



REGIONE
SARDEGNA



COMUNE DI
PUTIFIGARI



COMUNE DI
ITTIRI



PROVINCIA DI
SASSARI

PROGETTO DEFINITIVO

Impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica "Monte Rosso" con potenza di immissione in rete pari a 92.4 MW e relative opere connesse da realizzarsi nei comuni di Putifigari ed Ittiri (SS)

Titolo elaborato

Relazione idrologica e idraulica comprensiva di studio idraulico sulle opere in progetto

Codice elaborato

F0529AR02A

Scala

-

Riproduzione o consegna a terzi solo dietro specifica autorizzazione.

Progettazione



F4 ingegneria srl

Via Di Giura - Centro direzionale, 85100 Potenza
Tel: +39 0971 1944797 - Fax: +39 0971 55452
www.f4ingegneria.it - f4ingegneria@pec.it

Il Direttore Tecnico
(ing. Giovanni Di Santo)



Gruppo di lavoro

Dott. For. Luigi ZUCCARO
Ing. Giuseppe MANZI
Ing. Alessandro Carmine DE PAOLA
Ing. Flavio TRIANI
Ing. Gerardo SCAVONE
Ing. Monica COIRO
Ing. Simone LOTITO
Arch. Gaia TELESCA



Società certificata secondo le norme UNI-EN ISO 9001:2015 e UNI-EN ISO 14001:2015 per l'erogazione di servizi di ingegneria nei settori: civile, idraulica, acustica, energia, ambiente (settore IAF: 34).

Consulenze specialistiche

Committente



wpd Monte Rosso S.r.l.

Viale Regina Margherita 33, 09124 Cagliari (CA)

| Data | Descrizione | Redatto | Verificato | Approvato |
|---------------|-----------------|---------|------------|-----------|
| Febbraio 2023 | Prima emissione | SLO | GMA | GDS |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Sommario

| | | |
|----------|------------------------------------|-----------|
| 1 | Premessa | 3 |
| 2 | Interventi in progetto | 5 |
| 3 | Analisi idrologica | 6 |
| 3.1 | Bacini Idrografici | 6 |
| 3.2 | Tempi di corrivazione | 7 |
| 3.3 | Portate al colmo di piena | 8 |
| 4 | Analisi idraulica | 13 |
| 4.1 | Geometria del modello idrodinamico | 13 |
| 4.2 | Portate di piena | 14 |
| 4.3 | Condizioni al contorno | 14 |
| 4.4 | Parametri di scabrezza | 15 |
| 4.5 | Analisi idraulica semplificata | 15 |
| 5 | Conclusioni | 18 |

1 Premessa

Il presente studio idrologico e idraulico presentato, da parte della società wpd Monte Rosso S.r.l., con sede legale in Viale Regina Margherita 33, 09124 Cagliari (CA), in qualità di proponente, è stato redatto in riferimento alla realizzazione di un parco eolico sito nei territori comunali di Putifigari ed Ittiri in provincia di Sassari, e costituisce parte integrante del progetto definitivo.

Il parco in oggetto sarà costituito da n. 14 aerogeneratori della potenza nominale di 6.6 MW ciascuno, con potenza complessiva in immissione di 92.4 MW, STMG Terna ID 202100120. In particolare, Putifigari ed Ittiri saranno complessivamente interessati dall'installazione dei 14 aerogeneratori, dal tracciato del cavidotto di collegamento alla Rete di Trasmissione Nazionale (RTN) e dalle altre opere connesse. Il tracciato dell'elettrodotta seguirà prevalentemente la viabilità esistente.

L'area oggetto di studio ricade nell'ambito di competenza dell'Autorità di Bacino regionale della Sardegna e, benché non interessata da pericolosità idraulica, risulta caratterizzata dalla presenza, nelle immediate vicinanze, di rami del reticolo idrografico della Regione Sardegna.

In ragione di questo, nel presente studio è stato effettuato un primo studio idrologico-idraulico finalizzato a valutare la profondità di posa del cavidotto nei tratti di interferenza con le linee d'impiuvio naturali in funzione della profondità massima di escavazione della corrente in piena.

Le analisi idrologiche, illustrate in dettaglio nel seguito, sono state condotte mediante l'utilizzo del metodo VAPI Sardegna al fine di stabilire le portate al colmo di piena per eventi con tempi di ritorno di 50, 100, 200 e 500 anni.

Inoltre, in funzione dei risultati ottenuti, è stata effettuata un'analisi idraulica semplificata basata su una verifica di erosione che ha determinato la profondità massima di escavazione della corrente in piena.

Nella figura seguente è mostrata la planimetria dell'impianto di produzione di energia da fonte rinnovabile con la sua posizione in relazione alle perimetrazioni delle aree allagabili definite dal PAI.

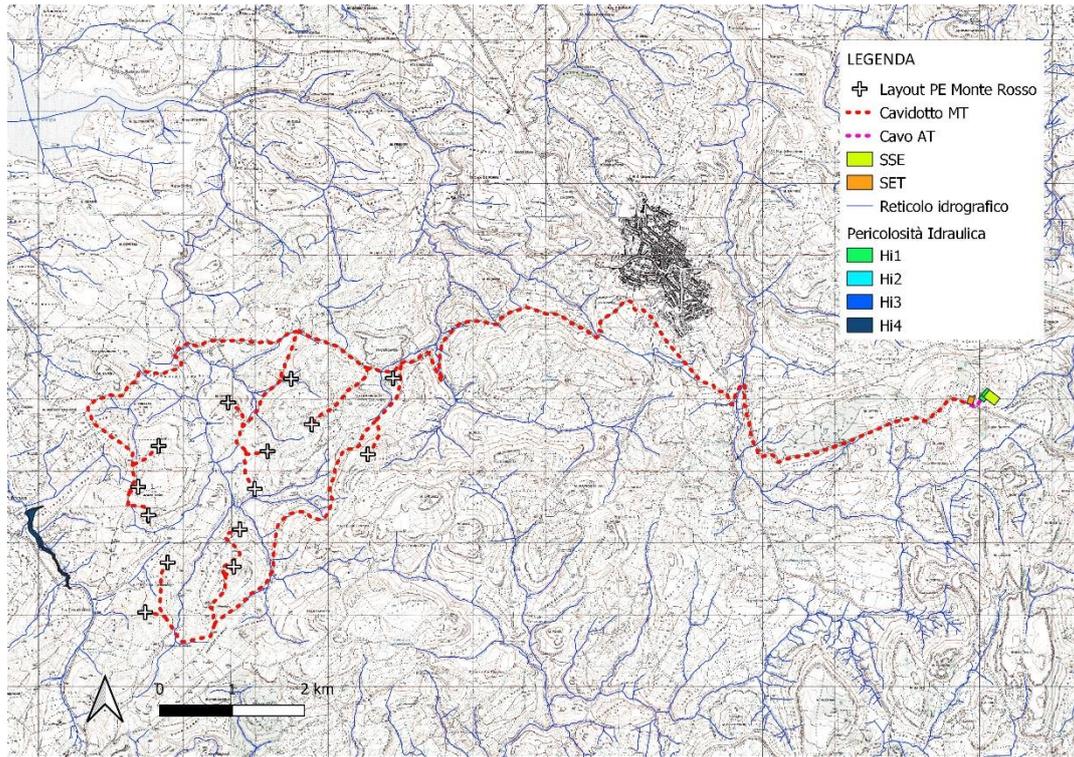


Figura 1: Inquadramento dell'area di interesse su base IGM

2 Interventi in progetto

Come anticipato in premessa, il parco eolico in progetto è costituito da una serie di interventi descritti negli elaborati tecnici del presente progetto.

Il cavidotto in oggetto, tuttavia, presenta alcune interferenze con il reticolo idrografico. Per la maggior parte di esse è previsto l'ancoraggio all'attraversamento stradale esistente mediante staffe. Nei casi in cui non si ritiene possibile lo staffaggio, identificati nella figura seguente, è stata predisposta un'analisi idraulica "semplificata", preceduta da una idraulica in moto permanente, mediante l'utilizzo del modello monodimensionale HEC-RAS dello US Army Corps of Engineers, con lo scopo di determinare le caratteristiche idrodinamiche necessarie per la valutazione della massima profondità di erosione.

L'analisi idraulica semplificata è rivolta infatti principalmente ai punti di intersezione degli impluvi esistenti con i cavidotti in caso di assenza di un idoneo attraversamento ed è caratterizzata dalle seguenti fasi:

1. analisi idrologica in base al metodo VAPI Sardegna;
2. verifica di erosione dell'intersezione a guado finalizzata alla profondità di posa in opera del cavidotto in progetto.

Il cavidotto in progetto verrà quindi posizionato ad una profondità pari a quella massima di escavazione più un franco di sicurezza di almeno 1.00 m, dato che verrà dettagliato in fase esecutiva in funzione delle caratteristiche della sezione in oggetto.

Si riporta di seguito una mappa con le interferenze individuate.

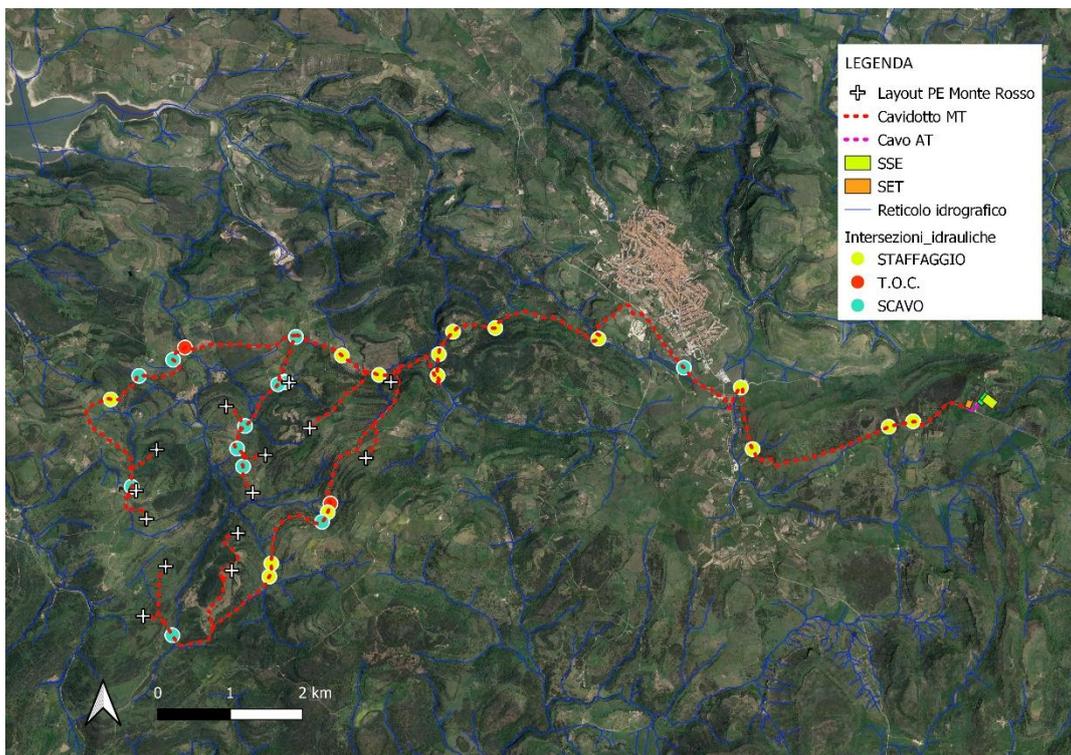


Figura 2: Planimetria con individuazione delle interferenze

3 Analisi idrologica

Nella presente analisi idrologica sono state determinate le portate al colmo di piena mediante l'utilizzo del metodo VAPI Sardegna come illustrato all'interno della Relazione di Piano del PAI, redatto dall'Autorità di Bacino della Sardegna.

Per tali scopi, sono state individuate le caratteristiche del bacino idrografico che, successivamente, sono state utilizzate per la definizione dei parametri per il calcolo delle portate al colmo di piena.

3.1 Bacini Idrografici

Nella figura seguente sono mostrati gli impluvi in esame con i bacini idrografici sottesi dalla sezione di chiusura individuata dalle aree di interesse. La delimitazione è stata effettuata utilizzando sia la cartografia IGM in scala 1:25.000 che il Modello Digitale del Terreno (Digital Terrain Model, DTM) messo a disposizione dalla sezione di Pisa dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia con dimensione di cella 10x10 m.

I bacini idrografici sono stati individuati nelle immediate vicinanze delle interferenze del cavidotto in progetto con gli impluvi naturali in modo da determinare le portate defluenti esattamente in quei punti.

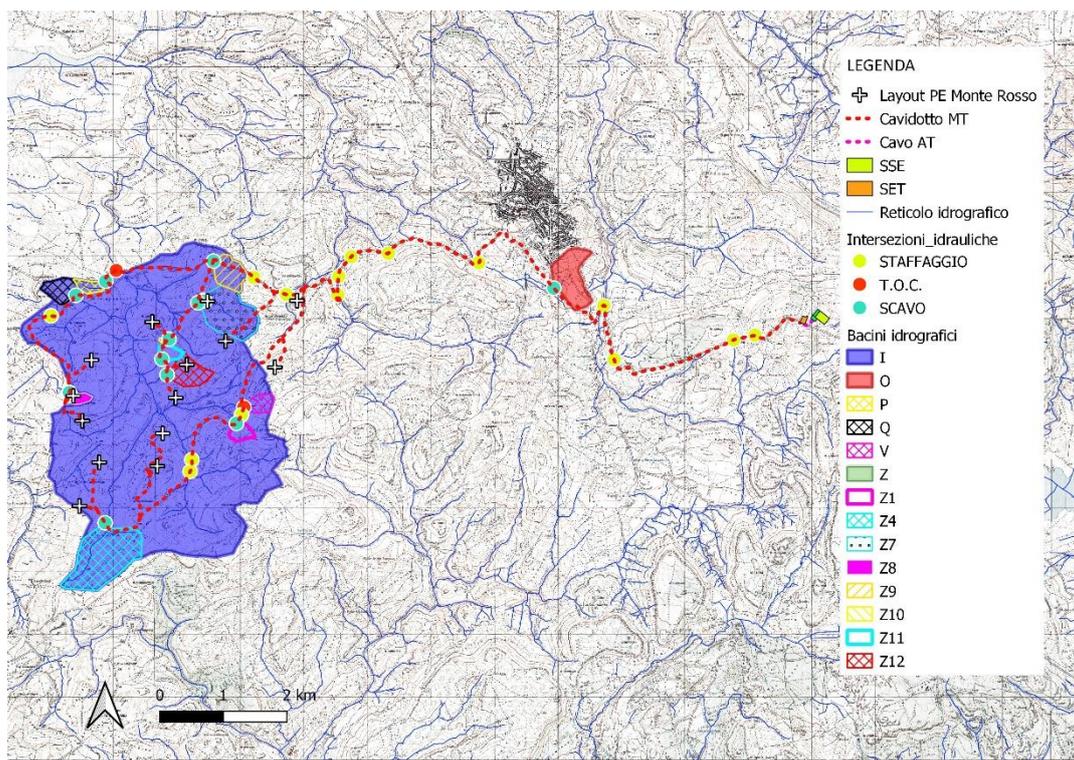


Figura 3: Planimetria dei bacini idrografici

Nella tabella seguente sono indicate le caratteristiche fisiografiche dei bacini ricavate dal DTM sopra citato.

Tabella 1: Caratteristiche fisiografiche dei bacini

| Caratteristiche fisiografiche | | | | | | | |
|-------------------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|--------|-------|-------|
| Bacino idrografico | S (km ²) | Hmax (mslm) | Hmed (mslm) | Hmin (mslm) | L (km) | i (%) | y (%) |
| Bacino I | 14.982 | 520.90 | 333.13 | 227.75 | 5.38 | 5.45 | 15.56 |
| Bacino O | 0.389 | 444.93 | 409.59 | 384.35 | 0.41 | 14.70 | 7.76 |
| Bacino P | 0.080 | 289.76 | 269.91 | 241.90 | 0.54 | 8.91 | 9.32 |
| Bacino Q | 0.162 | 322.08 | 295.33 | 273.20 | 0.34 | 14.59 | 13.48 |
| Bacino V | 0.103 | 486.92 | 453.74 | 375.60 | 0.34 | 33.13 | 24.38 |
| Bacino Z1 | 0.078 | 476.06 | 424.57 | 376.56 | 0.11 | 87.28 | 24.14 |
| Bacino Z4 | 0.808 | 417.75 | 387.70 | 353.58 | 1.50 | 4.28 | 9.01 |
| Bacino Z7 | 0.519 | 390.10 | 335.25 | 273.32 | 0.82 | 14.26 | 17.06 |
| Bacino Z8 | 0.053 | 372.89 | 364.65 | 349.26 | 0.10 | 22.94 | 7.58 |
| Bacino Z9 | 0.213 | 343.25 | 309.32 | 279.76 | 0.45 | 14.08 | 12.35 |
| Bacino Z10 | 0.012 | 294.42 | 286.32 | 276.59 | 0.13 | 14.04 | 11.52 |
| Bacino Z11 | 0.070 | 304.19 | 289.44 | 275.18 | 0.20 | 14.58 | 8.46 |
| Bacino Z12 | 0.218 | 360.05 | 306.33 | 278.20 | 0.17 | 47.04 | 12.14 |

Nella precedente tabella sono state indicate le seguenti grandezze:

- "S" (km²): superficie del bacino;
- "Hmax" (mslm): quota massima;
- "Hmed" (mslm): quota media;
- "Hmin" (mslm): quota minima;
- "L" (km): lunghezza dell'asta principale;
- "i" (%): pendenza dell'asta principale;
- "y" (%): pendenza media di versante.

3.2 Tempi di corrivazione

In funzione delle caratteristiche fisiografiche dei bacini individuati, sono stati riportati, nella tabella seguente, differenti valori per i tempi di corrivazione in base a diverse formulazioni.

Tabella 2: Tempi di corrivazione

| Tempi di corrivazione | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|------------|---------------|----------|-------------|
| Bacino idrografico | Giandotti (h) | Kirpich (h) | Ventura (h) | Pezzoli (h) | Pasini (h) | Viparelli (h) | VAPI (h) | tc (h) |
| Bacino I | 2.87 | 0.74 | 2.11 | 1.27 | 2.00 | 0.36 | 4.92 | 2.31 |
| Bacino O | 0.77 | 0.07 | 0.21 | 0.06 | 0.15 | 1.06 | 1.69 | 0.42 |
| Bacino P | 0.46 | 0.10 | 0.12 | 0.10 | 0.13 | 6.73 | 1.20 | 0.47 |
| Bacino Q | 0.56 | 0.06 | 0.13 | 0.05 | 0.11 | 2.07 | 1.26 | 0.27 |
| Bacino V | 0.25 | 0.04 | 0.07 | 0.03 | 0.06 | 3.27 | 1.01 | 0.20 |
| Bacino Z1 | 0.23 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 0.02 | 1.45 | 0.70 | 0.08 |
| Bacino Z4 | 1.25 | 0.30 | 0.55 | 0.40 | 0.56 | 1.86 | 2.81 | 1.09 |
| Bacino Z7 | 0.65 | 0.12 | 0.24 | 0.12 | 0.22 | 1.58 | 1.72 | 0.49 |
| Bacino Z8 | 0.34 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 1.93 | 0.91 | 0.14 |
| Bacino Z9 | 0.58 | 0.08 | 0.16 | 0.07 | 0.13 | 2.12 | 1.37 | 0.36 |
| Bacino Z10 | 0.26 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 10.21 | 0.70 | 0.13 |
| Bacino Z11 | 0.45 | 0.04 | 0.09 | 0.03 | 0.07 | 2.86 | 1.03 | 0.22 |
| Bacino Z12 | 0.50 | 0.02 | 0.09 | 0.01 | 0.05 | 0.80 | 0.97 | 0.17 |

Alla luce delle caratteristiche dimensionali dei bacini idrografici individuati, il tempo di corrivazione scelto per il calcolo delle portate è quello relativo al metodo SCS, adottato per i bacini con superficie inferiore ai 60 km². I risultati ottenuti applicando tale formulazione sono riportati nell'ultima colonna della precedente tabella.

3.3 Portate al colmo di piena

Ai fini del calcolo delle portate al colmo di piena è stato utilizzato il metodo VAPI Sardegna così come consigliato dalla Relazione di Piano del PAI (redatto dall'Autorità di Bacino della Sardegna).

Nella figura seguente è mostrata una corografia della Sardegna con l'individuazione delle zone pluviometriche omogenee del metodo VAPI. Il sito di interesse, in particolare, è situato nella "zona pluviometrica omogenea 1".

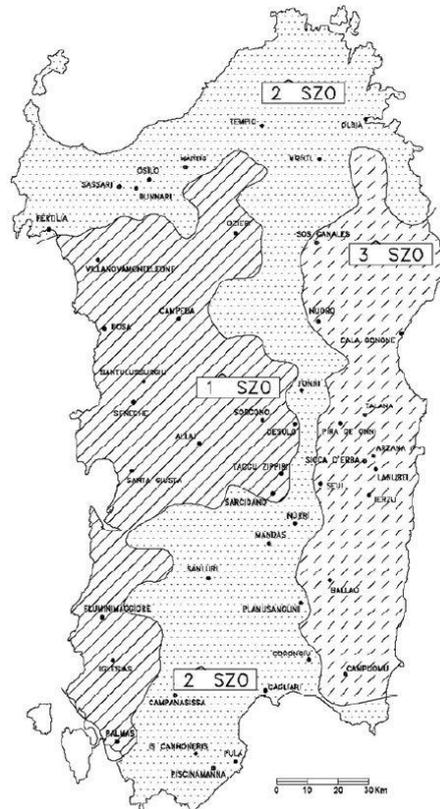


Figura 4: Corografia della Sardegna con la delimitazione delle zone pluviometriche omogenee del VAPI

Il metodo scelto prevede il calcolo della pioggia indice $\mu(t)$ di durata t tramite la seguente espressione:

$$\mu(t) = a_1 \cdot t^{n_1}$$

dove a_1 e n_1 si calcolano tramite le seguenti espressioni in funzione della pioggia indice giornaliera μ_g :

$$a_1 = \frac{\mu_g}{0.886 \cdot 24^{n_1}}$$

$$n_1 = -0.493 + 0.476 \log_{10}(\mu_g)$$

dove μ_g si stima in base alla carta delle isoiete riportata nella seguente figura.

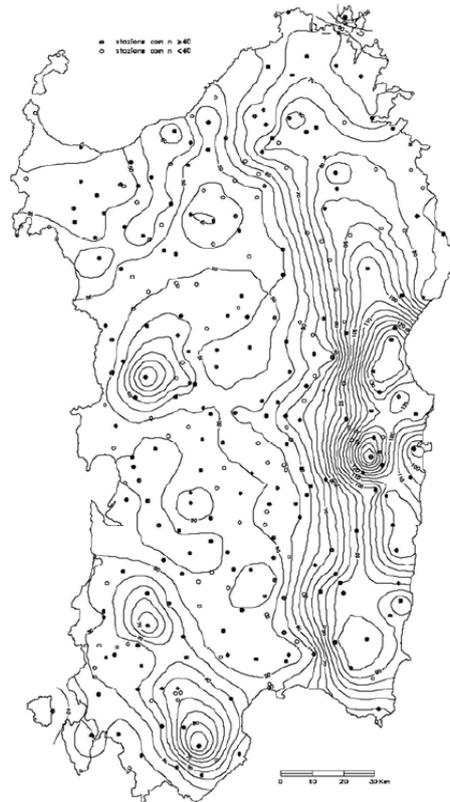


Figura 5: Carta delle isoiete per l'identificazione di μ_g

Per il sito di interesse, il valore di μ_g è pari a 50 mm.

L'altezza di pioggia $h_T(t)$ con tempo di ritorno T si ottiene moltiplicando la pioggia indice $\mu(tc)$ per il coefficiente di crescita $K_T(t)$ definito, in funzione del tempo di ritorno T , dalla seguente espressione:

$$K_T(t) = a_2 \cdot t^{n_2}$$

dove i coefficienti a_2 e n_2 definiti dalle seguenti formule valide per la sottozona 1 e per un tempo di ritorno maggiore di 10 anni:

$$SZO\ 1: \quad a_2 = 0.46378 + 1.0386 \cdot \log_{10}(T)$$

$$n_2 = -0.18449 + 0.23032 \cdot \log_{10}(T) - 3.3330 \cdot 10^{-2} \cdot (\log_{10}(T))^2 \quad \text{per } t \leq 1 \text{ ora}$$

$$n_2 = -1.0563 \cdot 10^{-2} - 7.9034 \cdot 10^{-3} \cdot \log_{10}(T) \quad \text{per } t \geq 1 \text{ ora}$$

Nella seguente tabella si riportano i valori ottenuti per i parametri a_1 , n_1 , a_2 e n_2 .

Tabella 3: Parametri a₁, n₁, a₂ e n₂.

| | Tr 50 | Tr 100 | Tr 200 | Tr 500 |
|-----------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| a1 | 20.69 | 20.69 | 20.69 | 20.69 |
| a2 | 2.228 | 2.541 | 2.854 | 3.267 |
| n1 | 0.316 | 0.316 | 0.316 | 0.316 |
| n2 (t ≤ 1 ora) | 0.11 | 0.14 | 0.17 | 0.19 |
| n2 (t ≥ ora) | -0.02 | -0.03 | -0.03 | -0.03 |

Nella seguente tabella sono riportati i valori ottenuti per le altezze di pioggia, per ogni bacino considerato, per tempi di ritorno pari a 50, 100, 200 e 500 anni.

Tabella 4: Altezze di pioggia

| Altezze di precipitazione (VAPI pluviometria) | | | | |
|---|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Bacino idrografico | h50 (mm) | h100 (mm) | h200 (mm) | h500 (mm) |
| Bacino I | 59.0 | 67.3 | 75.6 | 86.5 |
| Bacino O | 35.7 | 40.7 | 45.7 | 52.3 |
| Bacino P | 37.0 | 42.2 | 47.3 | 54.2 |
| Bacino Q | 31.3 | 35.7 | 40.1 | 45.9 |
| Bacino V | 28.7 | 32.8 | 36.8 | 42.1 |
| Bacino Z1 | 22.3 | 25.4 | 28.5 | 32.7 |
| Bacino Z4 | 47.3 | 54.0 | 60.6 | 69.4 |
| Bacino Z7 | 37.4 | 42.6 | 47.8 | 54.8 |
| Bacino Z8 | 25.8 | 29.4 | 33.1 | 37.9 |
| Bacino Z9 | 34.0 | 38.8 | 43.6 | 49.9 |
| Bacino Z10 | 25.5 | 29.1 | 32.7 | 37.4 |
| Bacino Z11 | 29.7 | 33.8 | 38.0 | 43.5 |
| Bacino Z12 | 27.3 | 31.1 | 34.9 | 40.0 |

Utilizzando il metodo razionale, infine, è possibile valutare le portate di piena da utilizzare come riferimento per l'analisi idraulica. Tale metodo calcola la portata al colmo di piena mediante la formula:

$$Q_T = \frac{S \cdot c \cdot i_T}{3.6} = \frac{S \cdot c \cdot h_T}{3.6 \cdot t}$$

dove:

- "S" (km²): superficie del bacino;
- "i" (mm/h): intensità di precipitazione;
- "c" (-): coefficiente di deflusso che, considerate le caratteristiche dei bacini in esame, è stato posto pari a 0.6.

Nella tabella seguente sono presenti i valori delle portate al colmo di piena per i tempi di ritorno considerati.

Tabella 5: Portate al colmo di piena

| Portate al colmo di piena (VAPI pluviometria) | | | | |
|--|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Bacino idrografico | Q50 (m³/s) | Q100 (m³/s) | Q200 (m³/s) | Q500 (m³/s) |
| Bacino I | 63.8 | 72.7 | 81.7 | 93.5 |
| Bacino O | 5.5 | 6.3 | 7.1 | 8.1 |
| Bacino P | 1.0 | 1.2 | 1.3 | 1.5 |
| Bacino Q | 3.1 | 3.6 | 4.0 | 4.6 |
| Bacino V | 2.5 | 2.8 | 3.1 | 3.6 |
| Bacino Z1 | 3.4 | 3.9 | 4.4 | 5.0 |
| Bacino Z4 | 5.8 | 6.7 | 7.5 | 8.6 |
| Bacino Z7 | 6.6 | 7.5 | 8.5 | 9.7 |
| Bacino Z8 | 1.6 | 1.9 | 2.1 | 2.4 |
| Bacino Z9 | 3.4 | 3.9 | 4.3 | 5.0 |
| Bacino Z10 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
| Bacino Z11 | 1.5 | 1.8 | 2.0 | 2.3 |
| Bacino Z12 | 5.9 | 6.7 | 7.6 | 8.6 |

Le portate di riferimento per l'analisi idraulica sono quelle riportate nella tabella precedente. Nella tabella seguente sono riportati i relativi coefficienti udometrici.

Tabella 6: Coefficienti udometrici

| Coefficienti udometrici | | | | |
|--------------------------------|---|--|--|--|
| Bacino idrografico | u50 (m³/s·km²) | u100 (m³/s·km²) | u200 (m³/s·km²) | u500 (m³/s·km²) |
| Bacino I | 4.3 | 4.9 | 5.5 | 6.2 |
| Bacino O | 14.2 | 16.2 | 18.2 | 20.8 |
| Bacino P | 13.0 | 14.9 | 16.7 | 19.1 |
| Bacino Q | 19.4 | 22.1 | 24.8 | 28.4 |
| Bacino V | 23.8 | 27.2 | 30.5 | 35.0 |
| Bacino Z1 | 43.7 | 49.9 | 56.0 | 64.1 |
| Bacino Z4 | 7.2 | 8.2 | 9.2 | 10.6 |
| Bacino Z7 | 12.7 | 14.5 | 16.3 | 18.6 |
| Bacino Z8 | 30.8 | 35.1 | 39.4 | 45.1 |
| Bacino Z9 | 15.9 | 18.1 | 20.4 | 23.3 |
| Bacino Z10 | 31.7 | 36.1 | 40.6 | 46.5 |
| Bacino Z11 | 22.1 | 25.2 | 28.3 | 32.3 |
| Bacino Z12 | 27.0 | 30.8 | 34.6 | 39.6 |

4 Analisi idraulica

Come descritto precedentemente, il tratto di cavidotto di interesse, in riferimento ai punti di intersezione con il reticolo idrografico per i quali non è previsto l'ancoraggio all'attraversamento stradale esistente mediante staffe, è oggetto di analisi semplificata.

Al fine di ottenere i parametri idrodinamici necessari per tale analisi, è stata effettuata un'analisi idraulica in moto permanente mediante l'utilizzo del modello idrodinamico monodimensionale HEC-RAS dello US Army Corps of Engineers. Per ragioni cautelative le portate, immesse come condizioni al contorno di monte all'interno del modello, sono state considerate costanti nel tempo e le simulazioni sono state condotte in condizioni di moto permanente

4.1 Geometria del modello idrodinamico

Le sezioni trasversali sono state riportate nella tabella seguente con l'indicazione del nome della sezione inserito nel modello ("station") delle distanze parziali e progressive, delle quote di fondo e delle pendenze parziali e totali.

Tabella 7: Sezioni trasversali

| Stato di fatto - Sezioni | | | | | |
|--------------------------|---------------------|------------|-----------|--------------|----------------|
| Sezione | Sezione nel modello | Progr. (m) | Parz. (m) | Fondo (mslm) | Pendenza (m/m) |
| I1 | -1 | 0.00 | 62.47 | 227.98 | 0.00 |
| I2 | -2 | 62.47 | 61.38 | 227.75 | 0.00 |
| I3 | -3 | 123.85 | 0.00 | 227.56 | 0.00 |
| O1 | -1 | 0.00 | 62.92 | 386.90 | 0.04 |
| O2 | -2 | 62.92 | 90.73 | 384.40 | 0.04 |
| O3 | -3 | 153.66 | 0.00 | 381.24 | 0.04 |
| P1 | -1 | 0.00 | 58.78 | 250.30 | 0.11 |
| P2 | -2 | 58.78 | 58.54 | 241.90 | 0.11 |
| P3 | -3 | 117.32 | 0.00 | 237.11 | 0.11 |
| Q1 | -1 | 0.00 | 71.76 | 277.47 | 0.07 |
| Q2 | -2 | 71.76 | 60.94 | 273.65 | 0.07 |
| Q3 | -3 | 132.70 | 0.00 | 267.61 | 0.07 |
| V1 | -1 | 0.00 | 48.50 | 379.62 | 0.21 |
| V2 | -2 | 48.50 | 45.76 | 372.88 | 0.21 |
| V3 | -3 | 94.26 | 0.00 | 359.59 | 0.21 |
| Z1_1 | -1 | 0.00 | 75.47 | 392.88 | 0.28 |
| Z1_2 | -2 | 75.47 | 73.94 | 372.34 | 0.28 |
| Z1_3 | -3 | 149.41 | 0.00 | 350.99 | 0.28 |
| Z4_1 | -1 | 0.00 | 121.52 | 355.81 | 0.03 |
| Z4_2 | -2 | 121.52 | 84.40 | 352.55 | 0.03 |
| Z4_3 | -3 | 205.92 | 0.00 | 348.96 | 0.03 |
| Z7_1 | -1 | 0.00 | 61.79 | 275.38 | 0.06 |
| Z7_2 | -2 | 61.79 | 63.05 | 272.27 | 0.06 |
| Z7_3 | -3 | 124.83 | 0.00 | 268.23 | 0.06 |
| Z8_1 | -1 | 0.00 | 37.71 | 353.79 | 0.11 |
| Z8_2 | -2 | 37.71 | 35.61 | 349.56 | 0.11 |
| Z8_3 | -3 | 73.33 | 0.00 | 345.67 | 0.11 |
| Z9_1 | -1 | 0.00 | 100.16 | 283.47 | 0.05 |
| Z9_2 | -2 | 100.16 | 135.50 | 279.72 | 0.05 |
| Z9_3 | -3 | 235.66 | 0.00 | 271.91 | 0.05 |
| Z10_1 | -1 | 0.00 | 31.29 | 279.71 | 0.13 |
| Z10_2 | -2 | 31.29 | 34.90 | 275.69 | 0.13 |
| Z10_3 | -3 | 66.19 | 0.00 | 271.26 | 0.13 |
| Z11_1 | -1 | 0.00 | 20.88 | 276.84 | 0.07 |
| Z11_2 | -2 | 20.88 | 26.04 | 274.72 | 0.07 |
| Z11_3 | -3 | 46.92 | 0.00 | 273.36 | 0.07 |
| Z12_1 | -1 | 0.00 | 66.79 | 280.84 | 0.06 |
| Z12_2 | -2 | 66.79 | 51.95 | 277.58 | 0.06 |
| Z12_3 | -3 | 118.75 | 0.00 | 274.09 | 0.06 |

4.2 Portate di piena

Considerato un tempo di ritorno pari a 200 anni, come portate al colmo di piena sono state considerate quelle ricavate nella analisi idrologica.

Come precisato in precedenza, le portate sono state considerate, per ragioni cautelative, costanti nel tempo e le simulazioni sono state condotte in condizioni di moto permanente.

4.3 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno, necessarie per l'esecuzione di simulazioni idrodinamiche con il modello, sono le seguenti:

- condizione al contorno di monte: scala di deflusso in moto uniforme della corrente con una pendenza pari a quella media del ramo rilevato;
- condizione al contorno di valle: scala di deflusso in moto uniforme della corrente con una pendenza pari a quella media del ramo rilevato.

4.4 Parametri di scabrezza

Come parametro di scabrezza è stato utilizzato un coefficiente di Gauckler-Strickler pari a $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (corrispondente ad un coefficiente secondo Manning pari a $0.05 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$).

4.5 Analisi idraulica semplificata

Per dimensionare adeguatamente la quota di posa del cavidotto, pertanto, è stata calcolata la profondità massima di escavazione da parte della corrente e, per tali scopi, sono stati utilizzati i risultati dell'analisi idraulica per l'evento con tempo di ritorno di 200 anni sopra descritti.

Il calcolo della massima profondità di erosione viene effettuato mediante l'utilizzo della seguente formula di Meyer-Peter e Müller espressa nell'ipotesi di "alveo largo" ed esplicitata da Chien (Montuori, "Complementi di Idraulica", Liguori, 1997):

$$\Psi = 8 \cdot (\Theta - 0,047)^3$$

dove:

- " Ψ " (-): parametro di trasporto;
- " Θ " (-): parametro di stabilità.

Tali parametri sono definiti dalle espressioni seguenti:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi = \frac{q_s}{\sqrt{g \cdot d^3 \cdot \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}}} \\ \Theta = \frac{\gamma \cdot R \cdot j}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d} \end{array} \right.$$

dove:

- " q_s " (m^2/s): portata solida (volumetrica) per unità di larghezza;
- " g " (m/s^2): accelerazione di gravità;
- " d " (m): diametro caratteristico del sedimento;
- " γ_s " (N/m^3): peso specifico del sedimento;
- " γ " (N/m^3): peso specifico dell'acqua;
- " R " (m): raggio idraulico;
- " j " (-): cadente piezometrica.

Grazie a tale formula è possibile calcolare la portata solida trasportabile dalla corrente una volta noti:

- alcuni parametri caratteristici del deflusso come la portata liquida, il raggio idraulico, la larghezza del pelo libero e la cadente piezometrica che sono stati calcolati nella precedente analisi idraulica;
- alcuni parametri caratteristici del sedimento come il diametro e il peso specifico.

Dopo aver determinato il valore della portata solida, infine, è possibile calcolare la concentrazione volumetrica del sedimento dividendo la portata solida per quella liquida.

Per i parametri caratteristici del sedimento, date le caratteristiche del terreno, si è scelto di considerare il diametro pari a 1 mm, ed un peso specifico di $25'000 \text{ N}/\text{m}^3$.

Nella tabella seguente sono presenti i calcoli effettuati per determinare la concentrazione del sedimento utilizzando la formula di Meyer-Peter e Müller per i tratti dell'impluvio in esame.

Tabella 8: Analisi del trasporto solido

| Analisi del trasporto solido - Tr100 | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|---------|---------------------|-------|----------|
| Sezione | γ | γ_s | d | j | R | θ |
| | (N/m ³) | (N/m ³) | (m) | (-) | (m) | (-) |
| I2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.003 | 1.240 | 2.6 |
| O2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.032 | 0.240 | 5.0 |
| P2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.182 | 0.120 | 14.1 |
| Q2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.045 | 0.170 | 5.0 |
| V2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.530 | 0.240 | 82.2 |
| Z1_2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.287 | 0.170 | 31.6 |
| Z4_2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.031 | 0.240 | 4.8 |
| Z5_2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.060 | 0.190 | 7.4 |
| Z6_2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.060 | 0.190 | 7.4 |
| Z7_2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.060 | 0.190 | 7.4 |
| Z8_2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.111 | 0.130 | 9.3 |
| Z9_2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.047 | 0.090 | 2.7 |
| Z10_2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.129 | 0.080 | 6.6 |
| Z11_2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.079 | 0.150 | 7.7 |
| Z12_2 | 9810 | 25000 | 0.00100 | 0.069 | 0.200 | 8.9 |
| Sezione | Ψ | q_s | b | Q | C | C |
| | (-) | (m ² /s) | (m) | (m ³ /s) | (-) | (ppm) |
| I2 | 32 | 0.0040 | 50 | 81.7 | 0.002 | 2421 |
| O2 | 88 | 0.0109 | 21 | 7.1 | 0.032 | 32158 |
| P2 | 420 | 0.0518 | 6 | 1.3 | 0.222 | 222311 |
| Q2 | 88 | 0.0108 | 17 | 4.0 | 0.047 | 47232 |
| V2 | 5958 | 0.7344 | 5 | 3.1 | 1.199 | 1198657 |
| Z1_2 | 1415 | 0.1744 | 8 | 4.4 | 0.322 | 321756 |
| Z4_2 | 82 | 0.0101 | 20 | 7.5 | 0.028 | 27520 |
| Z5_2 | 160 | 0.0197 | 30 | 8.5 | 0.070 | 70175 |
| Z6_2 | 160 | 0.0197 | 30 | 8.5 | 0.070 | 70175 |
| Z7_2 | 160 | 0.0197 | 30 | 8.5 | 0.070 | 70175 |
| Z8_2 | 226 | 0.0278 | 10 | 2.1 | 0.128 | 127612 |
| Z9_2 | 35 | 0.0043 | 49 | 4.3 | 0.049 | 49059 |
| Z10_2 | 135 | 0.0167 | 5 | 0.5 | 0.172 | 171622 |
| Z11_2 | 168 | 0.0207 | 7 | 2.0 | 0.069 | 69171 |
| Z12_2 | 212 | 0.0262 | 27 | 7.6 | 0.092 | 91957 |

Come mostrato nella tabella precedente, la concentrazione volumetrica "C" è strettamente legata al tempo di ritorno considerato. Tali valori sono stati utilizzati come parametri di ingresso per il modulo "Hydraulic design - Stable Channel Design" del modello HEC-RAS dello US Army Corps of Engineers (modello già utilizzato all'interno per il calcolo delle caratteristiche idrodinamiche).

Nella tabella seguente sono presenti i risultati del calcolo della massima profondità di erosione effettuato con tale modulo e, in particolare, utilizzando il metodo "Regime".

Tabella 9: Profondità di erosione

| Massima profondità di erosione - Tr100 | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|
| Sezione | Regime | Regime | Regime |
| | depth | width | slope |
| | (m) | (m) | (-) |
| I2 | 0.17 | 276.74 | 0.0017 |
| O2 | 0.01 | 292.72 | 0.0030 |
| P2 | 0.00 | 328.96 | 0.0031 |
| Q2 | 0.01 | 266.16 | 0.0032 |
| V2 | 0.00 | 1179.39 | 0.0020 |
| Z1_2 | 0.00 | 728.05 | 0.0024 |
| Z4_2 | 0.02 | 278.37 | 0.0030 |
| Z5_2 | 0.01 | 472.79 | 0.0027 |
| Z6_2 | 0.01 | 472.79 | 0.0027 |
| Z7_2 | 0.01 | 472.79 | 0.0027 |
| Z8_2 | 0.00 | 316.82 | 0.0031 |
| Z9_2 | 0.01 | 281.24 | 0.0031 |
| Z10_2 | 0.00 | 179.26 | 0.0038 |
| Z11_2 | 0.01 | 227.69 | 0.0034 |
| Z12_2 | 0.01 | 511.69 | 0.0026 |

Come è possibile osservare nella tabella precedente, i risultati dell'applicazione di tale metodologia indicano una profondità di scavo massima di 17 cm per le sezioni in esame.

5 Conclusioni

L'area oggetto di studio ricade nell'ambito di competenza dell'Autorità di Bacino regionale della Sardegna e, benché non interessata da pericolosità idraulica, risulta caratterizzata dalla presenza, nelle immediate vicinanze, di rami del reticolo idrografico della Regione Sardegna.

In ragione di questo, nel presente studio è stato effettuato un primo studio idrologico-idraulico finalizzato a valutare la profondità di posa del cavidotto nei tratti di interferenza con le linee d'impiuvio naturali in funzione della profondità massima di escavazione della corrente in piena.

Le analisi idrologiche, illustrate in dettaglio nel seguito, sono state condotte mediante l'utilizzo del metodo VAPI Sardegna al fine di stabilire le portate al colmo di piena per eventi con tempi di ritorno di 50, 100, 200 e 500 anni.

Al fine di ottenere i parametri idrodinamici necessari per tale analisi, è stata effettuata un'analisi idraulica in moto permanente mediante l'utilizzo del modello idrodinamico monodimensionale HEC-RAS dello US Army Corps of Engineers. Per ragioni cautelative le portate, immesse come condizioni al contorno di monte all'interno del modello, sono state considerate costanti nel tempo e le simulazioni sono state condotte in condizioni di moto permanente.

Nel caso di specie, trattandosi di intersezioni a guado, nei casi in cui non si prevede lo staffaggio del cavidotto alle opere di attraversamento stradale esistenti, è stata effettuata un'analisi idraulica semplificata basata su una verifica di erosione che ha determinato la profondità massima di escavazione della corrente in piena.

L'analisi idraulica semplificata ha permesso di dimostrare i valori della profondità massima di escavazione della corrente nei tratti di interferenza individuati. Affinché il cavidotto risulti in condizioni di sicurezza idraulica è necessario avere almeno 1,00 m di profondità rispetto al valore calcolato dall'analisi suddetta.

In fase esecutiva sarà necessario porre il cavidotto ad una profondità adeguata al fine di tutelarlo dal fenomeno di escavazione che dai calcoli effettuati risulta essere pari ad un massimo di 17 cm rispetto al fondo dell'alveo attuale. In ogni caso, tale valore si somma ad un franco di sicurezza di un metro determinato in fase progettuale.