



Contratto di Fiume **Canale Reale**

Allegato 3

Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

febbraio 2021

Documento Strategico

febbraio 2021

Contratto di Fiume Canale Reale

Accordo per l'esecuzione delle attività relative al primo progetto pilota per l'implementazione dello strumento dei Contratti di Fiume



Regione Puglia

R. Piemontese – *Assessore Risorse idriche e Tutela delle acque*

Dipartimento Agricoltura, Sviluppo Rurale e Ambientale – Sezione Risorse Idriche

A. Zotti – *Dirigente della Sezione*

C. Campana – *P. O. Pianificazione e Gestione Utilizzi Idrici*



Politecnico di Bari

L. Ficarelli – *Responsabile Scientifico*
F. Calace – *Coordinamento*

Aspetti idrologici ed idraulici

M. Mossa, F. De Serio – *Responsabili*

I. Pierri

Segreteria Tecnica-Operativa per il Contratto di Fiume del Canale Reale

C. Angelastro – *Responsabile*

F. Marcucci, O. G. Paparusso, N. Scardigno

Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

A cura di

M. Mossa, F. De Serio, I. Pierri (*Politecnico di Bari*)

INDICE

1. PREMESSA	2
2. ANALISI CONOSCITIVA DEL CANALE REALE	3
2.1 Documenti pregressi disponibili.....	3
2.2 Descrizione idrogeomorfologica del bacino.....	3
3. ANALISI IDROLOGICA DEL BACINO IDROGRAFICO DEL CANALE REALE	13
3.1 Normativa di riferimento.....	13
3.2 Studio idrologico.....	14
3.2.1 <i>Analisi idromorfologica di dettaglio</i>	15
3.2.2 <i>Analisi pluviometrica</i>	16
3.2.3 <i>Metodo SCS – CN per il calcolo della pioggia netta o efficace</i>	18
3.2.4 <i>Metodo di trasformazione afflussi – deflussi per il calcolo delle portate di piena</i>	22
4. STUDIO IDRAULICO	24
4.1 Modellazione della geometria del Canale Reale.....	24
4.2 Generalità sul codice di calcolo Hec - Ras.....	27
4.3 Modellazione monodimensionale.....	28
4.3.1 <i>Risultati dell'analisi monodimensionale</i>	29
4.4 Modellazione bidimensionale.....	36
4.4.1 <i>Creazione del modello bidimensionale del Canale Reale</i>	37
4.4.2 <i>Risultati dell'analisi bidimensionale</i>	39
4.4.2.1 <i>Stato di fatto</i>	39
4.4.2.2 <i>Ipotesi di intervento progettuale per la mitigazione del rischio idraulico</i>	44
5. CONCLUSIONI PRELIMINARI	53

L'Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale si compone:

- della presente **Relazione**;
- degli allegati **Elaborati grafici 1-17**.

1. PREMESSA

Nell'ambito dell'*Accordo tra la Regione Puglia e il Politecnico di Bari per l'esecuzione delle attività relative al primo progetto pilota per l'implementazione dello strumento dei Contratti di Fiume* (Responsabile Scientifico prof.ssa L. Ficarelli), il Gruppo di Ricerca 'Idraulica' del DICATECh del Politecnico di Bari è stato invitato a fornire il proprio contributo tecnico-scientifico, con particolare riferimento alla fase di 'Redazione di linee guida per l'implementazione del Contratto di Fiume del Canale Reale'.

La presente relazione viene redatta per illustrare l'attività condotta dal team, costituito dal prof. M. Mossa, dalla prof.ssa F. De Serio e dall'ing. I. Pierri. Tale attività è relativa all'analisi conoscitiva, allo studio idrologico e idraulico del Canale Reale, con valutazione del rischio idraulico.

Lo studio idrologico è stato condotto attraverso classica metodologia VaPI, per la determinazione delle portate al colmo di piena da utilizzare nel successivo studio idraulico.

Lo studio idraulico, è stato effettuato mediante l'utilizzo del modello numerico open source HEC-RAS, considerando due diverse situazioni applicative. In un primo step, infatti, si è considerato lo stato di fatto del Canale Reale, al fine di individuare le maggiori criticità idrauliche. In questa fase si è proceduto ad effettuare innanzitutto una modellazione monodimensionale, che ha messo in luce le esondazioni con particolare riferimento agli attraversamenti idraulici. Successivamente si è passati ad una modellazione 2D, che ha consentito di definire le aree allagabili per la portata di piena considerata.

A tale proposito preme evidenziare che le portate di piena ottenute dallo studio idrologico ed adottate nello studio idraulico sono state quella con tempo di ritorno di 200 anni (secondo indicazioni di normativa) e quella con tempo di ritorno di soli 5 anni, su esplicita richiesta di alcuni sottoscrittori del Contratto di Fiume, interessati a studiare anche gli effetti di piene che possono definirsi quasi 'ordinarie' e che sul territorio si traducono in periodiche esondazioni e periodici danni.

Nel secondo step lo studio idraulico è stato ripetuto per tre differenti scenari progettuali, impiegando sia la portata di piena con tempo di ritorno 200 anni sia quella con tempo di ritorno 5 anni, con l'intento di mostrare come possibili ipotesi di intervento possano mitigare gli impatti sul territorio circostante.

2. ANALISI CONOSCITIVA DEL CANALE REALE

L'analisi conoscitiva ha l'obiettivo di ricostruire le caratteristiche del bacino idrografico del Canale Reale da un punto di vista morfologico, geologico, idrologico e dell'uso del suolo, con particolare attenzione i) alla corretta gestione delle risorse idriche, ii) alla mitigazione della pericolosità e salvaguardia dal rischio idraulico e iii) alla tutela e valorizzazione naturalistica dei territori fluviali e dell'area di foce nell'oasi protetta di Torre Guaceto, compatibilmente con i numerosi strumenti di pianificazione vigenti alla scala regionale (PAI, PTA, PPTR, PGRA).

2.1 Documenti pregressi disponibili

Va ricordato che all'analisi conoscitiva contribuiscono indubbiamente i principali studi pregressi già disponibili per il territorio Pugliese in generale e per questo bacino idrografico in particolare. Descritti dettagliatamente nel Dossier di Conoscenza di questo Contratto, si richiamano qui brevemente in ordine di successione temporale, per sola esigenza di completezza.

Il Canale Reale è stato indicato come uno dei corsi d'acqua d'interesse regionale già nel PAI (Piano di Assetto Idrogeologico) Puglia 2005 (aggiornato al 2017), quello strumento che si è posto come primo obiettivo un quadro conoscitivo generale dell'intero territorio di competenza dell'allora Autorità di Bacino (oggi Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale), con particolare riguardo alle caratteristiche morfologiche, geologiche ed idrologiche.

Successivamente è stato descritto nella Carta Idrogeomorfologica della Regione Puglia del 2007 (aggiornata al 2017) che intendeva costituire un quadro di conoscenze, coerente e aggiornato, dei diversi elementi fisici, soprattutto relativi agli assetti morfologici ed idrografici del territorio.

Gli aspetti maggiormente connessi al deflusso nel Canale Reale, quali scabrezza idraulica, portate per specifici tempi di ritorno, opere di attraversamento idraulico, e le maggiori criticità legate alle esondazioni sono stati oggetto di analisi nello 'Studio per la definizione delle opere necessarie alla messa in sicurezza del reticolo idraulico interessato dagli eventi alluvionali di ottobre e novembre 2005 nelle Province di Bari e Brindisi', inserito nell'Accordo di Programma Quadro in materia di difesa del suolo finanziato con risorse della delibera CIPE 35/2005. In questo studio (in particolare nell'allegato 6.7.0 'Interventi di mitigazione del rischio idraulico per il Canale Reale - Corografia Generale') si sono evidenziati, a valle di modellazione idraulica e sulla base di un indice di priorità, i due interventi di messa in sicurezza denominati '055IS01 Messa in sicurezza di aree ricadenti nel territorio comunale di Francavilla Fontana' e '055IS02 Messa in sicurezza dell'area PIP del comune di Latiano'.

Con il P.O. FESR Puglia 2007-2013 (approvato nel 2009) il Canale Reale è stato inserito tra le aste fluviali oggetto delle previste attività di monitoraggio dei dissesti e di analisi delle criticità.

Infine, le criticità idrauliche del Canale Reale sono state analizzate in sede di redazione del PGRA - Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (il cui ultimo aggiornamento è del dicembre 2019). Il PGRA di fatto contiene le mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni (predisposte ai sensi dell'articolo 6 del D. Lgs. 49/2010), predisposte dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale.

2.2 Descrizione idrogeomorfologica del bacino

Il Canale Reale, con il suo bacino di circa 224 km² e una lunghezza complessiva di 48,70 km, è tra i principali corsi d'acqua della regione Puglia e il più importante corso d'acqua del Salento. Dalla sua sorgente, situata nel territorio

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico

Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

del comune di Villa Castelli, attraversa i territori dei comuni di Francavilla Fontana, Oria, Latiano, Mesagne e Brindisi, sfociando nel Mar Adriatico nei pressi della Riserva Naturale Regionale di Torre Guaceto (Figg. 1 e 2). Il bacino idrografico del Canale Reale appartiene alla piana brindisina, un uniforme bassopiano compreso tra i rialti terrazzati delle Murge a nord-ovest e le deboli alture del Salento settentrionale a sud, che nel Piano Paesaggistico Territoriale Regionale è stato ricompreso nell'Ambito paesaggistico denominato "La Campagna Brindisina".

Il Canale presenta mediamente sezioni dell'ordine dei 4-5 m nella parte di monte in agro del territorio di Francavilla Fontana, con pendenze dell'ordine del 1‰, mentre, nel tratto di valle le sezioni si allargano fino a raggiungere dimensioni dell'ordine dei 10-11 m e pendenze del 1‰, presentando in alcuni tratti sezioni rivestite in calcestruzzo. Lungo tutto il suo percorso, il Canale Reale non supera la profondità di 2 m.

Solcato da 42 opere di attraversamento idraulico (Fig. 3), il Canale è recettore delle acque depurate dei depuratori di Ceglie Messapica, Francavilla Fontana, Latiano e in parte di quelle del depuratore consortile di Carovigno. Inoltre, sono state censite le cave presenti sul territorio e prossime al reticolo idrografico, per il loro eventuale utilizzo come vasche di laminazione, al fine di mitigare il rischio legato alla pericolosità idraulica (Fig. 4). Si faccia riferimento alle tavole allegate alla presente relazione per indicazioni sulla scala grafica.

Le indagini in sito hanno denotato che la carenza di interventi di manutenzione nell'alveo del canale determina il depositarsi, nel corso del tempo, di uno strato di sedimenti di varia natura, favorendo la formazione della vegetazione spontanea e costituendo un impedimento fisico al naturale deflusso delle acque, esponendo a rischio idraulico, conseguente a fenomeni di allagamento, le campagne limitrofe, alcune case sparse e le sedi stradali.



Fig. 1. Canale Reale. Per le immagini con relativa scala grafica si faccia riferimento alle Tavole allegate alla presente relazione.

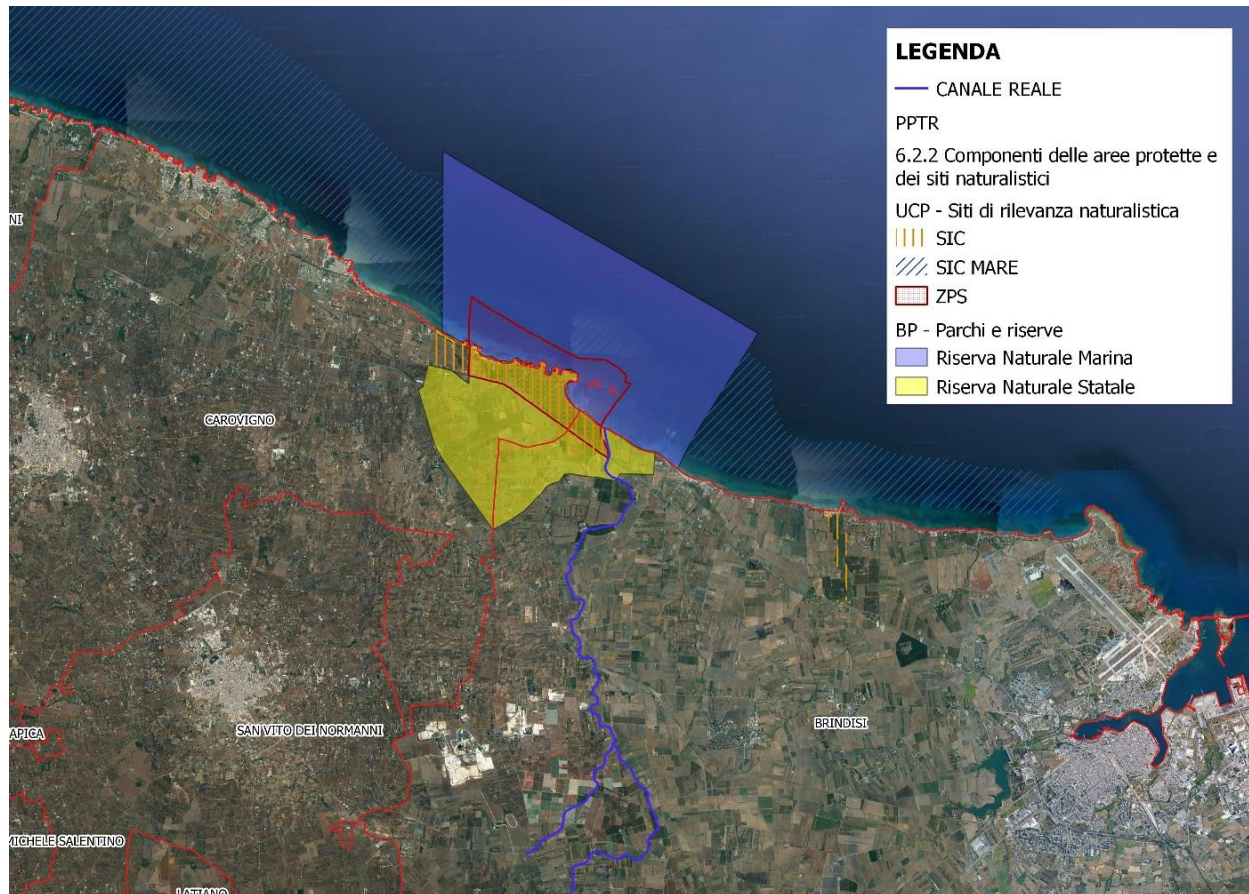


Fig. 2. Tratto di foce del canale nella Riserva Naturale di Torre Guaceto

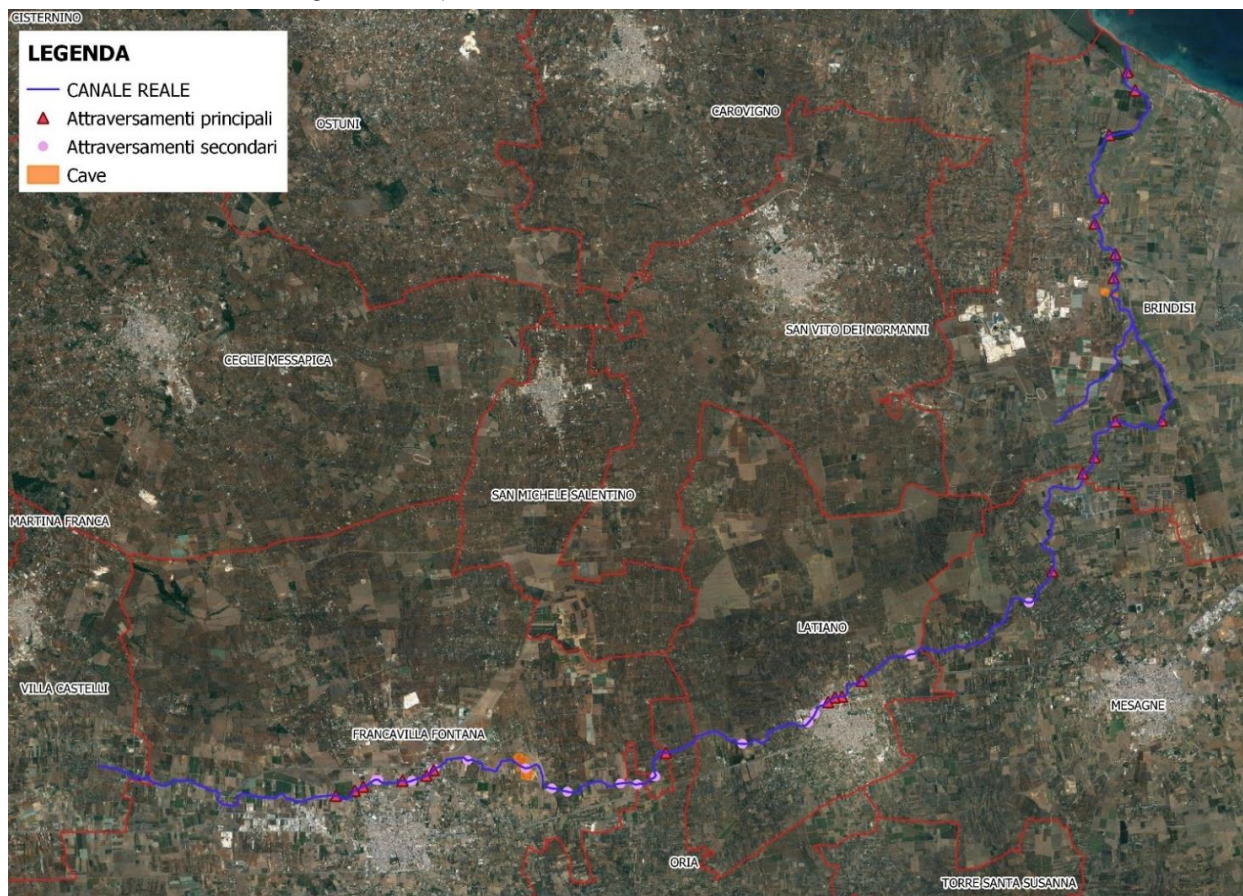


Fig. 3. Attraversamenti idraulici e cave



Fig. 4. Cava nella zona di Francavilla Fontana

Di seguito, nelle tabelle 1, 2, e 3, si riportano le informazioni geometriche relative agli attraversamenti principali, stradali e ferroviari, e a quelli appartenenti a viabilità minore, con opportuna descrizione in Fig. 5 degli elementi di interesse considerati. Tali dati vengono riportati qui in quanto utilizzati nella costruzione del modello idraulico.

ATTRAVERSAMENTI IDRAULICI PRINCIPALI _ CODICE: BR055										
N.	Codice	Coordinate UTM84-33 N		Tipologia	Caratteristiche geometriche					
		X	Y		Luci N.	L o D (m)	Hc (m)	Hs (m)	Deck (m)	P (m)
154	BR05500001FV	717795.73	4491039.00	Ponte	1	4.0	4.0	3.0	1.25	1.2
					2	4.0	4.0	3.0	1.25	1.2
					3	4.0	4.0	3.0	1.25	
155	BR05500005FV	736933.32	4504529.57	Ponte	1	3.0	4.4	3.0	1.8	1.5
					2	3.0	4.4	3.0	1.8	1.5
					3	3.0	4.4	3.5	1.8	1.5
					4	3.0	4.4	3.5	1.8	1.5
					5	3.0	4.4	3.0	1.8	1.5
					6	3.0	4.4	3.0	1.8	
156	BR05500010SS	719782.23	4491557.75	Tombino O	1	1.9	1.9		0.2	1.5
					2	1.7	1.7		0.45	1.15
					3	1.9	1.9		0.2	
157	BR05500012SS	737235.52	4509130.36	Ponte	1	25.5	4.0		2.1	1.4
					2	25.5	4.0		2.1	1.4
					3	25.5	4.0		2.1	1.4
					4	25.5	4.0		2.1	1.4
					5	25.5	4.0		2.1	1.4
					6	25.5	4.0		2.1	1.4

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico
 Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

					7	25.5	4.0		2.1	
158	BR05500013SS	735344.65	4496554.65	Ponte	1	3.15	2.55	1.8	2.58	1.2
					2	3.15	2.55	1.8	2.58	1.2
					3	3.15	2.55	1.8	2.58	
159	BR05500015SS	736887.57	4503939.73	Ponte	1	6.0	3.4	0.8	1.5	1.95
					2	6.0	3.4	0.8	1.5	1.95
					3	6.0	3.4	0.8	1.5	
160	BR05500023SP	718009.86	4491136.6	Ponte	1	2.5	1.7		0.25	0.8
					2	2.5	1.7		0.25	0.8
					3	2.5	1.7		0.25	
161	BR05500028SP	717319.58	4490907.18	Ponte	1	3.8	1.15		1.53	
162	BR05500030SL	718991.17	4491284.82	Ponte	1	2.8	1.4	0.95	1.3	1.9
					2	2.8	1.4	0.95	1.3	1.9
					3	2.8	2.8	1.95	1.3	
163	BR05500031SP	719598.15	4491413.35	Ponte	1	2.05	0.9		0.75	0.5
					2	2.05	0.9		0.75	1.1
					3	2.05	0.9		0.75	1.1
					4	2.05	0.9		0.75	
164	BR05500034SL	725621.68	4491985.44	Ponte	1	5.0	1.0		1.0	
165	BR05500035SP	729700.83	4493264.27	Ponte	1	5.0	2.3		1.75	
166	BR05500036SL	729873.74	4493384.33	Ponte	1	12.0	3.5		1.15	
167	BR05500037SP	730054.27	4493404.54	Ponte	1	3.05	3.7	1.3	0.6	2.75
					2	3.05	3.7	1.3	0.6	2.75
					3	3.05	3.7	1.3	0.6	
168	BR05500040SL	730543.64	4493798.35	Ponte	1	5.0	3.65	1.25	0.8	
169	BR05500049SL	736638.56	4505956.28	Ponte	1	4.2	4.0	2.0	0.5	
170	BR05500050SP	736116.94	4499017.11	Ponte	1	6.2	2.0		0.4	
171	BR05500051SL	736638.56	4505956.28	Ponte	1	6.1	1.4		0.75	
172	BR05500052SP	736414.32	4505300.08	Ponte	1	6.0	1.75		1.3	
173	BR05500054SL	737431.52	4508651.98	Ponte	1	5.9	1.65		0.85	
174	BR05500055SP	738100.62	4500344.35	Ponte	1	6.15	2.8	1.6	0.65	
175	BR05500056SL	736934.25	4500324.62	Ponte	1	7.1	3.2		0.8	
176	BR05500057SL	736781.91	4507530.56	Ponte	1	6.2	1.5		0.6	
177	BR05500058SL	736408.77	4499420.48	Ponte	1	5.3	2.0		0.7	

Tabella 1

ATTRAVERSAMENTI IDRAULICI SECONDARI _ CODICE: BR055NC									
N.	Codice	Coordinate UTM84-33 N		Tipologia	Caratteristiche geometriche				
		X	Y		Lo Luci N.	Hc (m)	Hs (m)	Deck (m)	P (m)
47	BR05500001NC	718326	4491309	Ponte	1	4.0	1.0	0.6	
48	BR05500002NC	718390	4491304	Ponte	1	4.0	0.7	0.3	

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico

Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

49	BR05500003NC	719235	4491285	Ponte	1	4.6	1.5	0.3	
50	BR05500004NC	719758	4491532	Tombino O	1	2.58		0.3	
51	BR05500005NC	719806	4491585	Tombino O	2	1.5		0.3	
52	BR05500006NC	720626	4491798	Tombino A	1	1.6	2.4	1.4	1.0
53	BR05500007NC	722095	4491598	Tombino O	1	1.0		0.4	
54	BR05500008NC	722754	4491092	Tombino A	1	5.0	2.0	1	0.8
55	BR05500009NC	723144	4491009	Tombino A	1	5.0	2.0	1	0.35
56	BR05500010NC	724480	4491217	Ponte	1	6.0	1.5	0.35	
57	BR05500011NC	724904	4491194	Ponte	1	6.0	1.5	0.35	
58	BR05500012NC	725358	4491393	Ponte	1	6.0	1.5	0.7	
59	BR05500013NC	727548	4492214	Tombino A	1	6.0	2.1	1.3	0.9
60	BR05500014NC	729209	4492748	Ponte	1	6.0	2.1	0.6	
61	BR05500015NC	729378	4492973	Ponte	1	5.5	1.0	1.2	
62	BR05500016NC	729621	4493206	Tombino A	1	5.0	2.35	1.4	0.65
63	BR05500017NC	731774	4494462	Tombino A	1	5.0	2.0	1.6	0.8
64	BR05500018NC	734760	4495767	Tombino A	1	5.0	1.2	0.8	0.8

Tabella 2

Parte	LEGENDA CARATTERISTICHE GEOMETRICHE PONTE	
Impalcato	Luce (m)	Larghezza della luce delle campate
	Hc (m)	Altezza della luce (altezza in chiave)
	Hs (m)	Altezza della luce in spalla
	Deck (m)	Spessore impalcato ponte
Pila	P (m)	Larghezza della pila successiva in dx idraulica
Forma	LEGENDA CARATTERISTICHE GEOMETRICHE TOMBINO	
S - scatolare	L o Do (m)	Larghezza del tombino o diametro orizzontale
O - ovoidale	Hc o Dv (m)	Altezza del tombino o diametro verticale
A - ad arco	Hs (m)	Altezza del tombino in spalla
	Deck (m)	Spessore impalcato
	P (m)	Larghezza del pieno successivo in dx idraulica

Tabella 3

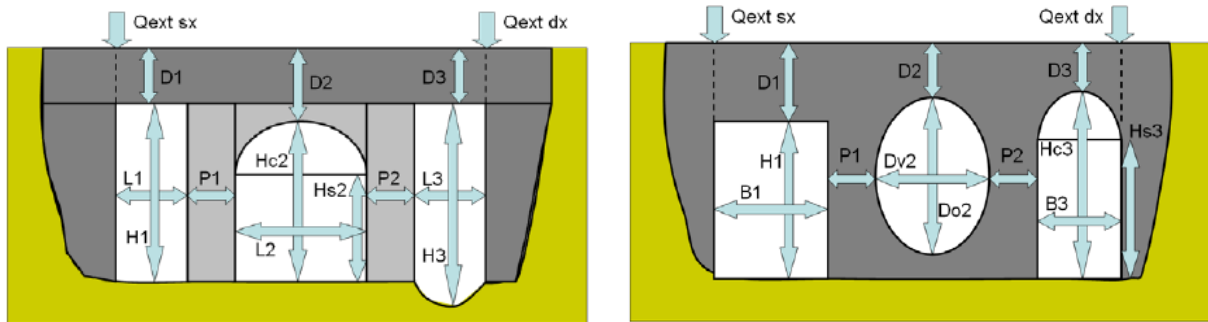


Fig. 5. Sketch con indicazione degli elementi caratteristici della geometria trasversale del ponte (sinistra) e del tombino ovvero 'culvert' (termine in inglese utilizzato nel modello) (destra)

Per poter procedere allo studio idrologico ed idraulico, per la valutazione della pericolosità idraulica, è stato necessario definire l'area contribuyente del canale.

L'analisi morfologica è consistita nella delimitazione del bacino idrografico e nella determinazione delle sue caratteristiche geometriche. I bacini sono comunemente determinati attraverso modelli digitali del terreno mediante procedure automatiche in ambiente GIS.

A tal fine, si è proceduto all'acquisizione del modello digitale del terreno DTM (Digital Terrain Model) con risoluzione al suolo pari a 8 metri disponibile sul SIT della Regione Puglia.

L'accuratezza con la quale sono definite le linee di displuvio e compluvio dipende da numerosi fattori, principalmente la risoluzione del DEM di partenza, la presenza di elementi antropici o di depressioni naturali.

La caratterizzazione idrogeomorfologica è basata sulla valutazione dei percorsi di scorrimento delle acque superficiali ottenuti mediante l'assegnazione, per ogni cella del bacino, della direzione di drenaggio locale.

La determinazione della *Flow Direction* si basa sul principio fisico secondo il quale, una particella liquida che scorre sul terreno a gravità segue la direzione della massima pendenza. Le direzioni di flusso individuano tra le otto direzioni, quattro cardinali (Est, Nord, Ovest, Sud) e quattro diagonali (Nord-Est, Nord-Ovest, Sud-Ovest, Sud-Est) codificate con valori compresi tra 1 e 255, quella preferenziale di scorrimento.

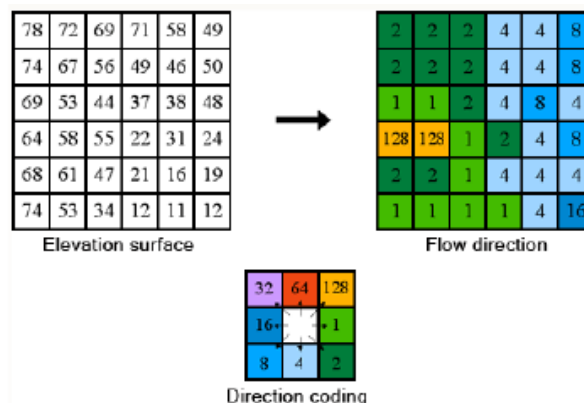


Fig. 6. Procedura di codifica delle direzioni di flusso

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico

Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

La cosiddetta *Flow-Accumulation* definisce invece per ogni cella in cui viene suddiviso il bacino qual è l'area del bacino (idrografico superficiale) ad essa contribuyente, in termini di dimensione espressa in mq.

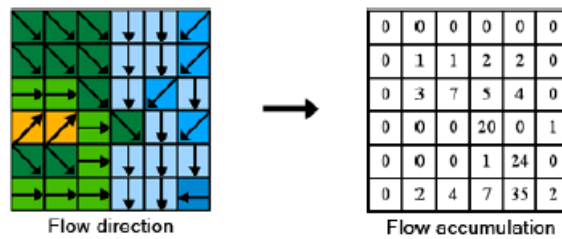


Fig. 7. Procedura di definizione di aree afferenti alle celle

Nel caso specifico, l'individuazione del bacino tributario del Canale Reale è stata eseguita utilizzando il tool "Hydrology" del software ESRI- ArcGIS 10.2, secondo i seguenti passaggi:

1. Caricamento delle varie tavolette DTM a griglia regolare 8x8 scaricabili dal sito "SIT Puglia" ed elaborazione del Merge per creare un'unica base del terreno con indicazione delle quote del terreno;
2. Tool Hydrology FILL per il depittaggio del modello del terreno al fine di eliminare le depressioni locali per una rappresentazione più accurata delle direzioni di deflusso;
3. Tool Hydrology FLOW DIRECTION per la definizione delle direzioni di flusso. Viene creato un raster di direzione del flusso di ruscellamento lungo la superficie del terreno, coincidente con la direzione di massima pendenza;
4. Tool Hydrology FLOW ACCUMULATION per il calcolo delle aree contribuenti, a partire dal raster di output del Flow Direction;
5. Definita la matrice Flow Accumulation è possibile tracciare lo STREAM NETWORK indicante l'idrografia superficiale dell'area in esame;
6. Si definisce la sezione di chiusura in corrispondenza della foce del reticolo e, mediante il Tool Hydrology WATERSHED, viene delineato lo spartiacque o linea di dislivello che definisce il bacino idrografico di studio (Fig. 8).

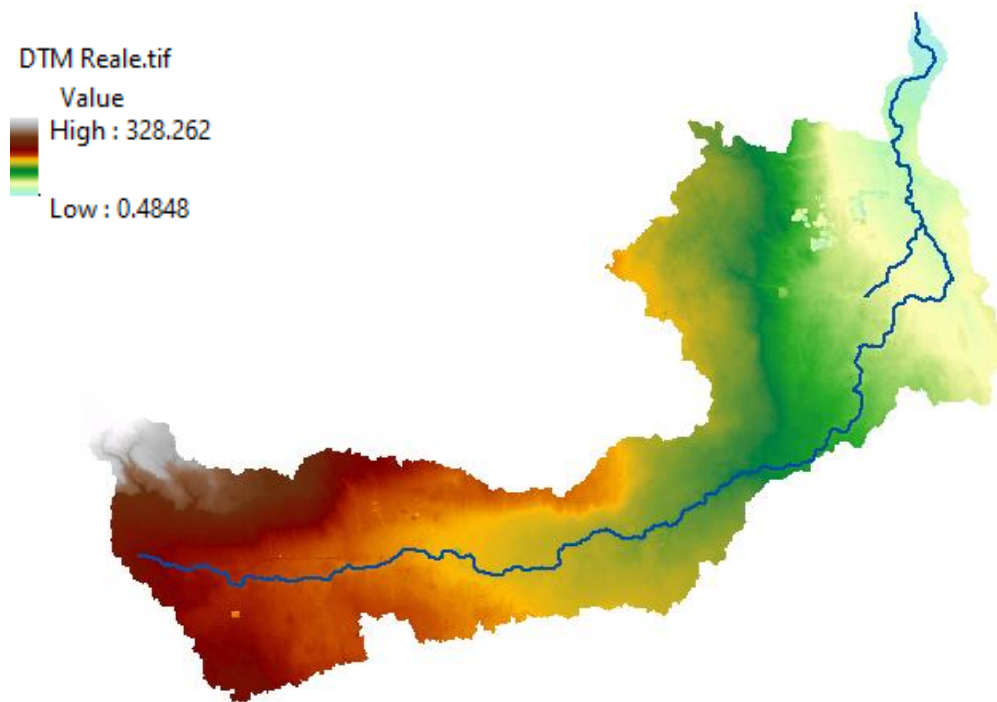


Fig. 8. DTM del Bacino Idrografico del Canale Reale



Fig. 9. Bacino Idrografico del Canale Reale

Determinato il bacino tributario del Canale Reale di tipo esoreico con sfocio a mare, si sono estratte le sue caratteristiche morfometriche, come riportato in tabella 4 e a titolo esemplificativo in Fig. 10 (con riferimento alla pendenza del suolo), necessarie all'elaborazione idrologica:

Area (Kmq)	L. asta principale (Km)	H_{max} (m s.l.m)	H_{min} (m s.l.m)	H_{mean} (m s.l.m)	Dislivello (m)	Pendenza media bacino (%)	Pendenza asta principale (%)
224,0	48,70	328,26	0,4848	107,10	327,78	2,3	0,67

Tabella 4

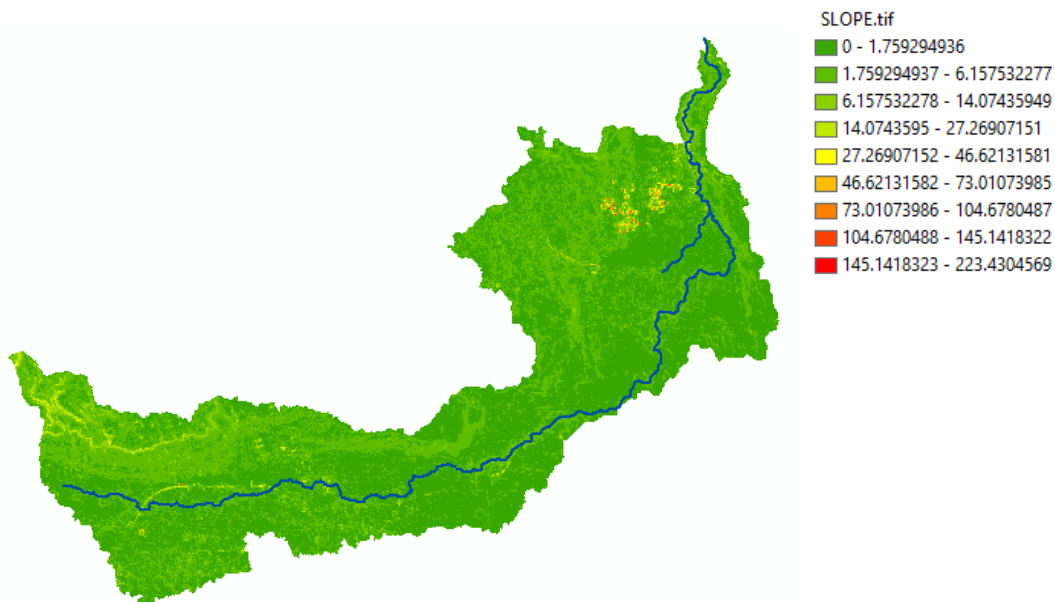


Fig. 10. Carta delle pendenze

3. ANALISI IDROLOGICA DEL BACINO IDROGRAFICO DEL CANALE REALE

3.1 Normativa di riferimento

Il Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) dell’Autorità di Bacino della Puglia (oggi Autorità di Bacino Distrettuale dell’Appennino Meridionale) è stato approvato con Delibera del Comitato Istituzionale n. 39 del 30.11.2005 e pubblicato il 30.12.2005. Esso è finalizzato al miglioramento delle condizioni di regime idraulico e della stabilità dei versanti ed a consentire uno sviluppo sostenibile del territorio nel rispetto degli assetti naturali, della loro tendenza evolutiva e delle potenzialità d’uso, e rappresenta la disciplina che più particolarmente si occupa delle tematiche proprie della difesa del suolo.

Il P.A.I. costituisce il Piano Stralcio del Piano di Bacino, ai sensi dell’articolo 17 comma 6 ter della Legge 18 maggio 1989, n° 183; ha valore di piano territoriale di settore ed è lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d’uso finalizzate alla conservazione, alla difesa e alla valorizzazione del suolo ricadente nel territorio di competenza dell’Autorità di Bacino della Puglia.

Le finalità del PAI (art. 1) sono realizzate, dall’Autorità di Bacino della Puglia e dalle altre Amministrazioni competenti, mediante:

- la definizione del quadro della pericolosità idrogeologica in relazione ai fenomeni di esondazione e di dissesto dei versanti;
- la definizione degli interventi per la disciplina, il controllo, la salvaguardia, la regolarizzazione dei corsi d’acqua e la sistemazione dei versanti e delle aree instabili a protezione degli abitati e delle infrastrutture, indirizzando l’uso di modalità di intervento che privilegino la valorizzazione ed il recupero delle caratteristiche naturali del terreno;
- l’individuazione, la salvaguardia e la valorizzazione delle aree di pertinenza fluviale;
- la manutenzione, il completamento e l’integrazione dei sistemi di difesa esistenti;
- la definizione degli interventi per la difesa e la regolazione dei corsi d’acqua;
- la definizione di nuovi sistemi di difesa, ad integrazione di quelli esistenti, con funzioni di controllo della evoluzione dei fenomeni di dissesto e di esondazione, in relazione al livello di riduzione del rischio da conseguire.

Il PAI (art. 4), in relazione alle condizioni idrauliche, alla tutela dell’ambiente e alla prevenzione di presumibili effetti dannosi prodotti da interventi antropici, disciplina le aree di cui agli artt. 6, 7, 8, 9 e 10.

In particolare, le aree di cui sopra sono definite:

- Alveo fluviale in modellamento attivo ed aree golenali (art. 6);
- Aree ad alta pericolosità idraulica (A.P.) (art. 7);
- Aree a media pericolosità idraulica (M.P.) (art. 8);
- Aree a bassa pericolosità idraulica (B.P.) (art. 9);
- Fasce di pertinenza fluviale (art. 10).

Relativamente alle zone a diversa pericolosità idraulica (A.P., M.P., B.P.), individuate in rapporto a eventi alluvionali, queste risultano arealmente individuate nelle “Carte delle aree soggette a rischio idrogeologico” allegate al PAI, mentre, per i restanti reticoli idrografici per i quali non sono state definite le aree a pericolosità idraulica, ai sensi delle

NTA del PAI si applicano i contenuti dell'art. 6 per "Alveo fluviale in modellamento attivo ed aree golenali" e dell'art. 10 per le "Fasce di pertinenza fluviale". Pertanto, la loro delimitazione e tutela segue i seguenti criteri:

- (art. 6 comma 8) quando il reticolo idrografico e l'alveo in modellamento attivo e le aree golenali non sono arealmente individuate nella cartografia in allegato al PAI e le condizioni morfologiche non ne consentano la loro individuazione, le norme si applicano alla porzione di terreno a distanza planimetrica, sia in destra che in sinistra, dall'asse del corso d'acqua, non inferiore a 75 m;
- (art. 10 comma 3) quando la fascia di pertinenza fluviale non è arealmente individuata nelle cartografie in allegato al PAI, le norme si applicano alla porzione di terreno, sia in destra che in sinistra, contermina all'area golenale, come individuata dall'art. 6 comma 8, di ampiezza comunque non inferiore a 75 m.

Laddove esistono perimetrazioni delle aree AP, MP e BP così definite:

- area ad alta pericolosità idraulica (A.P.): porzione di territorio soggette ad essere allagate per eventi di piena con tempo di ritorno inferiore o pari a 30 anni;
- area a media pericolosità idraulica (M.P.): porzione di territorio soggette ad essere allagate per eventi di piena con tempo di ritorno compreso tra 30 e 200 anni;
- area a bassa pericolosità idraulica (B.P.): porzione di territorio soggette ad essere allagate per eventi di piena con tempo di ritorno compreso tra 200 e 500 anni;

trovano applicazione le norme contenute negli art. 7,8 e 9.

Gli obiettivi del PAI sono definiti dall'art. 17 e consistono nel perseguire il raggiungimento delle condizioni di sicurezza idraulica e della qualità ambientale come definite dall'art. 36.

L'art. 36 definisce per sicurezza idraulica la condizione associata alla pericolosità idraulica per fenomeni di insufficienza del reticolo di drenaggio. *Agli effetti del PAI si intendono in sicurezza idraulica le aree non inondate per eventi con tempo di ritorno fino a 200 anni.*

3.2 Studio idrologico

Lo studio idrologico ha la finalità di definire le portate generate da un bacino idrografico in conseguenza di eventi meteorici con prefissato tempo di ritorno. Nello specifico, l'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale ha individuato i tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni, per la definizione degli scenari rispettivamente di alta, media e bassa probabilità di accadimento, assumendo altresì come riferimento per la condizione di sicurezza idraulica lo scenario con tempo di ritorno di 200 anni.

Lo studio idrologico, così come di seguito descritto, si compone delle seguenti fasi:

1. analisi morfologica per la determinazione delle caratteristiche morfometriche dei bacini idrografici;
2. analisi pluviometrica per la definizione dell'altezza totale di precipitazione;
3. definizione della precipitazione netta o efficace, ovvero la componente di precipitazione che partecipa al ruscellamento superficiale, pari alla pioggia totale depurata da quella persa in conseguenza a perdite idrologiche (immagazzinamento superficiale, vegetazione, evaporazione, infiltrazione);
4. trasformazione afflussi - deflussi per il calcolo della portata di piena.

3.2.1 Analisi idromorfologica di dettaglio

Come già riportato nel par. 2.2., con l'analisi morfologica si è provveduto a delimitare il bacino idrografico (in Fig. 11 riportato su base ortofoto) mediante procedure automatiche in ambiente GIS, determinando le sue caratteristiche geometriche (tab. 4).

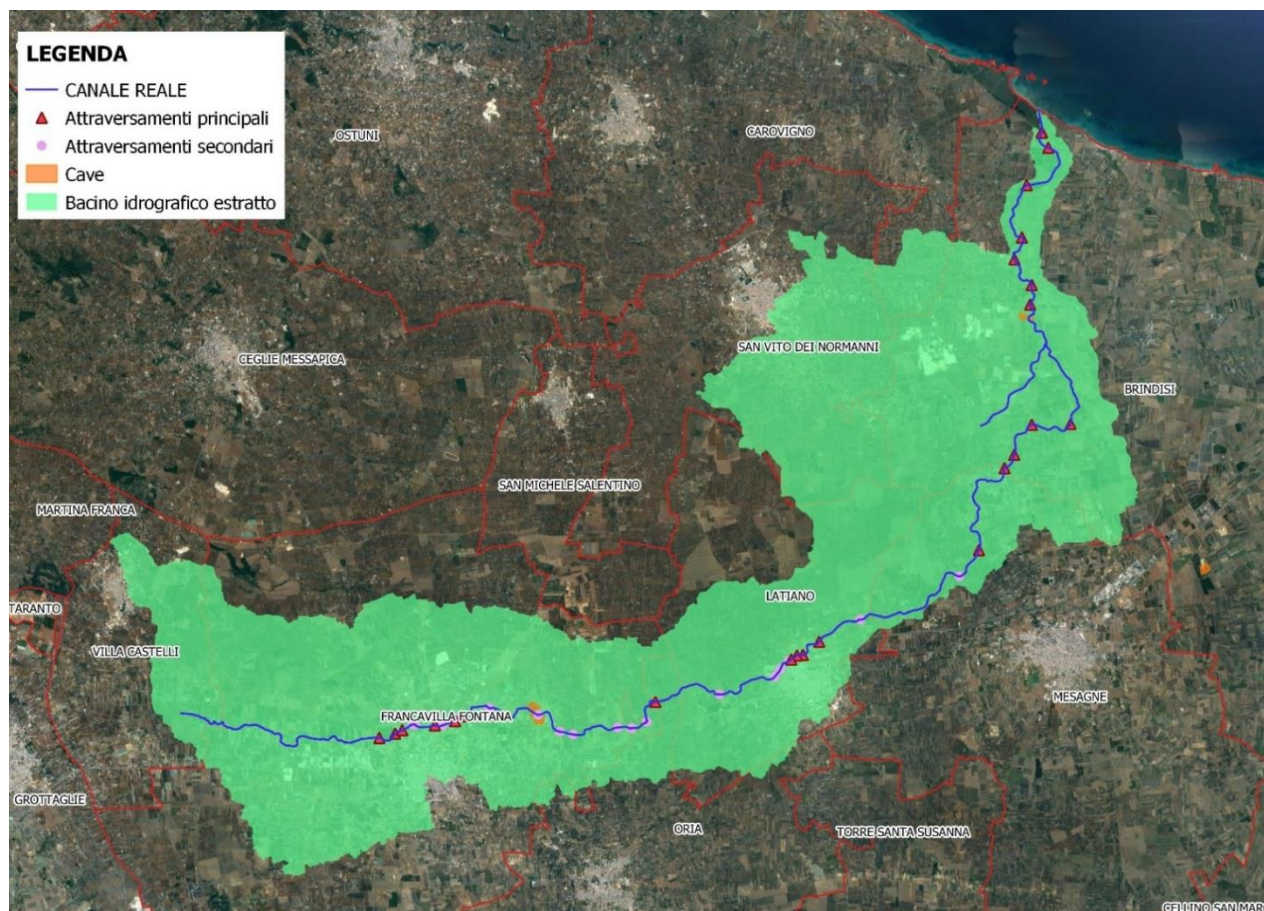


Fig. 11. Bacino idrografico del Canale Reale su base ortofoto

Al fine di stimare gli afflussi meteorici e valutare le portate di piena, evidenziando l'evoluzione dei contributi nel percorso verso valle, si è utilizzato un approccio modellistico di carattere distribuito, calcolando l'apporto di cinque sottobacini via via contribuenti, lungo il Canale Reale (Fig. 12). L'analisi idrologica è, quindi, rivolta ai 5 sottobacini di studio, descritti in tabella 5.

Basin	Superficie (Kmq)	L. asta principale (Km)	H _{max} (m s.l.m)	H _{min} (m s.l.m)	H _{mean} (m s.l.m)	Dislivello (m)	Pendenza media bacino (%)	Pendenza asta principale (%)
1	53.4	8.9	328.26	120.45	169.4	207.81	2.97	2.33
2	89.4	17.9	328.26	108.16	153.3	220.10	2.56	1.23
3	124.6	27.5	328.26	74.15	139.1	254.11	2.24	0.92
4	198.5	40.9	328.26	8.58	114.2	319.68	2.07	0.78
5	224.0	48.7	328.26	0.4848	107.1	327.78	2.30	0.67

Tabella 5. Caratteristiche dei sottobacini

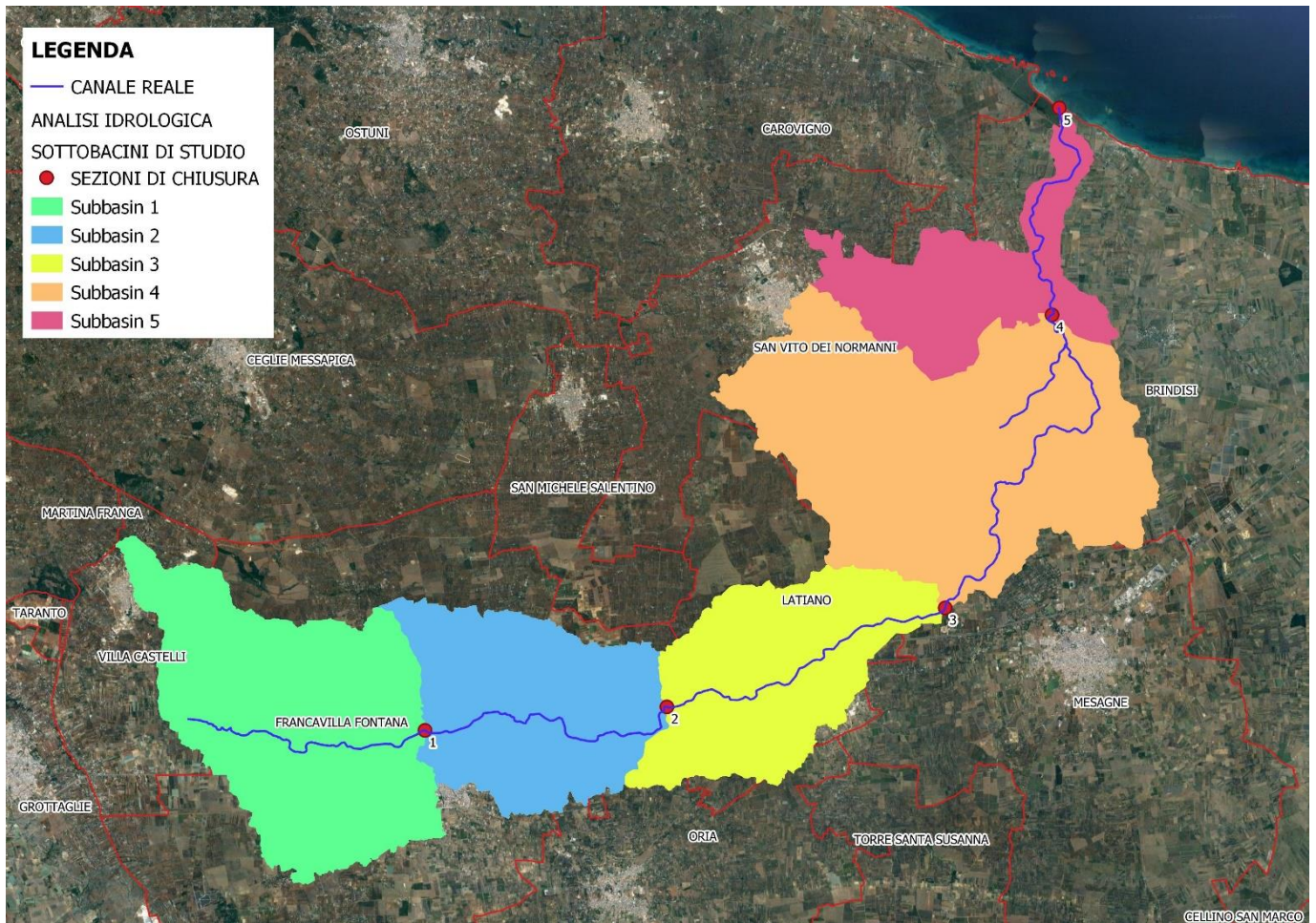


Fig. 12. Bacini di studio del Canale Reale su base ortofoto

3.2.2 Analisi pluviometrica

La determinazione della curva di possibilità pluviometrica del bacino idrografico del Canale Reale è stata determinata attraverso la procedura propria del progetto Valutazione Piene (VaPi) del Gruppo Nazionale di Difesa delle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI), metodologia di riferimento delle NTA del PAI Puglia.

Il metodo VaPi effettua la regionalizzazione delle piogge su sei zone omogenee, in cui è stata suddivisa la Puglia, con formulazioni diverse per ognuna di esse (Fig. 13).

Nel VaPi l'analisi idrologica è basata sulla legge di distribuzione statistica TCEV (Two Components Extreme Value). La particolarità di questo modello è quella di riuscire a considerare gli estremi idrologici, che sono di fatto gli eventi che inducono un livello di pericolosità più elevato, riconducendosi al prodotto di due funzioni di distribuzione di probabilità di tipo Gumbel, una che riproduce l'andamento degli eventi ordinari e l'altra che riproduce l'andamento degli eventi eccezionali.

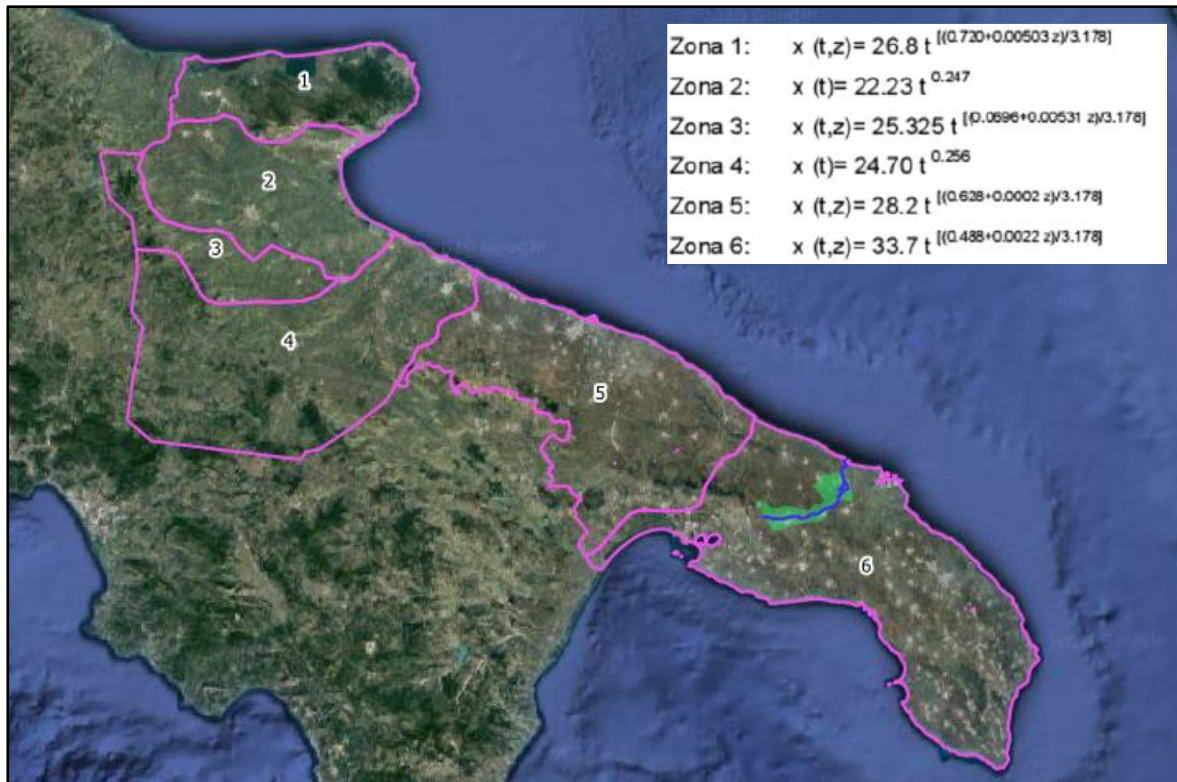


Fig. 13. Zone omogenee VaPi

L'identificazione dei parametri della distribuzione TCEV consente di costruire un modello regionale con struttura gerarchica, basata su tre livelli di regionalizzazione, con due zone omogenee al primo e secondo livello, ovvero Puglia Settentrionale e Puglia Centro – Meridionale, e sei zone omogenee al terzo livello, dove si indaga la variabilità spaziale del valor medio dell'altezza di pioggia.

Il bacino del Canale Reale rientra nella zona omogenea 6 della Puglia Centro Meridionale, pertanto l'equazione da applicare è la seguente:

$$ZONA 6 \quad h = x(t, z) = 33,7 * t^{((0.488 + 0.0022 z) / 3.178)}$$

dove z è l'altezza media del bacino e t la durata di progetto delle curve pluviometriche che si assume pari al tempo di ritardo del bacino espresso in ore, definito come distanza tra il baricentro dello ietogramma e il baricentro dell'onda di piena. Per i bacini pugliesi, in accordo con il VaPi, per il calcolo del tempo di ritardo si considera la seguente formula empirica in funzione dell'area del bacino in Km²: $t = tr = 0,344 A^{0.5}$.

Basin	Area (Kmq)	t (ore)
1	53.4	2.51
2	89.4	3.25
3	124.6	3.84
4	198.5	4.85
5	224.0	5.15

Tabella 6. Tempo di ritardo per i sottobacini individuati

L'altezza di pioggia totale è pari a $X(t, T_R) = x(t, z) * K_T$, con K_T fattore di crescita che dipende dal tempo di ritorno. È possibile rappresentare graficamente la funzione $K_T = K_T(T_R)$ al variare del tempo di ritorno T_R .

Per quanto concerne il fattore di crescita K_t per la Puglia Centro – Meridionale, esso è espresso dalla seguente espressione: $K_T = 0,1599 + 0,5166 * \ln T_R$, che porta ai valori indicati in tabella 7 per $T = 30, 200, 500$ anni rispettivamente ed all'altezza di pioggia per i sottobacini considerati al variare di T_R in tabella 8.

Puglia Centro - Meridionale $K_t = 0.1599 + 0.5166 * \ln T_R$	T_R	K_t
	30	1.916959
	200	2.897011
	500	3.370367

Tabella 7. Fattore di crescita K_t in funzione di T_R

Basin	H_{media} (m.s.l.m)	h_{media} (mm)	K_t ($T_R = 30$)	h_{30} (mm)	K_t ($T_R = 200$)	h_{200} (mm)	K_t ($T_R = 500$)	h_{500} (mm)
1	169.4	43.3	1.92	83.1	2.90	125.4	3.37	145.77
2	153.3	45.8	1.92	87.9	2.90	132.8	3.37	154.27
3	139.1	47.2	1.92	90.6	2.90	136.8	3.37	158.95
4	114.2	48.6	1.92	93.4	2.90	141.1	3.37	163.95
5	107.1	48.9	1.92	94.0	2.90	141.9	3.37	164.93

Tabella 8. Altezza di pioggia totale per i sottobacini individuati al variare del tempo di ritorno T_R

3.2.3 Metodo SCS – CN per il calcolo della pioggia netta o efficace

La portata idrologica di piena viene calcolata con il metodo del "Soil Conservation Service" (S.C.S.).

Per la stima della pioggia netta o efficace, ovvero la componente di precipitazione che partecipa al ruscellamento superficiale pari alla pioggia totale depurata dalla parte di pioggia persa in conseguenza a perdite idrologiche (immagazzinamento superficiale, vegetazione, evaporazione, infiltrazione) si è utilizzata la metodologia del Soil Conservation Service (SCS) che prevede la determinazione del Curve Number (CN).

Il Curve Number è un parametro di fondamentale importanza nelle valutazioni idrologiche, in quanto usato per determinare l'aliquota di precipitazione netta, ovvero l'aliquota di precipitazione totale che contribuisce alla formazione del deflusso, indicando l'attitudine del bacino a produrre deflusso.

Tale parametro assume valori compresi tra 0 (terreni permeabili) e 100 (terreni impermeabili) e si stima in funzione delle caratteristiche idrologiche dei suoli e di copertura vegetale.

La stima del CN è effettuata determinando il gruppo idrologico di appartenenza di ciascun suolo e, all'interno di ciascun gruppo, valutando la copertura d'uso del suolo; alle sottoclassi così determinate viene associato un valore di CN. Gli strati informativi utili alla definizione del Curve Number sono quindi rappresentati dalla Carta Geolitologica e dalla Carta di Uso del Suolo, disponibili sul SIT della Regione Puglia.

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico

Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

L'attribuzione delle 4 classi di permeabilità (A, B, C, D,) del metodo SCS-CN è operata avendo come base cartografico la Carta Geolitologica della Puglia 1: 250.000 (Fig. 14). È associato un livello di permeabilità a ciascuna unità geolitologica (tab. 9), valutando in maniera qualitativa porosità, fessurazione, carsismo e pendenza.

Gruppo A	Suoli aventi scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde, con scarsissimo limo ed argilla e ghiaie profonde, molto permeabili. Capacità di infiltrazione in condizioni di saturazione molto elevata.
Gruppo B	Suoli aventi moderata potenzialità di deflusso. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A. Elevate capacità di infiltrazione anche in condizioni di saturazione.
Gruppo C	Suoli aventi potenzialità di deflusso moderatamente alta. Suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali. Scarsa capacità di infiltrazione e saturazione.
Gruppo D	Potenzialità di deflusso molto elevata. Argille con elevata capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressochè impermeabili in vicinanza della superficie. Scarsissima capacità di infiltrazione a saturazione.

Tabella 9. Gruppi geolitologici

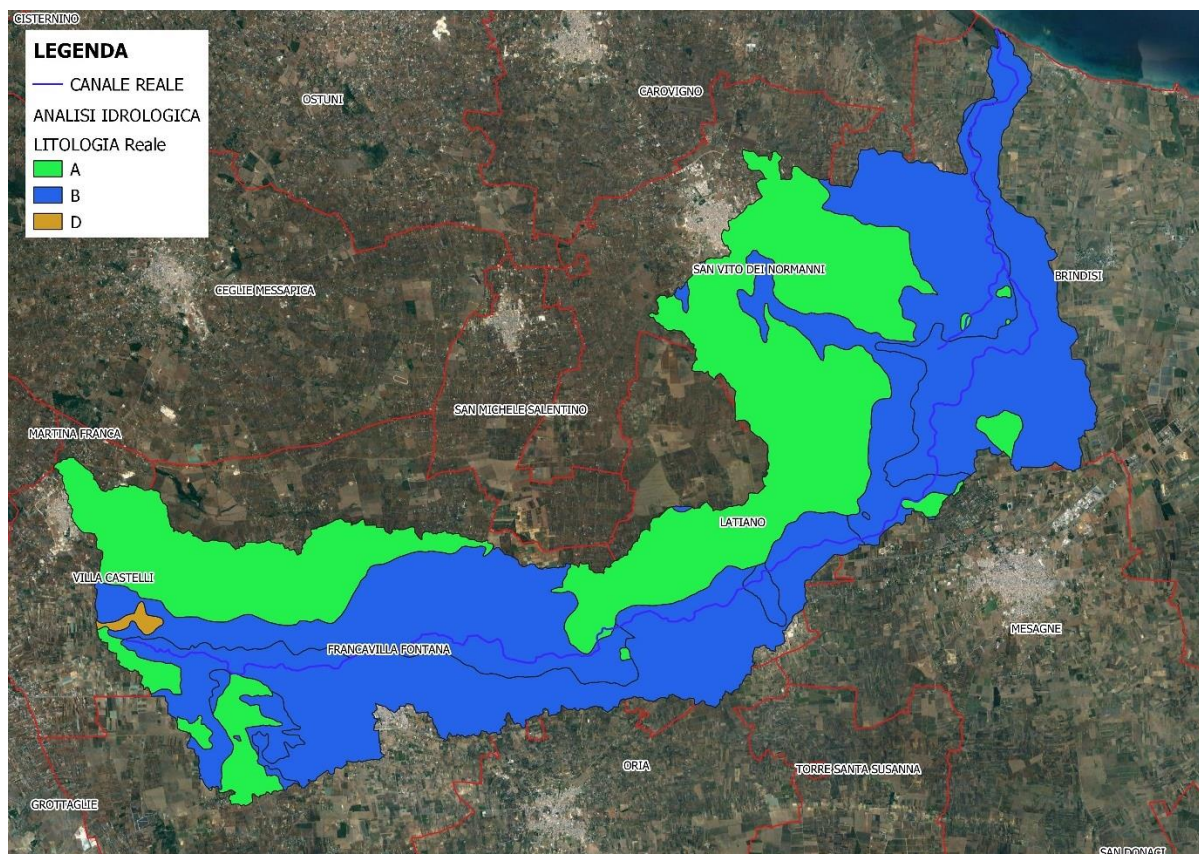


Fig. 14. Carta litologica del bacino idrografico del Canale Reale

La copertura del suolo è valutata attraverso la Carta di Uso del Suolo (Land Use) della Carta Tecnica Regionale del SIT Puglia in scala 1: 5.000, pubblicata sul portale del SIT Puglia (Fig. 15).

Ad ognuna delle 67 tipologie di uso del suolo è associata una macrocategoria di copertura, che comprende diverse situazioni di aree caratterizzate da differenti morfologie (pascoli, terrazzamenti, etc.) varie coperture vegetali (boschi, praterie, parchi), condizioni di conservazione e destinazione d'uso (coltivazioni, parcheggi, distretti industriali o altro).

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico
 Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

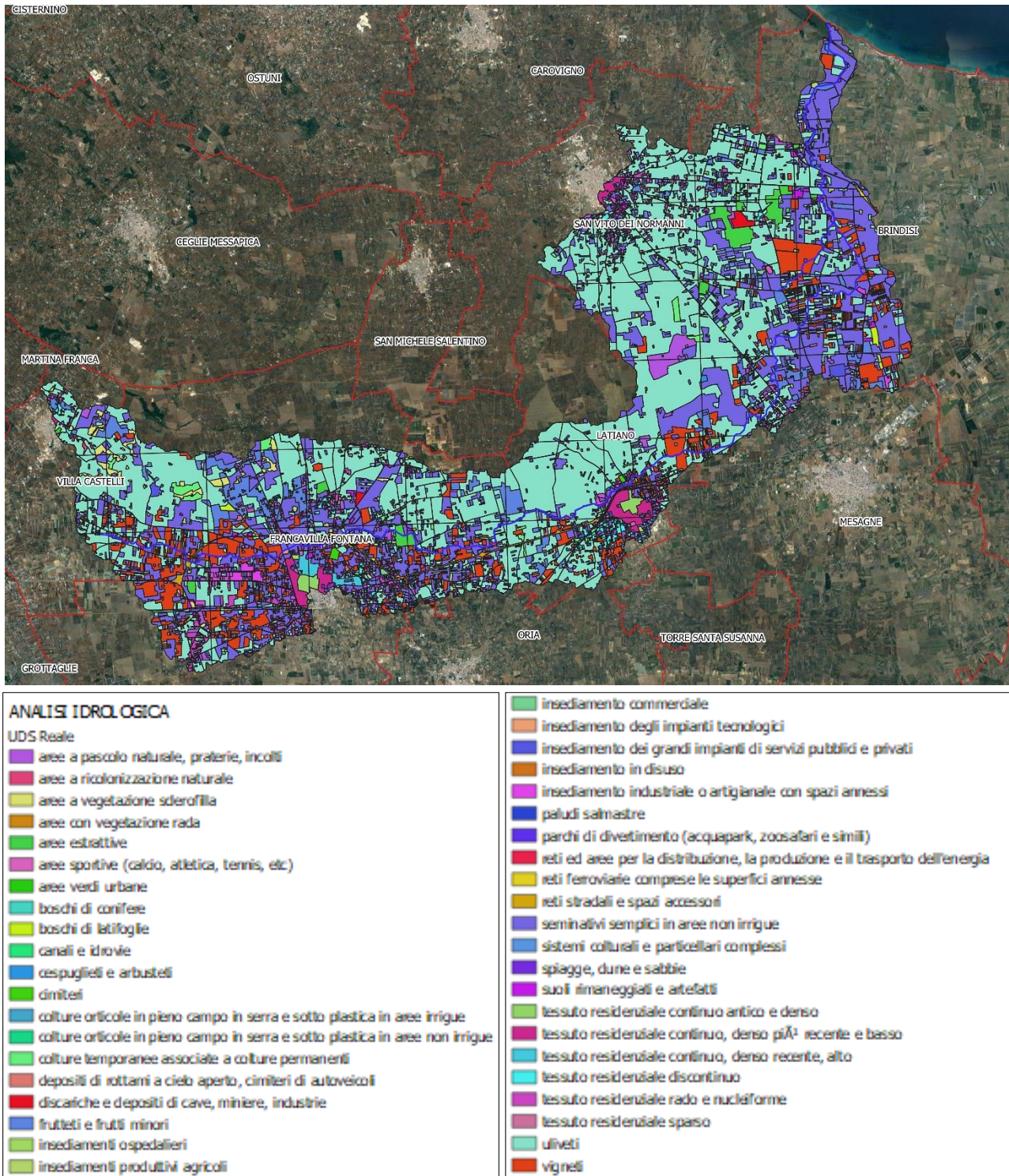


Fig. 15. Carta Uso del Suolo del bacino idrografico del Canale Reale

Nell'applicazione del metodo SCS sono previste tre classi di CN (tab. 10), rispettivamente la I, la II, e la III in funzione dell'altezza di pioggia caduta nei 5 giorni precedenti l'evento esaminato (Antecedent Moisture Condition): molto asciutto (<50 mm), standard (tra 50 e 110 mm) e molto umido (oltre 110 mm).

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico
 Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

AMC categoria CN	Altezza di precipitazione antecedente di 5 giorni			
	Stagione di riposo		Stagione vegetativa	
	[in]	[mm]	[in]	[mm]
I	< 0,5	< 12,7	< 1,4	< 35,6
II	0,5 - 1,1	12,7 - 27,9	1,4 - 2,1	35,6 - 53,3
III	> 1,1	> 27,9	> 2,1	> 53,3

Tabella 10. Classi del CN in funzione dell'altezza di pioggia

Poiché lo studio è rivolto al calcolo delle portate di piena e, considerato che in occasione di questi eventi il terreno del bacino si presenta in condizioni di elevato imbibimento, si preferisce utilizzare il valore di CN corrispondente alla classe AMC-tipo III legato al CN II dalla seguente relazione, secondo la Relazione di Piano del PAI: $CN\ III = CN\ II / (0.43 + 0.0057 * CN\ II)$.

Per determinare il CN III è necessario, quindi, individuare il CN II medio del bacino in esame.

Nel caso specifico, per i sottobacini più a monte si è considerato il parametro CN II, supponendo una condizione standard di umidità del terreno, mentre per i bacini più a valle si è supposto che il terreno si presenta in condizioni di imbibimento (Fig. 16).

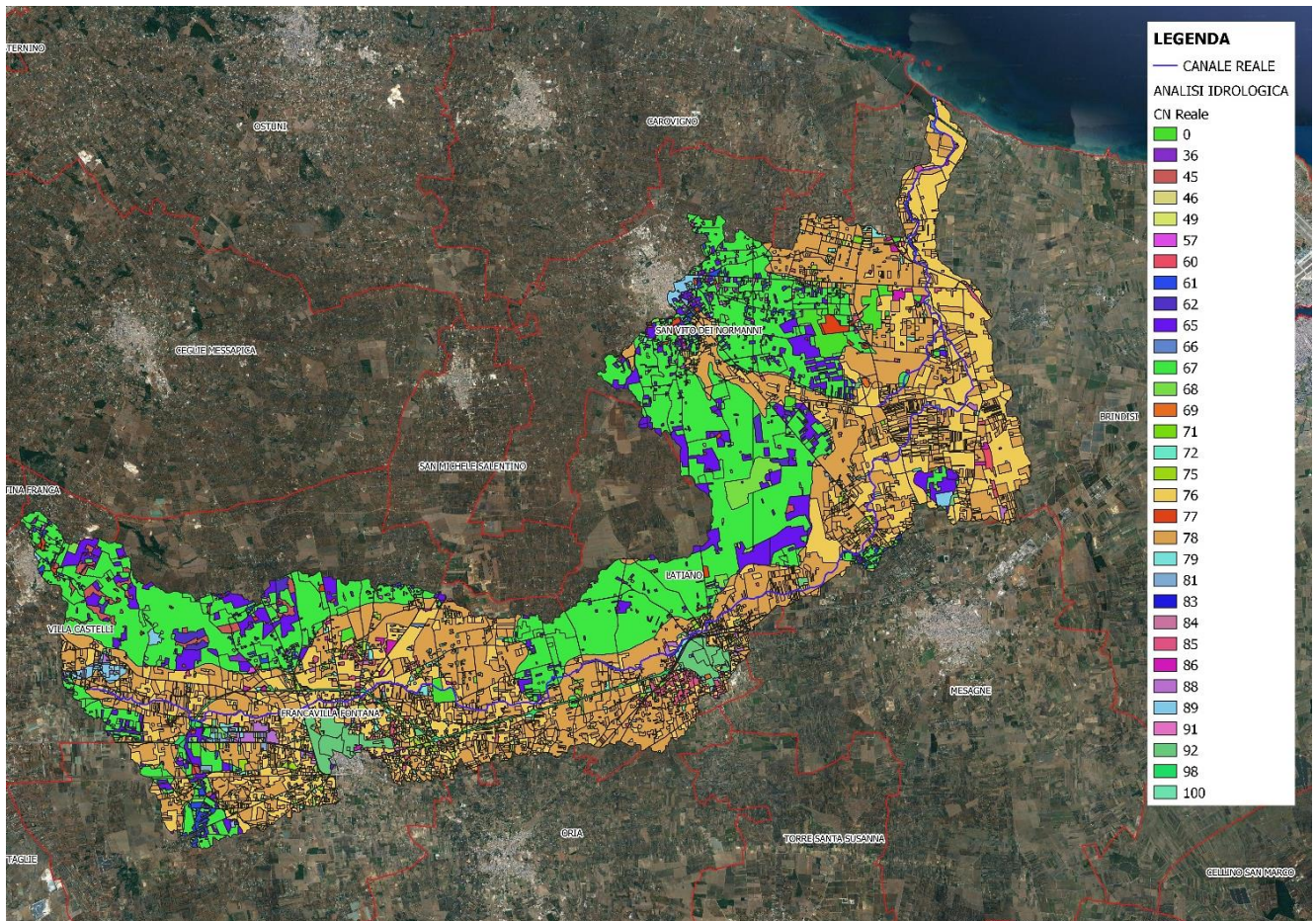


Fig. 16. Mappa del Curve Number del bacino idrografico del Canale Reale

Definito il parametro del CN è possibile determinare il valore di altezza di pioggia netta P_n , mediante la seguente relazione:

$$P_n = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S} \text{ in mm}$$

con $S = 254 \cdot (100/CN - 1)$ che rappresenta il massimo volume di invaso del suolo, in funzione del CN, e P rappresenta l'altezza di pioggia totale, precedentemente calcolata con il metodo VaPi, in corrispondenza di un evento con assegnato tempo di ritorno (tabella 8).

Si ottengono dunque valori di CN, P e Pn come riassunti in tabella 11.

Basin	CN II medio	CN III	CN formula	S (mm)	P ₃₀ (mm)	Pn ₃₀ (mm)	P ₂₀₀ (mm)	Pn ₂₀₀ (mm)	P ₅₀₀ (mm)	Pn ₅₀₀ (mm)
1	72.1		72.1	98.29	83.1	24.86	125.4	54.84	145.77	70.88
2	73.5		73.5	91.58	87.9	30.04	132.8	63.57	154.27	81.23
3	73.85	86.79	86.79	38.67	90.6	56.46	136.8	99.29	158.95	120.41
4	73.2	86.40	86.40	39.99	93.4	58.17	141.1	102.33	163.95	124.12
5	73.9	86.22	86.22	40.60	94.0	58.28	141.9	102.65	164.93	124.55

Tabella 11. Calcolo della pioggia netta Pn

3.2.4 Metodo di trasformazione afflussi – deflussi per il calcolo delle portate di piena

Per il calcolo della portata al colmo di piena si considera, come metodo di trasformazione afflussi – deflussi, l'idrogramma di piena triangolare di Mockus, che ha una fase crescente di durata t_a (tempo di accumulo) e una fase di esaurimento di durata t_e (tempo di esaurimento) (Fig. 17).

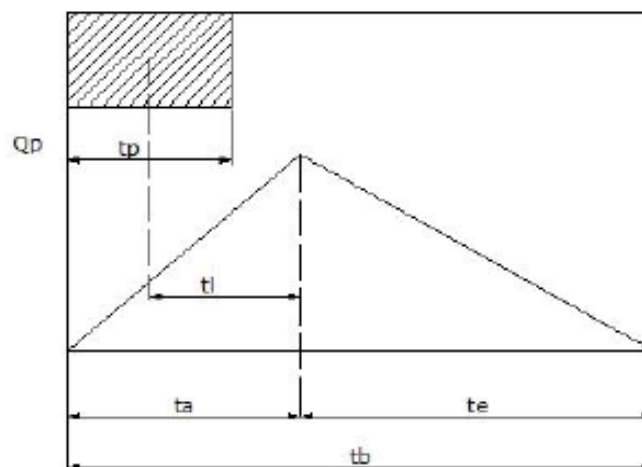


Fig. 17. Rappresentazione dell'idrogramma di Mockus

Secondo il metodo SCS, il tempo di ritardo t_L di Mockus, definito come la distanza tra il baricentro dell'idrogramma rettangolare e il picco dell'onda di piena, viene calcolato con la formula di Mockus, per cui:

$$t_L = 0.342 \cdot (L^{0.8}/s^{0.5}) \cdot (1000 / CN - 9)^{0.7}, \text{ dove:}$$

- L è la lunghezza dell'asta principale in Km;
- s è la pendenza media in % del bacino;
- CN curve number, pari a CN I, CN II o CN III a seconda se il bacino è secco o umido.

Il passaggio dal tempo di ritardo al tempo di corruzione del bacino avviene attraverso la seguente formula: $t_p = t_c = t_L / 0.6$.

Il tempo di accumulo è pari a $t_a = 0.5 t_c + t_L$

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico

Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

L'area sottesa da tale triangolo definisce la portata idrologica al colmo di piena che, pertanto, assume la formulazione seguente: $Q_p = 0,208 (P_n * A) / t_a$

L'ascissa e l'ordinata del picco dell'onda di piena rappresentano, rispettivamente, il tempo di risposta del bacino e la portata al colmo.

Basin	L (km)	s (%)	t _L (ore)	t _p (ore)	t _a (ore)	A (kmq)	Pn ₃₀ (mm)	Q ₃₀ (mc/s)	Pn ₂₀₀ (mm)	Q ₂₀₀ (mc/s)	Pn ₅₀₀ (mm)	Q ₅₀₀ (mc/s)
1	8.9	2.97	3.45	5.76	6.33	53.4	24.86	43.6	54.84	96.2	70.88	124.3
2	17.9	2.56	6.26	10.43	11.47	89.4	30.04	48.7	63.57	103.0	81.23	131.6
3	27.5	2.24	6.19	10.32	11.35	124.6	56.46	128.9	99.29	226.8	120.41	275.0
4	40.9	2.07	8.97	14.95	16.45	198.5	58.17	146.0	102.33	256.9	124.12	311.6
5	48.7	2.30	9.85	16.42	18.06	224.0	58.28	150.3	102.65	264.8	124.55	321.3

Tabella 13. Elementi caratterizzanti l'onda di piena per i diversi sottobacini e per i diversi tempi di ritorno considerati

Lo studio idrologico, quindi, si è completato con la stima delle portate al picco di piena, per i tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni, valutando i crescenti contributi dei vari sottobacini del Canale Reale, come riportati in tabella 13.

4. STUDIO IDRAULICO

Lo studio idraulico del Canale Reale è stato condotto mediante l'utilizzo del modello idraulico HEC - RAS, codice di calcolo sviluppato dall'Hydrological Engineering Center (HEC) dello United States Army Corps of Engineering, meglio descritto nel seguito.

Come anticipato in premessa questo studio idraulico si è articolato in due step. Il primo ha riguardato una simulazione dello stato di fatto del Canale Reale, ovvero nella sua situazione attuale. Il secondo, invece, è consistito nell'applicazione del modello idraulico a tre diversi scenari progettuali, individuati nell'ambito del confronto con alcuni sottoscrittori del Contratto di Fiume.

In questo primo step, si è condotta sia una modellazione monodimensionale del flusso in canale in condizioni di moto permanente, sia una successiva modellazione bidimensionale in condizioni di moto vario. In entrambi i casi si è simulata la propagazione della portata di piena bicentenaria, ovvero con tempo di ritorno di 200 anni.

Preme sottolineare che al fine di validare il modello idraulico utilizzato, i risultati della simulazione 2D di moto vario con portata di piena bicentenaria sono stati confrontati con quelli ottenuti, sempre per la stessa portata, dallo studio condotto dall'AdB nell'ambito dell'aggiornamento del 2019 del PGRA, in particolare con le mappe di pericolosità. Il confronto ha evidenziato un'ottima rispondenza tra gli output della simulazione condotta e le mappe ottenute dall'AdB, provando la buona risposta del modello numerico.

Di seguito, si descrivono le varie operazioni eseguite per l'implementazione e l'utilizzo del modello HEC-RAS, dapprima nel caso della modellazione 1D e poi di quella 2D.

4.1 Modellazione della geometria del Canale Reale

Per la modellazione della geometria di partenza necessaria alla costruzione del modello idraulico HEC-RAS è stato utilizzato Hec - GeoRas, un'estensione del GIS che lavora in ambiente HEC-RAS, che ha consentito sia la restituzione vettoriale che la definizione tabellare delle sezioni trasversali tracciate, con passo prefissato, lungo l'asse del canale. Il sistema di riferimento adottato è stato il WGS84-UTM 33 N.

Quanto ai dati di partenza, non si è fatto riferimento esclusivamente al DTM 8x8m (già descritto in par. 2.2), ma si sono utilizzati anche i dati LIDAR di dettaglio (risoluzione 1x1m) come ricavati dall'aggiornamento del PGRA 2019 (e forniti a questo gruppo di ricerca dall'AdB, nell'ambito dell'accordo sottoscritto).

Dapprima è stato generato il TIN (Triangulated Irregular Network) a partire dal merge tra i dati LIDAR di dettaglio, disponibili per il tratto da Francavilla Fontana fino alla foce del canale per la sola fascia del Canale Reale e il DTM 8x8m, per la parte di bacino rimanente. Dopodiché, sono stati tracciati:

1. Stream Centerline: asse fluviale del corso d'acqua;
2. Banks station lines: limiti dell'alveo inciso in destra e sinistra idraulica, per separare il flusso all'interno del canale da quello nelle espansioni laterali;
3. Flowpaths a destra e sinistra idraulica: dominio in cui studiare la propagazione della piena;
4. XS cut lines: sezioni trasversali di studio in funzione dell'andamento del corso d'acqua e della larghezza dell'alveo stesso. Tali sezioni sono state successivamente importate nel software di modellazione numerica HEC-RAS per lo

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico

Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

sviluppo del modello 1D. Queste sezioni sono state tracciate a passo di 100 m l'una dall'altra ed in corrispondenza di variazioni di pendenza e di forma (Figg. 18, 19, 20);

5. XS cut lines attraversamenti idraulici: è necessario tirare due sezioni, una strettamente a monte e l'altra strettamente a valle delle opere di attraversamento idraulico.

Il verso da considerare per ogni tracciamento è da monte verso valle, in modo tale che il software riconosca il verso della corrente.

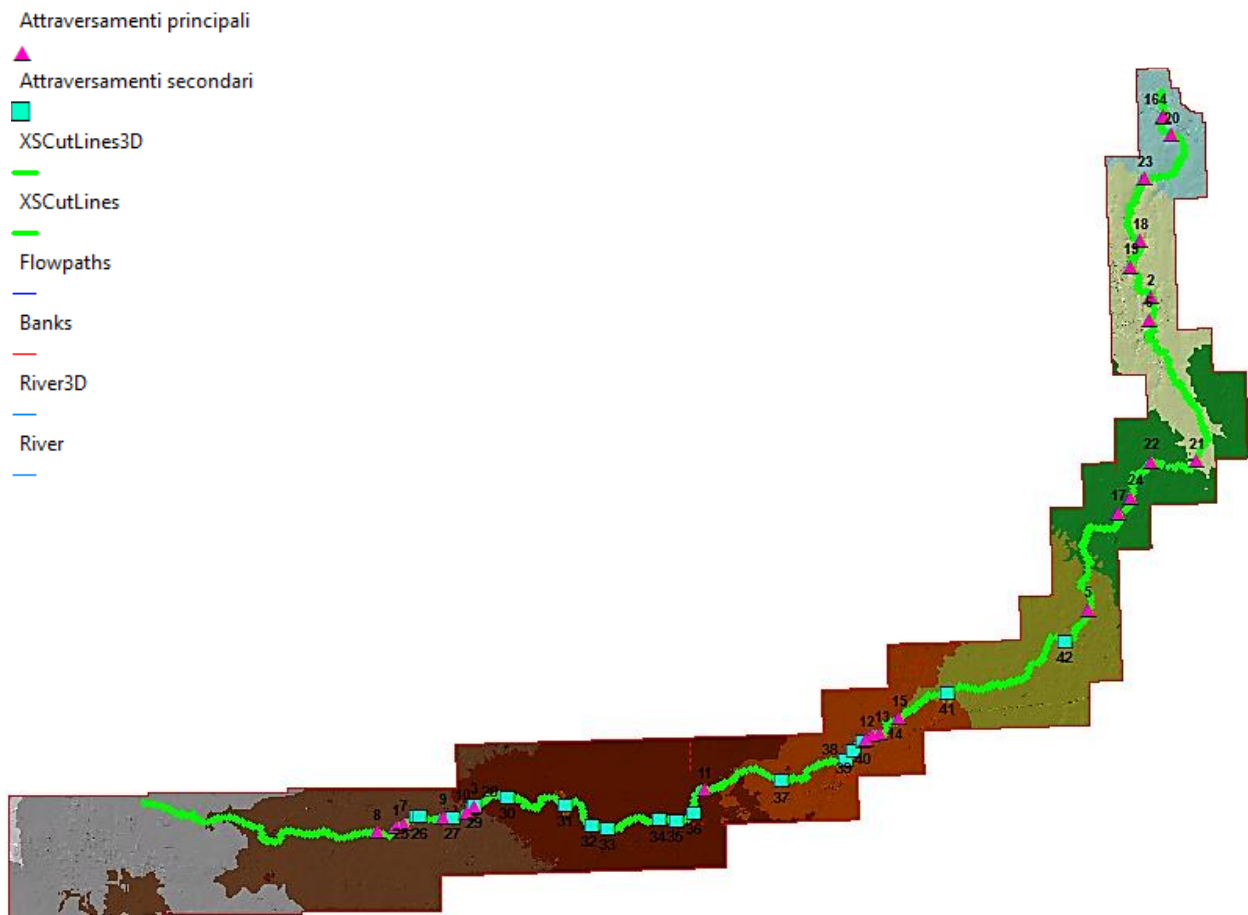


Fig. 18. Dominio di studio del Canale Reale - definizione geometria su base TIN

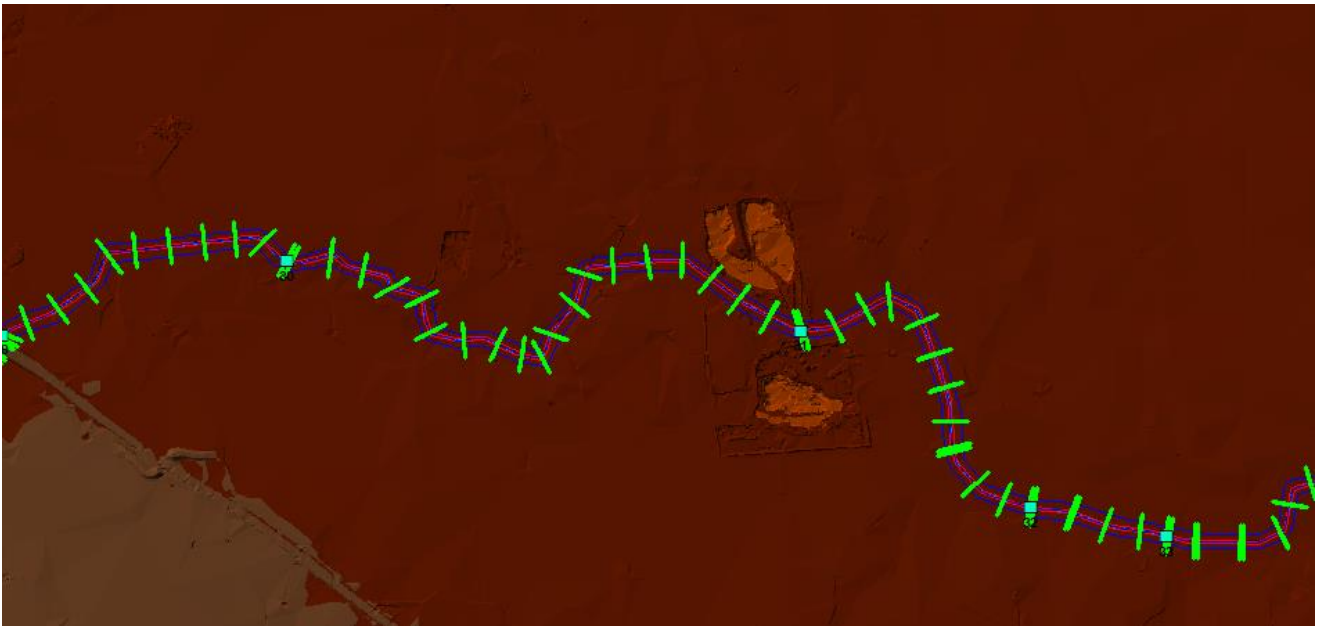


Fig. 19. Zoom di alcune sezioni di studio (tratto di monte in corrispondenza della cava di Francavilla Fontana)

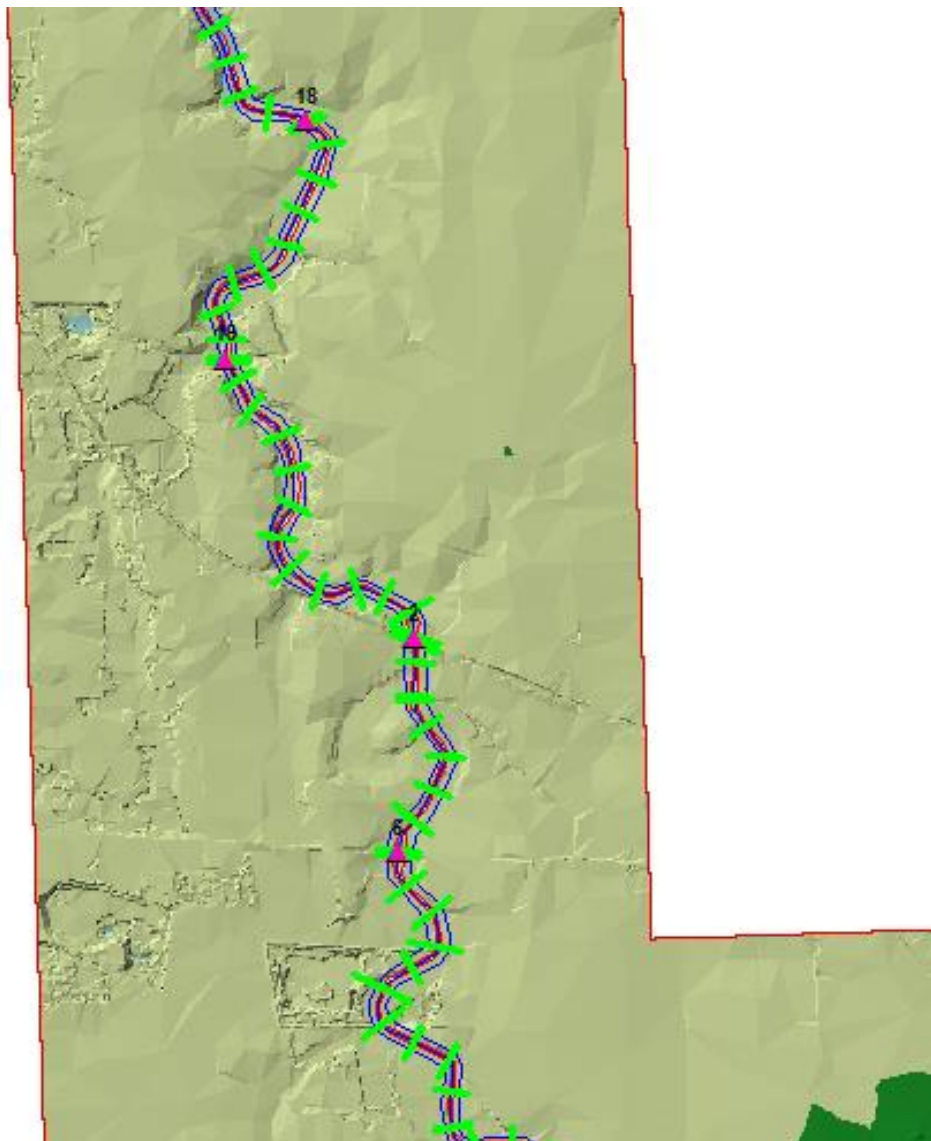


Fig. 20. Zoom sezioni di studio (tratto di valle in corrispondenza delle cave di Brindisi)

4.2 Generalità sul codice di calcolo Hec - Ras

Obiettivo dell'analisi idraulica è la modellazione del comportamento idraulico del Canale Reale, in diverse condizioni di moto, attraverso l'ausilio del software HEC-RAS 5.0.7.

Il codice di calcolo HEC-RAS, modello di deflusso superficiale (che quindi non tiene contezza dei fenomeni di infiltrazione), è un programma sviluppato presso l'Hydrological Engineering Center (HEC) dall'United States Army Corps of Engineering (USACE), utilizzato per l'implementazione di modelli numerico-idraulici di canali naturali ed artificiali, per la ricostruzione, con un accettabile grado di approssimazione, della geometria, della dinamica fluviale e della risposta di un corso d'acqua agli interventi in alveo, oltre che per pianificare l'urbanizzazione in base alla perimetrazione delle aree a rischio inondazione.

Il software HEC – RAS permette varie analisi implementate in differenti moduli. Quelli utilizzati nel presente studio sono i seguenti:

- Modulo 1 per le simulazioni in condizioni di moto permanente (*Steady Flow Analysis*); questo può far riferimento a un canale singolo o ad una rete di canali, inoltre, l'analisi del profilo può essere condotta con riferimento ad una corrente lenta, veloce o mista;
- Modulo 2 per le simulazioni in condizioni di moto vario (*Unsteady Flow Analysis*); questo può far riferimento a un canale e/o ad un'area adiacente esterna al canale.

L'utilizzo del modello in modalità monodimensionale consente di modellare il flusso all'interno dell'alveo fluviale nel modo seguente. Il sistema è rappresentato da una serie di sezioni trasversali che si sviluppano tra l'alveo e la golena, all'interno delle quali vengono computati i tiranti idrici e le velocità di deflusso, ottenendo informazioni relative al profilo idraulico e alle sezioni del canale. Ciò è particolarmente utile al fine di valutare le criticità della rete fluviale, per eventi di piena associabili a diversi tempi di ritorno, ad esempio in termini di efficienza idraulica delle opere di attraversamento idraulico delle reti viarie e ferroviarie.

Le simulazioni 2D, invece, permettono di studiare il comportamento del flusso anche al di fuori dell'alveo, sull'intera piana alluvionale, considerando anche le componenti di velocità del flusso ortogonali alla direzione dell'asse del canale. In questa modalità, il modello risulta particolarmente utile per la valutazione delle aree a rischio inondazione, per una corretta pianificazione urbanistica.

La mappatura delle aree allagabili si basa sul modello digitale del terreno, ciò significa che la reale superficie bagnata è basata sui dettagli della morfologia del terreno. Per questo motivo il DEM utilizzato alla base della modellistica idraulica è di tipo LIDAR 1x1 con risoluzione al suolo pari a 1 m, in modo da avere una descrizione più fedele ed accurata della realtà.

Per la valutazione del rischio idraulico dello stato attuale del Canale Reale, è stato utilizzato uno **schematismo monodimensionale in regime di moto permanente**, per la verifica idraulica delle sezioni trasversali del Canale Reale, specialmente in corrispondenza dei 42 attraversamenti idraulici analizzati. Invece si è implementato uno

schematismo puramente bidimensionale in regime di moto vario per la perimetrazione delle aree a rischio inondazione per eventi di piena con differenti tempi di ritorno.

4.3 Modellazione monodimensionale

La procedura di calcolo monodimensionale di HEC-RAS si basa sulla soluzione delle equazioni dell'energia, analizzando solamente la componente della velocità diretta secondo la direzione prevalente del moto (longitudinale). Il calcolo dei profili di corrente viene effettuato all'interno del software attraverso la risoluzione dell'equazione dell'energia tra due sezioni consecutive, mediante una procedura iterativa "standard step method". L'equazione che esprime il bilancio di energia della corrente è la seguente eq. di Bernoulli:

$$z_1 + h_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \Delta H$$

dove, con i pedici 1 e 2 si indicano le grandezze che si riferiscono alle due sezioni che individuano il volume di controllo:

- h_1 e h_2 sono le altezze idriche;
- z_1 e z_2 sono le quote del fondo alveo rispetto ad un piano di riferimento prefissato;
- V_1 e V_2 sono le velocità medie;
- α_1 e α_2 sono i coefficienti di ragguglio o coefficienti di Coriolis;
- ΔH è la perdita di carico tra le due sezioni.

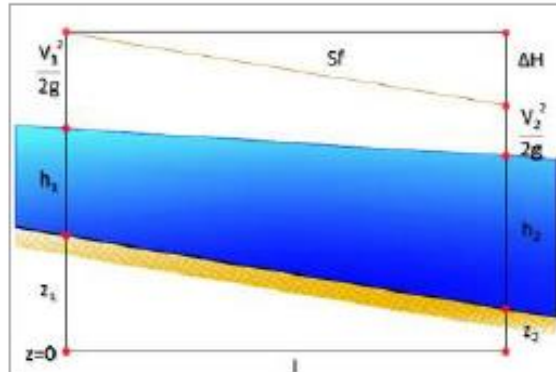


Fig. 21. Conservazione dell'energia – schema di calcolo

Importata in HEC-RAS la geometria del canale, creata in Hec-GeoRas come già spiegato in par. 4.2., si è proceduto alla definizione delle condizioni al contorno (*Boundary Conditions*) e della scabrezza per lo schema monodimensionale.

L'analisi monodimensionale in regime di moto permanente è stata condotta per la condizione di portata di piena bicentenaria, al fine di ottenere una stima di prima approssimazione dell'andamento della portata stessa lungo le varie sezioni del canale, e analizzare le condizioni di sicurezza idraulica, così come definita all'art. 36 delle NTA del PAI.

Le portate di piena per i differenti tempi di ritorno, così come determinate con lo studio idrologico (tabella 13) per le varie sezioni di chiusura esaminate lungo il corso d'acqua, nonché le sezioni del modello idraulico utilizzate come condizioni al contorno corrispondenti, sono riassunte nella seguente tabella 14.

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico

Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

Basin	Q (Tr = 30) (mc/s)	Q (Tr = 200) (mc/s)	Q (Tr = 500) (mc/s)	Insert STATION M	Insert STATION V
1	43.6	96.20	124.3	49100	40790
2	48.7	103.0	131.6	40740	31680
3	128.9	226.8	275.0	31565	21800
4	146.0	256.9	311.6	21700	8200
5	150.3	264.8	321.3	8100	30

Tabella 14. Portate di piena e indicazione delle sezioni-condizione contorno

Con riferimento alla scabrezza, va detto che la scelta di un appropriato valore del coefficiente di scabrezza di Manning n è particolarmente significativa per un'accurata simulazione del profilo di moto, in quanto i tiranti idrici e le velocità di scorrimento del flusso sono fortemente connessi a questo parametro.

In generale, la scabrezza caratteristica di un tratto di corso d'acqua è data dalla somma di molteplici fattori tra cui il materiale costituente il fondo e i piani golenali, l'irregolarità delle sezioni trasversali, la presenza di ostruzioni e di vegetazione e, infine, l'effetto del materiale trasportato dalla corrente.

Alle sezioni trasversali del canale sono stati attribuiti valori del coefficiente di scabrezza, forniti come input del modello idraulico, sulla base delle caratteristiche di uso del suolo del bacino idrografico, destinato principalmente alla presenza di seminativi in aree non irrigue, uliveti e vigneti.

Nello studio dei deflussi del Canale, si è assunto per i seminativi in aree non irrigue un indice di Manning $n=0.04$ s/m^{1/3}, per gli uliveti e frutteti $n=0.06$ s/m^{1/3}, per i vigneti $n=0.1$ s/m^{1/3}, per i cespuglieti $n=0.05$ s/m^{1/3}, per le aree a pascolo naturale e praterie $n=0.035$ s/m^{1/3} e, infine, per le paludi salmastre $n=0.04$ s/m^{1/3}. All'interno del canale artificiale si è assegnato un valore del coefficiente di Manning cautelativamente costante e pari a $n=0.035$ s/m^{1/3}.

In genere, si è adottato tra i tre valori del coefficiente di scabrezza secondo le varie classi di uso del suolo, quello relativo alla condizione media, ai fini di adottare cautela nei confronti delle due grandezze idrodinamiche esaminate, tiranti e velocità. Un indice di Manning più basso, rappresentativo di una resistenza al flusso minore, determina una velocità di scorrimento maggiore e, quindi, dei tiranti idrici minori; invece, un indice di Manning più alto, rappresentativo di una resistenza al flusso maggiore, determina l'effetto opposto. La scelta del valor medio dell'indice di Manning appare più cautelativa in relazione all'estensione delle aree a pericolosità idraulica, soprattutto se si considera che l'adozione dell'indice di scabrezza di valore massimo è relativa ad uno stato vegetativo più denso, condizione che si verifica solitamente nei periodi estivo-primaverile, quando la presenza di eventi precipitativi estremi è più ridotta rispetto alle altre stagioni.

4.3.1 Risultati dell'analisi monodimensionale

Lo studio idraulico monodimensionale ha permesso di analizzare le 42 opere di attraversamento idraulico delle infrastrutture viarie, essendo tali intersezioni con il reticolo idrografico punti di particolare criticità. L'efficienza delle opere è valutata in relazione al loro comportamento idraulico in regime di piena per eventi con tempo di ritorno pari a 200 anni, in termini di luce di sbocco non sommerso, sbocco sommerso e sormonto.

Si riportano nelle figure successive (Figg. 22-26), a titolo di esempio, alcune sezioni trasversali di attraversamenti che interessano il canale, con indicazione dei tiranti idrici raggiunti in condizioni di piena.

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico
Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

Il risultato della modellazione monodimensionale mostra che per 39 delle 42 sezioni si verifica una condizione di sormonto, nel caso di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni.

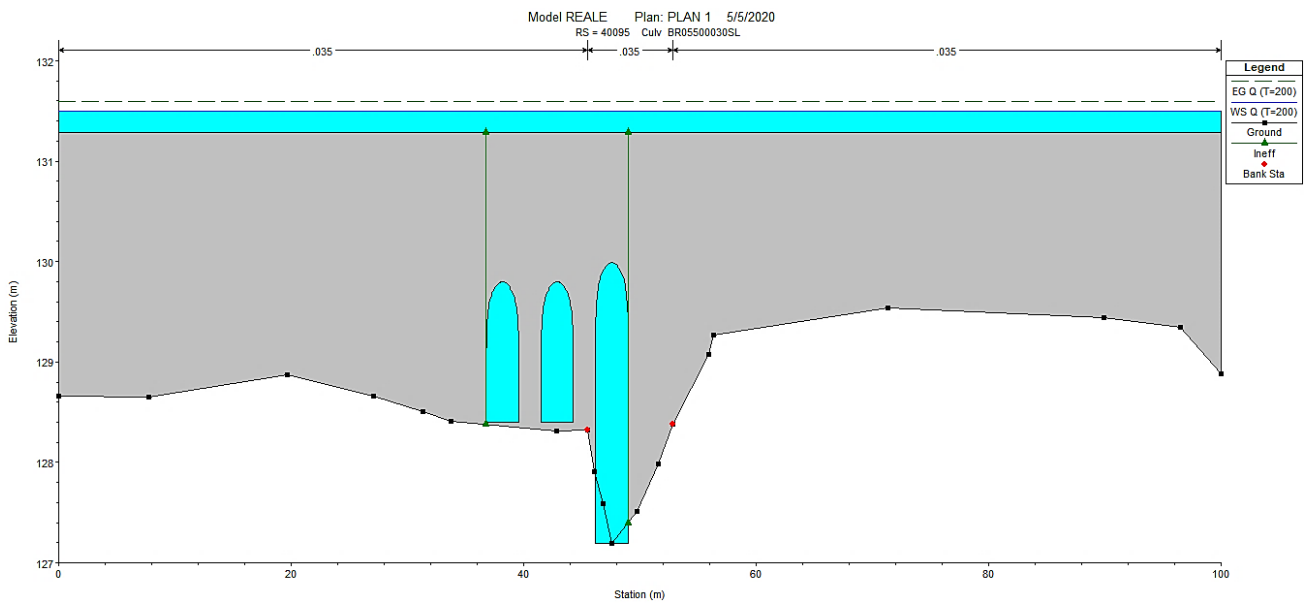


Fig. 22. Attraversamento BR05500030SL

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico
Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

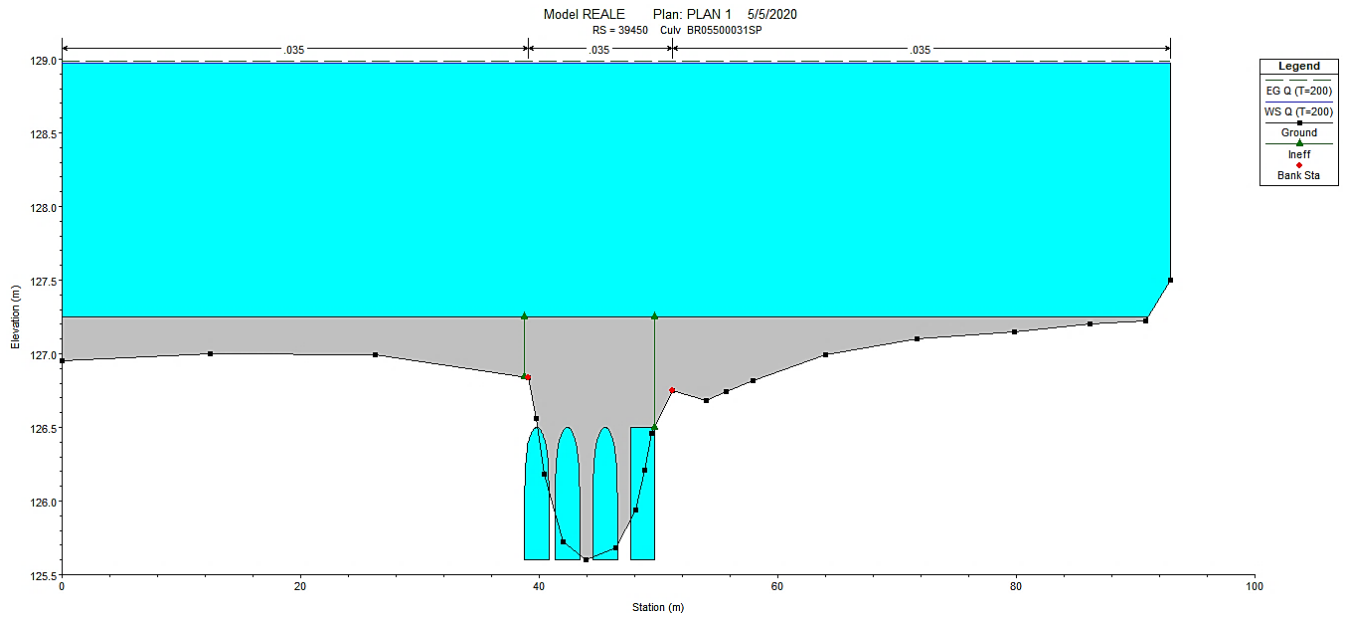


Fig. 23. Attraversamento BR05500031SP

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico
Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

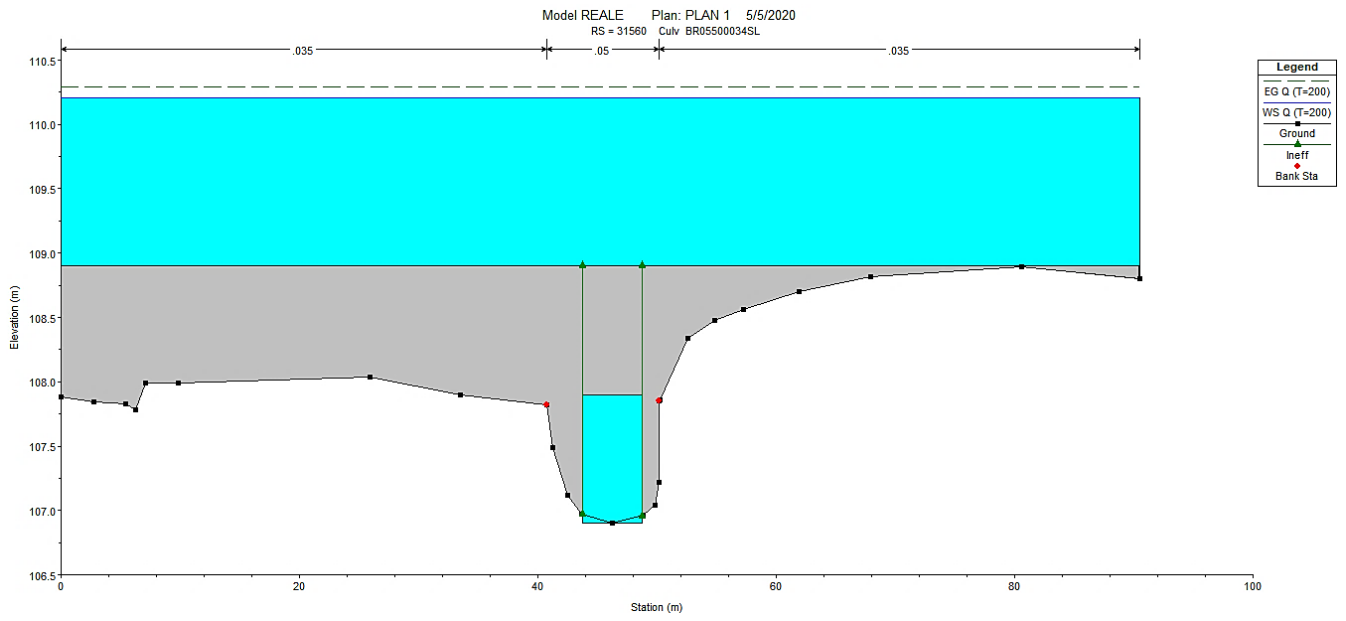


Fig. 24. Attraversamento BR05500034SL

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico
Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

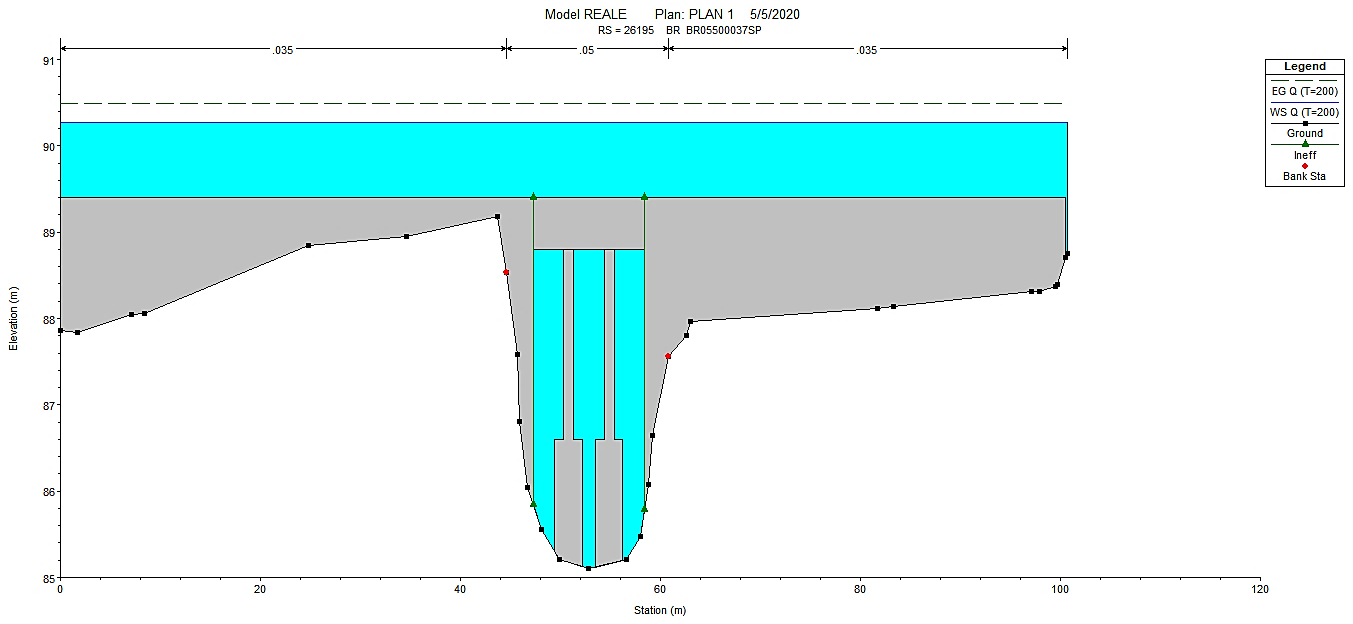


Fig. 25. Attraversamento BR05500037SP

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico
Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

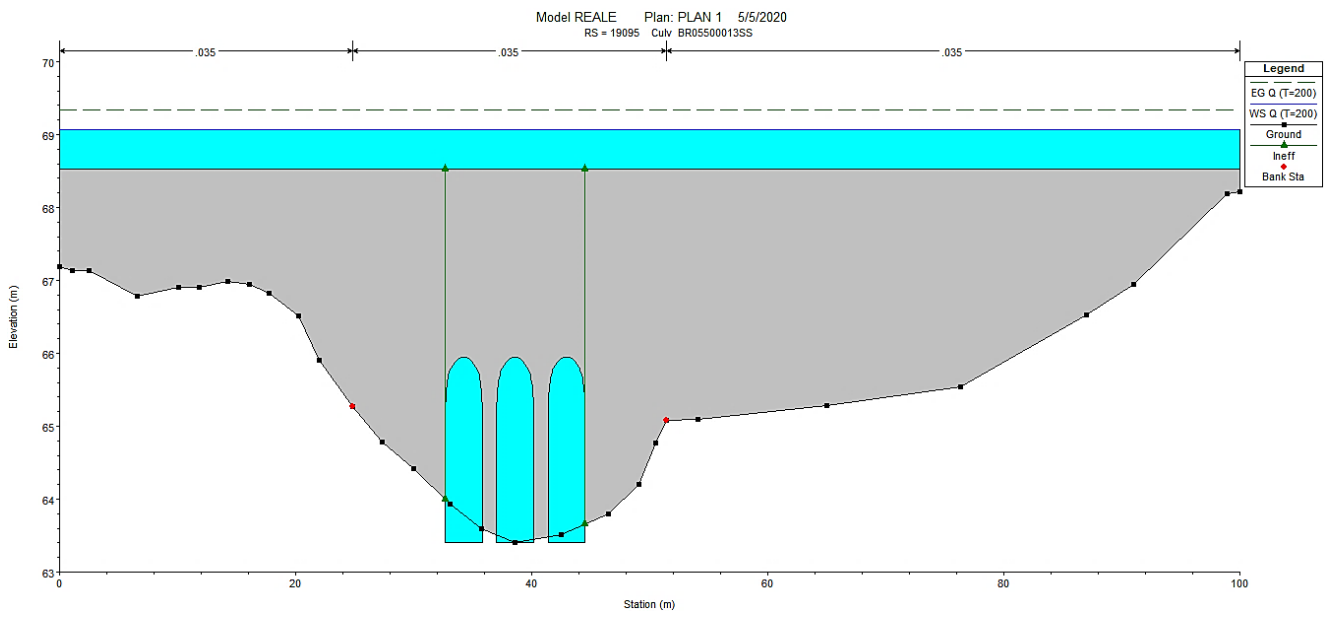


Fig. 26. Attraversamento BR05500013SS

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico
Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

Inoltre, è stato possibile estrarre una tabella risultati post modellazione per ogni sezione del canale, le cui sigle si riferiscono a:

- Q_{tot} = portata totale per il tempo di ritorno studiato (m^3/s);
- Min Ch El = quota del fondo alveo (m s.l.m.);
- W.S. Elev = quota del pelo libero (m s.l.m.);
- Crit W.S. = quota critica del pelo libero (m s.l.m.);
- E.G. Elev = quota della linea dell'energia (m s.l.m.);
- E.G. Slope = pendenza della linea dell'energia (m/m);
- Vel Chnl = velocità media della corrente nell'alveo (m/s);
- Flow area = area totale della sezione liquida effettiva (m^2);
- Top Width = larghezza superficiale della sezione liquida (m);
- Froude = numero di Froude.

La differenza tra W.S. Elev e Min Ch El fornisce il tirante idrico nelle varie sezioni trasversali del canale.

Si riporta un breve stralcio della tabella risultati post modellazione 1D, a titolo esemplificativo.:

HEC-RAS Plan: PLAN 1 River: REALE Reach: REALE Profile: Q (T=200)

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m^3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m^2)	Top Width (m)	Froude # Chl
REALE	49100	Q (T=200)	96.20	158.22	159.76	159.71	159.94	0.014338	2.63	56.20	100.00	0.74
REALE	49000	Q (T=200)	96.20	157.60	158.94		159.06	0.007959	1.97	67.56	100.00	0.57
REALE	48900	Q (T=200)	96.20	156.95	158.48		158.54	0.003458	1.44	88.51	100.00	0.39
REALE	48800	Q (T=200)	96.20	156.55	158.18		158.24	0.002679	1.30	95.23	100.00	0.34
REALE	48700	Q (T=200)	96.20	155.91	157.81		157.89	0.004325	1.81	81.41	100.00	0.44
REALE	48600	Q (T=200)	96.20	155.70	158.97		157.15	0.015179	2.66	55.42	100.00	0.79
REALE	48500	Q (T=200)	96.20	154.73	156.34		156.40	0.003729	1.47	89.20	112.05	0.40
REALE	48400	Q (T=200)	96.20	154.55	155.88		155.98	0.007017	1.83	71.01	100.00	0.54
REALE	48300	Q (T=200)	96.20	153.73	155.52		155.57	0.002273	1.22	100.14	106.85	0.32
REALE	48200	Q (T=200)	96.20	153.90	155.30		155.35	0.002634	1.20	96.40	100.00	0.34
REALE	48100	Q (T=200)	96.20	153.30	154.55	154.55	154.79	0.021086	2.98	47.39	88.61	0.90
REALE	48000	Q (T=200)	96.20	151.84	153.40	153.10	153.49	0.004917	1.75	81.74	113.86	0.47
REALE	47900	Q (T=200)	96.20	151.63	153.21		153.26	0.002760	1.28	102.92	131.03	0.34
REALE	47800	Q (T=200)	96.20	150.78	152.66	152.56	152.87	0.004988	2.78	57.00	89.05	0.69
REALE	47700	Q (T=200)	96.20	150.75	152.10		152.26	0.006060	2.34	58.45	100.00	0.70
REALE	47600	Q (T=200)	96.20	150.56	152.00		152.06	0.001520	1.22	97.67	130.58	0.36
REALE	47500	Q (T=200)	96.20	149.97	151.79		151.89	0.002954	2.00	73.24	100.00	0.52
REALE	47400	Q (T=200)	96.20	149.36	151.44		151.59	0.002946	2.25	64.12	76.46	0.54
REALE	47300	Q (T=200)	96.20	148.93	151.04	150.88	151.23	0.004227	2.71	56.59	71.99	0.63
REALE	47200	Q (T=200)	96.20	148.73	150.44	150.44	150.70	0.007317	3.10	51.82	91.33	0.82
REALE	47100	Q (T=200)	96.20	147.92	149.70	149.44	149.81	0.002999	1.95	72.13	98.38	0.50
REALE	47000	Q (T=200)	96.20	147.69	149.49		149.56	0.001781	1.54	86.86	100.00	0.40
REALE	46900	Q (T=200)	96.20	147.28	149.29		149.38	0.002077	1.80	80.56	100.38	0.45
REALE	46800	Q (T=200)	96.20	147.32	148.83		149.00	0.006565	2.65	55.94	91.81	0.75
REALE	46700	Q (T=200)	96.20	146.66	148.40		148.53	0.003969	2.33	63.25	86.48	0.61
REALE	46600	Q (T=200)	96.20	146.56	148.21		148.27	0.001570	1.38	90.14	100.00	0.38
REALE	46500	Q (T=200)	96.20	146.39	147.93		148.04	0.003480	1.97	69.15	95.84	0.55
REALE	46400	Q (T=200)	96.20	146.39	147.58		147.68	0.003596	1.71	70.88	100.00	0.54
REALE	46300	Q (T=200)	96.20	146.02	147.12		147.25	0.005402	1.95	62.13	100.00	0.65
REALE	46200	Q (T=200)	96.20	145.59	146.77		146.86	0.002867	1.56	75.75	100.00	0.49
REALE	46100	Q (T=200)	96.20	144.45	146.49		146.59	0.002450	1.85	72.71	84.46	0.46
REALE	46000	Q (T=200)	96.20	144.55	145.89	145.89	146.13	0.009318	2.75	48.55	95.81	0.85
REALE	45900	Q (T=200)	96.20	144.04	145.70	145.27	145.76	0.001490	1.34	92.01	100.00	0.37
REALE	45800	Q (T=200)	96.20	143.89	145.44		145.55	0.003046	1.90	71.23	98.45	0.52
REALE	45700	Q (T=200)	96.20	143.58	145.11		145.22	0.003577	2.04	69.47	100.00	0.57
REALE	45600	Q (T=200)	96.20	142.93	145.02		145.07	0.000724	1.14	109.04	94.28	0.27
REALE	45500	Q (T=200)	96.20	142.91	144.96		145.00	0.000676	1.07	114.92	100.00	0.26
REALE	45400	Q (T=200)	96.20	142.96	144.60	144.60	144.81	0.008366	2.63	52.98	100.00	0.82
REALE	45300	Q (T=200)	96.20	142.08	143.84	143.42	143.92	0.001899	1.64	77.25	80.43	0.42

Tabella 15. Output modellazione 1D in corrispondenza degli attraversamenti idraulici

4.4 Modellazione bidimensionale

La modellazione bidimensionale in regime di moto vario ha consentito la simulazione dettagliata del deflusso nelle due direzioni piane, partendo da una rappresentazione bidimensionale della morfologia dell'alveo e delle aree gole-nali limitrofe, definita con un modello digitale del terreno di tipo LIDAR (come già descritto in par. 4.1).

Obiettivo dell'analisi è stato quello di perimetrare l'effettiva impronta allagabile per i differenti tempi di ritorno considerati e di calcolare in ogni punto del dominio il tirante idrico e la velocità di deflusso della corrente.

Le leggi fisiche che regolano il moto vario di una corrente a pelo libero sono l'equazione di conservazione della massa e l'equazione di conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) - q_l V_l = 0$$

le cui variabili introdotte hanno il seguente significato:

- Q = portata defluente in alveo
- q_l = eventuale portata immessa lateralmente per unità di lunghezza
- A = sezione idrica della corrente
- g = accelerazione di gravità
- V = velocità media di deflusso della corrente
- V_l = velocità media di deflusso della portata immessa lateralmente;
- S_f = pendenza della linea dell'energia
- z = quota di pelo libero, che è legata al tirante idrico e alla quota di fondo alveo.

La risoluzione del sistema di equazioni suddetto è affidata al metodo delle differenze finite, il quale permette di riscrivere le equazioni in termini di differenze finite, evitando di dover risolvere delle derivate parziali: si passa così da un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali ad un sistema di equazioni algebriche.

In particolare, la modellazione 2D in HEC-RAS utilizza uno schema di tipo implicito ai volumi finiti, noto come "box scheme". L'algoritmo di soluzione di tipo implicito consente di utilizzare passi temporali di calcolo maggiori rispetto ai metodi espliciti; l'approccio ai volumi finiti fornisce un miglioramento in termini di stabilità e robustezza, rispetto alle tradizionali tecniche differenziali di soluzione basate su metodi a elementi finiti. Per testare la stabilità del modello si è utilizzato il criterio di Courant – Friedrichs – Lewy, abbreviato con CFL, secondo il quale il modello è stabile se è soddisfatta la seguente condizione:

- caso unidimensionale

$$C = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} < C_{max}$$

- caso bidimensionale

$$C = \frac{u_x \cdot \Delta t}{\Delta x} + \frac{u_y \cdot \Delta t}{\Delta y} < C_{max}$$

dove u rappresenta la velocità del flusso, Δt è l'intervallo temporale e Δx è l'intervallo spaziale e il numero adimensionale C è chiamato numero di Courant.

La costante C_{max} dipende dalla tipologia di equazione che deve essere risolta e dal tipo di schema numerico utilizzato per la soluzione (esplicito o implicito). Se si utilizza uno schema esplicito allora C_{max} è pari a 1; se invece lo schema è di tipo implicito sono tollerati valori di C_{max} più elevati.

4.4.1 Creazione del modello bidimensionale del Canale Reale

Al fine di una corretta modellazione idraulica in campo bidimensionale, il primo passo fondamentale è la generazione di un corretto e dettagliato modello del terreno, che è la discriminante principale degli output relativi all'estensione delle aree inondabili e ai tiranti idrici raggiunti in queste ultime.

HEC-RAS prevede una sezione dedicata all'inserimento dei file che descrivono il modello del terreno, *RAS Mapper*, uno strumento che permette la visualizzazione dei dati cartografici associati alla modellazione 2D, oltre che l'osservazione dei risultati delle simulazioni.

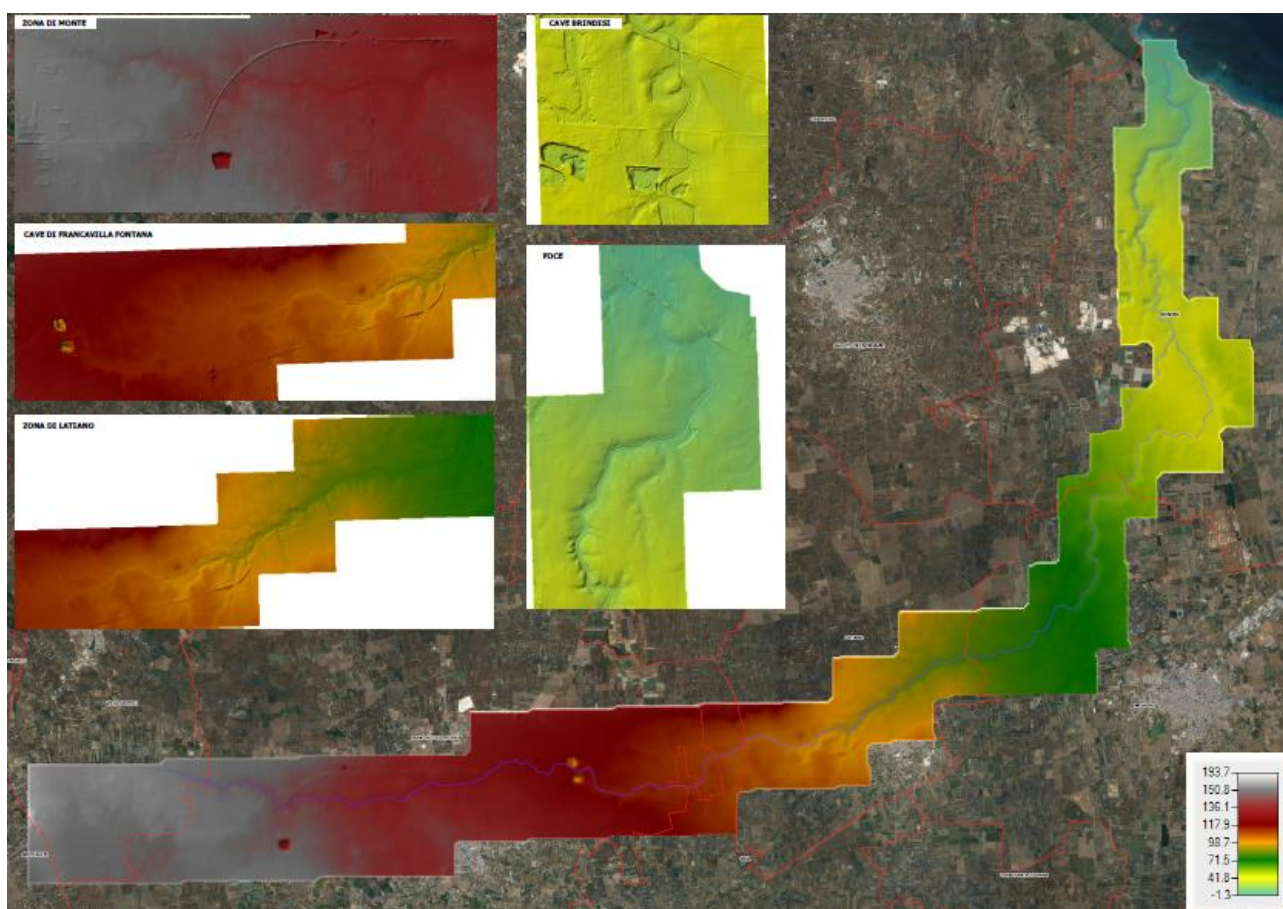


Fig. 27. Modello digitale del terreno del Canale Reale di tipo Lidar

Definito e generato il modello digitale del terreno (Fig.27) si è passato alla creazione del grigliato di calcolo che costituisce il corpo vero e proprio dell'area 2D per lo sviluppo della simulazione bidimensionale.

Innanzitutto, per la creazione della *2D Flow Area* si è tracciato il poligono di contorno rappresentativo della piana alluvionale e, successivamente, si è proceduto con la creazione della maglia di calcolo all'interno delle aree stesse. La dimensione della griglia di calcolo (Fig. 28) si sceglie impostando il valore del dx e del dy nella sezione dell'Edit della area 2D, che consenta di verificare la condizione di stabilità dell'algoritmo CFL.

I tempi computazionali della simulazione numerica sono direttamente legati alle dimensioni della mesh di calcolo e all'estensione del poligono dell'area 2D.

Nel caso in esame, si è definita la dimensione della griglia attribuendo un valore di dx e dy pari a 100 m, adatto sia per l'estensione dell'area complessiva del canale Reale sia per la presenza dei centri urbani.

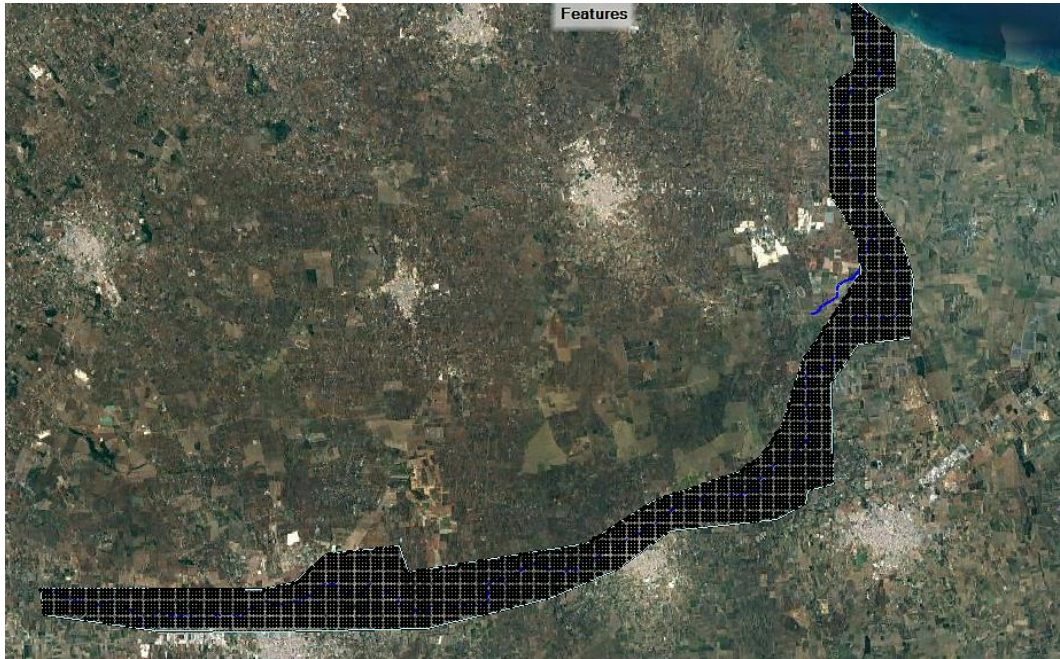


Fig. 28. Area 2D di calcolo del Canale Reale

Come anticipato, la modellazione 2D in HEC-RAS utilizza uno schema di soluzione ai volumi finiti. Questo algoritmo consente l'uso di una maglia di calcolo sia strutturata (elementi rettangolari o quadrati) che non strutturata (elementi triangolari o quadrilateri); ciò significa che la maglia di calcolo può essere una miscela di celle con 3,4,5 e 6 lati, fino ad un massimo di 8 lati.

Ogni singola cella che compone la maglia delle aree 2D è descritta dalle seguenti caratteristiche (Fig. 29):

- Cell Center: rappresenta la quota della superficie idrica, attribuita nel centro della cella;
- Cell Face: sono le linee di contorno, generalmente segmenti lineari, eccetto lungo il bordo dove possono essere spezzate;
- Cell Face Point: rappresentano il punto di collegamento tra le lateral structures e l'area 2D.

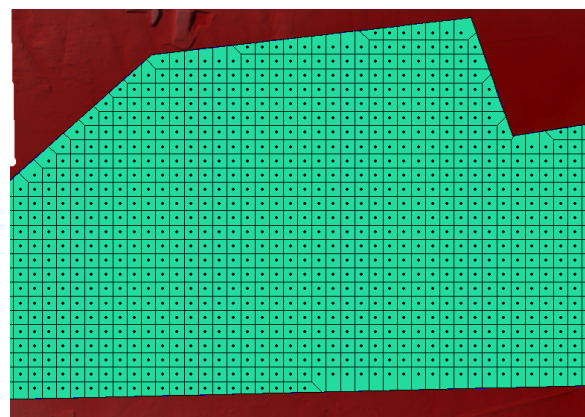
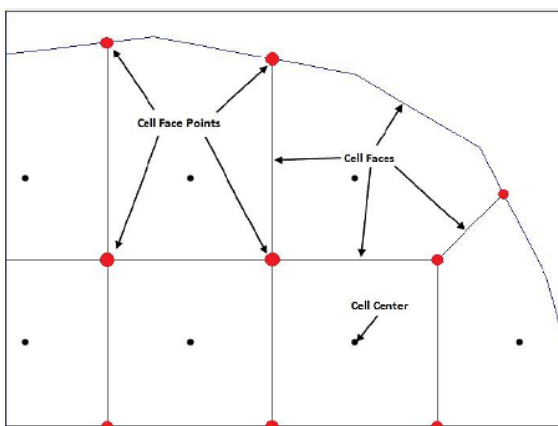


Fig. 29. Celle e punti caratteristici della griglia di calcolo dell'area 2D del Canale Reale

Per una simulazione accurata, è possibile associare alle aree 2D dei valori di scabrezza variabili che simulino l'eterogeneità reale delle aree inondabili. Questa variabilità spaziale è stata nel nostro caso tenuta in conto, mediante la sovrapposizione dell'area 2D di calcolo con la carta d'Uso del Suolo e conseguente attribuzione del coefficiente di scabrezza di Manning relativo alle varie tipologie di uso del suolo.

Prima di procedere con la simulazione in moto vario occorre inserire tutte le condizioni al contorno (*BC Boundary Conditions*), a monte e a valle dell'area di calcolo. Sfruttando lo strumento SA/2D Area BC Lines all'interno dell'editor Geometric Data, è stata digitalizzata la localizzazione di due segmenti, Upstream e Downstream, rispettivamente a monte e a valle della 2D Flow Area "Canale Reale".

Alle BC Lines è possibile associare quattro tipologie di condizioni al contorno:

- Variazione della portata in funzione del tempo (*Flow Hydrograph*);
- Variazione del livello idrico in funzione del tempo (*Stage Hydrograph*);
- Altezza di moto uniforme (*Normal Depth*);
- Scala di deflusso (*Rating Curve*).

Le simulazioni idrauliche effettuate per lo stato attuale del Canale Reale sono quelle con condizione di piena bicentennaria o straordinaria ($T_R=200$ anni) e di piena ordinaria ($T_R=5$ anni). A differenza di quanto fatto per lo studio monodimensionale, dove si sono utilizzate le portate caratteristiche di ciascun sottobacino nella modellazione numerica volendo valutare i singoli contributi dei sottobacini nel dettaglio lungo l'asta fluviale, a causa delle criticità riscontrabili negli attraversamenti idraulici, nella modellazione bidimensionale si è fatto riferimento alla portata di piena corrispondente al bacino intero nel suo complesso, al fine di una visione d'insieme. Quindi, per ciascuno dei due casi (piena straordinaria e piena ordinaria), come condizione al contorno di monte è stata selezionata l'opzione del *Flow Hydrograph*, con inserimento di un idrogramma di piena, descritto mediante discretizzazione temporale pari a 15 minuti, per una maggiore precisione, e valori di portata in mc/s determinati con lo studio idrologico per la piena ordinaria con $TR = 5$ anni (effetti sul breve termine) e per la piena straordinaria con $TR = 200$ anni (effetti sul lungo termine). Sulla base di precedenti studi e per tendere ad una condizione stazionaria, sono state effettuate simulazione di durata pari a cinque giorni. Per l'analisi di moto vario si è dovuto fissare un passo di integrazione temporale. La scelta di questo parametro è importante perché deve soddisfare la condizione di stabilità CFL dell'algoritmo, consentendo di descrivere accuratamente l'idrogramma di piena. Lo step temporale scelto, in grado di rispondere a questi requisiti è pari a 1 minuto.

4.4.2 Risultati dell'analisi bidimensionale

4.4.2.1 Stato di fatto

Simulazione A: Stato di fatto e piena con $T_R = 200$ anni

La prima simulazione idraulica bidimensionale del Canale Reale nella situazione attuale (stato di fatto) effettuata con portata al colmo di piena pari a 264.80 mc/s (ovvero evento con tempo di ritorno $Tr = 200$ anni) ha prodotto i risultati, qui di seguito riportati, in termini di tiranti idrici e aree inondabili (Fig. 30) e velocità di deflusso (Fig. 31).

Tali risultati sono del tutto analoghi a quelli presentati dall'AdB nelle mappe di pericolosità idraulica dell'aggiornamento del PGRA (dicembre 2019). Pertanto, questa prima simulazione ha di fatto consentito di validare il modello

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico
Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

numerico HEC-RAS. Si rileva, confermando quanto emerso nelle mappe di pericolosità del PGRA 2019, come le aree maggiormente interessate dal fenomeno di piena siano localizzate nella zona ASI di Francavilla Fontana, a monte di Latiano, in prossimità del centro abitato di Mesagne e presso la foce del Canale, a Torre Guaceto.

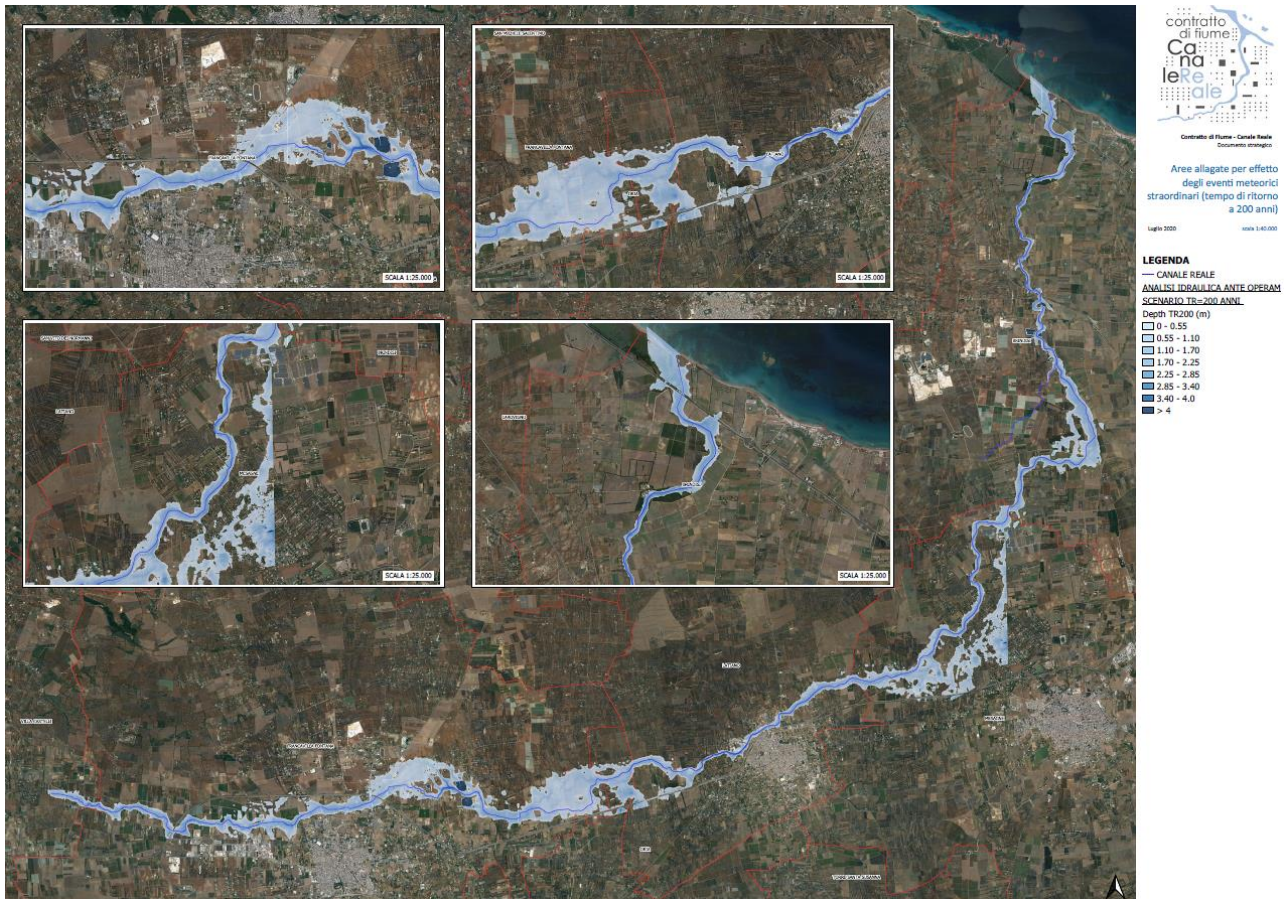


Fig. 30. Mappa dei tiranti idrici. Simulazione A. Stato di fatto e portata con $Tr = 200$ anni

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico
 Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale



Fig. 31. Mappa delle velocità di deflusso. Simulazione A. Stato di fatto e portata con $Tr = 200$ anni

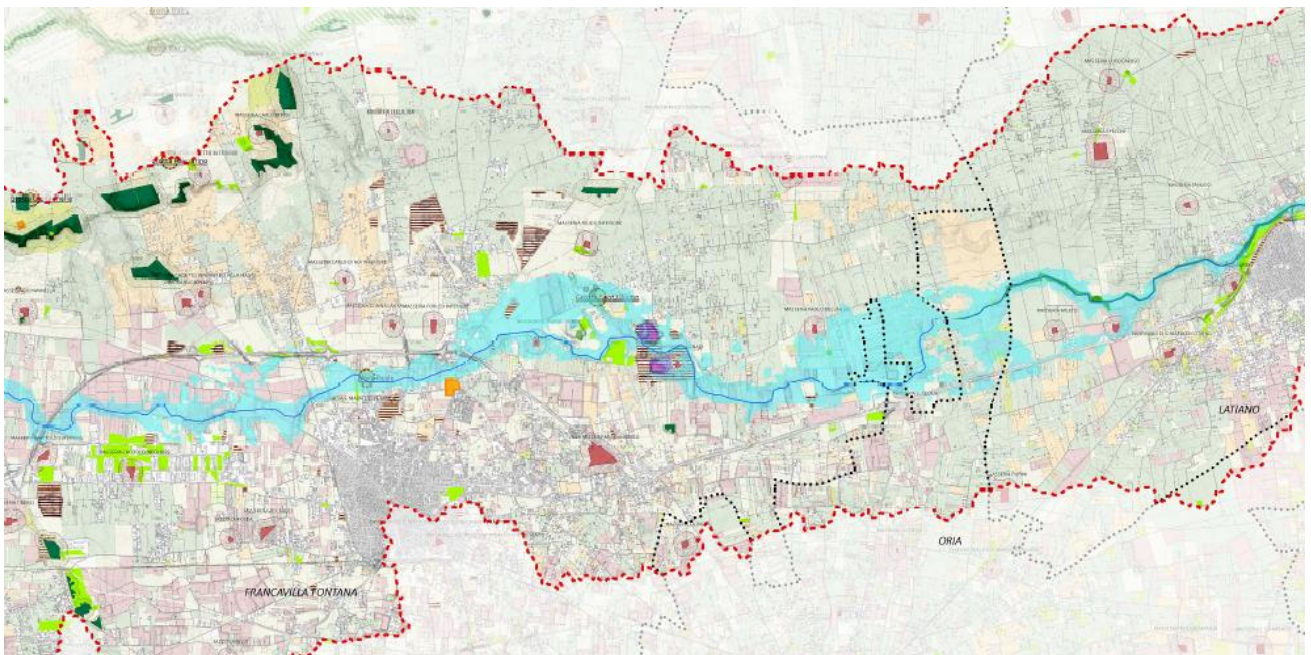


Fig. 32. Simulazione A. Ingrandimento della mappa dei tiranti idrici sull'area di Francavilla Fontana e sovrapposizione con la carta uso del suolo.

Simulazione B: Stato di fatto e piena con $T_R = 5$ anni

Come già scritto, è emersa, dal confronto con alcuni sottoscrittori, la necessità di valutare anche situazioni di pericolosità prodotte da portate con tempi di ritorno bassi ovvero con frequenza più elevata.

In particolare, su richiesta del Consorzio di Bonifica ARNEO, che ha evidenziato come esondazioni non trascurabili interessino diverse aree limitrofe al canale con cadenza praticamente annuale, si è deciso di esaminare il comportamento idraulico del Canale Reale per eventi di piena ordinaria caratterizzati da $T_R=5$ anni. Per determinare tale valore di portata, si è ripetuto lo studio idrologico come descritto al par. 3.2, ottenendo una portata al colmo di piena, sulla sezione di chiusura dell'intero bacino idrografico, per $T_R=5$ anni pari a 12 mc/s.

I risultati di questa simulazione in forma grafica sono quelli di Fig. 33 per tiranti idrici e aree allagabili e di Fig. 34 per le velocità di deflusso. In Fig. 35 si riporta la sovrapposizione delle aree allagabili sulla carta d'uso del suolo nella zona di Francavilla Fontana e Latiano, per un confronto con la stessa sovrapposizione di Fig. 32 relativa alla simulazione A. Si osserva che anche nel caso di una piena ordinaria si verificano fenomeni di allagamento, sebbene su aree decisamente più limitate e con tiranti idrici modesti (generalmente < 40 cm).

Ne sono particolarmente interessate alcune zone della pianura alluvionale, con criticità maggiori in corrispondenza della zona ASI di Francavilla Fontana e nel territorio ricompreso tra i centri abitati di Francavilla Fontana e Latiano, zona prevalentemente occupata da prati e pascoli naturali e da uliveti.



Fig. 33. Mappa dei tiranti idrici. Simulazione B. Stato di fatto e portata con $T_r = 5$ anni

Contratto di Fiume del Canale Reale – Documento Strategico
Allegato 3 – Studio idrologico e valutazione del rischio idraulico del Canale Reale

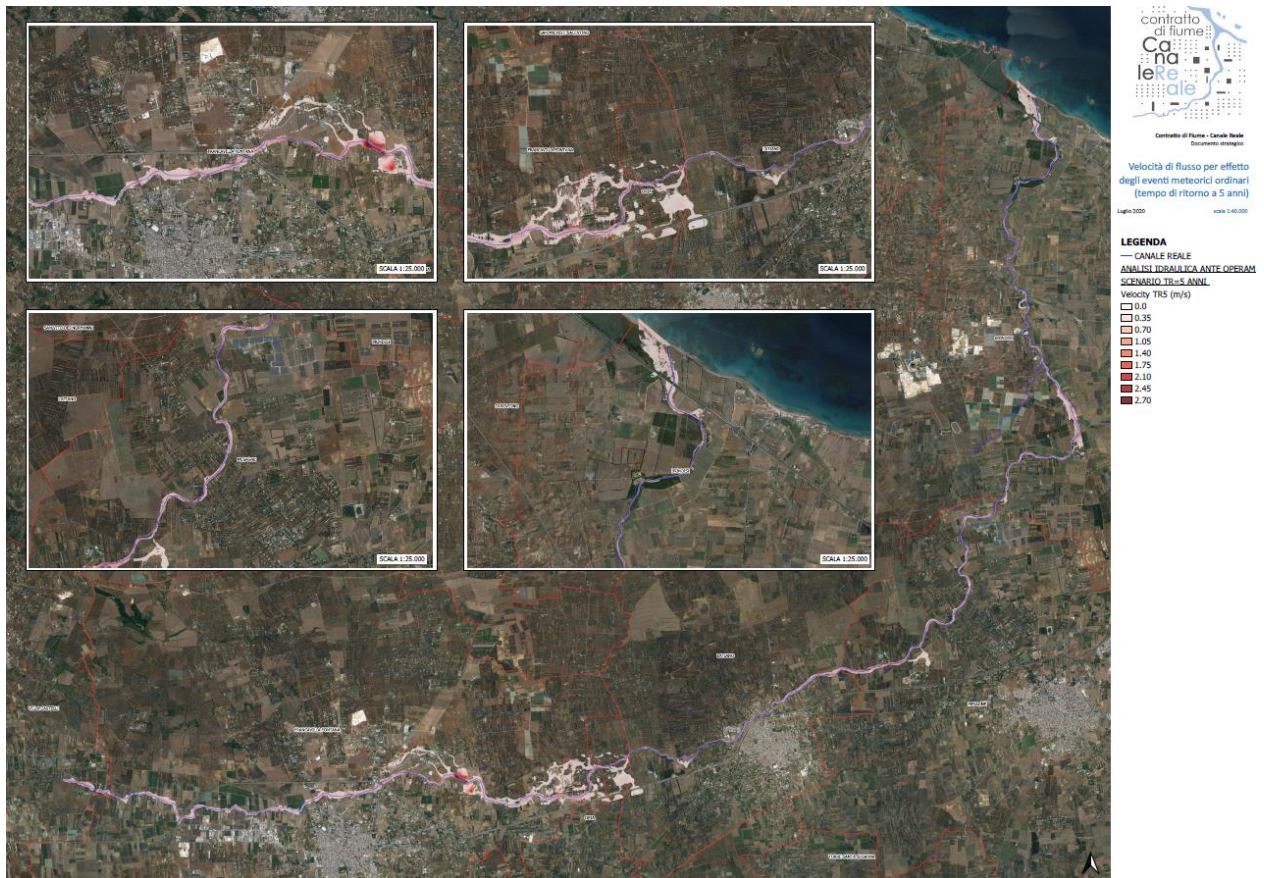


Fig. 34. Mappa delle velocità di deflusso. Simulazione B. Stato di fatto e portata con $Tr = 5$ anni

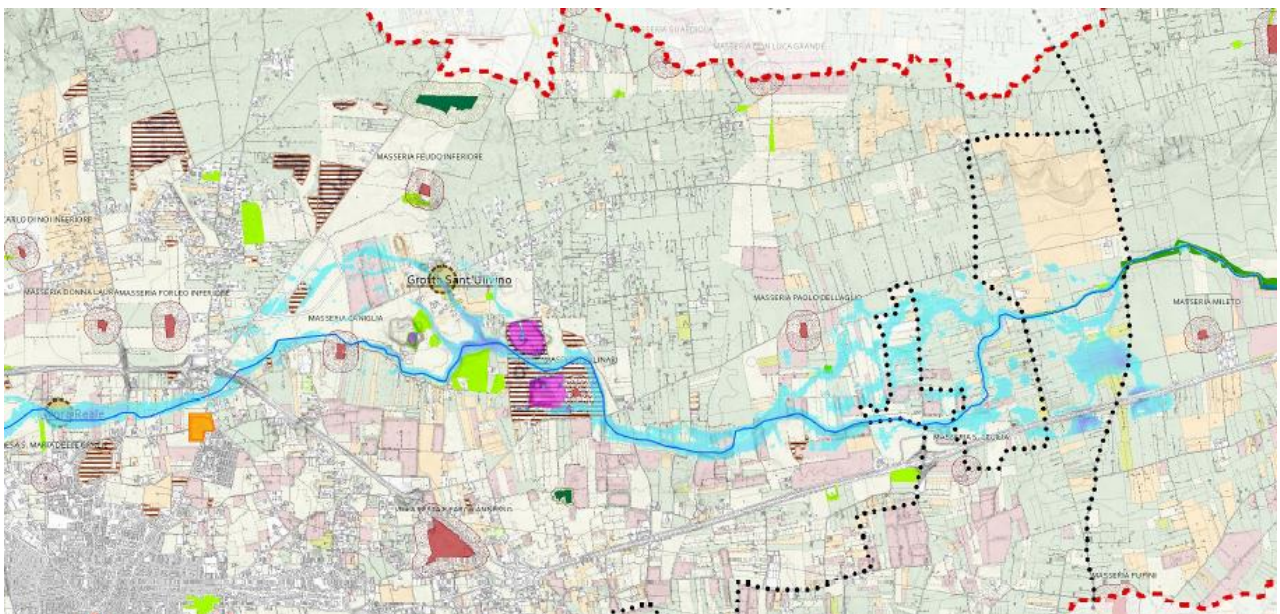


Fig. 35. Simulazione B. Ingrandimento della mappa dei tiranti idrici sull'area di Francavilla Fontana e sovrapposizione con la carta uso del suolo.

4.4.2 Ipotesi di intervento progettuale per la mitigazione del rischio idraulico

Preme sottolineare come sulla base di studi precedenti (p.e. Studio Lame Bari Brindisi) e nelle aree più esposte il PGRA abbia già individuato misure a scala locale, riferite ai risultati di una piena con TR=200 anni (come richiesto da normativa). Tali interventi si traducono in opere decisamente impattanti da un punto di vista economico e amministrativo oltre che puramente paesaggistico. Si ripotano a titolo di esempio le soluzioni previste per la messa in sicurezza dell'area di Francavilla Fontana e di Latiano (Fig. 36).

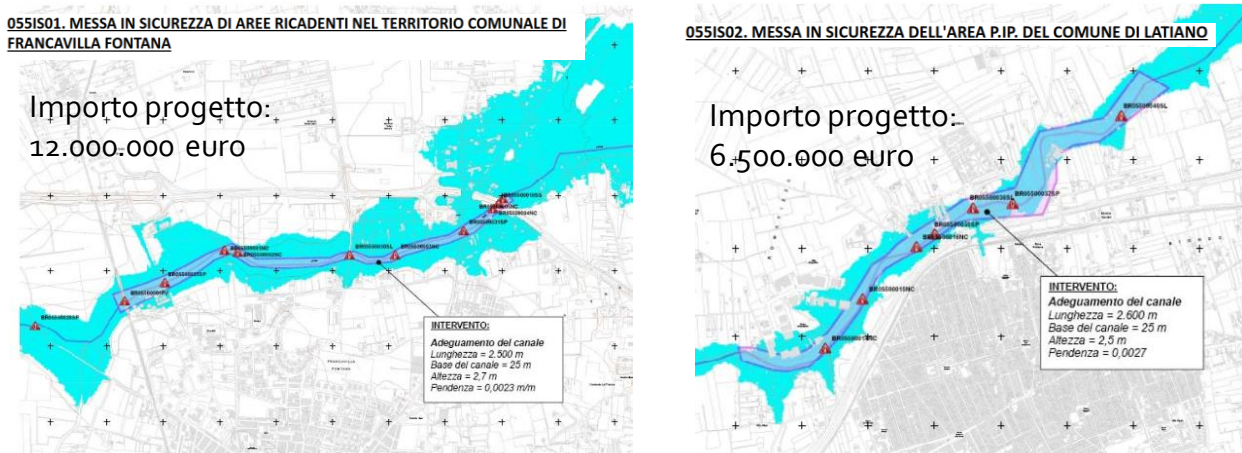


Fig. 36. Interventi di messa in sicurezza a Francavilla Fontana e Latiano, come da PGRA.

Dal confronto con i sottoscrittori del Contratto è emersa l'esigenza di valutare anche possibili interventi migliorativi definiti 'minori', ovvero che interessano aree meno estese, meno impattanti in termini paesaggistico-naturalistici e con costi ridotti, i quali saranno sicuramente insufficienti a mitigare il rischio idraulico nell'ipotesi di piena straordinaria, ma possono contribuire ad una riduzione del rischio nell'ipotesi di piena ordinaria.

Se si considera l'espressione del rischio idraulico (PAI, 2005), ovvero l'entità del danno atteso, questa è data da tre fattori:

$$R = P \times V \times E$$

P = pericolosità, probabilità di accadimento dell'evento in un certo arco temporale con determinata intensità;

V = vulnerabilità pari a 0 in caso di nessun danno e pari a 1 in caso di distruzione totale;

E = valore esposto, ovvero numero di presenze umane e/o valore di risorse naturali, economiche esposte al pericolo.

Considerando la situazione più critica in termini di vulnerabilità e ponendo V=1, poter ridurre il peso dei contributi di P ed E in questa espressione significa sostanzialmente poter ridurre l'estensione delle aree allagabili per effetto della piena. In questo caso, la piena di riferimento è proprio quella ordinaria, con TR=5 anni.

A tale proposito, si sono quindi valutati tre diversi possibili scenari di intervento. Questi sono stati individuati non solo al fine della mitigazione del rischio idraulico, ma anche tenendo presente una serie di obiettivi multidisciplinari, quali l'incremento della qualità del corpo idrico, la riduzione dell'apporto di sedimenti in mare, il ripristino della continuità ecologica del canale, l'incremento degli habitat e delle specie vegetali, ovvero obiettivi compatibili con la visione del Canale Reale come corridoio ecologico multifunzionale.

Gli interventi ipotizzati vogliono essere solo delle proposte orientative, tra le tante plausibili soluzioni progettuali, e consistono nella realizzazione di alcune aree di possibile espansione lungo il canale, opportunamente individuate.

Tali aree sono definite 'storage areas' e nella modellazione HEC - RAS vengono ottenute mediante opportuno abbassamento della quota del terreno. Per ciascuno scenario di intervento, dunque, si è modificato il Digital Terrain Model in input nella modellazione idraulica e si sono condotte le simulazioni 'post-operam', nella condizione di piena ordinaria. Successivamente si sono comunque ripetute queste stesse simulazioni anche per la condizione di piena straordinaria, al fine di valutare un eventuale effetto dell'intervento progettuale anche in questo caso.

La localizzazione degli interventi è stata effettuata sulla base delle curve di livello e della carta d'uso del suolo, privilegiando le aree di proprietà pubblica, in abbandono o in particolari condizioni di naturalità, le aree classificate come zone a pascolo naturale, praterie e incolti, oppure le aree coltivate a seminativo rispetto a coltivazione arboree. L'estensione delle aree va ad incidere sulla tipologia di intervento di rinaturalizzazione, dove le aree maggiormente estese, qualora sufficientemente distanti dalle antropizzazioni, possono ospitare zone umide ottenendo un importante incremento dell'ecotono fluviale.

Inoltre, gli sbancamenti considerati sono dell'ordine di 30 – 50 cm in modo da evitare opere impattanti sul territorio, dal punto di vista paesaggistico.

Simulazione ipotesi intervento 1: area storage in zona Francavilla Fontana

L'area individuata nella zona ASI di Francavilla Fontana si inserisce nel contesto rurale ad est del centro abitato di Francavilla Fontana. L'area storage ha un'estensione complessiva di 241.900 mq e su entrambe le sponde del canale sono presenti aree a pascolo naturale, praterie e incolti, secondo la classificazione dell'UDS, aree che risultano interessate da fenomeni di allagamento per effetto della piena ordinaria (si veda Fig. 33).

In adiacenza all'area individuata si trova il centro sportivo "ASD Tiro a Volo Diana", mentre procedendo verso valle si trova un'area estrattiva la cui attività è attualmente sospesa. Nella parte a nord-est ci sono piccoli nuclei di edificato sparso, a nord, invece, si trova l'area per la quale è prevista la realizzazione della zona ASI.

L'area risulta interessata da fenomeni di esondazione causati da eventi meteorici ordinari concentrati soprattutto in alcuni compluvi localizzati nella porzione prospiciente la sponda sinistra del canale (Fig. 33), mentre l'area allagabile relativa ad eventi straordinari (Fig. 32) interessa prevalentemente la sponda sinistra e in piccola parte anche quella destra.

Le caratteristiche dell'area storage (Fig. 37) sono:

- Superficie totale = 241.900 mq;
- Abbassamento argine e sbancamento dell'area = 30 – 50 cm;
- Quote nello storage: da 117 m slm in corrispondenza degli argini a circa 121.5 m slm nella piana alluvionale.

L'intervento consiste nell'abbassamento di entrambe le sponde fluviali e nello sbancamento dell'area per circa 30 – 50 cm sulla base delle curve di livello, al fine di favorire l'esondazione. Tuttavia, nella parte centrale dell'area storage in sponda sinistra si è evitato lo sbancamento, lasciando la quota del terreno originaria, questo al fine di creare una piccola isola centrale che possa garantire l'habitat idoneo per flora e fauna specifiche.



Fig. 37. Area storage Francavilla – Ipotesi intervento 1

I risultati complessivi delle simulazioni (per portata con TR = 5 anni e per portata con TR = 200 anni) sono presentati nelle Tavole in allegato a questa relazione. Qui di seguito si riportano alcuni ingrandimenti per specifiche zone di maggiore interesse.

In particolare, si riportano in Fig. 38 le immagini per un confronto tra lo stato di fatto e l'intervento di progetto proposto, nel caso di piena con portata ordinaria. In Fig. 39 lo stesso confronto è riproposto anche per la condizione di piena straordinaria. È evidente come nel caso di piena straordinaria l'intervento progettuale risulta praticamente ininfluente ai fini della riduzione dell'area allagabile.

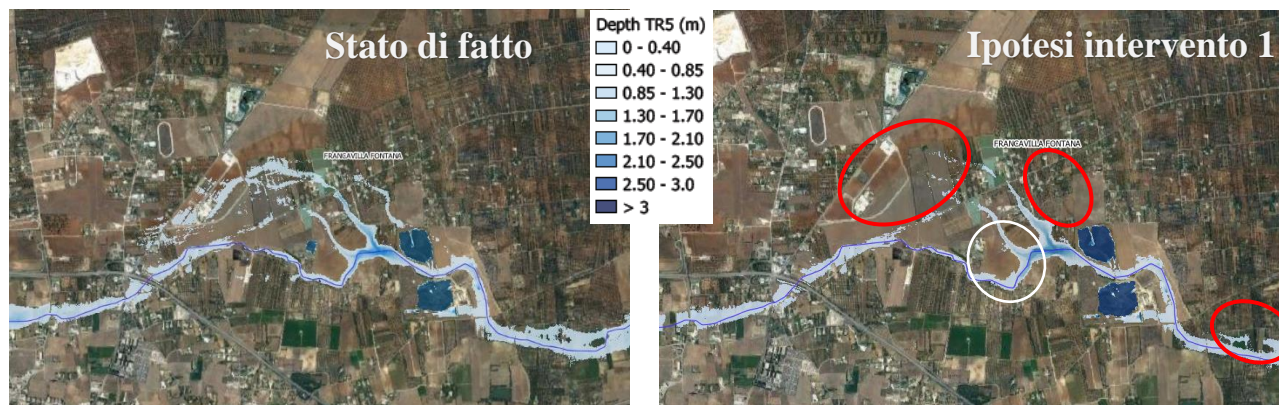


Fig. 38. Confronto delle mappe dei tiranti con $T_R = 5$ anni (scala 1:20.000). In bianco l'area storage. In rosso le aree di riduzione effetto piena.

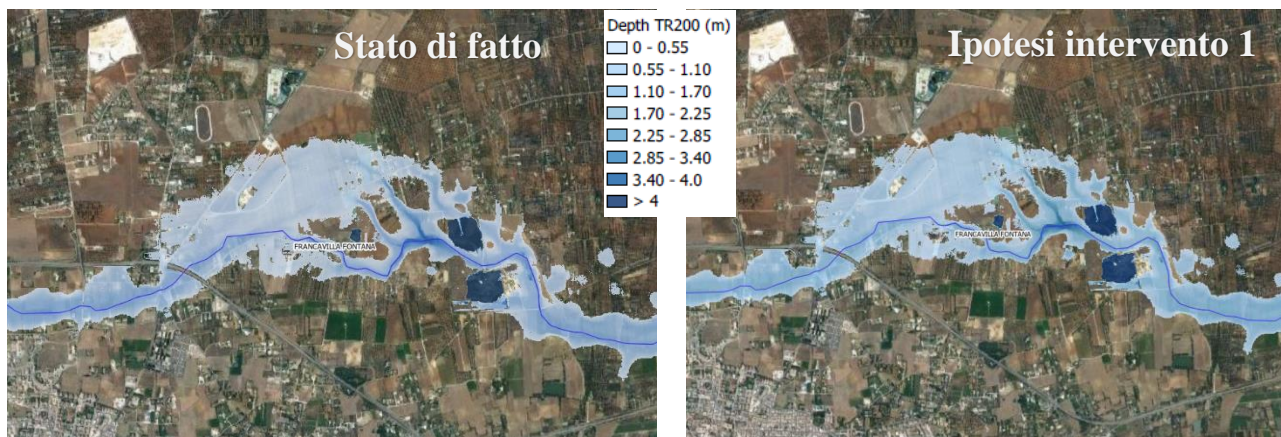


Fig. 39. Confronto delle mappe dei tiranti con TR = 200 anni (scala 1:20.000)

Il risultato ottenuto per piena ordinaria nell'ipotesi di intervento 1 è una riduzione dell'estensione dell'area allagabile (Fig. 38) nella zona ASI di Francavilla Fontana, soprattutto in corrispondenza degli impluvi naturali, così come anche a valle, con una riduzione dei livelli dei tiranti idrici nella piana alluvionale. Gli effetti migliorativi dovuti all'inserimento dell'area storage sono visibili, anche se comunque piuttosto limitati.

Simulazione ipotesi intervento 2: area storage in zona Torre Guaceto

L'area individuata per il secondo scenario è posta in prossimità della foce del Canale Reale ed è compresa nel perimetro della Riserva Naturale di Torre Guaceto, a monte della SS 379. Sulla sponda sinistra del canale, a ridosso della SS 379, si individua un'area attualmente classificata come area a cespuglieti ed arbusteti dalla carta uso del suolo.

Le caratteristiche dell'area storage sono:

- Superficie totale = 56.260 mq;
- Abbassamento argine e sbancamento dell'area = 30 – 50 cm;
- Quote nello storage = da 3 m slm in corrispondenza degli argini a circa 7 m slm nella piana alluvionale.



Fig. 40. Area storage foce – Ipotesi intervento 2

L'area risulta in parte coinvolta nei fenomeni di allagamento da piena ordinaria (Fig. 33) e interamente coinvolta nei fenomeni di allagamento da piena straordinaria (Fig. 32).

L'intervento consiste nell'abbassamento della sponda fluviale sinistra e nello sbancamento dell'area per circa 30 – 50 cm sulla base delle curve di livello, al fine di agevolare l'esonazione. Anche in questa soluzione, nella parte centrale dell'area storage si è evitato lo sbancamento, al fine di non modificare l'habitat per flora e fauna specifiche che potrebbero necessitare di ambiente asciutto.

Tuttavia, a causa dell'altimetria dei luoghi si evidenzia subito dal confronto con la simulazione B (stato di fatto) come la proposta di intervento non sia particolarmente efficace in termini di riduzione dell'area allagabile (Fig. 41):

Tuttavia, si osserva una leggera riduzione dei tiranti nello storage, mentre a valle di questo si nota una riduzione della velocità di deflusso. Sebbene il modello HEC-RAS non sia stato implementato con utilizzo di moduli di trasporto solido, si è tuttavia stimato che tale riduzione comporterebbe una riduzione del coefficiente di dispersione turbolenta ed una conseguente riduzione del trasporto di un tracciante passivo. In prima approssimazione, si può valutare tale riduzione pari al 7% circa (in termini di ordine di grandezza della variazione della concentrazione del tracciante). Ciò comunque comporterebbe effetti positivi più a valle, appunto riducendo l'apporto a mare di traccianti passivi di varia natura, nella riserva naturale marina di Torre Guaceto.

Di seguito, in Fig. 41, si riportano le immagini per il confronto tra lo stato di fatto e lo stato di progetto.

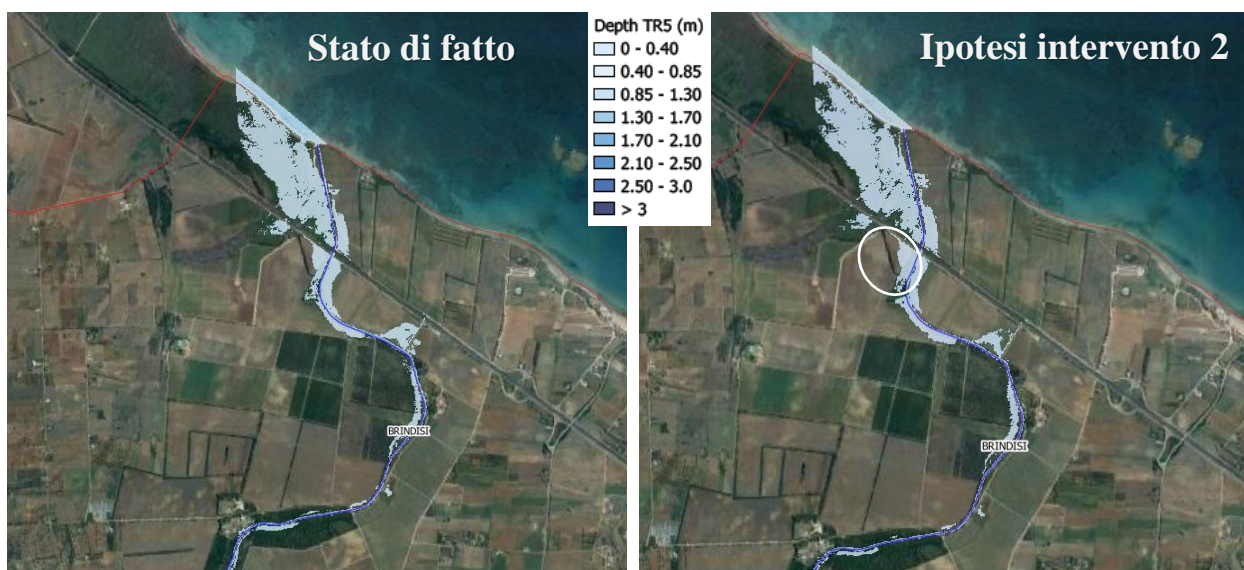


Fig. 41. Confronto delle mappe dei tiranti con TR = 5 anni (scala 1:20.000). Cerchio in bianco indica l'area storage

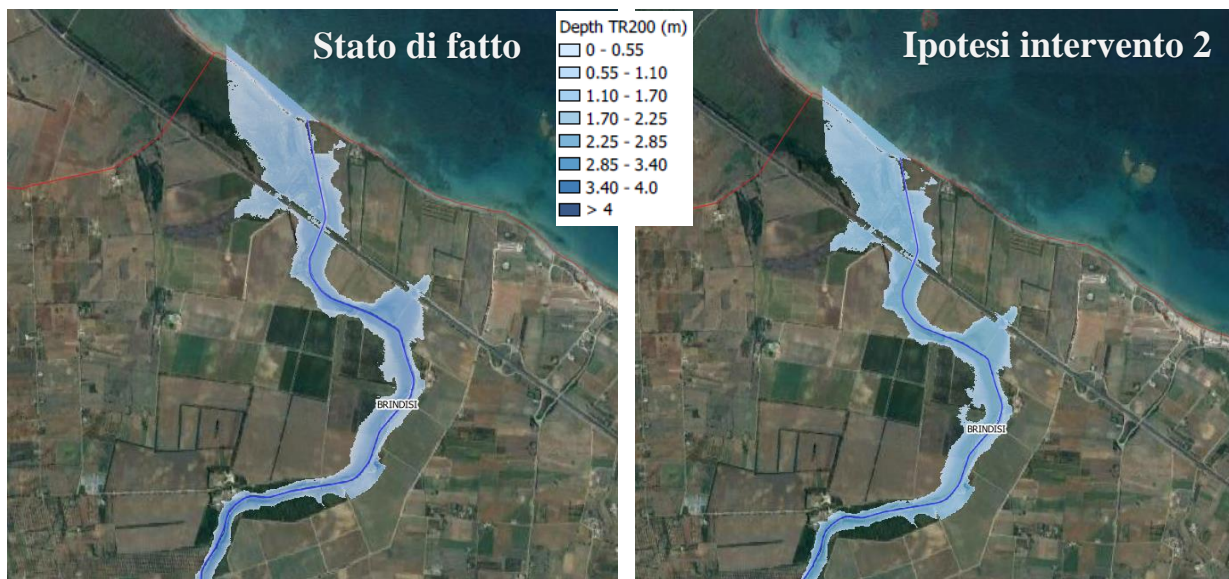


Fig. 42. Confronto delle mappe dei tiranti con TR = 200 anni (scala 1:20.000)

Dalla Fig. 42 emerge chiaramente come, anche in questo caso, l'intervento proposto non modifichi in alcun modo gli effetti di una piena straordinaria.

Simulazione ipotesi intervento 3: aree storage distribuite lungo il canale

Per il terzo possibile intervento si è pensato di non concentrare l'attenzione solo su una porzione specifica del canale, ma piuttosto di discretizzare gli impatti di possibili interventi sull'intera asta fluviale.

Pertanto, si sono state ipotizzate 14 aree storage distribuite lungo il canale. Le aree da destinare a storage si estendono dalle sorgenti del canale, nel contesto rurale di Francavilla Fontana, caratterizzato dalle coltivazioni di vigneti e seminativi (Fig. 43), passando nel territorio di Mesagne e Brindisi (Fig. 44), fino alla zona compresa nel perimetro della riserva di Torre Guaceto (Fig. 45), in coerenza con gli interventi strategici del Piano di Gestione della Riserva Naturale.

Le caratteristiche delle 14 aree storage sono:

- Superficie totale = 1.087.800 mq circa;
- Abbassamento argine e sbancamenti: massimo 1,5 m nelle aree meno estese; 30 – 50 cm nelle aree con estensione maggiore;
- UDS = seminativi semplici non irrigui.



Fig. 43. Aree storage nel territorio di Francavilla Fontana – Ipotesi intervento 3

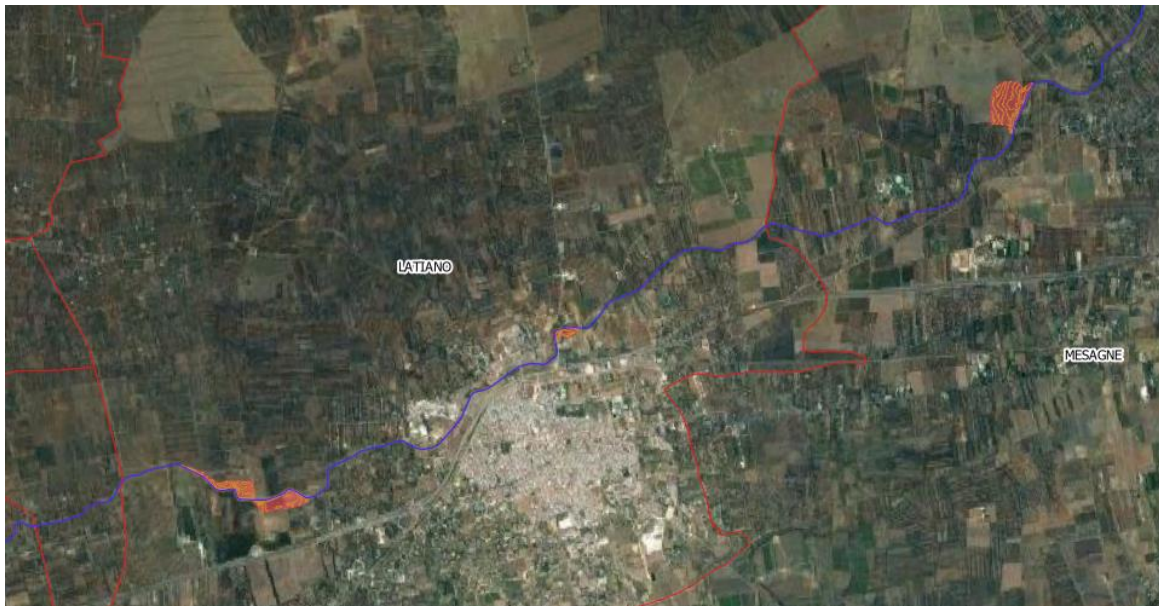


Fig. 44. Aree storage nel territorio di Latiano e Mesagne – Ipotesi intervento 3

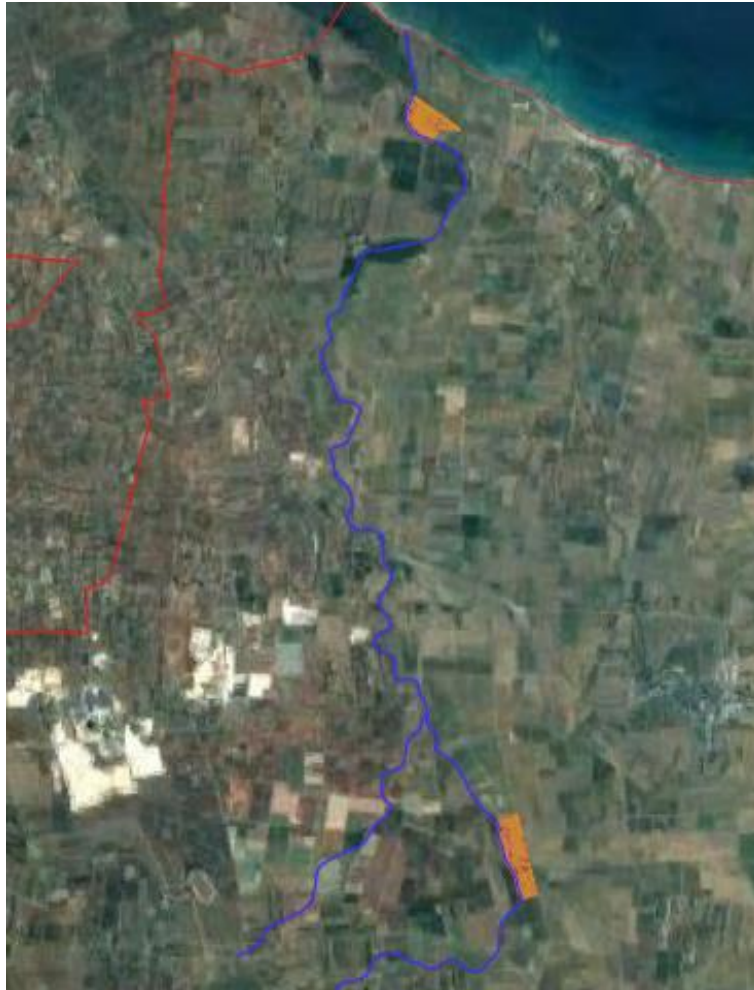
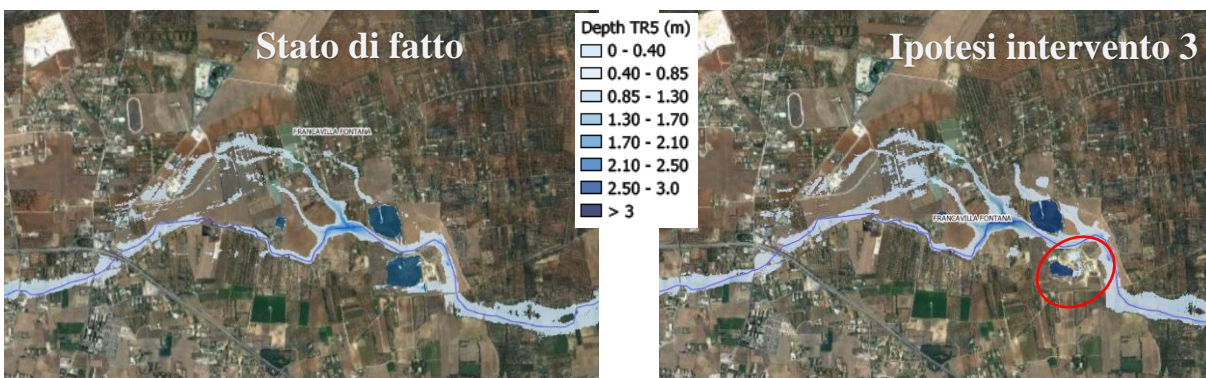


Fig. 45. Aree storage nel territorio di Brindisi – Ipotesi intervento 3

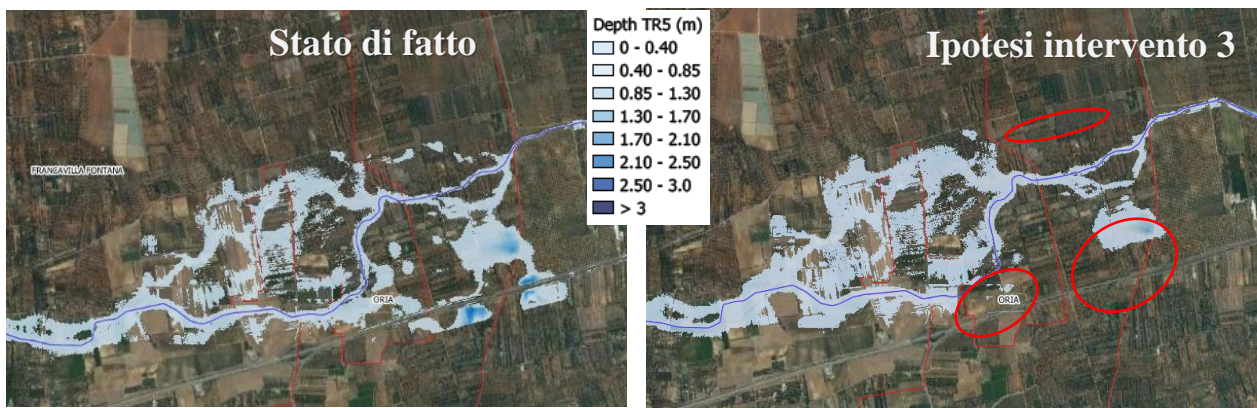
In Fig. 46 si riportano le immagini per un confronto tra lo stato di fatto e quest'ipotesi di intervento per le mappe dei tiranti a 5 anni (in scala 1:20.000) e per tre diverse porzioni di territorio.

Si rileva come la presenza di aree di espansione distribuite comporti benefici localizzati. In particolare, nelle zone più a monte (Francavilla Fontana e Latiano) si osserva la riduzione di aree interessate da esondazione, ma si nota un contestuale allagamento in quelle adiacenti, anche se sempre con tiranti modesti. Nell'area presso la foce, invece, l'effetto positivo indotto dall'intervento progettuale è evidente.

- Zona Francavilla Fontana



- Zona tra Francavilla Fontana e Latiano



- Zona Torre Guaceto

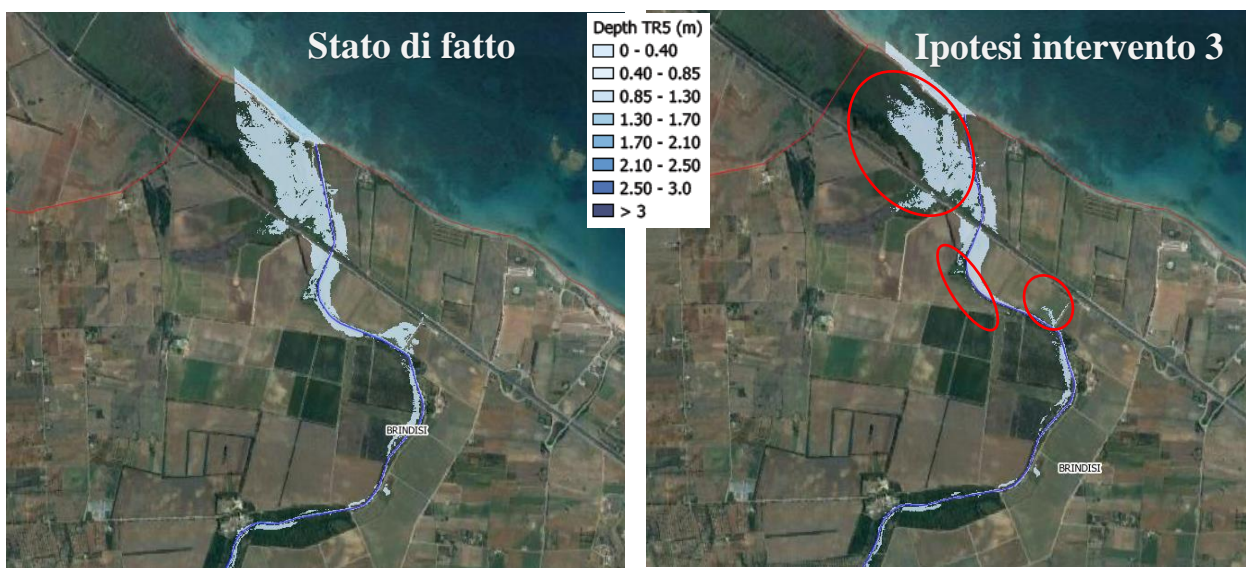


Fig. 46. Confronto delle mappe dei tiranti con TR = 5 anni (scala 1:20.000). In rosso aree di riduzione effetto piena.

Non si riportano qui per brevità le immagini per il confronto tra lo stato di fatto e l'intervento ipotizzato nel caso della piena straordinaria, non rilevandosi sostanziali variazioni tra stato di fatto e situazione progettuale proposta. Ad ogni modo, come anticipato, tutte le mappe complete sono disponibili nelle Tavole in allegato alla presente relazione.

5. CONCLUSIONI PRELIMINARI

Il presente studio porta a prime conclusioni riassumibili nel modo seguente:

Interventi di ‘piccolo impatto’ che non alterano sostanzialmente lo stato dei luoghi naturalistico-paesaggistici e sono più facilmente gestibili da punto di vista economico-amministrativo comportano una riduzione del rischio idraulico in alcune aree lungo il Canale, in termini essenzialmente di riduzione dell’area allagabile nel caso di piene ordinarie. Ad ogni modo è bene sottolineare che la riduzione delle aree interessate da un possibile allagamento è strettamente dipendente dalla posizione e dall’estensione delle aree (in questa relazione definite storage) appositamente individuate e destinate all’allagamento programmato, oltre che dalla naturale altimetria dei luoghi. Inoltre, questi interventi che producono un effetto sul territorio nel caso di piene ordinarie, non inducono effetti significativi di mitigazione nelle condizioni di piene straordinarie. In particolare, la definizione di questi interventi va opportunamente studiata, al fine di valutare quali siano gli obiettivi che si vogliono raggiungere, compatibili con la visione del Canale Reale come corridoio ecologico multifunzionale.

Gli effetti di interventi di questo tipo possono anche tradursi in un beneficio apportato al corpo idrico finale, in termini di trasporto di traccianti passivi. Ovviamente questi aspetti legati al trasporto dovrebbero essere oggetto di ulteriore approfondita indagine, mediante utilizzo di moduli di qualità delle acque e/o trasporto solido.