

DISMISSIONE DELLA DIGA DI BUNNARI BASSO E PROGETTAZIONE DELLE OPERE DI SISTEMAZIONE IDRAULICA CONNESSE

STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

MANDATARIA:

 **Lombardi**

Lombardi Ingegneria S.r.l.
Ing. Carlo SILVESTRI

MANDANTI:

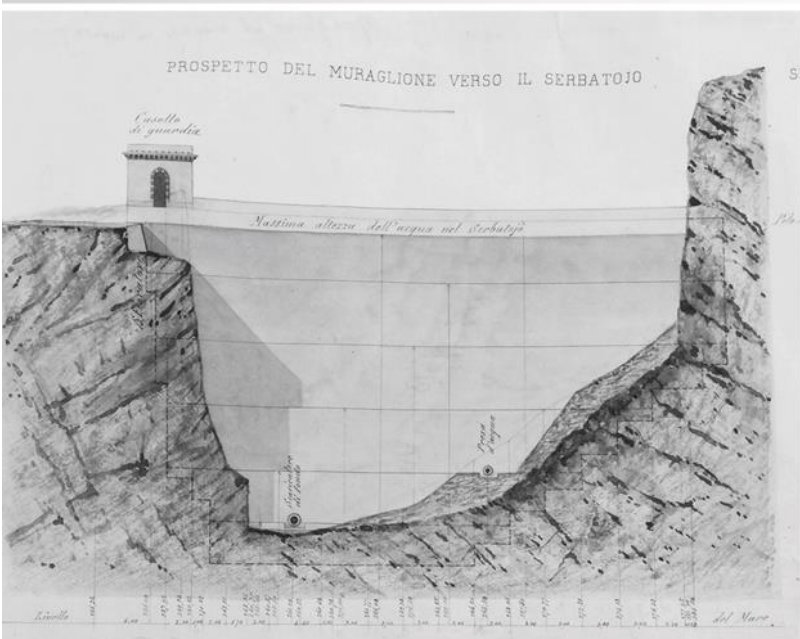
 **TECENTAL**

 **Metassociati**
architettura ingegneria urbanistica

 **Lombardi**

Lombardi SA Ingegneri Consulenti

Archeologo N. FADDA



GENERALE

Documento di fattibilità delle alternative progettuali (DOCFAP)

2020_0275_002_GEN_R001_1



COMUNE DI SASSARI

SETTORE LAVORI PUBBLICI E MANUTENZIONE
DEL PATRIMONIO COMUNALE

**DISMISSIONE DELLA DIGA DI BUNNARI BASSO E PROGETTAZIONE DELLE OPERE
DI SISTEMAZIONE IDRAULICA CONNESSE**

STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA


2	13.07.2021	Revisione generale	Tutti	C. Crémer	C. Silvestri
1	06.07.2021	Aggiunto cap.8 (Soluzione 0)	M. Lora	C. Crémer	C. Silvestri
0	29.06.2021	Prima emissione in bozza	Tutti	C. Crémer	C. Silvestri
Versione	Data	Modifica	Redatto	Verificato	Approvato

MANDATARIA:

MANDANTI:

 **Lombardi**

Lombardi Ingegneria S.r.l.

 **TSBENTRAL**

 **Metassociati**
architettura ingegneria urbanistica

 **Lombardi**

Lombardi SA Ingegneri Consulenti

**ARCHEOLOGO
N. FADDA**



Indice

1	PREMESSA	1
2	PRESCRIZIONI DEL DPP E QUADRO ESIGENZIALE	1
2.1	Requisito principale	1
2.2	Requisiti complementari	5
3	STUDI PREGRESSI E DOCUMENTI MESSI A DISPOSIZIONE	8
4	INQUADRAMENTO TERRITORIALE E VINCOLI	10
4.1	Vincoli urbanistici	10
4.2	Vincoli ambientali	11
4.3	Vincoli archeologici	15
5	INQUADRAMENTO IDROLOGICO-IDRAULICO	17
5.1	Caratteristiche del bacino	17
5.2	Opere idrauliche esistenti	22
6	INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO	23
7	RILIEVI TOPOGRAFICI	26
8	SOLUZIONE 0 – RECUPERO O ADEGUAMENTO DELL'ATTUALE SISTEMA DI SFIORO	29
9	ANALISI DELLE ALTERNATIVE PROGETTUALI	33
9.1	Soluzione A – Canale a cielo aperto	33
9.1.1	<i>Criteri idraulici</i>	34
9.1.2	<i>Descrizione delle opere civili</i>	35
9.1.3	<i>Valorizzazione del territorio</i>	35
9.2	Soluzione B – Galleria lunga	36
9.2.1	<i>Criteri idraulici</i>	37
9.2.2	<i>Descrizione delle opere civili</i>	37
9.2.3	<i>Valorizzazione del territorio</i>	38
9.3	Soluzione C – Galleria corta	38
9.3.1	<i>Criteri idraulici</i>	39
9.3.2	<i>Descrizione delle opere civili</i>	40
9.3.3	<i>Valorizzazione del territorio</i>	41
10	OPERE ACCESSORIE	42
10.1	Opere di stabilizzazione dei versanti	42
10.2	Restauro dell'edificio filtro e del manufatto sifone	42
10.3	Restauro dei paramenti della diga	42

MANDATARIA:

MANDANTI:



11	STIMA SOMMARIA DELLE OPERE	43
12	BILANCIO DELLE MATERIE	44
13	TEMPI DI REALIZZAZIONE	45
14	ANALISI MULTICRITERIA DI CONFRONTO DELLE 3 SOLUZIONI	46
14.1	Aspetti geologico-geotecnici	46
14.2	Aspetti idraulici	47
14.2.1	<i>Linearità planimetrica del sistema di diversione</i>	47
14.2.2	<i>Sicurezza del territorio a valle in relazione alla tipologia delle opere di dissipazione</i>	48
14.2.3	<i>Quote idrauliche di attivazione e suscettività delle opere geotecniche (sponde ed argine)</i>	49
14.2.4	<i>Rischio di intasamento del diversivo</i>	50
14.3	Compatibilità Ambientale e Paesaggistica	50
14.3.1	<i>Occupazione del suolo</i>	51
14.3.2	<i>Alterazione morfologica del terreno</i>	51
14.3.3	<i>Impatto visivo delle opere</i>	51
14.3.4	<i>Valorizzazione delle componenti ambientali</i>	52
14.3.5	<i>Fruizione del territorio</i>	52
14.4	Valore storico/monumentale	52
14.5	Manutenzione	53
14.5.1	<i>Suscettibilità all'ingresso di trasporto solido nel diversivo</i>	53
14.5.2	<i>Svuotamento dell'invaso</i>	54
14.6	Tempi di realizzazione	54
14.7	Costi di costruzione	55
15	CONCLUSIONI E SCELTA DELLA SOLUZIONE	56



1 PREMESSA

Il presente Documento di Fattibilità delle Alternative Progettuali (in seguito brevemente DOCFAP) è stato redatto dagli scriventi ai sensi dell'art. 23 comma 5 del Codice Appalti (D. Lgs. n. 50 del 18.04.2016 n.50) e secondo le indicazioni contenute negli artt. 84 e 85 dello Schema di Regolamento del Luglio 2020 (non ancora approvati), nel rispetto dei contenuti del Documento Preliminare alla Progettazione (brevemente DPP) redatto dal Comune di Sassari e del quadro esigenziale dell'Amministrazione appaltante.

Il DOCFAP individua ed analizza 3 possibili soluzioni progettuali che il sottoscritto Raggruppamento Temporaneo di Progettazione (in seguito RTP) ha individuato come possibili alternative per la realizzazione degli obiettivi di dismissione della Diga Bassa di Bunnari. Le tre soluzioni presentate si distinguono per:

- tipologia delle opere (galleria idraulica o canale a cielo aperto), e relative modalità esecutive,
- il tracciato e l'ubicazione delle opere,
- l'impatto paesaggistico-urbanistico sul territorio,
- il costo di realizzazione dell'opera,
- i tempi di realizzazione.

Per quanto riguarda le prestazioni garantite dalle soluzioni proposte e dalle relative opere, si evidenzia che tutte e tre le soluzioni garantiranno il necessario livello di sicurezza sia idraulico che statico, rispettando le prestazioni minime richieste dalle normative vigenti per le dighe, in particolare il D.M. 26.06.2014 "Norme Tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)" (brev. NTD18) e il D.M. 14.01.2018 "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni" (brev. NTC18).

Il presente DOCFAP propone un'analisi multi-criteria di confronto comparato delle 3 soluzioni, considerando anche l'ipotesi di non realizzazione dell'intervento, corrispondente all'attuale stato di fatto (SDF). Le proposte sono state confrontate relativamente agli aspetti idrologici-idraulici, geologici-geotecnici, agli impatti sul contesto territoriale, storico/monumentale, ambientale, paesaggistico ed infine per quanto riguarda il costo delle opere e i tempi della loro realizzazione.

A conclusione della valutazione multi-criteria, il DOCFAP individua la soluzione progettuale che presenta il miglior rapporto tra costi e benefici per la collettività e per l'ambiente.

2 PRESCRIZIONI DEL DPP E QUADRO ESIGENZIALE

2.1 REQUISITO PRINCIPALE

Le dighe del Bunnari (diga Alta e Bassa), secondo la classificazione delle NTD14 appartengono alla classe degli sbarramenti a gravità di tipo massiccio. Sono state costruite alla fine del secolo XIX, ultimate e collaudate nei primi decenni del secolo scorso (1924-1934). Si tratta di due manufatti in muratura di pietrame trachitico e malta di cemento, intonacate solo sul paramento interno. Sono classificate per la destinazione ad uso potabile ed hanno costituito per lungo tempo la principale risorsa d'approvvigionamento idrico per la città di Sassari. Esse rientrano nella classificazione delle "grandi dighe" italiane, ovvero quelle che hanno un'altezza superiore ai 15 m o un volume d'acqua maggiore di 1'000'000 m³ (v. punto C.7.7.2 delle NTD14).



I dati caratteristici della Diga Bunnari Basso sono riportati nella seguente Tabella:

SCHEDA RIEPILOGATIVA DIGA DI BUNNARI BASSO (SS)	
Coord. (Roma Monte Mario) punto centrale	latitudine 40° 43' 04",03 N longitudine 03° 48' 57",85 W
data inizio esercizio normale	14 Gennaio 1924
data certificato di collaudo:	14 Gennaio 1924
- altezza della diga (ai sensi del D.M. 24.03.'82)	29,50 m
- altezza della diga (ai sensi della L. 584/94)	27,50 m
- altezza di massima ritenuta	----- m
- quota coronamento	287,50 m s.m.
- franco (ai sensi del D.M. n° 44 del 24.03.'82)	----- m
- franco netto (ai sensi del D.M. n° 44 del 24.03.'82)	----- m
- sviluppo del coronamento	55,00 m
- larghezza coronamento	5 m
- volume della diga ** (stimato)	19.000,00 m ³
- grado di sismicità assunto nel progetto	nessuno
- classifica ai sensi del D.M. 24.03.82:	diga in muratura a gravità ordinaria – Aa1
Quota di massimo invaso	287,28 m s.m.
- Quota massima di regolazione	286,00 m s.m.
- Quota minima di regolazione	295,00 m s.m.
- Superficie dello specchio liquido:	
- alla quota di massimo invaso	0,484 km ²
- alla quota massima di regolazione	----- km ²
- alla quota minima di regolazione	----- km ²
- Volume totale di invaso (ai sensi del D.M. 24.3.'82)	0,456 x10 ⁶ m ³
- Volume di invaso (ai sensi della L.584/1994)	----- m ³
- Volume utile di regolazione	----- m ³
- Volume di laminazione	----- m ³
- Superficie del bacino imbrifero direttamente sotteso	17,50 km ²
- Portata di massima piena di progetto	----- m ³ /s
- Tempo di ritorno	1000 anni
- Contributo unitario	----- m ³ /s - km ²
Portata con livello nel serbatoio alla quota 287,28 m s.m.	
- dallo scarico di superficie:	105,00 m ³ /s
- dallo scarico di fondo	5,00 m ³ /s
TOTALE	120,00 m³/s
Contributo unitario massimo cui è possibile far fronte con gli organi di scarico esistenti:	----- m ³ /s -km ²

Figura 1 :Tabella dei dati di sintesi della Diga di Bunnari Basso (estratto dal DPP)

Alla fine degli anni '90, il Comune di Sassari, nella sua qualità di concessionario e di gestore degli invasi, in considerazione della necessità di poter sfruttare la risorsa idrica a disposizione, nonché su sollecitazione e



prescrizione del Servizio Nazionale Dighe, aveva avviato le attività volte all'**adeguamento normativo delle due Dighe di Bunnari Basso ed Alto**.

In ragione della loro età e delle tecniche costruttive adottate, del degrado funzionale conseguente all'esercizio, le due dighe sono state quindi oggetto, negli ultimi 20 anni circa, di diverse **indagini e studi specialistici** nonché di successivi interventi di ripristino e manutenzione per il loro adeguamento funzionale e di sicurezza.

Infatti, a seguito di procedura ad evidenza pubblica del 1995, con convenzione d'incarico professionale, a partire dal 1997, l'Ing. A. Porcheddu (ord. Sassari n. 548) ha condotto e/o coordinato una serie pressoché continua di **studi conoscitivi**, ha progettato e diretto gli **interventi richiesti** ed approvati dalle competenti autorità di controllo del Ministero delle infrastrutture **per gli adeguamenti imposti dalle Normative ai fini del miglioramento delle condizioni di gestione dei bacini e di riduzione del livello dei rischi ad essi associato**, il cui potenziale pericolo è il rilascio incontrollato di un volume d'acqua che può improvvisamente investire i territori e gli insediamenti posti a valle.

Allo stato attuale i bacini a monte delle dighe di Bunnari risultano entrambi vuoti, con status di temporaneo **fuori servizio**.

Gli studi preventivi eseguiti negli ultimi anni hanno evidenziato una sostanziale **inidoneità statica ed idraulica** della Diga di Bunnari Basso, da cui la decisione dello **svuotamento per ragioni di sicurezza**. Le opere di ripristino funzionale ed adeguamento normativo dell'invaso della Diga di Bunnari Alto sono state invece regolarmente portate avanti con alcuni specifici interventi (adeguamento e motorizzazione dello scarico di fondo e delle opere di presa e regolazione, sostituzione delle saracinesche nel torrino di presa).

Per la Diga di Bunnari Basso, una **valutazione dei costi/benefici** delle soluzioni di ripristino funzionale completo oppure di una dismissione ha condotto a confermare la scelta della **dismissione**, intervento che avrà, ai sensi delle NTD14, l'obiettivo principale di **privare permanentemente lo sbarramento della funzione di ritenuta idraulica, garantendo la sicurezza del sito e dei territori di valle** (v. punto H.2.5).

Nel DPP sono state valutate due possibili soluzioni di dismissione, la prima corrispondente alla demolizione totale o parziale della diga, e la seconda invece che contempla la salvaguardia dell'opera di sbarramento grazie alla realizzazione di un **by-pass idraulico o altre equivalenti opzioni tecniche**.

b) Salvaguardia integrale dello sbarramento con bypass idraulico o altre equivalenti opzioni tecniche in ragione di quanto deliberato dall'Amministrazione Comunale, che vedano quindi **la realizzazione di opere idrauliche di smaltimento in sicurezza dei flussi idrici in alveo**, e che consentano di mantenere in essere la diga storica. Le opzioni, dovranno essere oggetto specifico degli studi preliminari di fattibilità di cui al presente intervento di finanziamento per consentire una **corretta valutazione delle alternative possibili** come previsto sia dal Digs 50/2016 (art.23) che dall'art.3 dell'accordo sottoscritto e trasmesso il 06/04/18 con nota prot.59960/18 alla Regione Sardegna per l'utilizzo del finanziamento.

Le possibili opzioni potranno essere **individuate nel concreto e dimensionate sia tecnicamente che economicamente**, solo previa **valutazione/rivalutazione** - statisticamente validata ai sensi delle normative vigenti - **dei regimi di piena del bacino alto/basso come da prescrizioni del RID al punto 5) e quindi dei flussi idrici (determinazione degli idrogrammi di progetto) che le opere potranno/dovranno regolare**, in uno con la **caratterizzazione geomeccanica dei terreni di posizione**

MANDATARIA:

MANDANTI:



e quota delle opere d'imbocco e sbocco di tale flusso, e lungo i percorsi ipotizzati (p.e.s l'eventuale, ipotizzato tunnel di bypass laterale al bacino) in continuità con le perizie e gli studi idraulici, idrologici e geotecnici già fatti, alla contestuale individuazione della soluzione ai problemi d'instabilità individuati nei versanti d'invaso (sx sul bacino alto e dx sul basso) e stabilizzazione del dissesto in spalla sinistra a valle del secondo sfioratore. Al momento attuale potranno quindi essere analizzate anche le possibili modifiche alle opere già esistenti (p.es. nuovo dimensionamento delle opere di scarico esistenti, utilizzo canale fugatore in sponda sx dell'invaso basso ovvero realizzazione di nuove opere di ritenuta e derivazione a monte dell'invaso basso per la salvaguardia dello sbarramento dismesso..)

tali ipotesi di intervento, durante e dopo la fase preliminare, saranno quindi sottoposte alle verifiche ed approvazioni delle autorità di sorveglianza per poi procedere alle successive fasi di definizione tecnica progettuale a livello definitivo ed esecutivo le quali potranno essere anche riunite in unica fase;

L'Amministrazione si è espressa chiaramente in favore dell'ipotesi della **salvaguardia** della Diga di Bunnari Basso, optando pertanto per la realizzazione di un'opera che consentisse il mantenimento della Diga di Bunnari Basso come esempio di archeologia storica (v. premessa del DPP qui di seguito stralciata)

Con **Delibera CIPE** n. 25 del 10.08.2016 e n. 54 del 01.12.2016 veniva assegnato al Comune di Sassari, quale Concessionario, un finanziamento di € 7.400.000,00 per interventi straordinari sullo sbarramento "Diga bassa di Bunnari" (archivio S.N.D. n.88)

Con **Atto d'indirizzo DG n.29 del 18/02/2018** quest'Amministrazione, in ordine alla richiesta del competente Ministero circa una determinazione sulle sorti d'esercizio della diga bassa del Bunnari, e il conseguente utilizzo dello specifico finanziamento stabiliva:

a) **di procedere alla dismissione dello sbarramento**, sia in ragione dell'elevato rapporto costi/benefici derivante da una ipotesi di rimessa in pristino della diga, sia quale presupposto per poter procedere successivamente al **reinvaso del bacino alto** con l'utilizzo della diga a monte (Bunnari alta arch. S.N.D. n.155);

E, tra le due alternative prospettatesi con gli uffici del Ministero in sede di compilazione delle schede d'intervento per il finanziamento ovvero - demolizione parziale o realizzazione di bypass idraulico -:

b) **di condividere ed optare per la soluzione che preveda la realizzazione di un tunnel laterale** che, garantendo la sicurezza idraulica del manufatto e dell'alveo sottostante dagli effetti di una eventuale onda di piena del bacino alto, **consenta anche il mantenimento del manufatto**, la cui demolizione *".. potrebbe non essere autorizzata dagli Enti competenti trattandosi di manufatto sottoposto a vincoli di tutela storica in virtù delle particolari soluzioni tecniche adottate in fase di costruzione, tali da poter essere considerate a tutti gli effetti esempi di archeologia storica."*

L'intervento, in base all'accordo tra l'Amministrazione di Sassari e la Direzione Generale per le Dighe, è quindi finalizzato **"alla realizzazione degli interventi di consolidamento, manutenzione, ristrutturazione e messa in sicurezza della Diga di Bunnari Basso"**.

L'indirizzo progettuale ed il quadro esigenziale dell'Amministrazione sono chiaramente ribaditi nel Verbale di Avvio del Servizio trasmesso agli scriventi dal Comune di Sassari lo scorso 20.04.2021, che conferma la necessità di provvedere alla *"...salvaguardia integrale dello sbarramento, da intendersi come unica entità storica Muraglione ed Edificio Filtri, con bypass idraulico o altre equivalenti opzioni tecniche"*.



Per completare il quadro di riferimento alla base dello sviluppo del presente incarico, si riporta infine uno stralcio delle principali **prescrizioni** contenute nel **verbale ispettivo dell'UTD di Cagliari** del 22.10.2018, tuttora attuali, e che devono essere recepite nel progetto dell'intervento in esame:

Prescrizione n.1 : *".. Trasmissione entro il mese di dicembre 2015 del **progetto di messa in sicurezza statica ed idraulica dello sbarramento**, sulla base dei risultati delle indagini geognostiche e geofisiche effettuate e degli studi idrologici ed idraulici di cui al successivo p.to 5, **ovvero di un progetto di definitiva dismissione** qualora l'Ente Gestore non intenda rimettere in esercizio lo sbarramento...."*

Osservazioni: Con nota 6958 del 09.02.2018 il Comune di Sassari comunicava le proprie intenzioni di dover dismettere la diga. Con nota n.11017 del 236.03.2018 la Regione Sardegna - Assessorato dei Lavori Pubblici comunicava che si stava procedendo all'individuazione del soggetto attuatore dell'intervento.

Prescrizione n.2: *Trasmissione del progetto degli **interventi di messa in sicurezza dei versanti instabili nella sponda destra** dove, durante le precedenti visite di vigilanza, erano state segnalate e confermate dai risultati delle indagini geognostiche, situazioni di potenziale pericolo per chi transita sia sullo sbarramento che nell'ultimo tratto della strada di accesso. Il rappresentante del Gestore comunica che i lavori verranno realizzati col finanziamento dei fondi FSC;*

Prescrizione n.3: *Esecuzione di **interventi di stabilizzazione dell'area oggetto del dissesto in spalla sinistra a valle del secondo sfioratore**, con riferimento a quanto emerso dai risultati delle indagini e redazione delle necessarie verifiche sulla base dei parametri geotecnici determinati attraverso le prove di laboratorio già effettuate;*

Osservazioni: da un'osservazione visiva la situazione finora appare stabile e non si individuano attività di ripresa del fenomeno franoso. Il rappresentante del Gestore comunica che i lavori verranno realizzati col finanziamento dei fondi FSC;

Prescrizione n.4) : *Installazione dell'**asta idrometrica**;*

Prescrizione n.5) : *Redazione e trasmissione a questo Ufficio delle "**VERIFICHE IDRAULICHE**", come richiesto con nota prot. n.RID/953/UPCA del 07.09.2005, integrando quelle già presentate, datate maggio 1998, con le ulteriori disposizioni di cui alla nota suddetta;*

2.2 REQUISITI COMPLEMENTARI

In linea complementare al principale obiettivo di sicurezza idraulica su descritto, l'intervento in oggetto richiede anche l'introduzione di ulteriori requisiti, motivati dal contesto storico-culturale, ambientale e paesaggistico in cui l'opera risiede.

Le due dighe, come si è già evidenziato, vengono realizzate in periodi storici differenti e nel tempo hanno avuto progressivi interventi di utilizzazione/connessione orientati a soddisfare esigenze di fabbisogno idrico civile per la città di Sassari. Il territorio su cui il sistema Bunnari è inserito, amministrativamente appartenente ai Comuni di Sassari e Osilo, è segnato dal grande solco geologico all'interno del quale scorre il rio Bunnari, di particolare pregio paesaggistico e ambientale soprattutto nell'areale compreso fra la sua parte alta all'altezza del centro urbano di Osilo e la sua propaggine verso sud all'altezza dell'intersezione con la S.S.



131 Carlo Felice. Il suddetto areale territoriale, con una estensione territoriale di circa 500 ettari, presenta un valore paesaggistico ambientale legato ai seguenti aspetti di interesse:

- a) la sua articolazione geologica, con versanti caratterizzati da profonde incisioni sulle pareti rocciose;
- b) gli ambienti botanici e vegetazionali presenti sul corso del rio Bunnari e sui suoi apporti laterali, in particolare la cosiddetta Valle dei Ciclamini;
- c) il sistema di archeologia industriale costituito dagli interventi di ingegneria idraulica realizzati nella seconda metà dell'Ottocento (la diga di Bunnari basso, l'edificio filtri, le strutture di servizio dell'acquedotto Bunnari-Sassari, la galleria Bunnari-Viale Adua);
- d) la positiva modificazione del paesaggio e della organizzazione/fruizione del territorio determinatasi con la realizzazione della Diga di Bunnari alto, con riferimento alla sua vocazione turistica.

Tutti questi elementi, di natura ambientale e storico-culturale, realizzano le condizioni per una concreta ipotesi di sviluppo del territorio e delle infrastrutture oggetto del progetto in senso turistico, con la realizzazione di strategie di diversa natura, che mettano insieme sia l'esigenza di tutela che l'opportunità di sviluppo economico del territorio. Gli elementi di maggiore importanza e attrazione di questa potenziale fruizione sono certamente costituiti dal complesso degli elementi di archeologia industriale facenti parte della diga di Bunnari Basso, da cui si può ipotizzare si possano anche irradiare gli altri itinerari aventi caratteristiche più legate ai valori ambientali e paesaggistici.

Gli interventi previsti in progetto per il raggiungimento dell'obiettivo principale di messa in sicurezza della diga di Bunnari Basso risulteranno pertanto importanti anche in relazione alla possibilità di sviluppo turistico-ambientale di questa porzione di territorio e le soluzioni progettuali definitivamente assunte.

In questa prospettiva di valutazione, si ritiene di evidenziare i seguenti aspetti, che rappresentano requisiti complementari:

- Gli interventi proposti dovranno avere necessariamente la caratteristica tecnica di salvaguardare tutti gli elementi di archeologia industriale presenti e di rendere possibile il loro restauro e riutilizzo
- Risulterà importante ricreare all'interno del bacino compreso fra le due dighe le condizioni ambientali originarie, con il corso d'acqua del rio Bunnari alimentato da una portata (derivata dalla diga di Bunnari Alto) capace di costituire un volume idraulico semi-permanente nell'interbacino, con funzionalità ecologica, ricreativa e rievocativa dell'esercizio storico dell'invaso.

La possibilità di alimentare tale specchio d'acqua è garantita dalla torretta di presa presente sul paramento di monte di Bunnari Alto. La torretta è caratterizzata da n°4 bocche di presa (**Figura 2**) comandate da saracinesca manuale, che adducono alla condotta allacciata allo storico acquedotto di Sassari. A valle della torretta, la condotta è intercettata da un pozzetto partitore che consente di rilasciare portata al bacino intercluso tra le due dighe.

MANDATARIA:

MANDANTI:



Tale manufatto partitore, unitamente al rinvaso anche parziale di Bunnari Alto, garantisce l'alimentazione dello specchio d'acqua nell'interbacino.



Figura 2 : Ripresa della torretta di presa di Bunnari Alto, da cui sono visibili n°3 delle complessive n°4 bocche di derivazione dell'acqua

3 STUDI PREGRESSI E DOCUMENTI MESSI A DISPOSIZIONE

Come detto in precedenza, a partire dal 1997, l'Ing. A. Porcheddu di Sassari ha condotto e/o coordinato una serie pressoché continua di studi conoscitivi, e progettato e diretto gli interventi richiesti ed approvati dal Servizio Nazione Dighe per gli adeguamenti imposti dalle normative sulle dighe.

In particolare, nel 1998 è stato redatto dall'ing. Porcheddu il progetto preliminare dell'adeguamento delle Dighe Bunnari Alto e Basso alle normative allora vigenti, incluse le verifiche statiche delle due dighe.

Nel seguito è stata realizzata per la Diga Basso una campagna di indagini geognostiche con rilievo geologico di dettaglio sulla sezione d'imposta, ed indagini sul corpo, spalle e fondazioni dell'opera di sbarramento. Inoltre, sono state eseguite indagini geofisiche per la valutazione delle condizioni generali statiche e di stabilità dell'opera di sbarramento, ai fini dell'individuazione di eventuali cavità e zone di indebolimento della struttura, e per la determinazione delle caratteristiche geomeccaniche delle rocce in posto.

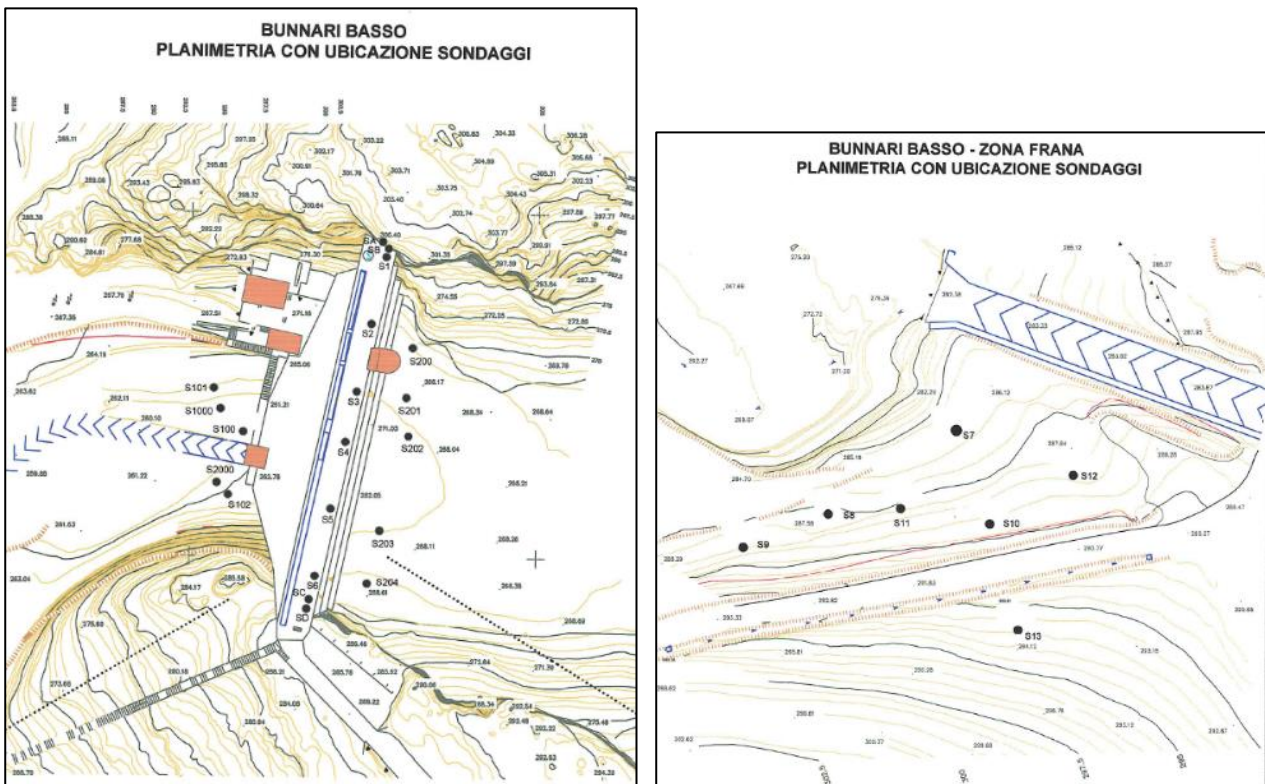


Figura 3 : Ubicazione dei sondaggi eseguiti nel 2004 in zona diga (a sx) ed in zona frana in sponda sx (a dx)

Inoltre sono stati condotti sempre dall'ing. Porcheddu numerosi studi idrologici-idraulici (studio dell'onda di piena, deflusso scarichi di fondo, massima portata transitabile in alveo, piano per la gestione idraulica,...).



I principali documenti pregressi trasmessi dall'Amministrazione al nostro RTP in fase di gara e all'avvio del servizio sono elencati qui di seguito:

Adeguamento delle dighe del Bunnari Alto e Basso alle vigenti norme, ivi compresa la motorizzazione degli scarichi e delle paratoie e lo studio dell'onda di piena. Progetto preliminare (1997-1999):

- Studio di Verifica statica della diga di Bunnari Basso (1998),
- Studio di Verifica statica della diga di Bunnari Alto (1998),
- Studio idrologico ed idraulico (1998) e sua integrazione (1999),
- Studio dell'onda di piena primo tratto dell'alveo (1997).

Opere di manutenzione straordinaria per Adeguamento delle dighe del Bunnari Alto e Basso alle vigenti norme, ivi compresa la motorizzazione degli scarichi e delle paratoie e lo studio dell'onda di piena (dal 2001 al 2006)

- Calcolo Modalità di deflusso dagli scarichi di fondo delle dighe di Bunnari (2001),
- Piano per la Gestione Idraulica delle Dighe di Bunnari (2001),
- Progetto definitivo-esecutivo. Indagini geognostiche (2001),
- Perizia studi e indagini geofisiche (2001),
- Progetto definitivo-esecutivo Indagini geognostiche. Integrazione a seguito della approvazione e prescrizioni del SND prot. SDI 1307/2002/UCCE (2002),
- Studio per la valutazione della massima portata transitabile in alveo (2003),
- Studi e Indagini geofisiche. Perizia di variante e suppletiva (2004),
- Indagini geognostiche. Perizia di variante e suppletiva (2004),
- Progetto definitivo-esecutivo Indagini geognostiche (2006) con le risultanze delle indagini geognostiche e geofisiche realizzate in sito (cui stratigrafie dei sondaggi) e delle prove di laboratorio,
- Studio dell'onda di piena generata dal collasso degli sbarramenti e dell'apertura degli organi di scarico (2008).

A seguito dell'avvio del servizio di progettazione, inoltre, il Comune di Sassari ha reso disponibili al RTP i disegni del progetto originale dell'Acquedotto della Città di Sassari e della Diga di Bunnari Basso a firma dell'ing. Luigi Claudio Ferrero di Torino (datato 1874).

4 INQUADRAMENTO TERRITORIALE E VINCOLI

4.1 VINCOLI URBANISTICI

L'area oggetto di intervento si trova all'interno dei territori comunali di Sassari e Osilo. Il PUC di Sassari è stato adottato con Del. C.C. N. 43 del 26/07/2012 e pubblicato sul BURAS N.58 del 11/12/2014.

L'area di intervento ricade all'interno della zona *E5.c - Aree agricole marginali nelle quali vi è l'esigenza di garantire condizioni adeguate di stabilità ambientale. Aree con marginalità elevata e con funzioni di protezione del suolo ed esigenze di conservazione.* In base all'art. 48 Sottozona E5 le categorie d'intervento ammesse sono quelle previste dall'art. 43 *Ambiti agricoli – Zona E* delle NTA sono concessi i seguenti interventi: I1 (*Interventi di manutenzione ordinaria*), I2 (*Interventi di manutenzione straordinaria*), I3 (*Interventi di restauro e di risanamento conservativo*), I4 (*Interventi di ristrutturazione edilizia*), I4bis (*Interventi di ristrutturazione edilizia leggera*), I5 (*Ricostruzione edilizia*), I6 (*Sopraelevazione*), I7 (*Ampliamento*), I8 (*Interventi di nuova costruzione*), I9 (*Demolizione totale o parziale*), I12 (*Opere interne*).

Il comune di Osilo è dotato di Programma di fabbricazione, pubblicato sul BURAS N. 26 del 17/08/1971, del quale si riporta uno stralcio nelle seguenti pagine. L'area di intervento non interessa ambiti urbani, ma aree del tessuto rurale.

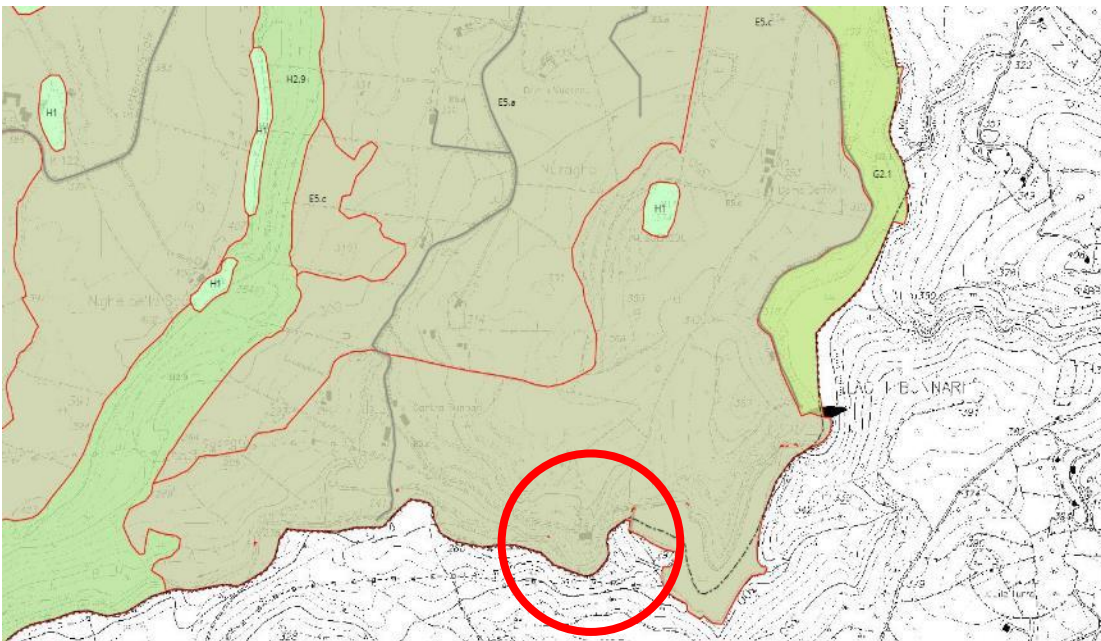


Figura 4 : Stralcio PUC (in rosso l'area di intervento). Fonte: http://sit.comune.sassari.it:8080/SIT2_internet/map.jsp

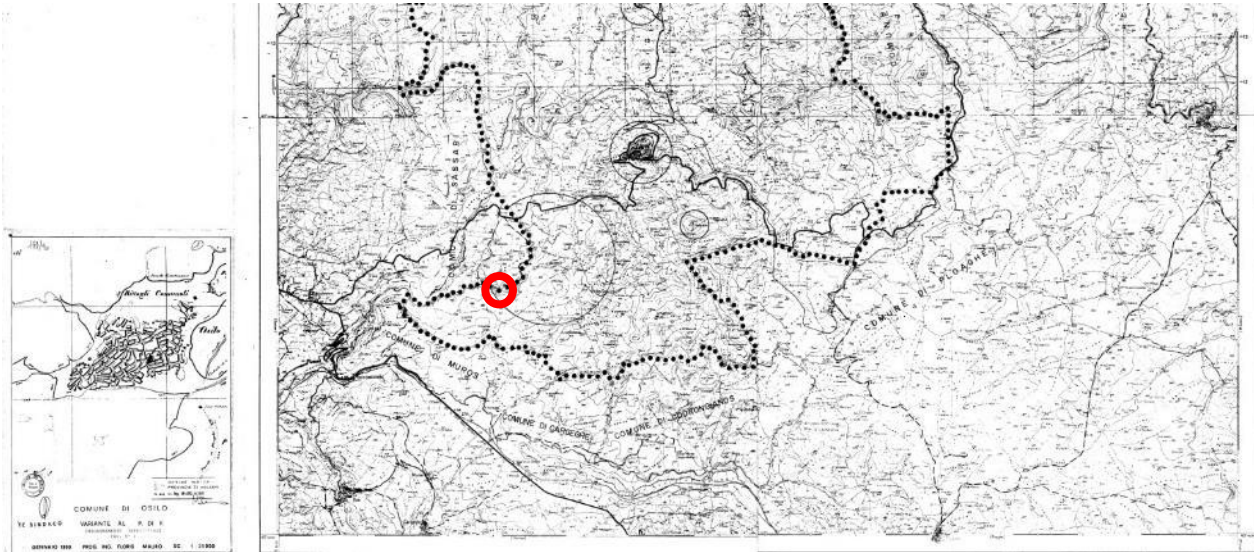


Figura 5: Tavola inquadramento territoriale - Programma di fabbricazione Osilo. In rosso l'area di intervento.

Fonte: <https://comune.osilo.ss.it/contenuti/293947/programma-fabbricazione-vigente>

4.2 VINCOLI AMBIENTALI

Il riferimento attualmente vigente in materia di tutela dei beni culturali ed ambientali è rappresentato dal D. Lgs. n. 42 del 22.11.2004, il cosiddetto “Codice Urbani”, recante il “Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell’art.10 della Legge 06.07.2002 n. 137”, e dalle s.m.i., vale a dire in particolare il D.Lgs. n. 62/08, relativo ai beni culturali ed il D.Lgs. n. 63/08, concernente il paesaggio.

Il D.Lgs. n. 42/04 ha tra l’altro raccolto gli aspetti della programmazione e le disposizioni di cui alla Legge n. 1089/39 “Tutela delle cose di interesse artistico e storico”, alla Legge n. 1497/39 “Protezione delle bellezze naturali” ed alla Legge n. 431/85 “Disposizioni per la tutela delle zone di particolare interesse ambientale”, abrogando inoltre il precedente D.Lgs. n. 490 del 29.10.1999, relativo al “Testo unico delle disposizioni legislative in materia di beni culturali ed ambientali”.

Il Piano Paesaggistico Regionale della Sardegna – Primo ambito omogeneo, che è stato approvato con Deliberazione della Giunta Regionale n. 36/7 del 05.11.2006 (BUR n.30 del 08.09.06), costituisce il quadro di riferimento e coordinamento per gli atti di programmazione e pianificazione regionale, provinciale e locale per lo sviluppo sostenibile.

Nell’ambito di tale piano, la Regione riconosce caratteri, tipologie, forme e punti di vista del paesaggio sardo – costituito dalle interazioni della naturalità, della storia e della cultura delle popolazioni locali, intesi come elementi fondamentali per lo sviluppo – e, inoltre, ne disciplina la tutela, promuovendone la valorizzazione.

L’area oggetto del presente intervento, sita nel comune di Sassari, è compresa nell’ambito di paesaggio 14 - Golfo dell’Asinara.

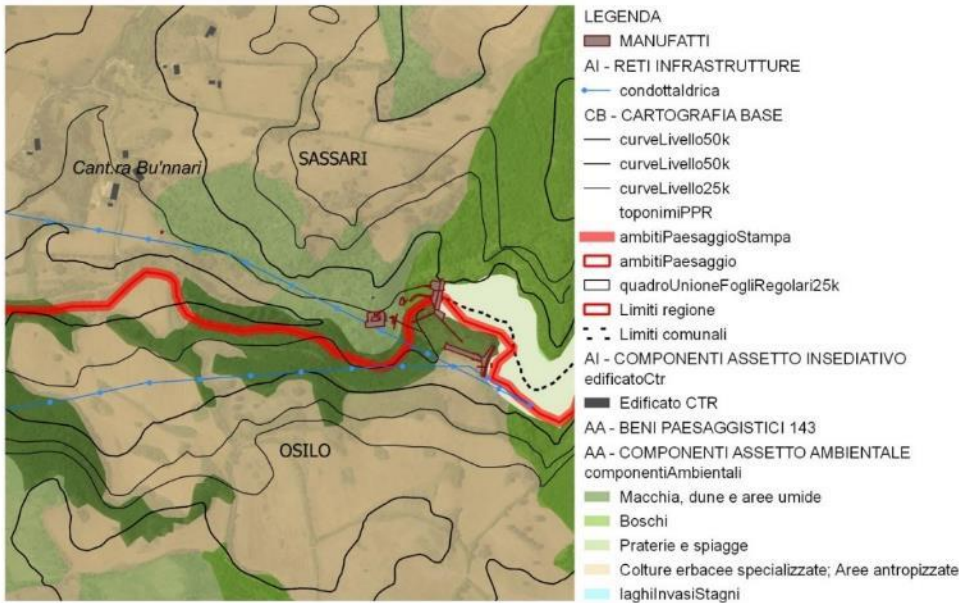


Figura 6 : Stralcio del PPR Sardegna

Sull'area di intervento troviamo le seguenti componenti di paesaggio: 1a – macchia, dune, aree umide, 1b – Boschi, 2a – Praterie, 3c Colture erbacee specializzate, 4a - Aree antropizzate.

L'area d'intervento è ricompresa nei fiumi, i torrenti, i corsi d'acqua iscritti negli elenchi previsti dal testo unico delle disposizioni di legge sulle acque ed impianti elettrici, approvato con Regio Decreto 11 dicembre n. 1175 e le relative sponde o piedi degli argini, per una fascia di 150 metri ciascuna e territori contermini ai laghi, compresi in una fascia della profondità di 300 metri, anche per i terreni elevati sui laghi.

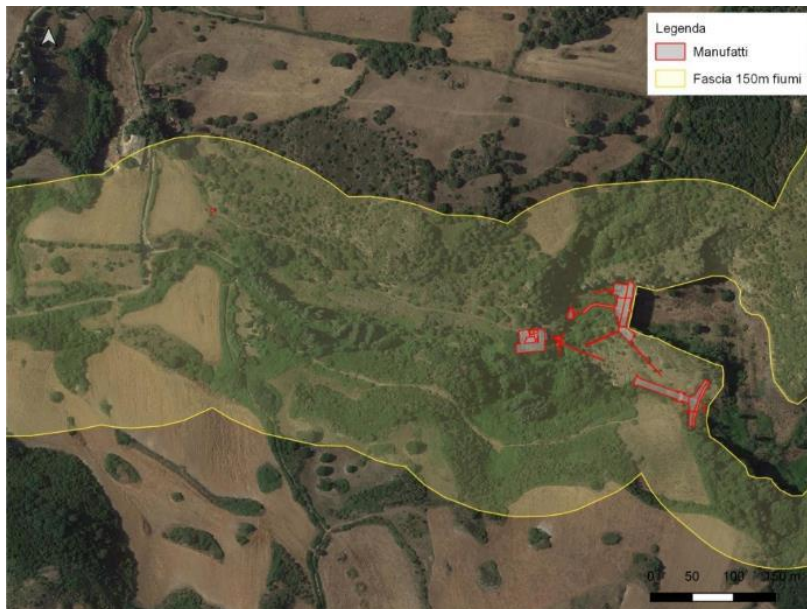


Figura 7 . Vincolo ai sensi del D.lgs. 42/04 art 142. c.1, lett. c)

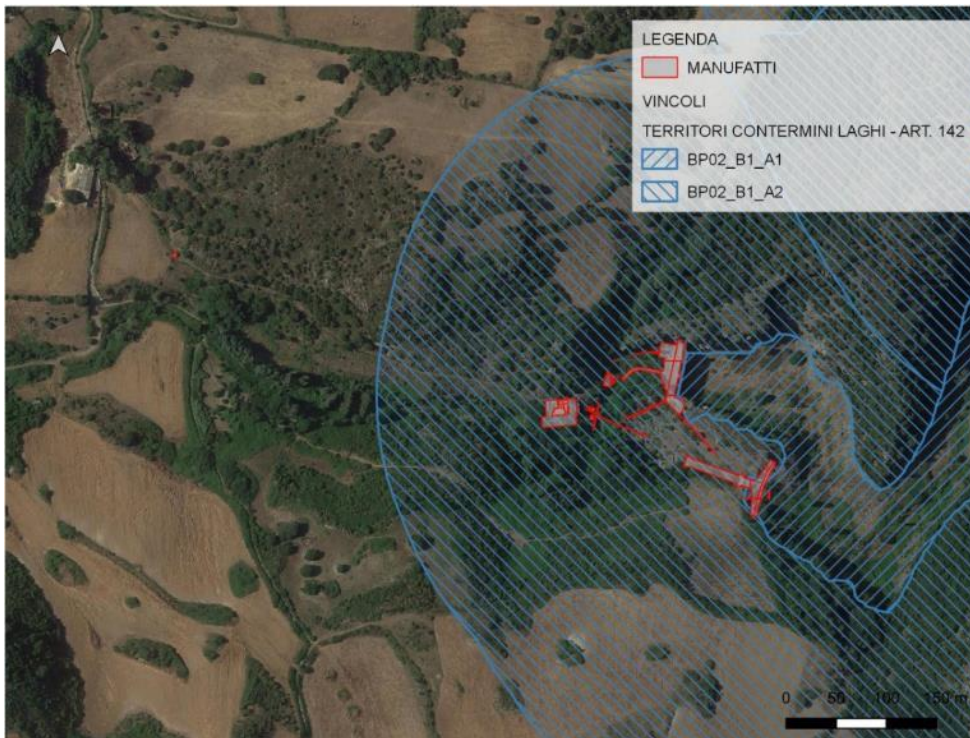


Figura 8 : Vincolo ai sensi del D.lgs. 42/04 art 142. c.1, lett. b)

Parte dell'area di intervento è ricompresa all'interno delle perimetrazioni PAI, come riportato negli stralci planimetrici allegati.



Figura 9 : Stralcio PAI art.8 c. 2 Pericolo alluvioni

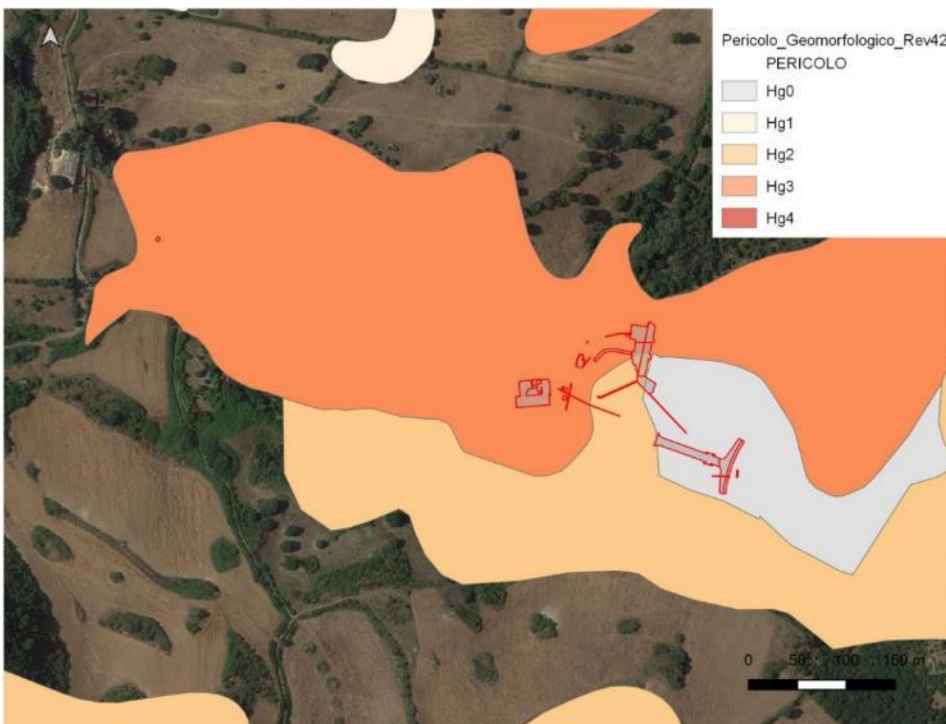


Figura 10 - Pericolo geomorfologico (Pericolo Frana PAI)

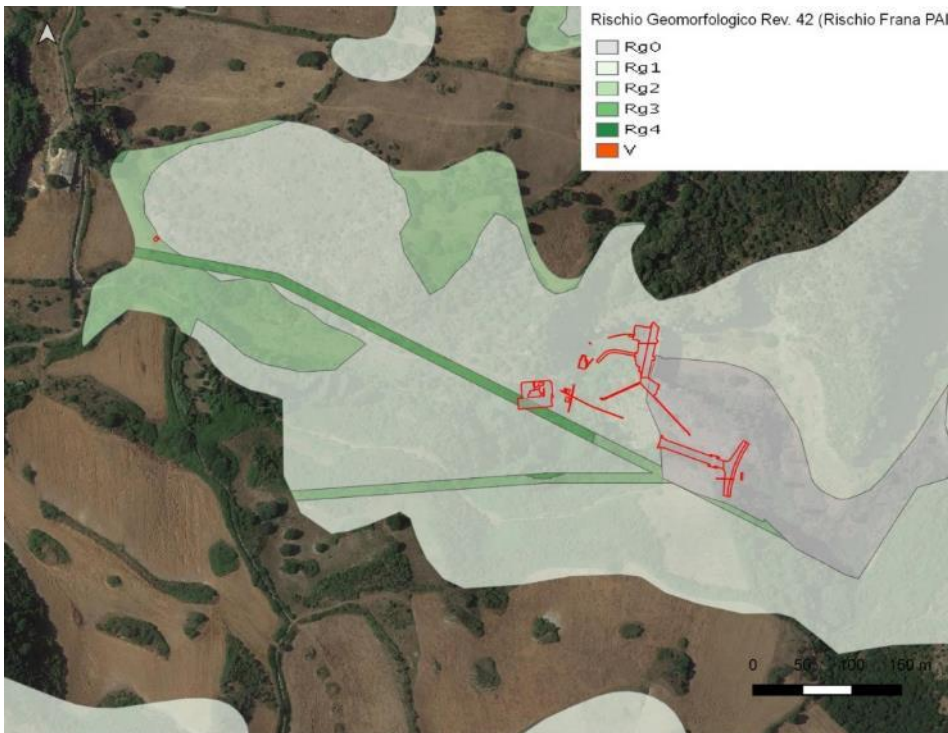


Figura 11 : Rischio Geomorfologico (Rischio frana PAI)

4.3 VINCOLI ARCHEOLOGICI

Lo spoglio degli atti depositati e resi disponibili alla consultazione presso gli archivi ABAP di Sassari e la consultazione del sito internet del MIBAC “Vincoli in rete” non hanno evidenziato - nel ristretto ambito territoriale direttamente coinvolto nel progetto – la presenza di aree sottoposte a tutela o a provvedimenti ai sensi della L. 364 del 20.06.1909, della L. 778 del 11.06.1922 (“*Tutela delle bellezze naturali e degli immobili di particolare interesse storico*”), ai sensi della L. 1089 del 01.06.1939 (“*Tutela delle cose di interesse artistico o storico*”), del D. Lgs. 490 del 29.10.1999 (“*Testo Unico delle disposizioni legislative in materia di beni culturali e ambientali*”) e del D. Lgs. N. 42 del 22.01.2004 (“*Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio*”).

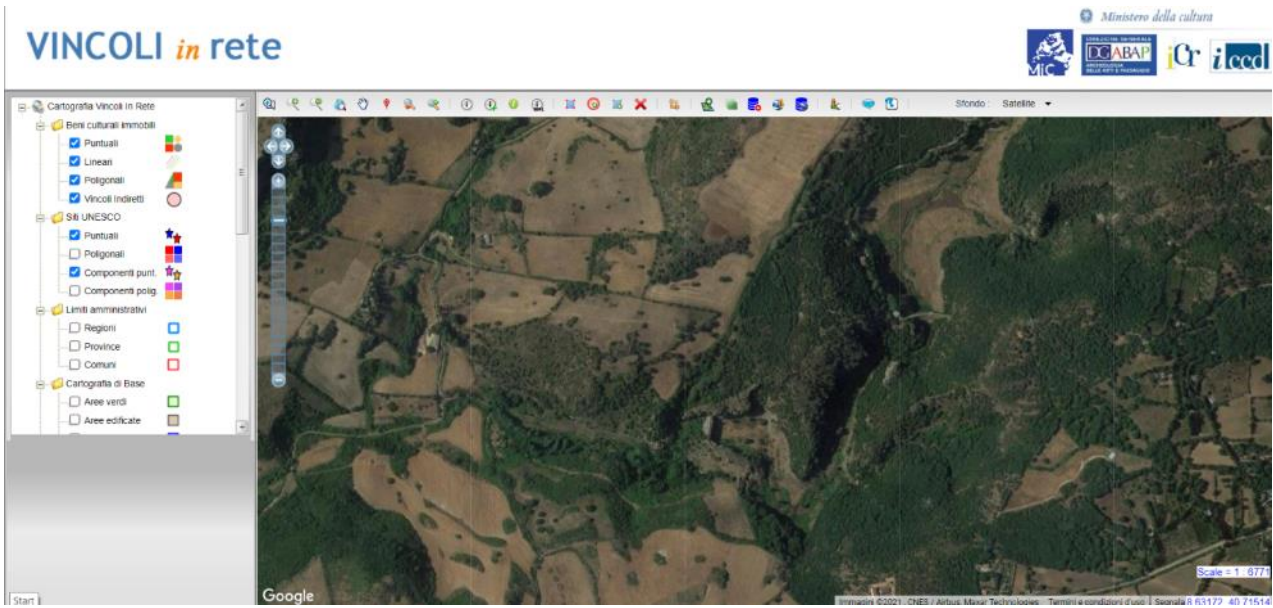


Figura 12 : Estratto del geoportale Vincoli in rete del Ministero della Cultura

5 INQUADRAMENTO IDROLOGICO-IDRAULICO

L'opera in progetto è costituita da un diversivo idraulico in corrispondenza della diga di Bunnari Basso, che ad oggi determina uno sbarramento sul rio Bunnari.

Il rio Bunnari è un affluente in destra del rio Màscari, affluente in destra del Mannu di Porto Torres, uno dei corsi d'acqua più importanti della Sardegna.

Lo sbarramento di Bunnari Basso è una diga a gravità massiccia (**Figura 13**), classificabile come diga muraria a gravità ordinaria ai sensi del DM LL.PP. 24.03.1982, realizzata nell'anno 1878, data riportata sul paramento murario di valle dello sbarramento. L'opera alimentava il sistema acquedottistico idropotabile della città di Sassari, concepito in modo da garantire la portata minima di approvvigionamento; il sistema venne realizzato assieme all'edificio di filtrazione, posto immediatamente a valle della diga, e al tunnel/acquedotto, lungo circa 5 km, che riforniva il serbatoio di arrivo a servizio della rete di distribuzione della città. Si tratta della terza diga realizzata in ordine cronologico in Italia, con tecnologie oramai superate.



Figura 13: Vista del paramento di valle e dello scarico di fondo della diga Bunnari Basso



Figura 14: Vista del paramento di valle e degli organi di sfioro della diga Bunnari Alto

A monte della diga di Bunnari Basso, a meno di 1'000 m di distanza, è presente la diga di Bunnari Alto (**Figura 14**), terminata nel 1932 con lo scopo di sopperire alle carenze idriche della città. Il serbatoio generato da Bunnari Alto ha alimentato il sistema acquedottistico della città di Sassari per oltre 70 anni.

Ad oggi, entrambi i serbatoi risultano inutilizzati.

5.1 CARATTERISTICHE DEL BACINO

Il bacino del rio Bunnari è ubicato circa 10 km a est rispetto alla città di Sassari. Presenta dimensioni modeste, con una superficie totale di circa 16 km² alla sezione di chiusura in corrispondenza della diga di Bunnari Alto, pari a 17.37 km² alla sezione di chiusura della diga di Bunnari Basso. L'asta principale del rio Bunnari presenta una lunghezza di circa 6 km fino alla diga di Bunnari Alto, partendo da una quota di 439.11



m s.m.m. fino ai 308.51 m s.m.m. di questa diga. Tale asta diventa poi di 7 km, se si considera la sua lunghezza sviluppata fino alla diga di Bunnari Basso, raggiungendo la quota minima di 290 m s.m.m.. Le quote principali del bacino, ovvero quella massima, media e minima, sono rispettivamente pari a 747.08 m s.m.m., 474.68 m s.m.m. e 308.51 m s.m.m. (quota minima che diventa 290 m s.m.m. considerando il bacino esteso fino a Bunnari Basso). Inoltre, l'asta principale presenta una pendenza media del 2.2 %, mentre il bacino nella sua interezza del 22.85% (**Figura 15**).

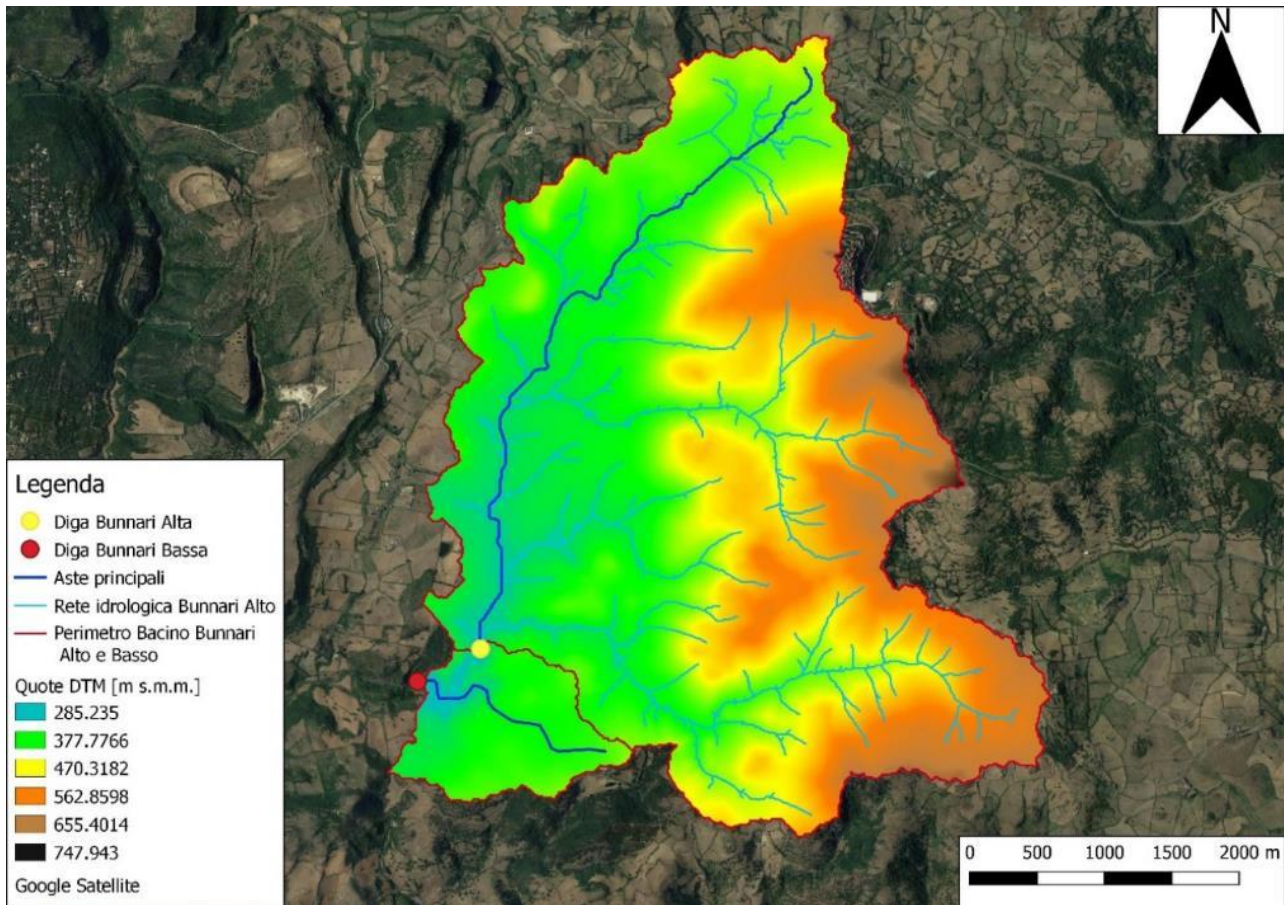


Figura 15 : Quote del bacino e individuazione aste principali

Nonostante il bacino di Bunnari Alto non presenti una superficie elevata, presenta una discreta disomogeneità morfologica: la porzione di bacino in cui si sviluppa il percorso dell'asta principale, che ricopre gran parte della superficie, presenta infatti pendenze relativamente dolci, se confrontate con quella sud-orientale. Per questo motivo, nello studio idrologico annesso al presente progetto è stato ritenuto opportuno suddividere il bacino di Bunnari Alto in n. 2 sottobacini (**Figura 16**), per valutarne in modo separato le caratteristiche morfometriche e valutarne le differenti capacità di deflusso.

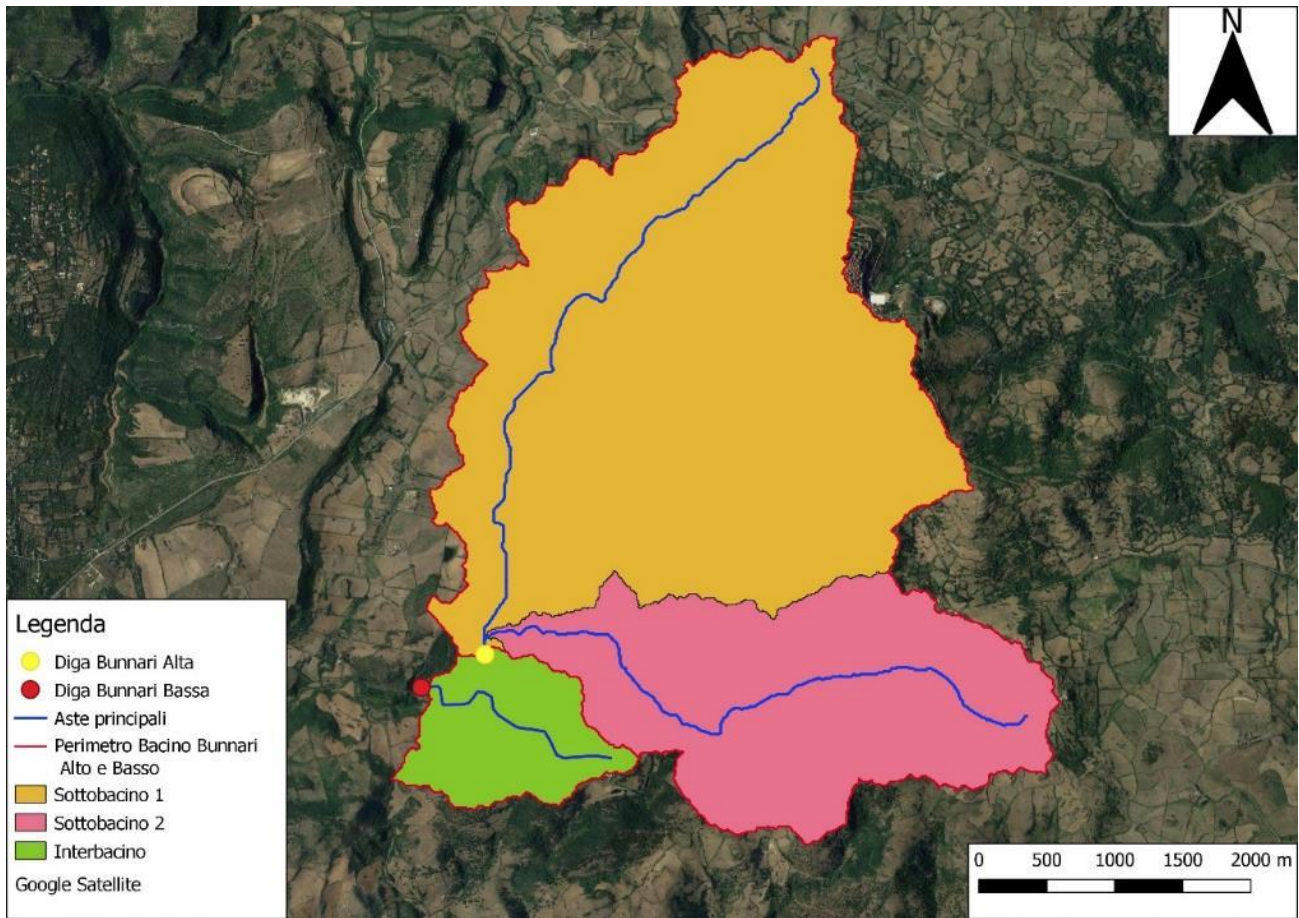


Figura 16 : Suddivisione in sottobacini con individuazione aste principali

Il bacino del Rio Bunnari si trova in un'area scarsamente popolata, in cui è presente un solo centro abitato di discrete dimensioni, ovvero la città di Osilo, situato in cima ad una collina sul perimetro nord-orientale del bacino. Il resto della superficie è occupato principalmente da coltivazioni, macchie di arbusteti, aree adibite al pascolo e boschi di latifoglie.

Dal geoportale della regione Sardegna è stato possibile reperire la mappa di utilizzo del suolo, dalla quale si ricava che circa il 60% della superficie del bacino è utilizzata a fini agricoli, considerando anche i prati artificiali. Le aree occupate da boschi (latifoglie, conifere, aree agroforestali) sono circa il 16%, quelle adibite al pascolo e comprendenti anche cespuglieti, arbusteti e macchia mediterranea sono circa il 20%, mentre l'occupazione data dal tessuto residenziale, considerando anche le aree estrattive e di cantiere, è pari a poco più del 2%. Infine, si osserva che la superficie destinata ai bacini artificiali è pari allo 0.91% dell'area totale del bacino.

La seguente **Figura 17** mostra la mappa di uso del suolo del bacino utilizzata.

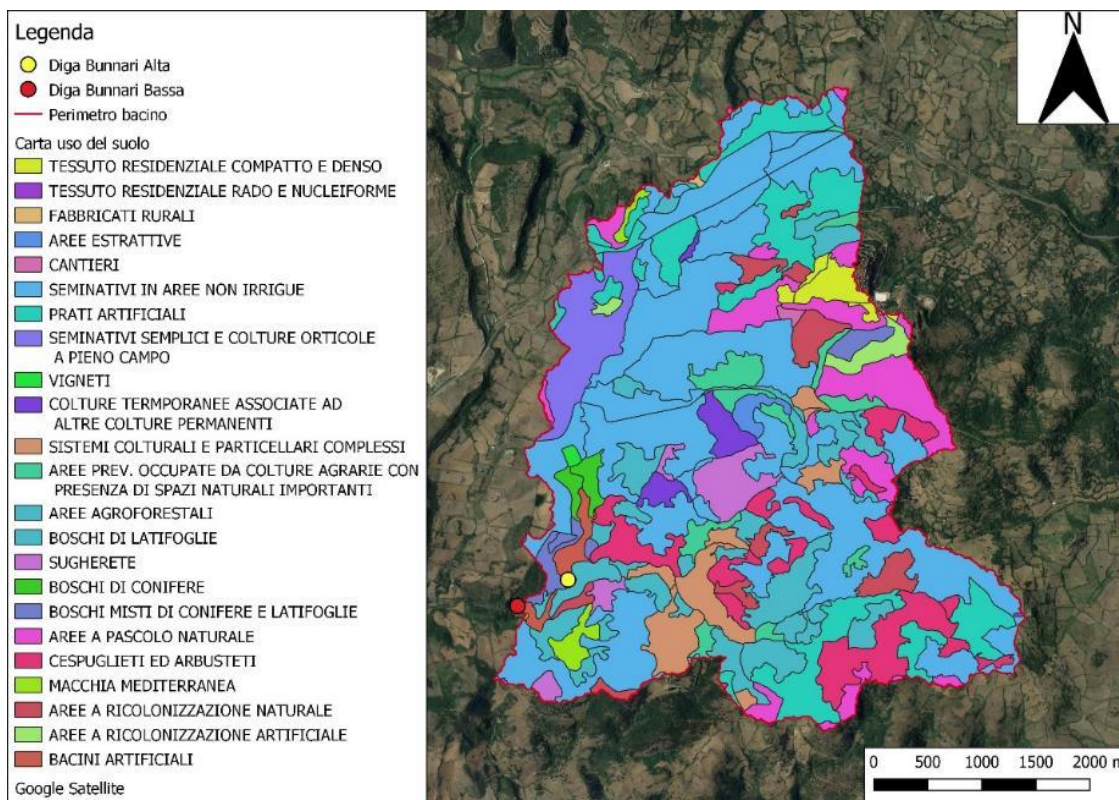


Figura 17 : Bacino del Rio Bunnari: uso del suolo

Nell'ambito dello studio idrologico svolto nel presente progetto, è stata eseguita l'analisi delle Curve di Possibilità Pluviometrica (CPP) al variare del periodo di ritorno, ricorrendo a metodi regionalizzati (TCEV e GEV). Le CPP sono state poi impiegate per calcolare gli idrogrammi di piena rispettivamente generati del bacino sotteso dalla diga di Bunnari Alto e nell'interbacino tra le due dighe (Tabella 1). A tal proposito è stato anche stimato il tempo di corrivazione alla diga di Bunnari Alto, pari a 2.06 hr.

Da notare che, in precedenti studi svolti sul medesimo bacino ed emessi dall'ing. Porcheddu (1997-2008), si attribuisce al bacino sotteso da Bunnari Alto un tempo di corrivazione pari a 1.5 hr, e CPP che sottostimano di quasi il 20 % la precipitazione cumulata.

Tempo di ritorno	0,5 ore	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore
Tr	h(mm)	h(mm)	h(mm)	h(mm)	h(mm)	h(mm)
10	26,53	33,67	46,05	56,12	68,38	83,32
20	31,06	39,77	54,51	66,50	81,13	98,98
50	37,59	48,72	66,94	81,80	99,95	122,14
100	42,85	56,06	77,18	94,42	115,52	141,33
200	48,31	63,79	87,98	107,77	132,01	161,70
500	55,63	74,36	102,82	126,15	154,77	189,89
1000	61,10	82,42	114,18	140,26	172,29	211,63

Tabella 1 : CPP ottenute con il metodo GEV



Dopo implementazione di modello idrologico del bacino con HEC-HMS, sono stati simulati gli idrogrammi di piena in arrivo alla sezione materializzata dalla diga di Bunnari Alto (Tabella 2) e nell'interbacino (Tabella 3).

Idrogrammi di piena per diversi T_R							
T_R [anni]	10	20	50	100	200	500	1'000
Q_{max} [m ³ /s]	57.7	75.2	101.7	123.9	147.5	179.9	204.7
t_{Qmax} [ore]	4.42	4.42	4.33	4.33	4.33	4.33	4.33

Tabella 2: Portate al colmo e tempo di picco per diversi T_R

Idrogrammi di piena dell'interbacino per $T_R=500,1'000$		
T_R [anni]	500	1'000
Q_{max} [m ³ /s]	31.9	36
t_{Qmax} [ore]	3.33	3.33

Tabella 3: Portate al colmo e tempo di picco idrogrammi dell'interbacino

In Figura 18 sono riportati gli idrogrammi relativi al bacino di BA e all'interbacino.

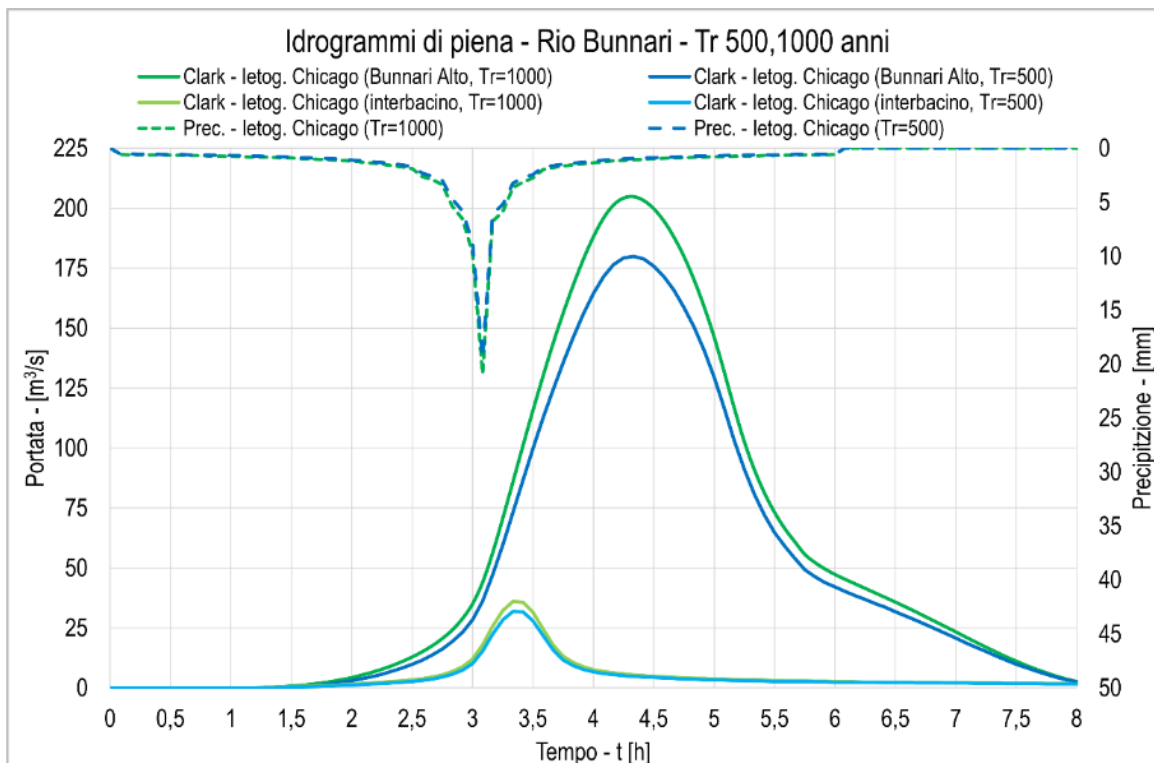


Figura 18 : Confronto tra idrogrammi in ingresso stimati per il bacino di Bunnari Alto e l'interbacino

5.2 OPERE IDRAULICHE ESISTENTI

La diga di Bunnari Basso è caratterizzata da un coronamento di sviluppo pari a 57 m, a quota 287.50 m s.l.m.. La quota di massimo invaso è pari a 287.28 m s.l.m..

Gli scaricatori di superficie sono costituiti da:

- uno scarico in sinistra idrografica di sviluppo pari a 15.48 m con quota di sfioro pari a 286.50 m s.l.m.,
- un'opera di captazione a petto sfiorante di lunghezza pari a 57.60 m con quota di sfioro pari a 286.50 m.

La massima portata evacuabile dagli sfiori ammonta a 77 m³/s.

La diga possiede anche uno scarico di fondo costituito da una tubazione che attraversa trasversalmente il corpo diga ed è intercettata a valle da una saracinesca di DN 600.

È inoltre presente la presa tramite torrino fornito di quattro bocche di presa comandate da saracinesca ad azionamento manuale.

La diga di Bunnari Alta è caratterizzata da un coronamento di sviluppo pari a 101.90 m, di quota 316.20 m s.l.m.. La quota di massimo invaso è pari a 313.43 m s.l.m..

Lo scaricatore di superficie è costituito da sfioro frontale di lunghezza pari a 35 m, intervallato da n°4 pile, con soglia di sfioro pari a 312.18 m s.l.m., coincidente con la quota di massima regolazione.

La portata massima sfiorata dallo scarico di superficie è stata assunta negli studi pregressi (Porcheddu 1997-2008) pari a 105 m³/s. Nel presente studio, la portata evacuata alla quota di massimo invaso (313.43 m s.l.m.) è stata rivalutata, e stimata pari a 98.59 m³/s.

Lo scarico di fondo è costituito da una galleria intercettata in testa da una paratoia piana. Inoltre, sono presenti n°2 saracinesche a corpo piatto DN 1400 con funzione di intercettazione e regolazione.

L'opera di presa, similmente alla diga di Bunnari Basso, è costituita da torrino fornito di quattro bocche comandate da saracinesca ad azionamento manuale.



Figura 19 : Diga di Bunnari Alta – Vista da monte della diga con paratoia piana (in primo piano) e torrino di presa

6 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO

L'area in esame è ubicata a SE della fossa tettonica del Sassarese e dell'Anglona, ed è composta principalmente da prodotti vulcanici e sedimentari terziari e quaternari.

La morfologia attuale è il risultato dell'erosione delle coperture sedimentarie mioceniche e dei complessi vulcanici sottostanti da parte del Rio Bunnari, che ha dato vita a vasti altipiani con superfici strutturali leggermente inclinate collocate alla sommità di versanti molto erosi ed incisi dall'azione dell'acqua.

I pendii hanno un'inclinazione più dolce se scavati nei complessi vulcanici piroclastici, leggermente incisi sui calcari e le facies vulcaniche più litificate, fino ad arrivare a pareti verticali nei complessi delle Daciti-Andesiti.

La superficie indagata risulta totalmente costituita da un complesso vulcanico composto da Andesiti e Daciti massive e litoidi generalmente interessate da processi erosivi superficiali legati a fenomeni meteorici. Sono inoltre presenti facies intermedie di transizione tra Andesiti alterate e Andesiti-Daciti litoidi e Andesiti in masse o in colate generalmente interessate da processi di alterazione idrotermale superficiale ("argillificate").



Figura 20 : Vista panoramica lato monte della Diga di Bunnari Basso - Affioramenti rocciosi

Lo studio della documentazione geologica fornita dall'Amministrazione (eseguita e coordinata dall'ing. Porcheddu tra gli anni 2001-2006 con la consulenza dell'Università degli Studi di Cagliari - prof. Balia), abbinata ai sopralluoghi eseguiti dagli scriventi nel corso del mese di aprile 2021, hanno fornito un chiaro quadro geologico generale del sito, coerente con le informazioni contenute negli studi passati. I rilievi preliminari eseguiti dagli scriventi si sono concentrati principalmente sulla soluzione proposta in sede di gara (galleria corta), tuttavia le informazioni raccolte durante i sopralluoghi sommate a quelle rese disponibili dall'Amministrazione sono certamente sufficienti nel loro complesso per formulare una valutazione geologica preliminare e valutare in modo corretto le soluzioni progettuali illustrate in questo DOCFAP.

Si può quindi certamente confermare che la diga di Bunnari Basso interessa principalmente l'Unità di Osilo, costituita da lave massive di colata, che danno origine a corpi cupoliformi e domiformi con tipiche laminazioni di flusso.

L'**unità di Osilo** è costituita dal punto di vista petrografico da rocce da porfiriche a debolmente porfiriche, in pasta di fondo ipocristallina con microcristalli di plagioclasio, clinopirosseno e abbondante magnetite. La facies Dacite-Andesitica che interessa il corpo diga si presenta massiva e compatta, localmente può presentare delle alterazioni evidenziate nei sondaggi eseguiti in fondazione.



I **detriti di versante** possono essere suddivisi in Detriti eluvio-colluviali a matrice limosa-argillosa e detriti colluvio-alluvionali recenti e attuali.

I **detriti eluvio-colluviali** superficiali che interessano il versante sinistro sopra il canale fuggatore hanno dato luogo ad un dissesto descritto nella documentazione agli atti come frana di medie dimensioni. Con riferimento al sopralluogo condotto nell'aprile 2021, l'area appare interessata da un soliflusso superficiale di limitata estensione, probabilmente causato dal processo di erosione del piede del versante innescato dal piccolo affluente di sinistra idrografica alimentato in passato anche dalle acque provenienti dalla struttura del canale fuggatore stesso. Queste valutazioni andranno tuttavia confermate mediante la realizzazione di un'opportuna campagna geognostica in sito che sarà oggetto delle prossime fasi progettuali.



Figura 21 : Vista panoramica - Area soggetta a soliflusso superficiale in sponda sx a valle del canale fuggatore

Dall'interpretazione dei dati dei sondaggi effettuati nel 2005-2006 in quest'area possiamo valutare in massimo 5 m lo spessore del detrito di versante interessato dal soliflusso superficiale; al di sotto dello strato superficiale di detrito, i sondaggi indicano uno spessore variabile dai 10 ai 14 m di Daciti alterate e fortemente argillificate, al di sotto delle quali si ritrova il substrato roccioso composto da Daciti fratturate.

Si nota però che nonostante la densità dei sondaggi effettuati in passato nell'area, non è stato installato nessun inclinometro in foro e nemmeno dei target topografici superficiali per poter monitorare eventuali movimenti del versante. Pertanto, nonostante non sembrino oggi evidenti segni di un movimento franoso in atto, nelle prossime fasi progettuali si dovranno eseguire ulteriori indagini geognostiche in quest'area, per meglio indagare il fenomeno descritto negli studi pregressi.

Il sopralluogo svolto dagli scriventi ha anche evidenziato la presenza di un forte reticolo di fratturazione nelle pareti verticali costituite da Daciti e Andesiti, in particolare si sono identificati 3 sistemi di fratturazione $K1=140/90$; $K2=225/90$ e $K3=260/25$ con persistenze e spaziature metriche che danno origine a grossi blocchi sospesi lungo le pareti circostanti la diga di Bunnari Basso.



La verticalità del versante costituisce un fattore di instabilità che può portare a crolli di porzioni di roccia anche di grosse dimensioni, blocchi che al momento giacciono in equilibrio precario alla sommità dei versanti verticali in corrispondenza di quasi tutto l'invaso ed in modo particolare in prossimità del corpo diga sia nella zona di monte che di valle.

Un rilievo geologico e geostrutturale di dettaglio sarà eseguito nelle prossime fasi di progettazione, e permetterà di definire gli interventi di stabilizzazione necessari alla messa in sicurezza dell'area.



Figura 22 : Vista panoramica - Pareti fortemente fratturate sponda imposta diga

7 RILIEVI TOPOGRAFICI

In questa fase progettuale, nonostante le attività fossero previste nelle successive fasi progettuali, lo scrivente RTP ha provveduto a sviluppare i rilievi topografici plano-altimetrici delle aree di entrambe le dighe di Bunnari Alto e Bunnari Basso, ed i rilievi topografici di dettaglio dei manufatti della diga bassa.

Le operazioni di rilievo in campagna hanno avuto luogo durante l'ultima settimana del mese di maggio 2021, e hanno compreso le seguenti attività:

- Rilievo plano-altimetrico delle aree individuate con linea nera nella **Figura 23**, e precisamente:
 - o asse fluviale del rio Bunnari e delle sue sponde fino alla quota di ca. 300 m slm, delimitato a monte dalla Diga Alta e a valle dalla Diga Bassa, fino all'edificio della casa filtri (compreso); nella zona della Diga Bassa l'area di rilievo è stata estesa sulla sponda sx fino a comprendere la parte terminale del sentiero di accesso al ponte del secondo sfioratore; l'area si estende per una superficie di complessivi 150'000 m² ca.
 - o una fascia di larghezza di ca. 50m in asse al sentiero di accesso alla Diga Bassa, a partire dal bivio della strada poderale; l'area si estende per una superficie di ca. 30'000 m².

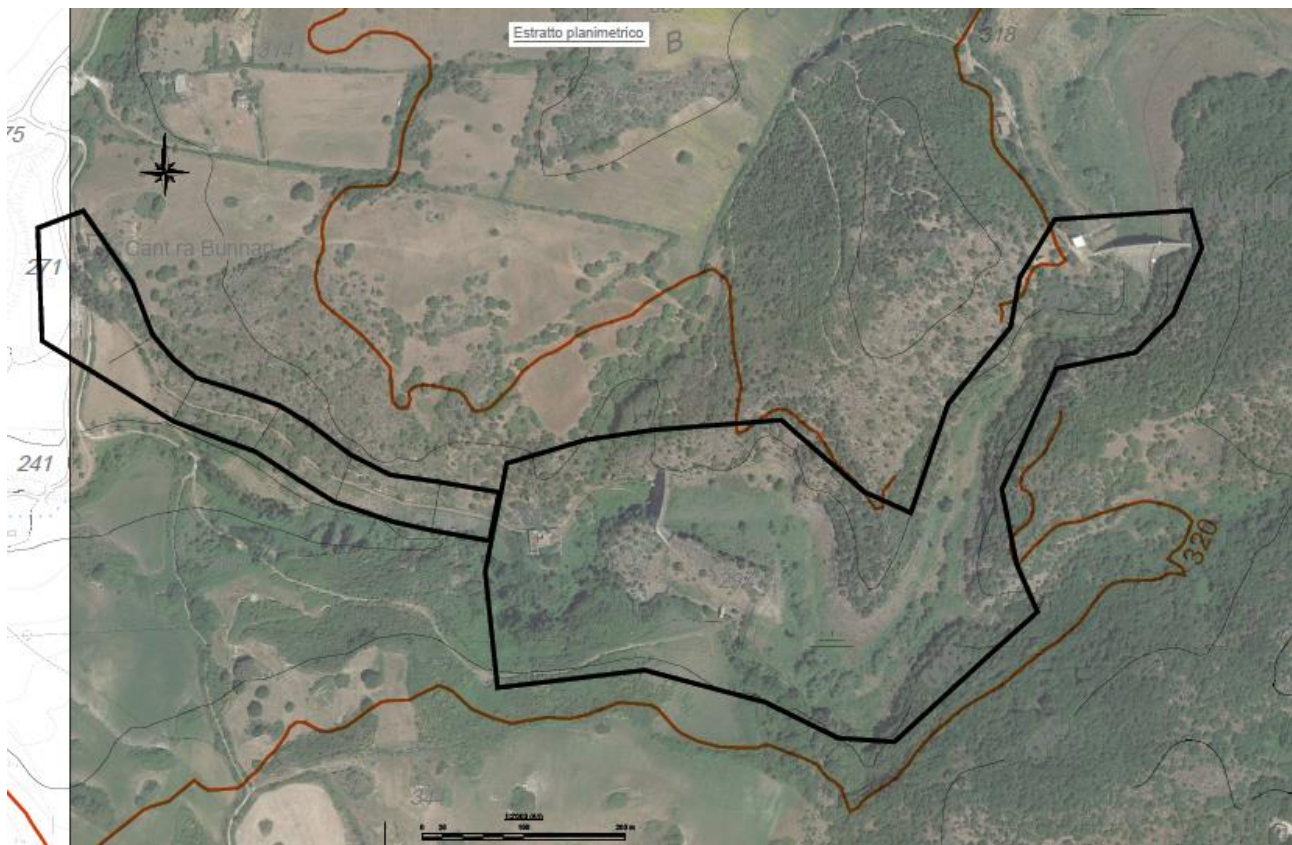


Figura 23 : Area soggetta a rilievi topografici



- Rilievo di tutti i manufatti inclusi nell'area della Diga di Bunnari Bassa, e precisamente:
 - o Diga di Bunnari Bassa, inclusi la torre di presa sul paramento di monte e i 3 piccoli manufatti addossati al paramento di valle (manufatto di sbocco dello scarico di fondo della diga ubicato al piede e 2 manufatti in cui sono alloggiati gli organi di regolazione, lato sponda dx);
 - o Manufatto di sbocco dello scarico di fondo della diga Alta, posto poco a valle della diga Bassa;
 - o Edificio Filtro;
 - o 1° sfioratore in sponda sx (prolungamento dell'asse diga con il ponte);
 - o 2° sfioratore in sponda sx (canale fuggatore a cielo aperto e ponte);
 - o Tracciato di tutte le condotte presenti nell'area, con rilievo dei rispettivi diametri;
 - o Piccolo manufatto (ca. 3x3m) ubicato lungo il sentiero di accesso alla diga.

Per i piccoli manufatti citati (3 manufatti addossati su paramento valle diga + 1 manufatto sul sentiero di accesso) e per l'Edificio Filtro, i rilievi hanno compreso il rilevamento della geometria del manufatto sia dell'esterno che degli spazi interni, con conseguente rilievo degli spessori delle colonne, pareti, solai, ecc...

L'attività di rilievo è stata eseguita integrando metodologie topografiche con attività laser scanner terrestre e LIDAR da drone.

Il rilievo plano-altimetrico dell'area delle due dighe Bunnari Basso e Alto è stato realizzato attraverso metodologia LIDAR da Drone e fotogrammetria, mentre i manufatti antropici sono stati rilevati esternamente ed internamente con metodologia Laser scanner terrestre. Il tutto è stato georeferenziato attraverso sistemi topografici e GPS nel sistema cartografico nazionale UTM WGS84.



Figura 24 : Rilievo Lidar da drone dell'area a valle della diga Bunnari Basso



Figura 25 : Rilievo Lidar da drone dell'area completa - Diga Bunnari Alto e Basso compreso il sentiero di accesso alle aree

Nell'area della diga di Bunnari Basso sono concentrati tutti i manufatti che sono stati rilevati con metodologia laser scanner terrestre. Il risultato finale dei rilievi è un unico modello 3D delle nuvole di punti, correttamente referenziato nel sistema assoluto UTM WGS84, contenente le informazioni geometriche di tutti gli elementi rilevati.



EDIFICI ORGANI DI REGOLAZIONE



EDIFICIO CASA FILTRI



SFIORATORE 2 - PONTE



SCARICO DI FONDO

Figura 26 : Rilievo Laser scanner terrestre dei manufatti

MANDATARIA:

MANDANTI:

8 SOLUZIONE 0 – RECUPERO O ADEGUAMENTO DELL'ATTUALE SISTEMA DI SFIORO

Nel presente capitolo si verifica se l'attuale manufatto sfioratore SF2 in sinistra idraulica rispetto al corpo di sbarramento di Bunnari Basso (BB) è in grado di sostenere la portata millenaria di progetto.

Tale iniziativa nasce dalla logica necessità di verificare l'idoneità dei dispositivi ad oggi esistenti per soddisfare il principale requisito di progetto, ovvero la diversione della piena millenaria dallo sbarramento esistente di BB, senza prevedere alcun impegno statico o idraulico della diga medesima.

Il manufatto SF2 (**Figura 27**) è costituito da uno sfioratore disposto secondo l'orografia del versante e da un canale fugatore con sviluppo perpendicolare allo sfioratore medesimo.

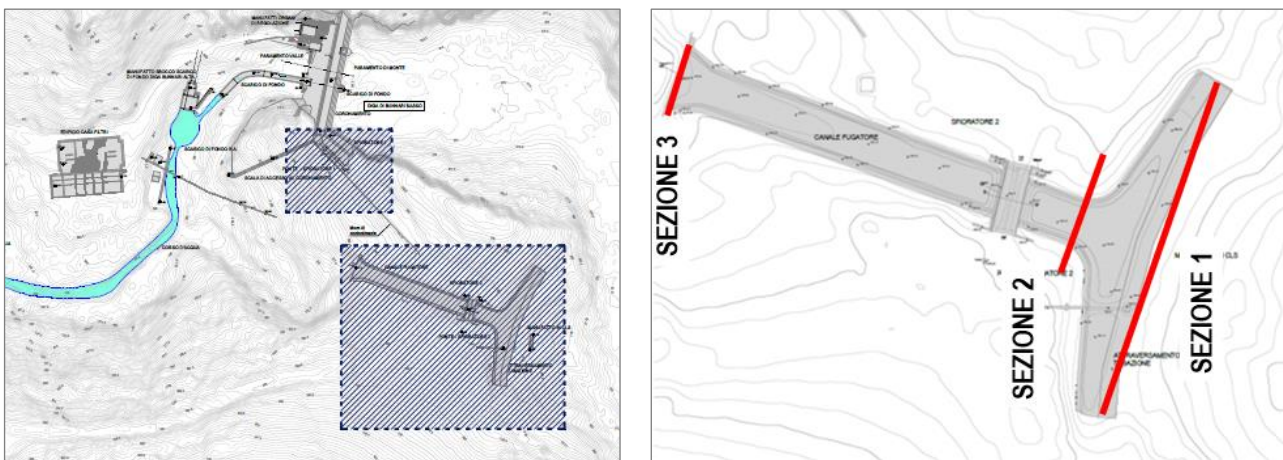


Figura 27 : Ubicazione e inquadramento planimetrico dello sfioratore SF2 di Bunnari Basso

Lo sviluppo dello sfioratore (SEZIONE 1 di **Figura 27**) è di 57.6 m, alla quota di sfioro pari a 286.5 m s.l.m., pari alla quota di massima regolazione dell'attuale serbatoio. La relativa quota di massimo invaso è pari a 287.28 m s.l.m.: dai documenti pregressi, a firma dell'ing. Porcheddu, si rileva che la massima portata captata dallo SF2 risulta pari a

$$Q = C_q \cdot L \cdot h^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2g} = 0.48 \cdot 57.6 \cdot 0.78^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2g} = 84.36 \frac{m^3}{s}.$$

Il canale fugatore che si sviluppa a valle dello sfioratore possiede larghezza utile di 6 m, altezza pari a 5 m, e quote di scorrimento variabili tra 284.59 – 283.04 m s.l.m..

Nel seguito si valuta analiticamente la possibilità di affidare a tale opera l'evacuazione della portata millenaria; con riferimento alle sezioni indicate in **Figura 27**, in caso della portata millenaria

$$Q = 194.47 \frac{m^3}{s}$$

alla SEZIONE 1 si instaura il carico $h_1 = \left[\frac{Q}{C_q \cdot L \cdot \sqrt{2g}} \right]^{\frac{2}{3}} = 1.36 \text{ m}$, corrispondente alla quota assoluta $H_1 = 1.36 +$

286.5 = 287.86 m s.l.m.. Alla SEZIONE 2 si genera la condizione critica, a causa delle ingenti perdite di



carico al passaggio dalla SEZIONE 1 alla SEZIONE 2: la SEZIONE 1 costituisce di fatto un restringimento, ad imbuto, molto concentrato. La condizione critica corrisponde al tirante

$$h_2 = \left[\frac{Q^2}{B^2 \cdot g} \right]^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{194.47^2}{6^2 \cdot g} \right]^{\frac{1}{3}} = 4.74 \text{ m}$$

e al carico idraulico di monte $H_2 = 4.74 \cdot \frac{3}{2} + 284.59 = 291.7 \text{ m s.l.m.}$.

Ne deriva che, essendo $H_2 > H_1$, il deflusso all'ingresso dello sfioratore risulta fortemente rigurgitato, poiché la capacità di evacuazione del sistema è condizionata dalla capacità di scarico del canale fuggatore all'imbocco del canale medesimo.

Tale soluzione impone di realizzare un elemento di ritenuta idraulica a valle dello SF2 con quota sommitale di coronamento da porsi in sicurezza rispetto alla massima quota idraulica di esercizio $H_{\text{coronamento}} \geq 291.7 + 1.5 = 293.2 \text{ m s.l.m.}$. Considerando che la quota d'alveo a valle dello SF2 è posta nell'intorno di 272.51 m s.l.m. ne deriva l'esigenza di prevedere un elemento di ritenuta di altezza (secondo L. 584/94) pari a $\Delta H = H_{\text{coronamento}} - 272.51 = 20.69 \text{ m}$: ne consegue l'ingresso nell'ambito delle grandi dighe, da ritenersi inappropriato per il presente progetto, che fissa come obiettivo la salvaguardia di una diga esistente a mezzo di un diversivo idraulico.

Si può quindi asserire che l'attuale sfioratore SF2 non è idoneo allo smaltimento della portata millenaria, per n°2 motivazioni principali:

- La ridotta affidabilità idraulica dello sfioratore, da attribuirsi al rigurgito idraulico generato dal restringimento all'imbocco del canale. A tale aspetto squisitamente idraulico si aggiunge anche la vetustà dell'opera, che può ulteriormente condizionare la funzionalità idraulica del manufatto
- La necessità di ricorrere alla realizzazione di un argine in terra di altezza equiparabile a quella di una grande diga (altezza superiore ai 15 m).

Si intende quindi esaminare la possibilità di prevedere un adeguamento dell'attuale opera di diversione, al fine di soddisfare i requisiti di sicurezza idraulica preposti.

Potrebbe ad esempio valutarsi la possibilità di approfondire la quota di scorrimento dell'attuale canale all'imbocco, attualmente pari a 284.59 m s.l.m. , di circa 10.69 m , raggiungendo quota pari a $284.59 - 10.69 = 273.9 \text{ m s.l.m.}$. Si eviterebbe così di prevedere un argine di ritenuta di dimensioni equivalenti ad una grande diga.

Tale scelta progettuale deve accompagnarsi con la realizzazione di una nuova captazione; in **Figura 28**, si ipotizzano n°2 alternative:

- Un invito "a raso" (opera di captazione tipo A1 in **Figura 28**), ovvero alla quota dello stesso canale (273.9 m s.l.m.) e con pareti divergenti;

- Un'opera di captazione con petto stramazzone a quota emergente rispetto al fondo canale, rievocando l'attuale soluzione esistente di sfioro (SF2).

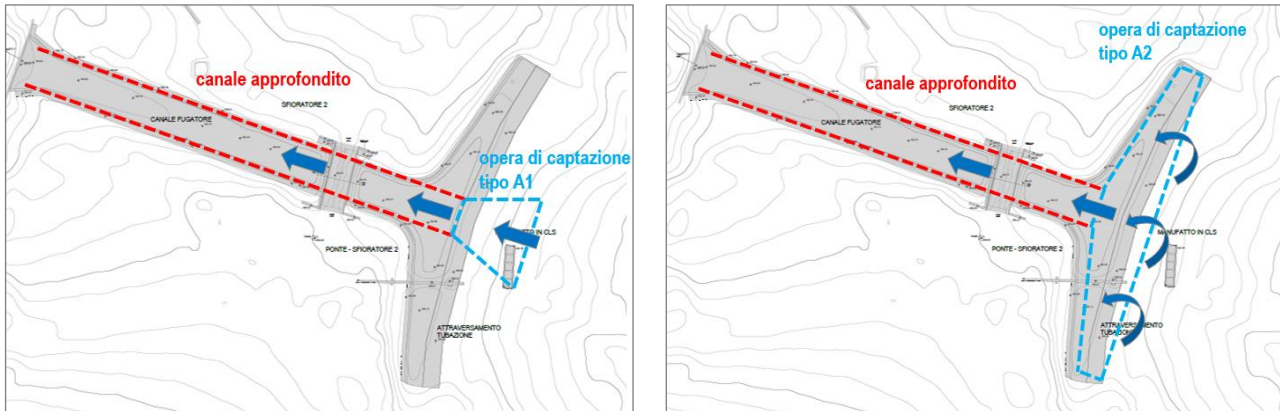


Figura 28 : Alternative per l'adeguamento dell'attuale sfioratore previo approfondimento delle quote di scorrimento

Tali soluzioni pongono alcune criticità, elencate e commentate nel seguito, che ne stabiliscono il grado di fattibilità:

- L'approfondimento del canale, valido per entrambi i casi A1 e A2 raffigurati in **Figura 28**, richiede opere geotecniche di notevole impegno, che non assicurano l'integrità delle sponde del canale esistente e la sua, seppure parziale, conservazione
- L'opera di captazione tipo A1 (immagine a sinistra in **Figura 27**) si pone a quota 273.9 m s.l.m. , come già suddetto, pari approssimativamente alla quota di fondo alveo antistante. Ne deriva che in condizioni ordinarie di esercizio non si verrebbe a creare nessun specchio liquido a monte, che costituisce invece uno dei requisiti complementari prefissati per conferire una connotazione di pregio ambientale, turistico e rievocativo alla nuova opera
- L'opera di captazione tipo A2 (immagine a destra in **Figura 27**) richiede necessariamente la demolizione dell'opera di presa attuale, elemento di archeologia industriale, e pone le stesse criticità di natura idraulica su descritte attribuite anche all'opera esistente (eccessivo rigurgito prodotto dal restringimento all'imbocco del canale).

La scelta citata come SOLUZIONE 0 è pertanto da ritenersi non percorribile per gli aspetti critici se non fallimentari su commentati: è quindi da assumersi che il recupero e/o l'adeguamento dell'attuale sistema di sfioro non adempie ai requisiti prefissati di sicurezza idraulica, di pregio ambientale e di conservazione delle opere di archeologia industriali esistenti. L'obiettivo di messa in sicurezza idraulica dell'attuale diga di Bunnari Basso deve essere quindi conseguito prevedendo opere di nuova realizzazione, in grado di fronteggiare efficacemente la portata millenaria.



Nel seguente capitolo si propongono quindi **n°3 alternative progettuali** in grado di soddisfare, parzialmente o complessivamente, i criteri sopra enunciati.



9 ANALISI DELLE ALTERNATIVE PROGETTUALI

In questo capitolo della relazione sono descritte le 3 soluzioni progettuali che sono state individuate dallo scrivente RTP come possibili alternative per la dismissione e messa in sicurezza della Diga di Bunnari Basso.

Si tratta in particolare di 3 soluzioni tutte allineate con i requisiti principali dell'Amministrazione e degli Enti coinvolti e che soddisfano completamente il quadro esigenziale del progetto per quanto riguarda la messa in sicurezza idraulica della diga di Bunnari Basso (v. par. 2.1). Queste soluzioni investigano in maniera molto equilibrata e completa il ventaglio delle possibili alternative adatte a conseguire in parte o totalmente anche i requisiti complementari enunciati nel par. 2.2.

9.1 SOLUZIONE A – CANALE A CIELO APERTO

La Soluzione A si basa sulla realizzazione di un'opera di ritenuta idraulica che fissa la quota di massima regolazione a **279.7 m** s.m.m., generando uno specchio d'acqua ($12'964.31 \text{ m}^2$) che si estende per una notevole porzione nell'invaso sotteso, con il beneficio di generare una risorsa idraulica semipermanente ad arricchimento del contesto ambientale e paesaggistico rinnovato dalle opere in progetto.

Un argine è ubicato a ca. 200 m a monte del paramento di monte della diga, subito dopo il gomito creato dall'ansa del fiume, e consente di mantenere inalterato l'ambiente naturale attualmente creato a ridosso della diga, e quindi anche la visuale panoramica dell'opera di sbarramento e del suo coronamento.

L'opera di by-pass idraulico è costituita da un **canale a cielo aperto** di larghezza pari a 8 m, ubicato in corrispondenza dell'attuale canale fugatore del 2° sfioratore posto in sponda sinistra idraulica. Il canale, per la sua configurazione e per la sua obbligata quota idraulica, crea una profonda e marcata incisione morfologica, che si colloca in corrispondenza del piede della frana dichiarata ed illustrata nei documenti geologici a base di progetto. Per questo motivo, la realizzazione dell'opera richiede importanti opere di sostegno e di stabilizzazione degli scavi.

I principali corpi d'opera che compongono la soluzione A sono i seguenti:

- argine di ritenuta idraulica;
- opera di sfioro laterale, costituita da muro con stramazzo superiore sagomato a Scimemi-Creager, che si sviluppa per un'estensione di 50 m;
- vasca colletttrice di portata, costituita da un canale a sezione rettangolare leggermente inclinato, allo scopo di raccogliere la portata in ingresso dallo sfioratore laterale e trasferirla al canale fugatore;
- canale fugatore, caratterizzato da una sezione rettangolare di pendenza superiore a quella della vasca;
- opera di dissipazione a valle, costituita da rampa parabolica che accelera la corrente e da un dissipatore a sci che indirizza la corrente verso l'alto.

La Soluzione A è illustrata in dettaglio nelle tavole 2020_0275_002 GEN D002 e 2020_0275_002 GEN D003, nella seguente figura è riportato uno stralcio planimetrico dell'alternativa proposta:



Figura 29 : Soluzione A – Stralcio planimetrico

9.1.1 Criteri idraulici

L'opera concepita come sopra è dimensionata per smaltire la portata massima riferibile a periodo di ritorno pari a $T_r=1000$, che, dalle stime svolte nel presente studio, risulta pari a $194.47 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'opera idraulica è concepita con il duplice obiettivo di collettare la portata a cielo aperto, e di generare, alla presa, un battente idraulico significativo.

Il canale collettore riceve la portata dallo stramazzo laterale di sviluppo pari a 50 m ed è dimensionato per evitare di generare rigurgito alla sezione di monte: la quota massima del profilo idraulico che si genera lungo lo stramazzo è pertanto inferiore alla quota riferita a 2/3 del carico idraulico che insiste sullo stramazzo medesimo.

Dalla sezione di valle del canale collettore si diparte il canale fugatore, con pendenza pari a circa 1.57 %, di modo da generare la condizione critica al raccordo tra il canale collettore ed il canale fugatore.

Il canale fugatore termina con l'opera di dissipazione, costituita da un salto di sci che indirizza il getto idraulico verso l'alto con inclinazione di 35° rispetto all'orizzontale. Il salto è preceduto da rampa di discesa che genera 11.54 m di dislivello altimetrico, necessaria per adattare la conclusione del canale alla morfologia altimetrica del versante: la presenza della rampa si abbina con il dissipatore a salto di sci, poiché accelera il deflusso e pone a sicura distanza l'impatto del getto in uscita dallo sci con l'alveo esistente a valle; tale



impatto si realizza a distanza di circa 30-35 m, considerando gli effetti di inglobamento dell'aria che dissipano parte dell'energia cinetica posseduta dal getto. Il rivestimento dell'alveo a valle del salto di sci si estende per ca. 35 m.

9.1.2 Descrizione delle opere civili

L'argine di ritenuta idraulica avrà un'altezza di ca. 10 m, con pendenza dei paramenti valle e monte di 1 (V) : 1,6 (H). Il corpo dell'argine sarà formato da un rilevato in materiale tout-venant proveniente dagli scavi del canale; un nucleo centrale in materiale fino fungerà da barriera impermeabile. In funzione della permeabilità della fondazione, il nucleo sarà eventualmente prolungato con uno schermo di diaframmi plastici. I paramenti di valle e di monte saranno protetti da una scogliera di massi ciclopici.

Lo sfioro laterale e la sua vasca collettoria saranno costituiti da un manufatto in c.a. con un muro di stramazzo sagomato a Scimemi-Creager, che si svilupperà per un'estensione complessiva di ca. 50 m. Il suo scavo, previsto in parte in terreno sciolto composto da detriti di versante e in parte in roccia, sarà sostenuto con una berlinese di micropali tirantata.

Il canale by-pass si svilupperà per ca. 90 m in asse al canale fuggatore dell'attuale 2° sfioratore. Lo scavo imponente che raggiungerà per la maggior parte del tracciato ca. 15 m di profondità sarà eseguito anch'esso grazie alla realizzazione di una paratia berlinese tirantata. Questa berlinese dovrà essere adeguatamente dimensionata in modo da sopportare le spinte provenienti dalla sopra-citata frana che interessa il versante direttamente inciso dal canale. Il fondo del canale e le pareti laterali saranno rivestite in c.a., dei puntoni in c.a. stabilizzeranno lateralmente le pareti contro la spinta delle terre.

L'opera di dissipazione a valle sarà costituita da una rampa parabolica di accelerazione seguita da un dissipatore a sci. Il manufatto sarà interamente rivestito in c.a. Nella zona di impatto del getto l'alveo sarà protetto con una scogliera in massi ciclopici cementati.

9.1.3 Valorizzazione del territorio

La soluzione in esame intende promuovere la valorizzazione del territorio attraverso una serie di opere che consentiranno di ottenere diversi vantaggi dal punto di vista ecologico, ambientale e turistico. Sotto il profilo ecologico, sarà possibile, tramite la formazione di un specchio d'acqua a carattere semipermanente:

- mantenere, ripristinare, far crescere le fasce di pertinenza fluviale;
- favorire la formazione di microhabitat ai piedi delle scarpate, grazie alla presenza di vegetazione, ristagni d'acqua, ecc.;
- creare una cosiddetta "area di margine" caratterizzata dalla transizione tra l'ambiente acquatico e quello terrestre, idonea all'attecchimento e allo sviluppo di comunità vegetali ed animali con conseguente aumento degli habitat disponibili, della biodiversità e del potere auto depurante.

Inoltre l'intervento è in grado di coniugare le necessità idrauliche agli aspetti legati alla fruibilità del territorio, attraverso la creazione di percorsi integrati nel contesto naturale, dove l'argine diventa un elemento di congiunzione tra le due sponde opposte dell'alveo.

9.2 SOLUZIONE B – GALLERIA LUNGA

La soluzione B si contraddistingue per la creazione di una ritenuta idraulica posta a quota di **275 m s.m.m.**, che si estende per una discreta porzione nell'invaso sotteso.

L'estensione di tale specchio idraulico (4,882.03 m²) corrisponde ad una dimensione intermedia rispetto a quella generata con la Soluzione A (12,964.31 m²) e con la Soluzione C (estensione pressoché nulla, poiché l'opera di presa è posta sul fondo dell'invaso).

Come per la Soluzione A, l'argine è ubicato subito dopo il gomito creato dall'ansa del fiume, e mantiene inalterato l'ambiente naturale nell'immediata vicinanza del paramento monte della diga.

Il by-pass idraulico è costituito da una **galleria** naturale di diametro interno di 5,5 m e di lunghezza ca. 150 m, che si sviluppa interamente in roccia attraversando lo sperone roccioso in sponda sinistra della diga.

I principali corpi d'opera che compongono la Soluzione B sono i seguenti:

- argine di ritenuta idraulica;
- opera di captazione, costituita da muro con stramazzo superiore Scimemi-Creager, a n.3 settori;
- galleria a sezione di ferro di cavallo, preceduta da un corto tratto di scivolo di raccordo;
- opera di dissipazione costituita da un bacino di smorzamento a valle.

La Soluzione B è illustrata in dettaglio nelle tavole 2020_0275_002 GEN D004 e 2020_0275_002 GEN D005, nella seguente figura è riportato uno stralcio planimetrico dell'alternativa proposta:

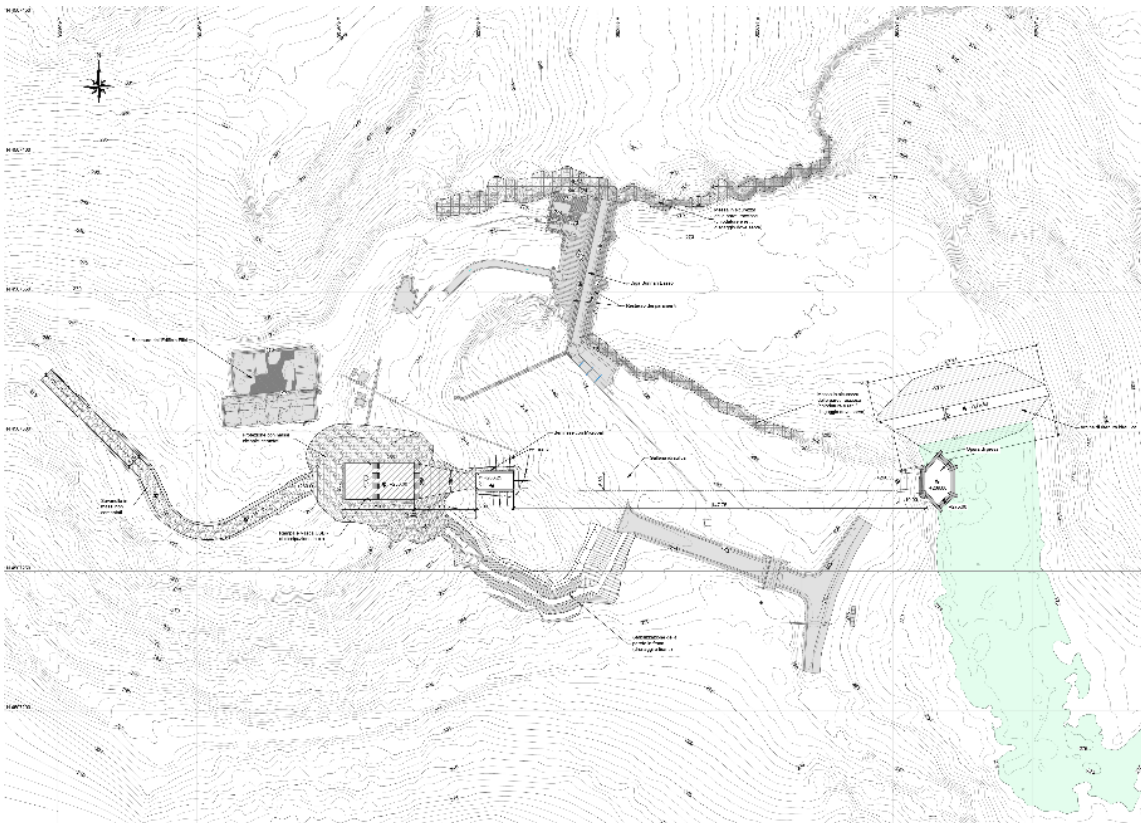


Figura 30 : Soluzione B – Stralcio planimetrico



9.2.1 Criteri idraulici

L'opera idraulica è dimensionata per il picco di portata dell'evento millenario $T_r=1000$, pari a $Q=194.47 \text{ m}^3/\text{s}$. L'opera è concepita per funzionamento idraulico a pelo libero, non in pressione, con livello idraulico di attivazione superiore di circa 3 m rispetto alla quota di fondo invaso. Tali criteri sono stati conseguiti prevedendo un diversivo in galleria.

L'opera di presa è costituita da uno stramazzo frontale sagomato e suddiviso in n. 3 settori che alimentano una vasca di carico. La vasca precede uno scivolo ($\Delta H=3\text{m}$) che assicura la condizione di corrente critica al suo imbocco e che restringe la larghezza di deflusso da 6.8 m (imbocco) fino a 5.5 m. Segue galleria a sezione corrente a ferro di cavallo, di larghezza pari a 5.5 m, dove la corrente di deflusso si mantiene a regime supercritico.

La dimensione altimetrica e planimetrica dello scivolo scongiura la possibilità di generare rigurgito al livello idraulico dell'invaso che insiste sullo stramazzo di presa. Il raccordo tra la sezione finale dello scivolo e la sezione iniziale della galleria presenta un salto di 0.5 m funzionale a sopperire alle perdite di carico al passaggio tra le due sezioni: la corrente si mantiene pertanto in regime supercritico. L'assetto altimetrico della galleria è tale da assicurare una velocità di deflusso pari a circa 10 m/s e un grado di riempimento non superiore a 70%.

L'opera di dissipazione è costituita da una vasca (stilling basin) che presenta un salto idraulico di 9.32 m e un'espansione planimetrica, che conferiscono al deflusso un numero di Froude idoneo per inserire un dissipatore del tipo USBR III. La vasca è poi terminata da un gradino che si raccorda al fondo alveo esistente. La vasca è funzionale a contenere il risalto idraulico, che assicura la dissipazione del carico cinetico in uscita dalla galleria.

9.2.2 Descrizione delle opere civili

L'argine di ritenuta idraulica avrà un'altezza di ca. 8 m, con pendenza dei paramenti di valle e di monte pari a 1 (V) : 1,6 (H). Il corpo dell'argine sarà formato da un rilevato in materiale tout-venant proveniente dagli scavi della galleria, dei suoi imbocchi e della vasca di dissipazioni; un nucleo centrale in materiale fino fungerà di barriera impermeabile. In funzione della permeabilità della fondazione, il nucleo sarà eventualmente prolungato con uno schermo di diaframmi plastici. Il paramento valle e monte sarà protetto da una scogliera con massi ciclopici.

L'opera di captazione sarà costituita da un manufatto in c.a. con un muro di stramazzo superiore sagomato a Scimemi-Creager, che si svilupperà in 3 settori intervallati da n. 2 pile intermedie e contenuti da n. 2 muri laterali. Questa geometria creerà a valle dello sfioro una vasca di carico, che convoglierà l'acqua in galleria tramite uno scivolo di raccordo.

La galleria idraulica, a forma di cavallo e di diametro interno idraulico di 5,5 m, si svilupperà per ca. 150 m interamente in roccia. Lo scavo sarà realizzato adoperando le tecniche classiche di scavo in tradizionale con esplosivi, martellone e scavatore, in funzione della qualità della roccia. La messa in sicurezza dello scavo all'avanzamento del fronte verrà eseguita con chiodatura radiale e spritz-beton della volta se la roccia è di



buona qualità, ovvero con centine metalliche e spritz-beton se la roccia si presenta fratturata. La galleria sarà interamente rivestita a fine scavo con un rivestimento di calcestruzzo.

L'imbocco in galleria lato monte potrà essere realizzato semplicemente previa messa in sicurezza della parete rocciosa d'imbocco con chiodatura e posa di reti paramassi. Lo sbocco invece richiederà verosimilmente la realizzazione di una berlinese tirantata, interessando probabilmente qualche detrito di versante al piede del pendio.

L'opera di dissipazione a valle sarà costituita da un bacino di smorzamento, con fondo della vasca a ca. 4 m sotto la quota del terreno naturale in alveo.

Il fondo della vasca sarà rivestito con una platea in c.a. con elementi dissipativi sporgenti. Le sue scarpate invece saranno protette con massi ciclopici cementati.

9.2.3 Valorizzazione del territorio

Gli specifici obiettivi di valorizzazione del territorio dal punto di vista ecologico, ambientale e turistico sono allineati a quelli proposti nella Soluzione A. Anche in questo caso le scelte progettuali comportano la formazione di uno specchio d'acqua e di un argine, che produrrebbero gli stessi effetti vantaggiosi già illustrati in dettaglio per la precedente soluzione alternativa.

9.3 SOLUZIONE C – GALLERIA CORTA

La Soluzione C si contraddistingue perché composta da una soglia di sfioro all'opera di presa posta alla quota di **270 m s.m.m.**, corrispondente circa alla quota di fondo invaso nell'area di ubicazione delle relative opere.

In questa soluzione non si genera pertanto una ritenuta idraulica in condizioni ordinarie, come nei casi precedenti delle Soluzioni A e B, e si evitano opere in elevazione all'imbocco della galleria; infatti, al fine di sfruttare efficacemente la derivazione di portata, le opere di imbocco risultano derivate in scavo.

Un argine di ridotta altezza $H=4,5m$ sarà tuttavia costruito direttamente a ridosso del muraglione della diga, con la funzione di protezione contro le spinte idrauliche generate durante gli eventi di sfioro della diga di Bunnari Alto.

Il by-pass idraulico, come per la soluzione B, sarà costituito da una **galleria** naturale. Questa galleria, anch'essa completamente ubicata in roccia, sarà molto più corta rispetto alla Soluzione B ($L=87m$), il suo diametro interno rimarrà di 5,5 m con la stessa forma a ferro di cavallo.

Rispetto alle soluzioni A e B, la quota di scorrimento dell'acqua nel by-pass sarà molto più bassa. La quota di sbocco della galleria corrisponderà all'incirca con quella del fondo dell'alveo, consentendo così un'opera di dissipazione poco impattante, a quota alveo.

I principali corpi d'opera che compongono la Soluzione C sono i seguenti:

- argine di ritenuta idraulica;
- opera di captazione, ricavata con intervento locale di approfondimento del fondo invaso, e pertanto riconducibile ad un salto di fondo che genera una vasca di carico;



- scivolo di raccordo tra la vasca di carico e la sezione iniziale della galleria ricavata in roccia;
- galleria a sezione di ferro di cavallo
- opera di dissipazione costituita da bacino di smorzamento all'uscita della galleria.

La Soluzione C è illustrata in dettaglio nelle tavole 2020_0275_002 GEN D006 e 2020_0275_002 GEN D007, nella seguente figura è riportato uno stralcio planimetrico dell'alternativa proposta:



Figura 31 : Soluzione C – Stralcio planimetrico

9.3.1 Criteri idraulici

L'opera idraulica è concepita per derivare l'intera portata di picco generata da evento millenario $T_r=1000$. L'assetto è stato definito per attivare l'opera senza necessità di battente idraulico significativo: infatti, la presa e successiva vasca di carico è realizzata con opere di solo scavo che garantiscono il funzionamento idraulico a pelo libero dell'intero diversivo, realizzato in galleria.

Analogamente alla Soluzione B, l'opera di presa è seguita dalla vasca di carico e da uno scivolo di raccordo altimetrico e planimetrico alla sezione corrente della galleria. La geometria dello scivolo assicura l'instaurarsi della condizione critica al suo imbocco, ed evita di generare rigurgito al livello dell'invaso. La corrente si



mantiene poi supercritica: il raccordo tra lo scivolo e la galleria avviene con salto di 0.5 m, al fine di sopperire alle perdite di carico al passaggio tra le due geometrie; si evita così che si generino fenomeni di risalito.

La geometria altimetrica della galleria è tale da conferire al deflusso velocità nell'intorno di 10 m/s, e grado di riempimento non superiore al 70%.

L'opera di dissipazione è ricavata direttamente sul piano dell'alveo: la quota di scorrimento dello sbocco della galleria è infatti prossima al piano dell'alveo, e l'inserimento di una vasca (stilling basin) richiederebbe un approfondimento eccessivo. Si ricorre quindi ad un'opera di dissipazione di tipo CSU (Colorado State University). La quota idraulica di raccordo al termine dell'opera di dissipazione è assunta pari all'altezza critica.

9.3.2 Descrizione delle opere civili

L'argine di ritenuta idraulica avrà un'altezza molto limitata di soltanto 4,5m, con pendenza dei paramenti valle e monte di 1 (V) : 1,6 (H). Il corpo dell'argine sarà formato da un rilevato in materiale tout-venant proveniente dagli scavi della galleria, dei suoi imbocchi e della vasca di carico; un nucleo centrale in materiale fine fungerà di barriera impermeabile. Avendo una funzione di ritenuta idraulica molto contenuta (battente idraulico ridotto ad un paio di metri) e limitata nel tempo agli soli eventi di sfioro della Diga di Bunnari Alto, non sarà necessario prevedere un prolungamento dello schermo impermeabile in fondazione. Tuttavia, il paramento valle e monte sarà protetto da una scogliera con massi ciclopici.

L'opera di captazione sarà costituita da un invito di forma circolare ricavato in scavo nel fondo dell'alveo, generando una vasca di carico che sarà interamente rivestita da massi ciclopici cementati. Uno scivolo di raccordo collegherà la vasca di carico alla sezione iniziale della galleria, abbassando la quota di scorrimento ad una quota di + 262 m s.m.m., cioè 8 m sotto la quota del fondo dell'alveo (+ 270 m s.m.m.). Lo scavo di tale scivolo verrà realizzato con berlinese tirantata.

La galleria idraulica avrà stessa forma e stesso diametro di quella della soluzione B (forma di cavallo con diametro interno idraulico di 5,5m), ma sarà nettamente più corta (L=87m contro L=150m per la soluzione B). Lo scavo, interamente in roccia, verrà realizzato adoperando le tecniche classiche di scavo in tradizionale con esplosivi, martellone e scavatore, in funzione della qualità della roccia. Vista l'immediata vicinanza del muraglione in pietrame della Diga Basso, un'attenzione particolare sarà portata alle vibrazioni generate dalle volate che ne potranno anche vietare l'utilizzo. La messa in sicurezza dello scavo della galleria sarà eseguita con posa di rivestimento provvisoria di tipo chiodatura e spritz-beton oppure centine e spritz-beton in funzione della qualità della roccia, come per la galleria della soluzione B. Anch'essa sarà interamente rivestita a fine scavo con un rivestimento in calcestruzzo.

L'imbocco sarà ubicato al piede delle falesie rocciose poste sotto il primo sfioratore della diga e sarà eseguito in roccia, mentre lo sbocco a valle potrà necessitare di una berlinese tirantata per sostenere lo scavo nei detriti di versante se dovessero essere presenti.

La quota di scorrimento della galleria allo sbocco coinciderà con la quota del fondo dell'alveo; l'opera di dissipazione consisterà semplicemente in una platea di protezione dell'alveo in C.A. corredata da elementi dissipativi sporgenti in C.A.

MANDATARIA:

MANDANTI:



9.3.3 Valorizzazione del territorio

A differenza delle soluzioni precedenti, la Soluzione C determina la creazione di un corso d'acqua a carattere fluviale, di superficie modesta, che apporta solo limitati miglioramenti allo stato attuale dell'ambiente, in quanto non consente l'instaurarsi di condizioni tali per cui si possano sviluppare microambienti idonei alle specie vegetali ed animali.

Inoltre la creazione dell'argine in prossimità del corpo diga non ne consente la fruizione quale elemento di connessione tra i fronti che definiscono l'alveo.



10 OPERE ACCESSORIE

10.1 OPERE DI STABILIZZAZIONE DEI VERSANTI

In accordo con le prescrizioni del Servizio Nazionale Dighe contenute nel verbale dell'UTD di Cagliari del 22.10.18, gli interventi prevederanno la stabilizzazione delle pareti rocciose delle sponde sinistra e destra del Bunnari nei dintorni della Diga Bassa e della parete in frana ubicata all'uscita del canale dello Sfiatore 2.

La stabilizzazione delle pareti rocciose delle sponde sinistra e destra del Bunnari sarà eseguita mediante **chiodatura** e posa di **reti** aderenti delle zone instabili. Mirati interventi di disaggio verranno anche eseguiti per rimuovere blocchi di roccia in equilibrio precario alla sommità dei versanti verticali.

Un rilievo geologico-geomeccanico di dettaglio sarà eseguito nelle prossime fasi progettuali e consentirà di definire l'estensione degli interventi di stabilizzazione necessari alla messa in sicurezza dell'area.

La parete ubicata a sinistra dello sbocco del canale fugatore dello Sfiatore 2 invece è interessata da un dissesto verosimilmente innescato dal piccolo affluente di sinistra idrografica alimentato in passato anche dalle acque provenienti dalla struttura del canale fugatore stesso. Le indagini geognostiche che saranno eseguite nelle prossime fasi di progettazione consentiranno di definire l'estensione areale esatta del dissesto e la sua profondità. Si prevede comunque fin da ora di procedere ad un **rimodellamento della parete** con alternanza di berme e scarpate, stabilizzate con tirantatura e drenaggio del versante. Le scarpate saranno protette da spritz-beton completamente ricoperto da paramenti in pietra di taglio e tasche vegetali.

10.2 RESTAURO DELL'EDIFICIO FILTRO E DEL MANUFATTO SIFONE

L'intervento di restauro nasce dall'esigenza di ridare leggibilità ai manufatti, assicurandone la conservazione e trasmissione per le future generazioni. Il progetto di conservazione dell'Edificio Filtro è profondamente legato al "senso della memoria" che affiora grazie alla particolare conformazione del manufatto e definisce una serie di interventi destinati ad arginare gli avanzati fenomeni di degrado che interessano le superfici, senza alterare l'articolazione planimetrica propria della funzione originaria. Le istanze di conservazione sono accompagnate dall'esigenza di preservare i caratteri percettivi dello spazio in oggetto. Pertanto verrà privilegiato il **restauro filologico**, attraverso interventi compatibili, distinguibili e reversibili, che sviluppino il potenziale narrativo dei luoghi. In particolare, il principio della reversibilità è alla base della progettazione degli spazi destinati ad ospitare piccole esposizioni inerenti la storia del manufatto, con elementi facilmente rimovibili. L'intervento sul piccolo manufatto sifone seguirà i medesimi principi, intervenendo sui fenomeni di degrado e dissesto in atto.

10.3 RESTAURO DEI PARAMENTI DELLA DIGA

La struttura della diga è parte integrante del processo di recupero del complesso di Bunnari, quale elemento da preservare e rendere visitabile, al fine di dare leggibilità alla propria storia. L'intervento sul coronamento è indirizzato alla fruizione in sicurezza, quale punto privilegiato di osservazione del panorama circostante.

Il restauro dei paramenti del muraglione seguirà i principi precedentemente descritti attraverso operazioni destinate ad assicurare la **conservazione del manufatto**, senza alterarne i caratteri tipologici e costruttivi.



11 STIMA SOMMARIA DELLE OPERE

È stata condotta una stima dei costi di costruzione legati alle 3 Soluzioni progettuali alternative (A, B e C) illustrate nel precedente cap. 8, includendo per ciascuna Soluzione sia le opere specifiche alla singola alternativa, e sia le opere accessorie che sono comuni alle 3 soluzioni (v. cap. 10: opere di stabilizzazione dei versanti, restauro dell'Edificio Filtro e del manufatto Sifone, restauro del paramento della diga).

	SOLUZIONE A Canale cielo aperto	SOLUZIONE B Galleria lunga	SOLUZIONE C Galleria corta
By-pass idraulico			
Argine di ritenuta idraulica	457.000,00 €	348.000 €	168.000 €
Sfioro laterale e vasca collettrice	1.092.000,00 €	273.000 €	494.000 €
Canale cielo aperto	3.619.000,00 €	1.496.000 €	814.000 €
Rampa e salto da sci	170.000,00 €	330.000 €	350.000 €
Protezione alveo, sistemazione fluviale e rilevati vari	217.000,00 €	305.000 €	351.000 €
TOTALE PARZIALE	5.560.000,00 €	2.750.000 €	2.180.000 €
Stabilizzazione versanti			
Messa in sicurezza pareti rocciose e Sistemazione frana	400.000 €	400.000 €	400.000 €
Interventi di restauro			
Demolizione e simili	50.000 €		
Restauro Diga	250.000 €		
Restauro edificio filtri	250.000 €		
Sistemazioni esterne/ percorsi	100.000 €		
TOTALE PARZIALE	650.000 €	650.000 €	650.000 €
TOTALE	6.610.000 €	3.800.000 €	3.230.000 €
Cantierizzazione e Oneri della sicurezza (10%)	660.000 €	380.000 €	320.000 €
TOTALE COSTO DELLE OPERE	7.270.000 €	4.180.000 €	3.550.000 €

Tabella 4: Stima sommaria delle opere per le 3 Soluzioni

Per la stima sommaria delle opere lo scrivente RTP ha considerato costi parametrici delle opere derivanti da progetti analoghi in cui è stato direttamente coinvolto, ed ha eseguito stime analitiche degli interventi e delle lavorazioni basandosi sui seguenti Prezzari di riferimento:

- Regione Autonoma della Sardegna - Prezziario Opere Pubbliche 2019;
- ANAS - Listino Prezzi 2020. Nuove costruzioni. Manutenzione straordinaria.

In tutti e 3 i casi sono stati considerati e sommati ai costi delle opere i costi di accantieramento e della Sicurezza, calcolati forfettariamente come pari al 10% del costo delle opere.

MANDATARIA:

43

Lombardi

Lombardi Ingegneria S.r.l.

MANDANTI:

REGIONAL**Metassociati**
architettura ingegneria urbanistica**Lombardi**

Lombardi SA Ingegneri Consulenti

ARCHEOLOGO
N. FADDA



12 BILANCIO DELLE MATERIE

Per le 3 Soluzioni alternative analizzate è stata condotta un'analisi preliminare riguardante la gestione delle terre ed i bilanci delle materie.

In linea del tutto generale, si può prevedere un **riutilizzo** in cantiere delle terre di scavo provenienti dallo scavo del canale, delle gallerie, degli imbocchi e delle vasche per la costruzione degli argini. Anche per il rivestimento delle opere di dissipazione costituito da scogliere di massi ciclopici cementati si può prevedere un importante riutilizzo dei materiali estratti dagli scavi, come pure si può certamente prevedere l'utilizzo in sito dell'esubero delle terre per piccole opere di rimodellamento del terreno (rimodellamento dell'alveo a valle della diga, realizzazione di percorsi pedonali, ecc...).

Il bilancio delle terre in termini di volumi e pesi è sintetizzato nelle seguenti tabelle:

	SCAVI	RIPORTI	
	Volume SCAVI (mc)	Volume ARGINE (mc)	Volume SCOGLIERA (mc)
	Imbocchi-Galleria-Canale-Vasche	Materiale tout-venant e materiale fine	Protezione argine e vasca dissipazione
Soluzione A - Canale cielo aperto	17.800	11.300	1.900
Soluzione B - Galleria lunga	13.400	9.100	2.300
Soluzione C - Galleria corta	9.100	3.600	900

peso specifico (ton/mc) 2,3 2 2,2
media tra roccia e terreno sciolto

	SCAVI	RIPORTI		ESUBERI	% tra Esuberi e Scavi
	Peso SCAVI (ton)	Peso ARGINE (ton)	Peso SCOGLIERA (ton)	Peso (ton)	
	Imbocchi-Galleria-Canale-Vasche	Materiale tout-venant e materiale fine	Protezione argine e vasca dissipazione		
Soluzione A - Canale cielo aperto	40.940	22.600	4.180	14.160	35%
Soluzione B - Galleria lunga	30.820	18.200	5.060	7.560	25%
Soluzione C - Galleria corta	20.930	7.200	1.980	11.750	56%

Tabella 5: Bilancio materie per le 3 Soluzioni

In tutte e 3 le soluzioni risulta un esubero di materiale, ma per quantità relativamente modeste. La Soluzione B è quella che minimizza gli esuberanti e massimizza i riutilizzi.

Il materiale da conferire in discarica autorizzata secondo quanto previsto dalle norme vigenti sarà quindi ridotto al minimo, e limitato al materiale le cui caratteristiche non risultino idonee al reimpiego, o dal punto di vista ambientale, ovvero dal punto di vista geotecnico.



13 TEMPI DI REALIZZAZIONE

Per le 3 Soluzioni analizzate sono stati valutati i tempi di realizzazione delle opere, sesunti sulla base delle esperienze degli scriventi in opere analoghe.

Di seguito è presentato un cronoprogramma di massima per la realizzazione delle singole proposte, considerando delle cadenze di produzione e di avanzamento degli scavi congrui con la prassi di piccoli cantieri, come potrà essere quello di Bunnari.

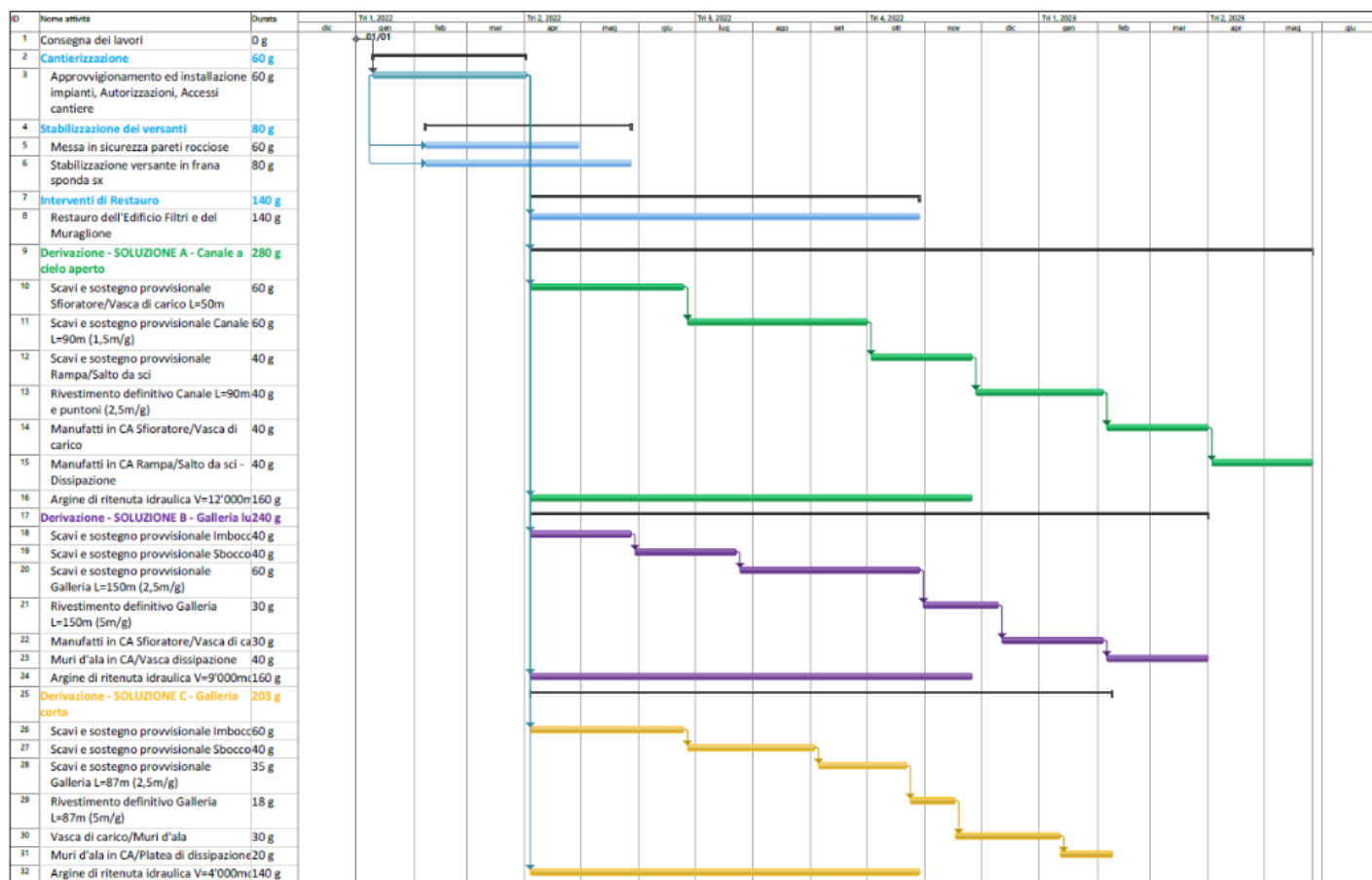


Figura 32: Cronoprogramma dei lavori per le 3 Soluzioni alternative analizzate

Per le varie soluzioni risultano tempistiche di realizzazione delle opere non tanto differenti, e comprese tra 13 mesi (Soluzione C) e 17 mesi (Soluzione A). Nei tempi stimati sono considerati inclusi quelli necessari alla preparazione degli accessi al cantiere e alla cantierizzazione, comuni alle 3 alternative progettuali analizzate.

MANDATARIA:

MANDANTI:



14 ANALISI MULTICRITERIA DI CONFRONTO DELLE 3 SOLUZIONI

Al fine di confrontare le 3 Soluzioni progettuali precedentemente illustrate, gli scriventi hanno condotto un'attenta e approfondita **Analisi Multicriteria**, basata sui seguenti parametri fondamentali:

1. Aspetti geologico-geotecnici;
2. Aspetti idraulici;
3. Compatibilità Ambientale e Paesaggistica;
4. Valore Storico-Monumentale;
5. Manutenzione;
6. Tempi di realizzazione;
7. Costi di costruzione.

Con riferimento a ciascuno dei suddetti criteri è stato assegnato un **punteggio compreso tra -5 e +5** sia allo Stato di Fatto (SDF, corrispondente alla non realizzazione di alcun intervento), e sia agli scenari relativi a ciascuna delle 3 Soluzioni (A, B e C) illustrate nel cap. 8.

Per alcuni dei criteri sopra elencati sono stati introdotti anche differenti **sub-criteri** di analisi, opportunamente pesati tramite coefficienti parziali. Nei paragrafi che seguono in questo capitolo sono illustrati e motivati i punteggi assegnati alle alternative progettuali in relazione a ciascun criterio.

14.1 ASPETTI GEOLOGICO-GEOTECNICI

Sotto il punto di vista geologico-geotecnico, la Soluzione A (il canale a cielo aperto) appare, allo stato attuale delle conoscenze di carattere geologico-geotecnico, come la più critica delle tre.

Lo sviluppo del canale presuppone infatti ingenti scavi in trincea, di estensione sensibile sia in altezza che in lunghezza, con conseguenti movimenti terra di entità importante. In più tali scavi si posizionano in prossimità della zona segnalata nei documenti storici pregressi come interessata da una possibile frana di scivolamento nell'ambito della formazione delle Vulcaniti argillificate. La frana, se ne fosse confermata la presenza, coinvolgerebbe spessori dell'ordine di una decina di metri, che andranno opportunamente stabilizzati prima di procedere allo scavo della trincea / canale.

Questa soluzione progettuale comporta pertanto la realizzazione di importanti opere di stabilizzazione della zona di frana e del margine di monte dello scavo.

La Soluzione B (galleria lunga) risulta simile all'opzione della galleria corta in termini di fattibilità ed efficienza tecnica, sempre con esclusivo riferimento agli aspetti progettuali di carattere geologico-geotecnici.

La galleria ha uno sviluppo di media lunghezza, si allontana dal corpo diga e dalle pareti rocciose a maggior verticalità ed asprezza morfologica, indicativamente quindi si ridurranno eventuali problematiche legate alla stabilizzazione delle zone di imbocco. La galleria si sviluppa inoltre ad una sufficiente profondità rispetto al diametro della galleria, e non dovrebbe quindi comportare fenomeni indotti in superficie che sono invece tipici per le gallerie più superficiali.

Da un punto di vista geologico-geotecnico la Soluzione C appare come la migliore opzione progettuale. La galleria si svilupperebbe infatti in corrispondenza dell'ammasso roccioso massivo per una lunghezza ridotta.



Si sottolinea solamente la necessità di realizzare un'adeguata opera di sostegno in corrispondenza delle zone di imbocco al fine di stabilizzare adeguatamente i torrioni rocciosi rilevati e che potrebbero essere soggetti a rischi di ribaltamento/crollo.

Stanti le considerazioni sopra riportate, nella tabella che segue si riportano i punteggi assegnati alle 3 opzioni progettuali analizzate. I punteggi sono stati assegnati con valutazione qualitativa, e sono tutti negativi rispetto allo SDF in quanto in ogni caso le opere geotecniche e gli scavi da realizzare avranno un impatto sugli equilibri degli ammassi rocciosi e dei versanti esistenti.

peso	1
max	5
min	-5
Opzione	CONDIZIONI GEOLOGICHE- GEOTECNICHE
	Punti pesati
	FINALI
SDF	0
Sol. A	-5,00
Sol. B	-1,00
Sol. C	-0,50

Tabella 6 : Valore dei punteggi assegnati per gli aspetti geologico-geotecnici

14.2 ASPETTI IDRAULICI

Le 3 Soluzioni prese in considerazione sono tutte dimensionate per fronteggiare la portata millenaria $T_r=1'000$, che possiede una portata di picco pari a $Q=194.47 \text{ m}^3/\text{s}$.

Dal punto di vista del funzionamento idraulico del sistema costituente ciascuna soluzione, tuttavia, sono stati individuati i seguenti **4 sub-criteri** che connotano le rispettive differenze tra le alternative proposte:

- 1) linearità planimetrica del sistema;
- 2) sicurezza del territorio a valle in relazione alla tipologia delle opere di dissipazione;
- 3) quote idrauliche di attivazione e relativa suscettibilità delle opere geotecniche (sponde e argine);
- 4) rischio di intasamento del diversivo.

Si commentano nei seguenti sotto-paragrafi le prestazioni di ciascuna soluzione in relazione ai sub-criteri individuati.

14.2.1 Linearità planimetrica del sistema di diversione

Il funzionamento idraulico nelle 3 soluzioni proposte è previsto in corrente supercritica, a meno dei tratti di captazione della portata, dove il deflusso è generalmente in corrente subcritica e richiamato dalla condizione critica di valle.



Trattasi quindi di opere dove la corrente acquisisce velocità nell'intorno di 10 m/s e numeri di Froude $Fr=1.5\div 2$: eventuali modifiche geometriche della sezione di deflusso comportano importanti perdite di carico che possono creare disturbo alla corrente, fino a generare, nei casi più estremi, il risalto idraulico.

Pertanto, la presenza di curve lungo il tracciato planimetrico rappresenta un fattore negativo, poiché pone la possibilità di introdurre disturbo alla corrente supercritica, limitando l'affidabilità del funzionamento idraulico attribuito al diversivo.

La presenza di curve deriva dalla morfologia vincolante su cui sono ubicate le opere:

- nella Soluzione A si ha una curva in prossimità del passaggio da canale collettore e canale fuggatore, di ampiezza pari a circa 51° ,
- nella Soluzione B non si hanno curve planimetriche,
- nella Soluzione C è presente una curva di circa 30° all'imbocco.

Secondo tale sub-criterio, quindi, la Soluzione B si presenta preferibile rispetto alle altre due.

I punteggi assegnati alle 3 Soluzioni (con peso pari a 0,40) sono riportati nella successiva **Tabella 7**; i valori assegnati ai punteggi sono tutti positivi per confronto con lo stato di fatto, in quanto la capacità idraulica del sistema attuale è nulla visto che il bacino a monte della diga è mantenuto fuori servizio e quindi non ha nessuna capacità di smaltimento.

14.2.2 Sicurezza del territorio a valle in relazione alla tipologia delle opere di dissipazione

La sicurezza del territorio a valle del diversivo in progetto è connessa all'affidabilità dell'opera di dissipazione idraulica in progetto.

Nel caso della Soluzione A, la dissipazione è affidata ad un salto di sci che genera un impatto tra la vena idraulica ed il fondo alveo: grazie al fenomeno di impatto, l'energia cinetica della corrente a valle del salto è abbondantemente smorzata, in considerazione anche del contributo dell'aria conglobata durante la traiettoria parabolica compiuta prima dell'impatto. È pur vero, tuttavia, che il getto in uscita dal salto di sci tende ad espandersi e a coinvolgere parti d'alveo non sempre protette. Inoltre, la forte dissipazione richiede che si generi un bacino d'acqua a valle del salto di sci con acqua generalmente ferma, che assume carico idraulico per mobilitare la corrente idraulica verso valle. Da considerare che il numero di Froude passa da valori intorno a 5 in corrispondenza del salto a valori pari a circa a 0 (corrispondente a velocità nulla).

Nel caso della Soluzione B, la dissipazione è controllata da un dispositivo che ospita il risalto idraulico della corrente, e che rilascia il deflusso in corrente critica. La dissipazione, in tal caso, diventa piuttosto onerosa, poiché richiede l'opera di maggior estensione rispetto alle restanti, e lascia una componente di energia residua pari alla corrente critica. Da considerare che il numero di Froude passa da valori intorno a 4 a valori pari ad 1, da corrispondere rispettivamente all'ingresso e all'uscita dalla vasca.

Nel caso della Soluzione C, la dissipazione è piuttosto concentrata e assicurata da un'opera posta sul piano del fondo alveo; anche in questo caso, unitamente alla Soluzione B, viene lasciata una componente di energia residua alla corrente, sufficiente per mobilitare la portata di deflusso verso valle, senza azzerare le velocità di deflusso, come invece avviene nella Soluzione A. Da considerare che il numero di Froude passa da valori intorno a 1.74 a valori pari ad 1.0, rispettivamente all'ingresso e all'uscita dalla vasca.



In tal senso, può dirsi che il fenomeno di dissipazione è tanto meglio controllato quanto minore è la differenza tra il numero di Froude all'ingresso e quello in uscita dalla vasca. Una differenza maggiore nei rispettivi numeri di Froude costituisce sempre un elemento di maggiore incertezza, e può condurre, in caso di mancato controllo del fenomeno, ad azioni erosive temibili per la sicurezza del territorio di valle.

I punteggi assegnati secondo questo sub-criterio (con peso pari a 0,30) sono riportati nella successiva **Tabella 7**. I punteggi sono tutti negativi per confronto con lo stato di fatto, e sono stati determinati in maniera quantitativa calcolando la variazione del numero di Froude in corrispondenza della vasca di dissipazione. La Soluzione A risulta la meno efficace, mentre la Soluzione C è quella migliore.

14.2.3 Quote idrauliche di attivazione e suscettività delle opere geotecniche (sponde ed argine)

Rispetto alla suscettibilità che può generare una maggiore quota idraulica di attivazione del diversivo sulle opere geotecniche circostanti, risultano preferibili le soluzioni che assicurano l'esercizio dell'opera entro livelli idraulici contenuti e limitati. Infatti, la presenza di un livello idraulico sostenuto nell'invaso di Bunnari Basso determina sollecitazioni idrauliche sulle sponde dell'invaso e sugli argini di nuova costituzione in materiale sciolto che, anche se ben definite, determinano un grado di esposizione e di rischio delle opere geotecniche.

Considerando le seguenti quote:

	Soluzione A	Soluzione B	Soluzione C
quota minima alveo [m s.l.m.] – Q1	273.0	272.0	268.6
quota max inv [m s.l.m.] – Q2	281.2	277.9	272.0
quota max reg [m s.l.m.] – Q3	279.7	275.0	269.88
Q1-Q2	- 8.2	- 5.9	- 3.4
Q1-Q3	- 6.7	- 3.0	- 1.28

può certamente dirsi che la Soluzione A è quella peggiore, perché espone le sponde dell'invaso e l'argine di ritenuta ad un carico idraulico pari al massimo a 8.2 m, mentre alla Soluzione B corrisponde ad un carico idraulico massimo di 5.9 m. Alla Soluzione C corrisponde invece un carico idraulico massimo di circa 2 m, ed è pertanto la migliore.

Inoltre, in condizioni ordinarie, il carico idraulico che si instaura corrisponde al livello di sfioro, ed è quindi pari a 6.7 m per la Soluzione A, 3.0 m per la Soluzione B e 1.28 m per la Soluzione C.

Rispetto ai suddetti livelli può valutarsi il grado di preferibilità di ciascuna soluzione.

I punteggi assegnati secondo questo sub-criterio (con peso pari a 0,20) sono riportati nella successiva **Tabella 7**. I punteggi sono tutti negativi per confronto con lo stato di fatto, e sono stati assegnati in maniera quantitativa considerando il dislivello (Q1-Q3) scalato rispetto ad un valore limite pari a -5 corrispondente alla soluzione caratterizzata dal massimo dislivello.



14.2.4 Rischio di intasamento del diversivo

La Soluzione A prevede un'opera di by-pass che si attiva ad una quota, corrispondente allo sfioro, pari a 279.70 m s.l.m.; le relative parti d'opera sono tutte a cielo aperto, diversamente dalle opere previste nelle Soluzioni B e C, che si attivano alle rispettive quote 275 e 269.88 m s.l.m. e che sono interrate (gallerie). Ne deriva che in presenza di trasporto solido e di tronchi galleggianti, la Soluzione A è quella meno suscettibile a problemi di intasamento e alle criticità che i solidi sospesi, come ramaglie o tronchi, possono arrecare al deflusso generando fenomeni di rigurgito.

Tra le alternative studiate, la Soluzione C si dimostra invece la meno favorevole, poiché caratterizzata da una presa con soglia di sfioro a quota fondo invaso in grado di recepire il trasporto solido mobilitato durante la piena e come tale suscettibile a fenomeni di intasamento che possono originare rigurgito e funzionamento in pressione della galleria, con conseguente sovrizzo della quota idraulica di invaso.

I punteggi assegnati secondo questo sub-criterio (con peso pari a 0,10) sono riportati nella successiva **Tabella 7**. I punteggi sono tutti negativi per confronto con lo stato di fatto, e sono stati assegnati in maniera qualitativa.

La tabella seguente sintetizza e somma i punteggi assegnati per i singoli sub-criteri riguardanti gli aspetti idraulici:

peso	0,4		0,3		0,2		0,1		1
max	5		5		5		5		
min	-5		-5		-5		-5		
Opzione	Linearità planimetrica		Opere di dissipazione		Suscettibilità geotecnica		Rischio intasamento		ASPETTI IDRAULICI
	Punti assoluti	Punti pesati	Punti assoluti	Punti pesati	Punti assoluti	Punti pesati	Punti assoluti	Punti pesati	Punti pesati FINALI
SDF	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sol. A	1,00	0,40	-5,00	-1,50	-5,00	-1,00	0,00	0,00	-2,10
Sol. B	5,00	2,00	-3,00	-0,90	-2,23	-0,45	-2,50	-0,25	0,40
Sol. C	3,00	1,20	-0,74	-0,22	-0,95	-0,19	-5,00	-0,50	0,29

Tabella 7 : Valore dei punteggi assegnati per gli aspetti idraulici

14.3 COMPATIBILITÀ AMBIENTALE E PAESAGGISTICA

Le 3 Soluzioni prese in considerazione presentano da un lato impatti negativi in quanto mutano le condizioni dei luoghi naturali esistenti, ma allo stesso tempo comportano anche impatti positivi in quanto recuperano delle aree ormai asciutte all'ambiente fluviale originario.

Dal punto di vista della compatibilità ambientale e paesaggistica sono stati individuati i seguenti **5 sub-criteri** che connotano le rispettive differenze tra le alternative progettuali proposte:

- 1) occupazione del suolo;
- 2) alterazione morfologica del sito;
- 3) impatto visivo delle opere;
- 4) valorizzazione delle componenti ambientali;
- 5) fruizione del territorio.



Si commentano nei seguenti sotto-paragrafi le prestazioni di ciascuna soluzione progettuale in relazione ai sub-criteri individuati.

14.3.1 Occupazione del suolo

L'impatto paesaggistico determinato dalla realizzazione di nuove opere è stato valutato considerando le dimensioni dei manufatti fuori terra e della loro estensione: in particolare è stato assunto come parametro di riferimento il volume degli scavi e dei riporti necessari.

I punteggi assegnati a questo sub-criterio (cui è stato dato un peso pari a 0,25) sono riportati nella **Tabella 8**; i punteggi sono tutti negativi rispetto all'opzione SDF, in quanto la realizzazione degli argini e gli scavi per il diversivo e le opere di dissipazione comportano impatti non trascurabili dal punto di vista paesaggistico. La soluzione più impattante è certamente la A in quanto prevede la realizzazione dell'argine più alto e gli scavi a cielo aperto di maggiore estensione. L'alternativa meno impattante è invece la Soluzione C.

L'impatto paesaggistico determinato dall'occupazione del suolo è di tipo permanente.

14.3.2 Alterazione morfologica del terreno

Anche in termini di alterazione morfologica del terreno la Soluzione A rappresenta quella di maggiore impatto, con un'incisione nel terreno di notevole profondità, mentre la Soluzione B è certamente la migliore, grazie alla presenza dell'imbocco di monte della galleria particolarmente incassato.

I punteggi assegnati a questo sub-criterio (cui è stato assegnato un peso pari a 0,25) sono riportati nella **Tabella 8**; i punteggi sono tutti negativi rispetto all'opzione SDF di conservazione dei luoghi nello stato attuale.

14.3.3 Impatto visivo delle opere

Il terzo criterio fa riferimento all'impatto visivo dell'opera rispetto ai punti panoramici presenti nell'area di intervento, impatto che può essere limitato grazie ad opportune misure di mitigazione.

L'impatto visivo della Soluzione A con il canale all'aperto è certamente molto più impattante visivamente rispetto alle soluzioni B e C con gallerie in sotterraneo. Le Soluzioni B e C minimizzano l'impatto visivo agli soli elementi di imbocco e sbocco del tunnel.

Per quanto riguarda l'impatto visivo degli argini, quelli delle soluzioni A e B, di maggior altezza, sono collocati in posizione arretrata rispetto all'ansa del bacino, attenuandone la vista dal coronamento della diga. L'argine invece della soluzione C della galleria corta, anche se di minor altezza, è collocato direttamente a ridosso del muraglione della diga.

Infine le 3 soluzioni prevedono tutte la creazione di un'opera di dissipazione a valle, più impattante per le Soluzioni A (salto da sci) e B (vasca di dissipazione).

Al sub-criterio dell'impatto visivo delle opere è stato assegnato un peso pari a 0.20. I punteggi assegnati sono riportati nella **Tabella 8**; e sono tutti negativi rispetto all'opzione SDF di conservazione dei luoghi intatti.



14.3.4 Valorizzazione delle componenti ambientali

In merito alla valorizzazione delle componenti ambientali si è valutato come parametro chiave di riferimento la ricostruzione di uno specchio d'acqua nel bacino a monte della diga, ambiente che può diventare un nuovo habitat naturalistico per avifauna e specie ittiche.

Al subcriterio si è assegnato un peso pari a 0,15, i punteggi assegnati sono positivi, in quanto si può dar vita a nuovi ambienti naturali di grande valore.

14.3.5 Fruizione del territorio

In merito alla fruizione del territorio si possono privilegiare le soluzioni progettuali che permettono di sfruttare l'argine quale elemento di giunzione tra le due sponde dell'alveo (Soluzioni A e B). A queste soluzioni è quindi stato assegnato un punteggio positivo. L'argine della Soluzione C è troppo basso, e non riesce a svolgere questa funzione di collegamento.

La **Tabella 8** sintetizza e somma i punteggi assegnati per i singoli sub-criteri riguardanti gli aspetti ambientali e paesaggistici:

peso	0,25		0,25		0,2		0,15		0,15		1
max	5		5		5		5		5		
min	-5		-5		-5		-5		-5		
Opzione	Occupazione del suolo		Alterazione morfologica del terreno		Impatto visivo		Valorizzazione delle componenti ambientali		Fruizione del territorio		IMPATTO AMBIENTALE E PAESAGGISTICO
	Punti assoluti	Punti pesati	Punti assoluti	Punti pesati	Punti assoluti	Punti pesati	Punti assoluti	Punti pesati	Punti assoluti	Punti pesati	Punti pesati FINALI
SDF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sol. A	-4,00	-1,00	-4,00	-1,00	-4,00	-0,80	4,50	0,68	3,00	0,45	-1,68
Sol. B	-3,00	-0,75	-1,00	-0,25	-1,50	-0,30	4,00	0,60	3,00	0,45	-0,25
Sol. C	-2,00	-0,50	-2,00	-0,50	-2,50	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,50

Tabella 8 : Valore dei punteggi assegnato per i criteri della valutazione dell'impatto paesaggistico/ambientale

14.4 VALORE STORICO/MONUMENTALE

Sotto il profilo storico monumentale è stato valutato in via preliminare l'impatto che le alternative di progetto hanno sulle componenti storiche dell'invaso, attraverso lo studio della documentazione relativa al progetto originario e i sopralluoghi in situ. In particolar modo i criteri valutati stimano l'impatto materiale delle opere sulle istanze storiche presenti e gli impatti indiretti determinati dall'alterazione della percezione delle opere stesse e della loro leggibilità.

Sono stati individuati **2 sub-criteri**:

- 1) valorizzazione e conservazione del patrimonio storico-culturale;
- 2) interferenze con le preesistenze storiche.

Poiché l'intervento di restauro della Diga e dell'Edificio Filtro è presente in tutte le 3 soluzioni proposte, la valutazione che ne consegue è omogenea. Il punteggio relativo alla valorizzazione del patrimonio è positivo.



Per le interferenze con le preesistenze storiche, si segnala, come punto negativo, la distruzione parziale della soglia dello sfioratore SF2, cui presenza è riportata nelle cartografie storiche ottocentesche, e completa del suo canale per la Soluzione A.

Similmente, l'interferenza visiva con l'argine alto circa 5.75 m in progetto nella Soluzione C, che si colloca in prossimità e a ridosso del paramento di monte della diga storica, genera un impatto negativo in termini di interferenza con le preesistenze storiche.

peso	0,6		0,4		1
max	5		5		
min	-5		-5		
Opzione	Valorizzazione e conservazione del patrimonio storico culturale		Interferenze con le preesistenze storiche		IMPATTO STORICO-MONUMENTALE
	Punti assoluti	Punti pesati	Punti assoluti	Punti pesati	Punti pesati FINALI
SDF	0	0	0	0	0
Sol. A	5,00	3,00	-5,00	-2,00	1,00
Sol. B	5,00	3,00	0,00	0,00	3,00
Sol. C	5,00	3,00	-3,00	-1,20	1,80

Tabella 9 : Valore dei punteggi assegnati per i criteri dell'impatto storico/monumentale

14.5 MANUTENZIONE

Il giudizio sulla facilità di manutenzione delle opere in progetto può esprimersi secondo i **2 subcriteri**:

- 1) suscettibilità all'ingresso di trasporto solido nel diversivo,
- 2) facilità al vuotamento dell'invaso sotteso dalla presa.

14.5.1 Suscettibilità all'ingresso di trasporto solido nel diversivo

Il trasporto solido che si genera in occasione della piena può accedere al diversivo idraulico e creare zone di deposito e di accumulo che richiedono il periodico intervento manutentivo da parte del gestore. Esso può anche accumularsi a valle del diversivo, in corrispondenza dei manufatti di dissipazione.

Le Soluzioni A e B, rispetto a tale tema, godono del presidio idraulico generato dalle opere di sfioro, che sostengono il livello idraulico alle quote prestabilite ed evitano, in tal modo, che eventuale trasporto solido confluisca all'interno dei collettori: l'elevazione dell'opera di presa genera infatti un volume disponibile per l'accumulo del materiale mobilitato dal trasporto solido. Di contro la Soluzione C è da ritenersi peggiorativa in tal senso, poiché è posta in scavo rispetto al fondo alveo e può ricevere il contributo di materiale eroso all'interno della galleria.



14.5.2 Svuotamento dell'invaso

Le Soluzioni A e B che propongono la creazione di un invaso grazie all'interposizione di una struttura stramazzone e ad un argine di ritenuta necessiteranno di alcuni normali interventi di manutenzione.

Durante l'esercizio dell'opera, si renderà necessario accedere direttamente al fondo dell'invaso per ispezionare l'area e svolgere la regolare manutenzione agli imbocchi delle opere, alle sponde o al fondo invaso. Sarà necessario lavorare in condizioni asciutte garantite da operazioni di svuotamento che assicurino la fattibilità di tali operazioni.

L'evacuazione dell'acqua sarà resa possibile con l'inserimento nel muro di testa dello sfioratore di un passaggio presidiato da paratoia manovrabile. Poiché le quote del fondo del manufatto di presa sono in tutti i due casi pari o inferiori al livello del fondo dell'alveo, sarà possibile svuotare l'invaso a gravità, senza l'utilizzo di pompe. Soltanto per lo svuotamento dell'ultimo paio di metri di acqua che rimarrebbe stagnante nell'area più depressa interclusa tra l'opera di presa e l'argine a valle, l'attivazione di pompe potrà essere richiesta.

Si inserisce quindi un punteggio negativo per gli interventi di manutenzione richiesti dallo svuotamento dell'invaso delle soluzioni A e B.

Rispetto alla trattazione discussa, viene riportato il punteggio relativo agli aspetti di natura manutentiva. Trattandosi di oneri da sopportare da parte del gestore, tutti i punteggi sono segnati come negativi.

peso	0,4		0,6		1
max	5		5		
min	-5		-5		
Opzione	Suscettibilità all'ingresso di trasporto solido		Svuotamento dell'invaso		ASPETTI MANUTENTIVI
	Punti assoluti	Punti pesati	Punti assoluti	Punti pesati	Punti pesati FINALI
SDF	0	0	0	0	0
Sol. A	-1,00	-0,40	-3,00	-1,80	-2,20
Sol. B	-1,00	-0,40	-3,00	-1,80	-2,20
Sol. C	-3,00	-1,20	0,00	0,00	-1,20

Tabella 10 : Valore dei punteggi assegnati per gli aspetti manutentivi

14.6 TEMPI DI REALIZZAZIONE

Per la valutazione sui tempi di realizzazione è stato attribuito un punteggio proporzionale alla durata di realizzazione delle singole proposte progettuali (v. **cap. Tempi di realizzazione13**):

- Soluzione A: 17 mesi;
- Soluzione B: 15 mesi;
- Soluzione C: 13 mesi.



Il punteggio, sempre negativo, è stato assegnato mediante regressione lineare rispetto al punteggio minimo pari a -5 assegnato alla Soluzione A che richiede i tempi di realizzazione più lunghi.

peso	1
max	5
min	-5
Opzione	TEMPI DI REALIZZAZIONE
	Punti pesati
	FINALI
SDF	0
Sol. A	-5,00
Sol. B	-4,40
Sol. C	-3,80

Tabella 11 : Valore dei punteggi assegnati per il criterio dei tempi di realizzazione

14.7 COSTI DI COSTRUZIONE

Per la valutazione sui costi di costruzione è stato attribuito un punteggio proporzionale al costo delle opere relative alle singole proposte progettuali (v. **cap. 11**):

- Soluzione A: 7'270'000 €;
- Soluzione B: 4'180'000 €;
- Soluzione C: 3'550'000 €.

Per la valutazione sui costi di costruzione, viene attribuito un punteggio proporzionale al costo delle opere delle singole proposte, mediante regressione lineare da valori compresi tra -5 e 0.

peso	1
max	5
min	-5
Opzione	COSTI DI COSTRUZIONE
	Punti pesati
	FINALI
SDF	0
Sol. A	-5,00
Sol. B	-2,87
Sol. C	-2,44

Tabella 12 : Valore dei punteggi assegnati per il criterio dei costi di costruzione



15 CONCLUSIONI E SCELTA DELLA SOLUZIONE

In questo Documento di Fattibilità delle Alternative Progettuali (DOCFAP) sono state analizzate in dettaglio dagli scriventi 3 soluzioni progettuali individuate dagli scriventi per raggiungere il prefissato obiettivo della dismissione della Diga di Bunnari Bassa.

Le 3 Soluzioni individuate, sviluppate e messe a confronto sono brevemente identificate come:

- A) Canale a cielo aperto,
- B) Galleria lunga,
- C) Galleria corta.

Per il confronto tra le 3 soluzioni progettuali è stata impostata un'analisi multicriterio basata sulla valutazione di 7 diversi parametri (aspetti geologico-geotecnici, aspetti idraulici, compatibilità ambientale e paesaggistica, valore storico-monumentale, aspetti manutentivi, tempi di realizzazione e costi di costruzione). Per ciascun criterio, in alcuni casi suddiviso in sotto-criteri, è stato assegnato un punteggio variabile tra -5 e +5, nella seguente tabella sono riassunti i punteggi attribuiti a ciascuna soluzione, operando una valutazione qualitativa o quantitativa secondo quanto descritto nel precedente **cap. 14**.

A ciascuno dei criteri può essere inoltre assegnato un peso specifico, che è evidenziato nella prima riga della seguente tabella di sintesi.

peso	0,05	0,25	0,15	0,2	0,1	0,05	0,2
max	5	5	5	5	5	5	5
min	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
Opzione	GEOLOGIA- GEOTECN.	ASPETTI IDRAULICI	IMPATTO AMBIENTALE PAESAGGISTIC O	IMPATTO STORICO- MONUMENTALE	ASPETTI MANUTENTIVI	TEMPI DI REALIZZAZIONE	COSTI DI COSTRUZIONE
	Punti pesati	Punti pesati	Punti pesati	Punti pesati	Punti pesati	Punti pesati	Punti pesati
	FINALI	FINALI	FINALI	FINALI	FINALI	FINALI	FINALI
SDF	0	0	0	0	0	0	0
Sol. A	-5,00	-2,10	-1,68	1,00	-2,20	-5,00	-5,00
Sol. B	-1,00	0,40	-0,25	3,00	-2,20	-4,40	-2,87
Sol. C	-0,50	0,29	-1,50	1,80	-1,20	-3,80	-2,44

Tabella 13 : Tabella riassuntiva dei punteggi relativi all'Analisi Multicriterio

Il risultato finale dell'Analisi Multicriterio, ottenuto applicando i pesi di cui sopra, è quindi il seguente:

SDF	0
Sol. A	-2,30
Sol. B	-0,40
Sol. C	-0,62

Pertanto la soluzione progettuale prescelta è la Soluzione B corrispondente alla Galleria Lunga.