i*) sormonto della sommità

arginale che comporta l'erosione dell'argine a partire dal paramento esterno del rilevato; *ii*) sifonamento dovuto alla filtrazione che determina la rimozione della frazione fine del materiale lungo vie preferenziali; *iii*) cedimenti strutturali o del piano di fondazione.

Nel caso di argini fluviali, i meccanismi più frequenti che portano alla formazione di rotte sono l'erosione associata al sormonto e quella interna dovuta al sifonamento [ASCE/EWRI, 2011 [3]].

Il processo di sifonamento può dare origine ad un vero e proprio condotto che continua ad allargarsi fino al crollo della sommità del rilevato a partire dal quale l'evoluzione della breccia segue gli stessi meccanismi caratteristici del sormonto. In alternativa, quando il processo è caratterizzato dalla rimozione diffusa delle particelle più fini, si può determinare la subsidenza della sommità del rilevato arginale fino a innescare fenomeni di sormonto.

Nel modello di formazione ed evoluzione della breccia è prevista sia la descrizione della formazione e dell'evoluzione di una breccia per sormonto, sia il caso di sifonamento con la formazione di un condotto che si allarga per effetto dell'erosione fino, eventualmente, al crollo della sommità arginale. In quest'ultimo caso il modello descrive i fenomeni di erosione successivi al crollo seguendo lo schema sviluppato per l'evoluzione di una breccia per sormonto.

Per quanto riguarda l'intero processo di formazione e di evoluzione di una breccia per sormonto arginale, si è scelto di utilizzare un approccio analogo a quello suggerito da [Visser, 1998 [29]], che consente di considerare agevolmente la maggior parte delle modalità di evoluzione della breccia stessa.

Nel modello proposto il processo di erosione si sviluppa, a partire da una piccola incisione trapezoidale dell'argine la cui larghezza di base è B_0 , in una serie di fasi successive rappresentate schematicamente in Figura 5.5.

Nella prima fase si assiste ad un eventuale incremento della pendenza del paramento di valle dall'angolo β_0 iniziale ad un angolo β_1 di equilibrio dinamico Figura 5.5 *a*. Successivamente il processo erosivo, che continua ad interessare il solo paramento di valle, mentre restano invariate la quota di sfioro e la lar-

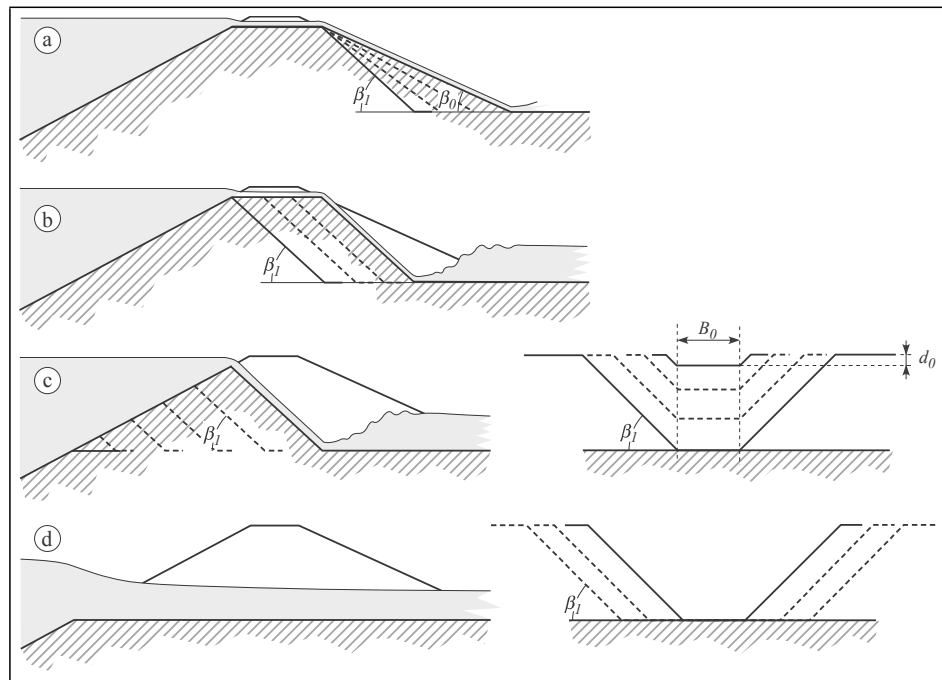


Fig. 5.5: Le diverse fasi di evoluzione della breccia per sormonto arginale da: [Viero D.P. et al., 2013].

ghezza della breccia, prosegue parallelamente a se stesso fino ad interessare il paramento di monte Figura 5.5 b. Durante queste due fasi il modello assume, per semplicità, che la corrente lungo il paramento di valle sia uniforme e in condizioni supercritiche. L'arretramento del paramento di valle prosegue nella fase successiva determinando al contempo un abbassamento della quota di sormonto (Figura 5.5 c, a sinistra) e un aumento della larghezza media della breccia che vede invariata la larghezza di base iniziale B_0 (Figura 5.5 c, a destra). In questa fase, come in quelle successive, il moto che si stabilisce lungo il paramento di valle può essere influenzato dalle condizioni idrometriche distinguendo, per semplicità, il caso in cui il livello di valle è sufficientemente basso da determinare il passaggio attraverso le condizioni critiche sulla soglia di sormonto, dal caso in cui il deflusso sia rigurgitato. Una volta rimosso il corpo arginale sopraelevato sul piano campagna, il processo erosivo prosegue determinando un progressivo allargamento della breccia (Figura 5.5 d).

Nel modello, l'intensità del processo erosivo è stimata mediante la formula di Bagnold-Visser durante le prime 3 fasi e mediante la formula di Van Rijn

nelle fasi successive. Con riferimento all'innescò del processo di erosione, il modello considera anche l'eventuale presenza di manti erbosi a protezione del paramento esterno dell'argine.

Seguendo l'approccio proposto da [Fread, 1988 [19]], si assume che l'erosione abbia inizio non appena la velocità della corrente ecceda quella massima ammissibile dipendente dalle caratteristiche del manto erboso [Chow, 1959 [8]]. Il modello prevede inoltre la possibilità di simulare la ripresa della rotta attraverso una riduzione lineare nel tempo della larghezza della breccia una volta che siano stati definiti dall'operatore l'istante iniziale e finale delle operazioni di ripristino del tratto arginale ceduto. Quest'ultima funzione permette di valutare i benefici che possono derivare dalla maggiore o minore tempestività con cui si interviene durante il corso dell'evento di piena.

Con riferimento ai processi di cedimento arginale per sifonamento, alcuni modelli di letteratura considerano inizialmente il flusso lungo un condotto di sezione rettangolare, con portata valutata mediante le leggi valide per il moto in pressione, mentre l'allargamento prodotto dall'erosione delle pareti è stimato mediante l'impiego di formule per il trasporto solido.

Il modello utilizza l'approccio suggerito da [Bonelli et al., 2008 [6]], relativo al processo di allargamento di un condotto di sezione circolare, inizialmente di piccolo diametro. Nel modello si assume che la velocità di erosione sia modesta e tale da consentire di trascurare l'influenza della concentrazione del sedimento in sospensione sia sugli sforzi tangenziali che sull'inerzia. Si assume inoltre che il condotto mantenga una sezione costante per tutta la sua lunghezza. La variazione di densità del fluido determinata dalla presenza di forti concentrazioni di solidi sospesi produce effetti significativi solo nei primissimi istanti del processo, causando un modesto allargamento del condotto verso la sezione di uscita [Lachouette et al., 2008 [22]].

La velocità di erosione $\frac{\partial R}{\partial t}$, in cui R è il raggio del condotto, viene stimata

nel modello mediante la formula di Partheniades per materiali coesivi:

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \begin{cases} \frac{k_{er}}{\rho_s} (\tau - \tau_c) & \tau > \tau_c \\ 0 & \tau \leq \tau_c \end{cases} \quad (5.20)$$

in cui k_{er} è il coefficiente di erosione, ρ_s è la densità del terreno, τ è lo sforzo tangenziale lungo la parete del condotto e τ_c è il corrispondente valore di soglia per l'inizio del processo erosivo. Lo sforzo tangenziale è stimato mediante la relazione $\tau = \gamma (R/2) J$, dove γ è il peso specifico dell'acqua e $J = (H_{in} - H_{out})/L$ è la pendenza della linea dell'energia calcolata ad ogni passo temporale in funzione del livello all'interno (H_{in}) e di quello esterno (H_{out}) all'alveo, entrambi forniti dal modulo idrodinamico, e della lunghezza del condotto L . Introducendo il fattore temporale $t_{er} = 2\rho_s / (\gamma k_{er} J)$, l'equazione differenziale che descrive il processo di erosione diviene:

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \begin{cases} R \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau}\right) \frac{1}{t_{er}} & \tau > \tau_c \\ 0 & \tau \leq \tau_c \end{cases} \quad (5.21)$$

Nel modello numerico, l'eq. 5.21 è discretizzata nel tempo alle differenze finite. Il processo di allargamento della sezione del condotto ha termine quando si verifica il crollo del cielo del condotto stesso. Nel modello proposto si assume che l'eventuale transizione dal processo di sifonamento a quello di tracimazione, determinata dal crollo per instabilità del terreno al di sopra del condotto, avvenga quando il diametro del condotto supera un valore soglia, generalmente compreso tra 0.5 e 0.75 volte l'altezza del corpo arginale. In questo caso, inoltre, si suppone che il materiale crollato venga rimosso istantaneamente dalla corrente e che la sezione della breccia assuma una forma trapezoidale, con sponde inclinate di un angolo β_1 rispetto all'orizzontale e larghezza al fondo data da:

$$B_0 = 2R_{max} \left(\frac{1}{\cos \beta_1} - \frac{1}{\tan \beta_1} \right) \quad (5.22)$$

A partire dall'istante del crollo, il processo di erosione prosegue in accordo con quanto già descritto per il caso di breccia prodotta da sormonto.

5.1.4 Condizioni al contorno

Affinché la soluzione del problema di Cauchy sia unica, è necessario fornire le condizioni iniziali e le condizioni al contorno. Un problema idrodinamico relativo alla propagazione di onde di piena in regime di moto lento richiede l'imposizione a monte di un idrogramma delle portate e a valle l'andamento dei livelli o di una scala delle portate. Nelle simulazioni della propagazione delle onde di piena, la procedura da seguire è quella di fornire una condizione iniziale possibilmente equilibrata, quale può essere, ad esempio, quella rappresentata dal moto stazionario determinato da un valore relativamente piccolo di portata fluente nelle diverse sezioni di ingresso e da un prefissato livello o scala delle portate nella sezione di valle. Tale condizione di moto permanente viene raggiunta imponendo delle condizioni al contorno costanti nel tempo.

La procedura di portare a moto permanente un corso d'acqua su fondo completamente asciutto rappresenta la fase più delicata dal punto di vista numerico: essendo il dominio inizialmente asciutto è necessario adottare un passo di integrazione temporale Δt molto più piccolo di quello che sarà poi utilizzato nella simulazione della propagazione dell'onda di piena.

Un espediente è quello di far propagare sull'asciutto una portata più piccola di quella permanente e quindi, una volta che l'alveo si è "bagnato", incrementare progressivamente la portata fino al valore desiderato, lasciando che il sistema si porti a regime.

5.2 Incidenze



Il software Incidenze consente la visualizzazione e l'elaborazione dei dati e dei risultati relativi alle simulazioni effettuate con il modello matematico uni-bidimensionale ad elementi finiti 2DEF sviluppato dai Proff. A. Defina e L. D'Alpaos del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova.

Incidenze è costruito in forma di software interattivo a finestre e fornisce gli strumenti per la generazione, la visualizzazione e la modifica del reticolo di calcolo del modello matematico (file .GEO) e del file delle condizioni al contorno delle simulazioni (file .SIM). Esso consente inoltre di visualizzare ed elaborare i risultati delle simulazioni (file .OUT), mediante rappresentazione grafica dei parametri di output forniti dal modello, quali livelli, tiranti, portate, velocità, sforzi al fondo, ecc..

Le rappresentazioni grafiche possibili includono diagrammi con andamento temporale dei parametri, profili longitudinali, mappe a colori e sequenze animate.

I file di tipo .GEO contengono i dati geometrici del reticolo di calcolo, i files di tipo .SIM, contengono le condizioni al contorno per le simulazioni, e i file di tipo .CNT, contengono i poligoni di appoggio (contorni) utili per la costruzione della mesh. I file .GEO, .CNT e .SIM possono essere modificati direttamente all'interno di Incidenze, anche se, essendo essi file di tipo testuale, possono essere modificati anche esternamente utilizzando un normale editore di testi.

I file con i quali si lavora maggiormente sono: quelli di tipo .cnt, contenenti i poligoni di appoggio (contorni) base per la costruzione del reticolo di calcolo; quelli di triangolazione .tin; quelli di tipo .geo, contenenti i dati geometrici del reticolo di calcolo; infine quelli di tipo .sim contenenti le condizioni al contorno per le simulazioni.

- **File dei contorni (.CNT)**

È un file vettoriale costituito da poligoni, i cui vertici volendo possono essere caratterizzati da una coordinata “z”. Tali poligoni rappresentano i contorni primitivi del reticolo di calcolo sui quali verrà effettuata la triangolazione automatica che darà origine al file .tin. Inoltre essi possono servire a delimitare aree di sottomesh o per tracciare sezioni o profili lungo i quali estrarre i dati delle simulazioni.

- **File della geometria (.GEO)**

In questo file sono contenute le coordinate dei nodi del reticolo e le connessioni nodali delle maglie, dei canali e dei tronchi speciali. Inoltre esso racchiude tutte le proprietà di ciascuno di questi elementi appena citati.

- **File della simulazione (.SIM)**

In questo file sono elencati i dati generali della simulazione (durata della simulazione, passo temporale di calcolo, porosità, ecc.) e le condizioni al contorno, date sostanzialmente dagli idrogrammi in ingresso a monte e dalla scala delle portate a valle. In pratica si tratta da una parte di ripartire la portata entrante tra i nodi che compongono le sezioni di monte, dall'altra di assegnare i livelli o la scala delle portate ai nodi di valle, estrapolando i parametri richiesti Q_0 , h_0 e α .

È possibile importare mappe raster georeferenziate, che possono essere visualizzate come sfondo per le elaborazioni. Incidenze consente di caricare esclusivamente file raster in formato .ECW.

5.3 Reticolo di calcolo e condizioni al contorno per la piena del 2010

Per simulare la propagazione dell'onda di piena del novembre 2010 nel Bacchiglione a valle di Padova e gli scenari di allagamento conseguenti all'apertura di ipotetiche brecce nei corpi arginali del fiume stesso, è stato utilizzato un reticolo di calcolo 2D composto da 19914 maglie, 4 maglie speciali, 13186 nodi, 1436 canali e 2187 tronchi speciali.

Le quote del terreno sono state attribuite agli elementi di calcolo sulla base dei rilievi LiDAR effettuati dal Ministero dell'Ambiente e sulla base delle quote riportate nella Carta Tecnica Regionale in formato numerico.

La batimetria dei principali corsi d'acqua (Bacchiglione, Cagnola) è stata ottenuta a partire da sezioni trasversali e rilievi multibeam del fondo messi a disposizione dalla competente Autorità di Bacino. I valori di scabrezza, riportati in Tabella 5.1, e distribuiti graficamente in Figura 5.7, sono stati tarati in studi precedenti, nei quali i livelli misurati sono stati confrontati con dati misurati.

Tab. 5.1: *Principali coefficienti di scabrezza utilizzati nella geometria del modello di calcolo.*

Tipologia di suolo	K_s [$m^{1/3}/s$]
Zona con fabbricati	16
Strade asfaltate	20
Canali con manutenzione annua	30 - 25
Alveo fluviale in suolo di tessitura granulare media	25 - 30
Alveo fluviale in suolo di tessitura granulare grossolana	35
Golene	15 - 25

Con riferimento alle condizioni al contorno, sono stati imposti i livelli idrometrici misurati a monte del manufatto di Voltabarozzo e, alle quattro paratoie che compongono il manufatto regolatore, sono stati assegnati con risoluzione temporale di 30 minuti i valori di apertura forniti dal Genio Civile di Padova.

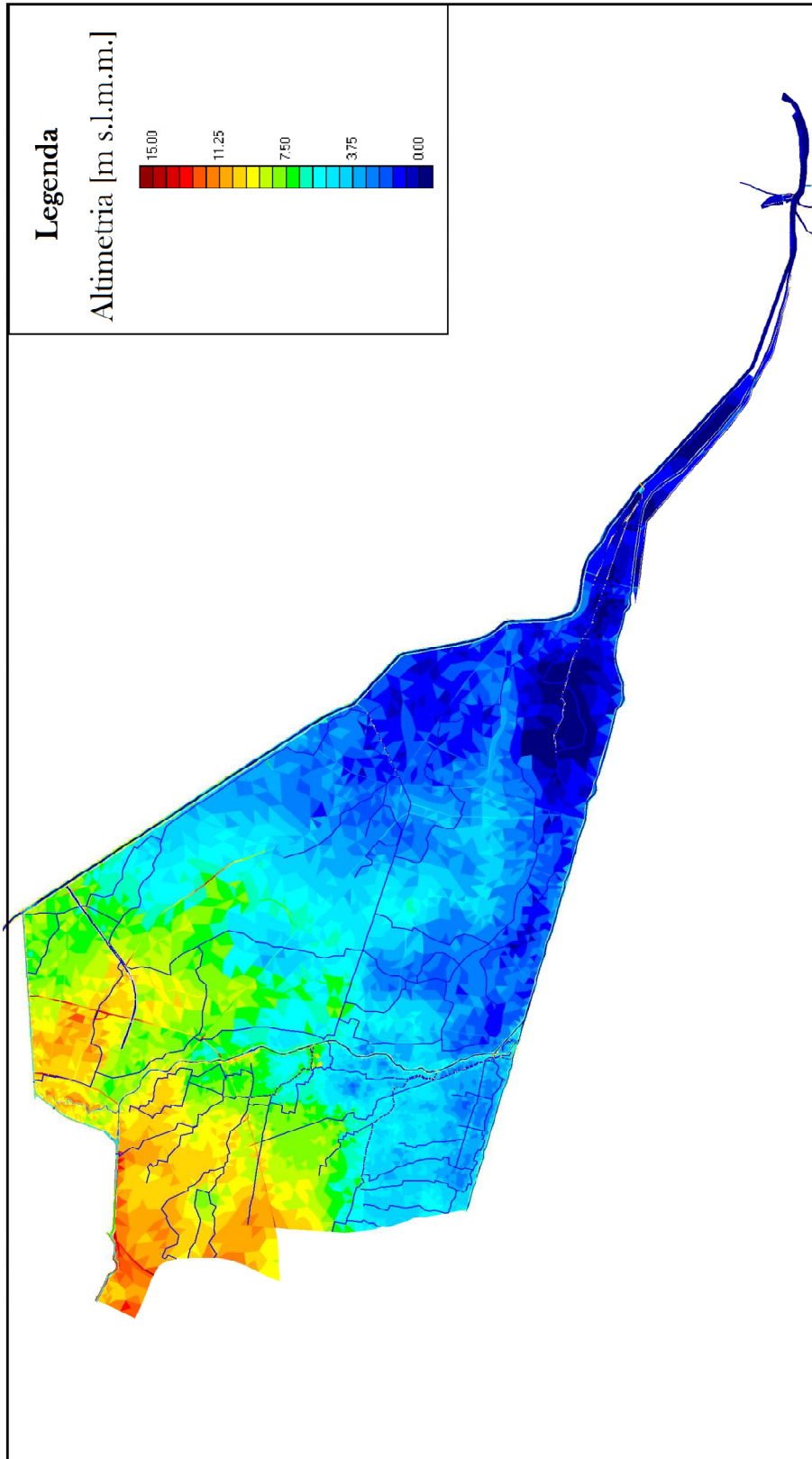


Fig. 5.6: Rappresentazione a scala di colori dell'altimetria del territorio schematizzato nel modello matematico del tratto del Fiume Bacchiglione compreso tra il manufatto di Voltabarozzo e Bovolenta.

La portata che transita nel Bacchiglione a valle del manufatto regolatore di Voltabarozzo è calcolata automaticamente dal modello in funzione dei livelli imposti a monte, dell'apertura delle singole paratoie e, nel caso di efflusso rigurgitato, anche dal livello che si instaura appena a valle delle paratoie stesse. Nei nodi del reticolo di calcolo che rappresentano la foce dei fiumi è stato imposto un livello costante pari al medio mare. La condizione di valle non influisce comunque sui risultati delle simulazioni nella zona di interesse. Le condizioni al contorno sono rimaste le stesse per tutti gli scenari simulati.

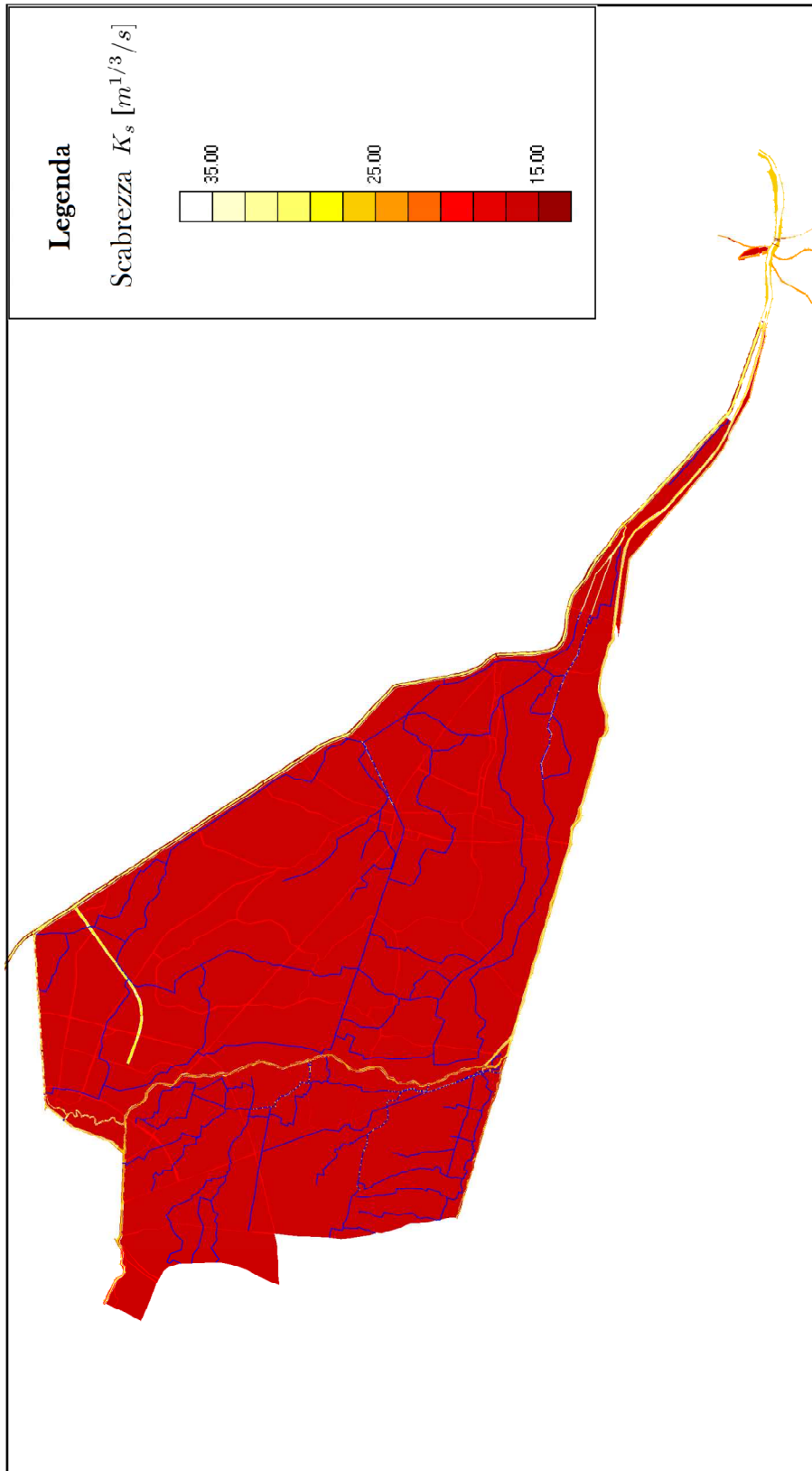


Fig. 5.7: Rappresentazione a scala di colori della distribuzione dei coefficienti di scabrezza secondo Strickler (K_s) assunta nel modello matematico che simula il tratto del Fiume Bacchiglione compreso tra il manufatto di Voltabarozzo e Bovolenta.

5.4 Metodi geofisici

Nell'Ottobre 2014 è stato effettuato uno studio geofisico da ricercatori dell'OGS (Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale) di Trieste al fine di verificare la consistenza dei rilevati arginali nel territorio della Regione Veneto per il Fiume Bacchiglione nel tratto tra Vicenza e Bovolenta (PD). Le indagini geofisiche condotte dall'OGS hanno permesso di evidenziare la presenza di alcune zone critiche nei tratti arginali compresi tra Voltabarozzo e Bovolenta.

Nell'ambito di questa tesi, per alcune delle zone critiche individuate dall'OGS, si è deciso di condurre analisi approfondite per verificare se i metodi geofisici nel seguito descritti forniscono risultati in accordo con quelli forniti dallo studio dell'OGS. La relazione conclusiva è stata gentilmente concessa dall'Ufficio del Genio Civile di Padova allo scrivente con l'obiettivo di approfondire i risultati ottenuti per le finalità di questa tesi. Gli esiti riguardanti il Canale Roncayette hanno permesso di focalizzare l'attenzione su zone specifiche dell'area di studio ed in particolare su tratti di argine che hanno presentato delle anomalie di resistività, come descritto nel sopracitato documento. Si tratta di zone in cui la componente granulare nel corpo arginale o al di sotto della corona dell'argine è così significativa da poter innescare fenomeni di filtrazione nei periodi di piena. Queste anomalie di resistività non sono direttamente correlabili ad una criticità idraulica, ma necessitano comunque di approfondimenti conoscitivi.

5.4.1 Metodo geoelettrico

Il metodo consiste nel trasmettere una corrente elettrica nel mezzo attraverso una coppia di elettrodi di corrente per determinare la distribuzione risultante di potenziale elettrico indotto tramite una coppia di elettrodi di potenziale. Questi ultimi sono collegati a un voltmetro in grado di misurare la differenza di potenziale. L'insieme dei quattro elettrodi nel sondaggio viene chiamato quadripolo, si veda Figura 5.8 [Corrao et al., 2009 [9]].

Le zone del suolo disomogenee hanno una differente capacità di conduzione elettrica e vengono messe in risalto poiché il mezzo deflette le linee di corrente e distorce pertanto la normale distribuzione del campo elettrico. Quindi, determinando la differenza di potenziale su due punti è possibile misurare la resistività elettrica apparente del terreno.

Principi fisici

La quantità di corrente elettrica che passa per un determinato punto nell'unità di tempo è detta intensità di corrente e si misura in Ampere. Ciò che invece determina il flusso di corrente è la differenza di potenziale ai capi del conduttore elettrico che possiede una certa resistenza.

La legge che definisce la relazione tra la differenza di potenziale, l'intensità di corrente e la resistenza è la *Legge di Ohm*:

$$\Delta V = IR \quad (5.23)$$

Tenendo conto delle geometrie di un mezzo si introduce la resistività (ρ), cioè l'attitudine di un materiale ad opporre resistenza al passaggio della corrente elettrica.

La seconda *Legge di Ohm* dimostra che la resistenza di un conduttore è direttamente proporzionale alla sua lunghezza L e inversamente proporzionale alla sua sezione S .

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S} \quad (5.24)$$

I materiali geologici presentano proprietà elettriche differenti in funzione del contenuto d'acqua, della quantità di ioni disciolti e dei minerali argillosi che costituiscono il mezzo. La resistività, nei mezzi anisotropi, assume valori differenti a seconda della direzione di misurazione.

5.4.2 Tomografia elettrica di resistività

La ERT (Electrical Resistance Tomography) è una tecnica geofisica di imaging che usa un numero di elettrodi in foro e/o sulla superficie per ricavare

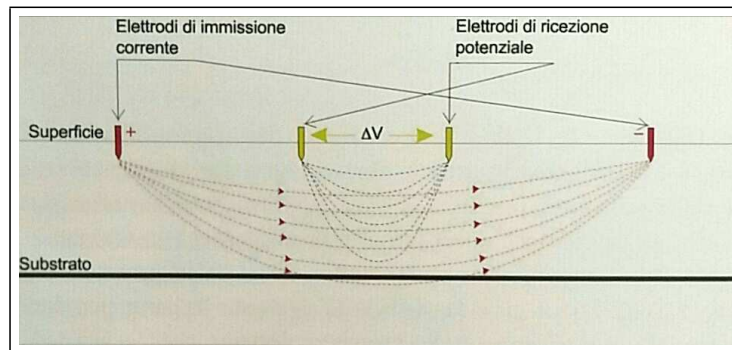


Fig. 5.8: Quadripolo ERT.

una immagine della distribuzione di resistività in una regione del sottosuolo. L'algoritmo inverso trova iterativamente la soluzione per i parametri che meglio si adattano ai dati osservati con il metodo dei minimi quadrati [Prem V.Sharma, 1997 [26]].

Questa tecnica misura la differenza di potenziale in corrispondenza di due elettrodi, dovuta all'immissione di corrente continua nel terreno in corrispondenza di un'altra coppia di elettrodi.

L'esecuzione del profilo tomografico prevede lo stendimento di una serie di picchetti metallici, che vengono utilizzati sia come elettrodi di corrente che di potenziale. Attraverso i primi (chiamati A e B) si immette nel terreno una corrente continua I, per poi rilevare la differenza di potenziale V che si instaura tra gli altri due elettrodi (chiamati M e N), posti simmetricamente al centro dell'allineamento tra i primi due.

Una volta conosciuti I e V si calcola la resistività elettrica apparente, relativa alla configurazione elettrodica utilizzata; spostando lateralmente il dispositivo elettrodico si rilevano le variazioni orizzontali della resistività, mentre con il progressivo allargamento della distanza tra le due coppie di elettrodi si esplorano gli strati più profondi. I risultati sono Pseudosezioni (o pseudovolumi) di resistività apparente.

5.4.3 Metodo elettromagnetico induttivo nel dominio della frequenza

I metodi geofisici elettrici ed elettromagnetici sono largamente impiegati nello studio della variazione spaziale e temporale del contenuto d'acqua sotto la superficie e le relative relazioni con l'atmosfera, le piante e gli acquiferi sotterranei.

Il FDEM (Frequency Domain Electro-Magnetic Induction Method) era considerato principalmente uno strumento che dà una rapida stima della conduttività media. Oggi, invece, può essere usato in modo efficiente per una caratterizzazione quantitativa 3D della variazione spaziale e temporale del suolo. Questo è possibile grazie al miglioramento della strumentazione con multi-bobine e in multi-frequenza [Boaga J., 2016 [5]].

Se i vincoli operativi vengono rispettati, lavora in un range di frequenza di:

$$2\pi f \ll 2\mu_0\sigma s^2 \quad (5.25)$$

dove μ_0 è la permeabilità del vuoto, ω è la frequenza angolare e σ la conduttività. Essendo σ la conduttività e s lo spazio tra le bobine, il valore in campo diventa una lettura diretta della conduttività apparente del suolo (σ_a):

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 s^2} \frac{H_s}{H_p} \quad (5.26)$$

dove σ_a può essere considerata come una conduttività media tra la superficie e la profondità di penetrazione nel terreno.

La profondità di indagine dipende dalle forze elettromagnetiche generate. Il campo magnetico secondario H_s è infatti proporzionale alla frequenza e alle proprietà elettriche, quindi il campo aumenta all'incrementare della frequenza o della conduttività.

Alte frequenze hanno lunghezze d'onda corte (incremento risolutivo) ma, d'altra parte, riducono la profondità di penetrazione nel terreno. Comunque la grandezza del campo primario e secondario diminuisce con l'incremento della distanza, pertanto sarebbe opportuno raggiungere un compromesso tra

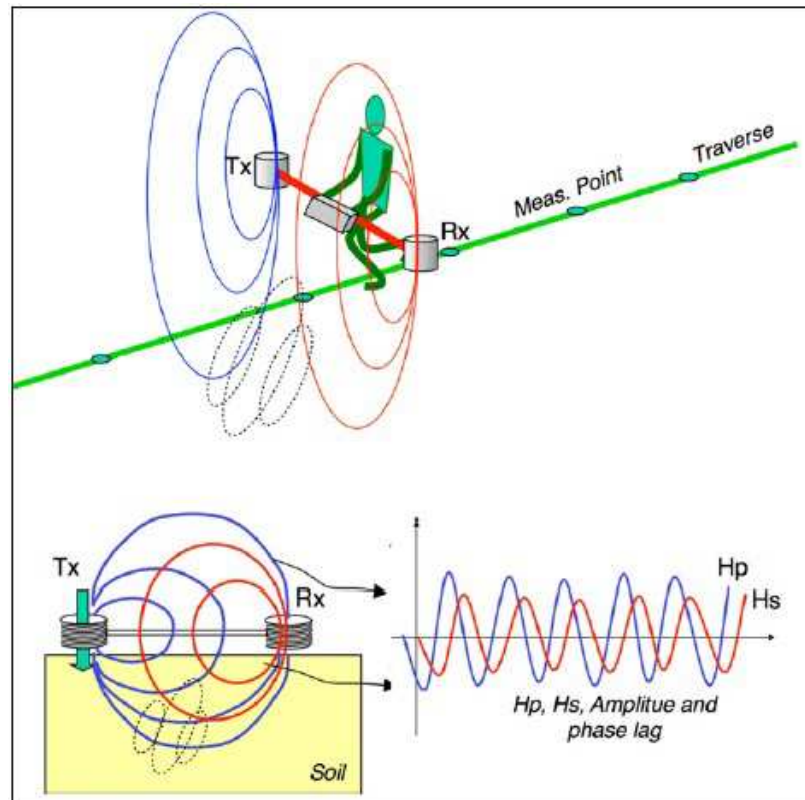


Fig. 5.9: Rappresentazione schematica del FDEM, da: [Boaga J., 2016].

la profondità di indagine e la intensità del segnale [Boaga J., 2016 [5]]. La profondità di penetrazione si può calcolare in metri attraverso lo "skin depth" (d), che è definito come:

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (5.27)$$

Uno strumento FDEM è composto sostanzialmente da una coppia di bobine usate per generare e misurare i componenti del campo magnetico, Figura 5.9. Diverse bobine possono essere orientate lungo differenti assi in direzione ortogonale per misurare le varie componenti del vettore campo magnetico. Il vettore totale di campo misurato alla bobina ricevente è la somma del campo primario (H_p) e del campo secondario H_s [Boaga J., 2016 [5]].

I metodi attivi consistono in una bobina trasmittente attiva (Tx) e una bobina ricevente (Rx). Le due bobine possono essere montate alle due estremità dello strumento EM con un'asta di plastica, o possono essere separate (e connesse da un cavo) per incrementare la loro interdistanza.

Capitolo 6

Risultati delle prove geofisiche

In questo capitolo si presentano i risultati delle indagini geofisiche ottenute con i metodi ERT e CMD, condotte in particolari zone del dominio considerato.

6.1 Metodi utilizzati

6.1.1 Electrical resistivity tomography



Fig. 6.1: *IRIS Syscal Pro*.

Lo strumento utilizzato per l'acquisizione dei dati ERT è il georesistivimetro Syscal Pro prodotto dalla IRIS Instruments. Questo strumento possiede internamente un amperometro e un voltmetro, inoltre ha la capacità di gestire ed eseguire automaticamente le misure di resistività in funzione della configurazione elettrodica preimpostata, individuando gli elettrodi nei quali iniettare la corrente e quelli in cui misurare la differenza di potenziale.

Il Syscal Pro possiede:

- 72 canali di cui 10 simultanei per le misure di resistività;
- 48 elettrodi in acciaio;
- 2 cavi bidirezionali multielettrodo in PUR (poliuretano) con spaziatura elettrodi 2 metri e connettori militari alle estremità;
- 48 connessioni picchetto/cavo *alligator clip*.

L'indagine ERT ha lo scopo di focalizzare l'attenzione sul rilevato arginale per studiare la sua composizione e la sua struttura. L'acquisizione in campo ha previsto la realizzazione di uno stendimento trasversale al corpo arginale con una disposizione lineare di 48 elettrodi con una interdistanza di 0.5 metri. La configurazione elettrodica utilizzata è la Dipolo - Dipolo skip 4, cioè interspaziata da 5 elettrodi durante l'acquisizione. Il Syscal Pro ha eseguito 2207 misure di resistività, delle quali metà dirette e metà reciproche.

6.1.2 Multidepth Electromagnetic Conductivity Meters

Il CMD rappresenta una grande famiglia di strumenti geofisici privi di contatto con la superficie per una rapida valutazione della conduttività del suolo e di suscettibilità magnetica. Le sonde singole o multi-profondità sono progettate per lavorare in un intervallo di profondità da 0,5 a 9 metri e consentono di mappare singoli o multi strati, inoltre è anche possibile collegare lo strumento ad un GPS per avere le coordinate geografiche del luogo di acquisizione dei dati.

Il CMD Explorer in Figura 6.2(a) ha la capacità di campionare simultaneamente a diverse profondità a seconda del tipo di configurazione dell'antenna, come specificato nella Tabella 6.1, che è in funzione dell'orientazione dei dipoli (orizzontale o verticale). È progettato per lavorare in campo geologico, geotecnico, archeologico e ambientale.

Lo strumento possiede una elevata stabilità alle variazioni temperatura e alla

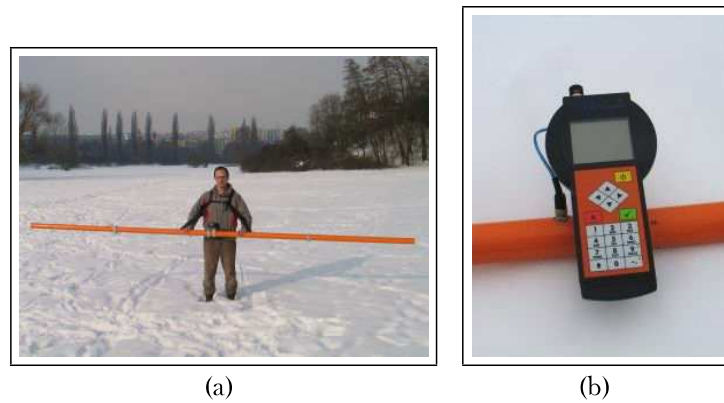


Fig. 6.2: *CMD Explorer (a), CMD control unit (b).*

precisione di calibrazione, quindi applica in maniera corretta il processo di inversione elettromagnetica da cui si ottengono sezioni associate a imaging DC (Direct Current).

Il CMD Explorer possiede una unità di controllo in Figura 6.2(b) che gestisce le modalità operative dello strumento quali tempi e modalità di acquisizione, gestione dei file memorizzati ecc... Le bobine sono all'interno del tubo e la distanza dalle estremità in cui sono presenti i dipoli è di 4.49 metri. Questo strumento pesa complessivamente 8 chilogrammi e mostra risultati migliori in aree in cui le variazioni topografiche sono minime come i suoli secchi o ghiacciati.

Tab. 6.1: *Profondità nominali raggiunte dal Cmd Explorer in cui viene acquisita la conducibilità elettrica apparente per le configurazioni High e Low.*

σ [mS/m]	High [m]	Low [m]
σ_1	2.2	1.1
σ_2	4.2	2.1
σ_3	6.7	3.3

6.2 Risultati delle indagini

6.2.1 Tomografia Elettrica

La tomografia elettrica è stata effettuata nell'argine destro del Fiume Bacchiglione indicato dalla immagine satellitare in Figura 6.3.



Fig. 6.3: Immagine satellitare Google Earth dell'area di campionamento dei dati ERT nelle vicinanze di Voltabarozzo (PD)

I dati sperimentali acquisiti possiedono un errore di reciprocità inferiore al 5% e vengono importati su un foglio elettronico per ottenere un dataset di input da utilizzare con il software ProfilerR della Lancaster University.

ProfileR è un software programmato per tracciare il profilo di resistività di uno stendimento superficiale. Il programma offre una soluzione inversa per la distribuzione bidimensionale della resistività basata sul calcolo del flusso di corrente nel suolo tramite l'uso di una griglia di calcolo con maglie triangolari o quadrate. La soluzione inversa si basa su un processo di inversione che viene regolarizzato con il metodo dei minimi quadrati.

Il software richiede il numero di elettrodi, la loro spaziatura e la loro posizione altimetrica. In seguito è necessario creare una mesh che rappresenti le reali misure geometriche dell'argine.

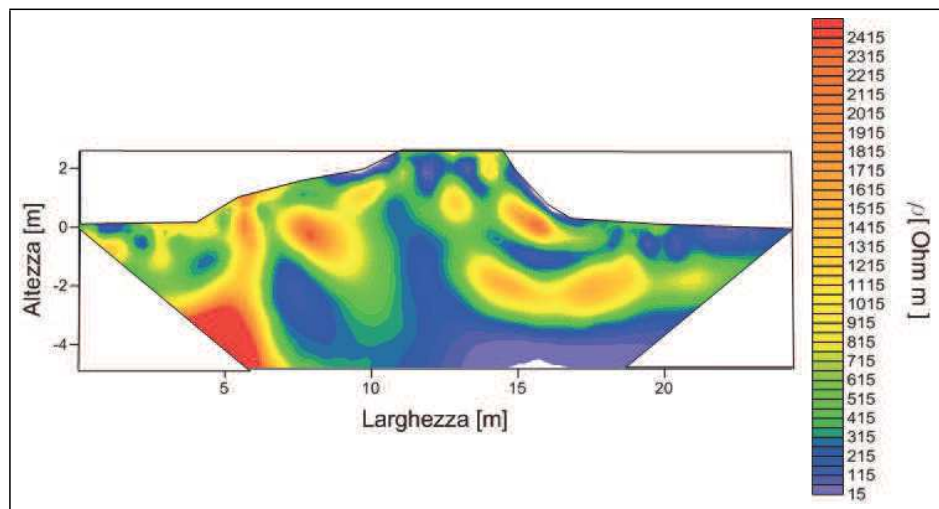


Fig. 6.4: Sezione della tomografia elettrica di resistività trasversale all'argine.

Il formato .msh del reticolo geometrico viene convertito da MatLab® in un formato .dat.

A questo punto è possibile avviare il processo di inversione da cui si ottengono i dati puntuali della resistività elettrica. I risultati, dopo essere stati interpolati tramite il software Surfer 13, mostrano la distribuzione 2D della resistività elettrica dell'argine, come in Figura 6.4.

La sezione raffigura la distribuzione della resistività reale trasversale dell'argine destro in prossimità della frazione di Voltabarozzo. I valori di misura rientrano in un range di resistività elettrica tra 15 e 2500 [$\Omega \cdot m$] come mostra la legenda. La sezione è tagliata ai lati perché le misure ai margini del dominio, ottenute dopo il processo di inversione, hanno un RMS% (Root mean square) più elevato rispetto al resto della sezione, quindi l'incertezza delle misure è maggiore.

Il lato sinistro della sezione corrisponde alla sponda destra del corso d'acqua, il lato destro al lato campagna.

L'area investigata comprende la parte sommitale dell'argine sino ad una profondità di 4 metri. Si notano delle zone di resistività con valori fra 800 e 2500 [$\Omega \cdot m$] tra 1 e 2 metri di profondità sia nella base destra che sinistra dell'argine. Questi risultati lasciano presumere che i valori di resistività osservati,

siano correlabili a materiale di grossa pezzatura e depositi granulari.

Il nucleo dell'argine mostra dei valori intorno ai 200 [$\Omega \cdot m$], o in termini di conducibilità elettrica 5 [mS/m] si veda il Paragrafo 6.2.2 per un confronto con i risultati del CMD Explorer. I valori ottenuti possono essere riconducibili a materiali non consolidati di granulometria più fine.

Per quanto riguarda il lato sinistro della sezione ad una profondità di circa 4 metri, la resistività aumenta in maniera considerevole superando i 2400 [$\Omega \cdot m$]. I valori ottenuti in questa zona sono talmente elevati da aver consentito una propagazione dell'errore ai valori di resistività nella immediata parte superiore.

6.2.2 CMD Explorer

Tratto arginale in prossimità di Voltabarozzo

Lungo l'argine destro del Fiume Bacchiglione, in prossimità della frazione di Voltabarozzo, sono state effettuate sia un'indagine con il CMD Explorer, sia la tomografia elettrica trasversale menzionata precedentemente. I risultati ottenuti con il CMD Explorer nelle configurazioni High e Low sono riportati in Figura 6.5 con l'immagine satellitare del sito.

Il campionamento dei dati con lo strumento ha riguardato un tratto della lunghezza complessiva di 134 metri utilizzando la configurazione Low all'andata e High al ritorno. I grafici in Figura 6.5 mostrano l'andamento della conducibilità elettrica apparente alle diverse profondità in funzione del tipo di configurazione adottata.

La configurazione Low mostra un decremento della conducibilità elettrica fra 8 e 4 mS/m nei primi 40 metri a cui segue un andamento costante nei valori, fino ad un massimo di 12 mS/m nel tratto finale.

Simmetricamente la configurazione High rileva un abbassamento della conducibilità elettrica nel tratto finale fra 8 e 4 mS/m , a cui corrisponde il tratto iniziale della configurazione Low.

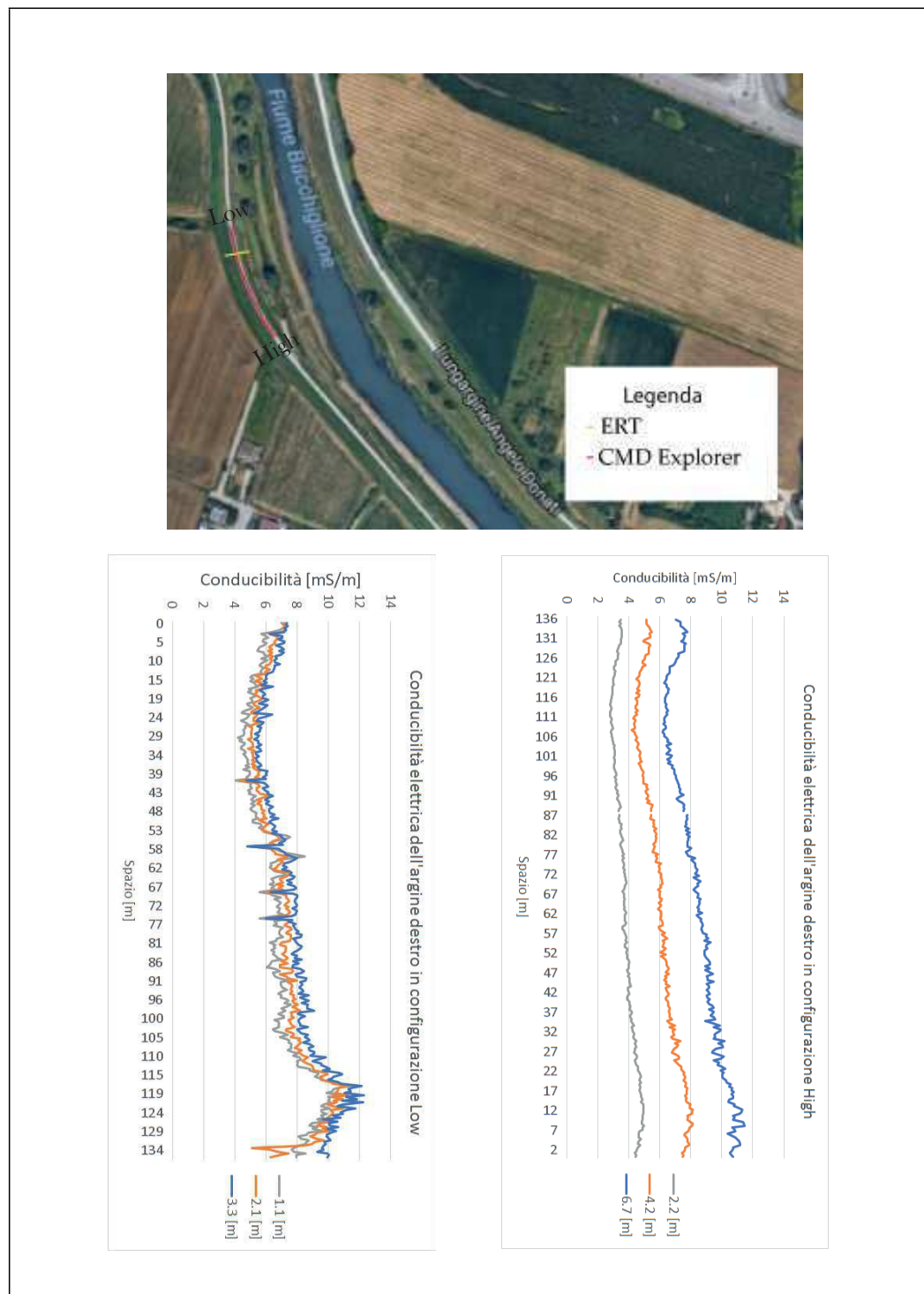


Fig. 6.5: Risultati del CMD Explorer per l'argine destro nei pressi della frazione di Voltabarozzo (PD).

Tratto arginale in prossimità di Ponte San Nicolò

Il secondo sito in cui sono state effettuate le indagini col CMD Explorer riguarda un tratto di argine attiguo alla località di Ponte San Nicolò. In quest'area sono state eseguite investigazioni sia per un tratto di argine in destra che in sinistra idrografica. I risultati ottenuti per l'argine destro non hanno avuto esito positivo in nessuna delle due configurazioni dello strumento a causa della forte antropizzazione dell'area che ha influenzato le misure di conducibilità elettrica in maniera rilevante. Mentre i risultati per l'argine sinistro sono visibili in Figura 6.6 ad eccezione della configurazione Low a causa di un errore durante la configurazione iniziale dello strumento.

Il tratto percorso è in direzione NO - SE come raffigurato dalla immagine satellitare. Il grafico delle variazioni di conducibilità elettrica evidenzia una diminuzione dei valori fra 8 e 4 mS/m tra 80 e 130 metri dall'inizio del percorso e un aumento costante e graduale con un massimo di 20 mS/m nel tratto finale.

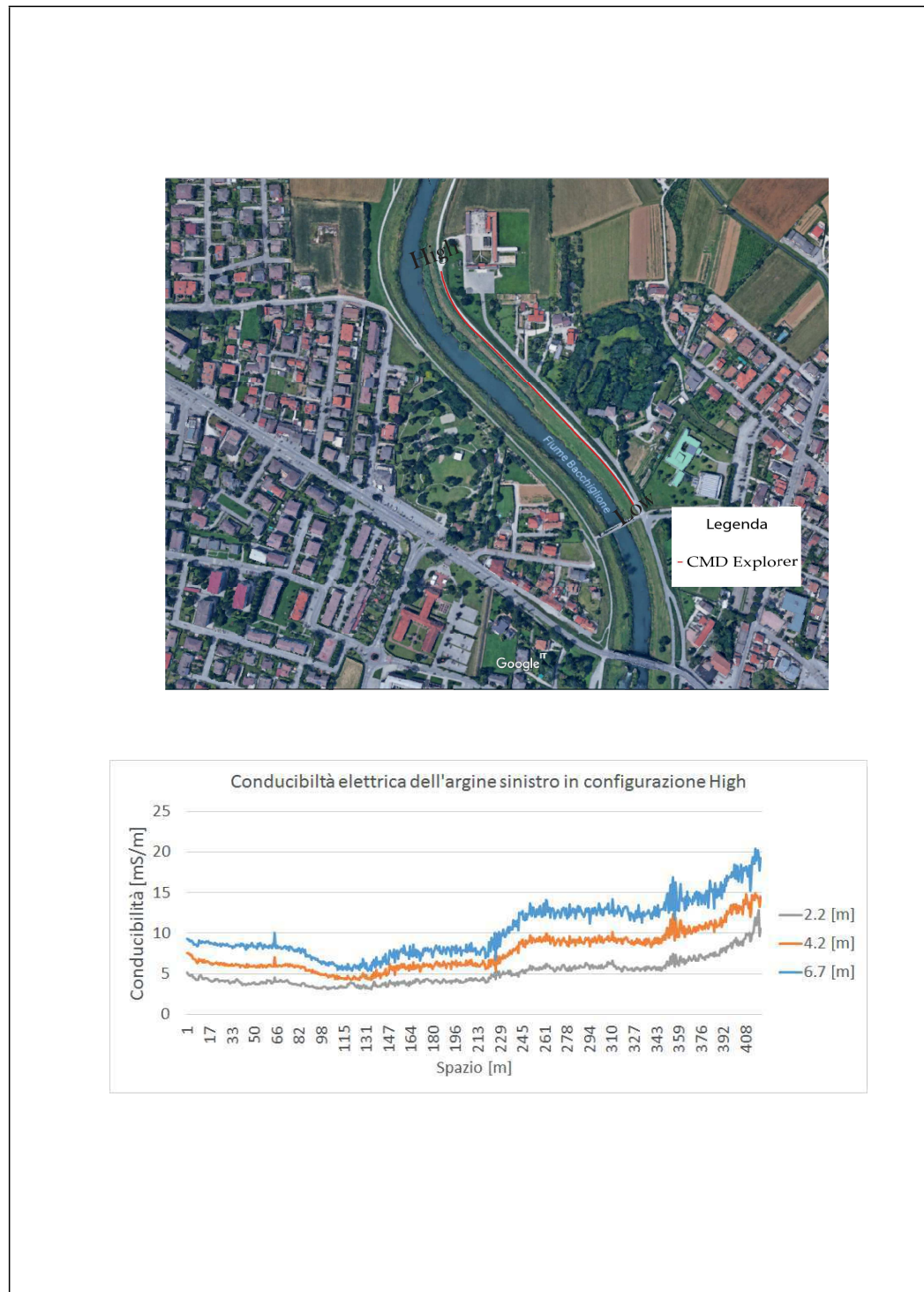


Fig. 6.6: Risultati del CMD Explorer per l'argine sinistro in località Ponte San Nicolò.

Tratto arginale in prossimità di Roncajette

Il terzo sito oggetto di studio è stato l'argine destro del Fiume Bacchiglione in prossimità della località di Roncajette, si veda Figura 6.7.

Il tratto indagato riguarda l'argine destro per una lunghezza di 320 metri con le due modalità di configurazione dello strumento. I risultati mostrano per la configurazione Low una certa sensibilità verso i paletti metallici della segnaletica stradale, i quali hanno influenzato probabilmente le bobine più esterne dello strumento. Si nota infatti un andamento costante fra 6 e 4 mS/m , ciò indica che il disturbo è generato principalmente dai paletti metallici.

Al ritorno, i risultati in configurazione High per lo stesso tratto mostrano delle diminuzioni di conducibilità elettrica fra i 90 - 130 metri dal punto di inizio e due picchi probabilmente generati da condotte metalliche di servizio.

Per quanto concerne le misure ottenute con il CMD Explorer, la diminuzione della conducibilità elettrica che si manifesta per i tre siti investigati può essere attribuita alla presenza di materiale granulare nei primi 6 metri di profondità in tutti e tre i casi; l'aumento di conducibilità elettrica si riconduce a materiali coesivi.

Commento ai risultati

Nell'ambito dello studio dell'OGS sono stati acquisiti dati con un sistema elettro-magnetico induttivo FDEM (Frequency Domain Electro Magnetic Induction) associato ad un sistema radar multicanale GPR (Ground Penetrating Radar).

Nell'ambito della presente tesi, invece, si è utilizzato il metodo FDEM (analogo al metodo utilizzato dall'OGS) associato alla tomografia elettrica che ha permesso di condurre un'analisi di dettaglio sui alcuni tratti critici.

Nei casi presi in esame, le metodologie d'indagine utilizzate hanno fornito dei risultati positivi poiché è stata osservata un'ottima correlazione tra i valori assoluti di resistività e le zone in cui la componente granulare nel corpo arginale ha la capacità di attivare dei fenomeni di filtrazione durante gli eventi di piena.

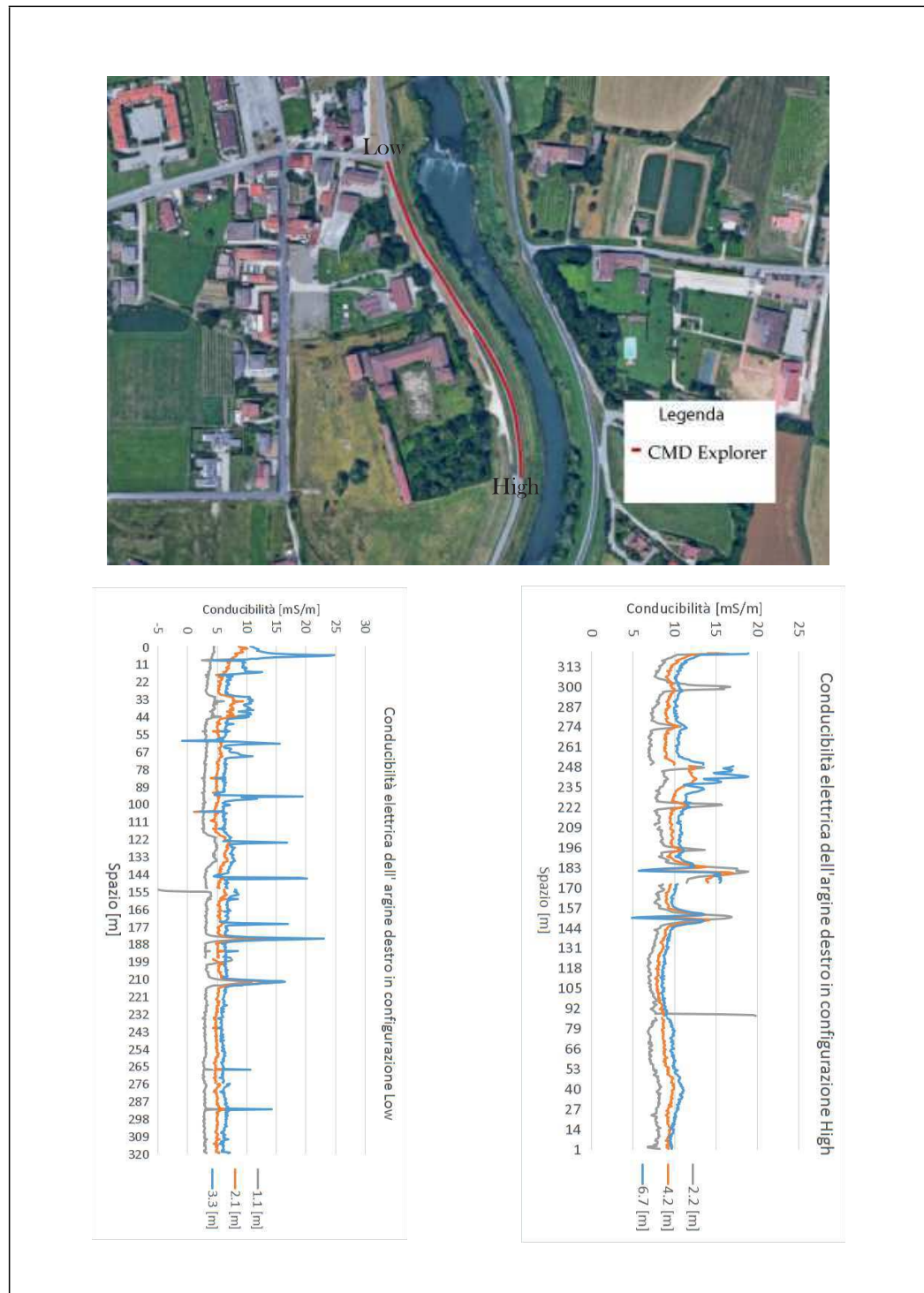


Fig. 6.7: Risultati del CMD Explorer per l'argine destro nella località Roncajette.

L'obiettivo delle indagini geofisiche utilizzate è stato quello di poter fornire un metodo da cui ottenere dei risultati concreti con costi e tempi ridotti per contribuire al processo di mantenimento in efficienza del sistema difensivo dei

corsi d'acqua.

La ERT trasversale all'argine, rispetto ad una ERT longitudinale, è un ottimo metodo per avere una valutazione migliore della distribuzione di resistività. Infatti è possibile definire con maggiore sicurezza le aree in cui si presentano dei corpi più resistivi.

Dai risultati ottenuti il CMD Explorer è risultato essere molto efficace per le elevate coperture indagate in breve tempo. È consigliabile però utilizzare questo metodo in aree poco urbanizzate per avere una influenza minore sulle misure da parte degli oggetti metallici presenti nelle vicinanze durante l'acquisizione dei dati.

Si forniscono in Allegato D le tavole estrapolate dallo studio dell'OGS inerenti alle aree in cui sono state effettuate le indagini della presente tesi.

Capitolo 7

Risultati delle simulazioni

Al fine di analizzare gli effetti di eventuali rotte che si potrebbero verificare lungo il Canale Roncajette, sono state condotte delle simulazioni con il modello idrodinamico presentato nel Capitolo 5, a fondo fisso (per quanto concerne il fondo del canale Roncajette e delle zone non canalizzate ad esso adiacenti).

Nelle analisi condotte con il modello matematico si è simulato l'evento alluvionale dell' 1-2 novembre 2010, evento tra i più gravosi registrati per il sistema, con tempo di ritorno poco meno che centenario. Utilizzando una griglia di calcolo precedentemente predisposta (e descritta nella §5.3), che fa parte di una griglia di calcolo che schematizza un territorio più vasto, utilizzata per simulare il comportamento idraulico del Fiume Bacchiglione e dei suoi tributari, oltre che quello delle aree adiacenti. Tale reticolo di calcolo è composto da 65000 nodi, 115000 elementi triangolari, 2000 elementi unidimensionali per simulare i canali minori e 6000 elementi unidimensionali per simulare il funzionamento dei diversi manufatti e la presenza di argini sormontabili. Le simulazioni sul modello "esteso" sono state sfruttate per derivare le condizioni al contorno utilizzate nel modello "meno esteso" qui utilizzato.

Il reticolo qui considerato infatti, come ricordato in precedenza, considera una porzione limitata rispetto al modello precedente. I valori dei coefficienti di scabrezza del dominio di calcolo secondo la formulazione di Strickler, sono stati individuati sulla base dell'esperienza maturata in studi precedenti (valori

del coefficiente di scabrezza K_s compresi tra 15 e 30 $m^{\frac{1}{3}}/s$ per i corsi d'acqua, $K_s = 25 m^{\frac{1}{3}}/s$ per i canali 1D, $K_s = 15 m^{\frac{1}{3}}/s$ per le aree rurali), ma anche appoggiandosi a una procedura di taratura e verifica [Viero et al., 2013 [28]]. Tale procedura è stata condotta sulla base di un confronto fra i risultati forniti dal modello matematico e i dati misurati per diversi eventi tra i quali quello del novembre 2010. Si è cercato, in particolare, di riprodurre al meglio i massimi livelli idrometrici registrati in alcune località e la celerità di propagazione dell'onda di piena lungo il Bacchiglione, confrontando i tempi di arrivo dei colmi calcolati e osservati in diverse sezioni.

L'evento dell' 1-2 novembre 2010, evento tra i più gravosi registrati per il sistema, con tempo di ritorno poco meno che centenario. L'evento, meno gravoso dell'evento del 1966, è stato scelto perché in occasione della piena del 2010 si sono verificate una serie di rotte nel sistema Brenta Bacchiglione, una delle quali si è manifestata nel Canale Roncajette.

Individuati alcuni tratti critici sulla base delle indagini geofisiche precedentemente descritte, si sono condotte una serie di simulazioni al fine di descrivere gli effetti delle rotte arginali sugli allagamenti delle zone adiacenti al corso del Canale Roncajette. Sono state condotte 10 simulazioni nelle quali si sono simulate rotte arginali in 9 punti diversi e una simulazione nella quale non si sono simulate rotture del corpo arginale al fine di stimare le condizioni idrometriche in alveo in assenza di brecce. Delle 9 simulazioni con brecce effettuate nell'ambito della tesi, per brevità ne vengono qui presentate solo 6. Essendo alcuni processi simili per tutte le brecce considerate, in questo capitolo si descrivono nel dettaglio i risultati ottenuti per la Breccia N°1 in sinistra idrografica all'altezza di Voltabarozzo, rimandando il lettore agli Allegati per i risultati relativi alle restanti simulazioni.



Fig. 7.1: Immagine satellitare Google Earth 3D del tratto iniziale del Canale Roncajette, con la localizzazione e il numero corrispondente della simulazione delle rotte arginali.

7.1 Simulazione condotta in assenza di rotte arginali

I punti complessivi in cui sono state simulate le rotte nel tratto fra la frazione di Voltabarozzo (PD) e Roncajette sono dieci, ma per equispaziare al meglio i luoghi e viste le leggere variazioni tra i risultati di rotte poco distanziate è stato scelto di presentarne sette. La prima simulazione rappresenta lo scenario in cui non si verifica nessuna breccia lungo il canale, invece le restanti riguardano le rotte simulate. Di queste tre in sinistra e tre in destra idrografica, come in Figura 7.1.

Franco arginale

La simulazione in assenza di rotte arginali ha lo scopo di verificare la risposta del Canale Roncajette all'evento di piena con particolare riferimento al confronto tra le quote idrometriche lungo il Canale e le quote arginali, ed eventualmente l'estensione delle aree allagate in caso di sormonto arginale. È

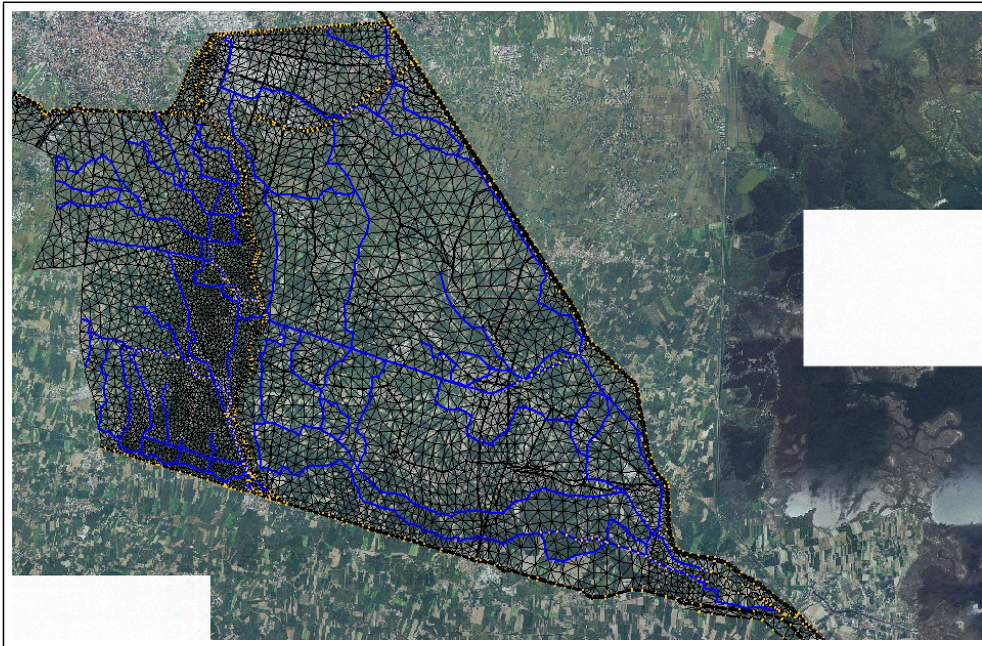


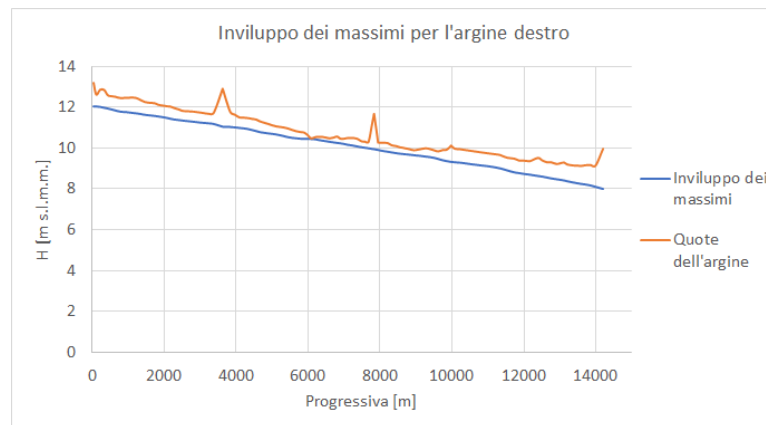
Fig. 7.2: Reticolo geometrico di calcolo con alla base una Ortofoto satellitare dell'area.

stato in particolare analizzato il franco arginale lungo tutta la lunghezza del canale per una durata di 120 ore.

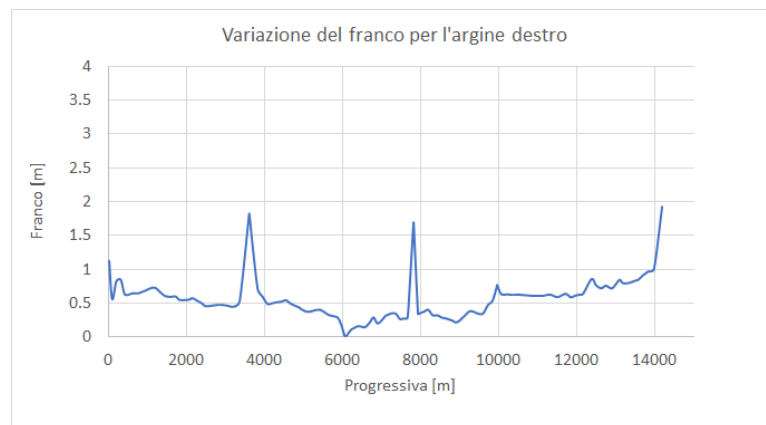
Il franco arginale rappresenta uno dei più importanti parametri per controllare la sicurezza idraulica. Definito come la distanza tra il livello del pelo libero, una volta raggiunta la massima piena, e la sommità arginale, esso si può considerare come una sorta di soglia di sicurezza. Le normative impongono per gli argini il rispetto di un franco $f \geq 1$ m e della distanza minima tra il talweg e la quota di sotto-trave di un ponte h_{min} uguale a 6 - 7 m.

La mesh, come già descritto nella §5.3 , è formata da 19914 maglie, 4 maglie speciali, 13186 nodi, 1436 canali e 2187 tronchi. Si carica il reticolo geometrico su Incidenze che è rappresentato da un file .geo e la Ortofoto satellitare in formato .ecw per individuare l'area in cui effettuare le simulazioni, come in Figura 7.2.

Successivamente si creano due file .cnt che seguono precisamente la sommità degli argini, si convertono in file .dxf e si elaborano su AutoCAD. I file .cnt sono dei segmenti che devono passare per i tronchi speciali degli argini ed evitare il contatto con le maglie triangolari del canale. Dopo ciò il file viene



(a)

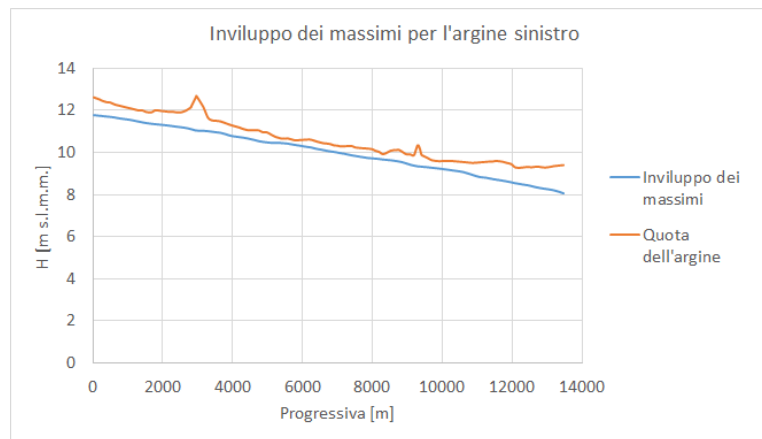


(b)

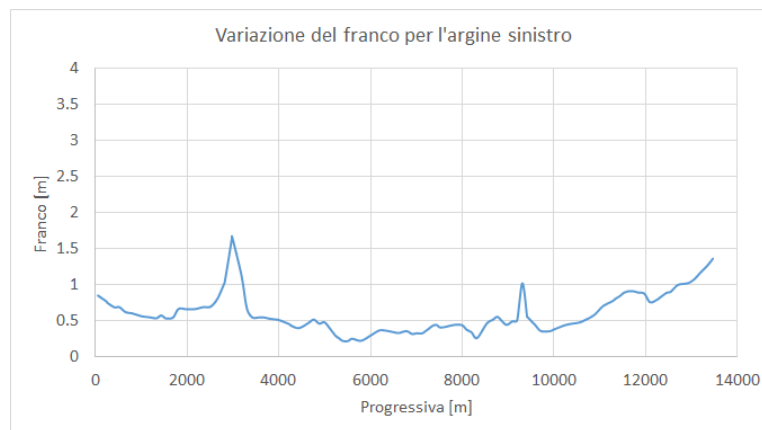
Fig. 7.3: *Inviluppo dei massimi livelli idrometrici (a) e inviluppo dei franchi arginali (b) per un evento analogo all'evento di piena del Novembre 2010, calcolati a ridosso dell'argine destro del Canale Roncajette da Voltabarozzo a Bovolenta, in assenza di brecce arginali*

importato su Incidenze, si carica il file .out e si ottengono i valori del franco per entrambi gli argini.

L'andamento dei franchi arginali, per entrambi gli argini in sinistra e in destra idrografica, evidenzia che il franco, pur rimanendo sempre positivo per tutto il tratto del Canale Roncajette, annullandosi localmente solo in prossimità dell'abitato di Isola dell'Abbà, immediatamente a valle di Roncajette, assume tuttavia valori generalmente ben al di sotto di 1.0 m e per lunghi tratti assume valori addirittura inferiori a 0.5 m. Anche se non si verificano sormonti arginali (l'annullamento locale del franco in destra alla progressiva 6000 m in località



(a)



(b)

Fig. 7.4: *Inviluppo dei massimi livelli idrometrici (a) e inviluppo dei franchi arginali (b) per un evento analogo all'evento di piena del Novembre 2010, calcolati a ridosso dell'argine sinistro del Canale Roncajette da Voltabarozzo a Bovolenta, in assenza di breccie arginali.*

Isola dell'Abbà non comporta sormonto e allagamento delle zone situate in adiacenza all'alveo) l'andamento dei franchi arginali evidenzia come i punti più depressi degli argini del fiume Roncajette siano chiaramente a rischio tracimazione, interessando in egual maniera ambedue gli argini.

In definitiva, stando a quanto emerso dall'analisi di questa simulazione, si può concludere che il Canale Roncajette si trova in condizioni al limite della tracimazione per piene analoghe alla piena del Novembre 2010 (evento stimato come meno che centenaria), mentre non sarebbe in grado di contenere le acqua nel caso di piene più che centenarie, come ad esempio la piena del

1966.

La portata al colmo stimata dal modello per la piena considerata, risulta, lungo il Canale Roncajette, pari a circa $550 \text{ m}^3/\text{s}$, suggerito come valore limite per lo stesso Canale [D'Alpaos L., 2016 [11]]. I risultati mostrano che non avviene il sormonto in nessun tratto, ma i valori del franco oscillano tra 0.90 – 0.30 metri, Figura 7.3(b) e in Figura 7.4(b), ad eccezione dei due picchi che rappresentano ponte San Nicolò e l'idrovora del Maestro. Chiaramente non è possibile fare una sovrapposizione tra i risultati ottenuti per l'argine destro e quello sinistro, in quanto la progressiva non è equiparabile.

7.2 Simulazioni condotte in presenza di brecce arginali

La seconda fase di elaborazione prevede di realizzare delle simulazioni nel caso in cui si verificano rotte arginali. Si carica la mesh su Incidenze, si individua il tronco speciale e si memorizza il suo numero e il valore dei nodi a cui è legato, Figura 7.5.

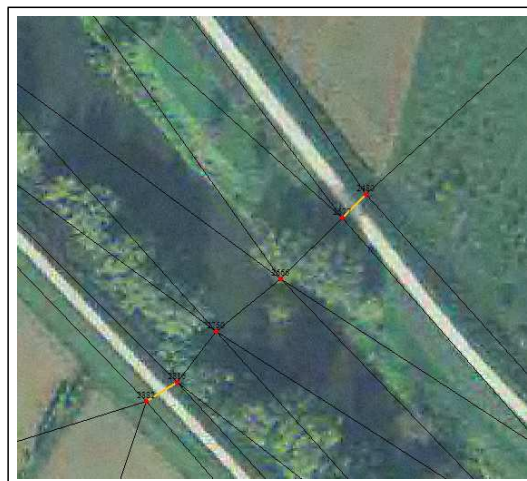


Fig. 7.5: Esempio di un tratto di canale con tronchi speciali e nodi.

Come già precedentemente descritto, i file .geo sono file di testo che possono essere soggetti a modifiche. Le variazioni riguardano il tronco speciale

individuato a cui verranno modificati i valori come ad esempio la tipologia di tronco speciale, il raggio iniziale per il sifonamento, la quota del rilevato arginale e le inclinazioni della sponda per il lato fiume e lato campagna.

A questo punto si crea un nuovo file .sim a cui viene nuovamente specificato il nome del file .geo e il nome del file di uscita della simulazione. Successivamente è possibile avviare il file .exe del modello 2DEF che svolge i processi computazionali e restituisce un file .out e due file .txt con i risultati numerici attinenti alla fase di sifonamento e di sormonto.

Il file .out può essere importato direttamente su Incidenze, al contrario dei due file di testo che necessitano di una elaborazione su un foglio Excel.

La simulazione di una breccia arginale segue un procedimento dettato dalle caratteristiche idrauliche dell'evento di piena e dalle proprietà fisiche del rilevato. Il processo dura circa 80 ore e ha inizio quando l'acqua comincia a filtrare dalla parte sommitale all'interno dell'argine. Gli sforzi di taglio si incrementano e si avvia un processo erosivo che accresce il diametro del tubo di flusso. A seconda delle vie preferenziali che l'acqua può intraprendere si verifica una erosione longitudinale e trasversale dell'argine che genera una piccola breccia. A tutto ciò consegue una diminuzione della quota della sommità arginale che lo rende vulnerabile al sormonto.

L'incremento dei livelli idrometrici determina la tracimazione della corona arginale e di conseguenza incrementa ulteriormente la capacità erosiva dell'acqua che, nello stesso tempo, erode l'argine scavandolo e allaga le aree limitrofe al luogo della rotta. L'acqua defluisce senza che le si opponga nessuna resistenza da quel tratto arginale ormai dilavato e allaga le aree circostanti finché l'evento di piena non si esaurisce.

Le aree allagate saranno sommerse da tiranti d'acqua che variano a seconda delle condizioni topografiche e dalla vicinanza al sito in cui è avvenuta la rotta. L'evoluzione della breccia nel tempo è potenzialmente controllata dalle condizioni idrodinamiche, cioè dalla massima portata, dal volume d'acqua massimo che attraversa la breccia e dalla durata della piena. A questa breve esposizio-

ne qualitativa del fenomeno ne seguirà una quantitativa con la descrizione dell'elaborazione dei dati a cui seguono i grafici e le tabelle dei risultati delle simulazioni.

7.3 Simulazione con formazione della breccia N°1

I valori iniziali assunti per tutte le simulazioni di rotta arginale sono elencati nella Tabella 7.1 e si riferiscono ai valori dei parametri utilizzati da [Viero et al., 2013 [28]] per simulare lo sviluppo delle brecce arginali nel caso dell'evento del 2010. I valori di questi parametri sono considerati appropriati perché consentono di ottenere valori simulati delle quote idrometriche e delle portate in buon accordo con quelli reali. Questi descrivono le proprietà geometriche iniziali e le caratteristiche intrinseche dell'argine prima della simulazione come ad esempio: il raggio di piping iniziale, i valori di τ_{cr} e k_{er} che indicano un terreno siltoso.

Tab. 7.1: Dati iniziali dell'argine per ogni simulazione di rotta.

Definizione	Unità	Valore
Altezza iniziale dell'argine	Z_0	12 m
Larghezza iniziale dell'argine	W_0	5 m
Pendenza interna dell'argine	α	11°
Pendenza esterna dell'argine	β	25°
Porosità	n	0.35
Raggio iniziale del tubo di flusso	R_0	0.25 m
Coeff. erosione del suolo	k_{er}	0.003 s/m
Sforzo di taglio critico	τ_{cr}	5 Pa
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	40°
Densità del suolo	ρ_s	1700 kg/m ³
Diametro della frazione passante al 50 %	D_{50}	0.1 mm
Diametro della frazione passante al 90 %	D_{90}	0.5 mm

7.3.1 Evoluzione della breccia arginale N°1.

Il processo inizia quando con l'incremento dei livelli idrometrici durante l'evento di piena, lo sforzo di taglio supera il valore soglia dello sforzo di

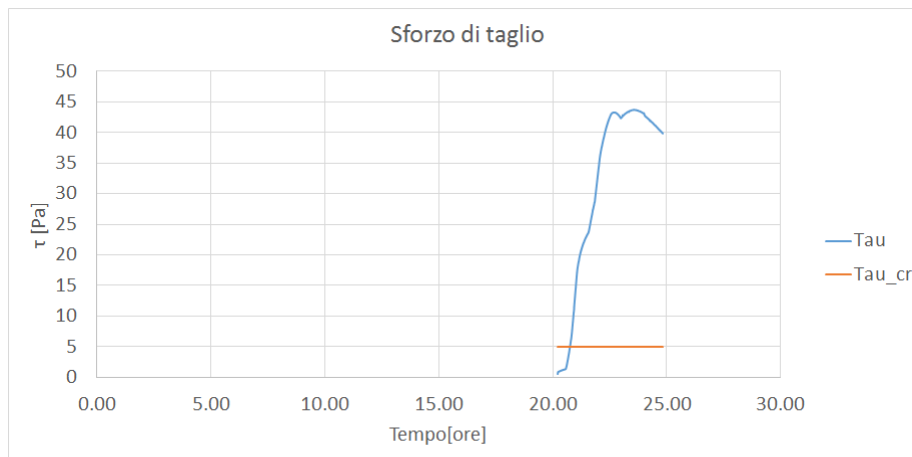


Fig. 7.6: Andamento nel tempo dello sforzo tangenziale lungo la parete del condotto, τ , posto a confronto con il corrispondente valore di soglia, τ_c , per l'inizio del processo erosivo.

taglio critico, come in Figura 7.6 a cui segue una graduale erosione interna all'argine che incrementa il raggio iniziale di 0.25 m di un ipotetico tubo di flusso. Questa fase rappresenta l'inizio del processo di piping che termina quando la rimozione dei sedimenti è tale da provocare il crollo della volta superiore. È possibile notare che questa fase termina poco prima delle 25 ore che è il momento in cui si manifestano i livelli idrometrici maggiori, come evidenziato dalla Figura 7.7 nella pagina successiva. In questo istante avviene la transizione dalla fase di piping a quella di overtopping.

La Figura 7.7 mostra l'andamento nel tempo dei livelli idrometrici raggiunti a ridosso della breccia arginale, nella parte lato fiume (H1) e lato campagna (H2), durante la fase di piping e durante la fase di sormonto ($H1_{sor}$ e $H2_{sor}$), con l'aggiunta della curva dell'andamento della portata fluente attraverso la breccia durante le due fasi.

Si noti che l'istante in cui avviene il sormonto è lo stesso istante in cui non viene più rappresentato l'andamento dello sforzo tangenziale nel grafico ed è anche l'istante in corrispondenza al quale si ha il picco massimo dei livelli (H1).

È interessante notare come in prossimità della breccia, l'andamento dei livelli venga modificato notevolmente dall'apertura della falla. L'andamento del

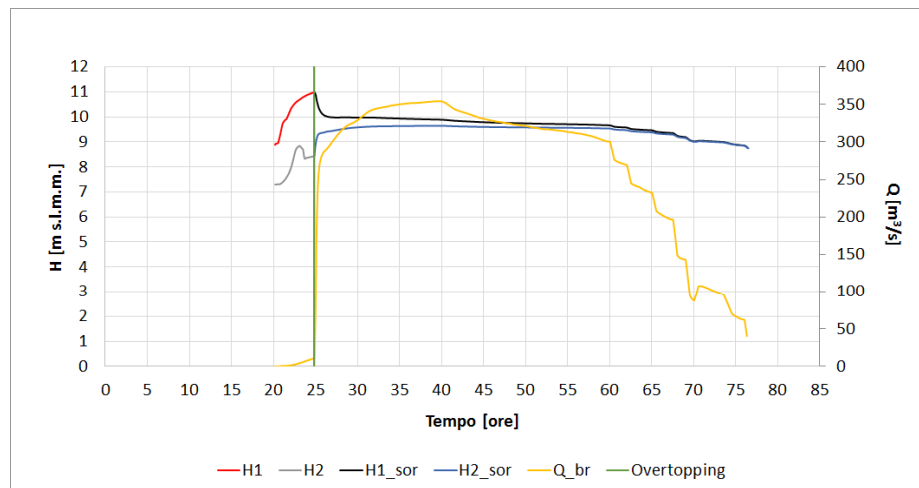


Fig. 7.7: Andamento nel tempo dei livelli idrometrici raggiunti a ridosso della breccia arginale, nella parte lato fiume (H1) e lato campagna (H2), durante la fase di piping e durante la fase di sormonto ($H1_{sor}$ e $H2_{sor}$) con l'aggiunta della curva dell'andamento delle portate.

livello all'interno del fiume prima della breccia (linea rossa) con quello calcolato in seguito alla la rotta (linea nera) mostra differenze massime che risultano essere di poco inferiori al metro.

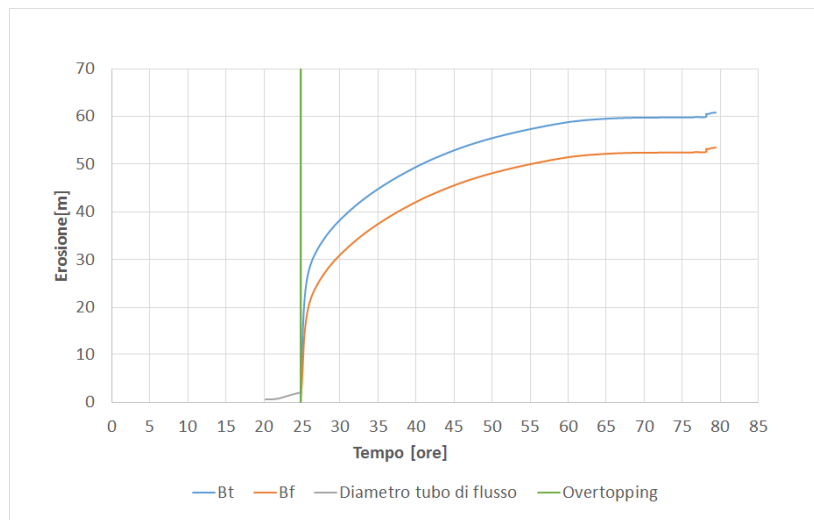


Fig. 7.8: Diametro del tubo di flusso, larghezza erosa dalla breccia nella parte sommitale dell'argine Bt e larghezza erosa dalla breccia alla base dell'argine Bf.

Il grafico in Figura 7.8 mostra la crescita del diametro del tubo di flusso dovuto all'erosione nella fase di piping e l'aumento dell'erosione longitudinale (i.e. lungo il rilevato arginale) complessiva della parte superiore e al fondo

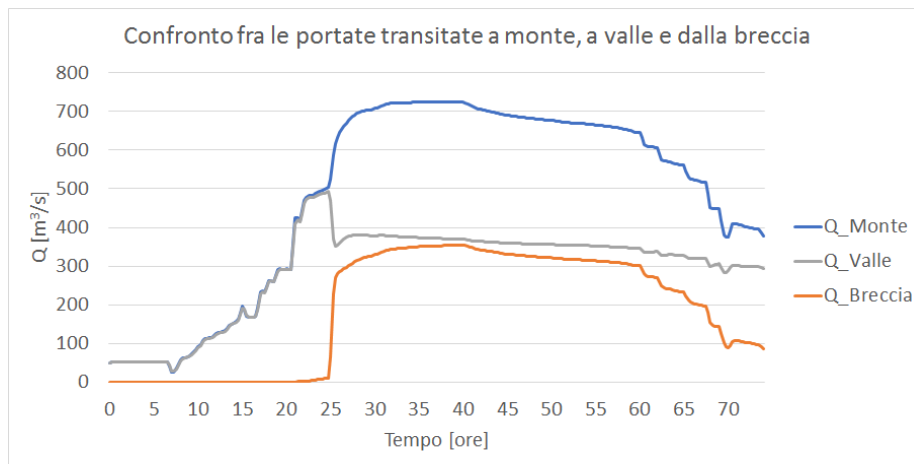


Fig. 7.9: Andamento nel tempo della portata transitata attraverso la breccia arginale sviluppata sull'argine sinistro del Canale Roncasette nel tratto di monte (poi intermedio e valle).

dell'argine.

Con l'inizio della fase di overtopping avviene l'erosione della superficie della corona dell'argine che aumenta con nell'istante in cui avviene il brusco incremento della portata in uscita dopo quasi 25 ore, come evidenziato in Figura 7.7.

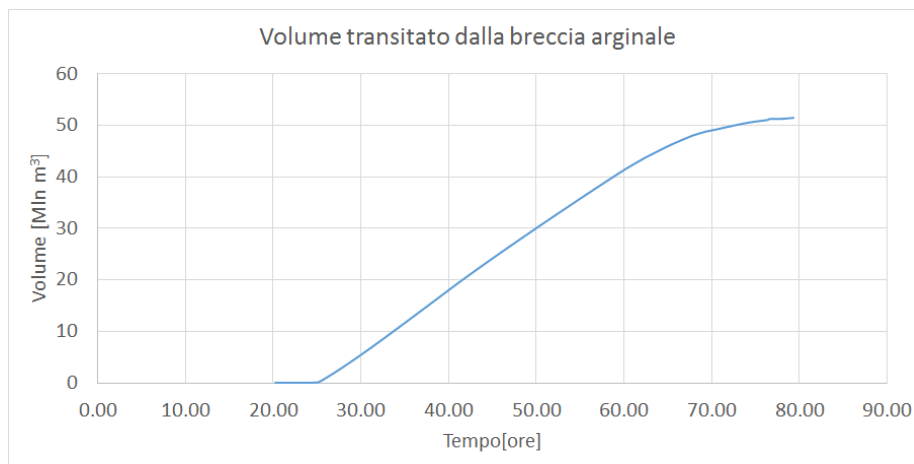


Fig. 7.10: Volume d'acqua transitato nel tempo dalla breccia N°1.

In Figura 7.9 sono riportati gli idrogrammi relativi a due sezioni immediatamente a monte e immediatamente a valle della rotta arginale, assieme all'idrogramma attraverso la rotta stessa. Il modello numerico calcola la por-

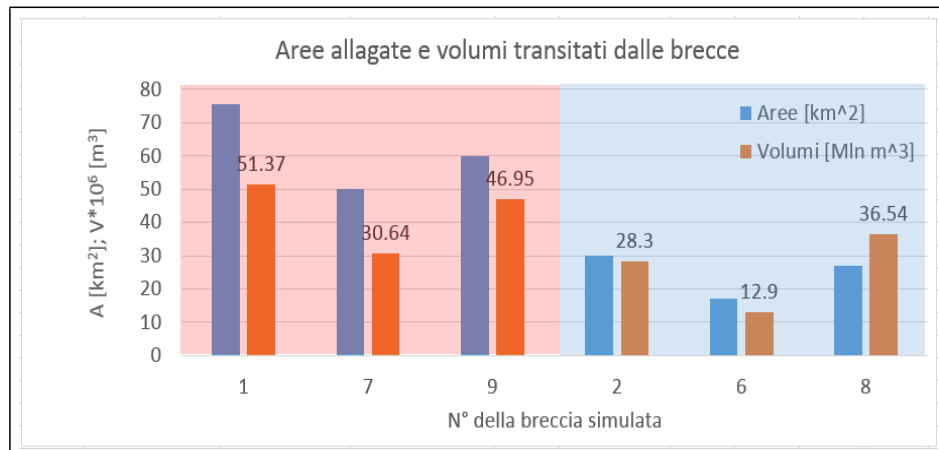


Fig. 7.11: Risultati complessivi delle superfici allagate e dei volumi transitati in funzione della breccia simulata. L'area rosa comprende le breccie in sinistra idrografica, l'area blu le breccie in destra idrografica.

tata massima defluita attraverso la breccia pari a circa $350 \text{ m}^3/\text{s}$ e il volume fuoriuscito pari a $51.37 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, Figura 7.10.

La Figura 7.12 nella pagina seguente riporta l'involuppo dei massimi tiranti nelle aree interessate dall'esondazione in seguito alla formazione della breccia (in alto) assieme all'involuppo delle massime velocità nelle stesse aree (in basso). I tiranti massimi si presentano poco a valle della breccia e lungo il rilevato arginale, per l'intera lunghezza del Canale Roncajette. Le massime velocità si manifestano, invece, immediatamente a ridosso della breccia. Si noti come la rottura dell'argine sinistro in prossimità di Voltabarozzo comporti anche l'allagamento di vaste porzioni a ridosso del Fiume Brenta, in destra idrografica. Tali allagamenti sono conseguenza delle portate che, in uscita dal Roncajette, percorrono il tratto dell'Idrovia PD-VE e giungono a ridosso del Brenta.

I risultati delle altre simulazioni, per alcuni versi analoghi a quelli relativi alla simulazione della Breccia N°1, sono riportati, per brevità in allegato. Invece, i valori delle superfici allagate per effetto delle portate fuoriuscite attraverso le diverse breccie, assieme ai volumi totali fuoriusciti, sono riportati per confronto in Figura 7.11.

I risultati evidenziano come le massime aree allagate siano relative alle breccie 1, 7,9 in sinistra idrografica, così come i massimi volumi. Inoltre, la

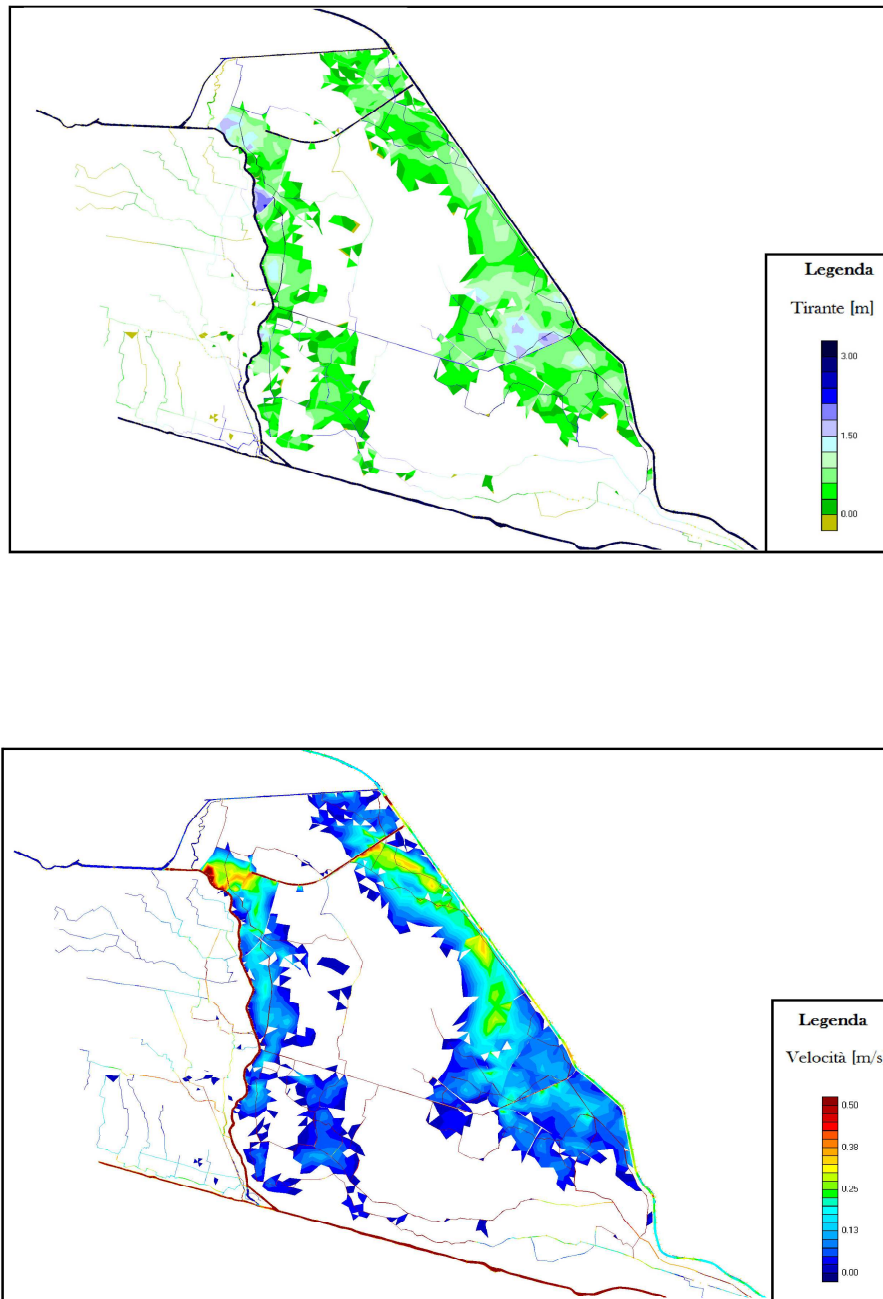


Fig. 7.12: Risultati delle simulazioni per la Breccia N°1, distribuzione dei valori dei tiranti e delle velocità.

possibile formazione di brecce nel tratto immediatamente a valle di Voltabarozzo comporta volumi e aree maggiori che quelle nel tratto Ponte San Nicolò e Roncajette.

Per avere un quadro generale di tutte le superfici allagate dalle sei brecce simulate si riporta una mappa degli allagamenti realizzata con Incidenze e AutoCad ® 2016 in Figura 7.13 nella pagina successiva.

Per ulteriori aspetti informativi sono presenti in Allegato E due Tavole riguardanti le aree allagabili e le altezze idriche, inerenti all'area di studio considerata, redatte dal Distretto Idrografico delle Alpi Orientali ad una scala 1:25.000 per un tempo di ritorno di 100 anni.

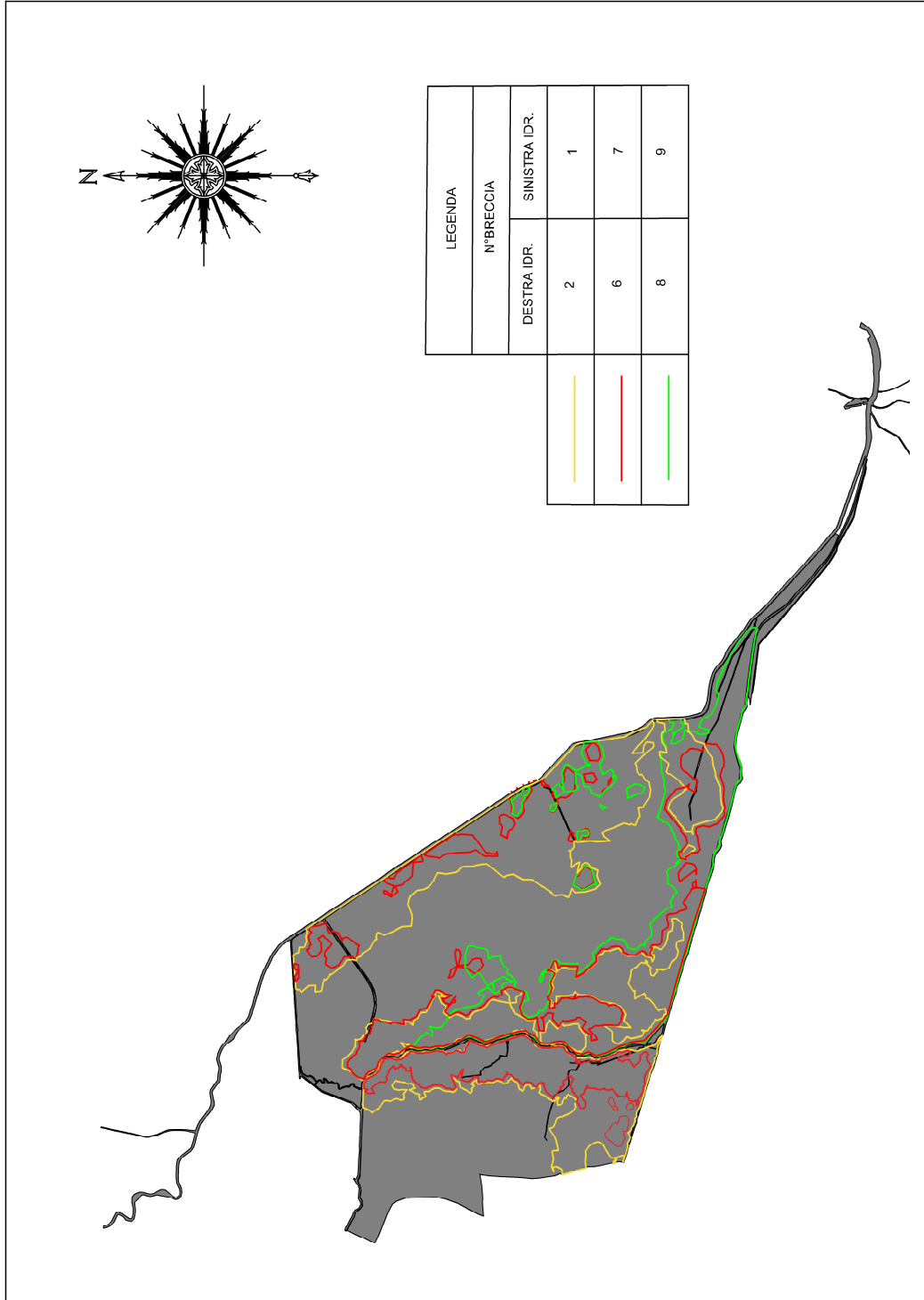


Fig. 7.13: Mappa delle superfici complessive allagate risultanti dalle simulazioni di rotta arginale elaborata con AutoCad ® 2016.

Capitolo 8

Conclusioni

La presente tesi è stata condotta sulla base di uno studio multidisciplinare che ha coinvolto diversi ambiti scientifici quali la geofisica e la modellazione matematica idrodinamica.

Il caso di studio è il Canale Roncajette, basso corso del Fiume Bacchiglione; la metodologia e i risultati ottenuti, tuttavia, hanno carattere generale e potrebbero essere applicati anche ad altri casi studio. Le analisi geofisiche hanno fornito risultati inerenti alle proprietà fisiche dei tratti arginali investigati, mentre la modellazione matematica delle caratteristiche idrauliche del Canale Roncajette ha permesso di simulare il comportamento idrodinamico del corso d'acqua per diversi scenari di rotte arginali e di ottenere quindi dei risultati che forniscono informazioni rilevanti per quanto riguarda l'evoluzione della breccia e i territori allagati dalle acque fouriuscite dal Roncajette nel caso di una piena del tutto analoga a quella del Novembre 2010.

Alla luce dei risultati ottenuti appare chiaro che il connubio tra le tecniche geofisiche e la modellazione matematica possa fornire un utile strumento sia per la caratterizzazione dei rilevati arginali in relazione all'individuazione di possibili zone critiche che potrebbero portare alla formazione di rotte arginali durante il passaggio di piene con importanti, sia per fornire degli elementi previsionali capaci di condurre verso una corretta pianificazione territoriale.

Dai risultati ottenuti dalle simulazioni si evince che la formazione di brecce in sinistra idrografica del Canale Roncajette porta all'allagamento di aree più

estese rispetto al caso di brecce in destra idrografica: le massime aree allagate, così come i massimi volumi, sono infatti relative alle brecce 1, 7, 9 in sinistra idrografica.

Sviluppi futuri potrebbero mirare a creare delle mappe di pericolosità (in funzione dei tiranti e delle velocità ottenute per effetto delle diverse brecce simulate) e di rischio per le zone qui indagate e per altre zone in cui fosse possibile accoppiare analisi geofisiche ad analisi di carattere idraulico.

Allegato A

Risultati per la breccia N° 2

Tab. A.1: Risultati delle simulazioni per le Breccia N° 2 in prossimità della frazione di Voltabarozzo.

	Unità	Breccia 2
B_f	m	25
t	ore/min	69
t_c	ore/min	24 h 40'
τ_{cr}	Pa	5
τ_{max}	Pa	50.40
Q_{max}	m^3/s	214.3
S_{allag}	km^2	30
V_t	$10^6 m^3$	28.3

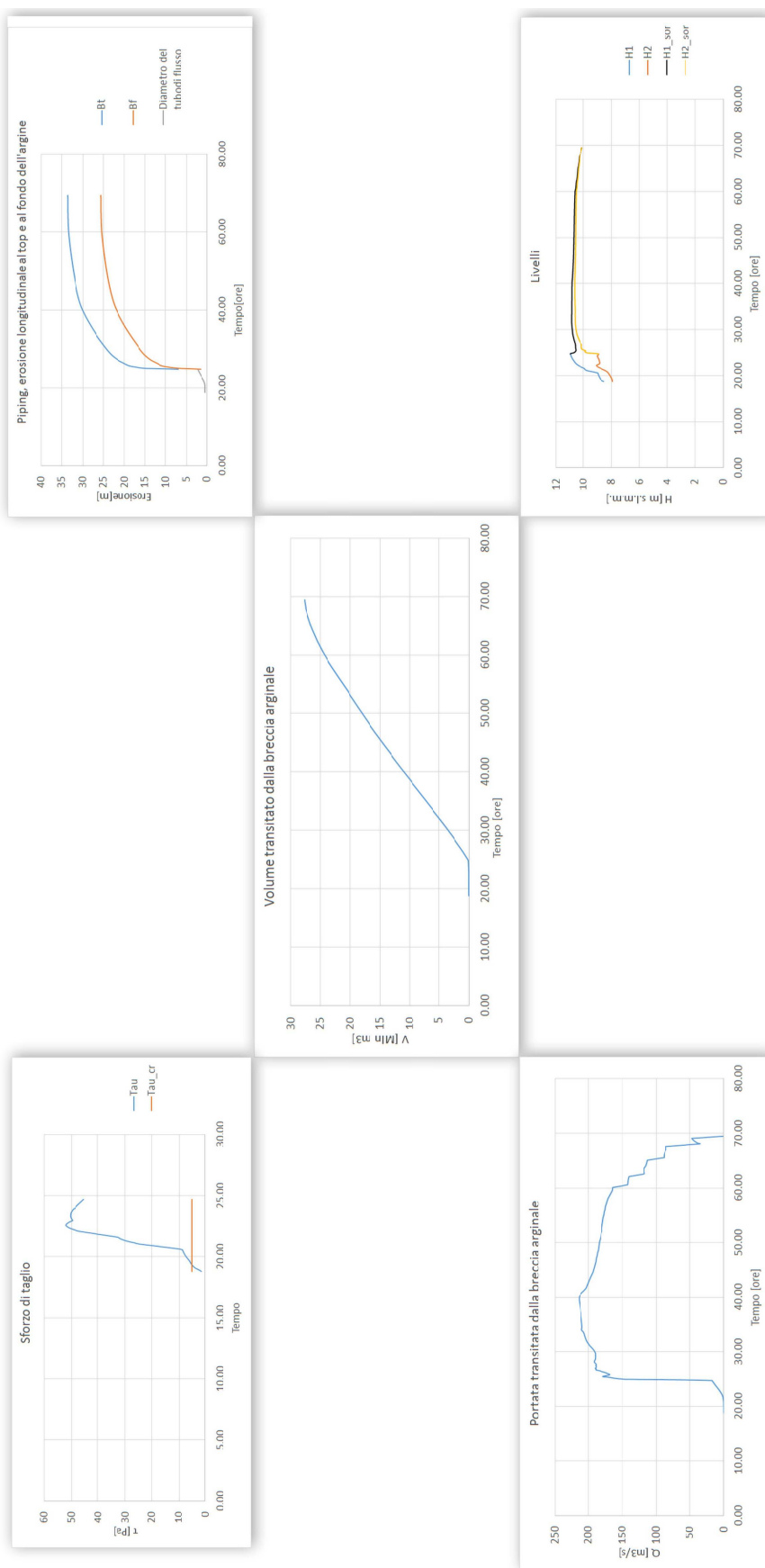


Fig. A.1: Risultati ottenuti per la simulazione della rotta arginale N° 2.

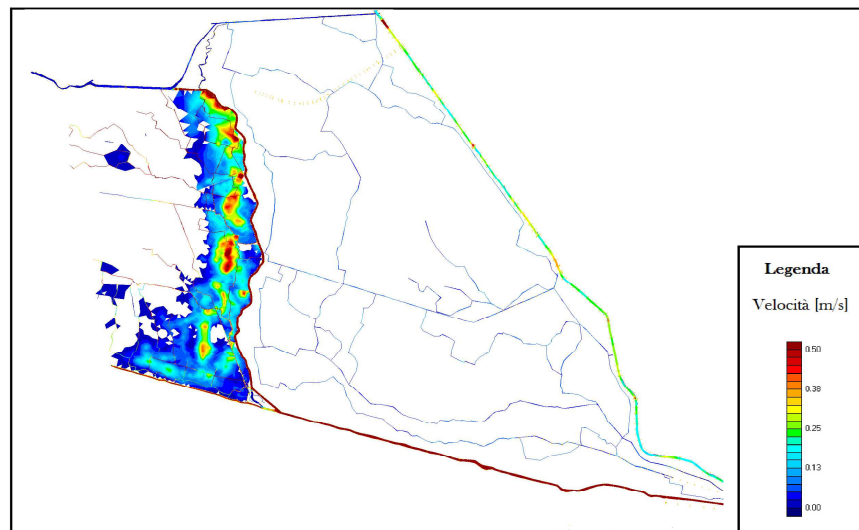
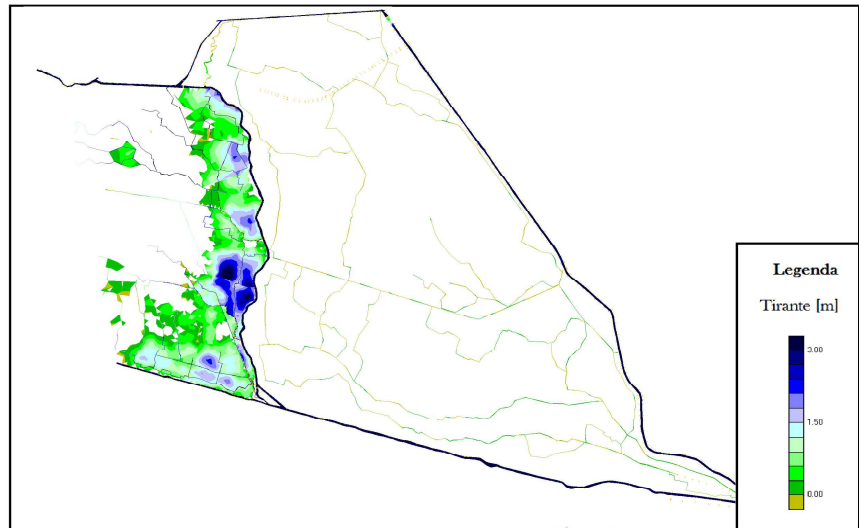


Fig. A.2: Risultati delle simulazioni per la Breccia N° 2, distribuzione dei valori dei tiranti e delle velocità.

Allegato B

Risultati per le brecce N° 6 e 7

Tab. B.1: Risultati delle simulazioni per le Brecce in prossimità di Ponte San Nicolò.

	Unità	Breccia 6	Breccia 7
B_f	m	13	32
t	ore	77	79
t_c	ore/min	27 h 24'	26 h 15'
τ_{cr}	Pa	5	5
τ_{max}	Pa	32.70	39.27
Q_{max}	m^3/s	106.3	223.4
S_{allag}	km^2	50	27
V_t	$10^6 m^3$	12.9	30.64

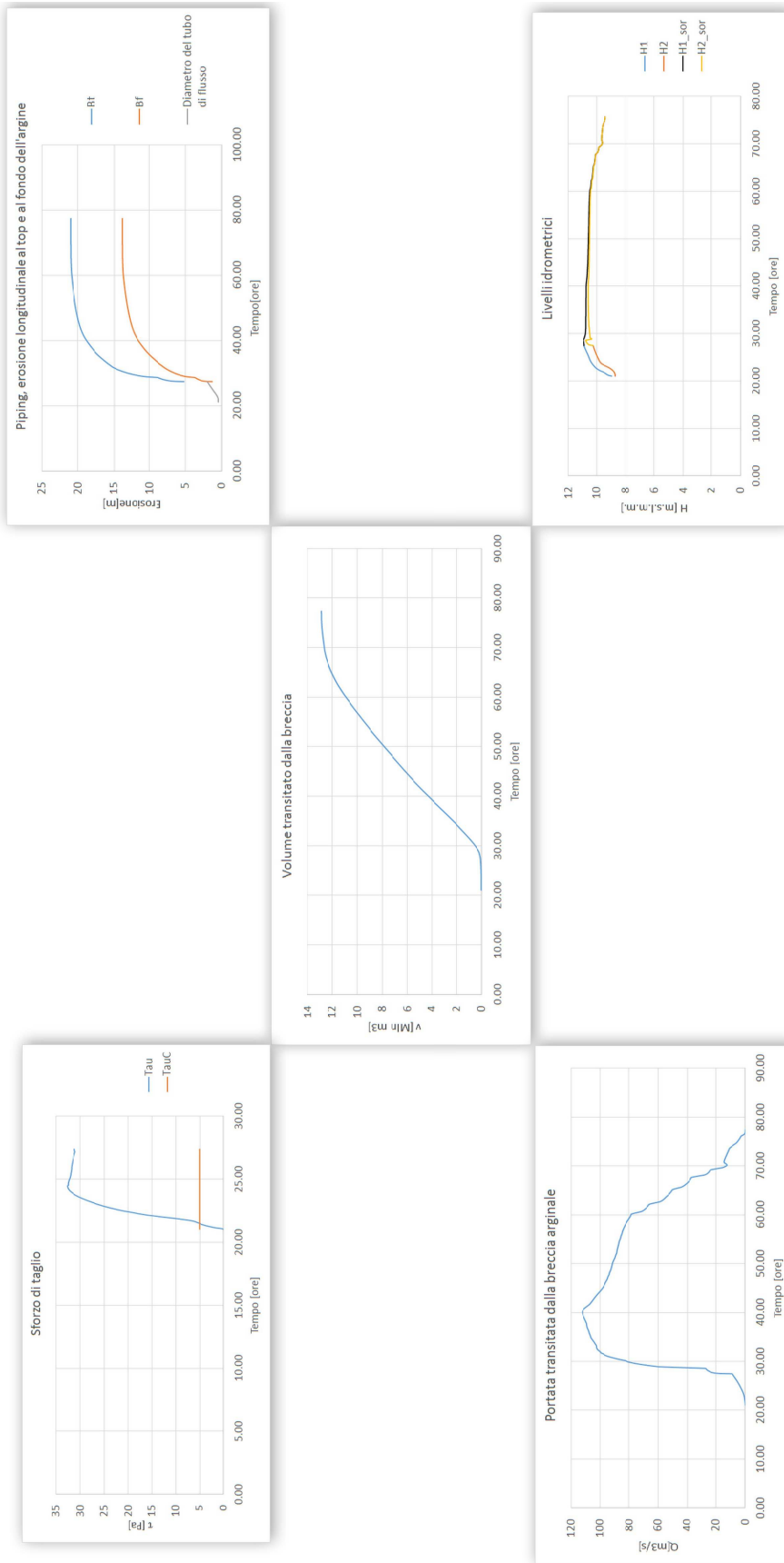


Fig. B.1: Risultati ottenuti per la simulazione della rotta arginale N° 6.

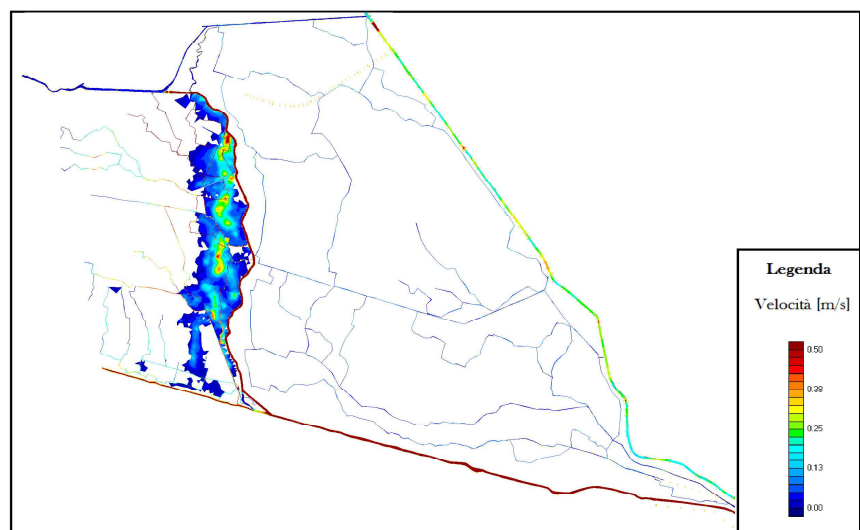
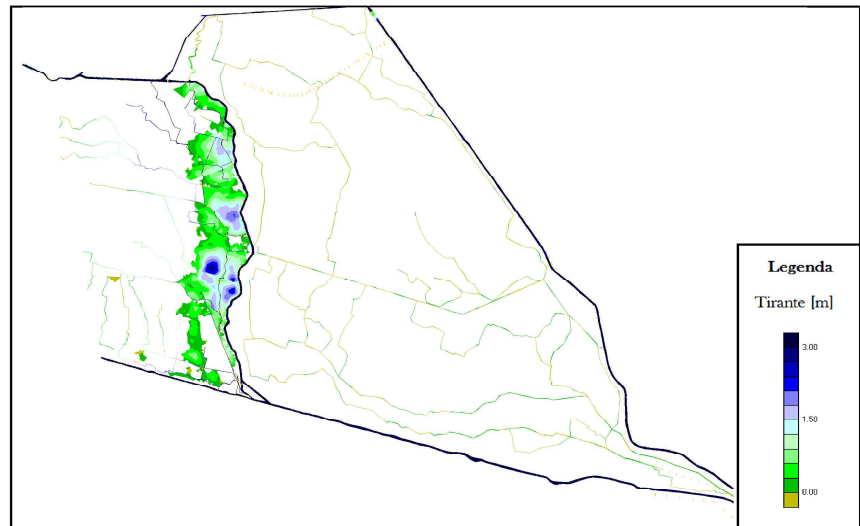


Fig. B.2: Risultati delle simulazioni per la Breccia N° 6, distribuzione dei valori dei tiranti e delle velocità.

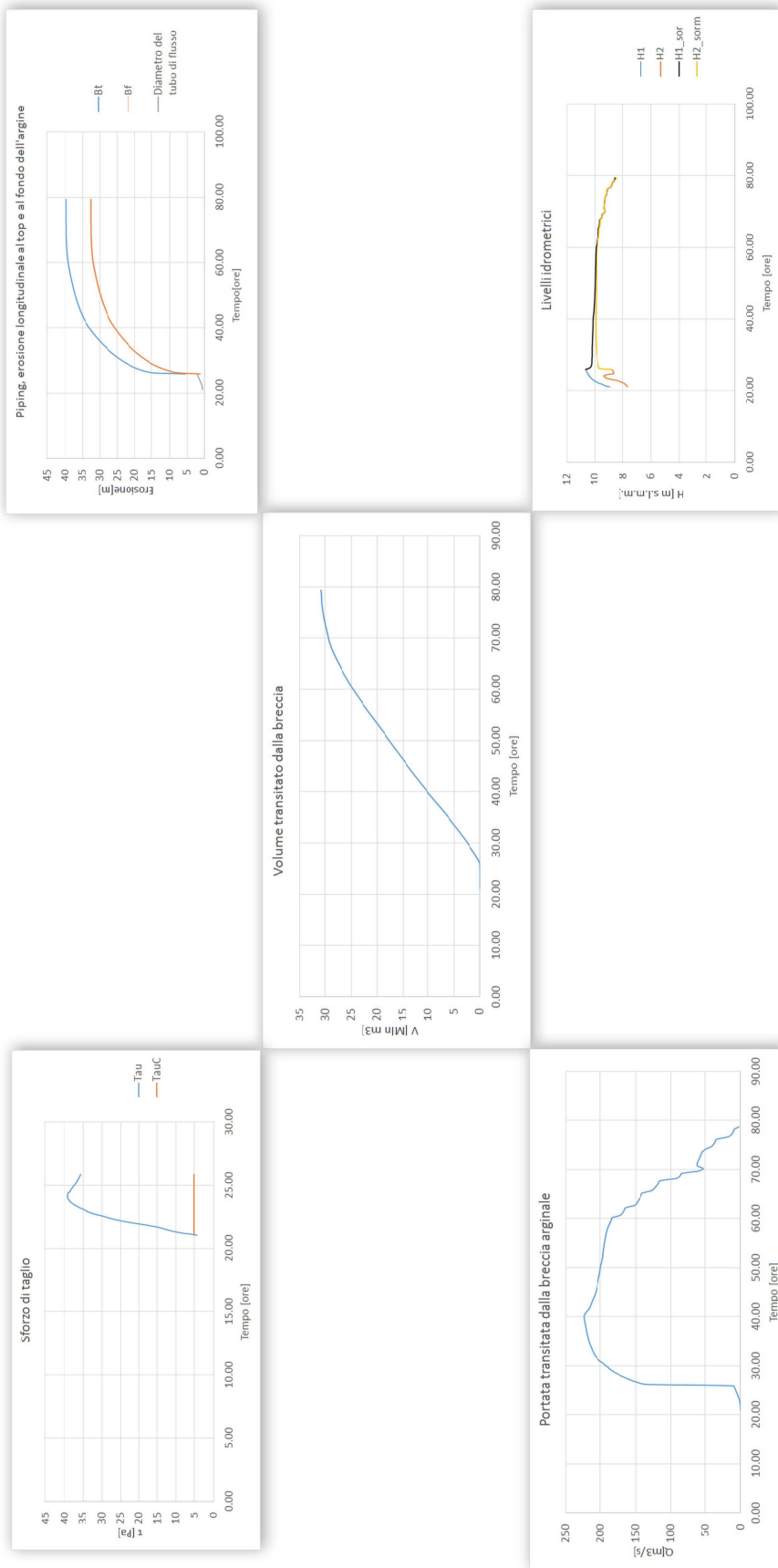


Fig. B.3: Risultati ottenuti per la simulazione della rotta arginale N° 7.

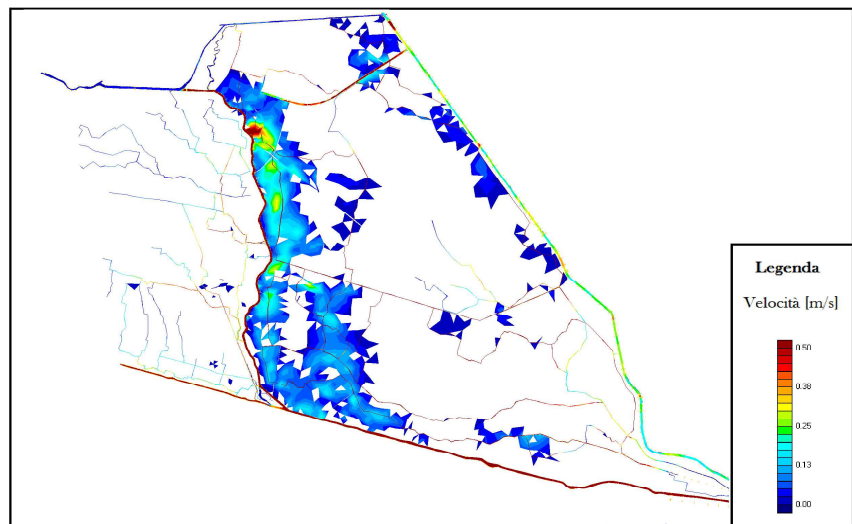
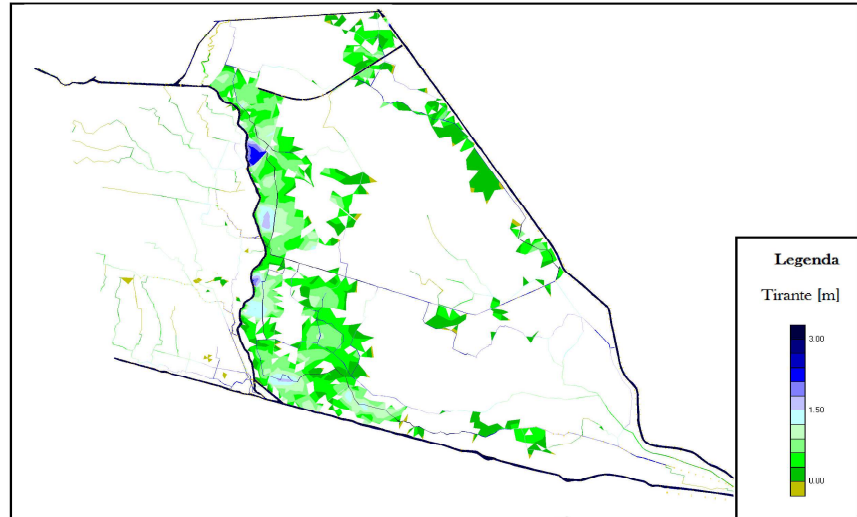


Fig. B.4: Risultati delle simulazioni per la Breccia N° 7, distribuzione dei valori dei tiranti e delle velocità.

Allegato C

Risultati per le breccie N° 8 e 9

Tab. C.1: Risultati delle simulazioni per le Breccie in prossimità di Roncayette.

	Unità	Breccia 8	Breccia 9
B_f	m	52	80
t	ore/min	83 h 20'	80 h
t_c	ore/min	22 h 7'	26 h 10'
τ_{cr}	Pa	5	5
τ_{max}	Pa	50.91	56.41
Q_{max}	m^3/s	242.4	317.6
S_{allag}	km^2	27	70
V_t	$10^6 m^3$	36.54	46.95

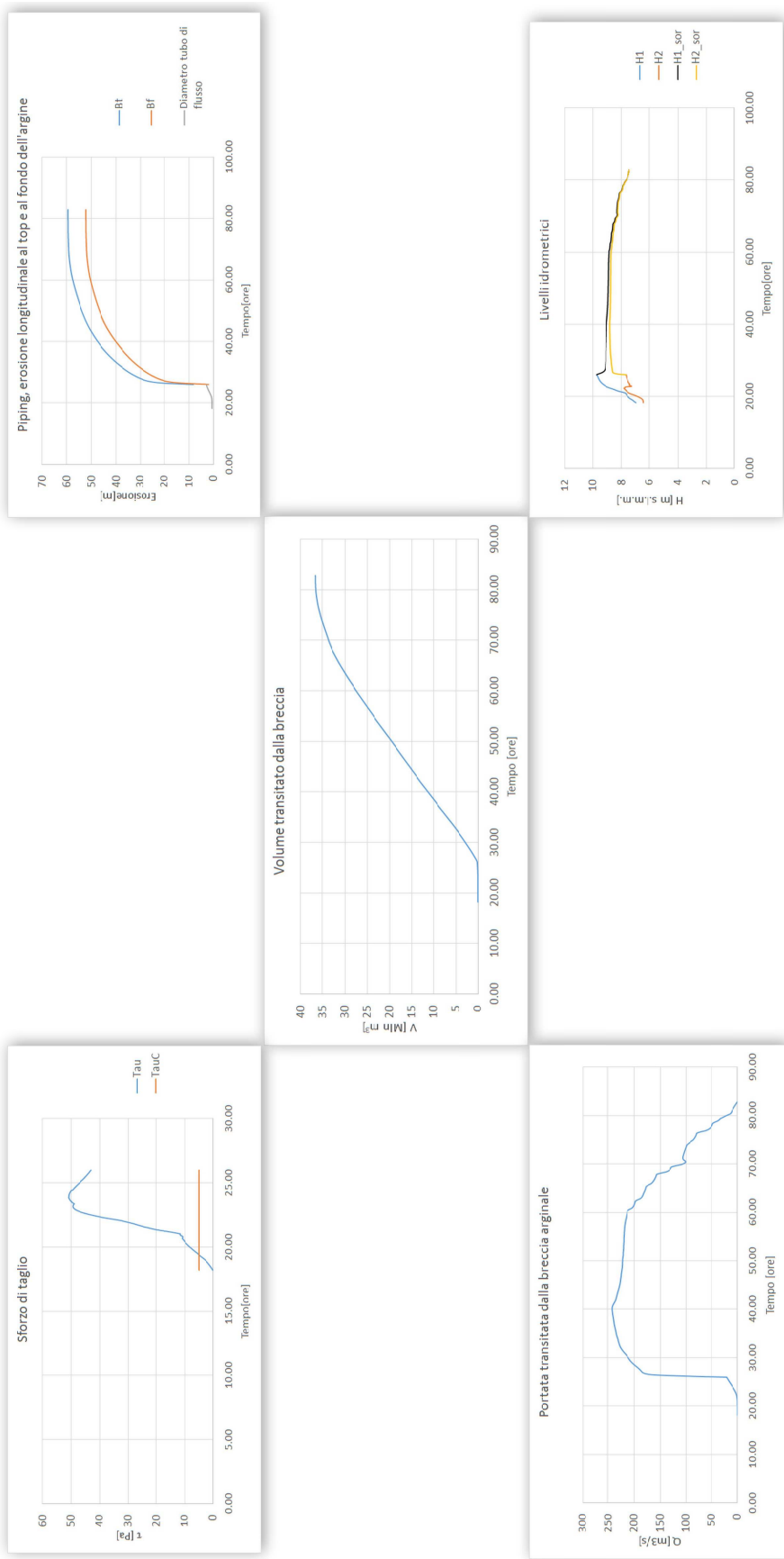


Fig. C.1: Risultati ottenuti per la simulazione della rotta arginale N° 8.

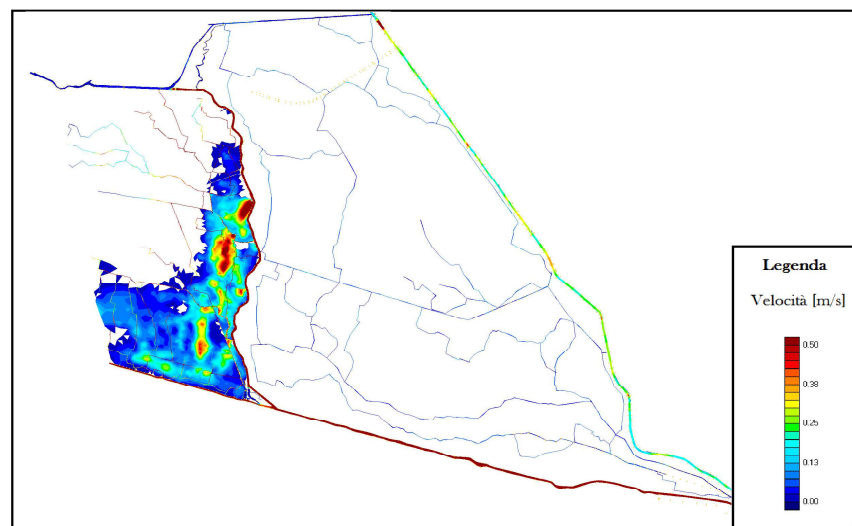
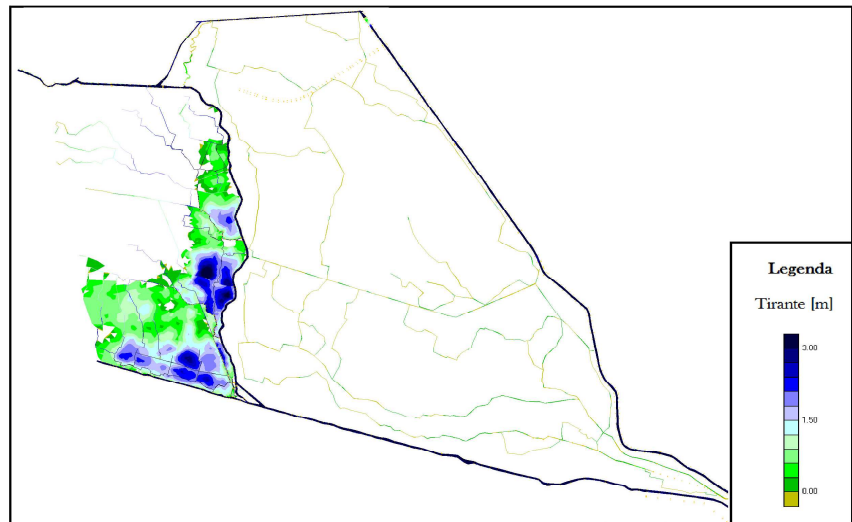


Fig. C.2: Risultati delle simulazioni per la Breccia N° 8, distribuzione dei valori dei tiranti e delle velocità.

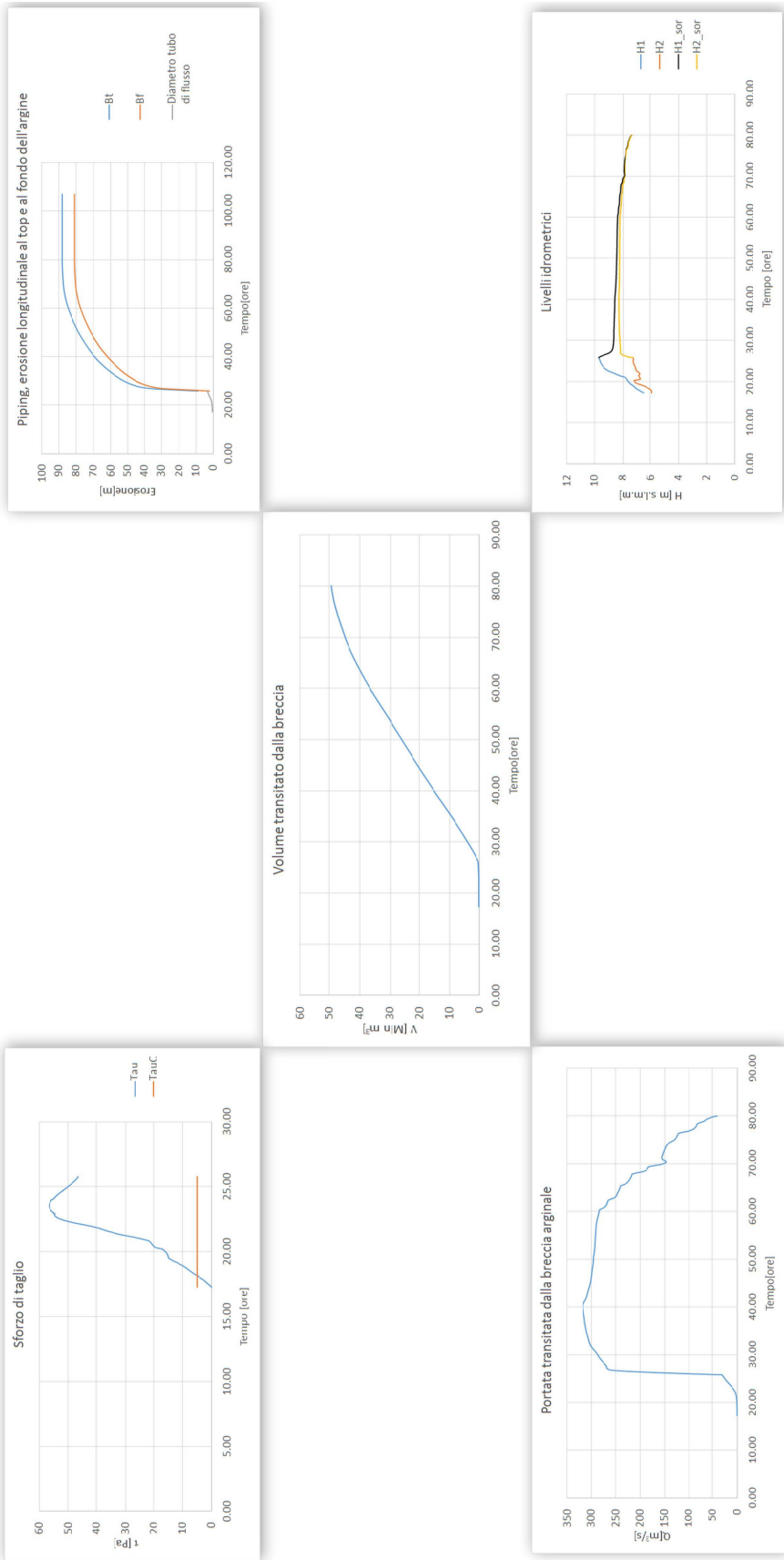


Fig. C.3: Risultati ottenuti per la simulazione della rotta arginale N° 9.

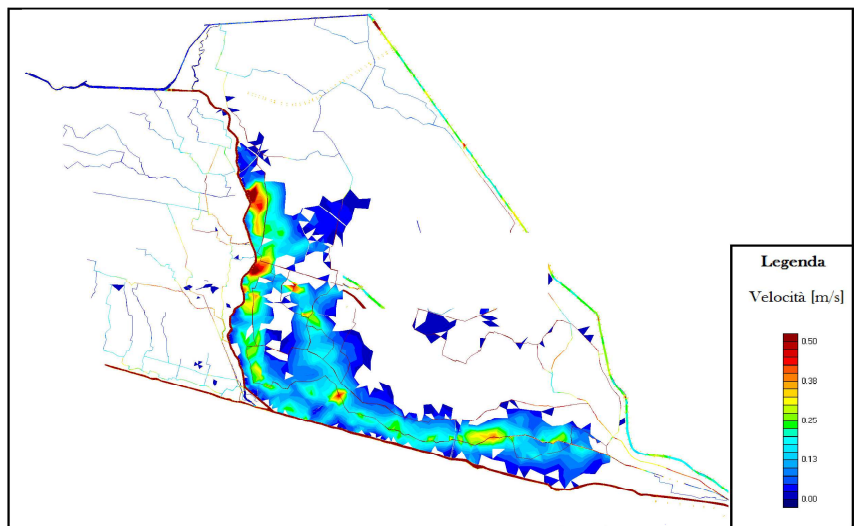
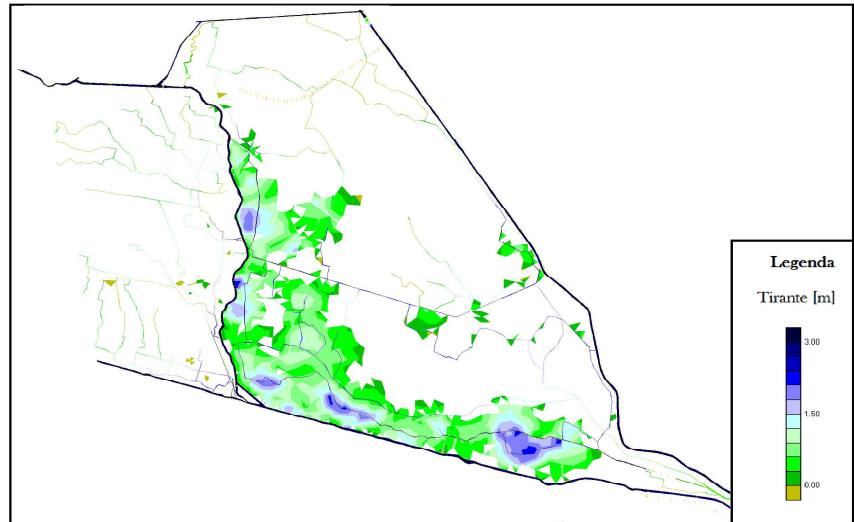
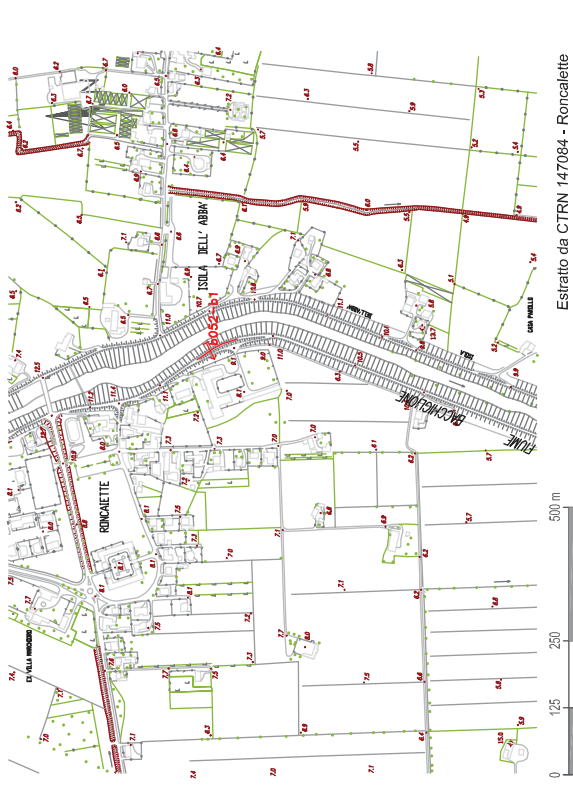
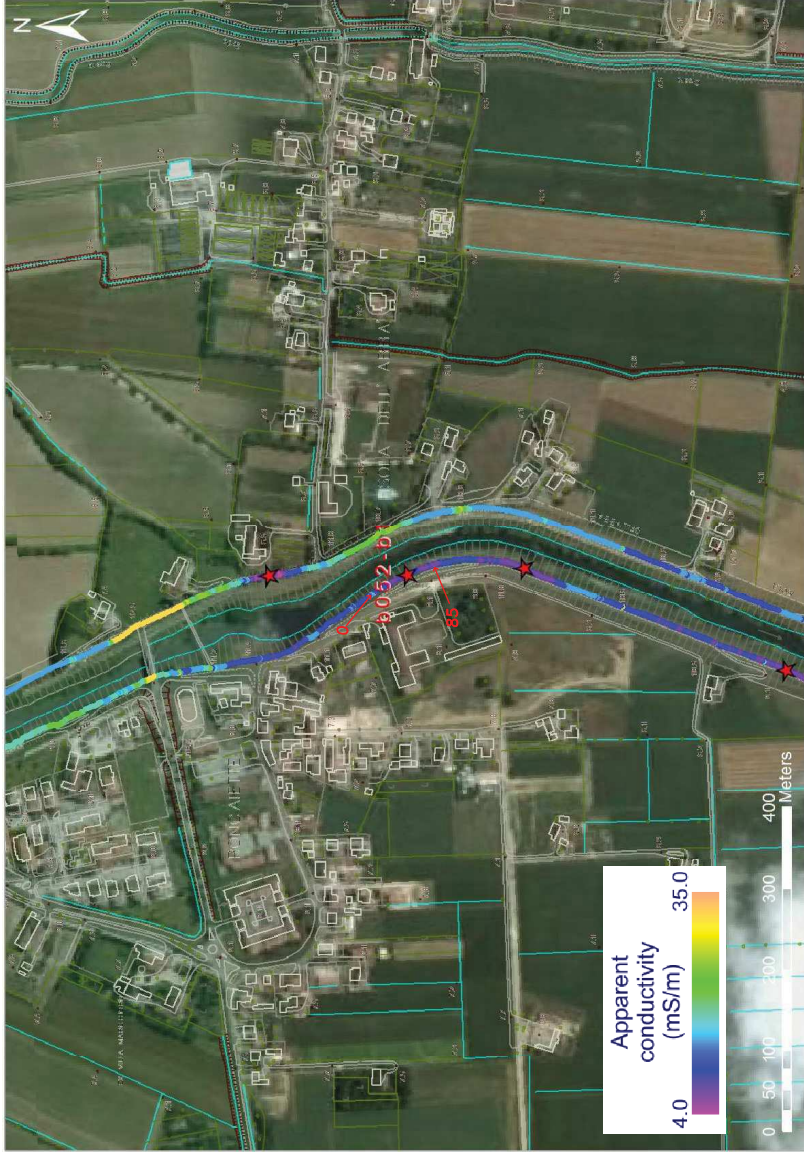


Fig. C.4: Risultati delle simulazioni per la Breccia N° 9, distribuzione dei valori dei tiranti e delle velocità.

Allegato D

**Tavole delle anomalie geogisiche.
Studio dell'OGS**



PROFILO b052-b1
angolo destro

QUOTE	7.07	1.61	0	6.44	7.07	5.02	10.51	11.5	10.37	16.87	8.81	26.03	8.47	31.09
DISTANZE PROGRESSIVE														
latio fiume														
latio campagna														
profondità														

DESCRIZIONE:

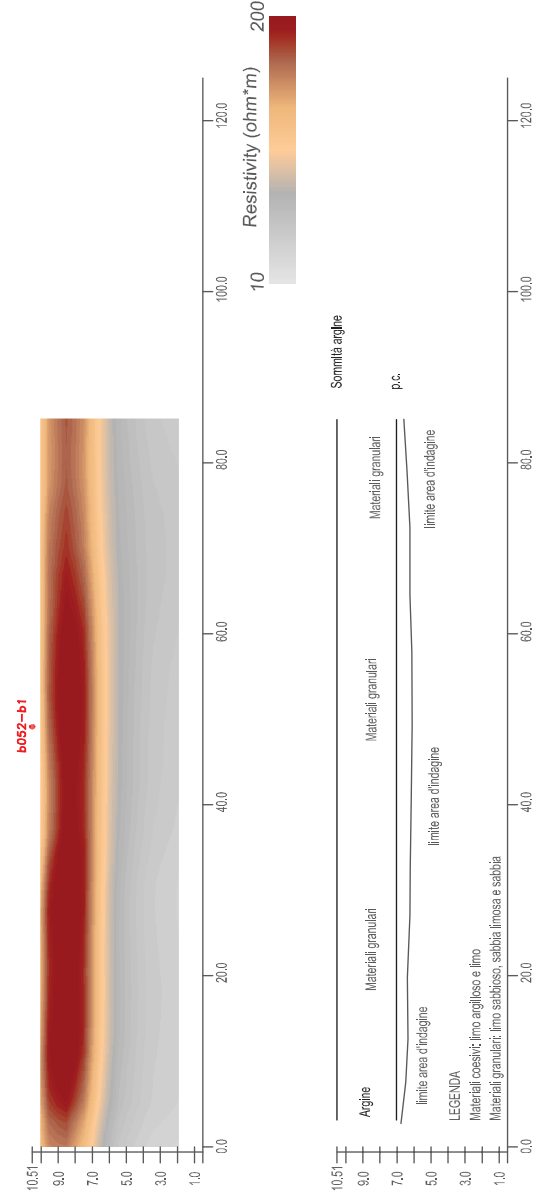
Lunghezza: 80 m

Posizione: CB

Severità: MA

(S=sommità originale; C=corpo; B=base e sottobase)
(B=bassa; M=media; A=alta)

Note:



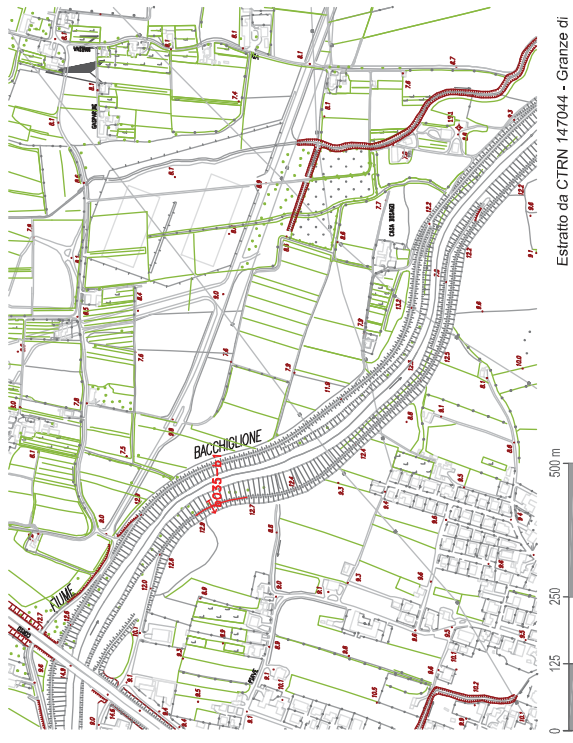
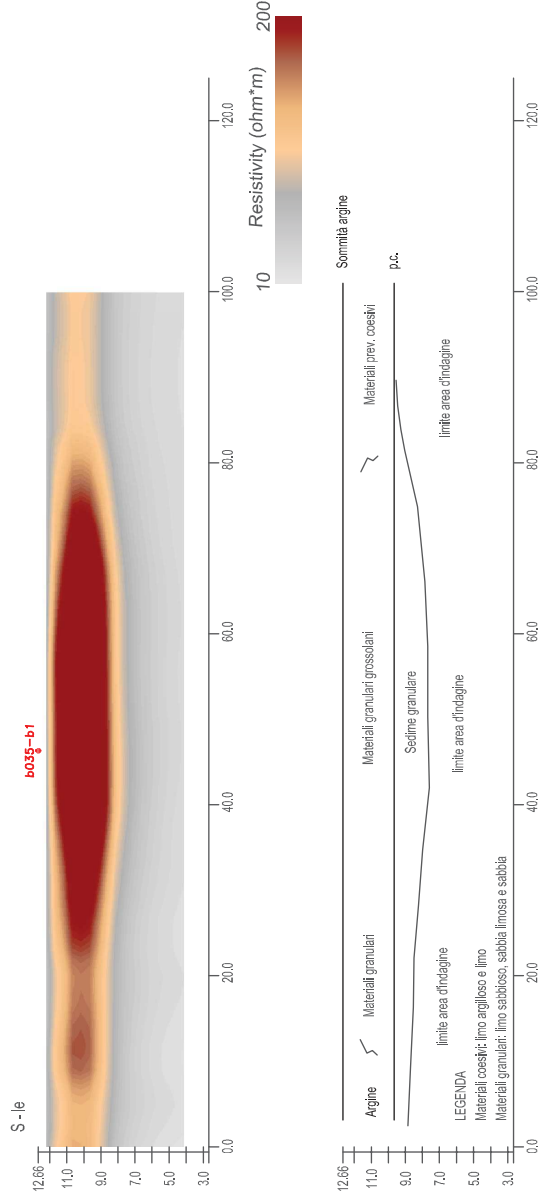
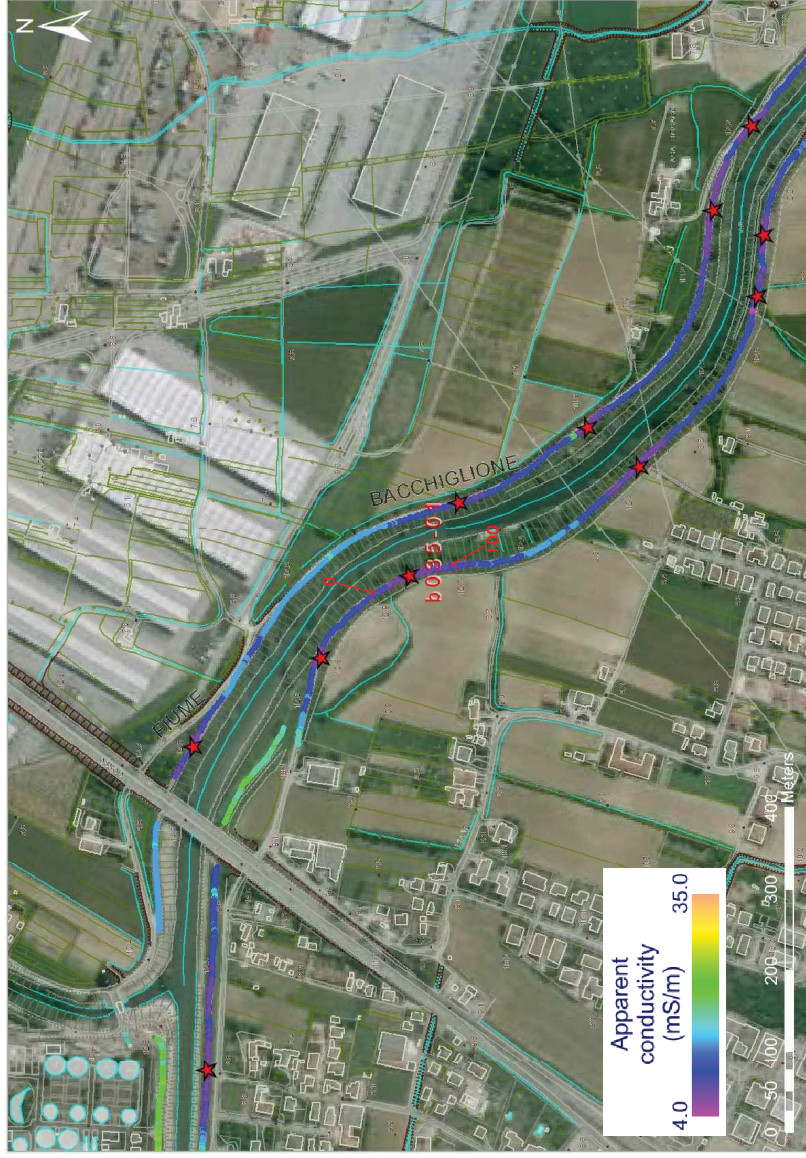
Resistivity (ohm*m) 200
10

Sommità argine

10.51	Argine	Materiali granulari	Materiali granulari	Materiali granulari
9.0				
7.0				
5.0	limite area d'indagine		limite area d'indagine	
3.0	LEGENDA			
1.0	Materiali coesivi: limo argilloso e limo			
	Materiali granulari: limo sabbioso, sabbia limosa e sabbia			

REGIONE DEL VENETO		Scheda di anomalia geofisica	
OGS 2014/50	Rilievo degli argini del Fiume Bacchiglione nel tratto Vicenza - Bovolenta	Comune: Ponte San Nicolò	Provincia: Padova
Elaborato: Francese, Giorgi	Resp. Scientifici: R. Francese	2014050_Tavola_b1_b052	Data: ott-2014
Controllo: Francese, Giorgi	Tavola: b1	Foglio: b052	Scala: -





PROFILO b035-b1
argilla destra

QUOTE	9.95	2.01	9.97	3.41	12.66	11.19	12.61	14.89	9.85	18.92	
DISTANZE PROGRESSIVE	0	8.42	0	9.97	3.41	12.66	11.19	12.61	14.89	9.85	18.92
lato fiume											
lato campagna											

DESCRIZIONE:

Lunghezza: 75 m

Posizione: CB

Severità: A

Note:

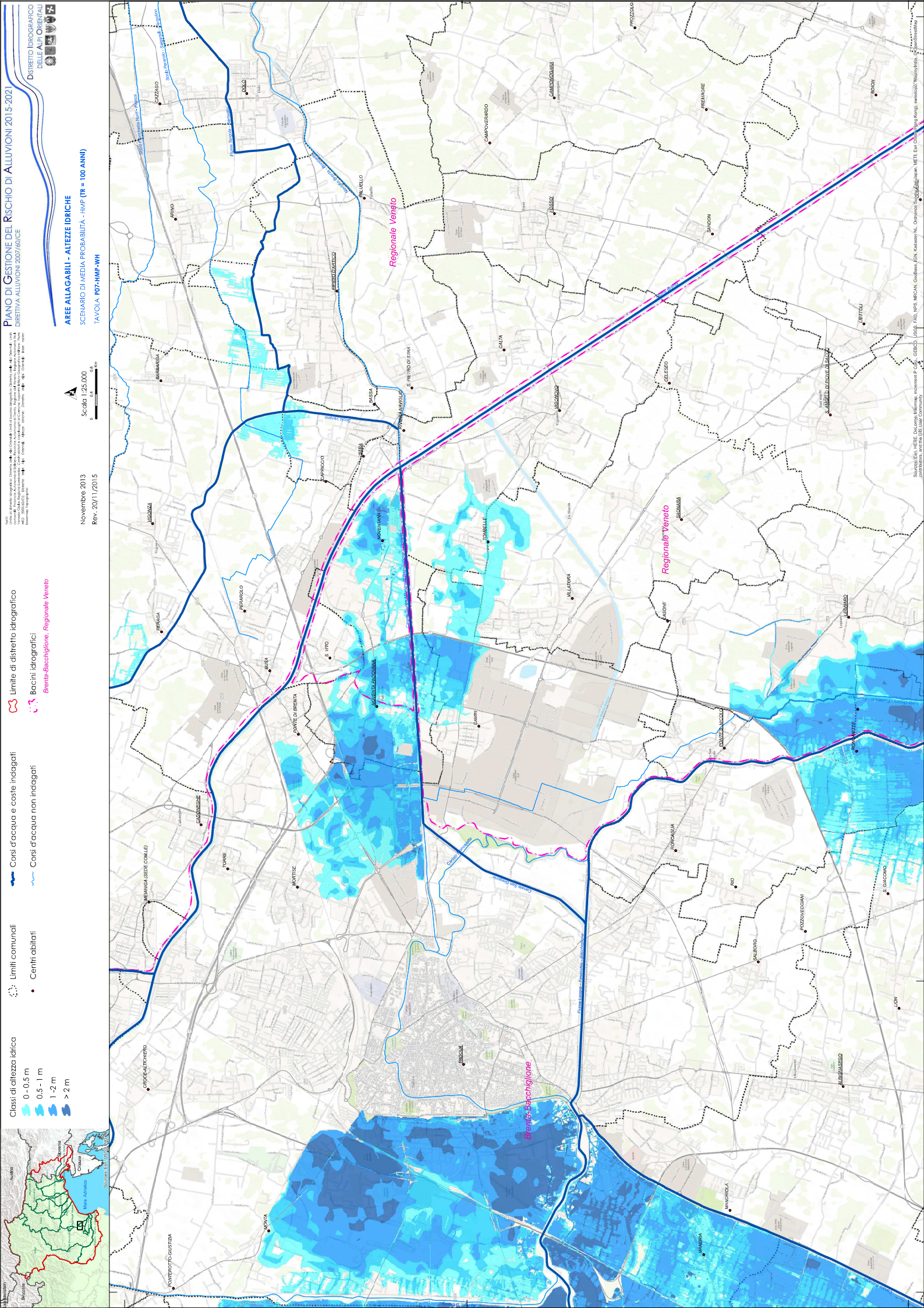
(S=sommità arginale; C=corpo; B=base e sottobase)
(B=bassa; M=media; A=alta)

REGIONE DEL VENETO		Schema di anomalia geofisica			
OGS 2014/50	Titolo:	Rilievo degli argini del Fiume Bacchiglione nel tratto Vicenza - Bovolenta			
Progetto:		Sperimentazione e messa a punto di un protocollo di misura geofisica per la verifica della consistenza dei rilievi arginali nel territorio della Regione del Veneto		Comune: Ponte San Nicolò	
Elaborato:		Francesse, Giorgi		Provincia: Padova	
Resp. Scientifici:		R. Francesse		Data: ott-2014	
Tavola:		b1		Foglio: 2014050_Tavola_b1_b035	
Scala:		-		-	



Allegato E

**Tavole del Piano di Gestione per il
Rischio Alluvioni 2015 - 2021.
Aree allagabili - Altezze idriche**



- Classi di altezza idrica**
- 0 - 0,5 m
 - 0,5 - 1 m
 - 1 - 2 m
 - > 2 m

- Limiti comunali**
- Centri abitati

- Corse d'acqua e coste indagati**
- Corse d'acqua non indagati

- Limiti di distretto idrografico**
- Bacini idrografici
 - Bacini-Bacchiglione, Regione Veneto

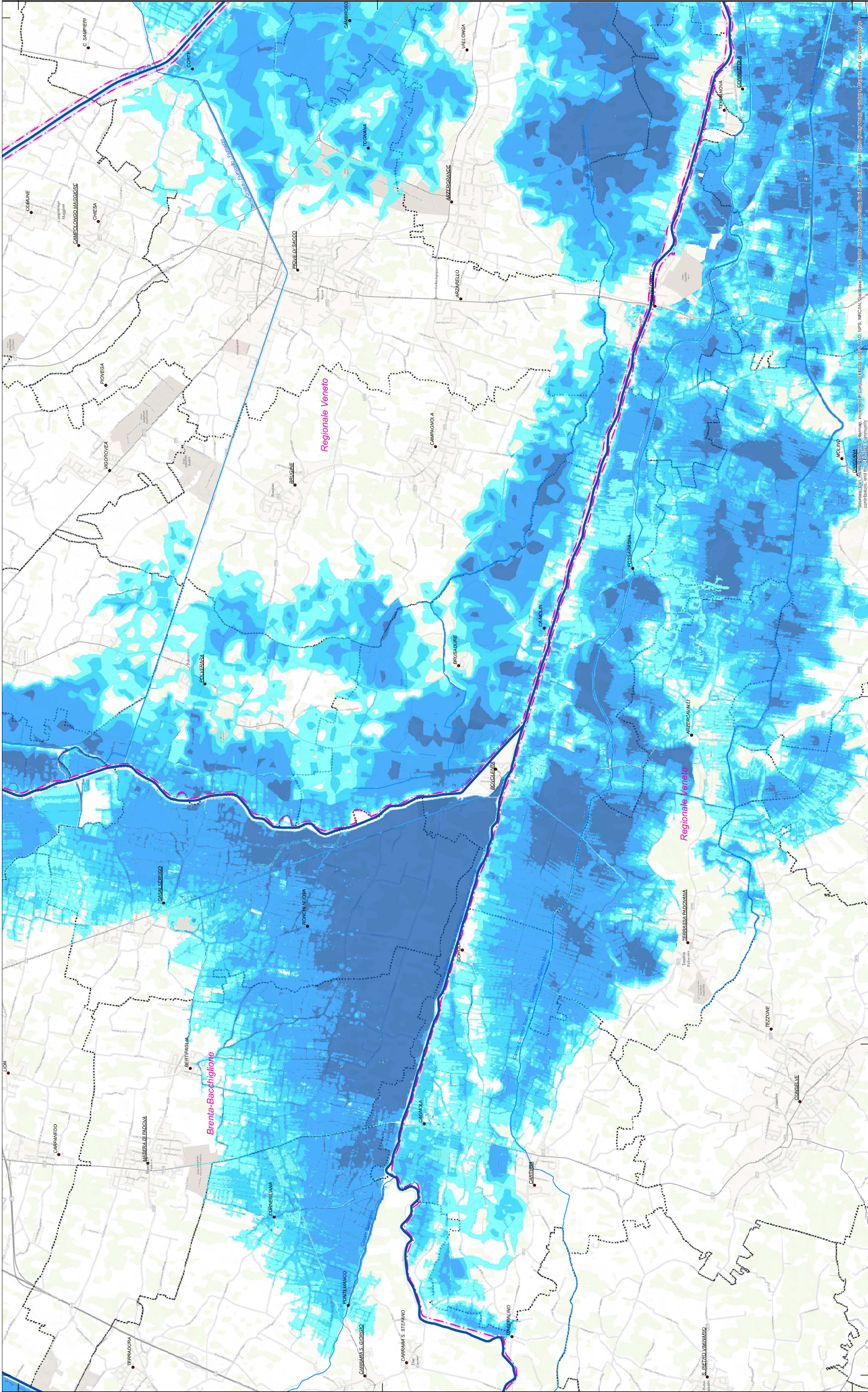
AREE ALLAGABILI - ALTEZZE IDRICHE

SCENARIO DI MEDIA PROBABILITÀ - HMP (TR = 100 ANNI)

TAVOLO P07-HMP-WH

Scale 1:25.000

Novembre 2013
Rev. 20/11/2015



Brenta-Bacchiglione

Regionale Veneto

Regionale Veneto

Allegato F

Chronostratigraphic chart

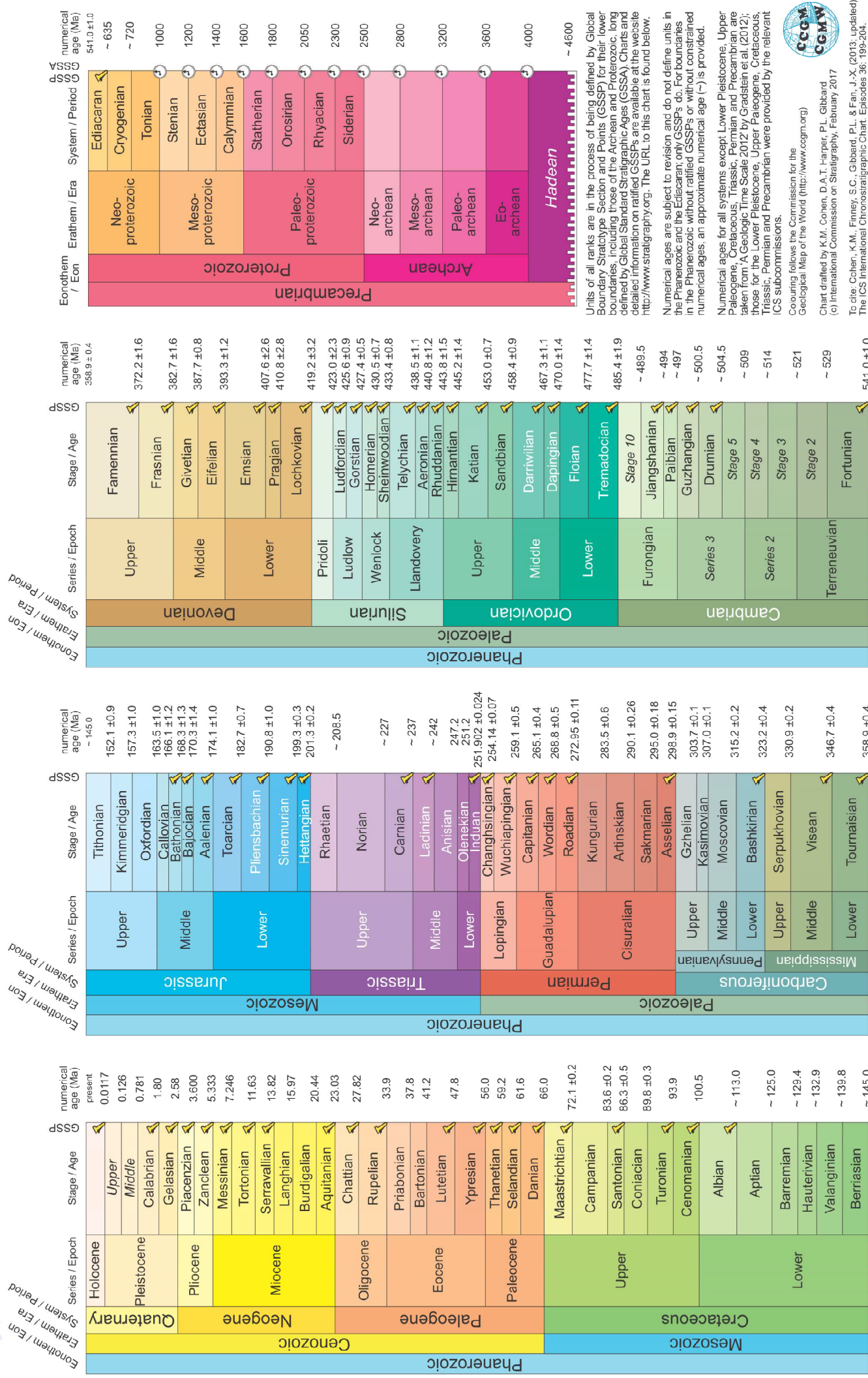


INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART

www.stratigraphy.org

International Commission on Stratigraphy

v 2017/02



Bibliografia

- [1] Autorità di Bacino, 2012. *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico dei bacini idrografici dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Piave e Brenta-Bacchiglione*. Relazione generale.
- [2] American Society of Civil Engineers, 2010. *So, You Live Behind a Levee!*.
- [3] ASCE/EWRI. *Task Committee on Dam/Levee Breaching. Earthen Embankment Breaching*. J Hydraul Eng 2011; 137(12):1549-1564. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000498
- [4] Bates, P. D., Anderson, M. G., and Hervouet M., 1995. *An initial comparison of two 2-dimensional finite element codes for river flood simulation*. Proc. Inst. Civ. Eng., Part 2, 112, 238–248.
- [5] Boaga J., 2017. *The use of FDEM in hydrogeophysics: A review*. In: Journal of Applied Geophysics.
- [6] Bonelli S, Brivois O. *The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop*. Int J Numer Anal Meth Geomech 2008; 32:1573-1595. doi:10.1002/nag.683
- [7] Busato L., Boaga J., Peruzzo L., Himi M., Cola S., Bersan S., Cassiani G., 2016. *Combined geophysical surveys for the characterization of a reconstructed river embankment*. In: Engineering Geology.
- [8] Chow VT. *Open-channel Hydraulics*. New York, McGraw-Hill Book Co; 1959.
- [9] Corrao M., Coco G., 2009. *Geofisica applicata*. Flaccovio Editore.

- [10] Cucato M., De Vecchi G. P., Mozzi P., Abbà T., Paiero R., Sedea R., 2012. *Note illustrative della Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 147-Padova Sud*. ISPRA-Servizio Geologico d'Italia–Regione Veneto, LTS Land Technology Services, Padova e Treviso.
- [11] D'Alpaos, L., 2016. *Un giorno, ospite inatteso, arrivò l'alluvione*. Grafiche Antiga Crocetta del Montello (TV).
- [12] D'Alpaos, L., Defina A., Matticchio B., 1994. *A new set of equations for very shallow water and partially dry areas suitable to 2D numerical models*. In: *Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas*. ASCE, 1994. p. 72-81.
- [13] D'Alpaos, L., Defina A., and Matticchio B., 1994. *2D finite element modelling of flooding due to river bank collapse*. On “Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas” P. Molinaro and L. Natale eds, pp. 60–71, ASCE, New York.
- [14] Da Deppo L., Datei C., Salandin P., 2016. *Sistemazione dei corsi d'acqua*. In: *Water Resources Research*. Edizioni Progetto.
- [15] Da Deppo L., Datei C., 2011. *Manuale sulla difesa dalle esondazioni e sulla chiusura delle rotte arginali*. Edizioni Progetto.
- [16] Defina, Andrea 2000. «*Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas*». In: *Water Resources Research* 36, pp. 3251–3264
- [17] Fontana A., Mozzi P., Bondesan A., 2004. *L'evoluzione Geomorfologica della pianura veneto-friulana*. Note illustrative della carta geomorfologica della provincia di Venezia. Esedra, Venezia, 113-136.
- [18] Fontana A., 2006. *Evoluzione geomorfologica della bassa pianura friulana e sue relazioni con le dinamiche insediative antiche*. Ed. del Museo Friulano di Storia Naturale.
- [19] Fread DL. *Breach: an erosion model for earthen dam failures. Model description and User Manual*. NOAA, Silver Spring, Maryland, USA 1988.

- [20] Gisotti G., Benedini M., 2012. *Il dissesto idrogeologico: previsione, prevenzione e mitigazione del rischio*. Dario Flaccovio editore.
- [21] Horritt M.S., and Bates P.D., 2001. *Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach*. *Hydrol. Process.* 15, 825–842.
- [22] Lachouette D, Golay F, Bonelli S. *One-dimensional modeling of piping flow erosion*. *CR Mecanique* 2008; 336:731-736. doi:10.1016/j.crme.2008.06.007.
- [23] Mozzi P., 2005. *Alluvial plain formation during the late Quaternary between the southern Alpine margin and the lagoon of Venice (northern Italy)*. *Suppl. Geogr. Fis. Quat.*, 7.
- [24] Orlandini S., Moretti G., Albertson J.D., 2015. *Evidence of an emerging levee failure mechanism causing disastrous floods in Italy*. In: *Water Resources Research*.
- [25] Servizio geologico d'Italia, 2012. *Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 Foglio 147*. ISPRA-Servizio Geologico d'Italia–Regione Veneto, LTS Land Technology Services, Padova e Treviso.
- [26] Sharma P.V., 1997. *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge University Press.
- [27] Sofia G., Masin R., Tarolli P., 2017. *Prospects for crowdsourced information on the geomorphic 'engineering' by the invasive Coypu (*Myocastor coypus*)*. In: *Earth Surface Processes and Landforms*.
- [28] Viero D.P., D'Alpaos A., Carniello L., Defina A., 2013. *Mathematical modeling of flooding due to river bank failure*. In: *Advances in Water Resources*.
- [29] Visser P.J. *Breach growth in sand-dikes*. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands 1998.