



CONSORZIO DI BONIFICA DELL'ORISTANESE

Via Cagliari n. 170 – Oristano

OPERE DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO DELLE AREE IN RIVA DESTRA DEL FIUME TIRSO

C.A.T. P0120

C.U.P.: G16J15001280002

C.I.G.: 894667883D

STUDIO DI FATTIBILITA' GENERALE

Ingegnere Idraulico
Ing. Gian Luca Zuddas

Geologo
Dott. Simone Manconi

Responsabile del Procedimento
Ing. Giorgio Bravin

Committente
Consorzio di Bonifica dell'Oristanese
Il Presidente
Dott. Carlo Corrias

Titolo

Allegato

STUDIO IDRAULICO

Rev.	Data	Nome file	Redattore	Verificatore
00	12/2016		Ing. G. Zuddas	Ing. R. Sanna
01	02/2017		Ing. G. Zuddas	Ing. R. Sanna
02	05/2018		Ing. G. Zuddas	Ing. R. Sanna
03	09/2019		Ing. G. Zuddas	Ing. G. Bravin
04	11/2023		Ing. G. Zuddas	Ing. G. Bravin

INDICE

1. PREMESSA	5
<u>PARTE PRIMA – INQUADRAMENTO</u>	7
2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE	7
3. INQUADRAMENTO DEI VINCOLI.....	9
3.1. P.A.I. E RELAZIONI CON L'AREA DI INTERESSE	9
3.2. P.S.F.F. E RELAZIONI CON L'AREA DI INTERESSE	10
3.3. CICLONE CLEOPATRA	12
3.4. ADEGUAMENTO DEL PUC DI ORISTANO AL PAI	13
3.5. P.G.R.A. E RELAZIONI CON L'AREA DI INTERESSE	14
4. INFORMAZIONE TERRITORIALE UTILIZZATA	17
<u>PARTE SECONDA – STATO ATTUALE.....</u>	18
5. ANALISI IDROLOGICA CONDOTTA	18
5.1. RETICOLO IDROGRAFICO	18
5.2. BACINI IDROGRAFICI	18
5.3. TEMPO DI CORRIVAZIONE	20
5.4. CURVA AREA-TEMPI	23
5.5. ANALISI PLUVIOMETRICA	23
5.5.1. <i>Determinazione degli afflussi</i>	<i>24</i>
5.5.2. <i>Ragguaglio dell'area di precipitazione</i>	<i>26</i>
5.5.3. <i>Calcolo del Curve Number.....</i>	<i>26</i>
5.5.4. <i>Precipitazione netta.....</i>	<i>29</i>
5.6. CALCOLO DELLE PORTATE	33
5.6.1. <i>Portate di picco.....</i>	<i>33</i>
5.6.2. <i>Idrogrammi di piena</i>	<i>34</i>
5.6.3. <i>Confronto delle portate con altri studi</i>	<i>36</i>
6. ANALISI IDRAULICA.....	37
6.1. IL CODICE DI CALCOLO HEC-RAS	37
6.2. BASE TEORICA DELLA VERIFICA IDRAULICA	37

6.3.	MODELLO IDRAULICO	38
6.3.1.	<i>Geometria</i>	38
6.3.2.	<i>Parametri di scabrezza</i>	41
6.3.3.	<i>Condizioni al contorno</i>	42
6.4.	CANALE TOMBATO DI SOLARUSSA.....	42
6.5.	RISULTATI DELL'ANALISI IDRAULICA	48
PARTE TERZA – CONFIGURAZIONE DI PROGETTO.....		50
7.	IPOTESI PROGETTUALI	50
8.	CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE.....	52
8.1.	TRAVERSE DI LAMINAZIONE	52
8.2.	ELIMINAZIONE DELLA COPERTURA DEL TRATTO TOMBATO	54
8.3.	RISAGOMATURA DELLE SEZIONI DEI CANALI	55
8.4.	NUOVI CANALI	56
8.5.	SIFONAMENTO DEL CANALE ADDUTTORE	56
8.6.	OPERE INTERFERENTI CON I CORSI D'ACQUA.....	57
9.	ANALISI IDROLOGICA NELLO SCENARIO DI PROGETTO	58
9.1.	EFFETTO DELLE TRAVERSE DI LAMINAZIONE	59
9.2.	EFFETTO DEI NUOVI CANALI	61
9.3.	SET DI PORTATE.....	63
10.	ANALISI IDRAULICA	64
10.1.	GEOMETRIA DEL MODELLO	64
10.2.	CONDIZIONI AL CONTORNO E PARAMETRI DI SCABREZZA	65
10.3.	FRANCO IDRAULICO	65
10.4.	RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA	70
11.	CONCLUSIONI.....	72

1. Premessa

Con deliberazione n. 31/3 del 17/06/2015, la Giunta Regionale ha approvato in via definitiva il “Piano regionale delle infrastrutture”, all'interno del quale risulta compreso l'intervento denominato “Opere di mitigazione del rischio idrogeologico delle aree in riva destra del fiume Tirso – Importo € 800.00,00” da realizzarsi in regime di convenzione tra l'Amministrazione regionale, in qualità di ente finanziatore, e il Consorzio di Bonifica dell'Oristanese, in qualità di soggetto attuatore.

In data 22.10 2015 è stata così stipulata la convenzione tra l'Assessorato dei Lavori Pubblici e il Consorzio di Bonifica dell'Oristanese (di seguito CBO).

All'interno di tale convenzione è previsto che il CBO debba procedere alla stesura di un piano generale col quale identificare tutti gli interventi necessari per la risoluzione delle problematiche individuate dagli atti pianificatori di bacino ovvero delle opere di mitigazione del rischio idrogeologico delle aree in riva destra del fiume Tirso.

In una seconda fase, il CBO dovrà realizzare un primo lotto prioritario da individuare sulla base del piano generale suddetto, per il quale si provvederà a redigere un progetto esecutivo delle opere e a dirigere i lavori.

La presente relazione ha l'obiettivo di studiare da un punto di vista idrologico e idraulico il territorio posto in destra del fiume Tirso sulla base dei criteri proposti dal Piano di Assetto Idrogeologico (PAI), redatto dalla Regione Sardegna, delle metodologie del Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF) e delle indicazioni date dall'Agenzia Regionale del Distretto Idrografico della Sardegna (di seguito ARDIS).

In merito a quest'ultimo aspetto, si precisa come la presente revisione sia l'ultima di una serie di relazioni di compatibilità idraulica, frutto di continui scambi di opinioni, a volte contrastanti, tra gli estensori del presente studio e i funzionari dell'ARDIS.

A dimostrazione di ciò, tra gli enti c'è stato un susseguirsi di note (05.12.2016 protocollo 10785/IX.1; 24.02.2017 protocollo 2408/IX.1; 10.05.2017 protocollo 3676/XIII.11.2; 20.11.2017 protocollo 11121/IX.8; 30.11.2017 protocollo 9503/XIII.11.2; 07.05.2018 protocollo 4423/IX.1 e 19.06.2018 protocollo 6009/IX.1; 21.09.2018 protocollo 8663/XIII.11.2; 07.01.2019 protocollo 0172/IX.1; 12.04.2019 protocollo 3278/IX.1; 23.05.2019 protocollo 4907/XIII.11.2; 19.06.2019 protocollo 5526/IX.1; 12.07.2019) e di incontri volti ad individuare la soluzione ideale per il territorio.

La soluzione definitiva è stata individuata in seguito ad un duplice incontro, uno di natura amministrativa e politica il 16.07.2019 presso il palazzo della Regione Sardegna in viale Trento a cui hanno partecipato, tra gli altri, gli Assessori dell'Industria Anita Pili e dei Lavori Pubblici Roberto Frongia, funzionari dell'ARDIS, funzionari del CBO e il sindaco di Solarussa Mario Tendas, e uno di natura tecnica il 17.07.2019 tra i suddetti funzionari del CBO e quelli dell'ARDIS.

Con quest'ultimo incontro si è arrivati ad una condivisione di una soluzione relativa agli aspetti per i quali divergevano le opinioni. Detto che in seguito si avrà modo di spiegare meglio gli aspetti tecnici di natura idrologica e idraulica, si anticipa brevemente che la soluzione suddetta consiste nell'utilizzo della formula di Viparelli con velocità di scorrimento pari a 1 m/s per il calcolo del tempo di corrivazione dei bacini e nell'utilizzo del Curve Number, purché superiore a 92.

Lo studio di Compatibilità Idraulica è stato sviluppato secondo le indicazioni di cui all'art. 24 e all'allegato E delle Norme di Attuazione del PAI della Regione Sardegna, aggiornato con le modifiche approvate dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino con Deliberazione n. 15 del 22 novembre 2022. Le NdA prevedono che la compatibilità idraulica dell'intervento proposto debba essere verificata in funzione degli effetti dell'intervento sui livelli di pericolosità rilevati dal PAI e valutata in base agli effetti sull'ambiente tenendo conto dell'evoluzione della rete idrografica complessiva e del trasferimento della pericolosità a monte e a valle.

Nel contesto generale dell'opera, lo studio si è reso necessario per l'analisi delle relazioni tra le trasformazioni del territorio derivanti dalla realizzazione dell'intervento proposto e le condizioni dell'assetto idraulico e del dissesto idraulico attuale e potenziale delle aree interessate dall'intervento, anche studiando e quantificando le variazioni della permeabilità e della risposta idrologica della stessa area. Inoltre, lo studio è stato essenziale per verificare e dimostrare la coerenza del Piano con le previsioni e le norme del P.A.I., al fine di prevedere le adeguate misure di mitigazione e compensazione dell'eventuale incremento del pericolo e del rischio sostenibile associato agli interventi proposti.

In sintesi, lo studio di Compatibilità Idraulica, avrà cura di dimostrare che gli interventi sottoposti all'approvazione siano stati progettati rispettando il vincolo di non aumentare il livello di pericolosità e di rischio esistente - fatto salvo quello eventuale intrinsecamente connesso all'intervento ammissibile - e di non precludere la possibilità di eliminare o ridurre le condizioni di pericolosità e rischio.

La presente relazione sarà strutturata in tre parti:

1. Parte Prima - la prima fase dello studio vuole inquadrare da un punto di vista territoriale e normativo l'area interessata;
2. Parte Seconda - la seconda fase dello studio è volto a valutare la pericolosità idraulica nel territorio allo stato attuale;
3. Parte Terza – la terza parte verte sugli interventi di mitigazione proposti e sul loro effetto sul territorio.

PARTE PRIMA – INQUADRAMENTO

2. Inquadramento territoriale

La zona oggetto del presente studio è ricompresa nel comprensorio di bonifica “Nord” nei territori comunali di Zerfaliu, Solarussa, Siamaggiore, Oristano e Cabras.

Nell’ambito della redazione degli “Studi, indagini, elaborazioni attinenti all’ingegneria integrata, necessari alla redazione dello studio denominato progetto di piano stralcio delle fasce fluviali (PSFF)” l’area in oggetto è inserita nel bacino idrografico del fiume Tirso.

Il reticolo idrografico secondario del fiume Tirso ha una rilevanza notevole come si è evinto dagli eventi piovosi del 18 novembre 2013 (ciclone Cleopatra), che hanno messo alla luce problematiche idrauliche, soprattutto nei comuni di Solarussa e Zerfaliu.

Nel presente studio, ai fini della valutazione della pericolosità idraulica sono stati indagati i corsi d’acqua principali in riva destra del fiume Tirso: il rio Saoru, il rio Nura Craba, il rio Tanui e il canale a marea di Bennaxi.

L’asta principale del rio Saoru scorre inizialmente in direzione nord-sud costeggiando l’abitato di Zerfaliu e, successivamente, dopo aver attraversato il canale di irrigazione denominato Adduttore destro Tirso, cambia direzione scorrendo parallelamente all’argine destro del Tirso.

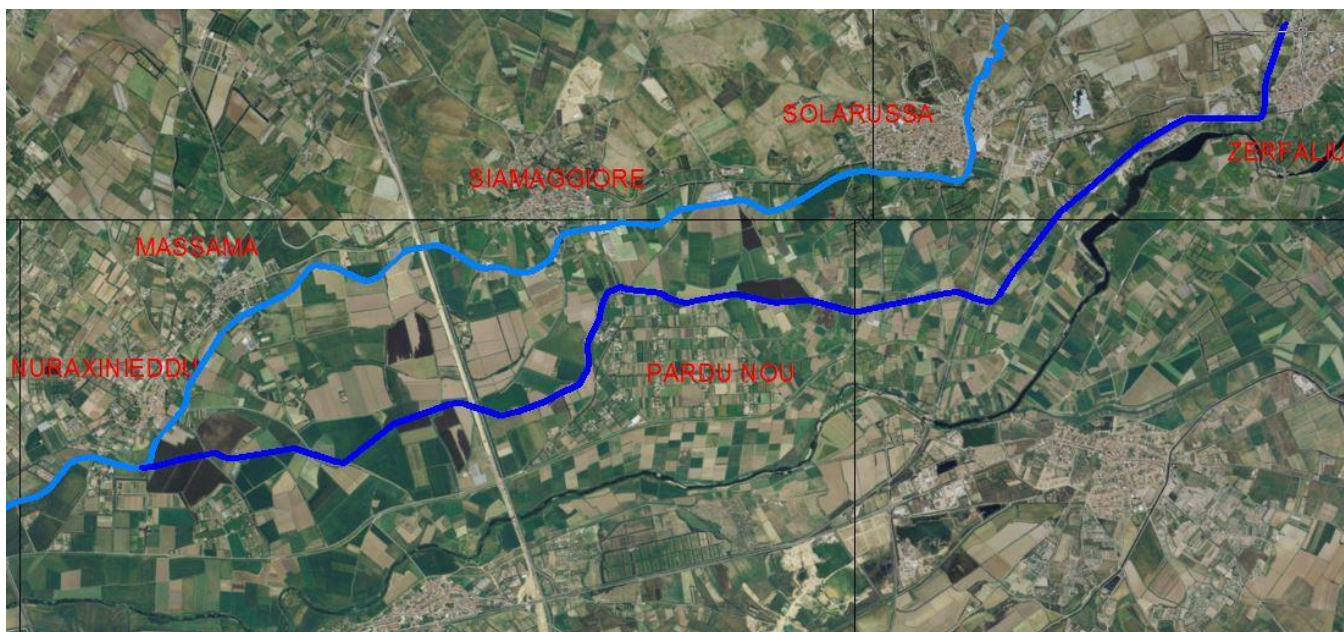


Figura 1 – Inquadramento del rio Saoru

Appena a monte dell'abitato di Solarussa ha origine il Rio Nura Craba. Questo scorre dentro un canale, che recentemente è stato oggetto di un intervento di rimozione della copertura ma ancora per un breve tratto tombato, di sezione rettangolare di larghezza pari a 3m e altezza 2,50m per tutto il tratto urbano e fino alla periferia sud del centro abitato (circa 1,2 Km), per poi proseguire, a cielo aperto, lungo un alveo a sezione trapezia con savanella centrale rivestita in cls.

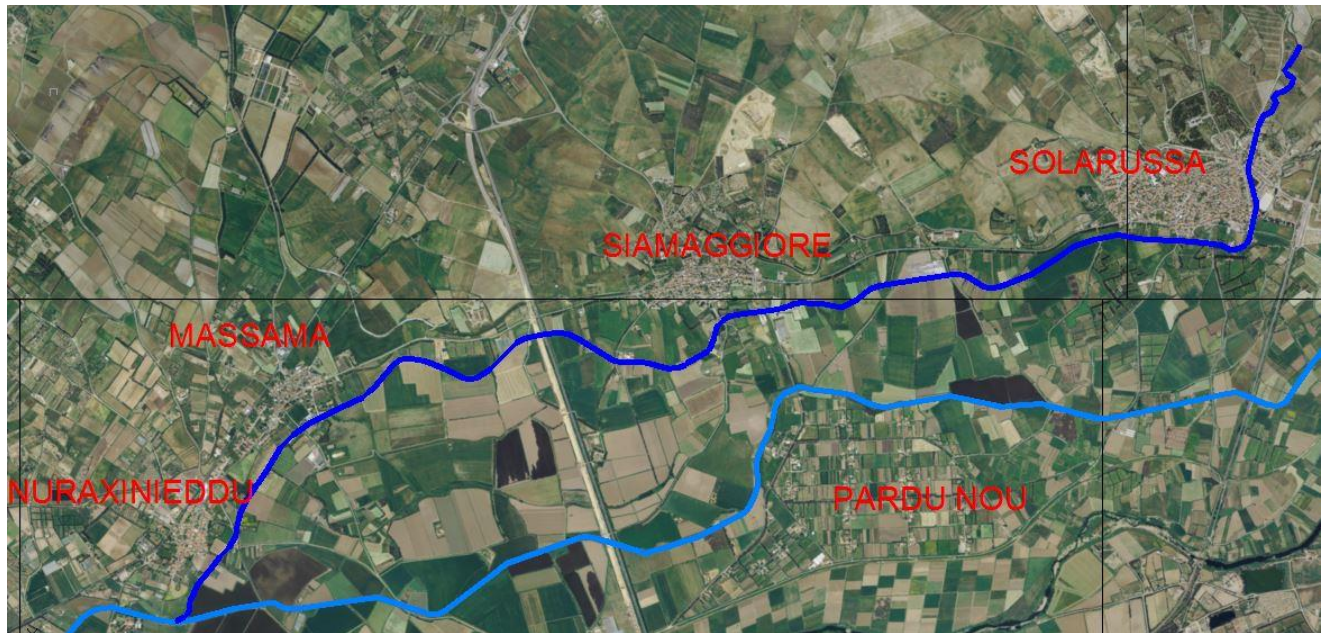


Figura 2 - Inquadramento del rio Nura Craba

I due rii si sviluppano parallelamente all'argine destro del fiume Tirso per poi confluire nel rio Tanui a sud dell'abitato di Nuraxinieddu. Proseguendo in direzione est-ovest, dopo circa una decina di chilometri, si immettono nello stagno di Cabras mediante il Canale a marea Bennaxi (parte terminale del rio Tanui).



Figura 3 - Inquadramento del rio Tanui

3. Inquadramento dei vincoli

3.1. P.A.I. e relazioni con l'area di interesse

Ai fini della difesa, della salvaguardia e del corretto sfruttamento del territorio, il PAI costituisce il documento di sintesi delle azioni promulgate dalla Pubblica Amministrazione (ai diversi livelli) e dagli Enti competenti nell'ambito della prevenzione del rischio idrogeologico. A tal proposito, si riporta brevemente il contesto normativo alla base della redazione dello stesso:

- Legge 18.5.1989, n. 183, "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo";
- Decreto Legge 11.6.1998, n. 180, "Misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella regione Campania", convertito con modificazioni dalla Legge 3.8.1998, n. 267;
- Decreto Legge 12.10.2000, n. 279, "Interventi urgenti per le aree a rischio idrogeologico molto elevato e in materia di protezione civile, nonché a favore di zone colpite da calamità naturali", convertito con modificazioni dalla legge 11.12.2000, n. 365;
- D.P.C.M. 29 settembre 1998, "Atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all'art. 1, commi 1 e 2, del decreto-legge 11 giugno 1998, n. 180";
- Legge della Regione Sardegna 22.12.1989, n. 45, "Norme per l'uso e la tutela del territorio regionale", e successive modifiche e integrazioni, tra cui quelle della legge regionale 15.2.1996, n.9;
- altre disposizioni normative.

Nelle aree di pericolosità idraulica e di pericolosità da frana il PAI ha le finalità di garantire adeguati livelli di sicurezza di fronte al verificarsi di eventi idrogeologici e tutelare quindi le attività umane, i beni economici ed il patrimonio ambientale e culturale esposti a potenziali danni.

Inoltre, il PAI è lo strumento attraverso il quale si deve:

- inibire le attività ed interventi capaci di ostacolare il processo verso un adeguato assetto idrogeologico e contrastare l'aumento delle situazioni di pericolo e delle condizioni di rischio idrogeologico esistenti;
- costituire le condizioni di base per avviare azioni di riqualificazione degli ambienti fluviali e di riqualificazione naturalistica o strutturale dei versanti in dissesto;
- evitare la creazione di nuove situazioni di rischio, rendendo compatibili gli usi attuali o programmati del territorio e delle risorse con le situazioni di pericolosità idraulica e da frana individuate.

Sulla scorta di quanto sopra, nel PAI sono riportati gli elementi per l'individuazione e la delimitazione delle aree con pericolosità idraulica e con pericolosità da frana ai diversi livelli, gli elementi per la rilevazione degli insediamenti, dei beni, degli interessi e delle attività vulnerabili nelle aree pericolose, e gli elementi per l'individuazione e la delimitazione delle aree a rischio idraulico e a rischio da frana ai diversi livelli.

Le Norme di Attuazione del PAI sono orientate sia verso la disciplina di politiche di prevenzione nelle aree di pericolosità idrogeologica allo scopo di bloccare la nascita di nuove situazioni di rischio, sia verso la disciplina del controllo delle situazioni di rischio esistenti nelle stesse aree pericolose allo scopo di non consentire l'incremento del rischio specifico, fino all'eliminazione o alla riduzione delle condizioni di rischio attuali.

Come meglio evidenziato in figura 4, il PAI prevede una fascia Hi4 all'interno degli argini del fiume Tirso e Hi1 all'esterno.



Figura 4 – Sovrapposizione delle aree di pericolosità PAI su ortofoto

3.2. P.S.F.F. e relazioni con l'area di interesse

Il Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF) è stato redatto ai sensi dell'art. 17, comma 6 della legge 19 maggio 1989 n. 183, quale Piano Stralcio del Piano di Bacino Regionale. Il PSFF trova specificazione nella direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni e nel Decreto Legislativo 23 febbraio 2010, n. 49 che recepisce tale direttiva.

Il P.S.F.F. 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 riguardanti le fasce fluviali.

Inoltre, costituisce un approfondimento ed un'integrazione necessaria al Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) in quanto è lo strumento per la delimitazione delle regioni fluviali funzionale a consentire, attraverso la programmazione di azioni (opere, vincoli, direttive), il conseguimento di un assetto fisico del corso d'acqua compatibile con la sicurezza idraulica, l'uso della risorsa idrica, l'uso del suolo (ai fini insediativi, agricoli ed industriali) e la salvaguardia delle componenti naturali ed ambientali.

Per quanto riguarda le procedure di approvazione, si fa riferimento alla delibera n. 2 del 17.12.2015, che ha adottato in via definitiva il Progetto di Piano Stralcio delle Fasce Fluviali, per tutto il territorio regionale con l'individuazione di nuove aree di pericolosità idraulica e la modifica di altre precedentemente identificate dal PAI. Per quanto concerne gli elementi areali il Piano Stralcio individua le cosiddette fasce fluviali, dette anche aree di pertinenza fluviale, che identificano quelle aree limitrofe all'alveo inciso occupate nel tempo dalla naturale espansione delle piene, dallo sviluppo morfologico del corso d'acqua, dalla presenza di ecosistemi caratteristici degli ambienti fluviali.

L'area di interesse è ricompresa all'interno del sub-bacino 02 Tirso e, come si evince dall'elaborato 2_1_3_3-CartaFasce, si trova a cavallo del sottobacino 01-Tirso e 24-Minori tra il Tirso e il Temo.

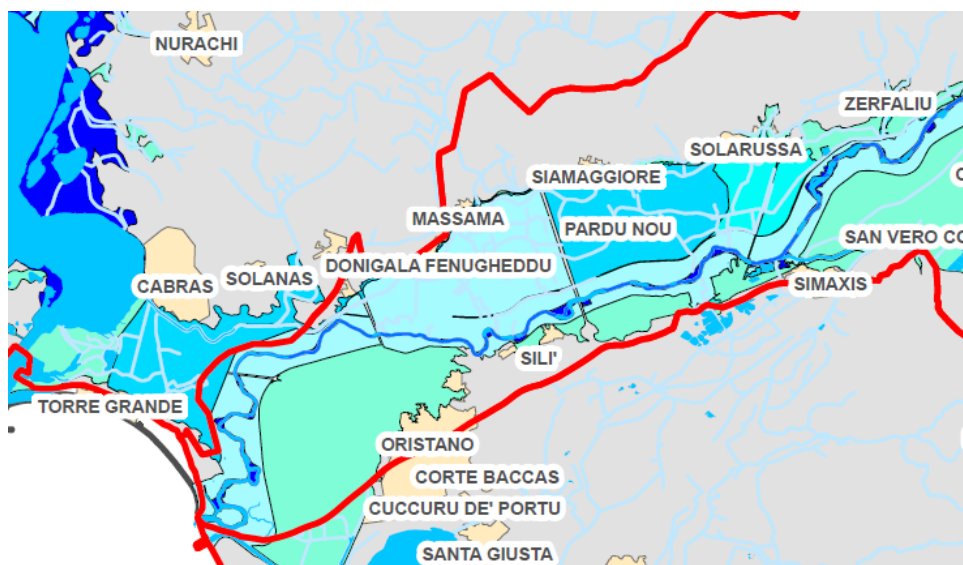


Figura 5 - Estratto dall'elaborato 2_1_3_3-CartaFasce

Di seguito si riporta la perimetrazione definita in ambito PSFF, la quale risulta essere assolutamente più gravosa rispetto a quanto previsto dal PAI. Questo è dovuto al fatto che tale studio ha messo in evidenza un'insufficienza dell'argine in destra idraulica, nel tratto tra Sili e Oristano, cosicché tutte quelle aree risultino essere allagate per tempi di ritorno di 50 anni.

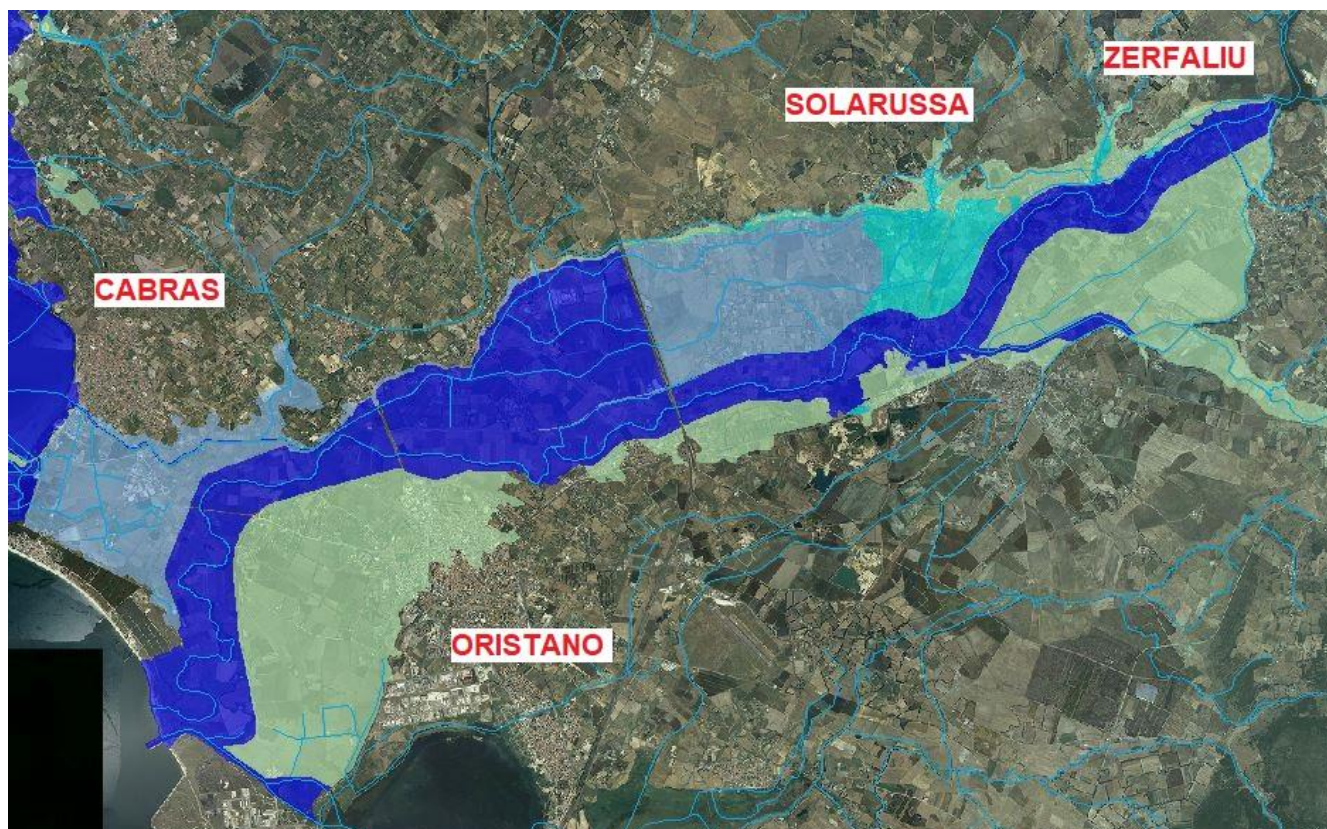


Figura 6 - Sovrapposizione delle aree di pericolosità PAI su ortofoto

In figura 6 si può notare come la Strada Statale SS131 funga da sbarramento per la risalita delle acque, cosicché l'Hi4 sia limitato all'area limitrofa alla tracimazione dell'argine, mentre la pericolosità diminuisce dirigendosi verso monte

3.3. Ciclone Cleopatra

Il ciclone Cleopatra è stato un ciclone extratropicale che ha colpito il bacino occidentale del Mediterraneo nel novembre del 2013. Il sistema di bassa pressione ha sviluppato un complesso di temporali a causa dell'aria fredda che, giungendo dal nord, è penetrata nel mediterraneo interagendo con l'aria calda proveniente da est.

Il ciclone ha generato abbondanti e intense precipitazioni sulla Sardegna, scaricando 440 mm d'acqua nella mattina del 18 novembre 2013, causando lo straripamento di vari canali e fiumi e provocando la morte di 19 persone, la distruzione di campi e la dispersione di una persona. Le aree più colpite sono state la Gallura, il Nuorese, l'Oristanese e il Medio Campidano.

In seguito a ciò è stata realizzata una mappatura delle aree esondate durante l'evento, imponendo in quelle fasce un vincolo idraulico di tipo Hi4. Solarussa è stato uno dei paesi colpiti dall'alluvione, per cui, come si può osservare in figura 7, la zona comunemente chiamata "Pau" è soggetta ad una pericolosità molto elevata:

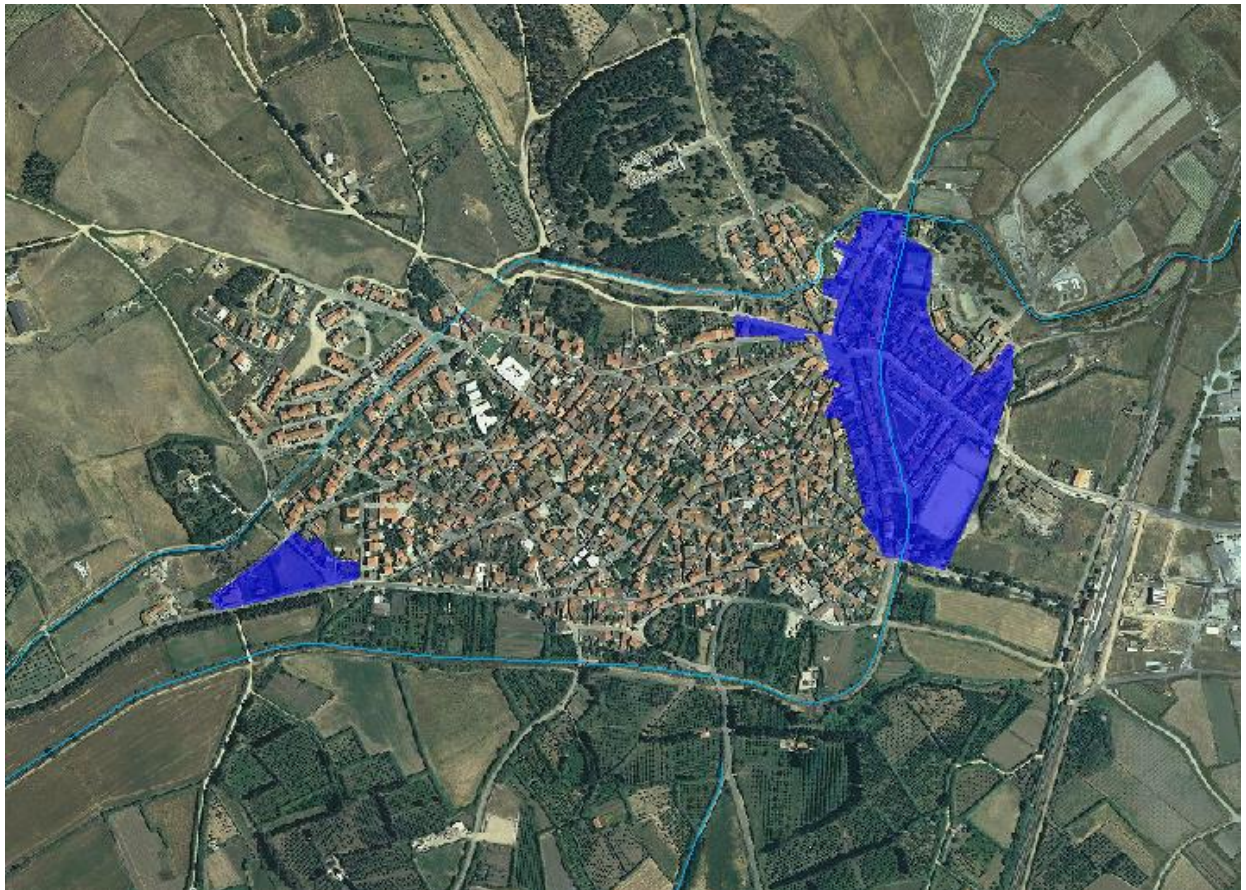


Figura 7 - Perimetrazione delle aree allagate a Solarussa a causa del Ciclone Cleopatra

3.4. Adeguamento del PUC di Oristano al PAI

L'articolo 8 comma 2 e 2 bis delle Norme Tecniche d'Attuazione del PAI stabilisce che: *“Indipendentemente dall'esistenza di aree perimetrate dal PAI e tenuto conto delle prescrizioni contenute nei piani urbanistici provinciali e nel piano paesistico regionale relativamente a difesa del suolo, assetto idrogeologico, riduzione della pericolosità e del rischio idrogeologico, i Comuni assumono e valutano le indicazioni di appositi studi comunali di assetto idrogeologico concernenti la pericolosità e il rischio idraulico, in riferimento ai soli elementi idrici appartenenti al reticolo idrografico regionale, e alle inondazioni costiere, definiscono gli interventi di mitigazione e contengono anche le valutazioni afferenti agli studi dei bacini urbani di cui al comma 5 bis seguente.*

Gli studi comunali di assetto idrogeologico sono redatti, in ogni caso, in sede di adozione di nuovi strumenti urbanistici e di varianti generali agli strumenti urbanistici vigenti. Le conseguenti valutazioni, poste a corredo degli atti di piano costituiscono presupposto per verifiche di coerenza di cui all'articolo 31, comma 5 della legge regionale 22.04.2002, n.7 (legge finanziaria 2002). Il presente comma trova applicazione anche nel caso di variazioni agli strumenti urbanistici conseguenti all'approvazione di progetti ai sensi del DPR 18.4.1994, n. 383, “Regolamento recante disciplina dei procedimenti di localizzazione delle opere di interesse statale”.

Il comma 3 specifica ulteriormente che “gli studi di cui al comma 2 analizzano le possibili alterazioni dei regimi idraulici e della stabilità dei versanti collegate alle nuove previsioni di uso del territorio, con particolare riguardo ai progetti di insediamenti residenziali, produttivi, di servizi, di infrastrutture.”

Il Comune di Oristano ha provveduto a redigere lo studio di compatibilità idraulica, geologica e geotecnica per l'adeguamento del proprio PUC al PAI ai sensi dell'articolo 8 comma 2 delle NA del PAI medesimo. Tale studio è stato adottato con deliberazione del Consiglio Comunale n. 29 del 22/03/2016 e approvato dall'Agenzia del Distretto Idrografico della Regione Sardegna con delibera del Comitato Istituzionale n.2 del 03/07/2018 (pubblicazione nel BURAS n.35 del 26/07/2018).

I rii Nura Craba, Saoru e Tanui interessano la parte settentrionale del territorio comunale di Oristano, per cui sono stati oggetto di studio nell'ambito dell'adeguamento del PUC al PAI. Di seguito si riporta uno stralcio della tavola 5.0 “Carta del pericolo inviluppo – quadro d'unione”

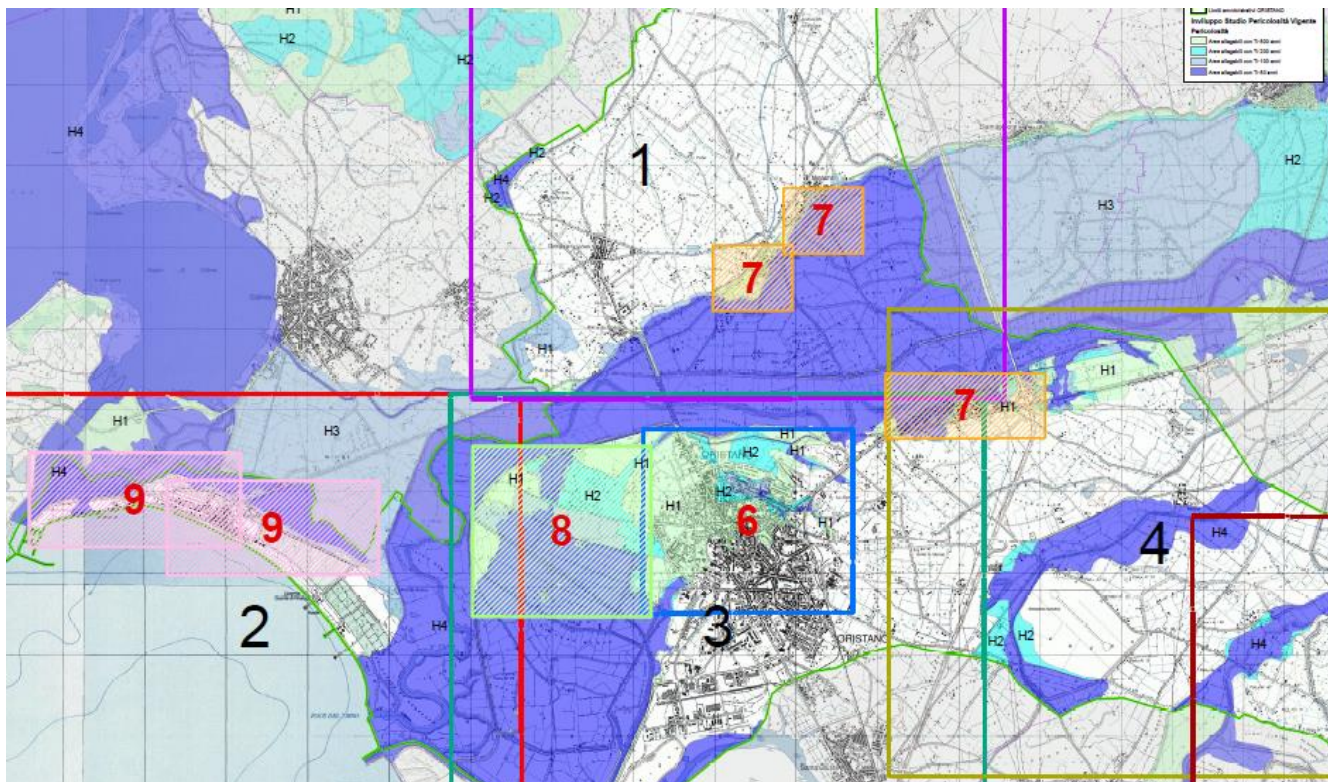


Figura 8 – Stralcio dalla tavola 5.0 “Carta del pericolo inviluppo – quadro d'unione”

Come si capisce dal nome della tavola, le aree definite sono l'inviluppo delle perimetrazioni relative al PAI, al PSFF e all'adeguamento del PUC al PAI.

3.5. P.G.R.A. e relazioni con l'area di interesse

In attuazione delle previsioni dell'art. 7 del D.Lgs. 49/2010 e dell'art. 13 del D.Lgs. 152/2006, con la Deliberazione del Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino della Regione Sardegna n. 1 del 30.07.2015 è stata adottata la “Proposta di Piano di gestione del rischio di alluvioni” (di qui in poi PGRA) e la relativa documentazione per la

Valutazione Ambientale Strategica, comprendente il Rapporto Ambientale, la Sintesi non tecnica e la Valutazione di incidenza ambientale.

Con successiva Deliberazione del Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino della Regione Sardegna n. 2 del 30.07.2015 è stata approvata la proposta di variante al PAI costituita dall'integrazione del Titolo V alle N.A del PAI recante "*Norme in materia di coordinamento tra il PAI e il Piano di Gestione del rischio di alluvioni (PGRA)*" così come riportato nell'allegato A alla presente deliberazione.

Le quattro classi di legenda utilizzate negli strumenti di pianificazione succitati (PAI, PSFF, studi ex art. 8 c.2 PAI e aree Cleopatra) sono state ricondotte alle tre classi individuate dal D.Lgs. 49/2010:

- P3 – Classe di pericolosità elevata, valevole per eventi con tempo di ritorno minori o uguali a 50 anni;
- P2 – Classe di pericolosità media, valevole per eventi con tempo di ritorno compresi tra 50 e 200 anni;
- P1 – Classe di pericolosità bassa, valevole per eventi con tempo di ritorno compresi tra 200 e 500 anni.

Con Deliberazione del Comitato Istituzionale n.2 del 15/03/2016 venne approvata la prima versione del PGRA e tutti gli elaborati costituenti (relazioni, mappe, repertori, scenari d'intervento strategico e coordinato, atlanti, manuali, documenti VAS).

In seguito, con Deliberazione del Comitato Istituzionale n.1 del 11/12/2018 pubblicata sul BURAS n.1 del 03/01/2019 che approva gli studi per gli Scenari di intervento strategico e coordinato per vari rii e fiumi, tra i quali il fiume Tirso, sono stati effettuati alcuni aggiornamenti agli elaborati della prima versione del PGRA.

Come si può osservare nelle figure 9 e 10, rispettivamente rappresentanti la prima e la seconda versione del PGRA, non ci sono particolari variazioni a monte del ponte Oristano - Donigala Fenugheddu, mentre a valle, nel territorio di Cabras e della borgata di Torregrande, il vincolo idraulico è passato dall'Hi3 all'Hi4.



Figura 9 – Sovrapposizione delle aree di pericolosità PGRA su ortofoto

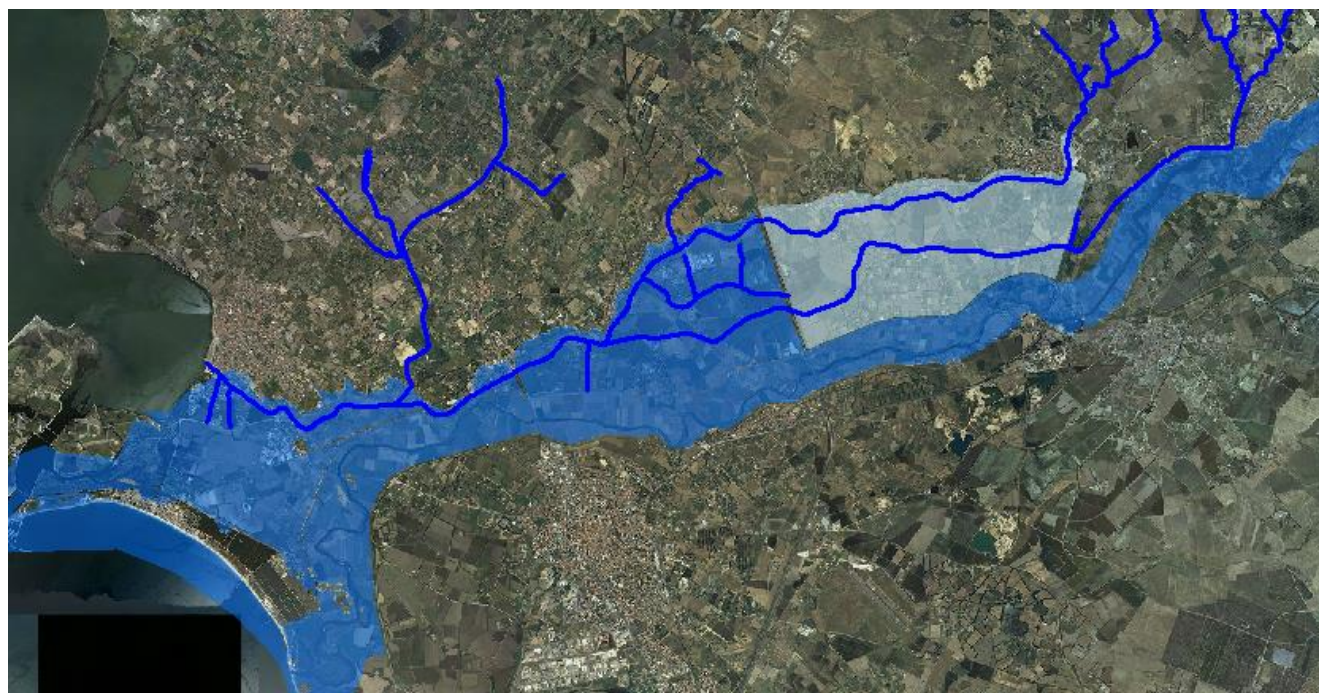


Figura 10 - Sovrapposizione delle aree di pericolosità derivanti da "Scenari di intervento strategico e coordinato" del PGRA

4. Informazione territoriale utilizzata

Per poter eseguire studi di natura idrologica e idraulica è necessario definire l'assetto del territorio.

A tal fine è stata utilizzata un'informazione territoriale che costituisce la sintesi delle informazioni provenienti dai rilievi eseguiti a diversa scala di dettaglio. In particolare, sono stati utilizzati:

- il DTM con passo a 10 m fornito dalla Regione Sardegna (fogli 528 e 529);
- il DTM con passo a 1 m fornito dal “Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare” (fogli 528070_07, _08, _09, _10, _12, _13, _14, _15, _17, _18, _19, _20, _22, _23, _24, _25, 528080_01, _02, _06, _07, _11, _12, _13, 528110_03, _04, _08, _09)
- il DTM con passo 1 m realizzato per le Fasce Fluviali (sezioni 528040, 528080, 529010, 529050)
- la cartografia tecnica regionale in scala 1:10.000;
- i rilievi di dettaglio dell'alveo dei corsi d'acqua e degli attraversamenti presenti lungo il loro sviluppo.

L'elaborazione di tali informazioni, attraverso l'impiego di comuni procedimenti di interpolazione dei dati puntuali, ha consentito di ottenere un modello digitale di elevazione del terreno (DEM), con il quale è stato ricostruito l'andamento del terreno e la morfologia dell'alveo nella porzione di territorio individuata per la modellazione idraulica.

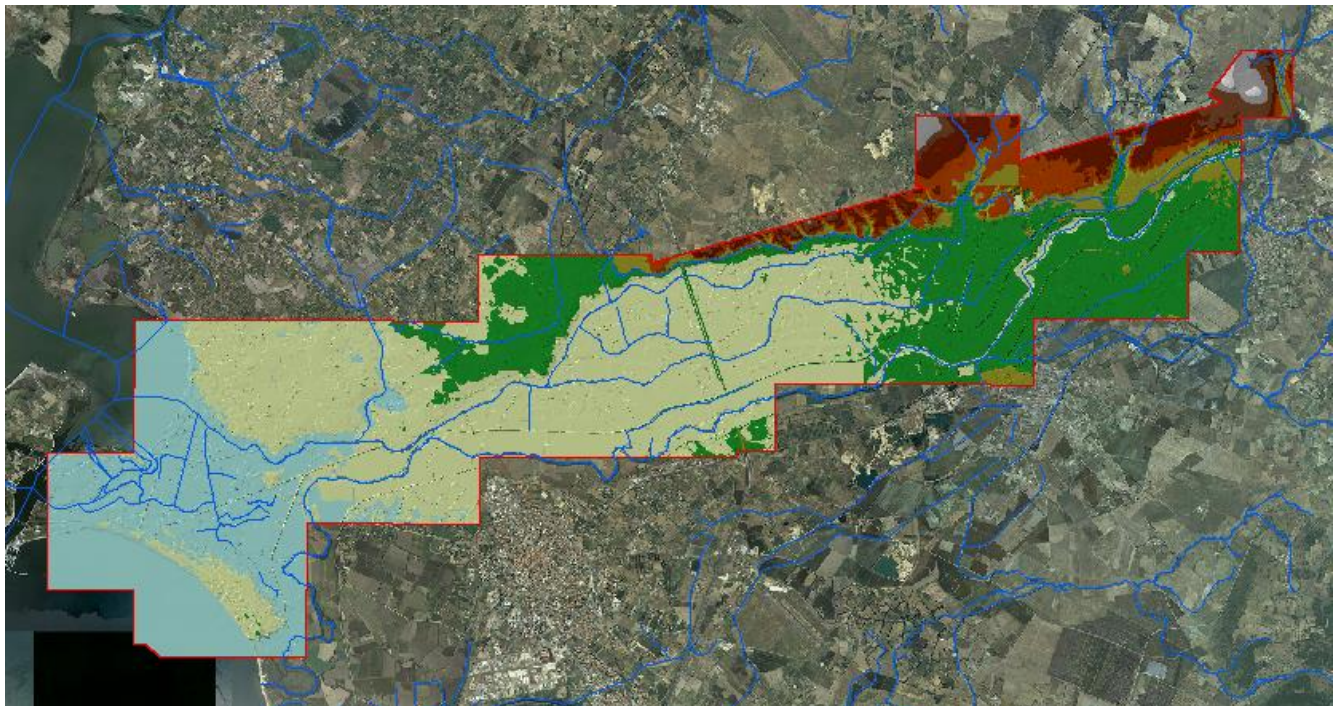


Figura 11 - TIN di informazione territoriale (elaborazione attraverso GIS). Con i diversi colori sono rappresentati intervalli discreti del valore dell'elevazione del terreno.

PARTE SECONDA – STATO ATTUALE

5. Analisi idrologica condotta

5.1. Reticolo idrografico

Sulla base di quanto esposto nella Deliberazione del Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino della Regione Sardegna n.3 del 30/07/2015, l'art 1 prevede *“per le finalità di applicazione delle Norme Tecniche di Attuazione del PAI e delle relative Direttive, di identificare quale reticolo idrografico di riferimento per l'intero territorio regionale l'insieme degli elementi idrici contenuti nell'ultimo aggiornamento dello strato informativo 04_ELEMENTO_IDRICO.shp del DGBT_10k_Versione 0.1 (Data Base Geo Topografico 1:10.000), da integrare con gli ulteriori elementi idrici eventualmente rappresentati nella cartografia dell'Istituto Geografico Militare (IGM), Carta topografica d'Italia-serie 25V edita per la Sardegna dal 1958 al 1965”*.

Sulla scorta di tale deliberazione, è stata quindi definita l'idrografia dell'area in esame la quale risulta ricompresa all'interno del bacino del fiume Tirso e, più in particolare, oltre l'argine in destra idraulica del fiume Tirso medesimo.

Il reticolo idrografico dell'area oggetto di studio è molto complesso, soprattutto per via dei numerosi canali di irrigazione e bonifica realizzati nei decenni scorsi. Quelli di maggior interesse su cui si concentra il presente studio sono quelli già descritti al paragrafo 2:

- Rio Nura Craba
- Rio Saoru
- Rio Tanui / Canale a marea di Bennaxi

Il Fiume Tirso non è oggetto di studio in quanto il progetto per cui si redige la presente relazione di Compatibilità Idraulica ha l'intento e il fine di mitigare il rischio idraulico indotto solo dal reticolo secondario.

Relativamente al fiume Tirso è stato presentato dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura dell'Università degli Studi di Cagliari ed approvato con deliberazione del Comitato Istituzionale n.1 del 11/12/2018 lo studio degli “Scenari di intervento strategico e coordinato”, nel quale sono previsti diversi interventi atti alla riduzione della pericolosità idraulica indotta dal fiume Tirso.

Si rimanda agli elaborati allegati alla suddetta deliberazione per maggiori informazioni.

5.2. Bacini idrografici

In primo luogo sono state riconosciute le aste principali dei corsi d'acqua, ossia il rio Nura Craba, il rio Saoru e il canale a marea Bennaxi. Ognuno di questi, poi, è stato suddiviso in tronchi mediante delle sezioni che costituiscono delle sezioni di chiusura di sottobacini. Si è reso necessario far ciò per via delle notevoli lunghezze

dei corsi d'acqua, così da determinare portate differenti lungo il loro sviluppo longitudinale e rendere più verosimile la modellazione.

In particolare, il Nura Craba è stato suddiviso in 4 tronchi e il Saoru in 3, con sezioni poste in coincidenza di punti caratteristici (quali la fine dei centri abitati, l'intersezione con il Canale Adduttore, etc). Il bacino relativo all'ultimo tratto del reticolo risulta essere particolarmente ingente per via della presenza del canale del Terzo Lotto di Bonifica, che scarica le proprie acque provenienti dalla zona più a nord sul rio Tanui.

Ad ogni sezione di chiusura, e quindi sottobacino, è stato associato un nome dato dall'iniziale del corso d'acqua più un numero progressivo da monte verso valle (NC1, NC2, NC3, NC4, S1, S2, S3, T, 3°L, B).

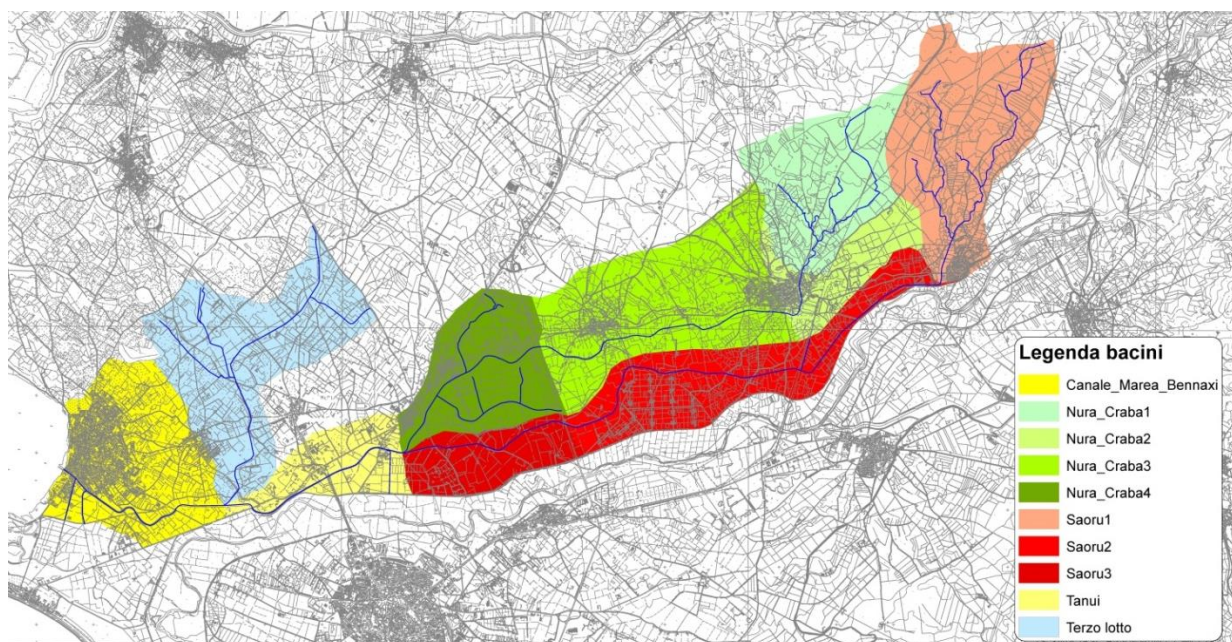


Figura 12 - Carta dei bacini

Sulla base del modello digitale del suolo descritto al punto 4 è stato possibile definire le caratteristiche geometriche e geomorfologiche principali dei sottobacini necessarie per lo studio idrologico e idraulico.

Prima di tutto son state determinate le curve ipsografiche, che mettono in relazione tra loro le quote geodetiche con le aree sottese dalle rispettive curve di livello. Inoltre, son stati determinati diversi parametri caratteristici dei bacini, quali area, quota massima, quota minima, altezza media e pendenza media, e delle aste fluviali, quali lunghezza e pendenza media del tronco di interesse.

In tabella 1 si riportano i valori di alcune delle grandezze descritte, avendo indicato con:

- A_b l'area del bacino;
- L_a la lunghezza dell'asta principale;
- i_b la pendenza media del bacino;
- z_m la quota media del bacino;
- z_0 la quota della sezione di chiusura

	A_b [Km²]	L_a [km]	i_b [%]	z_m [m]	z₀ [m]
NC1	5.46	4.3	2.273	33.19	10.60
NC2	8.09	5.28	2.264	27.76	6.65
NC3	16.79	9.92	2.655	23.84	4.14
NC4	21.77	13.32	2.151	20.60	2.20
S1	7.97	5.51	2.411	40.55	7.30
S2	14.54	13.41	2.063	26.53	3.90
S3	17.71	16.49	1.967	22.81	2.20
T	47.72	20.05	1.813	18.25	0.69
3°L	8.24	6.00	1.108	3.54	0.69
B	62.72	23.41	1.603	14.82	-1.21

Tabella 1 - Caratteristiche geomorfologiche dei bacini

5.3. Tempo di corrivazione

Note le lunghezze dei tronchi e le caratteristiche dei bacini, si devono calcolare i tempi di corrivazione.

L'università degli Studi della Tuscia (Viterbo) ha eseguito un'analisi critica relativamente al tempo di corrivazione, mettendo in evidenza la difficoltà oggettiva non solo nella definizione di una formula adeguata ai vari casi, ma anche nella semplice definizione del tempo di corrivazione in sé.

Si riporta uno stralcio dello studio eseguito ad opera di S. Grimaldi, A. Petroselli, F. Nardi, F. Tauro, intitolato "Analisi critica dei metodi di stima del tempo di corrivazione" e presentato in occasione del XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche a Palermo nel settembre 2010:

Già il suo enunciato (tempo di corrivazione) si presenta controverso visto che ne sono disponibili diverse versioni "operative" e "concettuali". Di seguito si riportano infatti le 6 definizioni operative presenti in letteratura, applicate quando si dispone di eventi osservati di precipitazione-portata, (McCuen, 2009):

- 1) tempo che intercorre dalla fine del tempo di pioggia netta al tempo in cui si verifica l'inflessione della curva di esaurimento del deflusso totale;*
- 2) tempo che intercorre dal centro di massa della pioggia netta al centro di massa del deflusso superficiale (tale definizione coincide con quella del "tempo di lag" nonostante ci sia una differenza teorica marcata tra i due parametri);*

- 3) tempo che intercorre dalla massima intensità di precipitazione al picco del deflusso totale;
- 4) tempo che intercorre dal centro di massa della pioggia netta al picco del deflusso superficiale;
- 5) tempo che intercorre dal centro di massa della pioggia netta al picco del deflusso totale;
- 6) tempo che intercorre dall'inizio del deflusso lordo al tempo di picco dello stesso;

e le due versioni concettuali:

a) il tempo che impiega una goccia d'acqua a raggiungere la sezione di chiusura del bacino dal punto idraulicamente più lontano dello stesso;

b) il tempo che intercorre dalla fine della pioggia netta alla fine del deflusso netto.

Le formule empiriche usate nello studio dimostrano come non si possa asserire con sicurezza come una sia meglio di un'altra, né tantomeno più corretta.

Per il calcolo del tempo di corrivazione esistono numerose formule in letteratura, tra cui:

- Ventura: $t_c = 0.1272 \left(\frac{A}{i_m} \right)^{0.5}$
- Pezzoli: $t_c = 0.055 \frac{L}{i_m^{0.5}}$
- Viparelli: $t_c = \frac{L}{v}$
- VAPI: $t_c = 0.212A^{0.231} \left(\frac{h_m}{i_m} \right)^{0.289}$
- Puglisi: $t_c = 6 \frac{L^{2/3}}{(h_{\max} - h_{\min})^{1/3}}$
- Tournon: $t_c = 0.396 * \frac{L}{i_m^{0.5}} \left(\frac{A}{L^2} * \sqrt{\frac{i_m}{i_b}} \right)^{0.72}$
- Giandotti: $t_c = \frac{4A^{0.5} + 1.5L}{0.8(h_m - h_{\min})^{0.5}}$
- Giandotti ridotta: $t_c = \frac{4A^{0.5} + 1.5L}{0.8(h_m)^{0.5}}$
- Pasini: $t_c = 0.108 \frac{(AL)^{1/3}}{i_m^{0.5}}$
- SCS: $t_c = 0.00227 L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7} i_b^{-0.5}$
- Kirpich: $t_c = 0.095 \frac{L_a^{1.155}}{(z_{\max} - z_{\min})^{0.385}}$

Dove:

- A è l'area del bacino in km²;
- L è la lunghezza dell'asta principale in km;
- i_m è la pendenza del corso d'acqua m/m;
- v è la velocità con cui scorre la goccia d'acqua (1 m/s);

- i_b è la pendenza del bacino in %;
- h_m , h_{max} e h_{min} rappresentano rispettivamente la quota media, massima e minima;
- CN è il Curve Number associato al bacino.

Di seguito si consegna una rapida descrizione delle caratteristiche dei campioni di bacini osservati per la determinazione delle formule di calcolo.

- Ventura: il campo di impiego riguarda principalmente bacini pianeggianti di modeste dimensioni;
- Pezzoli: l'analisi ha riguardato un campione di piccoli bacini ricadenti nel territorio del Piemonte;
- Viparelli: il principio alla base è quello di considerare le isocorrie coincidenti con le isoipse e conseguentemente ammettere che la distanza percorsa dalla goccia sia sostanzialmente legata alla differenza di quota tra i punti del bacino e la quota della sezione di chiusura;
- VAPI: come specificato nelle Linee Guida del PSFF il metodo non va bene per bacini con area minore di 50 km²;
- Puglisi: è stato determinato dall'esame di bacini appenninici con superfici tra i 43 e i 94 Km²;
- Tournon: il campione osservato, e conseguentemente il campo di applicazione riguarda bacini con estensioni comprese tra 30 e 170 e Km²;
- Metodo di Giandotti: è indicato per bacini collinari con estensione maggiore ai 170 Km²;
- Metodo di Giandotti ridotto: può essere utilizzato anche per bacini di estensione minore;
- Metodo di Pasini: il metodo è applicato su bacini di pianura delle dimensioni di qualche km²;
- Metodo SCS: si basa sulla determinazione del curve number;
- Metodo di Kirpich: la formula è stata sviluppata per piccoli bacini pianeggianti di estensione inferiore ai 10 km² in Tennessee e Pennsylvania.

Vista l'eterogeneità delle formule e dei contesti con i quali esse sono state ottenute, si è scelto di comune accordo con i funzionari dell'ARDIS di adoperare unicamente quella di Viparelli, con una velocità di scorrimento di 1 m/s. In tal modo si ritiene di riuscire a valutare meglio il funzionamento del fenomeno di formazione delle piene mantenendo un adeguato livello di sicurezza nei confronti delle incertezze insite nell'idrologia e nell'idraulica. In tabella 2 si riportano i valori ottenuti

Bacino	NC1	NC2	NC3	NC4		S1	S2	S3		T	3°L	B
tc [ore]	1.20	1.47	2.76	3.70		1.53	3.72	4.58		5.57	1.67	6.50

Tabella 2 - Tempi di corrvazione col metodo di Viparelli

5.4. Curva area-tempi

Noti il tempo di corrivazione e tutte le caratteristiche delle aste fluviali e dei rispettivi bacini, si sono determinate le curve aree-tempi, ossia la funzione di risposta del bacino. La curva area-tempi, infatti, ci permette di dire quale sia la quota parte di bacino contribuyente alla portata nella sezione di chiusura. Per la sua determinazione, si calcola preliminarmente la velocità di corrivazione, mediante la formula inversa di Viparelli (in questo caso è pari a 1 m/s per le scelte fatte e discusse nel paragrafo 5.3):

$$t_c = L_{asta} / V_c \rightarrow V_c = L_{asta} / t_c$$

Facendo l'ipotesi per cui le isocorrive coincidano con le linee ad uguale distanza idraulica, possiamo suddividere l'asta fluviale in vari tronchi, di cui misuriamo la lunghezza e di conseguenza il rispettivo tempo di corrivazione. Ora, poiché ogni tronco ha origine e fine per determinate quote, è possibile determinare l'area sottesa dalla curva di livello in cui termina il tronco fluviale considerato, cosicché si abbia una corrispondenza tra lunghezze dei tronchi, tempi di corrivazione e aree contribuenti. Da qua si può quindi determinare la curva aree-tempi.

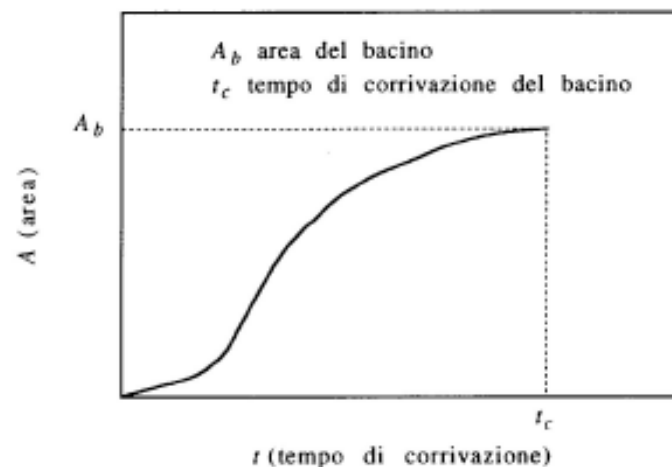


Figura 13 - Esempio curva aree-tempi

Suddividendo il tempo di corrivazione in n intervalli Δt , si può calcolare la funzione di risposta del bacino, ossia la quota parte di area che contribuisce alla formazione della piena ad ogni incremento del tempo di Δt .

5.5. Analisi pluviometrica

Per la determinazione delle portate di piena è necessario utilizzare il metodo indiretto non essendo presenti strumenti atti alla misurazione delle portate in corrispondenza della sezione di chiusura dei bacini.

Il metodo indiretto consiste in un modello afflussi-deflussi, ossia una metodologia che permette il calcolo delle portate in funzione delle altezze di precipitazione previste al variare del tempo di ritorno Tr .

5.5.1. Determinazione degli afflussi

Il calcolo delle altezze di precipitazione è stato eseguito mediante le Curve di Possibilità Pluviometrica estratte dalla distribuzione TCEV regionalizzata di Deidda, Piga e Sechi del 2000. Tale metodo prevede la suddivisione della Sardegna in 3 sottozone omogenee (SZO) e nell'individuazione della cosiddetta pioggia indice giornaliera H_g (figura 14), ovvero la media dei massimi annui di precipitazione giornaliera, in funzione della posizione del sito in esame.

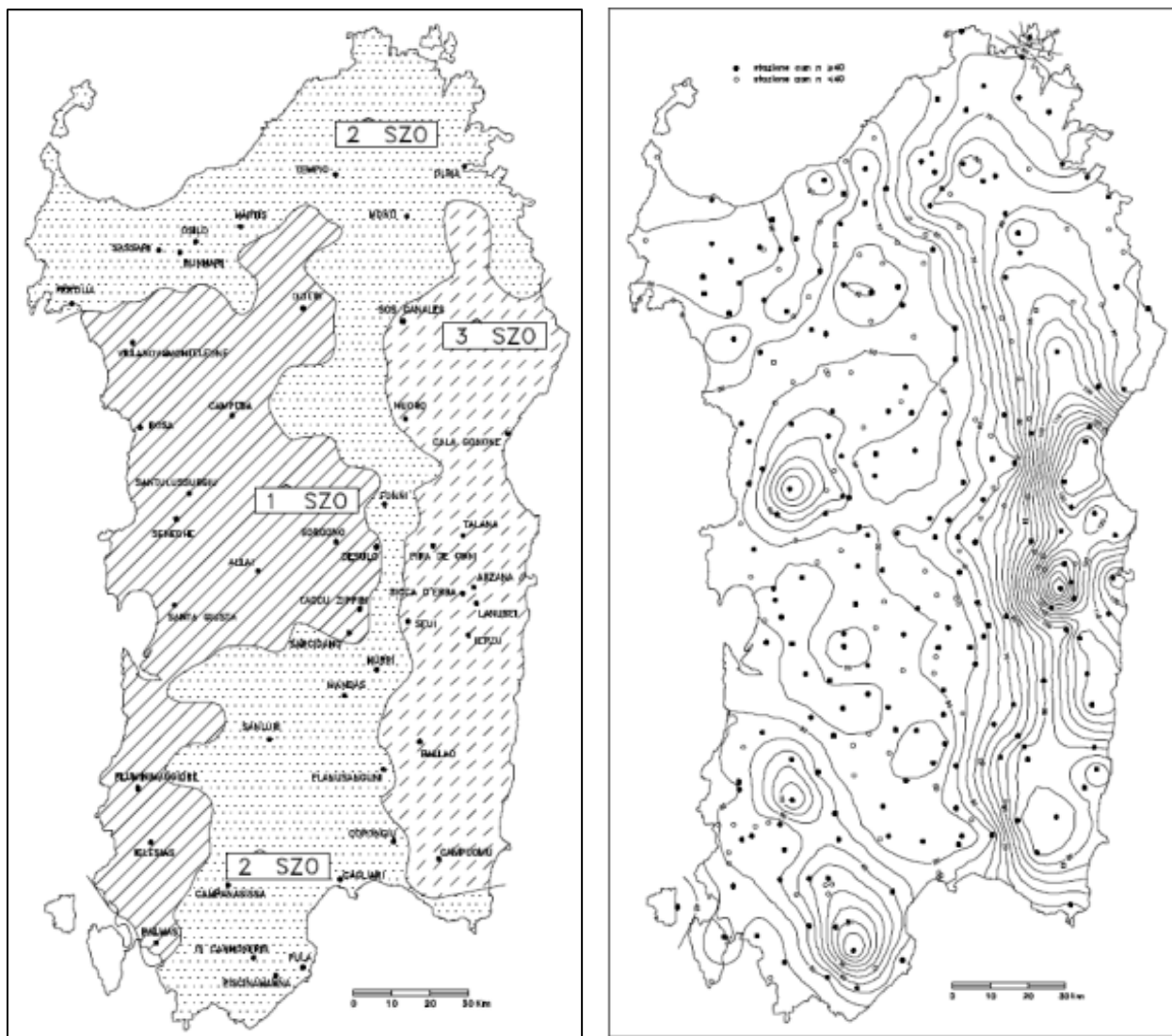


Figura 14 – Suddivisione della Sardegna in SottoZone Omogenee e Carta della pioggia indice giornaliera

A partire da questi parametri, dalla durata della precipitazione e dai tempi di ritorno di interesse (50, 100, 200, 500 anni), si possono calcolare le altezze di precipitazione lorde di progetto mediante le seguenti relazioni:

$$h_{Tr}(t) = H_m(t_p) * at_p^n$$

nella quale:

$$H_m(t_p) = 1.1287 H_g(t_p/24)^{-0.493+0.476 \cdot \log(H_g)}$$

con H_g dipendente dalla posizione geografica del bacino, mentre i parametri a ed n dipendono dalla sottozona SZO di appartenenza.

per la sottozona I:

$$a = 0.4642 + 1.0376 \cdot \text{Log}(\text{Tr})$$

$$n = -0.18488 + 0.22960 \cdot \text{Log}(\text{Tr}) - 0.033216 \cdot (\text{Log}(\text{Tr}))^2 \quad (\text{per } t_c < 1 \text{ ora})$$

$$n = -0.01469 - 0.0078505 \cdot \text{Log}(\text{Tr}) \quad (\text{per } t_c > 1 \text{ ora})$$

per la sottozona II:

$$a = 0.43797 + 1.089 \cdot \text{Log}(\text{Tr})$$

$$n = -0.18722 + 0.24862 \cdot \text{Log}(\text{Tr}) - 0.0336305 \cdot (\text{Log}(\text{Tr}))^2 \quad (\text{per } t_c < 1 \text{ ora})$$

$$n = -0.0063887 - 0.004542 \cdot \text{Log}(\text{Tr}) \quad (\text{per } t_c > 1 \text{ ora})$$

per la sottozona III:

$$a = 0.40926 + 1.1441 \cdot \text{Log}(\text{Tr})$$

$$n = -0.1906 + 0.264438 \cdot \text{Log}(\text{Tr}) - 0.038969 \cdot (\text{Log}(\text{Tr}))^2 \quad (\text{per } t_c < 1 \text{ ora})$$

$$n = 0.014929 + 0.0071973 \cdot \text{Log}(\text{Tr}) \quad (\text{per } t_c > 1 \text{ ora})$$

L'area oggetto di studio ricade nella SZO 1 ed è caratterizzata da una pioggia indice H_g pari a 45 mm.

Altezze di precipitazione lorde [mm]				
T_R	50	100	200	500
NC1	46.60	53.12	59.62	68.22
NC2	49.20	56.05	62.89	71.91
NC3	58.20	66.20	74.17	84.64
NC4	62.94	71.54	80.09	91.32
S1	49.77	56.70	63.61	72.72
S2	63.05	71.67	80.23	91.47
S3	66.61	75.68	84.69	96.49
T	70.17	79.69	89.13	101.49
3°L	50.91	57.98	65.04	74.33
B	73.12	83.01	92.81	105.62

Tabella 3 - Altezze di pioggia lorde calcolate con il metodo TCEV

5.5.2. Ragguaglio dell'area di precipitazione

Il coefficiente di ragguaglio delle piogge all'area ARF (t, S), funzione della durata t in ore e della superficie del bacino S in km², è esprimibile con la formulazione proposta nel Flood Studies Report - Wallingford:

$$ARF = 1 - (0.0394 S^{0.354}) t^{(-0.40+0.0208 \ln(4.6-\ln(S)))} \quad \text{per } S < 20 \text{ km}^2$$

$$ARF = 1 - (0.0394 S^{0.354}) t^{(-0.40+0.003832 (4.6-\ln(S)))} \quad \text{per } 20 < S < 100 \text{ km}^2$$

Bacino	NC1	NC2	NC3	NC4		S1	S2	S3		T	3°L	B
ARF	0.933	0.929	0.928	0.930		0.930	0.939	0.940		0.922	0.932	0.919

Tabella 4 - Calcolo dell'Areal Reduction Factor

A favore di sicurezza, però, nei seguenti calcoli si è scelto di utilizzare un valore di ARF unitario (ARF=1).

5.5.3. Calcolo del Curve Number

A partire dalle altezze di precipitazione lorde, si devono calcolare quelle nette in funzione del tipo di terreno e dell'uso del suolo.

Per far ciò è stato usato il metodo del Curve Number (CN) proposto dal Soil Conservation Service. Questo consiste nell'attribuire ad ogni categoria di uso del suolo un certo valore del CN (come previsto dalle Metodologie di Analisi previste per gli "studi, indagini, elaborazioni attinenti all'ingegneria integrata, necessari alla redazione dello studio denominato progetto di piano stralcio delle fasce fluviali (PSFF)") così da determinare la capacità di accumulo del terreno, ovvero di deflusso del suolo.

In primo luogo, quindi, è stata caricata su GIS la carta Corine Land Cover RAS - 2008 e ad ogni tipologia di uso del suolo è stato associato un certo valore del CN(II) classe C secondo quanto previsto nella tabella 5.

Quindi, si è proceduto all'analisi delle informazioni presenti nella Carta Geologica resa disponibile dalla Regione Sardegna, al fine di ottenere fattori correttivi per il calcolo definitivo dei valori di CN a scala regionale. Come per l'uso del suolo, è stato associato ad ogni unità geologica un fattore correttivo ΔCN da sommare al valore del CN(II) precedentemente definito.

L'area si trova in un'area caratterizzata principalmente da sedimenti alluvionali, depositi pleistocenici e basalti.

A questo punto si sono determinate le aree destinate ai vari usi del suolo, e si è associato ad ognuno di essi il rispettivo CN. Quindi, è stata fatta una media ponderata dei CN rispetto alle aree, così da ottenere un valore caratteristico del bacino. Il valore ottenuto rappresenta quello di CN relativo ad una condizione media di umidità antecedente (AMC) in funzione della precipitazione dei 5 giorni precedenti l'evento in studio, detto CN (II).

A questo valore è stato aggiunto il fattore correttivo relativo alla geologia del suolo.

A favore di sicurezza si è posta, infine, una condizione sfavorevole di umidità, per cui si è utilizzato il CN (III):

$$CN (III) = \frac{23 CN (II)}{10 + 0.13 CN (II)}$$

1111 - TESSUTO RESIDENZIALE COMPATTO E DENSO	95
1112 - TESSUTO RESIDENZIALE RADO	95
1121 - TESSUTO RESIDENZIALE RADO E NUCLEIFORME	95
1122 - FABBRICATI RURALI	95
1211 - INSEDIAMENTO INDUSTRIALI/ARTIG. E COMM. E SPAZI ANNESSI	95
1212 - INSEDIAMENTO DI GRANDI IMPIANTI DI SERVIZI	95
1221 - RETI STRADALI E SPAZI ACCESSORI	95
1222 - RETI FERROVIARIE E SPAZI ANNESSI	95
1223 - GRANDI IMPIANTI DI CONCENTRAMENTO E SMISTAMENTO MERCI	99
1224 - IMPIANTI A SERVIZIO DELLE RETI DI DISTRIBUZIONE	95
123 - AREE PORTUALI	95
124 - AREE AEROPORTUALI ED ELIPORTI	95
131 - AREE ESTRATTIVE	75
1321 - DISCARICHE	75
1322 - DEPOSITI DI ROTTAMI A CIELO APERTO, CIMITERI DI AUTOVEICOLI	75
133 - CANTIERI	95
141 - AREE VERDI URBANE	70
1421 - AREE RICREATIVE E SPORTIVE	95
1422 - AREE ARCHEOLOGICHE	75
143 - CIMITERI	95
2111 - SEMINATIVI IN AREE NON IRRIGUE	60
2112 - PRATI ARTIFICIALI	75
2121 - SEMINATIVI SEMPLICI E COLTURE ORTICOLE A PIENO CAMPO	60
2122 - RISAIE	99
2123 - VIVAI	70
2124 - COLTURE IN SERRA	75
221 - VIGNETI	60
222 - FRUTTETI E FRUTTI MINORI	60
223 - OLIVETI	60
231 - PRATI STABILI	75
2411 - COLTURE TEMPORANEE ASSOCIATE ALL'OLIVO	60
2412 - COLTURE TEMPORANEE ASSOCIATE AL VIGNETO	99
2413 - COLTURE TEMPORANEE ASSOCIATE AD ALTRE COLTURE PERMANENTI	60
242 - SISTEMI CULTURALI E PARTICELLARI COMPLESSI	60
243 - AREE PREV. OCCUPATE DA COLTURE AGRARIE CON PRESENZA DI SPAZI NATURALI IMPORTANTI	70
244 - AREE AGROFORESTALI	70
3111 - BOSCHI DI LATIFOGIE	50
31121 - PIOPPETI SALICETI EUCALITTETI	50
31122 - SUGHERETE	65
31123 - CASTAGNETI DA FRUTTO	50
31124 - ALTRO	50
3121 - BOSCHI DI CONIFERE	70
3122 - CONIFERE A RAPIDO ACCRESCIMENTO	70
313 - BOSCHI MISTI DI CONIFERE E LATIFOGIE	60
321 - AREE A PASCOLO NATURALE	75
3221 - CESPUGLIETI ED ARBUSTETI	65
3222 - FORMAZIONI DI RIPANON ARBOREE	65
3231 - MACCHIA MEDITERRANEA	65
3232 - GARIGA	65
3241 - AREE A RICOLONIZZAZIONE NATURALE	70
3242 - AREE A RICOLONIZZAZIONE ARTIFICIALE	70
3311 - SPIAGGE DI AMPIEZZA SUPERIORE A 25M	40
3312 - AREE DUNALI NON COPERTE DA VEGETAZIONE DI AMPIEZZA SUPERIORE A 25M	40
3313 - AREE DUNALI COPERTE DA VEGETAZIONE DI AMPIEZZA SUPERIORE A 25M	40
3315 - LETTI DI TORRENTI DI AMPIEZZA SUPERIORE A 25M	99
332 - PARETI ROCCIOSE E FALESIE	75
333 - AREE CON VEGETAZIONE RADA > 5%E< 40%	75
411 - PALUDI INTERNE	99
421 - PALUDI SALMASTRE	99
422 - SALINE	75
423 - ZONE INTERTIDALI	99
5111 - FIUMI, TORRENTI E FOSSI	99
5112 - CANALI E IDROVIE	99
5121 - BACINI NATURALI	99
5122 - BACINI ARTIFICIALI	99
5211 - LAGUNE, LAGHI E STAGNI COSTIERI A PRODUZIONE ITTICA NATURALE	99
5212 - ACQUACOLTURE IN LAGUNE, LAGHI E STAGNI COSTIERI	99
522 - ESTUARI E DELTA	99
5231 - AREE MARINE A PROD. ITTICA NATURALE	99
5232 - ACQUACOLTURE IN MARE LIBERO	99

Tabella 5 - Tabella dei valori CN al variare del tipo di uso del suolo

Tabella 6 - Calcolo del CN(II) per il bacino NC1

I fattori correttivi sono stati definiti per i tre macrobacini (Nura Craba, Saoru e Bannaxi):

			Bennaxi		Saoru		Nura Craba	
GERAR		ΔCN	A_i	ΔCN_i	A_i	ΔCN_i	A_i	ΔCN_i
A220	Depositi olocenici dell'area continentale	5	97280	0.01	0	0.00	0	0.00
A222	Sedimenti alluvionali	-5	30350037	-2.18	10859973	-2.48	6167804	-1.19
A223	Sedimenti lacustri	10	1295807	0.19	0	0.00	0	0.00
A225	Sedimenti litorali	-5	4458.55	0.00	0	0.00	0	0.00
A230	Depositi pleistocenici dell'area continentale	5	29434440	2.11	7101922	1.62	15099687	2.92
B111	Basalti dei plateau	10	8212035	1.18	3640628	1.66	4571407	1.77
B225	Distretto vulcanico di Ottava	5	307385	0.02	307385	0.07	0	0.00
				1.33		0.87		3.50

Tabella 7 - Calcolo fattore correttivo geologico del CN

Noto il valore del Curve Number si può calcolare lo Storage S, ossia il volume di acqua che il terreno è in grado di immagazzinare al proprio interno, e l'Initial Abstraction I_a , ovvero la quota parte di acqua persa per intercezione:

$$S = \frac{25400 - 254 \text{ CN}}{\text{CN}}$$

$$I_a = 0.2 S$$

	CN (II)	CN (II)+ ΔCN	CN (III)	S	I_a
NC1	64.54	68.04	83.04	51.88	10.38
NC2	65.56	69.06	83.70	49.48	9.90
NC3	66.62	70.12	84.37	47.06	9.41
NC4	66.77	70.27	84.46	46.73	9.35
S1	66.35	69.85	84.20	47.67	9.53
S2	69.44	72.94	86.11	40.98	8.20
S3	70.56	74.06	86.78	38.69	7.74
B	71.06	74.56	87.08	37.69	7.54

Tabella 8 - Valori del Curve Number

I valori riportati in tabella 8 sono stati ritenuti troppo bassi per cui, in accordo con i funzionari dell'ARDIS, si è deciso di imporre valori del CN superiori, almeno pari a 92. Questa scelta appare giustificata dal fatto che gli eventi meteorici estremi avvenuti negli ultimi anni sono stati talmente intensi da non permettere al suolo di drenare le acque efficacemente, cosicché i deflussi superficiali son risultati più abbondanti delle attese.

Inoltre, va sottolineato il fatto che la tabella 5 è stata definita in contesti diversi da quello sardo, per cui potrebbero generare valutazioni non corrette.

Di seguito si riportano i valori adottati nel presente studio, precisando che, avendo posto come valore base 92, si è scelto di portare il CN a 93 o a 94 nei bacini caratterizzati da una maggiore superficie impermeabile.

Bacino	NC1	NC2	NC3	NC4		S1	S2	S3		T	3°L	B
CN	92	93	93	93		93	94	94		93	92	93
S	22.1	19.1	19.1	19.1		19.1	16.2	16.2		19.1	22.1	19.1
Ia	4.42	3.8	3.8	3.8		3.8	3.2	3.2		3.8	4.42	3.8

Tabella 9 - Valori del CN, S e Ia utilizzati

5.5.4. Precipitazione netta

Il valore del curve number permette di fare delle valutazioni relativamente alle perdite delle precipitazioni dovute ad infiltrazione e intercezione.

Per calcolare la precipitazione netta che effettivamente contribuisce al deflusso superficiale si utilizza la seguente relazione

$$P_N = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

dove P è la precipitazione cumulata e P_N rappresenta la pioggia netta cumulata.

Altezze di precipitazione nette [mm]				
T _R	50	100	200	500
NC1	27.69	33.50	39.43	47.39
NC2	31.93	38.23	44.62	53.16
NC3	40.23	47.75	55.31	65.36
NC4	44.67	52.81	60.98	71.80
S1	32.45	38.83	45.30	53.93
S2	47.05	55.32	63.60	74.53
S3	50.46	59.19	67.92	79.43
T	51.51	60.60	69.69	81.68
3°L	27.88	34.00	40.26	48.69
B	54.31	63.78	73.24	85.70

Tabella 10 - Altezze di pioggia nette

In realtà, per lo studio degli interventi previsti si è reso necessario determinare anche gli idrogrammi di piena dei bacini NC1 e S1, non essendo sufficiente il valore della portata al colmo. Per questo motivo si è costruita, per ogni tempo di ritorno, una tabella come la seguente con passo temporale Δt pari a 1 minuto

Tempo	P(t)	P _N (t)	h _N (t)	i _N (t)
ore	mm	mm	mm	mm/h

dove P(t) è la precipitazione cumulata all'istante t, P_N(t) rappresenta la pioggia netta cumulata calcolata come

$$P_N(t) = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

$$h_N(t) = P_N(t) - P_N(t - \Delta t)$$

$$i_N(t) = \frac{h_N(t)}{\Delta t}$$

Tempo di ritorno = 50 anni				Tempo di ritorno = 100 anni				Tempo di ritorno = 200 anni				Tempo di ritorno = 500 anni			
Tempo	P(t)	P(t) - I _a	P _N (t)	P(t)	P(t) - I _a	P _N (t)	P(t)	P(t) - I _a	P _N (t)	P(t)	P(t) - I _a	P _N (t)	P(t)	P(t) - I _a	P _N (t)
ore	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0.00	0.00	-4.42	0.00	0.00	-4.42	0.00	0.00	-4.42	0.00	0.00	-4.42	0.00	0.00	-4.42	0.00
0.03	1.30	-3.12	0.00	1.48	-2.94	0.00	1.66	-2.76	0.00	1.90	-2.52	0.00	3.79	-0.62	0.00
0.07	2.59	-1.83	0.00	2.95	-1.46	0.00	3.32	-1.10	0.00	4.97	0.56	0.56	5.69	1.27	1.27
0.10	3.89	-0.53	0.00	4.43	0.01	0.01	4.97	0.56	0.56	6.63	2.21	2.21	7.59	3.17	3.17
0.13	5.18	0.77	0.77	5.91	1.49	1.49	6.63	2.21	2.21	8.29	3.87	3.87	9.49	5.07	5.07
0.17	6.48	2.06	2.06	7.39	2.97	2.97	8.29	3.87	3.87	9.95	5.53	5.53	11.38	6.96	6.96
0.20	7.78	3.36	3.36	8.86	4.45	4.45	9.95	5.53	5.53	11.61	7.19	7.19	13.28	8.86	8.86
0.23	9.07	4.65	4.65	10.34	5.92	5.92	11.61	7.19	7.19	13.26	8.85	8.85	15.18	10.76	10.76
0.27	10.37	5.95	5.95	11.82	7.40	7.40	13.26	8.85	8.85	14.92	10.50	10.50	17.07	12.66	12.66
0.30	11.66	7.25	7.25	13.29	8.88	8.88	14.92	10.50	10.50	16.58	12.16	12.16	18.97	14.55	14.55
0.33	12.96	8.54	8.54	14.77	10.35	10.35	16.58	12.16	12.16	18.24	13.82	13.82	20.87	16.45	16.45
0.37	14.26	9.84	9.84	16.25	11.83	11.83	18.24	13.82	13.82	19.90	15.48	15.48	22.76	18.35	18.35
0.40	15.55	11.13	11.13	17.72	13.31	13.31	21.55	17.14	17.14	23.21	18.80	18.80	24.66	20.24	20.24
0.43	16.85	12.43	12.43	19.20	14.78	14.78	23.21	18.80	18.80	24.87	20.45	20.45	26.56	22.14	22.14
0.47	18.14	13.73	13.73	20.68	16.26	16.26	24.87	20.45	20.45	26.53	22.11	22.11	28.46	24.04	24.04
0.50	19.44	15.02	15.02	22.16	17.74	17.74	26.53	22.11	22.11	28.19	23.77	23.77	30.35	25.94	25.94
0.53	20.74	16.32	16.32	23.63	19.22	19.22	28.19	23.77	23.77	29.84	25.43	25.43	32.25	27.83	27.83
0.57	22.03	17.61	17.61	25.11	20.69	20.69	29.84	25.43	25.43	31.50	27.09	27.09	34.15	29.73	29.73
0.60	23.33	18.91	18.91	26.59	22.17	22.17	31.50	27.09	27.09	33.16	28.74	28.74	36.04	31.63	31.63
0.63	24.62	20.21	20.21	28.06	23.65	23.65	33.16	28.74	28.74	34.82	30.40	30.40	37.94	33.52	33.52
0.67	25.92	21.50	21.50	29.54	25.12	25.12	34.82	30.40	30.40	36.48	32.06	32.06	39.84	35.42	35.42
0.70	27.21	22.80	22.80	31.02	26.60	26.60	36.48	32.06	32.06	38.13	33.72	33.72	41.73	37.32	37.32
0.73	28.51	24.09	24.09	32.50	28.08	28.08	38.13	33.72	33.72	39.79	35.38	35.38	43.63	39.21	39.21
0.77	29.81	25.39	25.39	33.97	29.56	29.56	39.79	35.38	35.38	41.45	37.03	37.03	45.53	41.11	41.11
0.80	31.10	26.69	26.69	35.45	31.03	31.03	41.45	37.03	37.03	43.11	38.69	38.69	47.43	43.01	43.01
0.83	32.40	27.98	27.98	36.93	32.51	32.51	43.11	38.69	38.69	44.77	40.35	40.35	49.32	44.91	44.91
0.87	33.69	29.28	29.28	38.40	33.99	33.99	44.77	40.35	40.35	46.43	42.01	42.01	51.22	46.80	46.80
0.90	34.99	30.57	30.57	39.88	35.46	35.46	46.43	42.01	42.01	48.08	43.67	43.67	53.12	48.70	48.70
0.93	36.29	31.87	31.87	41.36	36.94	36.94	48.08	43.67	43.67	49.74	45.32	45.32	55.01	50.60	50.60
0.97	37.58	33.17	33.17	42.84	38.42	38.42	49.74	45.32	45.32	51.40	46.98	46.98	56.91	52.49	52.49
1.00	38.88	34.46	34.46	44.31	39.89	39.89	51.40	46.98	46.98	53.06	48.64	48.64	58.81	54.39	54.39
1.03	40.17	35.76	35.76	45.79	41.37	41.37	53.06	48.64	48.64	54.72	50.30	50.30	60.70	56.29	56.29
1.07	41.47	37.05	37.05	47.27	42.85	42.85	54.72	50.30	50.30	56.37	51.96	51.96	62.60	58.18	58.18
1.10	42.77	38.35	38.35	48.74	44.33	44.33	56.37	51.96	51.96	58.03	53.61	53.61	64.50	60.08	60.08
1.13	44.06	39.64	39.64	50.22	45.80	45.80	58.03	53.61	53.61	59.69	55.27	55.27	66.40	61.98	61.98
1.17	45.36	40.94	40.94	51.70	47.28	47.28	59.69	55.27	55.27				68.29	63.88	63.88
1.20	46.65	42.24	42.24	53.17	48.76	48.76									

Tabella 11 - Calcolo degli ietogrammi per il bacino NC1

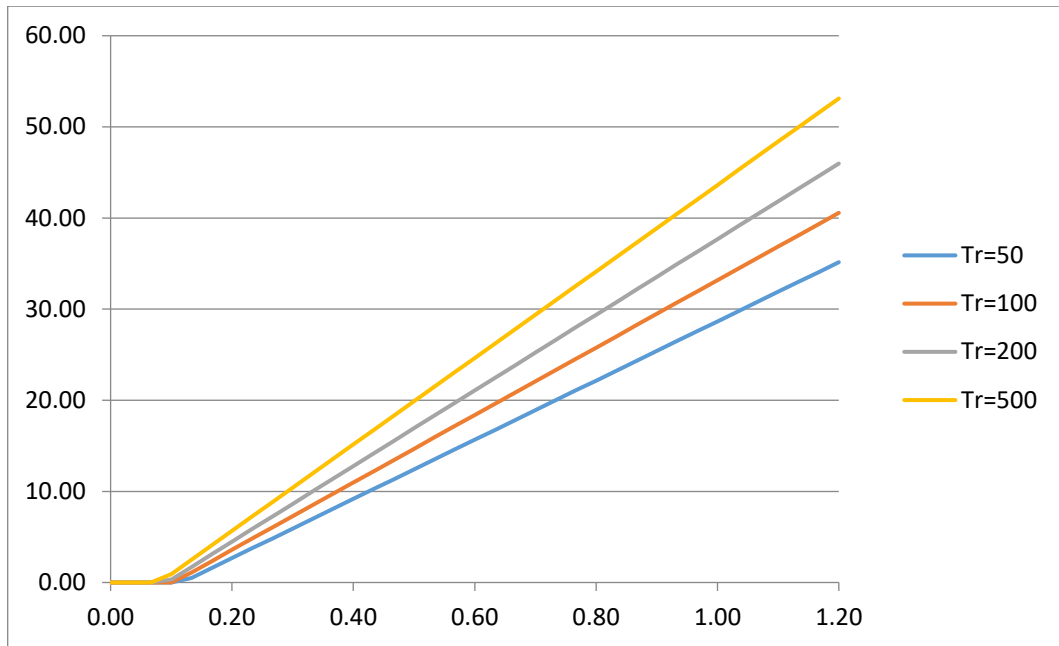


Figura 15 - Pioggia netta cumulata nel tempo per il bacino NC1

Tempo di ritorno = 50 anni				Tempo di ritorno = 100 anni				Tempo di ritorno = 200 anni				Tempo di ritorno = 500 anni			
Tempo	P(t)	P(t) - la	PN(t)	P(t)	P(t) - la	PN(t)	P(t)	P(t) - la	PN(t)	P(t)	P(t) - la	PN(t)	P(t)	P(t) - la	PN(t)
ore	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0.00	0.00	-3.82	0.00	0.00	-3.82	0.00	0.00	-3.82	0.00	0.00	-3.82	0.00	0.00	-3.82	0.00
0.03	1.08	-2.74	0.00	1.23	-2.59	0.00	1.38	-2.44	0.00	1.58	-2.24	0.00	1.58	-2.24	0.00
0.07	2.17	-1.66	0.00	2.47	-1.36	0.00	2.77	-1.06	0.00	3.16	-0.66	0.00	3.16	-0.66	0.00
0.10	3.25	-0.58	0.00	3.70	-0.12	0.00	4.15	0.33	0.33	4.74	0.92	0.92	4.74	0.92	0.92
0.13	4.33	0.51	0.51	4.93	1.11	1.11	5.53	1.71	1.71	6.33	2.50	2.50	6.33	2.50	2.50
0.17	5.41	1.59	1.59	6.17	2.34	2.34	6.92	3.09	3.09	7.91	4.08	4.08	7.91	4.08	4.08
0.20	6.50	2.67	2.67	7.40	3.58	3.58	8.30	4.48	4.48	9.49	5.67	5.67	9.49	5.67	5.67
0.23	7.58	3.75	3.75	8.63	4.81	4.81	9.68	5.86	5.86	11.07	7.25	7.25	11.07	7.25	7.25
0.27	8.66	4.84	4.84	9.86	6.04	6.04	11.07	7.24	7.24	12.65	8.83	8.83	12.65	8.83	8.83
0.30	9.74	5.92	5.92	11.10	7.27	7.27	12.45	8.63	8.63	14.23	10.41	10.41	14.23	10.41	10.41
0.33	10.83	7.00	7.00	12.33	8.51	8.51	13.83	10.01	10.01	15.82	11.99	11.99	15.82	11.99	11.99
0.37	11.91	8.08	8.08	13.56	9.74	9.74	15.22	11.39	11.39	17.40	13.57	13.57	17.40	13.57	13.57
0.40	12.99	9.17	9.17	14.80	10.97	10.97	16.60	12.78	12.78	18.98	15.16	15.16	18.98	15.16	15.16
0.43	14.07	10.25	10.25	16.03	12.21	12.21	17.98	14.16	14.16	20.56	16.74	16.74	20.56	16.74	16.74
0.47	15.16	11.33	11.33	17.26	13.44	13.44	19.37	15.54	15.54	22.14	18.32	18.32	22.14	18.32	18.32
0.50	16.24	12.41	12.41	18.50	14.67	14.67	20.75	16.93	16.93	23.72	19.90	19.90	23.72	19.90	19.90
0.53	17.32	13.50	13.50	19.73	15.91	15.91	22.13	18.31	18.31	25.31	21.48	21.48	25.31	21.48	21.48
0.57	18.40	14.58	14.58	20.96	17.14	17.14	23.52	19.69	19.69	26.89	23.06	23.06	26.89	23.06	23.06
0.60	19.49	15.66	15.66	22.20	18.37	18.37	24.90	21.08	21.08	28.47	24.64	24.64	28.47	24.64	24.64
0.63	20.57	16.74	16.74	23.43	19.61	19.61	26.28	22.46	22.46	30.05	26.23	26.23	30.05	26.23	26.23
0.67	21.65	17.83	17.83	24.66	20.84	20.84	27.67	23.84	23.84	31.63	27.81	27.81	31.63	27.81	27.81
0.70	22.73	18.91	18.91	25.90	22.07	22.07	29.05	25.23	25.23	33.21	29.39	29.39	33.21	29.39	29.39
0.73	23.82	19.99	19.99	27.13	23.30	23.30	30.43	26.61	26.61	34.79	30.97	30.97	34.79	30.97	30.97
0.77	24.90	21.07	21.07	28.36	24.54	24.54	31.82	27.99	27.99	36.38	32.55	32.55	36.38	32.55	32.55
0.80	25.98	22.16	22.16	29.59	25.77	25.77	33.20	29.38	29.38	37.96	34.13	34.13	37.96	34.13	34.13
0.83	27.06	23.24	23.24	30.83	27.00	27.00	34.58	30.76	30.76	39.54	35.72	35.72	39.54	35.72	35.72
0.87	28.15	24.32	24.32	32.06	28.24	28.24	35.97	32.14	32.14	41.12	37.30	37.30	41.12	37.30	37.30
0.90	29.23	25.40	25.40	33.29	29.47	29.47	37.35	33.53	33.53	42.70	38.88	38.88	42.70	38.88	38.88
0.93	30.31	26.49	26.49	34.53	30.70	30.70	38.73	34.91	34.91	44.28	40.46	40.46	44.28	40.46	40.46
0.97	31.39	27.57	27.57	35.76	31.94	31.94	40.12	36.29	36.29	45.87	42.04	42.04	45.87	42.04	42.04
1.00	32.48	28.65	28.65	36.99	33.17	33.17	41.50	37.68	37.68	47.45	43.62	43.62	47.45	43.62	43.62
1.03	33.56	29.73	29.73	38.23	34.40	34.40	42.89	39.06	39.06	49.03	45.21	45.21	49.03	45.21	45.21
1.07	34.64	30.82	30.82	39.46	35.64	35.64	44.27	40.44	40.44	50.61	46.79	46.79	50.61	46.79	46.79
1.10	35.72	31.90	31.90	40.69	36.87	36.87	45.65	41.83	41.83	52.19	48.37	48.37	52.19	48.37	48.37
1.13	36.81	32.98	32.98	41.93	38.10	38.10	47.04	43.21	43.21	53.77	49.95	49.95	53.77	49.95	49.95
1.17	37.89	34.06	34.06	43.16	39.34	39.34	48.42	44.59	44.59	55.36	51.53	51.53	55.36	51.53	51.53
1.20	38.97	35.15	35.15	44.39	40.57	40.57	49.80	45.98	45.98	56.94	53.11	53.11	56.94	53.11	53.11
1.23	40.05	36.23	36.23	45.63	41.80	41.80	51.19	47.36	47.36	58.52	54.69	54.69	58.52	54.69	54.69
1.27	41.14	37.31	37.31	46.86	43.03	43.03	52.57	48.75	48.75	60.10	56.28	56.28	60.10	56.28	56.28
1.30	42.22	38.40	38.40	48.09	44.27	44.27	53.95	50.13	50.13	61.68	57.86	57.86	61.68	57.86	57.86
1.33	43.30	39.48	39.48	49.32	45.50	45.50	55.34	51.51	51.51	63.26	59.44	59.44	63.26	59.44	59.44
1.37	44.38	40.56	40.56	50.56	46.73	46.73	56.72	52.90	52.90	64.84	61.02	61.02	64.84	61.02	61.02
1.40	45.47	41.64	41.64	51.79	47.97	47.97	58.10	54.28	54.28	66.43	62.60	62.60	66.43	62.60	62.60
1.43	46.55	42.73	42.73	53.02	49.20	49.20	59.49	55.66	55.66	68.01	64.18	64.18	68.01	64.18	64.18
1.47	47.63	43.81	43.81	54.26	50.43	50.43	60.87	57.05	57.05	69.59	65.77	65.77	69.59	65.77	65.77
1.50	48.71	44.89	44.89	55.49	51.67	51.67	62.25	58.43	58.43	71.17	67.35	67.35	71.17	67.35	67.35
1.53	49.80	45.97	45.97	56.72	52.90	52.90	63.64	59.81	59.81	72.75	68.93	68.93	72.75	68.93	68.93

Tabella 12 - Calcolo degli ietogrammi per il bacino S1

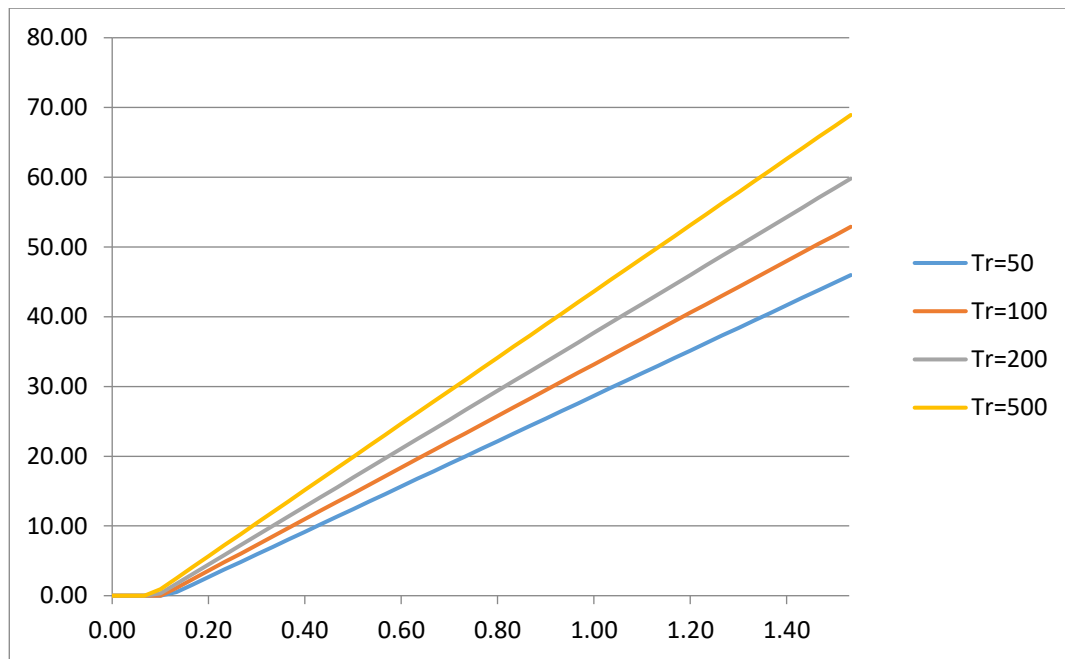


Figura 16 - Pioggia netta cumulata nel tempo per il bacino S1

5.6. Calcolo delle portate

5.6.1. Portate di picco

La portata al colmo può essere calcolata con la formula razionale secondo cui

$$Q_{Tr} = \varphi \frac{ARF \cdot h_{Tr} \cdot S}{t_c}$$

dove l'ARF è stato definito al punto 5.5.2, h_{Tr} è l'altezza di precipitazione netta, S è la superficie del bacino e t_c è il tempo di concentrazione. Tale relazione è valida sotto le seguenti ipotesi semplificative:

- una generica goccia d'acqua che cade in un generico punto del bacino, segue sempre e comunque una traiettoria del tutto autonoma, fino a quando non confluisce nella sezione terminale, contribuendo alla portata di deflusso insieme alle altre generiche gocce d'acqua mediante il principio di sovrapposizione degli effetti;
- ogni particella viaggia con velocità propria del tutto indipendente dal moto delle altre particelle liquide, come se fosse la sola presente nel bacino;
- le precipitazioni di carattere piovoso sono costanti nelle due dimensioni tempo e spazio.

I parametri calcolati nei paragrafi precedenti consentono la valutazione della portata di piena con i tempi di ritorno in linea con le prescrizione del PAI, ovvero per 50, 100, 200 e 500 anni.

Portate al colmo di piena Q [m³/s]				
T _R	50	100	200	500
NC1	35.17	42.56	50.08	60.20
NC2	48.95	58.62	68.41	81.50
NC3	68.06	80.77	93.57	110.56
NC4	73.02	86.33	99.69	117.38
S1	46.95	56.18	65.54	78.03
S2	51.01	59.98	68.95	80.81
S3	54.19	63.57	72.95	85.31
T	122.58	144.21	165.84	194.37
3°L	38.30	46.71	55.31	66.88
B	145.51	170.89	196.24	229.62

Tabella 13 - Valori delle portate di progetto in m³/s per i diversi tempi di ritorno

5.6.2. Idrogrammi di piena

Come anticipato al punto 5.5.4, è necessario determinare anche gli idrogrammi di piena, in particolare per i sottobacini NC1 e S1 in cui potrebbero essere previste due casse di laminazione.

Da quanto esposto, risultano note la funzione di risposta del bacino sotto forma di aree progressive contribuenti ai vari istanti t e lo ietogramma netto di precipitazione. Si possono, quindi, calcolare le portate relative ad eventi con durata di pioggia pari al tempo di corrivazione e con tempo di ritorno prefissato mediante un modello della corrivazione in forma discreta ovvero della convoluzione.

Nel caso in esame la determinazione degli idrogrammi di piena è stata condotta secondo l'approccio modellistico implementato nel software Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) della U.S. Army Corps of Engineers.

I dati di input inseriti sono:

- shapefile dei bacini e delle aste fluviali;
- dimensioni e valori del CN;
- ietogrammi di progetto;
- lag time, posto pari al 60% del tempo di pioggia, rappresenta il tempo di ritardo, ovvero la distanza temporale tra il baricentro dello ietogramma e il picco dell'idrogramma risultante.

Di seguito si riportano i risultati della modellazione idrologica sotto forma grafica:

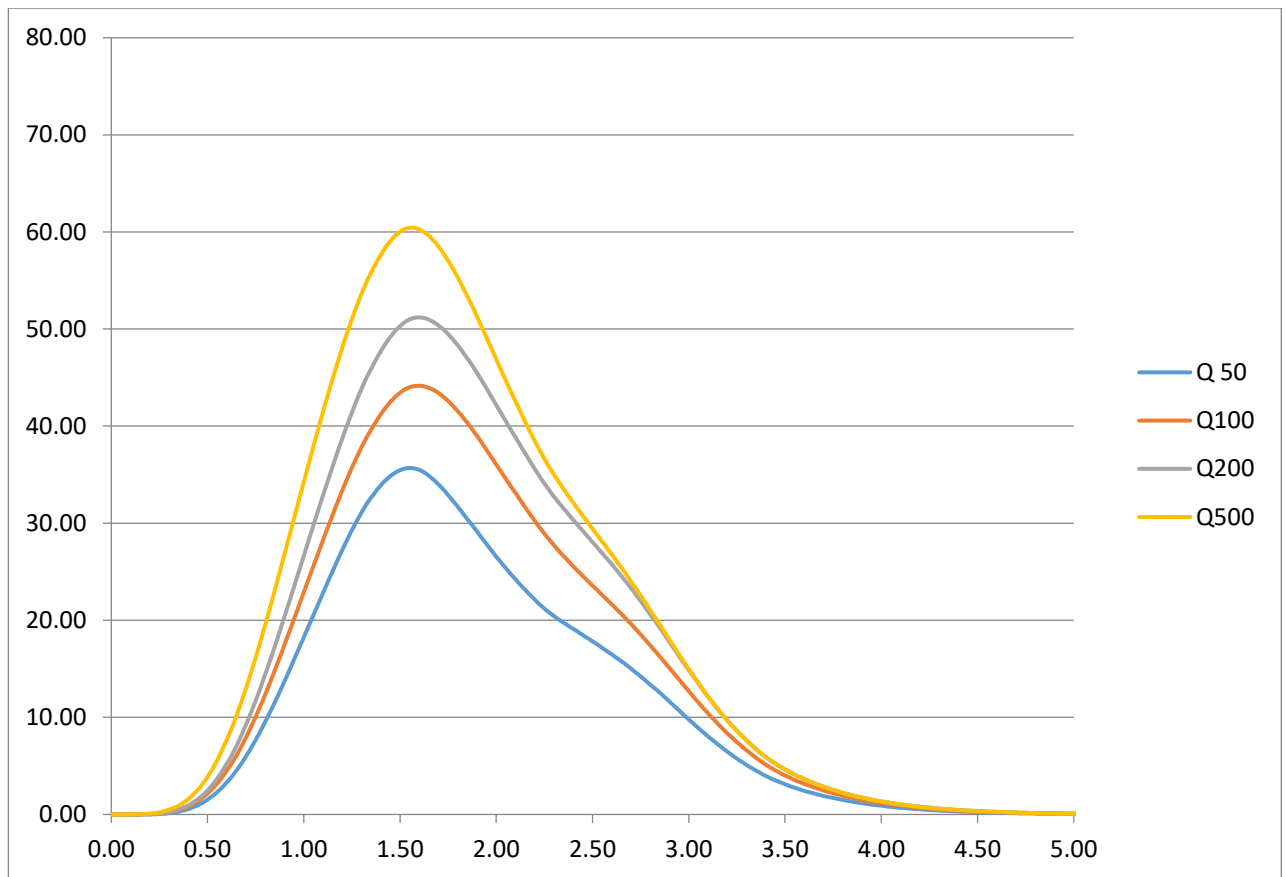


Figura 17 - Idrogrammi Nura Craba 1

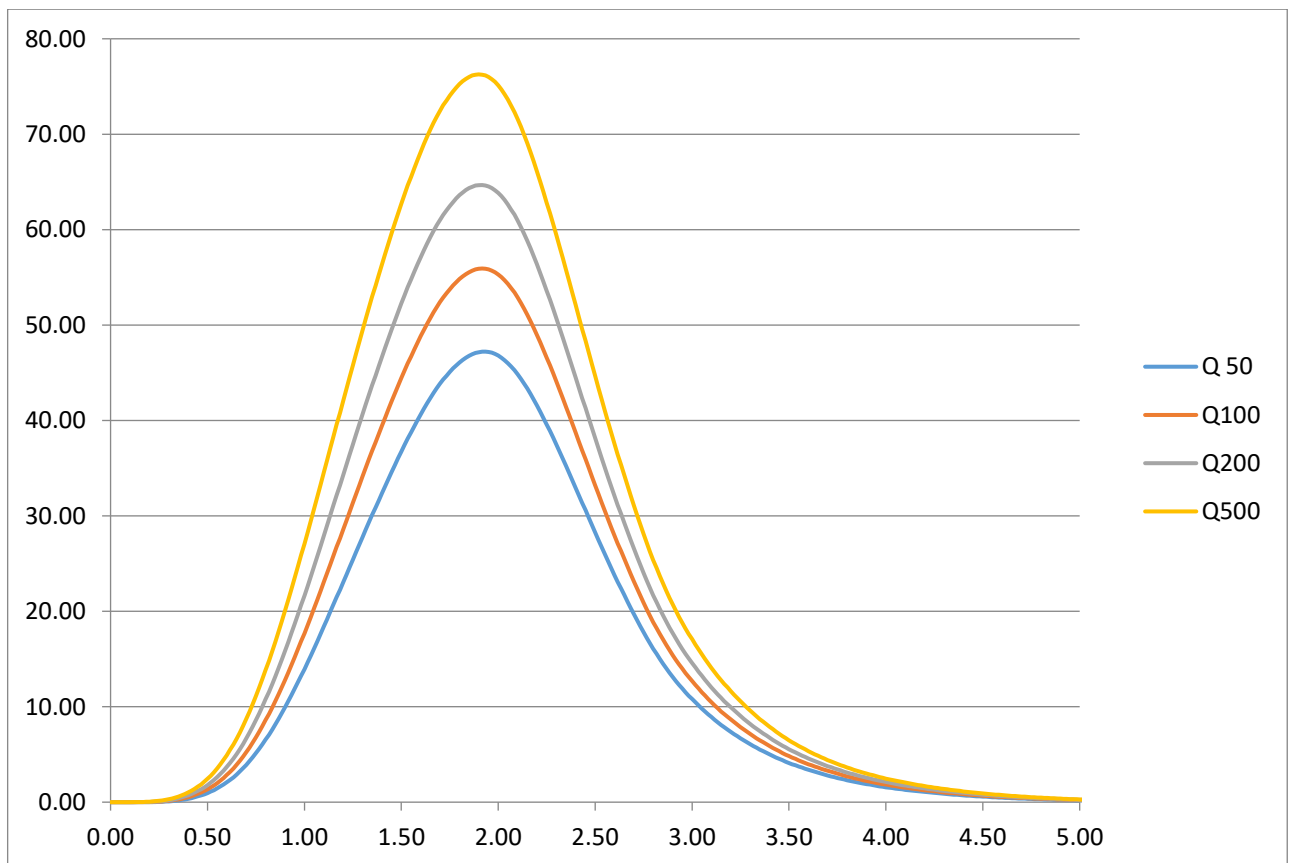


Figura 18 - Idrogrammi Saoru 1

Di seguito si riporta uno specchio con un confronto tra le portate ottenute mediante la formula razionale e il massimo valore degli idrogrammi di cui alle figure 17 e 18.

	TR	50	100	200	500
Nura Craba 1	razionale [m³/s]	35.17	42.56	50.08	60.20
	max HEC-HMS [m³/s]	35.69	44.16	51.21	60.44
Saoru 1	razionale [m³/s]	46.95	56.18	65.54	78.03
	max HEC-HMS [m³/s]	47.21	55.93	64.67	76.27

Tabella 14 - Confronto tra le portate calcolate

Si può notare come i picchi siano notevolmente simili tra loro, dando parziale conferma della bontà della metodologia utilizzata e dei calcoli eseguiti.

5.6.3. Confronto delle portate con altri studi

I corsi d'acqua oggetto di studio interessano, come visto al capitolo 2, i territori dei comuni di Oristano, Cabras, Solarussa, Zerfaliu e Siamaggiore.

Tra questi, solo il Comune di Oristano ha uno studio idraulico del territorio approvato dal Comitato Istituzionale, mentre quello di Solarussa è in regime di salvaguardia avendo un piano adottato dal Consiglio Comunale ma non ancora approvato dall'Autorità di Bacino.

Può essere interessante, a questo punto della trattazione, presentare le portate calcolate nei due studi appena citati e confrontarle con quelle esposte al paragrafo 5.6.1, sottolineando il fatto che i singoli adeguamenti del PUC al PAI (ex art. 8 comma 2) sono relativi al solo territorio comunale di competenza, onde per cui le sezioni di chiusura dei bacini possono differire rispetto a quelle utilizzate dallo scrivente.

		Area	Q50	Q100	Q200	Q500	Note
		km²	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	
NURA CRABA	Solarussa (NC1)	6.94	29.32	33.33	37.32	42.56	Confrontabile con NC1
	Solarussa (NC2)	9.84	51.72	58.84	64.94	75.27	Confrontabile con NC2
	Oristano	20.58	77.71	92.21	106.81	126.20	Confrontabile con NC4
SAORU	Solarussa	13.61	64.35	73.19	81.98	93.54	Confrontabile con S2
	Oristano	17.70	60.59	71.75	82.96	97.81	Confrontabile con S3
TANUI	Oristano	44.03	133.76	158.21	182.64	214.95	Confrontabile con T

Tabella 15 - Specchio riepilogativo dei risultati degli studi idrologici relativi ai piani di adeguamento del PUC al PAI dei comuni di Oristano, Solarussa e Siamaggiore

Confrontando i risultati ottenuti nel presente studio e quelli in tabella 13, si può notare come le differenze siano abbastanza contenute e tali da poter avvalorare quanto calcolato in precedenza.

6. Analisi idraulica

6.1. Il codice di calcolo HEC-RAS

HEC RAS è un codice sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers. Il software è in grado di analizzare e risolvere i calcoli legati al tracciamento del profilo idrico di un corso d'acqua sia in regime di moto permanente che in regime di moto vario mediante l'equazione del flusso monodimensionale. Per l'analisi del moto HEC RAS impone di fissare la portata su ogni ramo della rete e di definire per ogni ramo le condizioni al contorno di monte (indispensabile per il profilo coniugato di corrente veloce) e di valle (indispensabile per il profilo coniugato di corrente lenta). Il programma permette di dedurre il solo profilo coniugato di corrente lenta, il solo regime di corrente veloce ovvero di determinare autonomamente il profilo della corrente in regime misto utilizzando e raccordando entrambi i profili coniugati (metodo utilizzato nella modellazione). Le condizioni al contorno sono sinteticamente riconducibili a due tipi: altezza nota del pelo libero (critica, di moto uniforme, nota o imposta in corrispondenza di particolari condizioni) oppure conoscenza della velocità media in sezione. Il software prevede un tool di risoluzione ed un editor per la geometria delle sezioni molto raffinati. È infatti possibile introdurre con un notevole grado di precisione gli elementi geometrici di dettaglio quali ponti, tombinature, luci a battente, guadi, confluenze, argini, casse di espansione, salti di fondo, briglie e qualunque manufatto in genere. Hec-Ras dispone di una funzione di interpolazione geometrica delle sezioni rilevate che risulta certamente di grande utilità, soprattutto nei tratti in cui la definizione della geometria non sia sufficientemente dettagliata, al fine di evitare che vengano valutate forti perdite di energia per bruschi cambiamenti di sezione che nella realtà potrebbero essere gradualità e non immediati come può accadere tra due sezioni non interpolate.

6.2. Base teorica della verifica idraulica

Il moto permanente o stazionario nei corsi d'acqua è definito quando in ogni punto della massa fluida in movimento le grandezze idrauliche non variano nel tempo.

Il profilo idraulico viene determinato tra una sezione e la successiva applicando l'equazione dell'energia tra le due sezioni.

$$H_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 \times V_2^2}{2 \times g} = H_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 \times V_1^2}{2 \times g} + h_e$$

H tirante idrico nella sezione;

V velocità media nella sezione;

g accelerazione gravitazionale;

α_1 coefficiente di ponderazione delle velocità

h_e perdita di energia tra le due sezioni esprimibile come

$$h_e = L \times J + C \times \left| \frac{\alpha_1 \times V_1^2}{2 \times g} - \frac{\alpha_2 \times V_2^2}{2 \times g} \right|$$

In cui L è la distanza tra le sezioni, J è la cadente idraulica ricavabile dalla formula di Chezy, C è il coefficiente di perdita per espansione o contrazione di sezione.

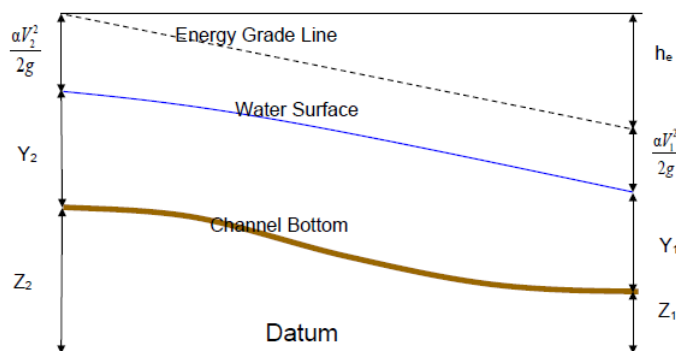


Figura 19 - Schematizzazione grafica della variazione dell'energia di una corrente idraulica

L'equazione dell'energia sopra descritta è applicabile solo per condizioni di moto gradualmente vario e non quando avvenga il passaggio da corrente lenta a veloce o viceversa allorché per esempio si abbia una significativa variazione di pendenza del fondo alveo oppure un cambio di sezione dovuto alla presenza di ponti o manufatti, salti di fondo, confluenze. Senza entrare nel dettaglio teorico ci si limita a dire che in tali situazioni occorre applicare l'equazione di conservazione della quantità di moto.

Il profilo della corrente sarà valutato considerando il moto permanente per tronchi omogenei chiusi alle sezioni di interesse. Rispetto alle reali condizioni del moto, che in generale presenta variazioni di portata nel tempo, si avranno delle differenze, tuttavia, l'involuppo dei massimi livelli idrici riscontrabili in un transitorio di portata variabile non sono, in generale, superiori ai livelli idrici riscontrabili in moto permanente.

6.3. Modello idraulico

6.3.1. Geometria

La prima fase prevede la generazione di un modello georeferenziato della rete idrica da studiare. Questo è possibile mediante l'utilizzo di supporti quali le Carte Tecniche Regionali (CTR) con scala 1:10.000 e, soprattutto, il modello del suolo generato in precedenza e descritto al punto 4.

Quest'ultimo svolge un ruolo fondamentale nella modellazione perché permette uno studio tridimensionale del modello, ovvero di attribuire una quota agli elementi costituenti.

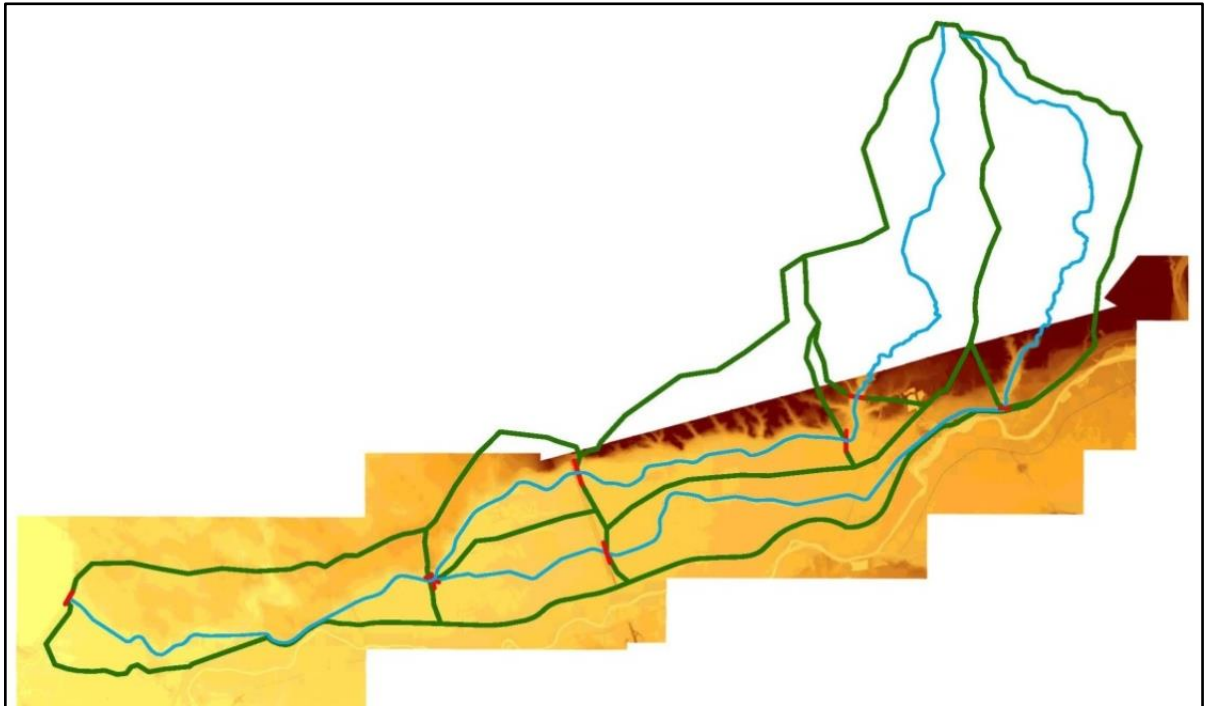


Figura 20 – Area ricoperta dal DTM con passo di 1m

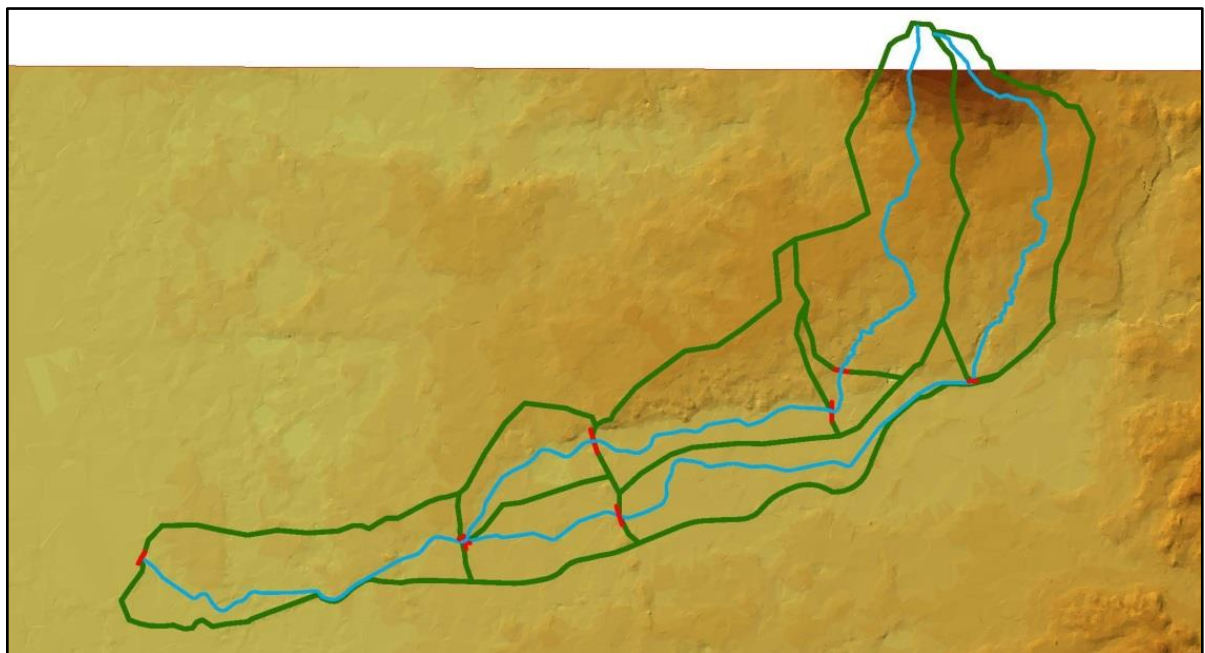


Figura 21 - Area ricoperta dal DTM con passo di 10 m

I software GIS e i loro componenti aggiuntivi permettono il passaggio delle informazioni dal Gis medesimo a HEC-RAS e viceversa, così da poter realizzare il modello geometrico e idraulico.

In primo luogo sono stati individuati i tracciati dei corsi d'acqua sulla base delle CTR e delle evidenze altimetriche mostrate dai DTM. Il passo successivo è il tracciamento delle "Bank Lines", linee che permettono di separare l'alveo dal resto della sezione, e dei "FlowPaths", che individuano il percorso del flusso.

L'ultimo passo fondamentale è la definizione delle sezioni trasversali al corso d'acqua che permettono di definire la geometria dell'alveo e della zona limitrofa. Queste vengono editate dall'utente e, attraverso un comando del

software, vengono collegate al DTM cosicché ogni punto della sezione abbia associata una quota. Particolare attenzione va posta nella metodologia con la quale si tracciano le sezioni, in quanto devono permettere la valutazione di tutte le apprezzabili modifiche del corso d'acqua (sia la forma dell'alveo che la direzione del corso d'acqua) e la modellazione delle opere di attraversamento che si trovano lungo il suo sviluppo longitudinale. Per questo motivo le sezioni non devono essere troppo lontane tra loro, e devono essere tracciate laddove sono presenti punti singolari, quali i ponti.

Il modello generato su GIS è stato quindi esportato su HEC-RAS così da poter effettuare l'analisi idraulica sulla base delle portate calcolate in precedenza.

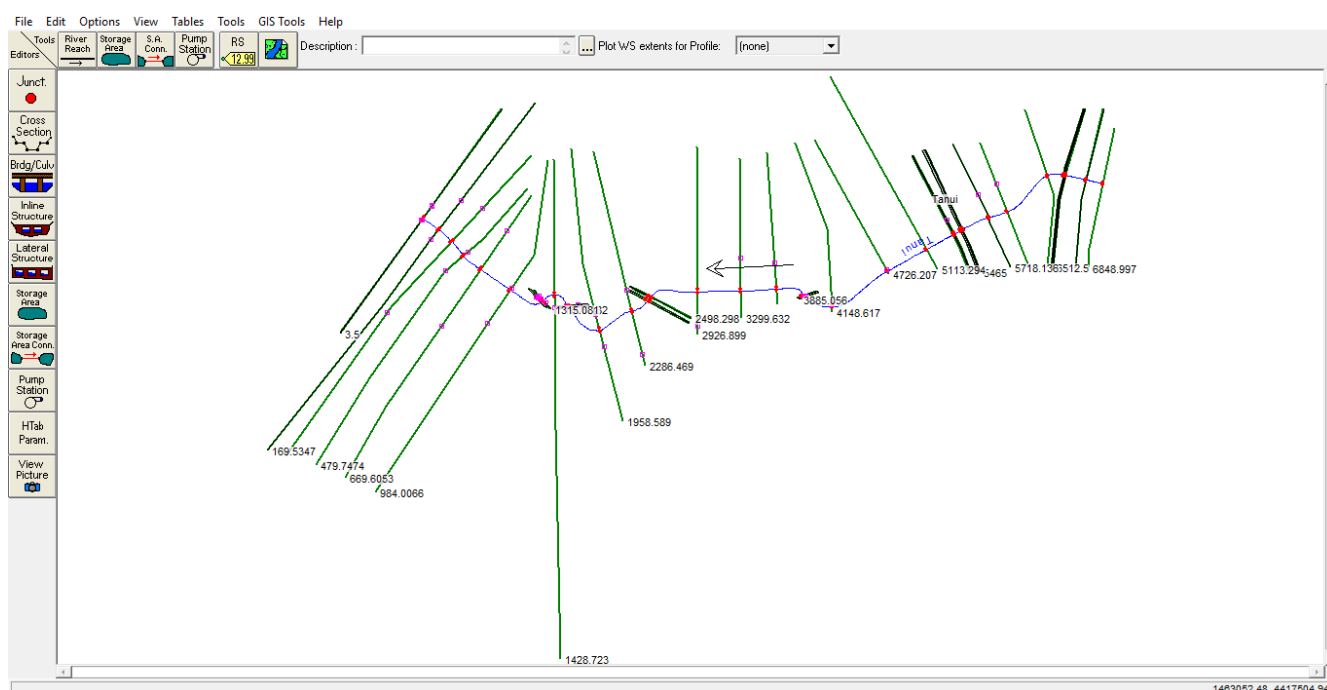


Figura 22 - Esempio di geometria su HEC-RAS

Quanto fatto fino ad ora permette una definizione della geometria ottima ma non definitiva, in quanto risultano necessarie diverse integrazioni relativamente agli argini (levees) e alle opere di attraversamento (bridges e culverts).

Gli argini sono stati individuati sezione per sezione in funzione della loro altimetria, così da evitare che il flusso si spandesse sull'intera estensione della sezione, andando a generare risultati non veritieri in termini di aree di esondazione e di velocità della corrente.

Per quanto riguarda le opere di attraversamento, si è resa necessaria una campagna di rilievi in sito col fine di valutare la posizione precisa degli stessi, reso possibile mediante l'utilizzo di un sistema GPS, e le loro dimensioni.

Le opere che si trovano lungo i corsi d'acqua sono fondamentalmente riconducibili a 4 tipologie: ponti, ponti-canali, ponti-tubo e passerelle. I primi sono i classici attraversamenti stradali o ferroviari per favorire la circolazione su mezzi, i secondi sono elementi realizzati in passato e ormai in disuso per portare le acque irrigue nelle varie zone

dei lotti di bonifica, i terzi sono tubi sopraelevati rispetto al fondo del canale e, infine, le quarte sono attraversamenti utili alla circolazione pedonale.

Tutte queste opere sono state censite e modellate su HEC-RAS. Questo aspetto è fondamentale perché molte di esse risultano essere sottodimensionate per tempi di ritorno cinquantennali onde per cui generano dei profili di rigurgito con innalzamento del tirante idrico a monte, che conseguentemente porta a diffuse esondazioni.

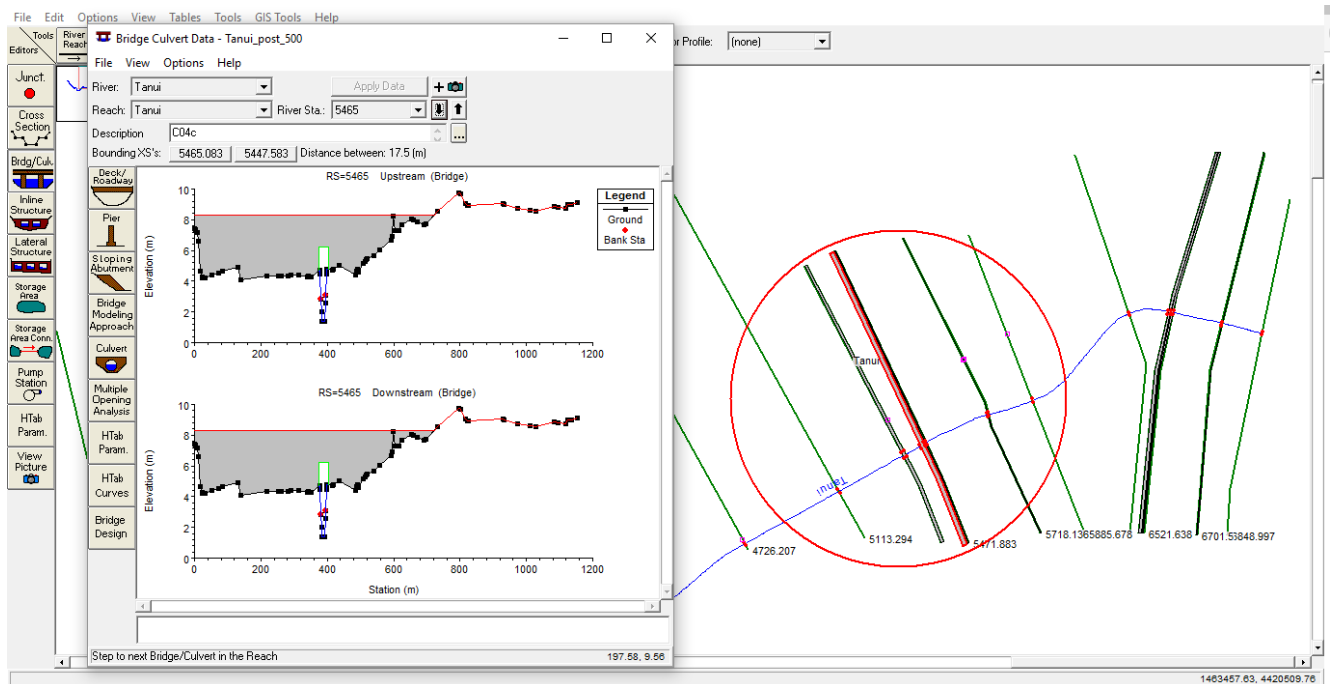


Figura 23 - Particolare del ponte sulla strada tra Oristano e il Rimedio

6.3.2. Parametri di scabrezza

Il profilo della corrente è stato valutato considerando il moto permanente per tronchi omogenei chiusi alle sezioni di interesse. Rispetto alle reali condizioni del moto, che in generale presenta variazioni di portata nel tempo, esistono delle differenze di comportamento. Tuttavia è riscontrato che l'involuppo dei massimi livelli idrici che si verificano in un transitorio non presenta in generale valori significativamente differenti da quelli riscontrabili in moto permanente.

Le perdite di carico distribuite sono valutate mediante la formula di Manning (n), assegnato per ciascuna sezione attraverso il confronto critico del valore calcolato tramite il metodo del U.S. Soil Conservation Service con il valore desunto dalla letteratura di settore, anche in considerazione del diversificato grado di antropizzazione delle aree di studio.

In particolare sono stati assegnati valori diversi del coefficiente di Manning a seconda del tipo di uso del suolo. Poi, mediante elaborazione in ambiente GIS, sono stati assegnati i suddetti valori alle sezioni in funzione della loro posizione planimetrica.

6.3.3. Condizioni al contorno

Prima di tutto son stati aggiunti i “flow change location”, ovvero le sezioni in cui ci si aspetta un cambiamento delle condizioni. Come è stato detto in precedenza, infatti, i corsi d’acqua son stati divisi in tronchi e per ognuno di essi è stata calcolata la portata.

Quindi si son definiti 4 profili e sono state inserite le portate relative ad ogni tronco per il corrispettivo tempo di ritorno (ovvero profilo).

Infine son state definite le “reach boundary conditions” che rappresentano le condizioni al contorno del flusso. I parametri da definire cambiano, ovviamente, a seconda che il moto sia in condizioni sub-critiche o super-critiche. Le correnti oggetto di questo studio risultano essere tutte sub-critiche per cui si dovranno definire le seguenti condizioni al contorno:

- condizione di valle: altezza del tirante idrico atteso;
- condizione di monte: altezza critica, ovvero quel tirante tale per cui si manifesta il passaggio da corrente veloce a corrente lenta e viceversa.

Relativamente al tirante idrico di valle, si precisa che è stata assunta una quota di sbocco del Canale a Marea Bennaxi nello stagno di Cabras pari a 1,80 m.

6.4. Canale tombato di Solarussa

La modellazione idraulica ha tenuto conto della presenza del canale tombato di Solarussa secondo quanto previsto dalla “Direttiva per lo svolgimento delle verifiche di sicurezza dei canali tombati esistenti (articolo 22 delle Norme Tecniche di Attuazione del PAI)” allegato alla D.C.I. n.2 del 17.10.2017.

Al capitolo 6 vengono specificati i criteri per le verifiche di sicurezza da cui si evince:

- il tempo di ritorno della piena da utilizzare per le verifiche idrauliche dei canali tombati esistenti deve rispettare un valore non inferiore ai 200 anni;
- il minimo franco tra la quota idrometrica relativa alla piena di progetto e la quota di intradosso del canale tombato è quello prescritto dall’articolo 21 delle N.A. del P.A.I.;
- nel caso in cui il franco non fosse rispettato, la modellazione dei canali con sezione ampia ispezionabile (come nel caso in esame) può essere eseguita modellando lo scorrimento al di fuori del canale della quota parte della portata non convogliabile con i franchi prescritti per i vari tempi di ritorno.

Tenendo conto che lungo il canale sono presenti degli attraversamenti stradali, il franco di sicurezza va definito nei riguardi di questi ultimi secondo quanto previsto dall’articolo 21 delle NdA del PAI:

“...un franco sul livello della portata di progetto, per velocità medie della corrente inferiori a 8 m/s, pari a quanto indicato dall’analisi modellistica sul franco idraulico approvata dal Comitato istituzionale dell’Autorità di Bacino, corrispondente al massimo tra:

1) $0,7 v^2 / 2g$, dove v indica la velocità media della corrente;

2) un metro;

3) $0,87\sqrt{y} + \alpha y'$, dove y è la profondità media della corrente, y' è l'altezza della corrente areata e α un coefficiente che varia linearmente tra 0 e 1 quando la velocità varia tra 5 m/s e 15 m/s, con le limitazioni che il valore $0,87\sqrt{y}$ sarà assunto al massimo pari a 1,5 ed y' viene assunto pari a 2 metri o alla profondità media y , se questa risulta minore di 2. Il valore y della profondità media della corrente è pari alla media pesata sulla base del contributo di ciascuna area di sezione liquida associata alla corrispondente larghezza della corrente sul pelo libero. Nelle sezioni idrauliche non confinate o nelle quali vi siano zone ove le velocità medie sono modeste, per la valutazione dell'area bagnata attiva si considerano le sole parti aventi velocità della corrente superiori a 0,1 m/s.

Fermo restando il valore minimo del franco di un metro, nel caso di profondità media della corrente inferiore a un metro, potrà essere assunto un franco pari al doppio della profondità media della corrente y .

Nel caso specifico, il canale non è assolutamente in grado di smaltire una portata duecentennale, per cui si è proceduto nella valutazione della portata critica, ossia di quella massima tale per cui viene rispettato il franco.

La modellazione del canale è stata condotta dal punto iniziale del rio Nura Craba, fino alla sezione 7359.666, posta circa 350 m a valle della fine del tratto tombato.

Relativamente alla scabrezza, si è scelto di imporre un coefficiente di Manning pari a 0.025 all'interno del canale e di 0.035 all'esterno.

Per individuare la portata critica si è fatta variare iterativamente la portata all'interno del canale, imponendo come condizione di monte l'altezza critica e come condizione di valle la pendenza del canale medesimo (pari a 0.00065), fino ad individuare quella per la quale tutte le sezioni soddisfacessero il franco minimo richiesto.

Da questa analisi è stato possibile definire una portata critica $Q_{cr}=2.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Station	Portata Q	Quota fondo	Quota pelo libero	Quota sponda	Velocità	Area bagnata	Froude
	m3/s	m slm	m slm	m slm	m/s	m2	
8853.0	2.5	7.5	8.51	10.1	0.7	3.55	0.22
8831.5	2.5	7.41	8.5	10.01	0.65	3.83	0.2
8809.8	2.5	7.4	8.5	10	0.65	3.83	0.2
8777.9	2.5	7.39	8.48	9.99	0.65	3.82	0.2
8743.8	2.5	7.38	8.46	9.98	0.66	3.8	0.2
8712.9	2.5	7.35	8.45	9.95	0.65	3.85	0.2
8691.3	2.5	7.33	8.44	9.93	0.64	3.89	0.19
8676.8	2.5	7.3	8.44	10	0.63	3.98	0.19
8661.8	2.5	7.3	8.43	10	0.63	3.96	0.19
8661.7	Culvert						
8645.0	2.5	7.3	8.41	10	0.65	3.87	0.2
8631.4	2.5	7.25	8.4	9.85	0.62	4.03	0.18
8567.0	2.5	7.25	8.37	9.85	0.64	3.94	0.19
8520.9	2.5	7.21	8.36	9.81	0.62	4.01	0.19
8473.5	2.5	7.09	8.34	9.69	0.57	4.38	0.16
8418.9	2.5	7.06	8.33	9.66	0.56	4.43	0.16
8364.9	2.5	6.9	8.31	9.5	0.51	4.95	0.14
8341.6	2.5	6.83	8.31	9.43	0.48	5.18	0.13
8335.0	2.5	6.83	8.31	9.43	0.48	5.18	0.13
8327.1	2.5	6.83	8.3	9.43	0.48	5.16	0.13
8327.0	Culvert						
8312.6	2.5	6.83	8.29	9.43	0.49	5.11	0.13
8286.8	2.5	6.81	8.29	9.41	0.48	5.17	0.13
8261.3	2.5	6.78	8.28	9.38	0.48	5.26	0.12
8207.1	2.5	6.77	8.27	9.37	0.48	5.26	0.12
8153.0	2.5	6.75	8.26	9.35	0.47	5.29	0.12
8094.3	2.5	6.74	8.25	9.34	0.47	5.29	0.12
8009.2	2.5	6.76	8.23	9.36	0.48	5.16	0.13
7911.5	2.5	6.73	8.21	9.33	0.48	5.2	0.13
7911.4	Culvert						
7895.0	2.5	6.73	8.2	9.33	0.49	5.15	0.13
7807.5	2.5	6.73	8.18	9.33	0.49	5.09	0.13
7688.1	2.5	6.73	8.16	9.33	0.5	5	0.13
7688.1	Culvert						
7678.0	2.5	6.73	8.15	9.33	0.5	4.98	0.13

Tabella 16 - Risultati della modellazione idraulica all'interno del canale tombato

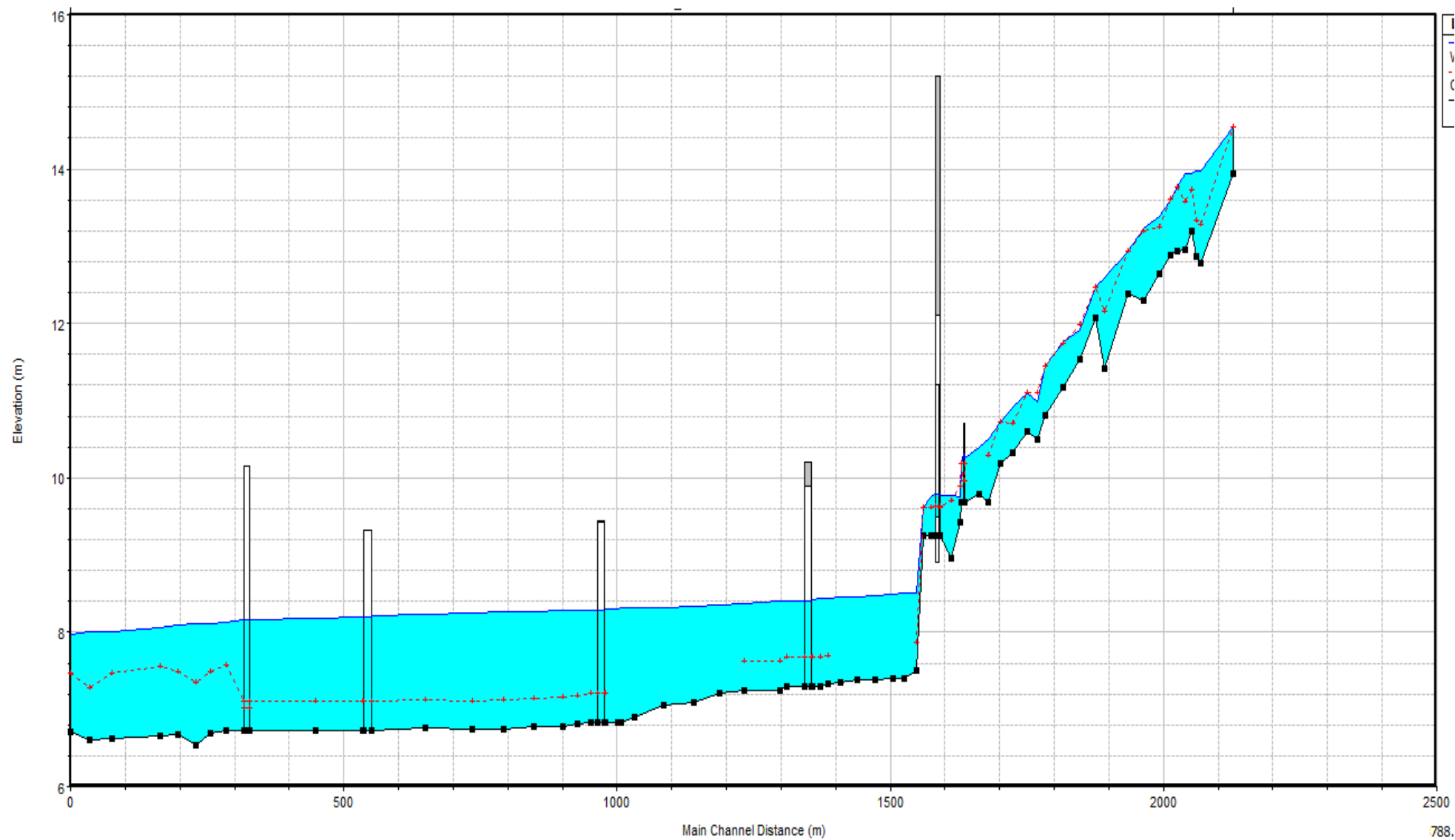
Sulla base di questi valori è stato possibile calcolare il franco minimo mediante i tre criteri descritti in precedenza, denominati nella tabella 17 F1, F2 e F3, e quindi il valore da adottare come il massimo dei tre.

Station	F1	F2	F3	Franco da modellazione HEC-RAS
	m	m	m	m
8853.0	0.02	1	0.87	1.59
8831.5	0.02	1	0.91	1.51
8809.8	0.02	1	0.91	1.5
8777.9	0.02	1	0.91	1.51
8743.8	0.02	1	0.90	1.52
8712.9	0.02	1	0.91	1.5
8691.3	0.01	1	0.92	1.49
8676.8	0.01	1	0.93	1.56
8661.8	0.01	1	0.92	1.57
8661.7				
8645.0	0.02	1	0.92	1.59
8631.4	0.01	1	0.93	1.45
8567.0	0.01	1	0.92	1.48
8520.9	0.01	1	0.93	1.45
8473.5	0.01	1	0.97	1.35
8418.9	0.01	1	0.98	1.33
8364.9	0.01	1	1.03	1.19
8341.6	0.01	1	1.06	1.12
8335.0	0.01	1	1.06	1.12
8327.1	0.01	1	1.05	1.13
8327.0				
8312.6	0.01	1	1.05	1.14
8286.8	0.01	1	1.06	1.12
8261.3	0.01	1	1.07	1.1
8207.1	0.01	1	1.07	1.1
8153.0	0.01	1	1.07	1.09
8094.3	0.01	1	1.07	1.09
8009.2	0.01	1	1.05	1.13
7911.5	0.01	1	1.06	1.12
7911.4				
7895.0	0.01	1	1.05	1.13
7807.5	0.01	1	1.05	1.15
7688.1	0.01	1	1.04	1.17
7688.1				
7678.0	0.01	1	1.04	1.18

Tabella 17 - Calcolo del franco e verifica

Si osserva come con una portata pari a 2,5 m³/s il franco venga sempre rispettato.

Tale portata critica è stata, quindi, detratta da quella relativa al sottobacino NC1 definita al punto 5.6, come previsto dalla “Direttiva per lo svolgimento delle verifiche di sicurezza dei canali tombati esistenti”, e si è condotta una modellazione nel centro abitato in assenza di funzionalità del canale di cui si riporta il profilo in figura 24.



6.5. Risultati dell'analisi idraulica

Una volta terminata la definizione della geometria e del flusso, si può procedere con la fase di elaborazione vera e propria che permette di individuare le insufficienze delle varie sezioni, e quindi le esondazioni per ogni tempo di ritorno.

Questi risultati vengono esportati in ambiente GIS cosicché possano essere definite le aree di pericolosità idraulica H_{i4} , H_{i3} , H_{i2} , H_{i1} relative ai tempi di ritorno di 50 anni, 100 anni, 200 anni e 500 anni.

L'importazione della modellazione svolta su HEC-RAS permette di ottenere i punti "Water Surface Extents", ossia i punti della sezione coincidenti con gli estremi del pelo libero. Ancor più importante risulta la definizione delle aree di esondazione sulla base delle quote del DTM, infatti è possibile generare dei poligoni luogo dei punti la cui quota geodetica sta al di sotto della quota del pelo libero calcolata su HEC-RAS.

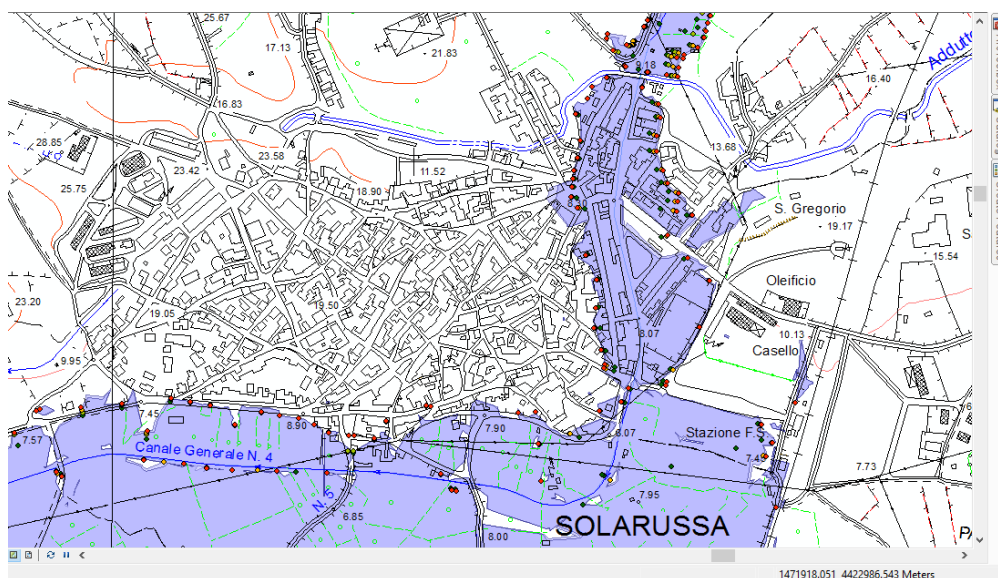


Figura 25 - Definizione automatica delle aree di esondazione

I corsi d'acqua presi maggiormente in esame sono il rio Nura Craba, il rio Saoru e il rio Tanui / Canale a marea Bennaxi.

Come si può osservare negli elaborati allegati alla presente relazione, le sezioni mostrano importanti insufficienze idrauliche e conseguenti diffusi allagamenti. Per questo motivo si rende necessario definire delle soluzioni progettuali atte alla riduzione della pericolosità idraulica.

A testimonianza di quanto appena detto si riportano i valori delle aree di esondazione ottenute con la modellazione idraulica descritta in precedenza e una la sovrapposizione di tali aree su ortofoto

Tempo di ritorno	50	100	200	500
Area (km ²)	20.231	1.950	0.739	0.847

Tabella 18 - Superfici delle fasce di pericolosità idraulica



Figura 26 - Fasce di pericolosità nello scenario attuale

PARTE TERZA – CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

La terza parte della presente relazione ha come obbiettivo l'esposizione delle varie ipotesi progettuali e la definizione, il calcolo e la valutazione degli effetti sul territorio di quella che si ritiene essere la più interessante.

7. Ipotesi progettuali

Gli interventi necessari per un'adeguata mitigazione e riduzione del rischio idraulico sono diversi e diffusi nel territorio, in quanto modifiche al deflusso delle acque in certi tronchi fluviali possono generare effetti nei tratti sia a monte che a valle.

La soluzione che è apparsa più risolutiva ai fini della riduzione della pericolosità idraulica consiste in una serie di opere di seguito brevemente elencate:

- realizzazione di una traversa di laminazione a monte del Canale Adduttore sul rio Nura Craba;
- realizzazione di un canale diversivo che prelevi le acque dalla traversa e le reimmetta sul rio Nura Craba nel tratto a sud del centro abitato di Solarussa;
- eliminazione della copertura del tratto tombato del rio Nura Craba;
- realizzazione di due canali di guardia, uno a nord e uno a est del centro abitato di Solarussa;
- allargamento del tratto terminale tra muri del rio Nura Craba, a sud del centro abitato di Solarussa;
- ampliamento della sezione idraulica del rio Nura Craba;
- realizzazione di una traversa di laminazione a monte della strada provinciale SP9 sul rio Saoru;
- sostituzione dell'attraversamento del Canale Adduttore sul rio Saoru con un sifone;
- ampliamento della sezione idraulica sul rio Saoru;
- risagomatura della sezione sul rio Tanui e su una porzione del Canale a marea di Bennaxi;
- demolizione di tutti i ponti canale;
- demolizione di tutti i ponti tubo e sostituzione con attraversamenti in subalveo;
- demolizione e rifacimento di tutti gli attraversamenti stradali e ferroviari con il rispetto del franco idraulico di sicurezza.

In figura 27 vengono mostrati gli interventi principali.



Figura 27 - Ortofoto con indicazione degli interventi da realizzare

8. Criteri di dimensionamento delle opere

8.1. Traverse di laminazione

Le traverse di laminazione sono state dimensionate per proteggere il centro abitato da eventi con tempi di ritorno inferiori o uguali a 200 anni, e messa in sicurezza per eventi cinquecentennali.

Il dimensionamento è stato eseguito attraverso la combinazione delle seguenti equazioni:

$$Q_{in} - Q_{out} = \frac{dV}{dt}$$

$$Q_{out} = f(h)$$

$$V = f(h)$$

ossia, rispettivamente, equazione di continuità, dipendenza della portata uscente dal carico idrico a monte della traversa e dipendenza del volume invasato dal carico idrico.

Relativamente all'equazione di continuità, si fa presente come le portate in ingresso e in uscita siano funzioni del tempo. Questo implica che il dimensionamento della traversa non può essere eseguito in moto permanente, ma solo in moto vario, ossia utilizzando gli idrogrammi calcolati al punto 5.6.2.

In primo luogo si è definita la posizione planimetrica delle traverse così da poter individuare il bacino sotteso a monte e quindi i volumi invasabili. Sulla base dei punti quotati e delle isoipse presenti sulle carte IGM a scala 1:5.000, sono stati determinati i volumi invasabili al crescere della quota dello sfioratore della traversa:

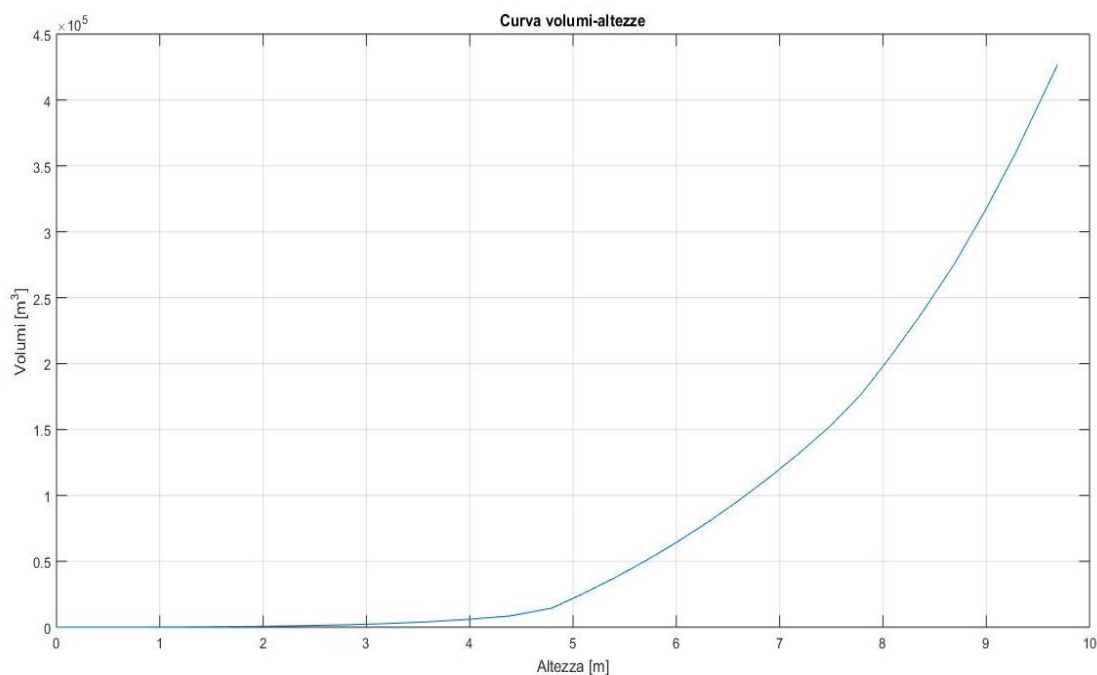


Figura 28 - Curva volumi - altezze della traversa sul rio Nura Craba

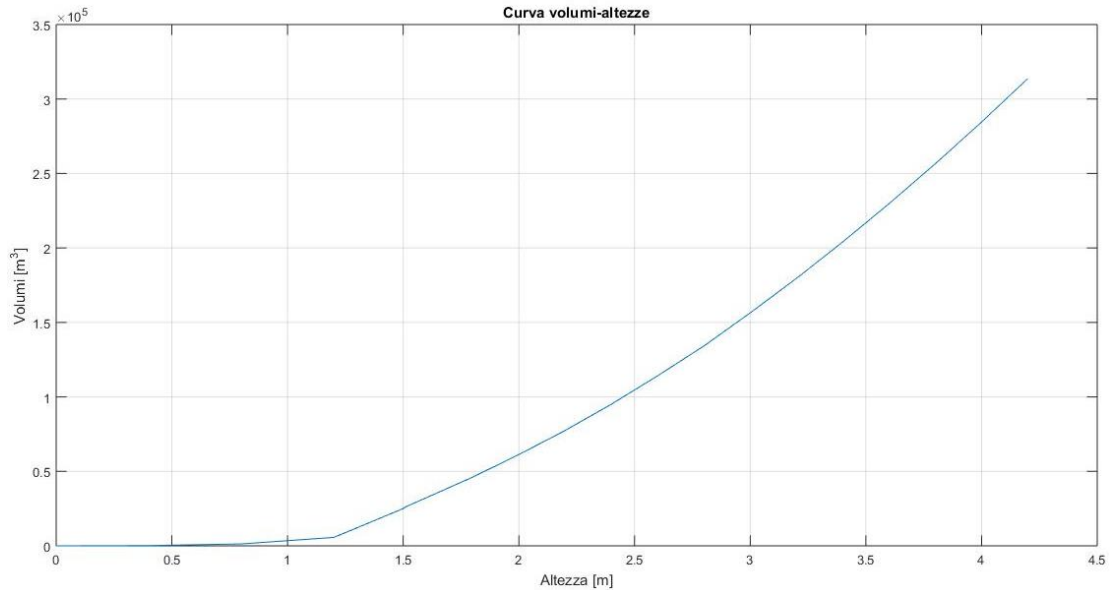


Figura 29 - Curva volumi - altezze della traversa sul rio Saoru

A questo punto si procede dimensionando la bocca tarata, attraverso la relazione di efflusso da luce sotto battente:

$$Q_{out} = c_d A \sqrt{2gh}$$

dove c_d rappresenta il coefficiente di deflusso pari a 0,82 nel caso di luce sotto battente, A è l'area della bocca tarata, g è l'accelerazione gravitazionale e h è il carico idrico.

Per poter eseguire la combinazione delle equazioni sopra citate è necessario scrivere l'equazione di continuità sotto forma di differenze finite:

$$V(t + \Delta t) = \left(\frac{Q_{in}(t) + Q_{in}(t + \Delta t)}{2} - \frac{Q_{out}(t) + Q_{out}(t + \Delta t)}{2} \right) \Delta t + V(t)$$

Combinando le due equazioni è possibile calcolare l'idrogramma in uscita dalla sola bocca tarata al fondo.

La messa in sicurezza delle traverse di laminazione avviene valutando eventi di piena con tempo di ritorno pari a 500 anni. Affinché questo sia garantito è necessario dimensionare uno sfioratore superficiale tale per cui la portata eccedente in ingresso venga smaltita senza che il tirante idrico sormonti il coronamento della cassa.

Tale organo di scarico sarà realizzato secondo il profilo classico, il Craeger-Scimemi.

In questo caso, la portata uscente dalla traversa sarà data da due contributi: quello dovuto alla bocca tarata e quello relativo allo sfioro.

$$Q_{out} = c_d A \sqrt{2gh} + c_{d,sf} (h - h_{sf})^{3/2} L_{sf} \sqrt{2g}$$

avendo indicato con $c_{d,sf}$ il coefficiente di deflusso dello sfioratore pari a 0.52, h_{sf} l'altezza dello sfioratore, h il tirante idrico e L_{sf} la larghezza dello sfioratore.

Infine, l'altezza del corpo della traversa è stata incrementata di un ulteriore metro (1 m) come franco di sicurezza al di sopra della quota massima prevista del battente per un evento con tempo di ritorno di 500 anni, sicché la quota al coronamento sia pari a

$$z_{cor} = z_{base} + h_{sf} + h_{battente} + f$$

Come detto, la traversa è ottimizzata per una portata con tempo di ritorno di 200 anni e messa in sicurezza per eventi cinquecentennali, ma ovviamente produce benefici importantissimi anche per gli altri tempi di ritorno.

Di seguito si riporta uno specchio riepilogativo delle caratteristiche dimensionali delle due traverse di laminazione:

Rio	Altezza scarico di fondo	Larghezza scarico di fondo	Altezza sfioratore	Larghezza sfioratore	Carico su sfioratore	Altezza coronamento	Volume sfioratore	Volume massimo invaso
	m	m	m	m	m	m	m ³	m ³
Nura Craba	1.20	1.00	7.88	12.00	0.33	9.21	185851.4	220208.6
Saoru	1.50	2.00	3.50	16.00	0.34	4.84	216898.4	262141.0

Tabella 19 – Caratteristiche geometriche delle traverse di laminazione

A valle delle traverse di laminazione sono previste delle vasche di dissipazione, di larghezza almeno pari a quella dello sfioratore superficiale, atte a dissipare l'elevata energia cinetica propria delle correnti uscenti dagli sbarramenti. Infatti, in occorrenza di eventi estremi si viene a generare un importante carico a monte della traversa tale da conferire molta energia, e quindi velocità notevoli, che deve essere ridotta per evitare possibili fenomeni erosivi o danneggiamenti delle opere poste a valle.

La vasca, opportunamente rivestita, sarà dotata all'interno di file di elementi in cls (pilastrini, elementi lineari, cubi) cosicché la corrente in uscita dagli organi di scarico impatti su di essi e dissipi la gran parte dell'energia cinetica.

8.2. Eliminazione della copertura del tratto tombato

Nel centro abitato di Solarussa il rio Nura Craba transita all'interno di un canale in calcestruzzo a sezione regolare, pari a 3.0 m di larghezza per 2.5 m di altezza, con una copertura sommitale realizzata con piastre appoggiate di spessore di 20 cm.

In attuazione delle previsioni dell'articolo 22 e dell'articolo 8 comma 9 delle NdA del PAI è stata redatta e approvata la Direttiva per lo svolgimento delle verifiche di sicurezza dei canali tombati esistenti, ovvero di qualunque opera derivante dalla copertura di un corso d'acqua facente parte del reticolo idrografico regionale e che non sia identificabile come rete urbana di smaltimento delle acque bianche e meteoriche.

La direttiva fornisce indirizzi operativi per lo svolgimento delle verifiche di sicurezza e specifica quanto segue:

Si stabilisce che, anche a seguito di tali interventi di ampliamento, non si possa procedere con la deperimetrazione delle aree di pericolosità se non nel caso di riapertura totale del canale.

Appare chiara, quindi, la necessità di inserire all'interno del presente Piano di mitigazione del rischio idraulico anche il cosiddetto stombamento del tratto chiuso del rio Nura Craba, il quale, peraltro, ha già danneggiato la copertura in occasioni di alcuni eventi alluvionali intensi.

Quanto detto è motivato anche da un punto di vista squisitamente idraulico: nel caso in cui il livello idrico all'interno del canale dovesse raggiungere la quota sommitale delle sponde si avrebbe una riduzione della portata effluente nel caso di funzionamento a bocca piena, ovvero nel caso di canale tombato, rispetto a quello a pelo libero.

8.3. Risagomatura delle sezioni dei canali

Mediante l'analisi idraulica descritta abbondantemente in precedenza, si è messa in evidenza una diffusa e generale incapacità, da parte di tutti i corsi d'acqua oggetto di studio, di contenere le piene con tempo di ritorno di 50 anni.

L'articolo 21 comma 2quater prevede che *“a seguito del positivo collaudo delle opere di difesa longitudinale, la riclassificazione delle aree in termini di pericolosità idraulica è consentita solo se l'intervento garantisce, con adeguato franco idraulico, la protezione per eventi caratterizzati da tempi di ritorno minimi di 200 anni. Possono essere considerate ammissibili opere di mitigazione che, pur dimensionate per tempi di ritorno inferiori ai 200 anni, dimostrino un significativo miglioramento della funzionalità idraulica rispetto alla situazione ante intervento, a parità di criteri utilizzati per tale verifica”*

Quanto sopra, quindi, impone che per addivenire agli obiettivi del presente Piano si debbano risagomare le sezioni idrauliche dei corsi d'acqua esistenti cosicché siano in grado di smaltire la piena duecentennale e contemporaneamente rispettare il franco idraulico di sicurezza.

Per la determinazione di tale franco si fa riferimento all'articolo 21 comma 2bis lettera c1:

“garantiscono un franco sul livello della portata di progetto, per velocità medie della corrente inferiori a 8 m/s, corrispondente al massimo tra:

- 1) $v^2/2g$, dove v indica la velocità media della corrente;*
- 2) un metro, per profondità media della corrente superiore a 1 m oppure pari alla profondità media, per profondità media della corrente inferiore o uguale a 1 m;*
- 3) $0,87\sqrt{y+\alpha y'}$, dove y è la profondità media della corrente, y_* è l'altezza della corrente areata ed α un coefficiente che varia linearmente tra 0 e 1 quando la velocità varia tra 5 m/s e 15 m/s, con le limitazioni che il valore $0,87_y$ sarà assunto al massimo pari a 1,5 ed y_* viene assunto pari a 2 metri o alla profondità media y , se questa risulta minore di 2. Il valore y della profondità media della corrente è pari alla media pesata sulla base del contributo di ciascuna area di sezione liquida associata alla*

corrispondente larghezza della corrente sul pelo libero. Nelle sezioni idrauliche non confinate o nelle quali vi siano zone ove le velocità medie sono modeste, per la valutazione dell'area bagnata attiva si considerano le sole parti aventi velocità della corrente superiori a 0,1 m/s.”

La lettera 2ter aggiunge:

“Nel caso di opere di difesa longitudinale rigide e opportunamente rivestite e protette in modo tale da evitare il collasso, anche parziale, dell'opera per effetto di sormonto, per velocità media della corrente inferiore a 4 m/s il valore del criterio 2) lett. c1) del comma 2bis è pari a 0,50 m. Restano fermi tutti gli altri criteri di cui al comma 2bis.”

Sulla base di ciò, è stato eseguito un predimensionamento delle sezioni in funzione delle portate calcolate al punto 6, modificate in funzione dell'effetto delle traverse, mediante la legge di Chezy; queste sezioni sono state inserite su HEC-RAS così da eseguire una modellazione idraulica dell'intero reticolo oggetto di studio; in funzione dei tiranti e delle velocità derivanti dalla modellazione, è stato calcolato il franco in ogni sezione e si è modificata la sezione di conseguenza; si è proceduto iterativamente fino ad arrivare ad una convergenza dei risultati e al rispetto del franco in tutti i corsi d'acqua.

8.4. Nuovi canali

All'interno del Piano sono previsti tre nuovi canali, di cui due di guardia e uno circondariale, tutti rivestiti in calcestruzzo, col compito di ridurre gli apporti idraulici gravanti sul tratto urbano del rio Nura Craba.

Il dimensionamento è stato eseguito esattamente come già descritto al paragrafo precedente, e più precisamente rispettando quanto previsto dall'articolo 21 comma 2ter, in funzione delle portate che essi vanno a captare.

8.5. Sifonamento del Canale Adduttore

L'intersezione del rio Saoru con il canale adduttore in destra del fiume Tirso, nella zona sud del centro abitato di Zurfaliu, risulta essere una delle più difficili da trattare. L'apertura alla base risulta insufficiente anche per la portata cinquantennale laminata, sicché si è scelto di realizzare un attraversamento sub-alveo del canale irriguo mediante sifonamento.

Per calcolare l'area del sifonamento A dobbiamo valutare le perdite di carico, localizzate e distribuite:

$$\Delta H = 0.5 \frac{u^2}{2g} + \frac{u^2}{2g} + jL$$

dove i tre termini indicano rispettivamente la perdita localizzata di imbocco, quella di Borda o di sbocco e la perdita distribuita, avendo indicato con u la velocità della corrente, g l'accelerazione gravitazionale, L la lunghezza della condotta e j la cadente.

I parametri noti sono la portata Q di $13 \text{ m}^3/\text{s}$, la pendenza del canale di $0,00025$, la lunghezza della condotta pari a 35 m e il coefficiente di Gauckler-Strickler k_s del tubo, che nel caso di tubazione in acciaio in servizio con tubercolizzazione diffusa può essere posta pari a $75 \text{ mm}^{1/3} \text{ s}^{-1}$.

Nell'ipotesi verosimile di moto turbolento in tubo scabro, la cadente j si può calcolare così:

$$j = k \frac{Q^m}{D^n}$$

dove $m=2$, $n=5,33$ e $k=10,29/k_s$.

Dalla formula della perdita di carico, noto che $u=Q/A$, si ricava:

$$\Delta H = 1.5 \frac{Q^2}{2g A^2} + k \frac{Q^2}{D^{5.33}} L$$

Attraverso il risolutore automatico di Excel è possibile determinare il diametro del tubo necessario per smaltire la portata fissando la perdita di carico totale tra i due pozzetti di imbocco e di sbocco e intervenendo con impianti di rilancio qualora necessario.

8.6. Opere interferenti con i corsi d'acqua

Lungo lo sviluppo dei rii Nura Craba, Saoru, Tanui e del canale a marea di Bennaxi sono presenti un gran numero di elementi interferenti con il normale deflusso delle acque.

Si possono riconoscere tre categorie principali:

- ponti canale;
- ponti tubo;
- attraversamenti.

I primi sono opere di attraversamento dei canali realizzati, generalmente, dai Consorzi di Bonifica col fine di trasportare le acque nei vari distretti irrigui mediante un funzionamento a gravità.

In seguito, la gran parte della rete formata da questi canali è stata dismessa a favore delle condotte interrato. In presenza dei corsi d'acqua, però, si tendeva a realizzare degli attraversamenti fuori terra, e in taluni casi passanti all'interno della sezione utile idraulica.

Gli attraversamenti, che possono essere stradali, ferroviari o pedonali, sono opere certamente più importanti sia da un punto di vista funzionale che dimensionale rispetto alle precedenti in quanto garantiscono la mobilità dell'utenza.

A prescindere dal tipo di opera interferente, si è riscontrato mediante la modellazione idraulica come quasi nessuna di esse rispettasse il franco di sicurezza previsto dall'articolo 21 delle NdA del PAI. Appare doveroso sottolineare come, in realtà, la gran parte sia caratterizzato da luci e altezze talmente piccole da non permettere nemmeno il passaggio della piena cinquantennale, producendo importanti rigurgiti a monte e conseguenti vaste aree di allagamento.

Per questo motivo si è scelto di demolire tutti gli attraversamenti presenti lungo i corsi d'acqua oggetto di intervento e ricostruirli secondo i crismi previsti dalla normativa, ad eccezione dei ponti canali che risultano essere inutilizzati e inutili.

Per quanto concerne i ponti tubo si è deciso di sostituirli con degli attraversamenti in subalveo, da proteggere a monte e a valle con dei taglioni in cls e superiormente con un rivestimento. Relativamente agli attraversamenti, invece, si determineranno i tiranti (mediante modellazione idraulica) e il franco idraulico che i nuovi ponti dovranno rispettare, ovvero la minima quota dell'intradosso dell'impalcato.

Il franco di sicurezza verrà calcolato per la piena ducentennale come il massimo tra:

- A. $0.7 v^2/2g$, articolo 21 comma 2 delle NdA del PAI;
- B. $0,87\sqrt{y} + \alpha y'$, articolo 21 comma 2 delle NdA del PAI;
- C. 1.50 metri, articolo 5.1.2.3 delle Norme Tecniche sulle Costruzioni del 2018

Si precisa che vengono indicati solo questi criteri in quanto, per via delle pendenze molto basse dei corsi d'acqua, le velocità sono contenute e sicuramente inferiori agli 8 m/s (valore oltre il quale cambiano i criteri). Qualora l'intradosso delle strutture non sia costituito da un'unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per un'ampiezza centrale di 2/3 della luce, e comunque non inferiore a 40m.

9. Analisi idrologica nello scenario di progetto

Le opere sommariamente descritte in precedenza genereranno una variazione sulle portate calcolate al punto 5:

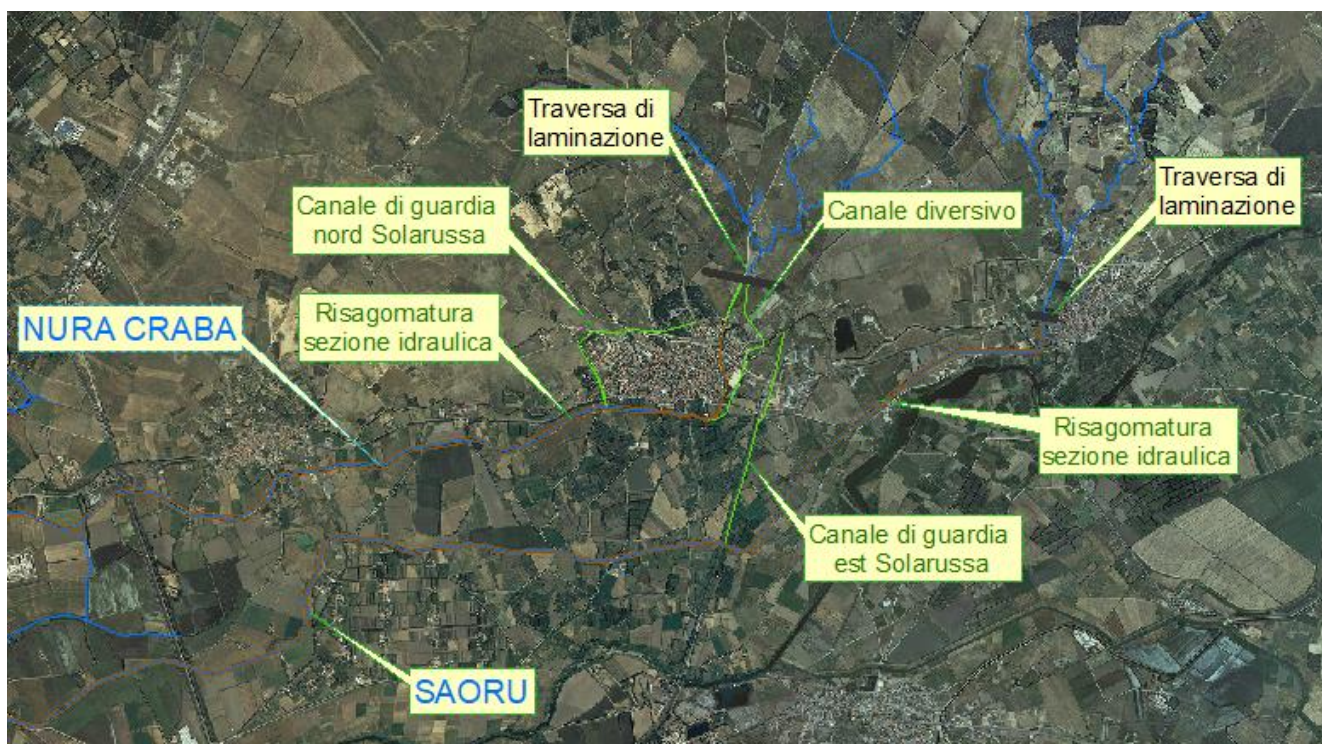


Figura 30 - In verde i nuovi canali, in nero le traverse di laminazione

9.1. Effetto delle traverse di laminazione

Le traverse di laminazione hanno il compito di invasare i volumi in ingresso per rilasciare a valle un idrogramma di piena decapitato.

La traversa sul rio Nura Craba intercetta la portata del bacino NC1, mentre quella sul rio Saoru i deflussi del bacino S1, producendo una notevole riduzione del picco di piena. Sulla base del processo di calcolo visto al punto 8.1, si ottengono gli idrogrammi nelle figure 31 e 32.

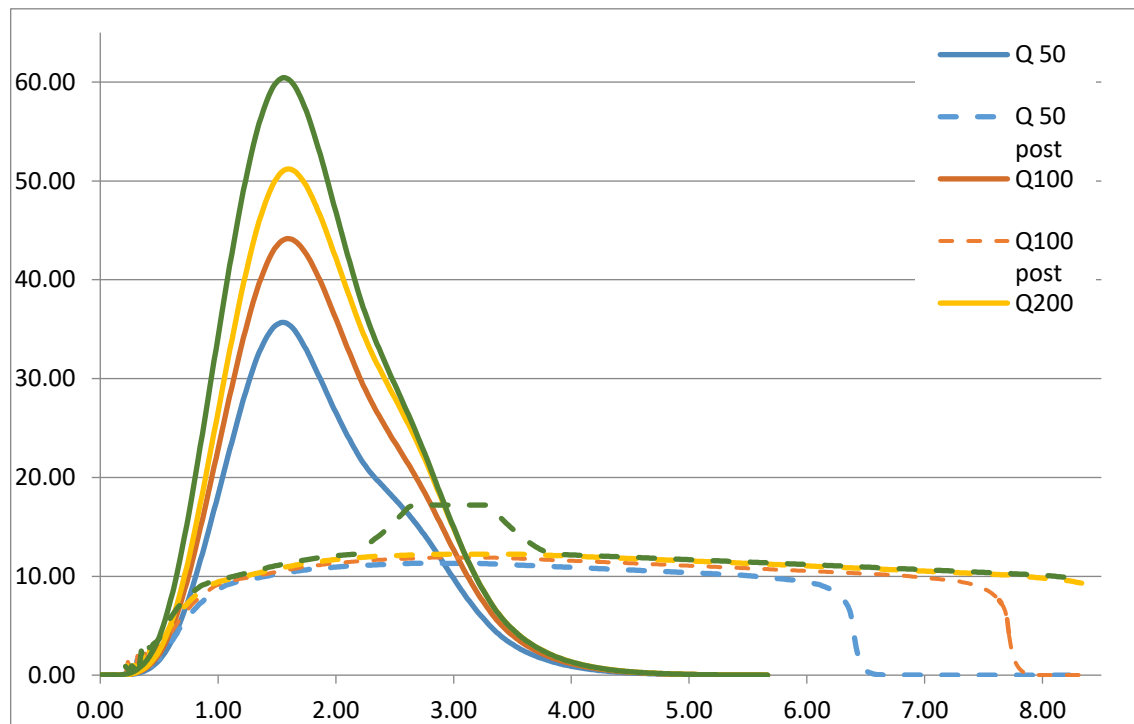


Figura 31 - Confronto tra le portate in ingresso (linea continua) e quelle in uscita (linea tratteggiata) dalla traversa sul rio Nura Craba

Tempo di ritorno		anni	50	100	200	500
Nura Craba	Portata in ingresso	m ³ /s	35.17	42.56	50.08	60.20
	Portata in uscita	m ³ /s	11.31	11.89	12.24	17.20

Tabella 20 - Variazione del picco di piena

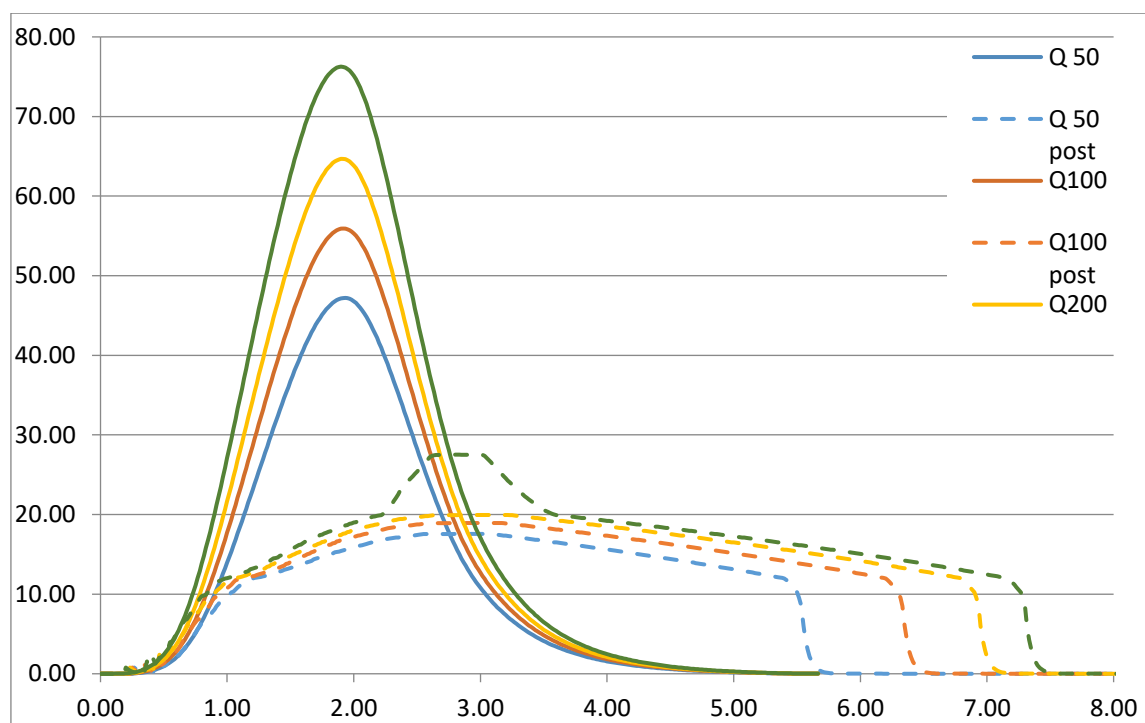


Figura 32 - Confronto tra le portate in ingresso (linea continua) e quelle in uscita (linea tratteggiata) dalla traversa sul rio Saoru

Tempo di ritorno		anni	50	100	200	500
Saoru	Portata in ingresso	m ³ /s	46.95	56.18	65.54	78.03
	Portata in uscita	m ³ /s	17.57	18.94	19.94	27.51

Tabella 21 - Variazione del picco di piena

A valle delle traverse sono previste delle vasche di dissipazione.

La vasca sul rio Nura Craba risulta essere quella più particolare perché dovrà essere realizzata in modo che da essa dipartano sia l'asta principale, che poi transita all'interno del canale tra muri, sia un canale diversivo con il compito di prelevare la gran parte della portata effluente dalla traversa e allontanarla dalla zona più depressa del centro abitato.

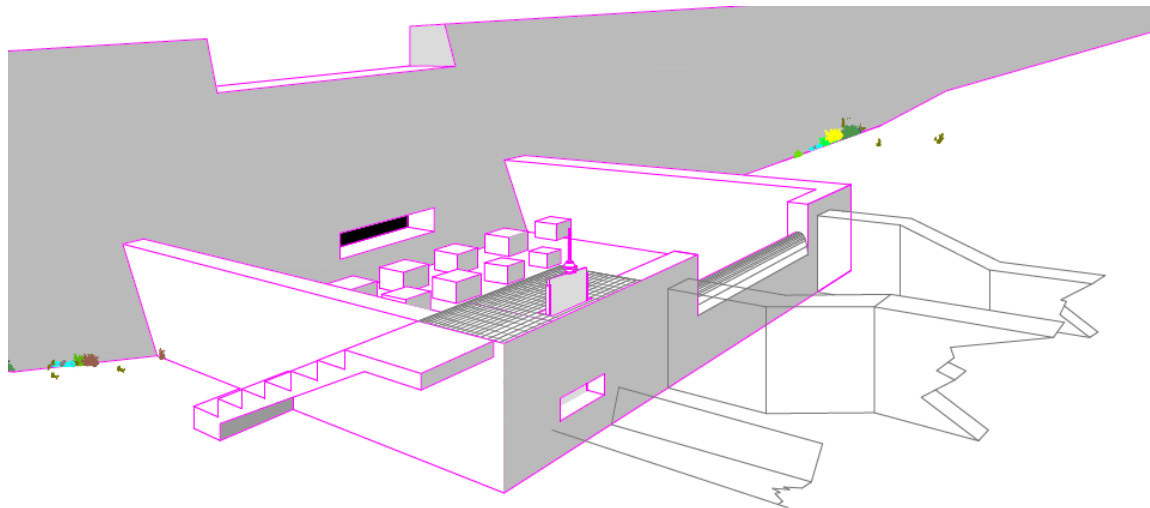


Figura 33 - Vasca di dissipazione a valle della traversa sul rio Nura Craba

La vasca di dissipazione e l'imbocco del canale circondariale sono stati dimensionati in modo tale che si faccia carico di 11 m³/s (a cui andrà aggiunto il contributo relativo alla quota parte del bacino a monte che trova, proprio nel canale, impedimento per arrivare sul rio Nura Craba).

Un'altra importante caratteristica della vasca è che lo stramazzo sul canale circondariale entra in funzione solo quando il livello idrico sale oltre la soglia della luce da cui diparte il rio Nura Craba. In questo modo si è in grado di garantire sempre un minimo deflusso all'interno dell'asta originaria.

9.2. Effetto dei nuovi canali

Il centro abitato di Solarussa ha manifestato negli ultimi anni una notevole debolezza della propria rete idrica, tanto che alcune aree vengono spesso allagate in occasioni di piogge più intense rispetto alle ordinarie precipitazioni. Per proteggere le opere, le case e soprattutto salvaguardare le persone sono stati studiati due canali di gronda da porre nell'area a nord del centro abitato (in seguito Canale di guardia nord) e ad est, oltre la linea ferroviaria (in seguito Canale di guardia est).

Due aspetti molto importanti relativi alla definizione del nuovo set di portate sono:

- il canale di guardia nord capta le acque provenienti dall'area a nord del bacino NC2 e le scarica appena a valle del centro abitato, nel tronco NC3;
- il canale di guardia est capta tutte le acque di una buona parte del bacino NC2 situato ad est della linea ferroviaria e le convoglia all'interno del rio Saoru.
- il canale circondariale deve farsi carico anche dei deflussi derivanti dalla porzione del bacino compreso tra di esso e il canale di guardia est.

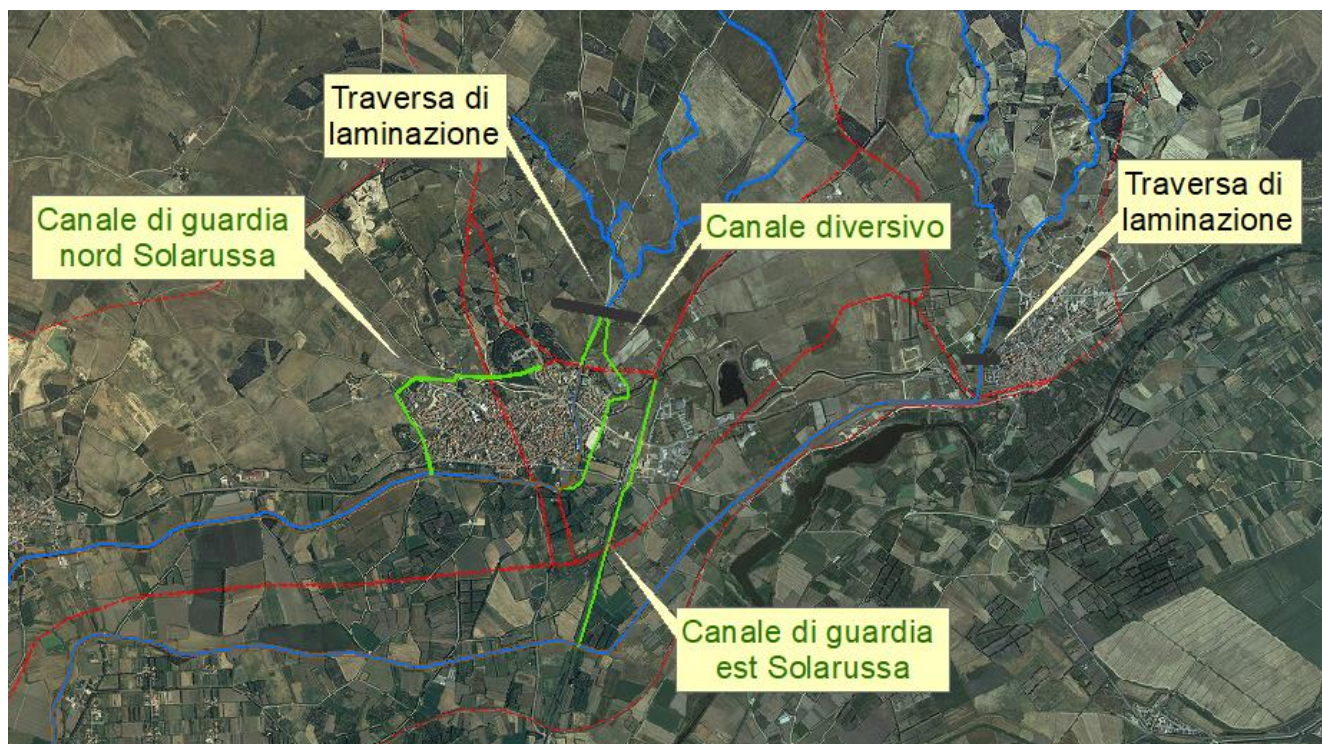


Figura 34 - In verde i nuovi canali e in rosso i bacini imbriferi

Sulla base di quanto detto sopra, sono stati calcolati i bacini contribuenti dei tre canali così da definirne le portate mediante il metodo dei contributi unitari. Quest'ultimo, sebbene non sia il più affidabile, permette comunque di avere una buona stima delle portate, anche in considerazione delle dimensioni ridotte del bacino NC2 all'interno del quale i canali vanno ad interferire.

	Area	Q 50	Q 100	Q 200	Q 500
	km ²	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
NC2-NC1_ante*	2.655	13.78	16.06	18.33	21.30
Circondariale	0.304	1.58	1.84	2.10	2.44
Guardia est	1.677	8.70	10.14	11.58	13.45
Guardia nord	0.209	1.08	1.26	1.44	1.68
NC2 residuo**	0.465	2.41	2.81	3.21	3.73

Tabella 22 - Calcolo delle portate frazionate all'interno del bacino NC2

* NC2-NC1_ante si riferisce al bacino compreso tra le sezioni di chiusura del NC1 e del NC2, così come definiti al punto 5.2

** NC2 residuo è la quota porta del bacino NC2 afferente al canale tra muri che transita all'interno del centro abitato di Solarussa

9.3. Set di portate

In funzione delle variazioni sui deflussi connesse agli interventi, di cui ai paragrafi 9.1 e 9.2, è doveroso definire un nuovo set di portate da utilizzare nella modellazione idraulica dello scenario di progetto.

È altresì utile ricordare che il canale di guardia est sversa le proprie acque di competenza sul rio Saoru, nel tratto S2, che il canale circondariale si immette sul rio Nura Craba in prossimità della curva in direzione ovest del canale, appena a monte della sezione di chiusura del NC2, e, infine, che il canale di guardia nord sposta il contributo del suo bacino imbrifero sul tronco NC3.

Tutto ciò detto, è possibile definire il set di portate riportato in tabella 23.

	Q 50	Q 100	Q 200	Q 500
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
NC1	11.31	11.89	12.24	17.20
Circondariale	12.58	12.84	13.10	13.44
NC2	2.72	3.70	4.44	9.93
Guardia nord	1.08	1.26	1.44	1.68
NC3 + Guardia nord	35.49	39.96	44.14	54.11
NC4	40.45	45.52	50.27	60.93
S1	17.57	18.94	19.94	27.51
S2	21.64	22.73	23.36	30.29
Guardia est	8.70	10.14	11.58	13.45
S2 + Guardia est	30.34	32.88	34.94	43.75
S3	33.52	36.47	38.93	48.25
T	73.97	81.99	89.20	109.18
3°L	38.30	46.71	55.31	66.88
B	112.28	128.70	144.51	176.06

Tabella 23 - Set di portate nella configurazione post operam

10. Analisi idraulica

10.1. Geometria del modello

La modellazione idraulica è stata condotta prendendo come base quanto già fatto nell'analisi dello stato di fatto, modificando la geometria, le condizioni al contorno e le portate.

Il primo passo è stato quello di eliminare tutti gli attraversamenti presenti lungo le aste fluviali in quanto, dovendo ampliare le sezioni dei canali, sarebbero risultati tutti quanti sottodimensionati e tali da generare risalti idraulici tanto consistenti da rendere inefficaci gli importanti interventi proposti.

Come detto, infatti, i ponti-tubo verranno sostituiti con degli attraversamenti in subalveo, mentre i ponti stradali, pedonali e ferroviari dovranno essere dimensionati in funzione del tirante idraulico e del franco di sicurezza calcolati al rispetto al livello idrico della portata duecentennale.

Il secondo passo è consistito nel predimensionare tutti i canali, definendo una sezione mediante la semplice legge di Chezy e, in taluni casi, anche una nuova livelletta del talweg.

Quindi, si è implementato il modello idraulico con le sezioni calcolate, modificando iterativamente la sezione fino ad arrivare ad una soluzione di convergenza che permettesse il regolare deflusso delle acque e il rispetto del franco idraulico minimo.

Queste operazioni son partite dal tronco vallivo, in quanto, trattandosi di una corrente lenta, gli effetti del deflusso si propagano verso monte. In questo modo, inoltre, è stato possibile definire la quota della sezione iniziale del rio Tanui, coincidente con la confluenza dei rii Nura Craba e Saoru, così da avere a disposizione la condizione al contorno di valle per le modellazioni dei suddetti rii.

Questo processo di calcolo ha portato alla definizione di una geometria dei rii tale da garantire il franco idraulico in ogni sezione, ad eccezione della zona terminale del canale a mare Bennaxi, a valle della confluenza del canale di bonifica del terzo lotto, in cui è risultato difficile ovviare al problema del rispetto del franco e della quota di sbocco di 1,80 m prevista dalle linee guida del PSFF.

I rii sono caratterizzati da una sezione del tipo trapezia, con sponde inclinate con rapporto di 2 a 3, in terra prive di rivestimento (eccezion fatta per i tratti in cui verranno predisposti gli attraversamenti in subalveo) e hanno una savanella centrale rivestita in cls per il deflusso delle portate ordinarie.

Le uniche anomalie sono presenti all'interno del centro abitato di Solarussa in cui verrà mantenuto l'esistente sezione rettangolare in calcestruzzo armato, priva di copertura sommitale, e un tratto tra muri del rio Tanui a valle del ponte che collega Oristano con Donigala Fenugheddu in quanto la vicinanza dell'argine del Tirso sulla sinistra e della strada provinciale SP1 sulla destra ne impediscono l'allargamento della sezione.

Per quanto riguarda, invece, i canali circondariale, di guardia nord e di guardia est si è scelto di prevederli rivestiti in cls con un'inclinazione delle sponde di 45°.

Rio / Canale	Base minore [m]	Inclinazione sponde	Altezza [m]
Bennaxi	80.0	2:3	variabile
Tanui	65.0	2:3	2.80
Nura Craba	30.0	2:3	variabile
Tratto NC2 del Nura Craba a valle della confluenza con il Canale circondariale	16.0	verticale	2.50
Circondariale	4.0 3.0	verticale 1:1	2.20 2.20
Guardia nord	0.5	1:1	1.50
Saoru	24.0	2:3	variabile
Guardia est	3.0	1:1	2.50

Tabella 24 - Dimensioni geometriche dei rii e dei canali

10.2. Condizioni al contorno e parametri di scabrezza

La modellazione idraulica è stata condotta inserendo due condizioni al contorno per ogni tronco di asta fluviale esaminato e, più precisamente, si è posta come condizione di monte l'altezza critica, calcolata automaticamente dal software HEC-RAS, e come condizione di valle l'altezza nota.

Questo valore risulta fisso e pari a 1.80 m slm solo per il canale a marea Bennaxi che sfocia nello stagno di Cabras. Per gli altri tronchi, sia i rii che i canali artificiali, si è imposta una quota variabile col tempo di ritorno in funzione dei risultati della modellazione idraulica svolta sull'asta in cui si immettono.

Relativamente ai parametri di scabrezza si è scelto un valore del coefficiente di Manning pari:

- 0.025 per i tratti in alveo non rivestiti;
- 0.020 per i tratti in alveo rivestiti;
- 0.040 per le porzioni esterne alle sponde dei corsi d'acqua.

10.3. Franco idraulico

I criteri per il calcolo del franco sono stati ampiamente discussi al paragrafo 8.3, per cui di seguito ci si limiterà a riproporre i risultati del calcolo in funzione dei dati estrapolati da HEC-RAS per tutti i corpi idrici investigati relativi al solo tempo di ritorno di 200 anni.

Nelle tabelle che seguono si indicheranno in rosso quelle sezioni in cui il franco non viene rispettato e per le quali non si potrà attuare la deperimetrazione delle aree di pericolosità.

Sezione	Quota fondo	Quota pelo libero	Quota sponda	Franco	Velocità media	Altezza media		F1	F2	F3	F
-	m slm	m slm	m slm	m	m/s	m		m	m	m	m
6849.0	2.20	3.75	5.00	1.25	0.85	1.50		0.02	1.00	1.07	1.07
6701.7	2.15	3.71	4.95	1.24	0.85	1.51		0.02	1.00	1.07	1.07
6521.6	2.03	3.67	4.90	1.23	0.81	1.58		0.02	1.00	1.09	1.09
6358.3	1.90	3.62	4.85	1.23	0.77	1.66		0.02	1.00	1.12	1.12
5885.7	1.65	3.55	4.73	1.18	0.70	1.83		0.01	1.00	1.18	1.18
5387.8	1.50	3.48	4.68	1.20	0.66	1.91		0.01	1.00	1.20	1.20
5113.3	1.40	3.45	4.67	1.22	0.64	1.98		0.01	1.00	1.22	1.22
4726.2	1.30	3.07	4.70	1.63	2.40	1.77		0.15	1.00	1.16	1.16
4148.6	1.21	2.70	4.70	2.00	1.54	1.42		0.06	1.00	1.04	1.04
3885.1	1.11	2.63	3.91	1.28	0.87	1.47		0.02	1.00	1.05	1.05
3609.1	0.95	2.56	3.75	1.19	0.82	1.55		0.02	1.00	1.08	1.08
3299.6	0.90	2.41	3.10	0.69	1.17	1.47		0.03	1.00	1.05	1.05
2926.9	0.14	2.28	2.56	0.28	0.96	1.78		0.02	1.00	1.16	1.16
2459.9	-0.51	2.20	2.37	0.17	0.81	2.09		0.02	1.00	1.26	1.26
2286.5	-0.55	2.17	2.30	0.13	0.80	2.12		0.02	1.00	1.27	1.27
1958.6	-0.60	2.13	2.20	0.07	0.79	2.14		0.02	1.00	1.27	1.27
1606.2	-0.81	2.06	2.00	-0.06	0.84	1.54		0.02	1.00	1.08	1.08
1428.7	-0.78	2.07	2.00	-0.07	0.52	0.45		0.01	1.00	0.58	1.00
1275.1	-0.82	1.97	2.00	0.03	0.98	2.10		0.02	1.00	1.26	1.26
984.0	-0.92	1.82	1.72	-0.10	1.51	0.46		0.06	1.00	0.59	1.00
669.6	-1.03	1.82	1.65	-0.17	0.56	0.81		0.01	1.00	0.78	1.00
323.5	-1.16	1.81	1.66	-0.15	0.38	0.84		0.00	1.00	0.80	1.00
0.0	-1.21	1.80	1.51	-0.29	0.24	1.00		0.00	1.00	0.87	1.00

Tabella 25 - Calcolo del franco lungo il rio Tanui (grigio) e il canale a marea Bennaxi
sez. 0.0 – stagno di Cabras
sez. 3299.6 – confluenza del canale del terzo lotto e inizio del Bennaxi
sez. 6849.0 – confluenza dei rii Nura Craba e Saoru nel rio Tanui

Sezione	Quota fondo	Quota pelo libero	Quota sponda	Franco	Velocità media	Altezza media		F1	F2	F3	F
-	m slm	m slm	m slm	m	m/s	m		m	m	m	m
11148.3	10.11	11.46	12.21	0.75	0.78	1.23		0.02	1.00	0.96	1.00
10873.8	9.97	11.38	12.21	0.83	0.75	1.29		0.01	1.00	0.99	1.00
10595.8	9.87	11.21	12.21	1.00	1.18	1.23		0.04	1.00	0.96	1.00
10338.9	9.73	11.01	12.21	1.20	1.24	1.18		0.04	1.00	0.95	1.00
9989.2	9.5	10.66	12	1.34	1.38	1.08		0.05	1.00	0.90	1.00
9626.9	9.08	10.29	11.29	1.00	1.33	1.11		0.05	1.00	0.92	1.00
9195.4	8.65	9.86	10.86	1.00	1.33	1.11		0.05	1.00	0.92	1.00
8815.9	8.29	9.43	10.49	1.06	1.41	1.06		0.05	1.00	0.90	1.00
8604.6	8	9.21	10.21	1.00	1.32	1.12		0.04	1.00	0.92	1.00
8260.9	7.65	8.9	10.05	1.15	1.28	1.15		0.04	1.00	0.93	1.00
8100.3	7.5	8.76	9.9	1.14	1.27	1.16		0.04	1.00	0.94	1.00
7892.9	7.3	8.59	9.8	1.21	1.24	1.18		0.04	1.00	0.95	1.00
7518.0	7	8.29	9.5	1.21	1.24	1.18		0.04	1.00	0.95	1.00
7201.3	6.8	7.92	9.3	1.38	1.43	1.04		0.05	1.00	0.89	1.00
6313.2	5.8	7.18	8.3	1.12	1.15	1.26		0.03	1.00	0.98	1.00
5649.4	5.4	6.73	7.9	1.17	1.2	1.22		0.04	1.00	0.96	1.00
4760.1	4.75	6.16	7.25	1.09	1.12	1.29		0.03	1.00	0.99	1.00
3687.9	4.1	5.62	6.7	1.08	1.03	1.38		0.03	1.00	1.02	1.02
3305.7	3.9	5.4	6.6	1.20	1.17	1.36		0.03	1.00	1.01	1.01
2920.0	3.7	5.16	6.4	1.24	1.21	1.33		0.04	1.00	1.00	1.00
2330.6	3.28	4.8	5.98	1.18	1.15	1.38		0.03	1.00	1.02	1.02
1629.7	2.9	4.4	5.6	1.20	1.17	1.36		0.03	1.00	1.01	1.01
1434.9	2.75	4.29	5.45	1.16	1.13	1.4		0.03	1.00	1.03	1.03
1121.2	2.5	4.17	5.34	1.17	0.95	1.52		0.02	1.00	1.07	1.07
512.0	2.3	3.96	5.12	1.16	0.96	1.51		0.02	1.00	1.07	1.07
0.0	2.2	3.75	5	1.25	1.03	1.41		0.03	1.00	1.03	1.03

Tabella 26 - Calcolo del franco lungo il rio Saoru (in rosso S2, in verde S2+guardia est, in blu S3)

sez. 0.0 – confluenza del rio Saoru nel rio Tanui

sez. 7892.9 – confluenza del canale di guardia est nel rio Saoru

sez. 11148.3 – valle della vasca di dissipazione della traversa sul rio Saoru

Sezione	Quota fondo	Quota pelo libero	Quota sponda	Franco	Velocità media	Altezza media		F1	F2	F3	F
-	m slm	m slm	m slm	m	m/s	m		m	m	m	m
7047.8	6.10	7.42	8.60	1.18	1.05	1.25		0.03	1.00	0.97	1.00
6813.7	5.98	7.29	8.46	1.17	1.05	1.24		0.03	1.00	0.97	1.00
6525.0	5.82	7.14	8.30	1.16	1.04	1.24		0.03	1.00	0.97	1.00
6196.3	5.65	6.97	8.13	1.16	1.05	1.24		0.03	1.00	0.97	1.00
6054.4	5.57	6.89	8.05	1.16	1.04	1.25		0.03	1.00	0.97	1.00
5809.1	5.44	6.77	7.92	1.15	1.04	1.25		0.03	1.00	0.97	1.00
5527.3	5.29	6.62	7.77	1.15	1.04	1.25		0.03	1.00	0.97	1.00
5399.8	5.23	6.55	7.71	1.16	1.04	1.25		0.03	1.00	0.97	1.00
5188.4	5.11	6.45	7.59	1.14	1.03	1.26		0.03	1.00	0.98	1.00
4930.1	4.98	6.32	7.46	1.14	1.03	1.26		0.03	1.00	0.98	1.00
4577.3	4.79	6.14	7.27	1.13	1.02	1.27		0.03	1.00	0.98	1.00
4359.9	4.67	6.04	7.15	1.11	1.01	1.28		0.03	1.00	0.98	1.00
4165.0	4.57	5.95	7.03	1.08	1.00	1.29		0.03	1.00	0.99	1.00
3890.2	4.42	5.83	6.90	1.07	0.98	1.32		0.02	1.00	1.00	1.00
3757.9	4.35	5.77	6.83	1.06	0.96	1.33		0.02	1.00	1.00	1.00
3362.6	4.14	5.63	6.66	1.03	0.92	1.39		0.02	1.00	1.03	1.03
3153.4	4.03	5.46	6.63	1.17	1.10	1.34		0.03	1.00	1.01	1.01
3040.4	3.97	5.40	6.57	1.17	1.10	1.34		0.03	1.00	1.01	1.01
2748.2	3.82	5.24	6.42	1.18	1.10	1.33		0.03	1.00	1.00	1.00
2628.4	3.75	5.18	6.35	1.17	1.10	1.34		0.03	1.00	1.01	1.01
2338.4	3.60	5.02	6.20	1.18	1.10	1.34		0.03	1.00	1.01	1.01
2061.5	3.45	4.88	6.05	1.17	1.10	1.34		0.03	1.00	1.01	1.01
1809.0	3.32	4.74	5.92	1.18	1.10	1.34		0.03	1.00	1.01	1.01
1727.7	3.28	4.70	5.88	1.18	1.10	1.33		0.03	1.00	1.00	1.00
1388.3	3.10	4.52	5.70	1.18	1.10	1.33		0.03	1.00	1.00	1.00
1055.0	2.93	4.34	5.53	1.19	1.11	1.32		0.03	1.00	1.00	1.00
862.2	2.82	4.23	5.42	1.19	1.11	1.32		0.03	1.00	1.00	1.00
622.5	2.69	4.10	5.35	1.25	1.11	1.33		0.03	1.00	1.00	1.00
391.5	2.57	3.97	5.17	1.20	1.12	1.32		0.03	1.00	1.00	1.00
231.8	2.48	3.88	5.08	1.20	1.12	1.32		0.03	1.00	1.00	1.00
0.0	2.36	3.75	4.96	1.21	1.13	1.31		0.03	1.00	1.00	1.00

Tabella 27 - Calcolo del franco lungo il rio Nura Craba (in rosso NC3, in verde NC4)
sez. 0.0 – confluenza del rio Nura Craba sul rio Tanui
sez. 7047.8 – sezione nel tratto NC3

Sezione	Quota fondo	Quota pelo libero	Quota sponda	Franco	Velocità media	Altezza media		F1	F2	F3	F
-	m slm	m slm	m slm	m	m/s	m		m	m	m	m
2571.6	13.00	13.65	15.00	1.35	2.28	0.65		0.13	1.00	0.70	1.00
2479.3	12.31	13.15	14.31	1.16	1.76	0.84		0.08	1.00	0.80	1.00
2278.7	11.43	12.28	13.43	1.15	1.75	0.85		0.08	1.00	0.80	1.00
2142.5	10.60	11.21	12.60	1.39	2.44	0.61		0.15	1.00	0.68	1.00
2048.1	9.60	10.10	12.10	2.00	2.37	0.42		0.14	1.00	0.56	1.00
1935.1	8.59	9.49	11.09	1.60	1.65	0.90		0.07	1.00	0.83	1.00
1832.3	7.55	8.88	10.05	1.17	1.11	1.33		0.03	1.00	1.00	1.00
1746.2	7.41	8.80	9.91	1.11	1.06	1.39		0.03	1.00	1.03	1.03
1688.2	7.38	8.73	9.88	1.15	1.10	1.35		0.03	1.00	1.01	1.01
1633.3	7.30	8.67	9.80	1.13	1.08	1.37		0.03	1.00	1.02	1.02
1569.7	7.25	8.58	9.75	1.17	1.12	1.33		0.03	1.00	1.00	1.00
1489.6	7.12	8.48	9.62	1.14	1.09	1.36		0.03	1.00	1.01	1.01
1363.2	7.07	8.30	9.57	1.27	1.20	1.23		0.04	1.00	0.96	1.00
1253.0	6.88	8.14	9.38	1.24	1.18	1.26		0.04	1.00	0.98	1.00
1116.7	6.86	8.11	9.36	1.25	0.59	1.25		0.01	1.00	0.97	1.00
1001.7	6.83	8.03	9.33	1.30	0.91	1.20		0.02	1.00	0.95	1.00
818.9	6.75	7.93	9.25	1.32	0.93	1.18		0.02	1.00	0.95	1.00
653.3	6.65	7.85	9.15	1.30	0.91	1.20		0.02	1.00	0.95	1.00
442.4	6.48	7.70	8.83	1.13	1.14	1.15		0.03	1.00	0.93	1.00
151.5	6.25	7.51	8.60	1.09	1.10	1.19		0.03	1.00	0.95	1.00
0.0	6.13	7.42	8.48	1.06	1.07	1.22		0.03	1.00	0.96	1.00

Tabella 28 – Calcolo del franco lungo il rio Nura Craba (in blu NC2, in giallo NC2+circondariale, in rosso NC3)
 sez. 0.0 – coincidente con la sezione 7047.8 di tabella 34
 sez. 151.5 – confluenza del canale di guardia nord
 sez. 1001.7 – confluenza del canale circondariale
 sez. 1832.3 – inizio del tratto tra muri del rio Nura Craba / Canale Adduttore
 sez. 2571.6 - valle della vasca di dissipazione della traversa sul rio Nura Craba

Canale circondariale											
Sezione	Quota fondo	Quota pelo libero	Quota sponda	Franco	Velocità media	Altezza media		F1	F2	F3	F
-	m slm	m slm	m slm	m	m/s	m		m	m	m	m
1268.92	13.00	14.20	15.20	1.00	2.75	1.19		0.19	0.50	0.95	0.95
1168.9	12.52	13.61	14.72	1.11	3.01	1.09		0.23	0.50	0.91	0.91
1160	12.47	13.61	14.67	1.06	2.79	0.89		0.20	0.50	0.82	0.82
680	10.15	11.24	12.35	1.11	2.93	0.86		0.22	0.50	0.81	0.81
670	10.00	10.89	12.20	1.31	3.67	0.89		0.34	0.50	0.82	0.82
0	6.85	8.05	9.05	1.00	2.74	1.2		0.19	0.50	0.95	0.95
Canale di guardia nord											
Sezione	Quota fondo	Quota pelo libero	Quota sponda	Franco	Velocità media	Altezza media		F1	F2	F3	F
-	m slm	m slm	m slm	m	m/s	m		m	m	m	m
1507.71	19.50	20.13	21.00	0.87	2.01	0.41		0.10	0.50	0.56	0.56
1208.79	16.40	17.26	17.90	0.64	1.22	0.53		0.04	0.50	0.63	0.63
362.36	13.50	14.13	15.00	0.87	2.01	0.41		0.10	0.50	0.56	0.56
0	7.00	7.38	8.50	1.12	4.29	0.27		0.47	0.50	0.45	0.50
Canale di guardia est											
Sezione	Quota fondo	Quota pelo libero	Quota sponda	Franco	Velocità media	Altezza media		F1	F2	F3	F
-	m slm	m slm	m slm	m	m/s	m		m	m	m	m
1704.04	14.50	15.52	17.00	1.48	2.84	0.81		0.21	0.50	0.78	0.78
1304.75	10.80	11.53	13.20	1.67	4.25	0.6		0.46	0.50	0.67	0.67
806.11	8.30	9.89	10.84	0.95	1.59	1.18		0.06	0.50	0.95	0.95
0	7.30	8.59	9.80	1.21	2.09	0.99		0.11	0.50	0.87	0.87

Tabella 29 - Calcolo del franco lungo i canali da realizzare ex-novo

10.4. Risultati della modellazione idraulica

Da quanto visto al paragrafo precedente, il franco idraulico risulta essere sempre rispettato ad eccezione del tratto immediatamente a valle della vasca di dissipazione della traversa sul rio Saoru e soprattutto lungo il canale a mare Bennaxi, a valle della confluenza del canale di bonifica del terzo lotto.

Per meglio valutare gli effetti degli interventi si allegano alla relazione presente una serie di allegati contenenti:

- profili idraulici;
- sezioni;
- tabelle analitiche.

A titolo puramente visivo si riporta la cattura dell'ortofoto dell'area oggetto di indagine con le nuove aree di pericolosità indotte dai rii Nura Craba, Saoru e Tanui, e dai canali di Bennaxi (per il quale è stata considerata la medesima perimetrazione individuata nello scenario attuale), circondariale e di guardia nord ed est.

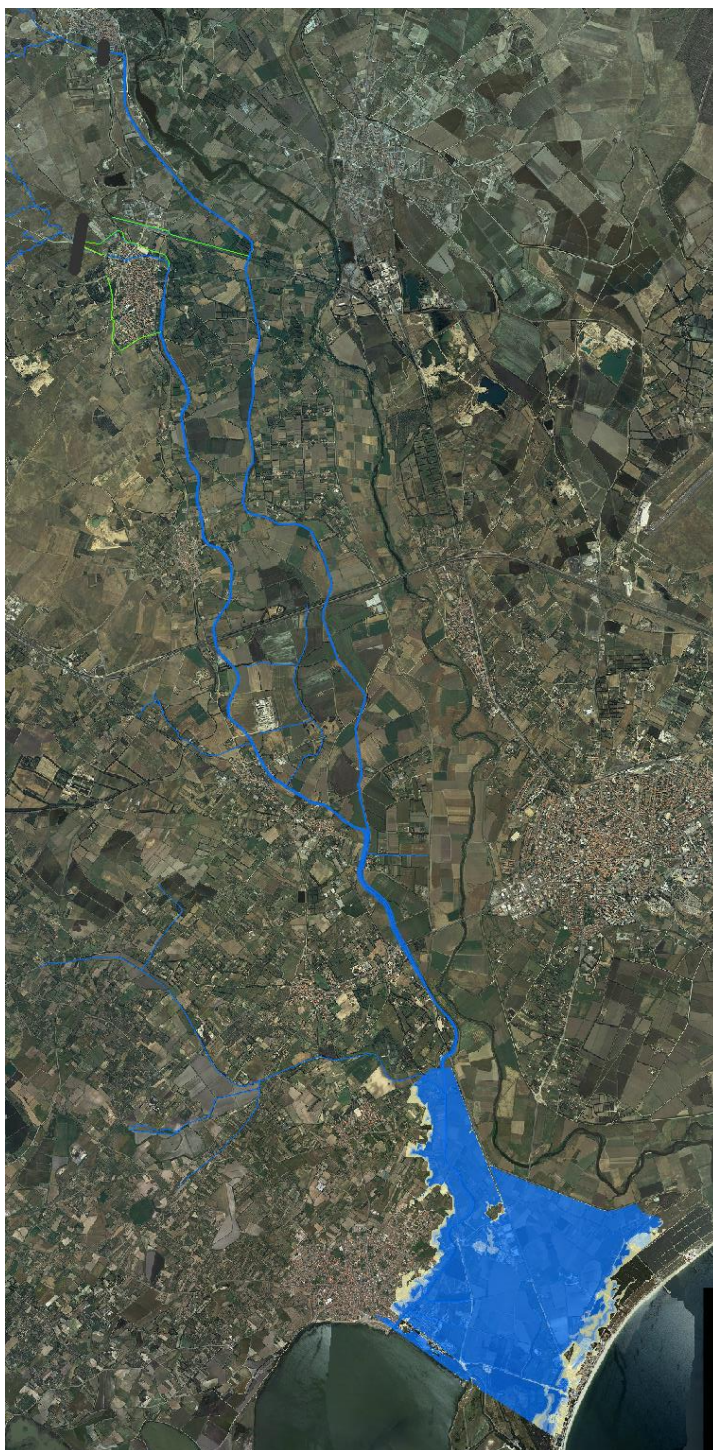


Figura 35 - Fasce di pericolosità nello scenario di progetto

11. Conclusioni

L'obiettivo del presente Piano era quello di individuare degli interventi con i quali poter mitigare la pericolosità idraulica del territorio posto in riva destra del fiume Tirso.

Si è dimostrato, infatti, che con un'adeguata infrastrutturazione, non solo si è in grado di mitigare il rischio idraulico (direttamente collegato alla pericolosità), ma anche di deperimetrare le aree che attualmente vincolano il territorio.

Gli interventi proposti permettono di ridurre drasticamente le aree di pericolosità. Nella tabella 38 si riporta un confronto delle superfici in Hi1, Hi2, Hi3 e Hi4 nello scenario attuale e in quello di progetto

Tempo di ritorno	50	100	200	500
Area ante (km ²)	20.231	1.950	0.739	0.847
Area post (km ²)	6.543	0.274	0.270	0.424
Variazione assoluta (km ²)	13.688	1.676	0.469	0.423
Variazione relativa	-67.7%	-85.9%	-63.5%	-50.0%

Tabella 30 - Confronto tra le fasce di pericolosità