

Direzione Territoriale Idrografica Lombardia Occidentale – U.O Pavia

PV-E-1124

OPERE DI RIPRISTINO DELLE SPONDE DEL F. TICINO IN BORGO BASSO DEL COMUNE DI PAVIA.
D.g.r. n. 6273/2022

PROGETTO ESECUTIVO



Importo finanziamento
€ 900.000,00

CUP
B18H22000770002

CUI
L92116650349202200106

Codice AIPO
A28/PV/70

Perizia n.
3367

RELAZIONE IDRAULICA

CODICE ELABORATO:

02.A

Supporto esterno per relazione idraulica:

ETATEC
STUDIO PAOLETTI

Il Responsabile Unico di Progetto

Ing. Fabio Sai

DATA:

17 MAG, 2024

VERSIONE:

REV.00

VISTO APPROVAZIONE:



INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. INQUADRAMENTO GENERALE DEL FIUME TICINO	3
3. RACCOLTA DATI	6
3.1 DATI DESUNTI DAL PAI – PIANO ASSETTO IDROGEOLOGICO	6
3.2 DATI DESUNTI DAL PGRA – PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO DI ALLUVIONI.....	7
4. RILIEVI DI DETTAGLIO DEL FIUME TICINO	13
4.1 PREMESSA	13
4.2 D.T.M. (MODELLO DIGITALE DEL TERRENO) LIDAR	13
4.3 RILIEVO BATIMETRICO	15
4.4 ELABORAZIONE FINALE DEI RILIEVI E CREAZIONE DI UN UNICO DTM RELATIVO ALLA PARTE EMERSA E ALLA PARTE SOMMERSA DELL'ALVEO DEL F. TICINO.....	16
5. IMPLEMENTAZIONE DI UN MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE	17
5.1 PREMESSA	17
5.2 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO	17
5.2.1 Ipotesi di calcolo e condizioni al contorno	17
6. ANALISI IDRAULICHE	21
6.1 EVENTO DI PIENA CON T=20 ANNI.....	21
6.2 EVENTO DI PIENA CON T=200 ANNI.....	23
7. CALCOLI DI DIMENSIONAMENTO DELLA SCOGLIERA IN PROGETTO.....	26

1. PREMESSA

La presente relazione riporta le caratteristiche idrauliche del fiume Ticino, con particolare riferimento al tratto interessato dagli interventi previsti nell'ambito del lavoro *"Opere di ripristino delle sponde del f. Ticino in Borgo Basso del Comune di Pavia- PV-E-1124"*.

Di seguito sono elencate le attività effettuate dagli scriventi nell'ambito della stesura della presente relazione, che vengono descritte nei successivi capitoli:

1. raccolta dati e informazioni idrologico-idrauliche del fiume Ticino nel tratto di interesse; in particolare, i principali dati sono stati desunti dal Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico del bacino del fiume Po (PAI) e dal Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), entrambi dell'Autorità distrettuale del bacino del fiume Po (capitolo 3);
2. esecuzione e restituzione di rilievi di dettaglio del fiume Ticino (Lidar per la parte emersa e batimetrico per la porzione di alveo posta al di sotto del pelo dell'acqua); successiva realizzazione di un unico modello digitale del terreno attraverso l'unione dei suddetti rilievi (capitolo 4);
3. implementazione del modello idraulico bidimensionale del fiume Ticino (capitolo 5);
4. effettuazione di analisi idrauliche, con il modello di cui al 3., per la definizione delle caratteristiche della corrente fluviale in condizioni di piena, utili al dimensionamento delle opere di difesa spondali oggetto del presente progetto (capitolo 6);
5. calcoli di dimensionamento della scogliera in progetto (capitolo 7).

2. INQUADRAMENTO GENERALE DEL FIUME TICINO

Il bacino idrografico del fiume Ticino sotteso dall'incile del Lago Maggiore a Sesto Calende è pari a 6'599 kmq, in parte compresi in territorio svizzero (3'369,5 kmq) ed in parte in quello italiano (3'229,5 kmq).

Il Ticino ha origine in territorio svizzero, in prossimità del passo del S. Gottardo, ed ha una lunghezza complessiva di 284 km ed un dislivello complessivo di circa 2800 m. Costituisce con il fiume Toce il principale affluente del lago Maggiore o di Verbano; a monte della sua immissione in lago, in località Locarno, riceve in sinistra torrenti Brenno e Moesa.

Uscito dal lago a Sesto Calende, a quota 205 m s.m., esso percorre la Pianura Padana per circa 110 km confluendo nel fiume Po a Linarolo (PV) a quota 56 m s.m., con una larghezza media del bacino idrografico di 7 km; tale bacino, con poche eccezioni, è circoscritto alle sole aree golenali ed ai territori agricoli le cui colature giungono, più o meno direttamente, al fiume.

Il Ticino sublacuale scorre in una valle a fondo quasi piatto, incisa nella superficie fondamentale della pianura cui è raccordata da un terrazzo principale e da altri minori: il fiume decorre dapprima con un alveo semplice, quindi amplia progressivamente il suo letto divagando e formando isole e meandri. Tra Oleggio e Bereguardo è composto in generale da uno o due rami principali, separati da grosse isole solcate da rami minori. A valle di Vigevano la struttura dell'alveo raggiunge la sua massima complessità, caratterizzata dalla presenza di diversi rami, ciascuno con propri meandri, e dalla continua ripresa ed abbandono di vecchi rami e l'attiva formazione ed erosione, all'interno dei canali principali, di isolotti. A valle di Bereguardo il Ticino assume chiare caratteristiche di fiume a meandri, anche se la loro evoluzione è da tempo artificialmente impedita dalle opere di difesa spondale.

Il tratto oggetto del presente studio è situato all'interno del Comune di Pavia, in sponda sinistra (cfr. Figura 2).

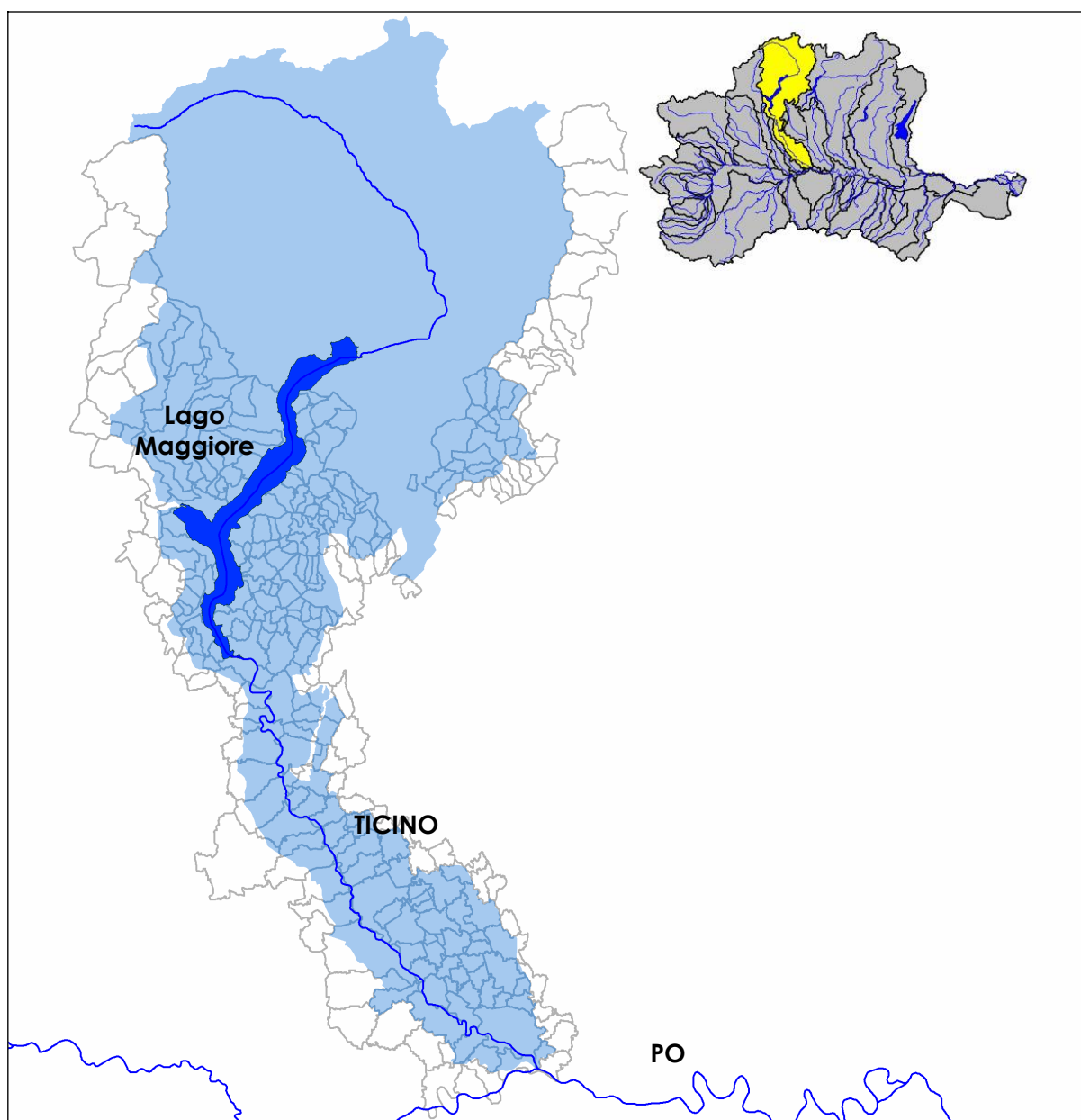


Figura 1 – Inquadramento del bacino idrografico del fiume Ticino

5

3. RACCOLTA DATI

3.1 DATI DESUNTI DAL PAI – PIANO ASSETTO IDROGEOLOGICO

Il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico del Bacino del Fiume Po (PAI), adottato dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino con Deliberazione n. 18 del 26 aprile 2001, è stato approvato con DPCM del 24 maggio 2001.

Obiettivo prioritario del PAI è la riduzione del rischio idrogeologico entro valori compatibili con gli usi del suolo in atto, in modo tale da salvaguardare l'incolumità delle persone e ridurre al minimo i danni ai beni esposti.

Il PAI, riguardo alla pericolosità e al rischio di alluvioni, contiene nell'Elaborato 8 la delimitazione delle fasce fluviali (Fascia A, Fascia B, Fascia B di progetto e Fascia C) dell'asta del Po e dei suoi principali affluenti, tra cui il F. Ticino. In tratto di fiume Ticino interessato dall'intervento in progetto è situato a valle della sezione del PAI n. 3.

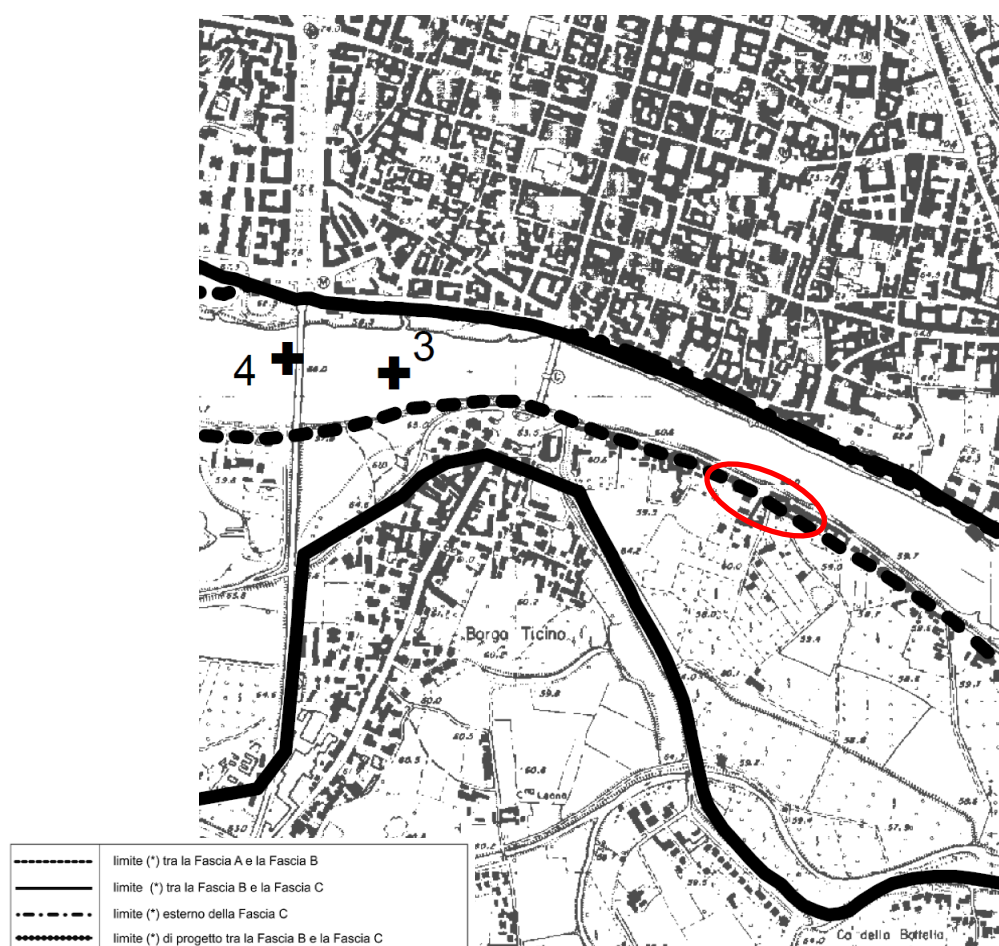


Figura 3 – Estratto cartografico delle fasce fluviali del fiume Ticino nell'intorno dell'intervento in progetto

Nella Direttiva n. 2 del PAI, relativa alla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica, sono riportati i valori di portata e i corrispondenti profili di piena sui corsi d'acqua interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali. Nelle figure seguenti sono riportate le tabelle relative al fiume Ticino.

Tabella 8: portate di piena per il fiume Ticino

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km ²	Q20 m ³ /s	Q100 m ³ /s	Q200 m ³ /s	Q500 m ³ /s	Idrometro Denominazione
		Progr.(km)	Cod.	Denomin.						
Ticino	Ticino	147.200	42	Traversa di Miorina	6599	-	-	2000	-	Ticino a Miorina
Ticino	Ticino	245.020	5	Confluenza in Po	7681	-	-	2300	-	

Figura 4 –“Tab. 8: portate di piena per il fiume Ticino (fonte: PAI)

Tabella 45: profilo di piena per il fiume Ticino

Sez.	Progr. (km)	T = 200 anni		Sez.	Progr. (km)	T = 200 anni		Sez.	Progr. (km)	T = 200 anni	
		Quota idrometrica (m s.m.)	Q (m ³ /s)			Quota idrometrica (m s.m.)	Q (m ³ /s)			Quota idrometrica (m s.m.)	Q (m ³ /s)
042	147.200	201.70	2000	028	177.256	144.64		014	217.200	80.35	
041	154.201	192.62		027	180.133	139.00		013	222.920	73.66	
040	156.450	190.36		026	182.000	135.24		012	226.540	71.29	
039	156.650	190.15		025	183.867	132.93		011	230.911	68.67	
038	157.900	189.80		024	189.200	123.75		010	232.600	67.92	
037	158.050	184.82		023	192.620	119.81		009	232.800	67.22	
036	159.817	180.19		022	192.811	118.38		008	235.960	65.88	
035	160.700	178.99		021	195.000	112.94		007	240.121	64.00	
034	162.465	176.81		020	195.200	112.19		006	241.101	63.92	
033	164.231	173.96		019	200.091	105.94		005	245.020	63.80	2300
032	167.400	166.60		018	205.200	98.61		004	248.000	63.72	
031	171.200	156.77		017	211.151	89.12		003	248.200	63.70	
030	174.090	151.63		016	212.400	87.51		002	252.200	63.70	
029	174.341	150.74		015	212.600	86.99		001	254.600	63.70	

Figura 5 –“Tab. 45: profilo di piena per il fiume Ticino (fonte: PAI)

In particolare, per il tratto di interesse la portata di piena duecentennale è pari a 2'300 m³/s, mentre il livello idrico della piena duecentennale è pari a 63.70 m s.m..

3.2 DATI DESUNTI DAL PGRA – PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO DI ALLUVIONI

Il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), predisposto in attuazione del D.lgs.

49/2010 di recepimento della Direttiva 2007/60/CE (cosiddetta “Direttiva Alluvioni”), è stato adottato con deliberazione 17 dicembre 2015 n. 4, approvato con Deliberazione 3 marzo 2016, n. 2 dal Comitato Istituzionale dell’Autorità di bacino del fiume Po e successivamente con DPCM 27 ottobre 2016 (pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 30 del 6 febbraio 2017).

Il Piano ha come finalità quella di ridurre le conseguenze negative derivanti dalle alluvioni per la salute umana, il territorio, i beni, l’ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche e sociali.

A tal fine nel Piano vengono individuate le aree potenzialmente esposte a pericolosità per alluvioni, stimato il grado di rischio al quale sono esposti gli elementi che ricadono entro tali aree “allagabili”, individuate le “Aree a Rischio Significativo (ARS)” e impostate misure per ridurre il rischio medesimo, suddivise in misure di prevenzione, protezione, preparazione, ritorno alla normalità ed analisi, da attuarsi in maniera integrata.

Con riferimento al fiume Ticino, nella successiva Figura 6 sono riportate le aree di pericolosità definite nel PGRA, mentre nella Figura 7 sono riportate le aree a rischio.

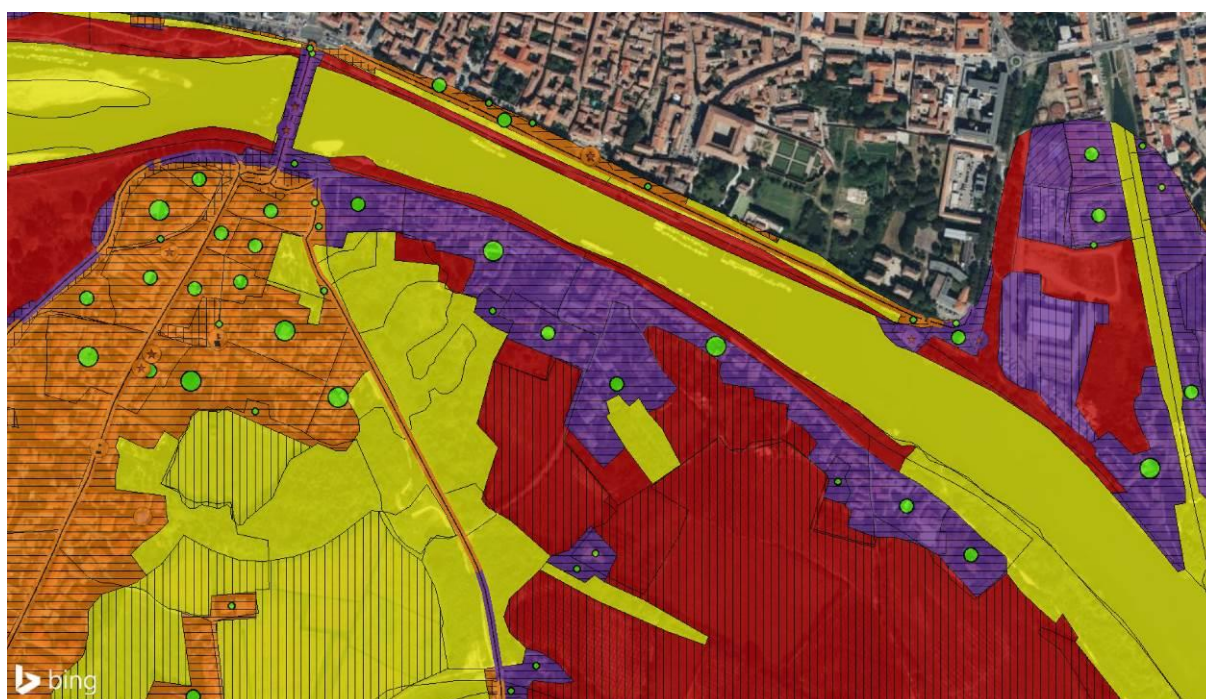
Nella Figura 8 sono riportati i valori delle portate di piena di riferimento per diversi valori del tempo di ritorno ($T=20$ anni e $T=200$ anni), desunte dal documento “*Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale*” del PGRA, mentre nella Figura 9 sono riportate le quote idriche della piena duecentennale del F. Ticino.

In particolare, per il tratto di interesse del presente studio, la portata di piena ventennale è pari a $2'100 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre la portata di piena duecentennale è pari a $3'000 \text{ m}^3/\text{s}$. Si segnala che i valori di portata definiti nel PGRA sono superiori a quelli definiti nel PAI. Il valore riportato nel PGRA è da considerarsi un aggiornamento rispetto a quanto definito nel PAI.

Il livello idrico della piena duecentennale è pari a 63.70 m s.m.. In questo caso, invece, si segnala che il profilo della piena riportato nel PGRA è uguale a quello del PAI.



Figura 6 – carta della pericolosità da alluvione del PGRA del F. Ticino nei pressi di Pavia (blu: pericolosità frequente; azzurro scuro: pericolosità poco frequente; azzurro chiaro: pericolosità rara)



- Rischio moderato - R1
- Rischio medio - R2
- Rischio elevato - R3
- Rischio molto elevato - R4

Figura 7 – carta del rischio da alluvione del PGRA del F. Ticino nei pressi di Pavia

Bacino	Corso d'acqua	Sezione		Superficie	Q20	Q100	Q200	Q500	Idrometro
		Progr. (km)	Cod.	Denomin.	km ²		m ³ /s	m ³ /s	Denominazione
Ticino	Ticino	147.200	42	Sesto Calende	6599	2000		2900	- Verbano a Sesto Calende
Ticino	Ticino	212.400	16	Vigevano	-	2100		3000	- Ticino a Vigevano
Ticino	Ticino	248.000	4	Pavia	7681	2100		3000	- Ticino a Pavia

Figura 8 – estratto “Tab. 4.9: portate di piena per i corsi d'acqua principali del bacino del Ticino (fonte: PGRA)”

Sez. PAI	Progr. PAI (km)	T = 200 anni	Sez. PAI	Progr. PAI (km)	T = 200 anni	Sez. PAI	Progr. PAI (km)	T = 200 anni
		Quota idrica (m s.m.)			Quota idrica (m s.m.)			Quota idrica (m s.m.)
042	147.200	197.96	028	177.256	144.64	014	217.200	80.35
041	154.201	192.62	027	180.133	139.00	013	222.920	73.66
040	156.450	190.36	026	182.000	135.24	012	226.540	71.29
039	156.650	190.15	025	183.867	132.93	011	230.911	68.67
038	157.900	189.80	024	189.200	123.75	010	232.600	67.92
037	158.050	184.82	023	192.620	119.81	009	232.800	67.22
036	159.817	180.19	022	192.811	118.38	008	235.960	65.88
035	160.700	178.99	021	195.000	112.94	007	240.121	64.00
034	162.465	176.81	020	195.200	112.19	006	241.101	63.92
033	164.231	173.96	019	200.091	105.94	005	245.020	63.80
032	167.400	166.60	018	205.200	98.61	004	248.000	63.72
031	171.200	156.77	017	211.151	89.12	003	248.200	63.70
030	174.090	151.63	016	212.400	87.51	002	252.200	63.70
029	174.341	150.74	015	212.600	86.99	001	254.600	63.70

Figura 9 – estratto “Tab. 5.28: profilo di piena per il fiume Ticino” (fonte: PGRA)”

Nell’Allegato 1 alla relazione generale del PGRA, denominato “*Schede descrittive delle mappe di pericolosità sul Reticolo Principale (fonti, criteri, livelli di confidenza)*”, sono riportate le principali informazioni in relazione a fonti, criteri e livelli di confidenza delle mappe di pericolosità. Per quanto riguarda il fiume Ticino, si ha:

➤ Note su fonti:

- ✓ *PAI: Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico (2001). Contiene la delimitazione delle fasce fluviali e la definizione dei valori di portata (TR 20, 100, 200, 500 anni) e di livello di piena (TR 200 anni).*
- ✓ *MS: Mappe di soggiacenza (solo per TR 200 anni): rappresentano la soggiacenza del terreno rispetto ai livelli di piena e derivano dall’intersezione GIS fra il DEM*

liquido (superficie interpolante l'involuppo massimo dei profili di piena duecentennali del PAI) e il DEM del terreno (DTM derivante da rilievo laser scanner effettuato dal MATTM nel 2008/2009).

- ✓ *Evento 2000: Perimetrazione delle aree allagate nell'evento del 2000, effettuata dal Parco del Ticino. Pubblicazione del Consorzio del Ticino "L'evento di piena dell'ottobre 2000 sul bacino del Ticino" che in particolare contiene un aggiornamento della stima delle portate di piena per TR 200 anni.*

➤ *Criteri di rielaborazione dei dati e aggiornamento delle delimitazioni delle aree inondabili:*

- ✓ *la delimitazione delle aree inondabili per lo scenario di piena poco frequente è stata effettuata utilizzando le mappe di soggiacenza realizzate con il profilo PAI (TR 200 anni), la delimitazione delle aree allagate nel corso dell'evento di piena del 2000, nonché le risultanze di alcuni approfondimenti locali condotti nell'ambito della progettazione di interventi infrastrutturali (Oleggio, Bernate Ticino, Pavia).*
- ✓ *Per lo scenario di piena rara è stata aggiornata localmente e con criteri speditivi la fascia C del PAI.*
- ✓ *Non sono state delimitate per mancanza di informazioni, le aree allagabili dello scenario frequente, che in via cautelativa possono essere ritenute coincidenti con quelle dello scenario poco frequente.*

➤ *Note sul livello di confidenza:*

- ✓ *Il livello di confidenza associabile alla delimitazione delle aree inondabili si può ritenere adeguato rispetto alle finalità delle mappe e alla prima fase di gestione prevista dalla Direttiva 2007/60/CE.*
- ✓ *Tale livello di confidenza potrà essere migliorato, nei successivi cicli di aggiornamento del piano, mediante l'aggiornamento delle modellazioni idrauliche di asta, della mappa di soggiacenza e della delimitazione delle aree allagabili. Localmente potranno essere efficacemente condotte analisi idrauliche di maggior dettaglio e verifiche locali (sopralluoghi, segnalazioni, ecc.).*
- ✓ *Per lo scenario di piena rara è inoltre necessario considerare l'incertezza connessa alla stima dei livelli di piena e a possibili fenomeni estremi connessi allo scenario in questione (rottture dei rilevati arginali e stradali che contengono il livello, parzializzazione o ostruzione delle luci dei ponti, mancato funzionamento di paratoie, ecc.).*

- ✓ *Al fine di migliorare il livello di confidenza per tale scenario di piena occorrono pertanto specifici approfondimenti di asta fluviale o di area vasta.*

4. RILIEVI DI DETTAGLIO DEL FIUME TICINO

4.1 PREMESSA

Nell'ambito dello studio idraulico sono stati effettuati i seguenti rilievi di dettaglio:

- Rilievo Lidar, finalizzato a ottenere il modello digitale del terreno (D.T.M.) dell'intera regione fluviale, effettuato dalla C.G.R. di Parma nell'ambito dello studio di "Monitoraggio morfologico e sedimentologico dell'alveo del fiume Ticino" effettuato nel 2008
- Rilievo batimetrico, finalizzato ad integrare il D.T.M. ottenuto con il sistema Lidar per la parte di alveo posta al di sotto del livello idrico, effettuata dalla ditta Oikos s.r.l. di Grosseto nel corso dell'anno 2022.

Nei successivi paragrafi vengono forniti i dettagli relativi a tali attività.

4.2 D.T.M. (MODELLO DIGITALE DEL TERRENO) LIDAR

I sistemi di scansione che utilizzano la tecnica laser per la modellazione del terreno, sono sostanzialmente dei distanziometri che misurano la distanza tra il punto di emanazione del raggio laser ed il primo ostacolo che ne genera la riflessione. La misura viene effettuata sulla base di un calcolo molto preciso del tempo di ritorno. Dal momento che il raggio laser viaggia alla velocità della luce, è possibile trasformare la misura di tempo in misura di distanza con estrema accuratezza.

I sensori Lidar sono costruiti in modo da poter emettere un elevatissimo numero di impulsi al secondo, in modo da realizzare un numero elevatissimo di misure nell'unità di tempo.

E' dunque ovvio che, per poter garantire un'elevata accuratezza delle misure date dal Lidar, è indispensabile la determinazione con la massima accuratezza, istante per istante, della posizione del punto di emanazione del raggio laser al momento della sua emissione, e quindi della traiettoria descritta dall'aereo su cui è installato il sensore. Per ottenere questo scopo vengono utilizzate le tecniche più moderne di localizzazione e di georeferenziazione dei dati di volo che sono il GPS cinematico ed i sistemi inerziali ad esso collegati.

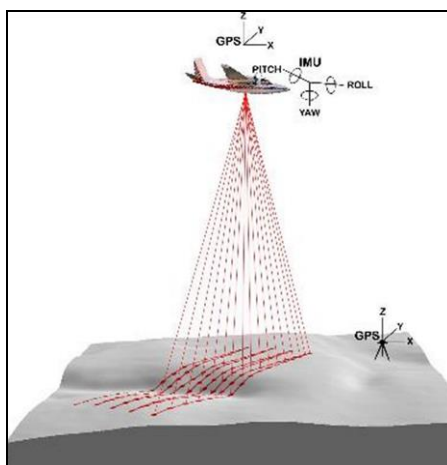


Figura 10 – Schema sistema di rilevazione LIDAR

Per lo studio in oggetto è stato effettuato, nel mese di gennaio 2008, un rilievo Lidar che ha permesso di ottenere un D.T.M. relativo al fiume Ticino caratterizzato da una maglia di 1.0 m di lato. Nella figura successiva si riporta il D.T.M. Lidar ottenuto.

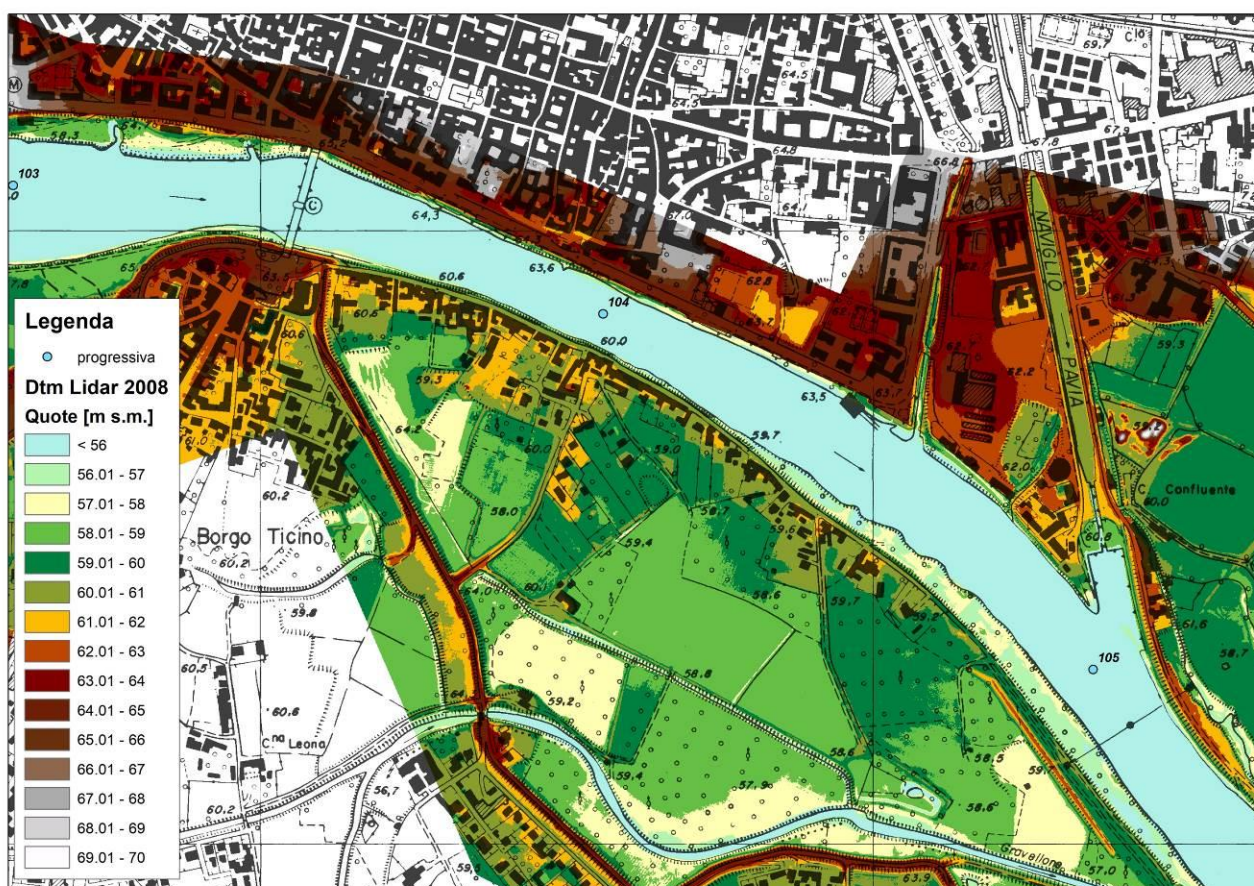


Figura 11 – D.T.M. fiume Ticino da rilievo Lidar con CTR

4.3 RILIEVO BATIMETRICO

Siccome il D.T.M. da rilievo Lidar fornisce le quote altimetriche relative solo alla porzione di alveo posta al di sopra del livello idrico presente durante il volo, per poter disporre della corretta morfologia dell'alveo occorre effettuare dei rilievi batimetrici in grado di caratterizzare anche l'assetto fluviale posto al di sotto del livello idrico.

Nell'ambito del presente studio, al fine di integrare i dati desumibili dal D.T.M. Lidar, è stato effettuato un rilievo batimetrico con diverse metodologie, a seconda del tirante idrico presente nei diversi tratti. In particolare, nel tratto in attraversamento a Pavia e fino al Po i rilievi sono stati effettuati mediante ecoscandaglio multi-beam installato su una piccola imbarcazione. Tale attività di rilievo è stata effettuata nel 2022.

Nella Figura 12 è riportato il modello digitale del terreno (D.T.M.) ricavato dai punti rilevati.

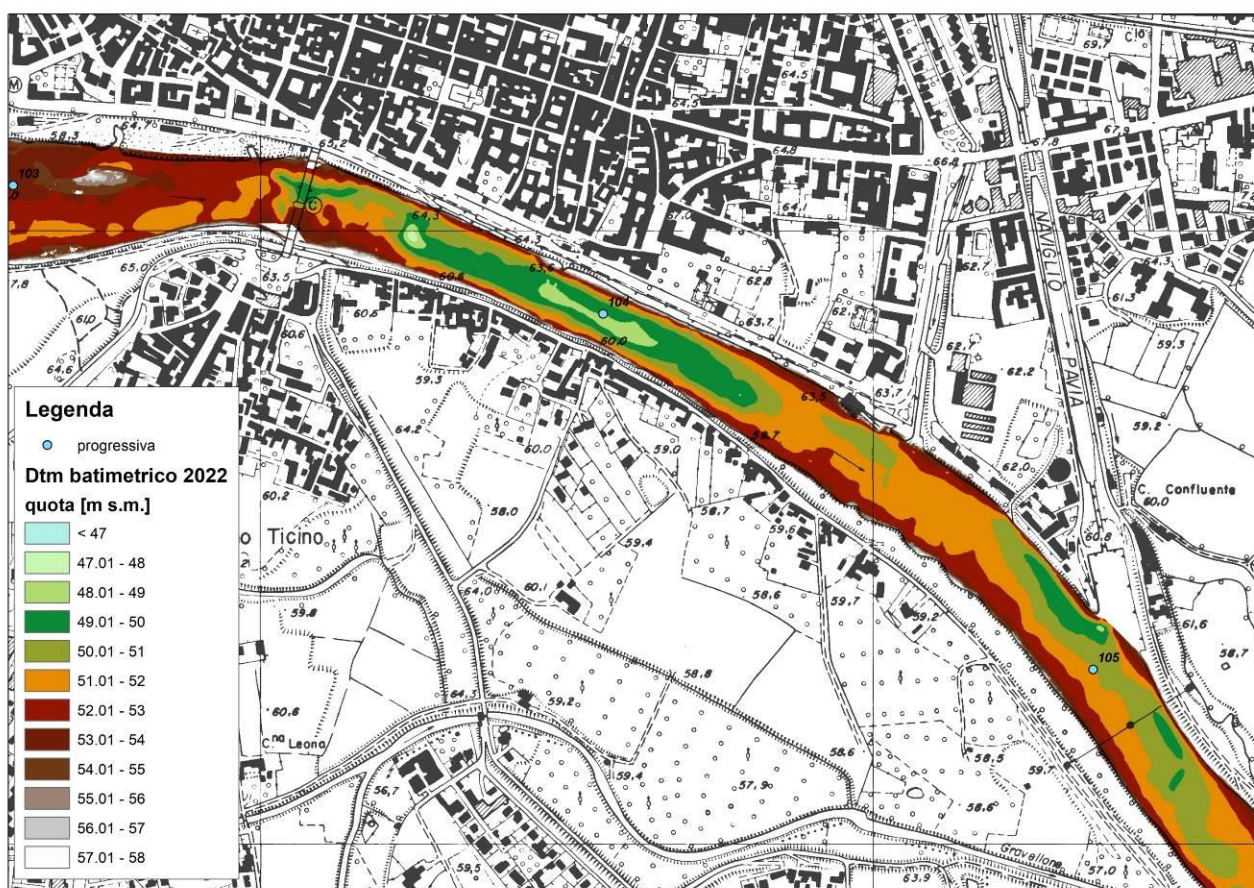


Figura 12 – D.T.M. dell'alveo del fiume Ticino ricavato da rilievo batimetrico

4.4 ELABORAZIONE FINALE DEI RILIEVI E CREAZIONE DI UN UNICO DTM RELATIVO ALLA PARTE EMERSA E ALLA PARTE SOMMERSA DELL'ALVEO DEL F. TICINO

Allo scopo di ottenere un unico modello digitale dell'alveo da utilizzare per le analisi idrauliche, si è proceduto ad unire i D.T.M. ottenuti con il Lidar e con il rilievo batimetrico, dando la precedenza alle quote batimetriche nelle zone di sovrapposizione tra i due rilievi.

Nella successiva Figura 13 si riporta il DTM del fiume Ticino che deriva dall'unione di tali rilievi.



Figura 13 – D.T.M. fiume Ticino da rilievo Lidar e rilievo batimetrico

5. IMPLEMENTAZIONE DI UN MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE

5.1 PREMESSA

A partire dai rilievi effettuati nell'ambito del presente studio e dalle principali grandezze idrauliche di riferimento riportate nel PGRA (portate di piena al colmo e livelli di piena in determinate sezioni dell'alveo), è stato implementato un modello idraulico bidimensionale a fondo fisso dell'intero tratto di fiume Ticino oggetto dello studio generale, che si estende da qualche km a monte del ponte di barche di Bereguardo, fino alla confluenza in Po. La lunghezza complessiva del modello lungo l'asse fluviale è pari a circa 30 km.

5.2 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO

5.2.1 Ipotesi di calcolo e condizioni al contorno

Sulla base dei dati topografici e delle informazioni idrologico-idrauliche disponibili per il tratto fluviale di indagine, così come riportato nei precedenti paragrafi, si è proceduto all'implementazione di un modello di simulazione idraulica bidimensionale di dettaglio del fiume Ticino che, opportunamente calibrato con le informazioni disponibili, ha permesso di analizzare, ad un'opportuna scala di riferimento, l'evoluzione delle dinamiche fluviali relative all'assetto attuale del corso d'acqua.

La modellazione idraulica a fondo fisso è stata implementata mediante il programma di calcolo INFOWORKS 2D ICM di Innovyze, che permette di analizzare il campo di moto a partire da un D.T.M. (Digital Terrain Model), rappresentativo della geometria del dominio di calcolo, basandosi sulla risoluzione di tre equazioni non lineari alle differenze finite per la determinazione del campo di moto della corrente su di un piano bidimensionale (x, y).

Due di queste sono le equazioni del moto nelle direzioni x e y; la terza equazione è data dalla legge di continuità che garantisce la conservazione della massa all'interno del dominio di calcolo.

Il modello viene rappresentato attraverso una griglia di elementi triangolari. Le tre equazioni vengono risolte in ciascun nodo della maglia di calcolo; il metodo di calcolo delle suddette equazioni è sviluppato attraverso una procedura di risoluzione iterativa per la minimizzazione dello scarto della soluzione stessa.

In questo modo il modello calcola la velocità in ogni nodo mediandola sul tirante idrico, ovvero senza tenere conto della variazione della velocità nella direzione z.

Per minimizzare i possibili errori numerici nella soluzione, a causa di scarti nel calcolo dell'equazione di conservazione di massa, è possibile infittire localmente la maglia di calcolo per limitare tali effetti di diffusione numerica e fornire risultati di maggiore dettaglio.

Le equazioni di base, impiegate per simulare il moto bidimensionale indotto dalla piena di riferimento nell'area in studio, sono affette da alcune approssimazioni. Innanzitutto, le due equazioni del moto lungo le direzioni x e y si basano sull'ipotesi che la corrente sia lineare e che quindi la pressione abbia una distribuzione verticale idrostatica.

A livello geometrico la dimensione della maglia, se non sufficientemente piccola, può generare effetti di instabilità al momento in cui un elemento passa dalla condizione di completa immersione ad un parziale asciugamento. Il modello considera appartenente al campo di moto solo gli elementi in cui tutti i nodi presentano un tirante maggiore di zero.

Tuttavia, un eccessivo infittimento della dimensione delle celle, specialmente in zone in cui si prevede che il deflusso delle acque possa avere caratteristiche mediamente regolari e non particolarmente complesse, è tale da generare un appesantimento del calcolo con incremento della durata della simulazione stessa senza che vengano forniti ulteriori utili dettagli.

La corretta scelta della risoluzione delle maglie di calcolo, nelle diverse porzioni costituenti il dominio della modellazione, è quindi un aspetto particolarmente delicato per poter fornire le necessarie informazioni circa la dinamica fluviale.

Un'altra importante approssimazione del modello di calcolo risiede nella formula adottata per la resistenza idraulica del fondo, che viene fatta dipendere dal quadrato del modulo della velocità e dal coefficiente di scabrezza di Manning supposto localmente noto. Se sulla prima dipendenza non ci sono particolari dubbi, dato il carattere turbolento della corrente, sulla dipendenza da un valore costante del coefficiente di Manning esistono non poche incertezze, specialmente per le profondità minori e in presenza di trasporto di materiale solido. In questo caso il problema risulta molto attenuato dalla presenza in alveo di tiranti idrici mediamente elevati.

Il modello bidimensionale di dettaglio del fiume Ticino è stato implementato per un'estensione longitudinale lungo l'asse pari a circa 30 km, comprendente l'intera larghezza dell'alveo di piena. La superficie del dominio di calcolo del modello idraulico è pari a circa 50 kmq, e siccome il numero delle celle di calcolo è pari a circa 920'000, si ha che la superficie media degli elementi di calcolo è pari a circa 50 mq.

Il modello bidimensionale a fondo fisso è stato utilizzato per simulare diversi scenari di portata di riferimento (condizione al contorno di monte), in particolare:

- evento di piena caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 200 anni, il cui valore della portata di piena al colmo è pari a 3'000 m³/s (fonte: PGRA);
- evento di piena caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 20 anni, il cui valore della portata di piena al colmo è pari a 2'100 m³/s (fonte: PGRA).

Come condizione al contorno di valle, da porre in corrispondenza della sezione terminale del modello, rappresentata dalla confluenza in Po, è stato considerato il corrispondente livello della piena duecentennale definito dal PGRA, pari a 63.7 m s.m.. Per la simulazione della piena ventennale è stato assunto un livello idrico pari a 62.2 m s.m., ottenuto dagli studi condotti dall'Autorità di bacino sul fiume Po.

Le simulazioni sono state condotte in moto quasi permanente, facendo crescere linearmente la portata da zero fino al valore considerato in una determinata simulazione e mantenendo il valore della portata al picco di piena per un tempo congruo, tale da consentire il deflusso della portata massima lungo tutto il tratto in studio.

Nella Figura 14 è riportata l'estensione del dominio di calcolo del modello bidimensionale, mentre nella Figura 15 è riportato un dettaglio della magliatura del modello nei pressi della sponda oggetto in progetto.

Come parametri di scabrezza si è assunto per l'alveo un valore del coefficiente di Strickler pari a 35 m^{1/3}/s, mentre per le aree golenali esterne all'alveo inciso è stato utilizzato un valore pari a 20 m^{1/3}/s.

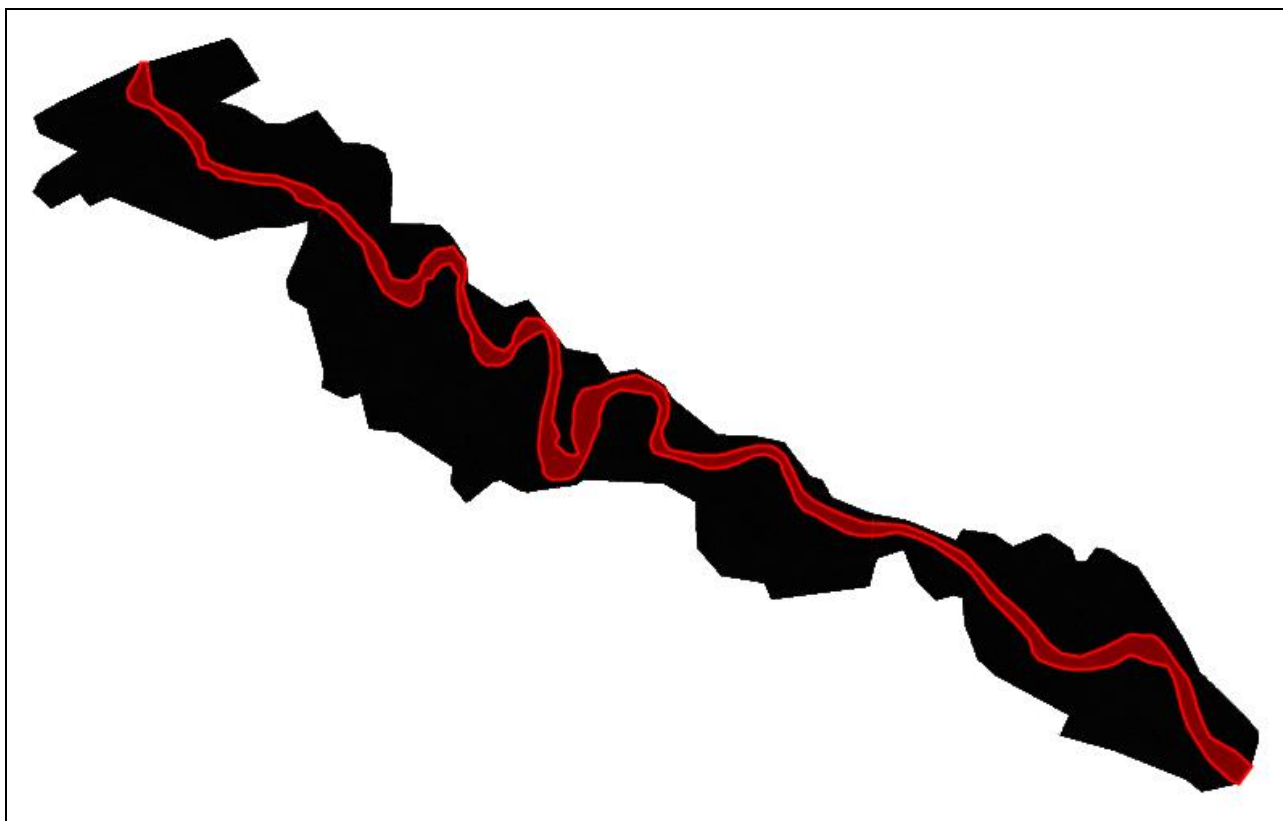


Figura 14 – estensione del dominio di calcolo del modello bidimensionale del fiume Ticino, da Bereguardo al Po



Figura 15 – dettaglio della magliatura di calcolo del modello bidimensionale del fiume Ticino nei pressi del tratto di intervento all'interno del Comune di Pavia

6. ANALISI IDRAULICHE

Nel presente capitolo vengono descritte le analisi idrauliche, effettuate con l'ausilio del modello bidimensionale descritto nel capitolo precedente, finalizzate alla valutazione delle grandezze idrauliche necessarie per il corretto dimensionamento delle opere di protezione spondale. In particolare, attraverso il modello idraulico bidimensionale relativo allo stato attuale, sono state effettuate le seguenti simulazioni:

- evento di piena caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 20 anni, il cui valore della portata di piena al colmo è pari a 2'100 m³/s (fonte: PGRA).
- evento di piena caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 200 anni, il cui valore della portata di piena al colmo è pari a 3'000 m³/s (fonte: PGRA).

Nei paragrafi seguenti si riportano i risultati ottenuti.

6.1 EVENTO DI PIENA CON T=20 ANNI

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati della simulazione condotta con riferimento ad un evento di piena caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 20 anni (portata al colmo pari a 2'100 m³/s). In particolare:

- nella Figura 16 sono riportati i livelli idrici, espressi in m s.m.;
- nella Figura 17 sono riportati i tiranti idrici, espressi in m;
- nella Figura 18 sono riportate le velocità della corrente, espresse in m/s.

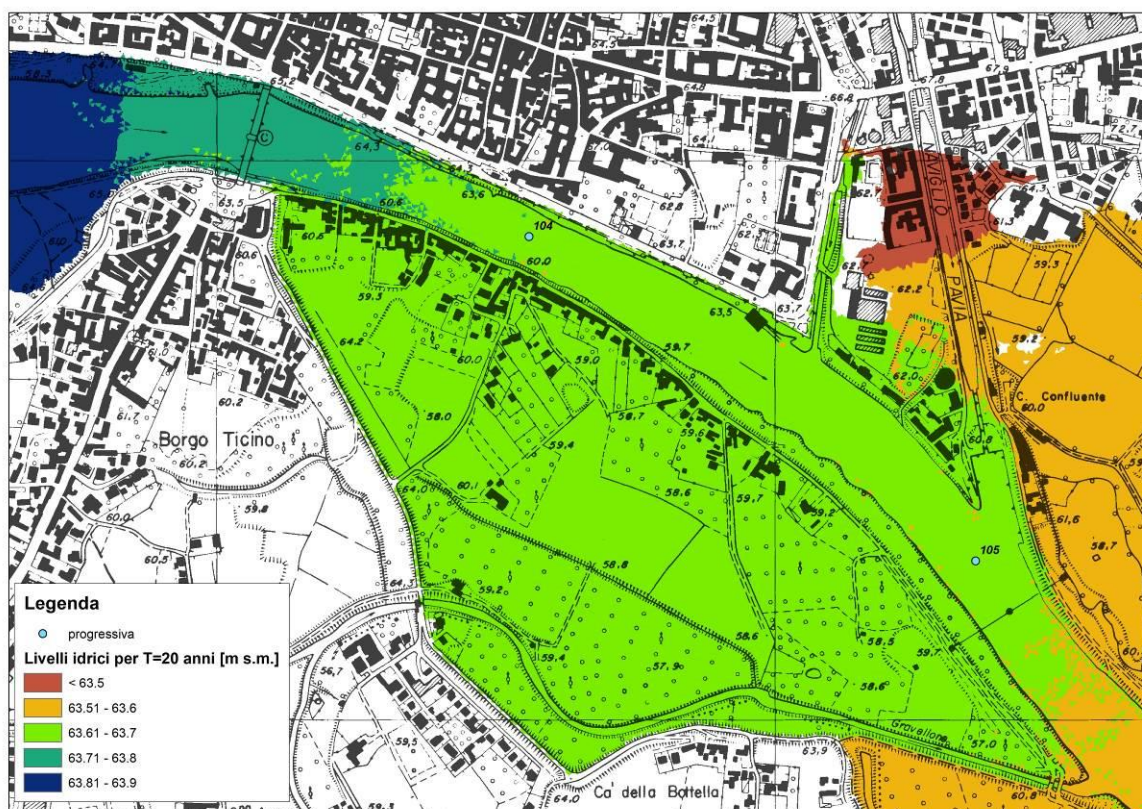


Figura 16 – risultati del modello 2D – stato attuale - piena con T=20 anni: livelli idrici

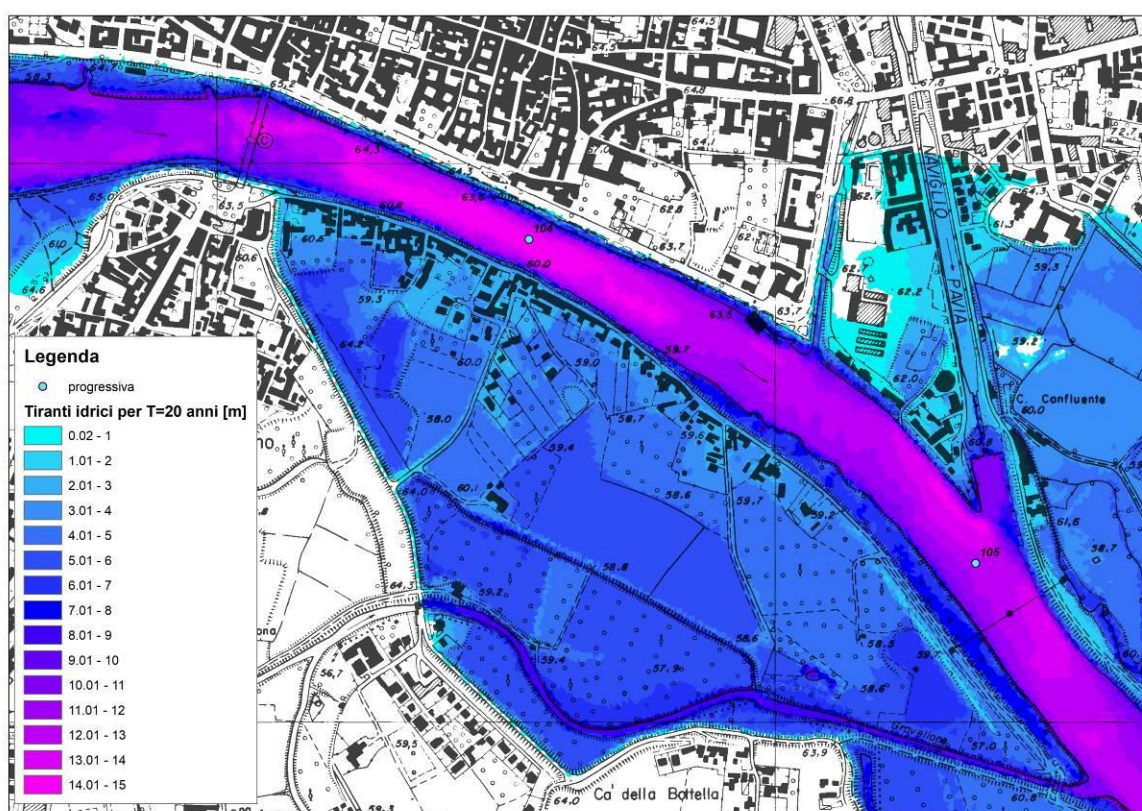


Figura 17 – risultati del modello 2D – stato attuale - piena con T=20 anni: tiranti idrici

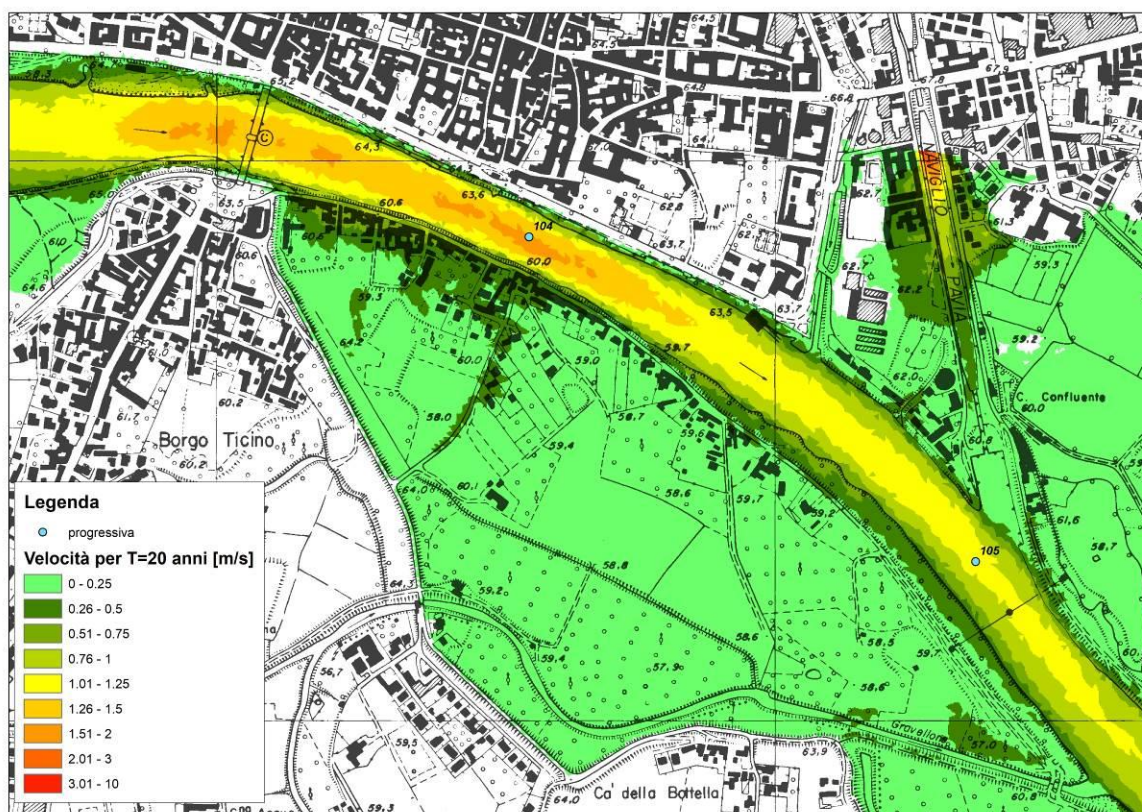


Figura 18 – risultati del modello 2D – stato attuale - piena con T=20 anni: velocità

6.2 EVENTO DI PIENA CON T=200 ANNI

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati della simulazione condotta con riferimento ad un evento di piena caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 200 anni (portata al colmo pari a 3'000 m³/s). In particolare:

- Nella Figura 19 sono riportati i livelli idrici, espressi in m s.m.;
- nella Figura 20 sono riportati i tiranti idrici, espressi in m;
- nella Figura 21 sono riportate le velocità della corrente, espresse in m/s.



Figura 19 – risultati del modello 2D – stato attuale - piena con T=200 anni: livelli idrici

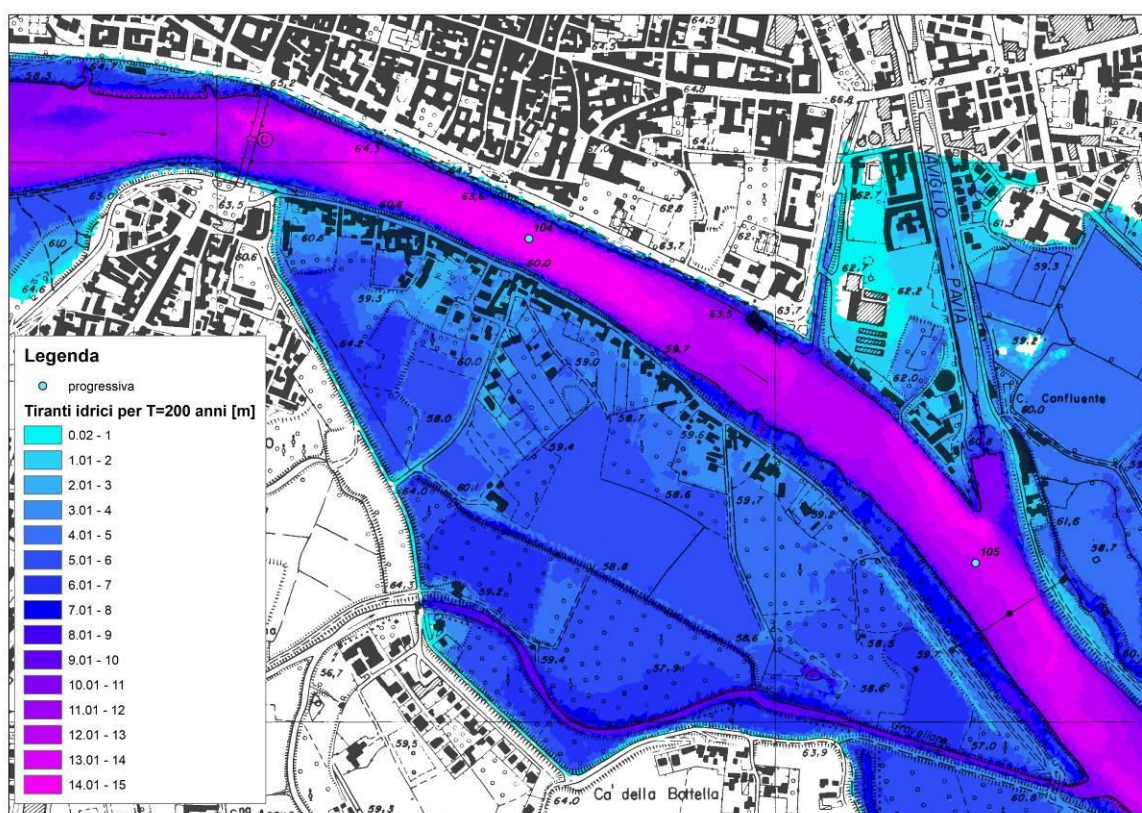


Figura 20 – risultati del modello 2D – stato attuale - piena con T=200 anni: tiranti idrici

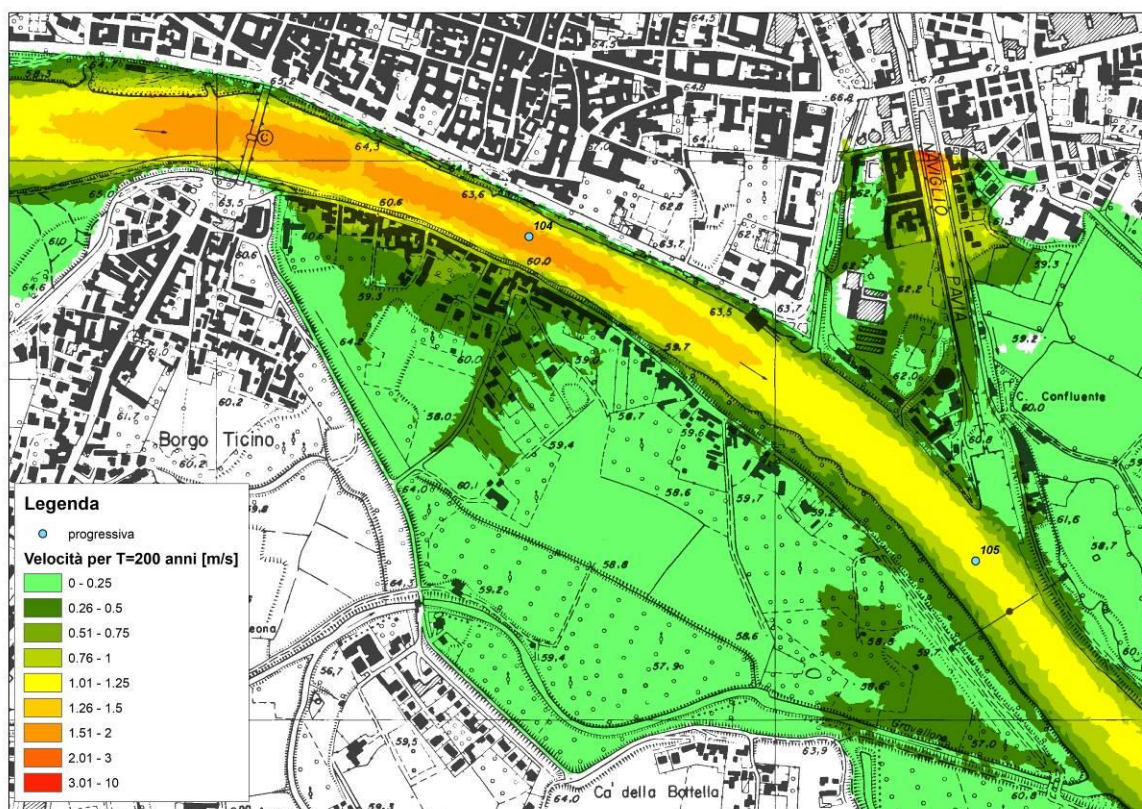


Figura 21 – risultati del modello 2D – stato attuale - piena con T=200 anni: velocità

7. CALCOLI DI DIMENSIONAMENTO DELLA SCOGLIERA IN PROGETTO

Il presente progetto prevede il consolidamento di un tratto di sponda sinistra del fiume Ticino, attualmente in erosione, attraverso la realizzazione di una scogliera in massi. Di seguito di riporta le analisi condotte per definire il diametro minimo dei massi da utilizzare per il rinforzo della sponda.

Dall'analisi dei risultati ottenuti con l'applicazione del modello bidimensionale del fiume Ticino, si ha che in corrispondenza della sponda sinistra oggetto di realizzazione della scogliera la velocità della corrente in occasione di un evento di piena duecentennale è pari a 1.2 m/s, mentre il tirante idrico è pari a circa 12 m.

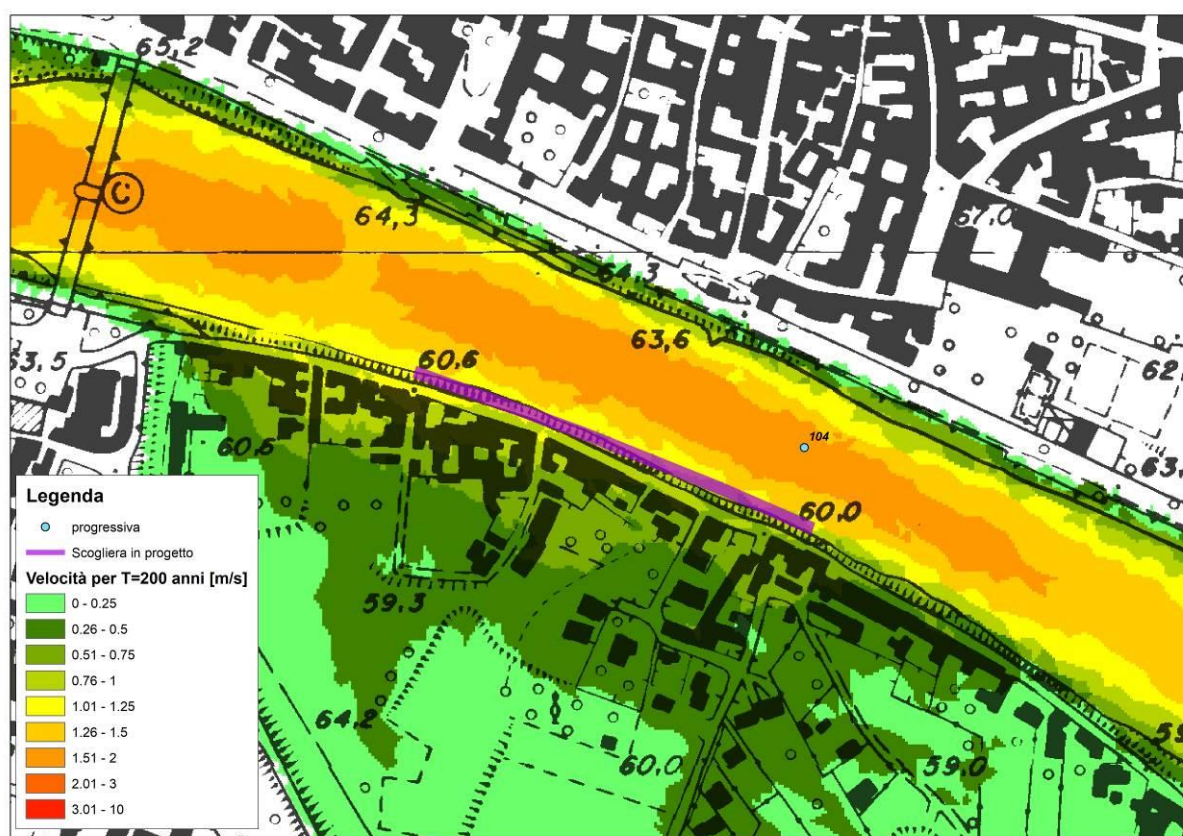


Figura 22 – velocità della corrente in corrispondenza della sponda oggetto di intervento per T=200 anni

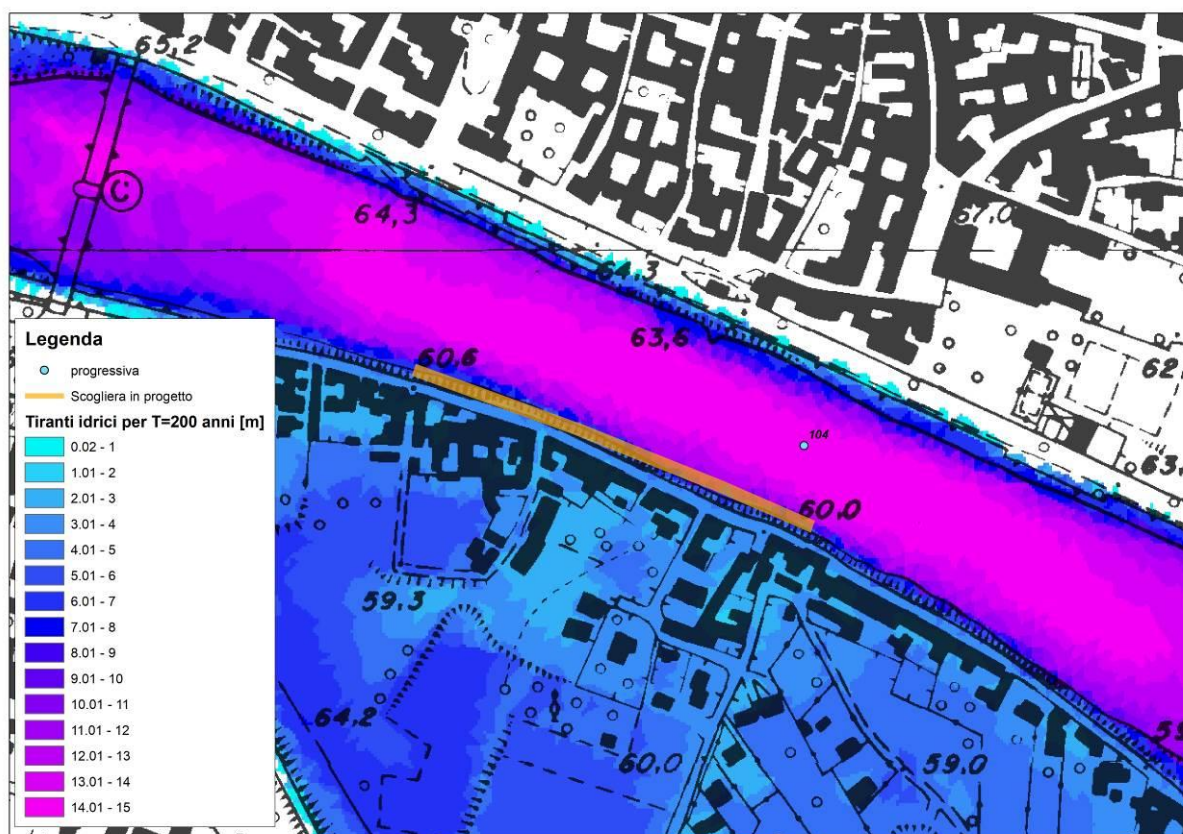


Figura 23 – tiranti idrici in corrispondenza della sponda oggetto di intervento per T=200 anni

Il calcolo di verifica della stabilità consiste nel verificare le condizioni d'equilibrio del materiale costituente le sponde. Stevens et al. (1976), a seguito di accurata analisi dei momenti delle forze agenti sull'elemento solido, giunsero alle seguenti espressioni utili per la determinazione del diametro d'equilibrio su sponda inclinata, e quindi per la valutazione dell'opportunità, o meno, di realizzare opere di consolidamento spondale.

$$\sigma = \frac{21\tau}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma-1}\right)\gamma d_m} = \frac{0,30u_f^2}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma-1}\right)gd_m} \quad (1)$$

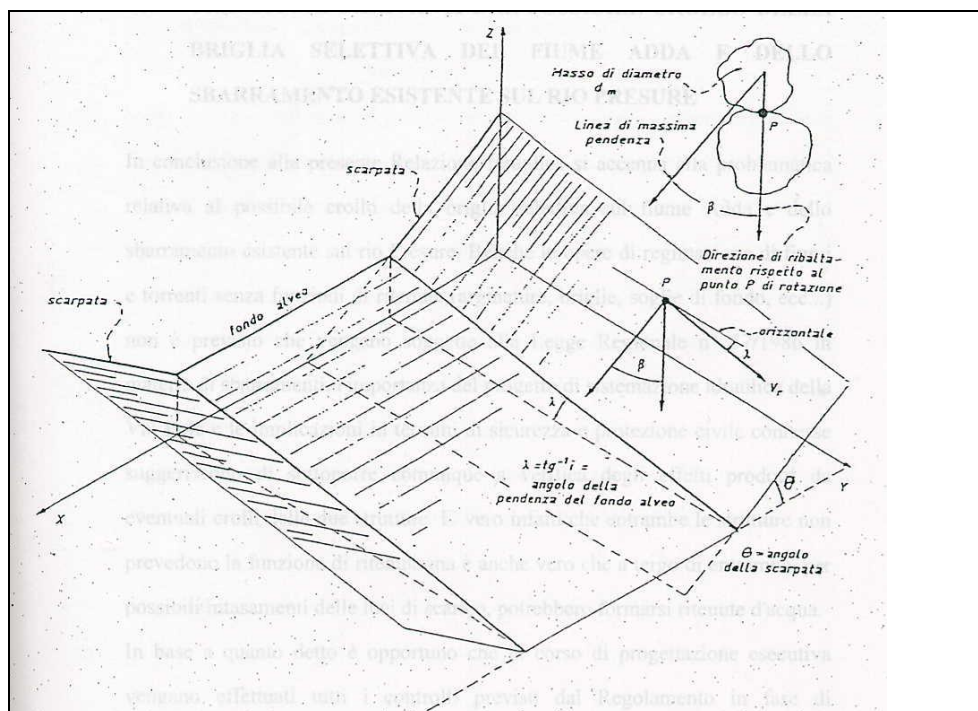
$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \lambda}{\frac{2 \sin \theta}{\sigma \tan \phi} + \sin \lambda} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{1 + \sin(\lambda + \beta)}{2} \quad (3)$$

$$C_s = \frac{\cos \theta \tan \phi}{\sigma' \tan \phi + \sin \theta \cos \beta} \quad (4)$$

in cui:

- d_m è il diametro del masso;
- C_s è il coefficiente di sicurezza al ribaltamento del masso rispetto al punto P di rotazione (rapporto tra il momento risultante delle forze stabilizzanti e il momento risultante delle forze ribaltanti);
- Θ è la pendenza adottata per la scarpata;
- ϕ è l'angolo di riposo in acqua dei massi, pari a 45° ;
- β è l'angolo che la direzione di caduta del masso forma con la linea di massima pendenza della scarpata;
- λ è l'angolo diedro tra il piano orizzontale e il piano inclinato costituente il fondo dell'alveo ($\tan \lambda = i =$ pendenza del fondo);
- σ e σ' sono i cosiddetti numeri di stabilità del masso rispettivamente su sponda inclinata ed orizzontale ($\Theta = 0$);
- τ è l'azione di trascinamento sul masso;
- u_T è la velocità della corrente contro il masso.



In definitiva le espressioni precedenti consentono di verificare la stabilità di una sponda. Dati infatti la dimensione d_m dei massi, l'angolo di scarpata θ , l'angolo di riposo ϕ , calcolata la velocità u_f e la sua direzione, applicando in successione le prime quattro equazioni si giunge a calcolare il coefficiente di sicurezza C_s . Se questo è maggiore di 1, la scogliera ha sufficiente stabilità; se $C_s = 1$, l'equilibrio è al limite; se $C_s < 1$, la scogliera è soggetta a franamento.

Per una buona sicurezza è auspicabile che C_s sia almeno pari a 1,2.

Nel caso in esame sono stati considerati in primo luogo i seguenti parametri:

- altezza della corrente: 12 m;
- velocità media della corrente: 1.25 m/s;
- pendenza della sponda: 1 su 2 (h:b);
- pendenza fondo alveo: 0.1%;
- peso specifico dei massi: 2'500 kg/m³

Considerando di utilizzare per la formazione della scogliera massi di peso minimo pari a circa 300 kg, a cui corrisponde un diametro equivalente pari a 0.6 m, si ha che dall'applicazione delle suddette formule emerge che il coefficiente di sicurezza risulta essere pari a 1.9, che è maggiore del valore minimo richiesto pari a 1.2.

Pavia, settembre 2023