

Bentu Energy Srl

Parco Eolico BENTU sito nel Comune di Thiesi

Relazione Geologica

Luglio 2022

Regione autonoma della Sardegna



Comune di Thiesi



Committente:

BENTU Energy Srl

BENTU Energy Srl

Via Sardegna, 40
00187 Roma
P.IVA/C.F. 15802451003

Titolo del Progetto:

Parco Eolico BENTU sito nel Comune di Thiesi

Documento:

Relazione Geologica

N° Documento:

IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18



**Studio Tecnico di Geologia
Applicata all'Ingegneria e
all'Ambiente**

Centro Direzionale "Pittarello"
Loc. Scala Sa Perda, 87
09028 Sestu (CA)
T +39 070 734 6008
Mob +39 345 788 2814
e-mail: info@gaiiconsulting.eu

Progettista:



Cosima Atzori

| Rev | Data Revisione | Descrizione | Redatto | Controllato | Approvato |
|-----|----------------|-----------------|---------------|-------------|-----------|
| 00 | 05.07.2022 | Prima emissione | Cosima Atzori | | |
| | | | | | |

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|-------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 3 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|-------------------|

Sommario

| | |
|---|-----------|
| 1. Premessa | 7 |
| 2. Normativa di riferimento | 7 |
| 3. Studio e indagini di riferimento | 7 |
| 4. Inquadramento geografico generale | 8 |
| 5. Caratteristiche di progetto dell'opera | 13 |
| 6. Inquadramento geologico | 15 |
| 6.1. Descrizione del contesto geologico dell'area vasta oggetto di intervento | 15 |
| 6.2. Successione litostratigrafica dell'area di intervento | 15 |
| 6.2.1. Distretto vulcanico di Capo Marargiu Miocene Inferiore) | 16 |
| 6.2.2. Distretto Vulcanico di Osilo-Castelsardo (Miocene Inferiore) | 17 |
| 6.3. Successione sedimentaria Oligo-Miocenica del Logudoro-Sassarese | 17 |
| 6.4. Depositi Quaternari dell'area continentale | 18 |
| 7. Analisi delle condizioni geostrutturali generali | 20 |
| 7.1. Campagna di raccolta dei dati geostrutturali su affioramento | 20 |
| 7.1.1. Rilievo geostutturale Scanline 1 | 24 |
| 7.1.2. Rilievo geostutturale Scanline2 | 25 |
| 8. Analisi qualitativa di stabilità dell'ammasso roccioso | 27 |
| 9. Inquadramento geomorfologico | 29 |
| 9.1. Lineamenti geomorfologici dell'area di studio | 32 |
| 9.2. Definizione dell'area geomorfologicamente significativa | 37 |
| 10. Inquadramento idrogeologico | 38 |
| 10.1. Scheme della circolazione idrica superficiale | 38 |
| 10.2. Caratteristiche delle acque sotterranee | 41 |
| 10.3. Analisi della vulnerabilità degli acquiferi | 43 |
| 11. Inquadramento climatico | 48 |
| 11.1. Precipitazioni | 50 |
| 11.2. Temperature | 50 |
| 11.3. Stima dell'evapotraspirazione | 51 |
| 12. Inquadramento pedologico | 54 |

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|-------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 4 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|-------------------|

| | |
|---|-----------|
| 13. Uso del Suolo | 56 |
| 14. Analisi dei vincoli gravanti sui terreni | 57 |
| 14.1. Piano Stralcio D'Assetto Idrogeologico della Sardegna | 57 |
| 14.2. Art.30 Ter NTA PAI | 59 |
| 14.3. Inventario dei Fenomeni franosi | 61 |
| 14.4. Piano Stralcio delle Fascie Fluviali | 61 |
| 14.5. Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) | 62 |
| 15. Indagini geognostiche | 64 |
| 15.1. Generalità sul metodo sismico a rifrazione | 64 |
| 15.1.1. Caratteristiche delle stese sismiche | 65 |
| 15.1.2. Caratteristiche della Strumentazione impiegata | 66 |
| 15.1.3. Elaborazione dei dati | 66 |
| 15.1.4. Specifiche delle indagini svolte | 67 |
| 15.1.5. Caratteristiche della strumentazione impiegata | 68 |
| 15.1.6. Interpretazione dei segnali acquisiti | 68 |
| 15.1.7. Categorie di sottosuolo - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018) | 68 |
| 15.2. Tomografia elettrica | 69 |
| 15.2.1. Tecnica e parametri utilizzati | 69 |
| 15.2.2. Geometria delle acquisizioni | 70 |
| 15.2.3. Strumentazione e attrezzatura utilizzata | 70 |
| 15.2.4. Elaborazione dei dati e software | 70 |
| 15.3. Risultati delle indagini del sito SMT01 (AG02) | 71 |
| 15.3.1. Masw SMT01 | 71 |
| 15.3.2. Rifrazione SMT01 e Tomografia elettrica SMT01 | 72 |
| 15.4. Risultati delle indagini del sito SMT02 (AG06) | 75 |
| 15.4.1. Masw SMT02 | 75 |
| 15.4.2. SMT02: Rifrazione e Tomografia elettrica | 76 |
| 15.5. Risultati delle indagini del sito SMT03 | 79 |
| 15.5.1. Masw SMT03 | 79 |
| 15.6.2. Rifrazione SMT03 – Aerogeneratore AG05 | 80 |
| 16. Modellazione geologica | 88 |
| 16.1. Caratterizzazione geostrutturale degli ammassi rocciosi | 88 |
| 16.2. Viabilità di impianto e sottostazione | 95 |
| 17. Modello geologico di sito | 96 |
| 18. Conclusioni: criticità geologiche e suggerimenti operativi | 98 |

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|-------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 5 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|-------------------|

Indice delle figure

| | |
|---|----|
| Figura 1 Localizzazione del progetto | 8 |
| Figura 2 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione W | 10 |
| Figura 3 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione E | 11 |
| Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000 | 12 |
| Figura 5 Paesaggio caratteristico dell'area di studio..... | 13 |
| Figura 6 Schema tettonico-strutturale della Sardegna..... | 15 |
| Figura 7 Particolare della litologia appartenente all'unità di Uri | 16 |
| Figura 8 Stralcio carta geologica (Fonte RAS)..... | 19 |
| Figura 9 Affioramento dell'Unità di Monte Frusciu con discontinuità in giacitura subverticale con orientazione 140° Nord e 75° di inclinazione, coord. 40.52325, 8.59521..... | 21 |
| Figura 10 Affioramento con discontinuità in giacitura 250Nord e inclinazione 60 gradi in prossimità della AG08, coord. 40.53518, 8.66079 | 21 |
| Figura 11 Affioramento con discontinuità in giacitura 140Nord e inclinazione 82 gradi in località Baddighedda, coord. 40.5266, 8.59245..... | 22 |
| Figura 12 Affioramento con discontinuità in giacitura 250Nord e inclinazione 81 gradi tra la AG07 e la AG08, coord. 40.53273, 8.65894..... | 23 |
| Figura 13 Rilievo geostrutturale Scanline1..... | 24 |
| Figura 14 Proiezione stereografica delle discontinuità rilevate sull'affioramento Scanline1..... | 25 |
| Figura 15 Rilievo geostrutturale Scanline2..... | 26 |
| Figura 16 Proiezione stereografica delle discontinuità rilevate sull'affioramento Scanline2..... | 26 |
| Figura 17 Tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione..... | 27 |
| Figura 18 A sinistra parete esposta a Sud situata tra la AG02 e la AG03, a destra lo schema del ribaltamento di blocchi per scalzamento alla base | 28 |
| Figura 19 Ammasso roccioso situato nei pressi della AG04..... | 29 |
| Figura 20 Parete carbonatica esposta a Nord nella parte meridionale del parco..... | 30 |
| Figura 21 Vista in sezione della struttura stratificata con andamento concentrico nell'altopiano a sud del parco, presunto centro d'emissione a sinistra nella foto..... | 32 |
| Figura 22 Piazzola AG01..... | 32 |
| Figura 23 Piazzola AG02..... | 33 |
| Figura 24 Piazzola AG03..... | 33 |
| Figura 25 Piazzola AG04..... | 34 |
| Figura 26 Piazzola AG06..... | 34 |
| Figura 27 Piazzola AG07..... | 35 |
| Figura 28 Piazzola AG08..... | 35 |
| Figura 29 Rilievo isolato a N del parco ospitante le Domus de Janas..... | 36 |
| Figura 30 Erosione selettiva dovuta all'azione aggressiva dell'acqua nella roccia costituita da livelli di flusso piroclastico di differente competenza..... | 36 |
| Figura 31 Esempio di tafonature ad ovest della AG04 affetta da tafonature..... | 37 |
| Figura 32 Reticolo idrico superficiale (Fonte RAS)..... | 40 |
| Figura 33 - Monografie dei pozzi censiti nell'Archivio Nazionale delle Indagini nel Sottosuolo | 41 |
| Figura 34 Schema esemplificativo, non in scala, dei processi di infiltrazione e deflusso sotterraneo..... | 43 |
| Figura 35 Grande ristagno tra la AG02 e la AG03, coord. 40.52523, 8.59298 | 44 |
| Figura 36 Ristagno presso AG03, coord.40.52748, 8.59728..... | 45 |
| Figura 37 Ristagno situato nei pressi della AG06, coord.40.52404, 8.65069 | 45 |

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|-------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 6 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|-------------------|

| | |
|--|----|
| Figura 38 Ristagno in corrispondenza della piazzola della AG07 | 46 |
| Figura 39 Ristagno a valle della sorgente nei pressi della AG08 | 46 |
| Figura 40 Carta delle Permeabilità dei Substrati e dei Suoli – area impianto (Fonte RAS) | 47 |
| Figura 41 Reticolo idrografico numerato secondo l'ordine di Stralher | 48 |
| Figura 42 Temperature mensili (in °C, nell'asse delle ordinate) registrata nella stazione di Villanova Monteleone (2012-2018) e Romana (1995-2011)..... | 51 |
| Figura 43 Evapotraspirazione (espressa in mm) per la zona di Thiesi..... | 51 |
| Figura 44 Ventosità media annuale per le stazioni meteorologiche relativa all'anno 2017 (mese giugno) | 52 |
| Figura 45 Umidità relativa per la stazione di Fertilia, per l'anno 1971-2000 | 53 |
| Figura 46 Diagramma ombrotermico (Walter e Lieth) per il settore di Thiesi | 53 |
| Figura 47 Climogramma relativo alla regione di Thiesi | 54 |
| Figura 48 Carta dei Suoli (Fonte RAS) | 55 |
| Figura 49 Stralcio della Carta dell'Uso del Suolo della Sardegna (2008, Fonte RAS). | 56 |
| Figura 50 Inquadramento PAI Pericolosità da frana (Fonte RAS)..... | 57 |
| Figura 51 Inquadramento PAI Pericolosità idraulica (Fonte RAS). | 58 |
| Figura 52 Reticolo idrografico numerato secondo l'ordine di Stralher | 60 |
| Figura 53 Archivio IFFI (Fonte ISPRA) in rosso l'area di intervento | 61 |
| Figura 54 Stralcio perimetrazione Piano Stralcio fasce Fluviali PSFF 2015..... | 62 |
| Figura 55 Stralcio perimetrazione PGRA 2021 | 63 |
| Figura 56 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 m | 66 |
| Figura 57 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche | 72 |
| Figura 58 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche | 76 |
| Figura 59 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche | 80 |
| Figura 60 - Ubicazione delle indagini geofisiche..... | 84 |
| Figura 61 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia | 89 |
| Figura 62 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso..... | 89 |
| Figura 63 Valori della costante mi per diversi tipi di roccia..... | 90 |
| Figura 64 Correlazione fra valori di mi, s, indice RMR, ed il tipo di roccia. | 91 |
| Figura 65 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S1 | 93 |
| Figura 66 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S2 | 93 |
| Figura 67 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S3 | 94 |
| Figura 68 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S4 | 94 |
| Figura 69 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S5 | 95 |

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|-------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 7 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|-------------------|

1. Premessa

Nell'ambito della redazione del Progetto Definitivo del Parco Eolico denominato "BENTU" dislocato nel territorio comunale di **Thiesi** - Provincia di Sassari (SS), al fine di avere un quadro completo del contesto geologico e geotecnico è stata redatta la presente **Relazione Geologica**, la cui stesura ottempera quanto previsto dal D.M. del 17/01/2018 recante le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (di seguito NTC), con l'obiettivo di evidenziare, le caratteristiche geologico-morfologiche e il comportamento fisico-meccanico dei terreni interessati dalle opere in progetto attraverso:

1. Analisi dell'assetto geologico e geomorfologico e definizione del modello geologico di sito;
2. La caratterizzazione geotecnica preliminare del modello geologico di sito;
3. L'analisi dell'interazione opera-terreno nel volume significativo in funzione delle caratteristiche geotecniche dei terreni di imposta, in relazione alla generica tipologia di fondazioni previste e le potenziali interazioni con le dinamiche di circolazione sotterranea eventualmente esistenti.

2. Normativa di riferimento

La presente relazione è redatta in osservanza a quanto stabilito dalla vigente normativa in materia, con particolare riferimento a:

1. D.M LL.PP. 11.03.1988 "Norme Tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii attuali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione in applicazione della Legge 02.02.1974 n°64.
2. Circ. Min. LL.PP. n° 30483 del 24.09.1988 – Istruzioni per l'applicazione del D.M. LL.PP.11.03.1988.
3. Raccomandazioni, programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, 1975 – Associazione Geotecnica Italiana.
4. D.M. Infrastrutture 17.01.2018 - Norme Tecniche per le Costruzioni. (6.2.1 – Caratterizzazione e modellazione geologica del sito, 6.4.2 Fondazioni superficiali)
5. Circ. Min. Infrastrutture e Trasporti 21.01.2019 n°7 – Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 17.01.2018.
6. D.L. 3 aprile 2006, n. 152 e successive modificazioni - "Norme in materia ambientale".
7. Norme di attuazione del PAI aggiornate al 2022 con la Deliberazione n. 12 del 21/12/2021, pubblicata sul BURAS n. 72 del 30/12/2021 e successivamente approvate con la Deliberazione di giunta regionale n. 2/8 del 20/1/2022 e con Decreto del Presidente della Regione n. 14 del 7/2/2022 dal Comitato Istituzionale.

3. Studio e indagini di riferimento

Le informazioni topografiche e geologiche dell'area oggetto della presente relazione sono state ricavate dalle pubblicazioni ufficiali e cartografia tematica esistente. Si elencano di seguito:

1. Carta Topografica I.G.M. scala in 1:25000
2. Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000
3. Carta Geologica dell'Italia in scala 1:100000
4. Carta Geologica dell'Italia in scala 1:50.000 (CARG).
5. Cartografia Geologica di base della R.A.S. in scala 1:25.000
6. RAS - Carta dell'Uso del Suolo della Regione Sardegna, 2008
7. I.S.P.R.A. - Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (legge 464/84)
8. RAS – Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna, annali idrologici 1922-2009
9. RAS – Autorità di Bacino - Piano Stralcio d'Assetto Idrogeologico

10. RAS – Autorità di Bacino - Piano di Tutela delle Acque
11. RAS – Autorità di Bacino - Piano Stralcio delle Fasce Fluviali
12. Foto aeree, Regione Sardegna

I dati a disposizione sono stati integrati con le informazioni derivanti dai sopralluoghi effettuati dalla scrivente in sito e dagli esiti della campagna di indagini geognostiche eseguite rispettivamente in data 12/05/2022 e 08-14/06/2022 nella zona di interesse.

4. Inquadramento geografico generale

L'aggettivo *tiesu* significa disteso: non a caso, il suo abitato si adagia su un pianoro alle pendici dell'altopiano *su Montiju*. Thiesi è un centro di tremila abitanti del *Meilogu*, a 40 chilometri da Sassari, fondato, secondo alcune fonti, da ebrei deportati dai romani.

L'impianto urbano si è sviluppato in due aree: attorno alla seicentesca chiesa di sant'Antonio e attorno alla parrocchiale di santa Vittoria, bell'edificio gotico-aragonese costruito fra 1400 e 1590, con decorazione interna e portale rinascimentali. In origine la forma del paese era a triangolo con ai vertici altre tre chiese: san Sebastiano, san Giovanni, immersa nella rigogliosa vallata *Badde Serena* (e raggiungibile da una scala in pietra) e il santuario della Madonna di *Seunis*, in periferia, costruita nel Settecento (poi rimaneggiata) su uno spuntone roccioso che domina la valle del rio *Molinu*.

A dieci chilometri dal paese, si trova la necropoli di *Mandra Antine*: quattro *domus de Janas* ricavate in un costone trachitico. Spicca la tomba III detta 'dipinta' per i raffinati e variopinti affreschi all'interno: è una delle eredità più sorprendenti del Neolitico sardo (III millennio a.C.).

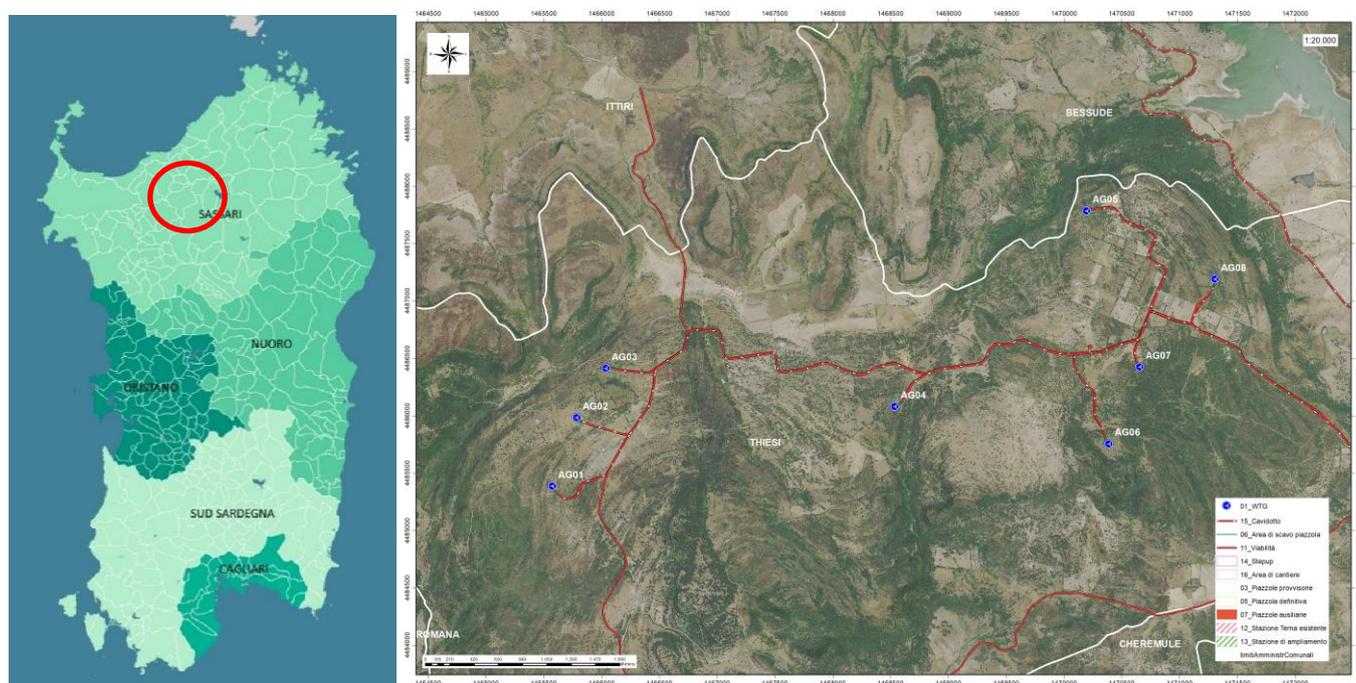


Figura 1 Localizzazione del progetto

Fuori dal paese anche il protonuraghe *Fronte 'e Mola*. È uno dei circa 350 nuraghi del *Meilogu*, territorio che ti conquisterà anche con particolarità naturalistiche, come i cono vulcanici spenti che si ergono isolati: il colle *santu Bainzu* di Thiesi è uno dei cinque crateri vulcanici del *Meilogu*, affascinante monumento naturale protetto, che crea

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|-------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 9 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|-------------------|

un paesaggio insolito e unico. Altro emergenza naturalistica è la grotta di monte *Majore*, che si apre con un ampio ingresso nel versante orientale del monte.

L'inquadramento cartografico di riferimento è il seguente:

1. Cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare I.G.M scala 1:25 000. Serie 25 -Fogli: **479 sez. I** "Ittiri"
2. Carta Tecnica Regionale scala 1:10 000 - Fogli: **479080** "Monte Cheia" e **479040** "Diga 'e su Bidighinzu".

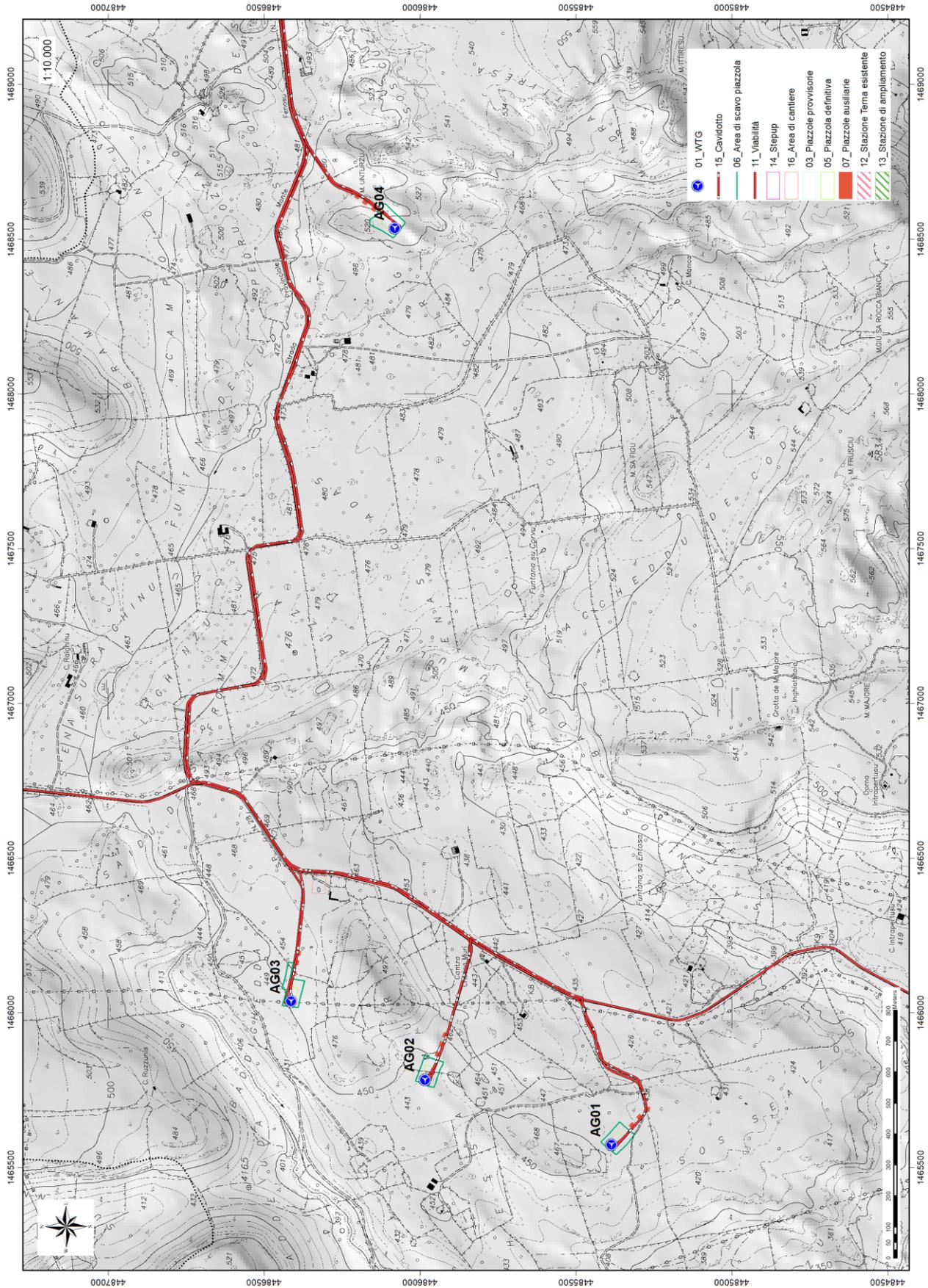


Figura 2 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione W

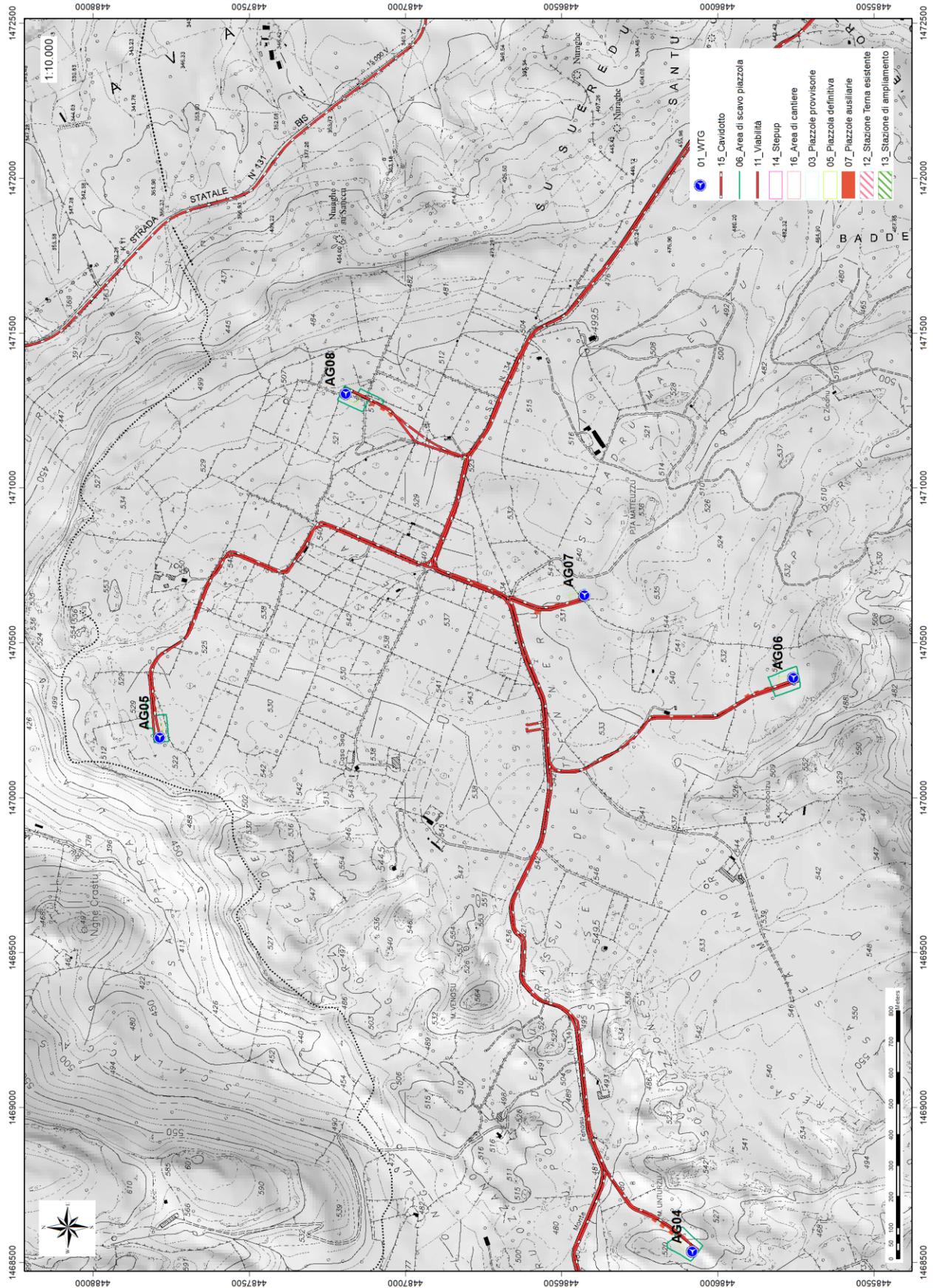


Figura 3 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione E

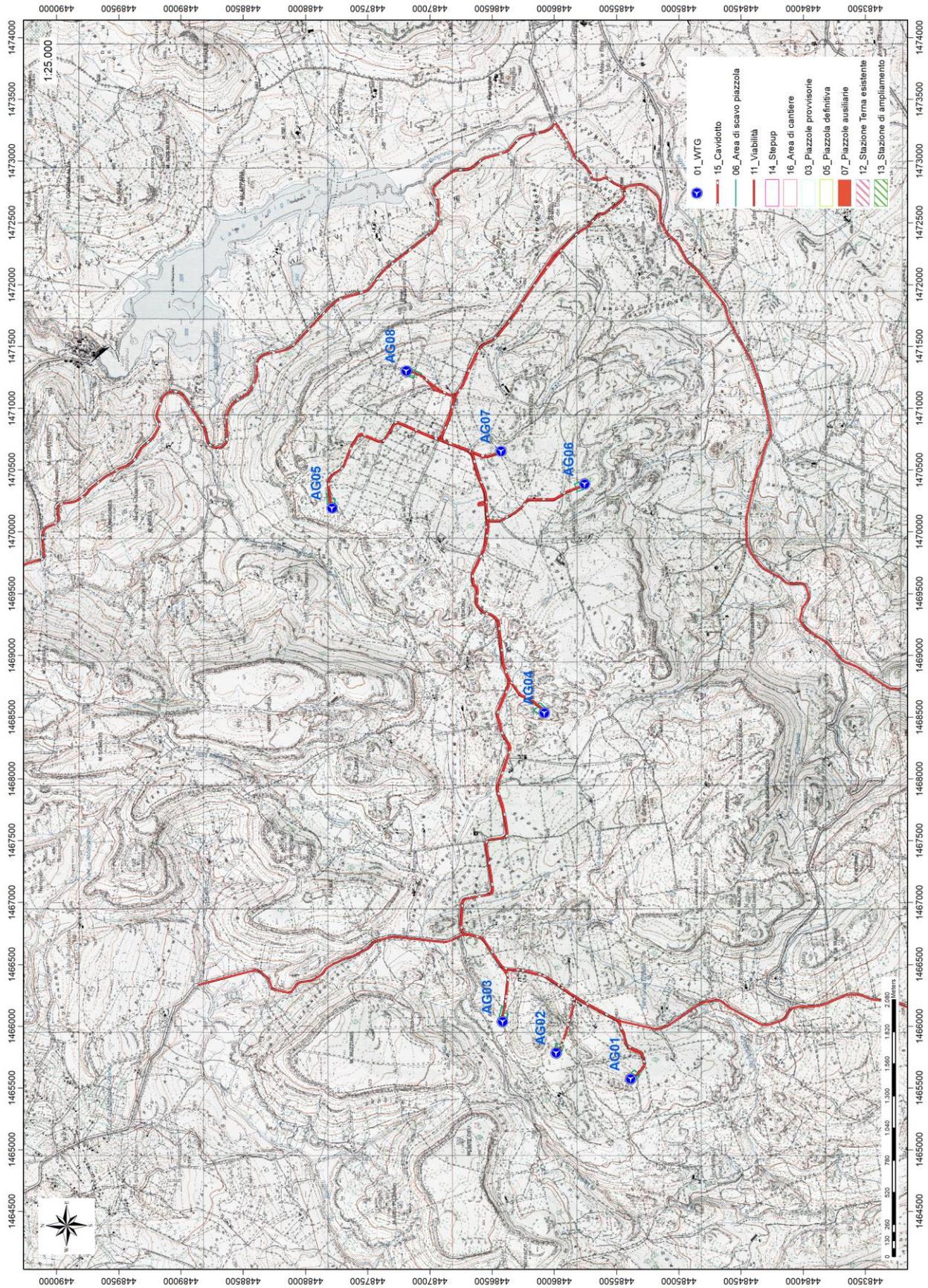


Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 13 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|



Figura 5 Paesaggio caratteristico dell'area di studio

5. Caratteristiche di progetto dell'opera

Il Parco Eolico è costituito da 8 aerogeneratori ad asse orizzontale montati su torri tubolari ad elementi in acciaio; il modello adottato è il V162 da 6,0 MW prodotto da VESTAS, ormai collaudato con risultati altamente prestazionali. Questi sono posizionati ad una distanza mediamente tra di loro pari a 6 volte il diametro del rotore, nel senso del vento dominante proveniente dal quadrante nordovest, e 3,5 volte il diametro del rotore, in senso perpendicolare alla direzione del vento dominante.

La potenza nominale del parco eolico installata è pari a 48 MW. Con un vento medio annuale di 6,22 m/s e un funzionamento annuale previsto pari a circa 2.795 ore equivalenti la produzione di energia elettrica lorda stimata è di circa 138.906 MWh/anno.

Le caratteristiche tecniche degli aero-generatori e del parco sono le seguenti:

- generatori asincroni trifase con potenza nominale pari a 6,0 MW, tensione 3 X 0.96 Kv, freq. 50 Hz
- rotor a tre pale con diametro pari a 162 m;
- torri in acciaio a sviluppo tronco conico di altezza pari a 125 m;
- cabine elettriche secondarie di trasformazione inserite in ogni aerogeneratore;
- rete elettrica interrata MT a 30 KV dai singoli aerogeneratori alla sottostazione di trasformazione MT/AT;
- sottostazione di trasformazione MT/AT (Media Tensione 30 kV - Alta Tensione 150 kV), comprendente sezionamento, ricezione e smistamento;
- rete telematica interrata per il monitoraggio e controllo dell'impianto;
- connessione alla Rete di Trasmissione Nazionale (RTN) in alta tensione 150 KV.

Le fondazioni delle torri saranno costituite da piastre in cemento armato atte a ripartire sia le azioni statiche dovute al peso proprio dell'apparato eolico che le azioni dinamiche dovute al vento trasmesse alla base delle torri dagli "apparati eolici". Da un predimensionamento di massima risulta che per terreni sufficientemente portanti ($\sigma > 1$

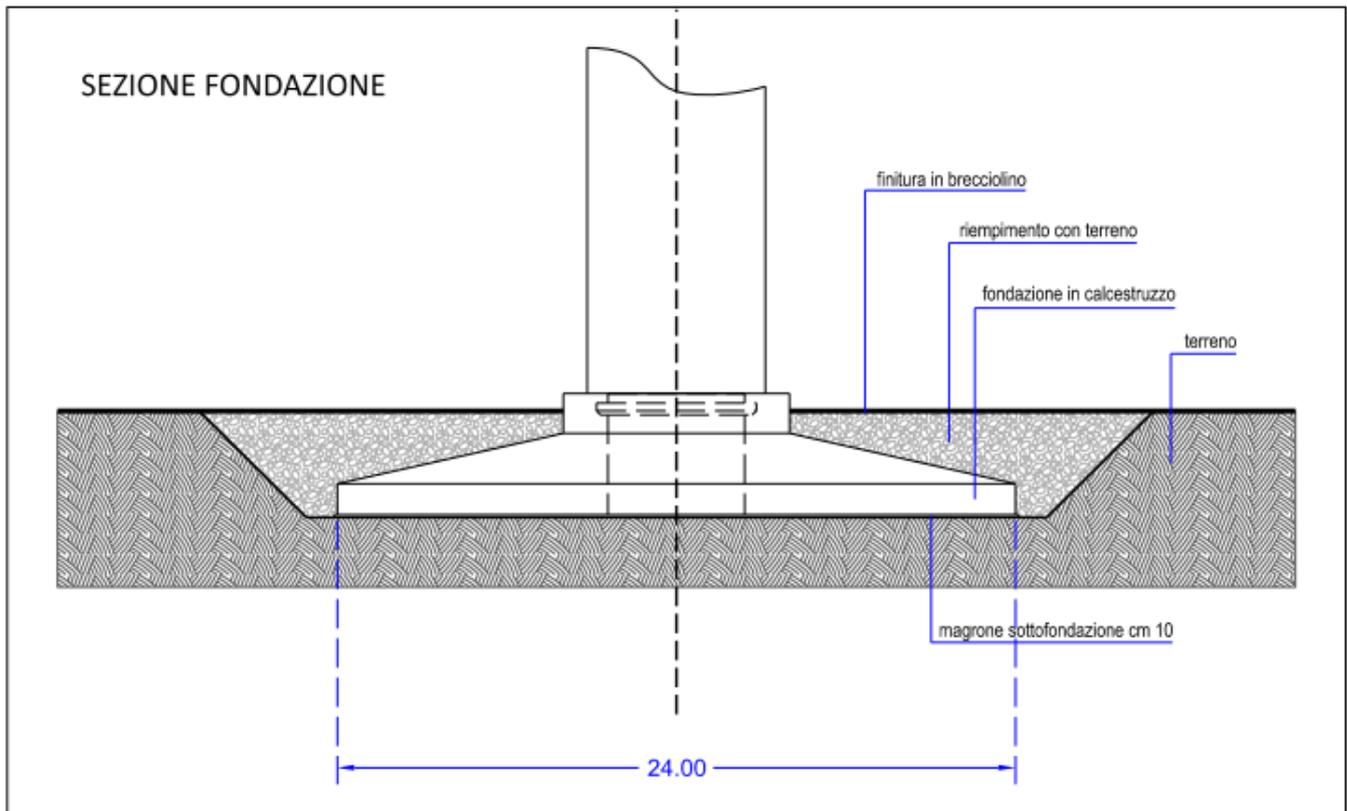
N/mm²), dovranno realizzarsi fondazioni a platea di forma circolare aventi un raggio di 12 m e un'altezza complessiva di 4,00 m

In caso di terreni dalle caratteristiche meccaniche scarse, si realizzeranno delle platee su pali di grande diametro (cm 100) disposti su tutta l'area di base atti a garantire adeguata stabilità al sistema fondazione-terreno.

Le fondazioni saranno interrate e ricoperte da uno strato di terreno dello spessore di circa m 1.

L'utilizzo di una tipologia o di un'altra scaturirà dalle indagini geotecniche derivanti dai sondaggi previsti in fase esecutiva in corrispondenza di ogni aerogeneratore.

Il volume di scavo della fondazione per ogni aerogeneratore è di circa 2260 mc.



Schema di fondazione

6. Inquadramento geologico

L'obiettivo dell'analisi dell'assetto geologico è quella di caratterizzare geologicamente e geotecnicamente l'area ove verrà installato il parco eolico e quella geomorfologicamente significativa, con particolare riferimento alle condizioni del substrato roccioso di fondazione, agli scavi ed ai riporti necessari per la realizzazione del sistema di fondazione e delle sue potenziali interazioni con le condizioni al contorno (dinamica geomorfologica, circolazione idrica superficiale e sotterranea, rapporti fra le componenti litologiche interessate) attraverso:

1. Definizione dell'assetto geologico-strutturale e idrogeologico di area vasta e dell'area geomorfologicamente significativa;
2. Definizione dell'assetto stratigrafico dell'area di sedime delle opere;
3. Definizione del modello geologico di sito.

6.1. Descrizione del contesto geologico dell'area vasta oggetto di intervento

A partire dal Paleozoico si sono susseguiti una serie di eventi geologici sviluppatasi nell'arco di circa mezzo miliardo di anni, che hanno reso la Sardegna una delle regioni geografiche più antiche del Mediterraneo centrale e, morfologicamente e cronologicamente eterogenea.

L'isola riflette pertanto una storia geologica molto articolata, che testimonia, in maniera più o meno completa, alcuni dei grandi eventi geodinamici degli ultimi 400 milioni di anni.

L'orogenesi Caledoniana, la più antica, le cui tracce si rinvergono principalmente nel nord della Gran Bretagna e nella Scandinavia occidentale, fu causata dalla progressiva chiusura dell'oceano Giapeto, a seguito della collisione dei continenti Laurentia, Baltica e Avalonia, dando così origine al super continente Laurussia.

La successiva fase dell'orogenesi Ercinica (o Varisica) ha avuto corso a partire dal Carbonifero, circa 350 Ma fa e si è protratta fino al Permiano determinando un'estesa catena montuosa ubicata tra il Nord America e l'Europa.

Quest'orogenesi ha prodotto in Sardegna tre zone metamorfiche principali. Procedendo dal nucleo orogenetico verso l'avanfossa si trovano le zone dette: Assiale (Sardegna NE) – a Falde interne (Sardegna centrale) - a Falde esterne (Sardegna SW).

Successivamente, tra il Carbonifero Sup. e il Permiano Inf., il basamento paleozoico è soggetto a magmatismo, intrusioni di differente composizione, che danno luogo a un batolite granitico composito, la cui ossatura fondamentale affiora in continuità nella Sardegna Settentrionale e nella Corsica Occidentale.

Nel resto dell'Isola affiorano plutoni isolati, anch'essi compositi, di minori dimensioni, quali quelli dell'Iglesiente e del Sarrabus.

L'area di studio ricade nella zona costituita dalla copertura sedimentaria e vulcanica post-ercinica; principalmente è costituita dalle coperture sedimentarie mioceniche, dalle rocce della successione vulcano-sedimentaria Miocenica, e dai depositi quaternari. In particolare, l'area vasta è compresa all'interno *Distretto vulcanico di Capo Marargiu*, del *Distretto vulcanico di Osilo Castelsardo* e della *Successione sedimentaria oligo-miocenica del Logudoro-Sassarese*.

6.2. Successione litostratigrafica dell'area di intervento

La successione vulcanica oligo-miocenica affiorante nell'area di interesse è costituita da ammassi lavici, duomi e piroclastiti messi in posto in condizioni subaeree e da subordinate epiclastiti.

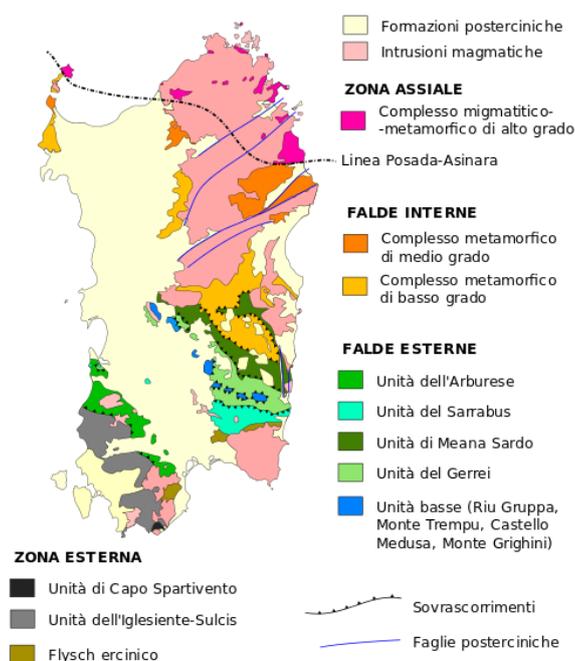


Figura 6 Schema tettonico-strutturale della Sardegna

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 16 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

6.2.1. Distretto vulcanico di Capo Marargiu Miocene Inferiore)

(MTD) Unità di Pala Mantedda: è costituita da un'alternanza di colate e duomi a chimismo da andesitico a dacitico, per uno spessore di circa un centinaio di metri. Le lave, talora scoriacee, hanno tessitura porfirica per fenocristalli di plagioclasio e clinopirosseno, immersi in una pasta di fondo vetrosa. Le colate, spesso separate tra loro da livelli conglomeratici, presentano porzioni autoclastiche nelle parti basali, e laminazioni di flusso in quelle centrali. Aquitaniano.

(LGS) Unità di Monte Longos: è rappresentata da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, pomiceo-cineritici, saldati, di colore nerastro o violaceo alla base. I depositi si presentano ben saldati, con aspetto vetroso e ricchi in cristalli di plagioclasio, pirosseno e biotite, e rare fiamme di colore nero. I depositi hanno chimismo riolitico, e spessore minimo di 5 m. Al contatto con le sottostanti piroclastiti (UUI) sono presenti alcuni livelli centimetrici di ceneri di caduta, con pomici e litici. Burdigaliano.

(UUI) Unità di Uri: è costituita da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, variamente saldati, di colore grigiastro e subordinatamente rossastro per alterazione, ricchi in frammenti litici e cristalli liberi. Il deposito piroclastico è costituito da pomici biancastre e litici eterometrici (4-5 cm) di natura andesitica o ignimbratica, in matrice cineritica grossolana nella quale sono immersi anche cristalli di plagioclasio, pirosseno e biotite. Il diverso grado di saldatura varia dalla base (nullo) verso il tetto della successione (elevato), influenza la tessitura della roccia, che si presenta debolmente isoorientata nei termini poco saldati, mentre è marcatamente eutassitica nei termini saldati. La composizione delle piroclastiti è riolitica, e lo spessore varia da pochi metri fino a 30 m. Le datazioni radiometriche ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Gattacecca et al., 2007) indicano un'età di $18,95 \pm 0,07$ (Burdigaliano).



Figura 7 Particolare della litologia appartenente all'unità di Uri

(UNV) Unità di Nuraghe Vittore: è costituita da colate di andesiti basaltiche e basalti, con caratteristiche prevalenti di autobrecce, e daciti porfiriche. Le lave coerenti hanno colore grigio scuro e tessitura porfirica per fenocristalli di plagioclasio, pirosseno e olivina in pasta di fondo microcristallina. Presentano frequente fratturazione tipo *platy jointing* secondo la direzione di flusso. Le lave a blocchi sono costituite da blocchi irregolari e eterometrici di lava, debolmente vescicolati, a tessitura clasto-sostenuta, con arrossamento dovuto ad alterazione idrotermale. I

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 17 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

rapporti con le piroclastiti a contatto a letto (SSU) e a tetto (UUI) sono caratterizzati da disconformità. Burdigaliano inferiore.

(MLO) Unità di Villanova Monteleone: sono costituiti da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, a chimismo riodacitico, da saldati a mediamente saldati, con strutture vitroclastiche e/o eutaxitiche, e cristalli liberi di plagioclasio, sanidino, clinopirosseno, anfibolo, biotite e rare olivine. Burdigaliano.

(OMN) Unità di Romana: rappresentata da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica a chimismo riodacitico, pomiceo-cineritici, mediamente saldati, ricchi in pomici e cristalli liberi di Pl, San, Bt, e subordinato Px.

(SSU) Unità di Su Suerzu: rappresentati da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, saldati, e con tessitura paratassitica, di colore rossastro, con fiammae grigiastre di dimensioni comprese tra 2 cm e 20 cm, e litici centimetrici costituiti da altre ignimbriti o da andesiti. Nell'area a NNW di **Thiesi** è presente un prodotto di aspetto ossidiano, probabilmente originato dalla silicizzazione di una piroclastite, di colore grigio da chiaro a scuro, con spessore limitato (7-8 m), preceduto da cineriti bianche contenenti frustoli carboniosi e litici e lapilli accrezionali. I depositi di Su Suerzu sono delimitati dalle Lave di Pala Mantredda (MTD) a letto, e dai corpi di Nuraghe Vittore (UNV) a tetto, con rapporti di disconformità. La composizione chimica delle ignimbriti è riodacitica, mentre lo spessore varia tra 15-20 m fino a 70 m. Burdigaliano.

6.2.2. Distretto Vulcanico di Osilo-Castelsardo (Miocene Inferiore)

(ILV) Unità di Monte sa Silva: sono costituiti da piroclastiti di flusso pomiceo-cineritiche, di colore bianco-grigiastro, non saldate, ricche di fenoclasti (plagioclasio, quarzo, biotite), con litici di vulcaniti di dimensioni da 3 a 10 cm, e pomici di dimensioni variabili tra il centimetro e 5 cm. Le piroclastiti sono prevalentemente massive, con rari livelli grossolanamente stratificati per effetto della concentrazione dei litici. Il chimismo dei depositi è riolitico, e lo spessore varia da 10 fino a 100 m. L'età radiometrica determinata col metodo $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ (progetto CARG) è di $18,61 \pm 0,23$ Ma. Burdigaliano.

6.3. Successione sedimentaria Oligo-Miocenica del Logudoro-Sassarese

La successione sedimentaria miocenica affiorante nell'area di interesse è caratterizzata dalla presenza di due sequenze deposizionali limitate da discordanze riconoscibili a scala bacinale. Il substrato di questi depositi è costituito da vulcaniti ed epiclastiti di età compresa tra i 23 e i 18 Ma.

La prima sequenza deposizionale è costituita da depositi continentali fluviali e di piana alluvionale, deltizi e marini di piattaforma, mentre la seconda sequenza è costituita da depositi fluvio-marini e carbonatici di piattaforma.

(RESa) Litofacies nella Formazione di Mores: nota come "calcarei inferiori", è costituita da una successione di calcareniti, calcari bioclastici fossiliferi, e calcari a componente terrigena variabile, con faune a gasteropodi "Turritelle", ostreidi ed echinidi (Scutella, Amphiope), riferibili al Miocene inferiore (Burdigaliano). Il passaggio alla soprastante formazione di Borutta (RTU) presenta spesso caratteri eteropici, infatti può essere sormontata direttamente dalla Formazione di Monte Santo (NST). Burdigaliano superiore.

(RTU) Formazione di Borutta: si tratta di una successione di marne, marne arenacee bioturbate, calcari marnosi e siltiti, localmente in alternanze ritmiche, di colore da grigio-bruno a biancastro-giallastro. Tali depositi, il cui spessore varia tra 100 e 200 m, presentano contatto superiore eteropico con le arenarie della formazione di Florinas, oppure direttamente con i calcari della Formazione di Monte Santo (NST). Il contenuto fossilifero abbondante, costituito da echinidi, bivalvi, gasteropodi, pteropodi, foraminiferi planctonici e ostracodi, permette di riferire i depositi di questa formazione al Burdigaliano superiore - Langhiano.

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 18 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

(TLR) Unità di Chelchedu-Tiloromo. Andesiti e andesiti basaltiche in cupole di ristagno, ipocristalline, porfiriche per fenocristalli di Pl, Ol, Cpx; intercalate e/o iniettate entro i depositi piroclastici dell'unità UUI.

Formazione del Rio Minore. Depositi epiclastici con intercalazioni di selci, siltiti e marne con resti di piante, conglomerati, e calcari silicizzati di ambiente lacustre ("Formazione lacustre" Auct.). Burdigaliano

(FSI) Unità di Monte Frusciu. Daciti ipocristalline, porfiriche per fenocristalli di Pl, Sa, Bt, Am, Mag; in cupole di ristagno e locali versamenti laterali. (K/Ar $17,5 \pm 0,5$ Ma: Lecca et alii, 1997), (40Ar/39Ar bt: $18,48 \pm 0,18$ Ma: Progemisa S.p.A.

(NST) Formazione di Monte Santo: è costituita da una successione di calcari bioclastici di piattaforma interna, con rare intercalazioni silicoclastiche ed episodi biohermali, e calcareniti. Poggiano eteropicamente sopra la Formazione di Florinas, quella di Borutta (RTU) o sulle vulcaniti. Gli affioramenti che poggiano sulla Formazione di Florinas sono costituiti da *grainstone* con stratificazione incrociata o cliniformi, ricche in alghe calcaree (*Rodophyllum*, *Lithophyllum*) e coralli (*Tarbellastrea*, *Porites*), con accumuli di *algal ball*, gasteropodi, lamellibranchi, echinidi, macroforaminiferi. Quando poggia sulle marne della Formazione di Borutta (RTU), il passaggio avviene in giacitura caotica ed erosiva, con slumping e megabrecce. Lo spessore è variabile, con un massimo di 50 m. L'associazione fossilifera permette di riferire tali depositi al Serravalliano - Tortoniano.

6.4. Depositi Quaternari dell'area continentale

I depositi quaternari cartografati nell'area di studio sono generalmente poco rilevanti; sono rappresentati principalmente da depositi alluvionali, depositi di versante e sedimenti legati a gravità.

(PVM2a) Litofacies nel Subsistema di Portovesme: si tratta di depositi di ghiaie e alluvioni terrazzate, da medie a grossolane, con subordinate sabbie. Pleistocene superiore.

(a) Depositi di versante: sono costituiti da detriti con clasti angolosi, talora parzialmente cementati accumulati essenzialmente per gravità alla base dei versanti rocciosi più ripidi. Olocene.

(a1a) Sedimenti legati a gravità: sono costituiti di frana, e rappresentano corpi di frana antichi accumulati essenzialmente per gravità alla base dei versanti rocciosi più ripidi. Olocene.

Tutte le turbine ricadono nell'Unità di Monte Frusciu, appartenente al distretto vulcanico di Capo Marargiu

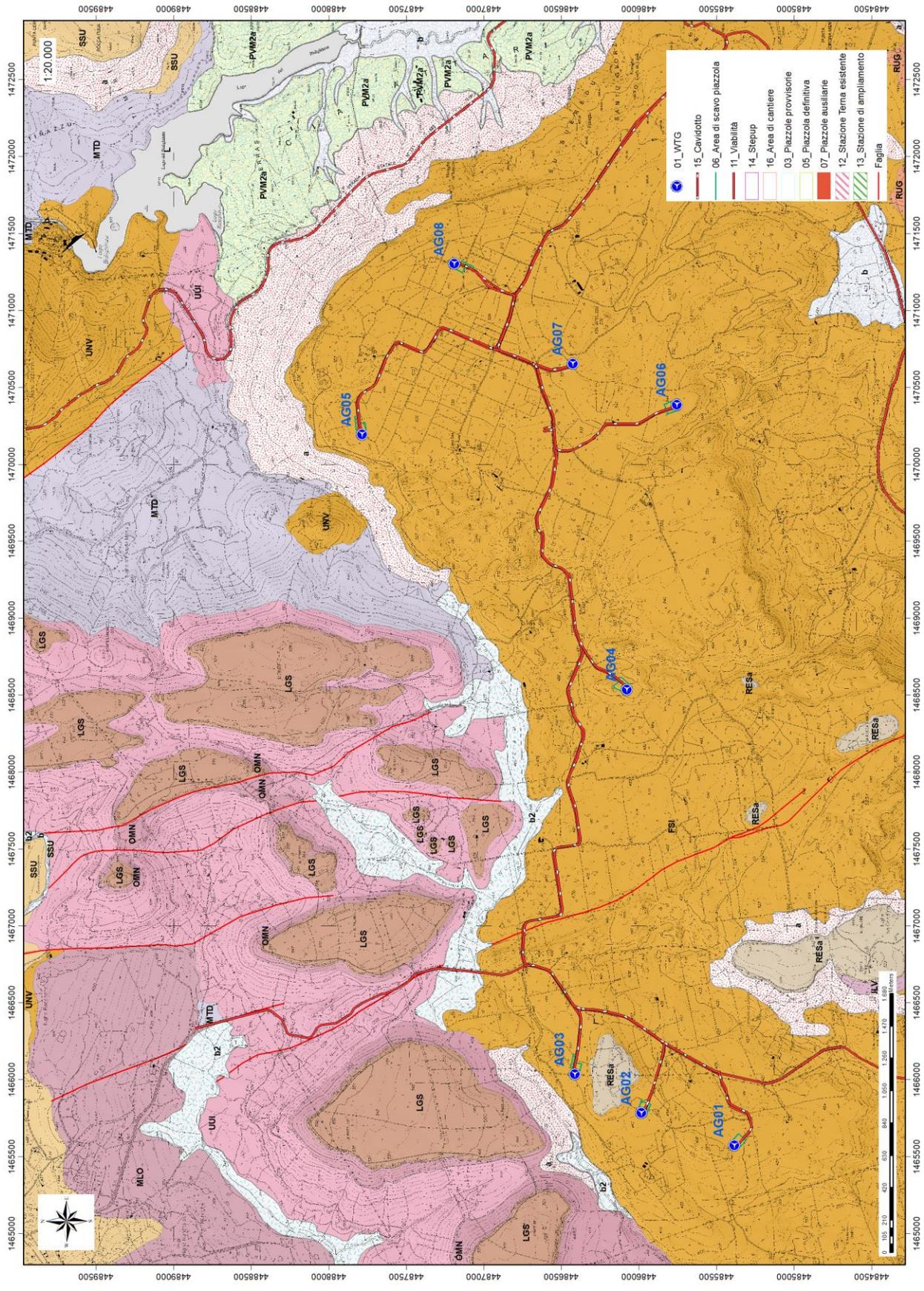


Figura 8 Stralcio carta geologica (Fonte RAS)

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 20 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

7. Analisi delle condizioni geostrutturali generali

L'area di studio è caratterizzata dall'affioramento delle rocce sedimentarie e vulcaniche del Miocene e dai depositi quaternari.

I depositi sedimentari miocenici sono costituiti da diverse facies composizionali che vanno dai termini carbonatici alle arenarie, mentre le coperture vulcaniche sono costituite prevalentemente da espandimenti lavici e ignimbriti.

I depositi quaternari sono principalmente costituiti da depositi alluvionali e depositi di versante.

L'area vasta è caratterizzata da diverse faglie a direzione NW-SE (settore centro-orientale dell'area vasta) e alcune a direzione NE-SW (nel settore occidentale dell'area vasta).

Di queste strutture tettoniche presenti, le faglie determinano il controllo tettonico delle principali valli incise. La giacitura dei piani è abbastanza costante, sebbene possa esser influenzata dalle faglie. Una faglia principale a direzione NW-SE separa il settore ovest (con le turbine AG01, AG02 e AG03), dal settore est, nel quale ricadono le turbine AG04, AG05, AG06, AG07 e AG08. Nei diversi siti di installazione la dinamica geostrutturale ha creato piani di fratturazione a diversa scala. I movimenti tettonici hanno fratturato i materiali affioranti.

Tutte le stazioni eoliche sono posizionate nella copertura vulcanica miocenica del Distretto vulcanico di Capo Marargiu (Unità di Monte Frusciu – FSI)

7.1. Campagna di raccolta dei dati geostrutturali su affioramento

Nel corso dei rilievi effettuati è stata realizzata un'indagine mirata alla caratterizzazione geostrutturale delle litologie su cui poggeranno le fondazioni delle turbine, indirizzata al rilievo di tutti i parametri tecnici, verificando in prima battuta le caratteristiche strutturali, come direzione, immersione e inclinazione delle discontinuità presenti, e analizzando le caratteristiche dei vari sistemi di discontinuità. L'analisi della struttura dell'ammasso roccioso e delle discontinuità è infatti indispensabile in quanto essa regola i processi di rottura e deformazione della roccia: lungo tali piani di debolezza, infatti, le resistenze alla trazione risultano sostanzialmente assai ridotte e talora nulle. Dai rilievi geologici è emerso che nel territorio in esame sul quale verranno installate le turbine, sia per quanto riguarda caratteristiche litologiche in senso stretto e sia per quanto riguarda le caratteristiche strutturali è possibile considerare, in base al comportamento geomeccanico, **un'unica litologia principale**, quella dove ovviamente ricadono tutte le turbine, appartenente all'**Unità di Monte Frusciu**, costituita da Daciti ipocristalline.

Durante l'attività di rilevamento di campo, per avere un'idea generale e il più rappresentativa possibile delle discontinuità a grande sono state prese in particolare le giaciture delle fratture principali (di tipo *platy joints*) nelle diverse aree nel parco.



Figura 9 Affioramento dell'Unità di Monte Frusciu con discontinuità in giacitura subverticale con orientazione 140° Nord e 75° di inclinazione, coord. 40.52325, 8.59521.



Figura 10 Affioramento con discontinuità in giacitura 250Nord e inclinazione 60 gradi in prossimità della AG08, coord. 40.53518, 8.66079



Figura 11 Affioramento con discontinuità in giacitura 140Nord e inclinazione 82 gradi in località Baddighedda, coord. 40.5266, 8.59245



Figura 12 Affioramento con discontinuità in giacitura 250Nord e inclinazione 81 gradi tra la AG07 e la AG08, coord. 40.53273, 8.65894

Per determinazione dei parametri geomeccanici delle litologie interessate, ovvero quelle costituite da daciti più o meno fratturate, sono stati presi in considerazione n° 2 affioramenti rocciosi (**Scanline 1** e **Scanline 2**), entrambi situati nell'area centrale del parco, in corrispondenza di tagli stradali, per via della scarsità di affioramenti sufficientemente estesi e privi di vegetazione. Tali affioramenti sono stati utilizzati come punti di stazione, nei quali sono state rilevate le caratteristiche delle discontinuità. Gli ammassi rocciosi analizzati presentano unicamente discontinuità secondarie, ovvero date da fratturazione. E' stata riconosciuta e distinta una famiglia di fratturazione principale, dovuta al fenomeno chiamato "*Platy jointing*", dove le discontinuità in seguito al raffreddamento sono influenzate dall'orientazione del flusso lavico durante la messa in posto, questa risulta estremamente frequente e regolare, e varia la sua giacitura in tutta l'area del parco; sono state rilevati piani di discontinuità con orientazioni differenti, ma non è stato possibile, per la loro scarsa frequenza, dividerli in famiglie.

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 24 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

Gli affioramenti presi in considerazione permettono di classificare solo in maniera preliminare le unità litologiche più rappresentative del sito di indagine. Per avere un quadro esaustivo delle condizioni strutturali degli ammassi rocciosi sarebbe opportuno perciò, in fase esecutiva, effettuare delle indagini puntuali.

Alla prima fase del rilievo dei dati in situ, è seguita la fase di elaborazione dei dati riguardanti le giaciture delle discontinuità. La distribuzione nello spazio di tali discontinuità è stata rappresentata mediante la proiezione equiangolare di SCHMIDT-LAMBERT, proiezione stereografica equatoriale che visualizza nell'emisfero inferiore della sfera ideale di riferimento le discontinuità, rappresentate come archi di ellissi (dette ciclografiche) per i piani, e come punti per le linee o per i poli dei piani (ossia le intersezioni della linea ortogonale al piano con la sfera di proiezione). L'elaborazione grafica dei dati giacaturali delle discontinuità è stata eseguita con il software "Dips7.0".

7.1.1. Rilievo geostrutturale Scanline 1

Il rilievo Scanline 1 è stato fatto lungo una linea di 8,70m orientata N90, coordinate 40.52968, 8.63976. L'ammasso roccioso ha l'aspetto stratificato e struttura massiccia. Le superfici riconoscibili sono imputabili unicamente alla fratturazione, la principale delle quali è dovuta al fenomeno di *platy jointing*. Dall'analisi dell'ammasso in situ, la roccia si presenta massiva ma debolmente affetta da alterazione fisica. La spaziatura media tra le fratture che pervadono l'ammasso roccioso è di 0,25m. Unicamente una famiglia di giunti risulta essere ben riconoscibile, queste presentano quasi sempre un'apertura che va dal millimetro ai 6mm, è stato possibile rilevare i valori delle giaciture nelle superfici affioranti grazie all'erosione. Le superfici sono in genere da poco a mediamente scabre, in base ai risultati ottenuti dalle osservazioni su campo risulta che i valori di JRC compresi tra 5 e 12.



Figura 13 Rilievo geostrutturale Scanline1.

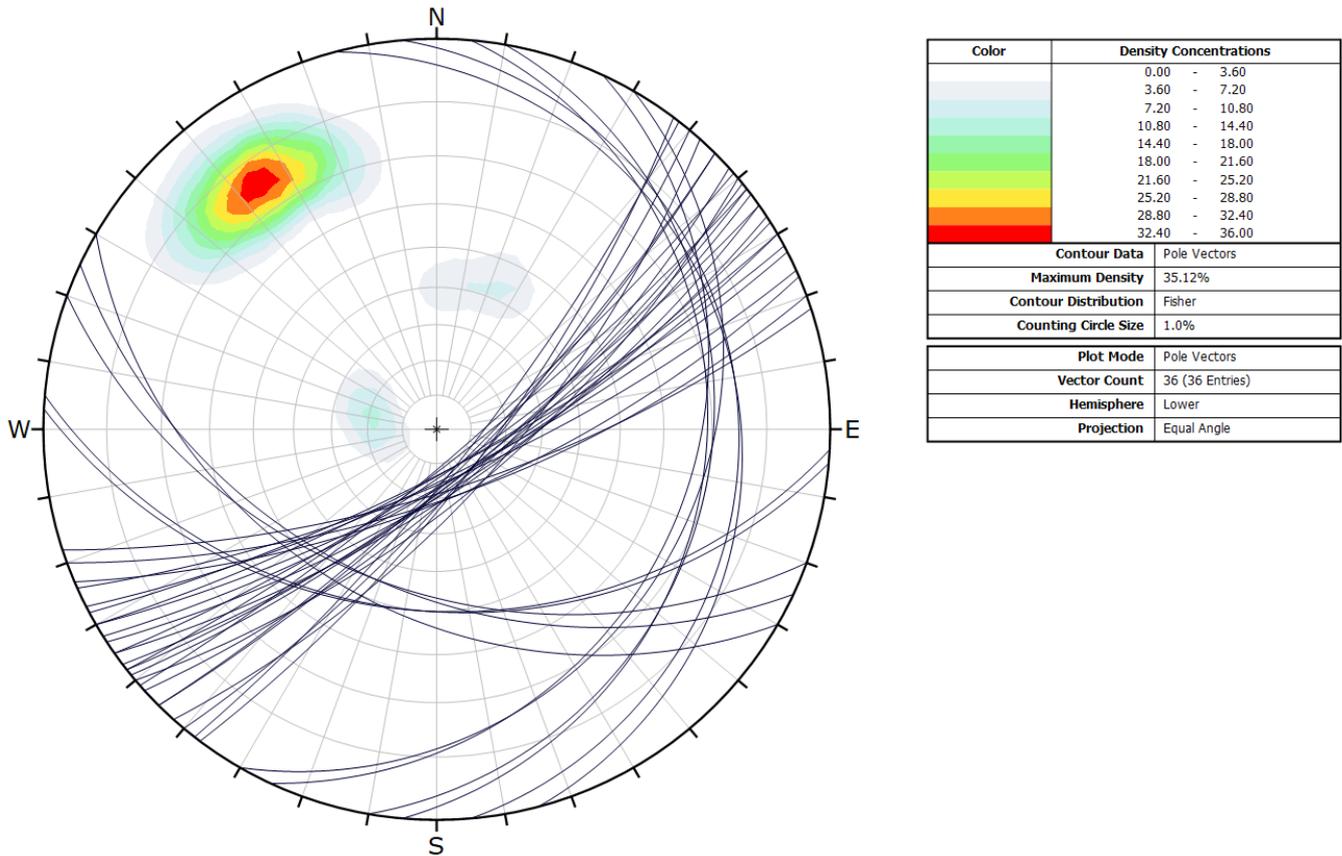


Figura 14 Proiezione stereografica delle discontinuità rilevate sull'affioramento Scanline1.

Dall'elaborazione dei dati sulle discontinuità è possibile notare come la densità dei poli delle discontinuità sia alta a NW con valori di inclinazione superiore a 70° . Per il caso specifico sarebbe quindi opportuno prestare attenzione al verificarsi di scivolamenti durante gli scavi in eventuali scarpate orientate a SE con inclinazioni superiori ai 70° .

7.1.2. Rilievo geostrutturale Scanline2

Il rilievo Scanline 2 è stato fatto lungo una linea di 10m orientata N55 in un taglio stradale a nord della AG04. L'ammasso roccioso ha l'aspetto stratificato e struttura massiccia. Le superfici riconoscibili sono imputabili principalmente alla stratificazione delle colate durante la messa in posto. Dall'analisi dell'ammasso in situ, la roccia si presenta massiva ma debolmente affetta da alterazione fisica. Un campione di roccia si frattura con pochi colpi di martello. La spaziatura media tra le fratture che pervadono l'ammasso roccioso è di 0,25m. Sono state rilevate più famiglie di fratture ma la principale è data dai Platy Joints. Le superfici sono in genere da poco a mediamente scabre, in base ai risultati ottenuti dalle osservazioni su campo risulta che i valori di JRC compresi tra 5 e 10.



Figura 15 Rilievo geostrutturale Scanline2.

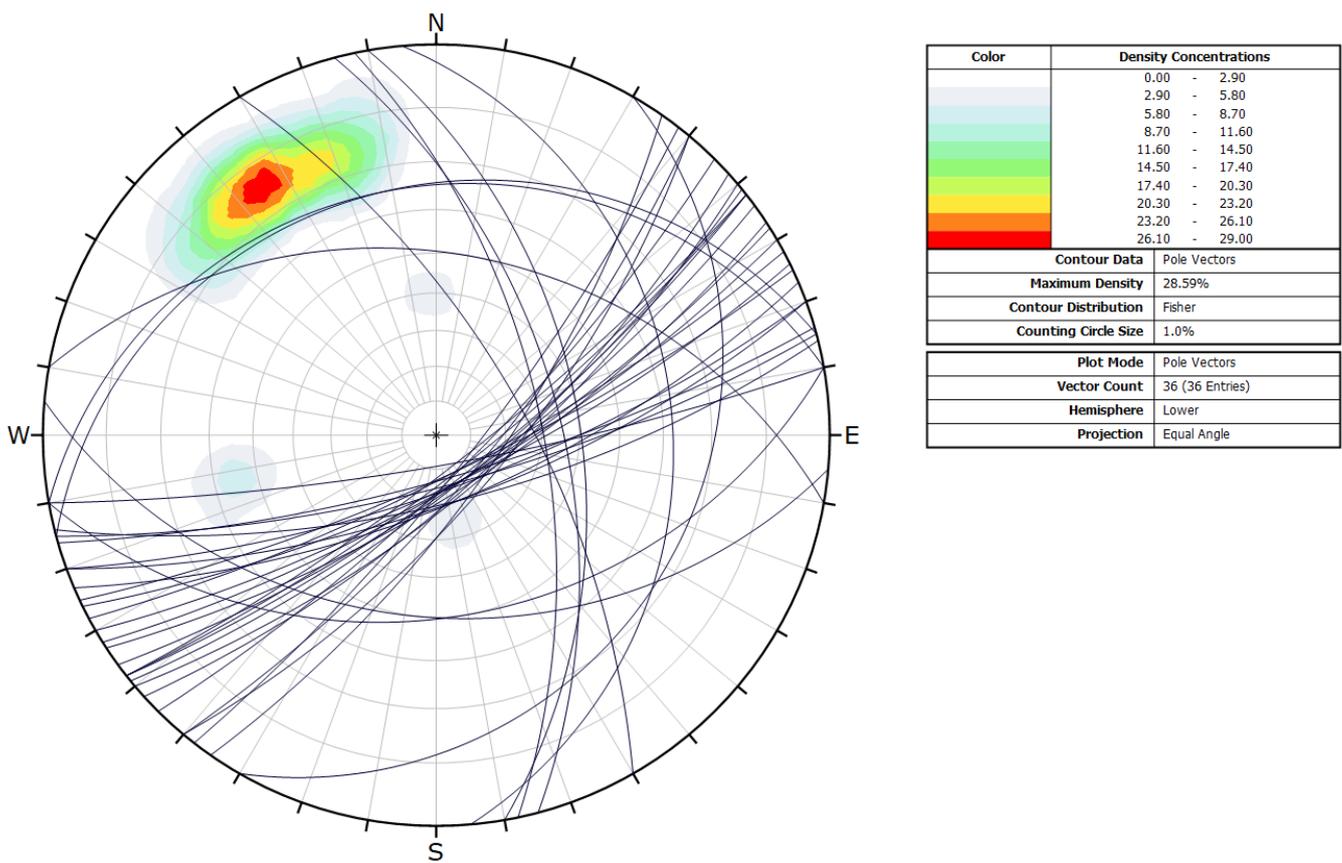


Figura 16 Proiezione stereografica delle discontinuità rilevate sull'affioramento Scanline2.

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 27 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

Dall'elaborazione dei dati sulle discontinuità è possibile notare come la densità dei poli delle discontinuità sia alta a N-NW con valori di inclinazione di circa 70°. Per il caso specifico sarebbe quindi opportuno prestare attenzione al verificarsi di scivolamenti durante gli scavi in eventuali scarpate orientate a S-SE con inclinazioni superiori ai 70°.

8. Analisi qualitativa di stabilità dell'ammasso roccioso

L'intensa fratturazione descritta nei precedenti capitoli produce sulla roccia una geometria estremamente variabile in termini di direzione e immersione, nelle tre direzioni principali dello spazio. Ciò che varia in relazione alla composizione granulometrica dei singoli strati originari è la spaziatura tra i giunti e il grado di fissilità. Pertanto è estremamente difficile se non impossibile definire l'assetto a piccola scala per quanto appena descritto.

Si può definire un range di spaziatura alla mesoscala, tale da individuare una potenziale compagine di blocchi in grado di staccarsi dall'ammasso se le condizioni geostrutturali lo permettono (piani a franapoggio o intersezione di piani con direttrice a franapoggio).

Tali dimensioni possono essere individuate tra il decimo di metro cubo a qualche metro cubo. La variabilità direzionale delle famiglie di giunti che individuano i blocchi è piuttosto marcata e diversificata in funzione, come detto della competenza degli strati soggetti agli sforzi.

Ne deriva di fatto, una difficile previsione delle potenziali propensioni a fenomeni di crollo e/o scivolamento, ma si tratta di caratteri locali la cui eteropia laterale risulta sempre molto marcata.

In generale si può affermare che versanti come questi sono oggetto di due fenomeni di scivolamento distinti in relazione al dominio di famiglie di giunti.

Alla piccola scala laddove il materiale originario è costituito da granulometrie medie e fini, sono più frequenti fenomeni di sfaldamento e distacco di lamine da centimetriche a decimetriche. Queste ultime divengono più simili a piccoli blocchi la dove la granulometria aumenta.

A scala media infatti, le spaziature nella stessa famiglia sono maggiori, anche oltre metro ed interessano blocchi più grandi ma che rispondono alle medesime dinamiche di quelli pocanzi analizzati.

Di fatto quindi, non potendo generalizzare alla piccola scala è sempre d'obbligo un rilievo puntuale sugli affioramenti ove possibile. Il materiale distaccato si raccoglie ai piedi del pendio, in accumuli più o meno estesi in funzione della pendenza.

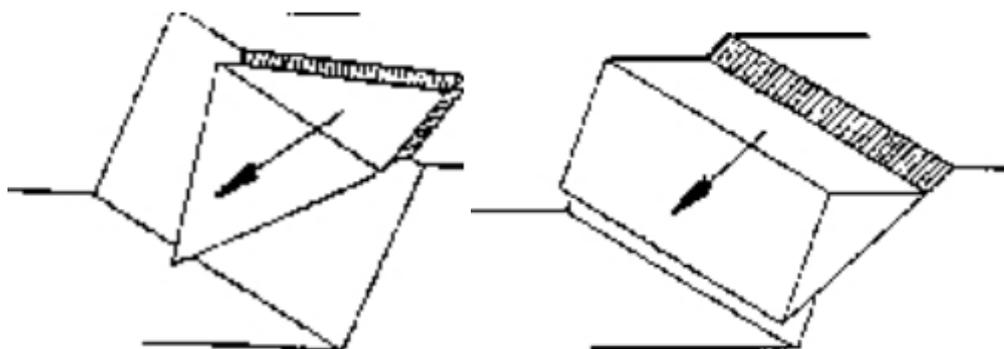


Figura 17 Tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione

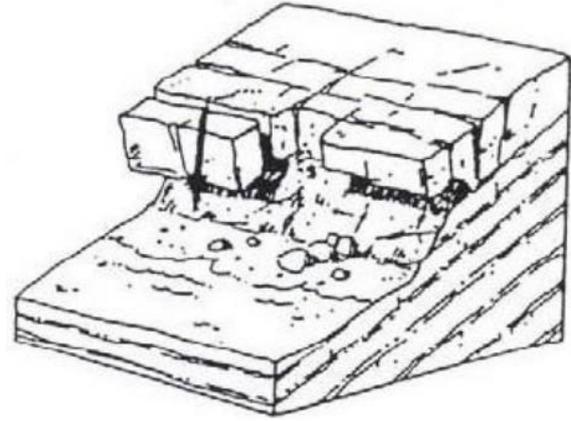


Figura 18 A sinistra parete esposta a Sud situata tra la AG02 e la AG03, a destra lo schema del ribaltamento di blocchi per scalzamento alla base

In Figura 18 viene illustrata una parete affiorante appartenente alla Formazione di Mores caratterizzata da stratificazione a giacitura orizzontale, questa è soggetta ad erosione differenziale in strati meno competenti, ciò comporta uno scalzamento alla base con conseguente distacco di blocchi nei livelli soprastanti più competenti ma fratturati; ai piedi sono presenti blocchi distaccatisi tendenzialmente per crollo/ribaltamento.

Gli ammassi rocciosi costituiti in litologie dacitiche, ovvero quelle su cui poggeranno tutte le turbine, presentano le medesime caratteristiche per quanto riguarda instabilità, ovvero tendono a formare scarpate che arretrano per crollo ribaltamento e per scivolamento planare o di cunei. La differenza con le formazioni carbonatiche sopra citate sta nella natura dei giunti, ovvero, mentre nelle prime sono dovuti anche a stratificazione, in queste ultime sono di tipo *platy joints*, presentano in ogni caso una forte regolarità anche alla scala dell'ammasso, è pertanto prevedibile, almeno in parte, come vari la stabilità dell'ammasso al variare dell'orientazione e della pendenza del versante.



Figura 19 Ammasso roccioso situato nei pressi della AG04.

In Figura 19 è evidente come l'intersezione subortogonale di diverse famiglie di fratture tenda ad isolare blocchi plurimetrici, questi, una volta deconfinati dall'erosione tendono a crollare per ribaltamento.

9. Inquadramento geomorfologico

Il territorio indagato è caratterizzato principalmente dalla presenza di altipiani, con rilievi tabulari e dislivelli massimi dell'ordine di 350 m circa tra monte e valle, e morfologie a *cuestas* dovute alla presenza di versanti con pendenze talvolta differenti, che individuano valli a orientamento SW-NE e N-S. I rilievi presentano altezze massime di 550-570 m s.l.m., mentre le valli si trovano da quote minime di 200m fino a 350 m circa.

I fenomeni di sollevamento tettonico hanno ridefinito la morfologia del paesaggio operando un ringiovanimento del rilievo, innescando una nuova azione geomorfogenetica ad opera degli agenti atmosferici (acqua, vento in primis) che hanno rimodellato l'altipiano così come lo conosciamo, ovvero solcato da profonde incisioni vallive che riprendono le linee di fratturazione tettoniche, che isolano il settore montano distinguendolo nettamente dalle aree pianeggianti circostanti.

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 30 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

I prodotti di erosione vengono trasportati dall'acqua e dal vento e si depositano in relazione alla loro dimensione e all'energia di trasporto delle acque lungo le pendici dei versanti e nelle valli andando a costituire le coperture sedimentarie.

Le morfologie osservabili in quest'area sono strettamente connesse alle caratteristiche di messa in posto e dalle caratteristiche fisico-chimiche delle litologie presenti e dalla tipologia ed intensità degli agenti modellanti predominanti.

Il settore oggetto di studio è contraddistinto essenzialmente da due unità geomorfologiche:

1. i rilievi di natura vulcanica, dati dalle colate di flusso piroclastico nel caso della Monte Longos Fm., e dalle daciti nel caso della Monte Frusciu Fm.
2. le coperture sedimentarie, date dalla Formazione di Mores.

I primi rappresentano la manifestazione di un vulcanismo appartenente al ciclo calco-alcalino oligo-miocenico, che produsse flussi piroclastici e in subordine lavici. Il paesaggio è dominato da rilievi tabulari costituiti dalla sovrapposizione di bancate estese e generalmente inclinate; sono costituite prevalentemente da piroclastiti a chimismo acido e intermedio, di aspetto massivo e con fessurazioni di raffreddamento colonnari irregolari e prismatiche, talvolta anche tabulari.



Figura 20 Parete carbonatica esposta a Nord nella parte meridionale del parco

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 31 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

Alla fratturazione da raffreddamento si sovrappongono frequenti fratturazioni legate alla successiva attività tettonica o a cedimenti puramente gravitativi. L'alternanza tra le bancate con facies meno coerenti, essenzialmente tufacee, e quelle decisamente litoidi e resistenti, ossia ignimbristiche o laviche, determina il profilo a "gradinata" che caratterizza i versanti dei rilievi. Questa morfologia, nota in letteratura col termine di *cuestas*, è particolarmente evidente nei rilievi a Nord degli aerogeneratori AG01, AG02 e la AG03. Meno diffuse che nei territori circostanti, le lave, di composizione prevalentemente andesitica, si rinvengono a Nord della AG05, nella quale è rappresentato da una sequenza di colate sub-orizzontali e di aspetto massivo, con ritrazioni per consolidamento indicate da fessurazioni prismatiche e macrostrutture colonnari.

Le coperture sedimentarie, testimoniano quelle fasi di deposito in ambiente dapprima continentale e fluvio-lacustre, successivamente marino, verificatesi dalle ultime fasi del ciclo vulcanico e proseguite durante la trasgressione marina che interessò la Sardegna occidentale nel Miocene inferiore e medio, in un contesto in cui i maggiori rilievi vulcanici, per via della loro quota, emergevano da un mare poco profondo. Questa condizione ha rappresentato l'ambiente di deposito da cui traggono origine le strutture che poggiano sulle formazioni vulcaniche delle quali, per quanto si è detto, quelle più elevate risultano prive di copertura. Di ambiente fluvio-lacustre, instaurato nel paesaggio vulcanico, risultano i depositi conglomeratici a elementi vulcanici in parte elaborati e caotici, alternati con depositi a granulometria fine, verdastri, con sottile stratificazione piano-parallela, diffusamente alterati e argillificati. Tali formazioni, derivate dall'erosione e rimaneggiamento delle vulcaniti nonché dalla sedimentazione in ambiente acquatico di materiali piroclastici sottili, si rinvengono lungo i versanti della valle del Riu Minore, lungo il corso del Riu Mannu e presso Ponte Camedda, alla base della successione marina. Questa è costituita da calcari organogeni, biocalcareni, calcari marnosi e arenarie calcaree, poggianti su conglomerati di trasgressione a cemento calcareo e clasti vulcanici. Benché lungo le incisioni fluviali e a margine dei rilievi vulcanici le strutture sedimentarie siano state smantellate dall'erosione, queste coperture giacciono talvolta sottoforma di tavolati e pianori come nel caso dell'area centro-meridionale del parco qualche centinaio di metri a Est della AG01. Le stesse azioni erosive che hanno determinato la frammentazione delle strutture sedimentarie, si sono esplicate su tutto il territorio dando luogo a quei prodotti dell'alterazione e del degrado diffusi nell'area in esame, che costituiscono spesse coltri di detrito di falda, orizzonti pedogenizzati e depositi alluvionali lungo i corsi d'acqua.

Nel complesso entrambe le unità geomorfologiche conferiscono all'area un paesaggio ad altopiani, le Formazioni di Mores (calcari) e di Monte Longos (depositi di flusso piroclastico) tendono a giacere suborizzontali arrivando nei casi limite a formare delle *Cuestas*. Diversamente, la litologia che interessa direttamente la fondazione dell Turbine, ovvero la Formazione di Monte Frusciu (Daciti), risulta essere interessata da una fratturazione la cui giacitura è influenzata dal flusso lavico durante le messa in posto, questo fenomeno prende il nome di "*platy jointing*".

Osservando le foto aeree è possibile notare come queste discontinuità a piccola scala prendano un andamento concentrico a giustificare l'espansione da uno o più centri d'emissione.

Laddove la giacitura dei *platy joints* presenta pendenze elevate, tende talvolta a dare luogo a versanti ad Hogback.



Figura 21 Vista in sezione della struttura stratificata con andamento concentrico nell'altopiano a sud del parco, presunto centro d'emissione a sinistra nella foto.

9.1. Lineamenti geomorfologici dell'area di studio

I tratti geomorfologici del settore di studio sono dati da estese aree a rilievi tabulari appartenenti al ciclo vulcano-sedimentario miocenico, incise dai corsi d'acqua principali e dai loro affluenti. I corsi d'acqua incidono le rocce formando valli con versanti poco acclivi. Le rocce affioranti nell'area di studio appaiono incise da un reticolo idrografico impostato sui principali lineamenti strutturali, in connessione con l'evoluzione tettonica dell'intero settore e in particolar modo con l'evoluzione plio-quadernaria.

Le superfici morfologiche principali sono rappresentate da modesti rilievi tabulari e dai resti di un altipiano profondamente dissecato dai processi erosivi lineari.

Nel settore occidentale, nei pressi degli aerogeneratori AG01, AG02 e AG03 il paesaggio si compone di campi e dolci rilievi le cui quote vanno dai 490m ai 500m circa, nel settore centrale la AG04 è situata da un gruppo di rilievi dalle quote pari a 520m, 527m e 542mslm.



Figura 22 Piazzola AG01



Figura 23 Piazzola AG02



Figura 24 Piazzola AG03



Figura 25 Piazzola AG04

Gli aerogeneratori AG05, AG06, AG07 e AG08 poggerranno su un unico altopiano con delle quote che si aggirano intorno a i 500m-540mslm.



Figura 26 Piazzola AG06

Il reticolato idrografico dell'area di studio mostra valli quasi sempre poco incassate, con prevalente andamento NW-SE e N-S.



Figura 27 Piazzola AG07

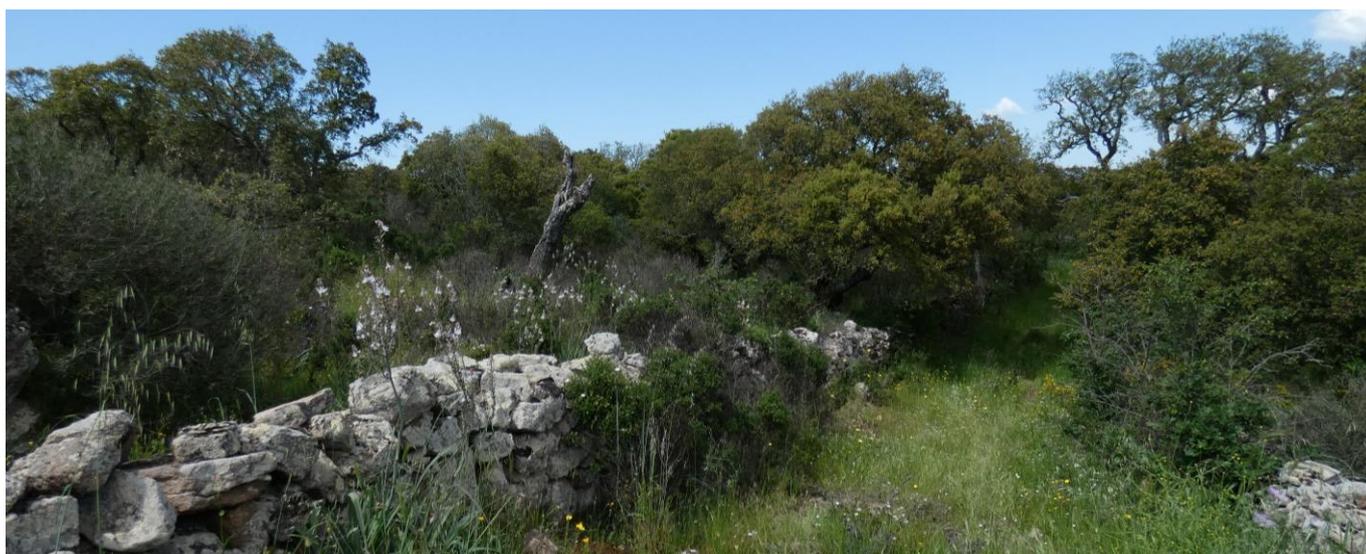


Figura 28 Piazzola AG08



Figura 29 Rilievo isolato a N del parco ospitante le Domus de Janas.

Nei pressi delle scarpate appartenenti alla formazione del Monte Tului e del Monte Longos sono state rilevate microforme ricorrenti quali tafoni, “nidi d’ape”, vacuoli e cavità di varie dimensione, dovute principalmente all’idrolisi. I processi di degradazione meteorica per il quale i silicati e i minerali ferromagnesiaci, aggrediti dalle acque di precipitazione leggermente acidule per la presenza dell’anidride carbonica dell’atmosfera, si decompongono, possono comportare, per erosione selettiva, l’approfondimento e l’allargamento delle discontinuità, costituite da lesioni e fratture di origine meccanica della roccia, prodotte dagli agenti fisici della degradazione (dilatazioni termiche differenziali, azione di cuneo delle radici) e dalle forze tettoniche.



Figura 30 Erosione selettiva dovuta all'azione aggressiva dell'acqua nella roccia costituita da livelli di flusso piroclastico di differente competenza

Il processo dell’idrolisi dei silicati è massimo in condizioni di clima caldo-umido. La deflazione eolica può nel tempo rimuovere le parti rocciose distaccate, determinando nel blocco ancora inalterato la formazione di cavità tipiche, note come tafoni.



Figura 31 Esempio di tafonature ad ovest della AG04 affetta da tafonature.

Tra le morfologie osservabili nell'area a Nord del parco ve ne sono alcune strettamente connesse alle caratteristiche fisico-chimiche delle litologie presenti e dalla tipologia ed intensità degli agenti modellanti predominanti, in questo caso il carsismo.

Tale processo si sviluppa principalmente a seguito della dissoluzione chimica delle rocce carbonatiche. Il processo carsico rientra nel grande insieme delle azioni di disaggregazione compiute dagli agenti esogeni a spese delle rocce affioranti sulla crosta terrestre. La corrosione avviene come nel caso dell'idrolisi sopra citata per opera delle acque meteoriche che, oltre a contenere una certa quantità di anidride carbonica atmosferica disciolta al loro interno, scorrendo sulla superficie del suolo ed attraversando lo strato superficiale del suolo si arricchiscono ulteriormente di CO₂. Queste acque reagiscono con la roccia calcarea intaccandola lentamente, sia in superficie sia infiltrandosi nel reticolo, fino a dar luogo nell'arco del tempo a veri e propri condotti di dimensioni variabili, che costituiscono i classici acquiferi tipici delle rocce carbonatiche. Infatti le acque ricche di anidride carbonica sono particolarmente aggressive nei confronti del carbonato di calcio.

9.2. Definizione dell'area geomorfologicamente significativa

La predisposizione naturale di un territorio a fenomeni di instabilità legata alle dinamiche geomorfologiche deriva in generale dall'interazione di diversi fattori come natura geologica dei terreni, loro assetto sia deposizionale che geostrutturale, circolazione delle acque superficiali e sotterranee con la morfologia, cioè la geometria del territorio.

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 38 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

L'area oggetto di intervento, in base delle caratteristiche suddette **non presenta allo stato attuale evidenze di dissesto di natura geologico-geomorfologica in atto**, mentre, potenziali fenomeni di dissesto potrebbero presentarsi con la naturale evoluzione del pendio.

L'area geomorfologicamente significativa per le azioni di progetto è quell'area in cui si esplicano tutti i processi geomorfici, il cui effetto può generare interazioni con le dinamiche ambientali. Pertanto la stessa, nello specifico, si individua nei versanti e nei sub-bacini idrografici presenti che interferiscono con l'opera.

10. Inquadramento idrogeologico

Secondo la classificazione dei bacini sardi riportata nel Piano di Assetto Idrogeologico, il comune di Thiesi è incluso nel sub-bacino n° 3 Coghinas-Mannu-Temo.

Il Sub_Bacino si estende per 5402 Km², pari al 23% del territorio regionale; in esso sono presenti nove opere di regolazione in esercizio e cinque opere di derivazione. Dal punto di vista idrografico, i corsi d'acqua principali sono i seguenti:

1. Rio Mannu di Porto Torres, sul quale confluiscono, nella parte più montana, il Rio Bidighinzu con il Rio Funtana Ide (detto anche Rio Binza 'e Sea).
2. Il Rio Minore che si congiunge al Mannu in sponda sinistra. - Rio Carrabusu affluente dalla sinistra idrografica.
3. Rio Mascari, affluente del Mannu di Porto Torres in sponda destra, si innesta nel tratto mediano del rio presso la fermata San Giorgio delle Ferrovie Complementari.
4. Fiume Temo, regolato dall'invaso di Monteleone Roccadoria, riceve i contributi del Rio Santa Lughia, Rio Badu 'e Ludu, Rio Mulino, Rio Melas, affluenti di sinistra che si sviluppano nella parte montana del bacino. Negli ultimi chilometri il Temo, unico caso in Sardegna, è navigabile con piccole imbarcazioni; il suo sbocco al mare, sulla spiaggia di Bosa Marina, avviene tramite un ampio estuario.

10.1. Scheme della circolazione idrica superficiale

Il reticolo idrografico sulle litologie affioranti è impostato su un sistema di valli e compluvi, ed è caratterizzato da una ramificazione ben sviluppata in tutta l'area vasta che include le zone di interesse per il progetto. Sono presenti diversi corsi d'acqua lungo tutta l'area di interesse, e i relativi affluenti.

L'area di studio ricade tra il Sub-bacino del Rio Mannu, il cui principale corso d'acqua che interessa il territorio di è l'omonimo Rio Mannu che scorre da Est verso Ovest, e il Sub-bacino del Fiume Temo, che scorre a ovest dell'area di interesse, con flusso da Nord verso Sud.

Le acque dei torrenti più prossimi all'area di interesse sono rappresentate dal Rio Melas a Ovest, dal Rio Santa Lughia a S, dal Rio Bidighinzu a ENE e dai suoi affluenti (Rio Matte de sa Ua e il Rio su Trainu de Letti) a nord dell'area di interesse. In particolare gli affluenti del Rio Bidighinzu che scorre da sud verso nord, scorrono a nord dei rilievi su cui verranno installate le turbine AG05 e AG08.

Trattandosi, per il progetto, di alti topografici, i fiumi presenti scorrono allontanandosi da queste aree. Ne consegue che, l'area in studio si collocano in concomitanza con gli spartiacque dei bacini idrografici dei fiumi che interessano la zona.

Il **Rio Bidighinzu** scorre nella parte settentrionale dell'area, in particolare costeggia il lato E del costone su cui verranno installate le torri eoliche AG05, e AG08. Il **Rio Santa Lughia**, scorre a sud-ovest dei rilievi su cui verranno installate le turbine AG01, AG02 e AG03, mentre il Rio Melas costeggia ad ovest i rilievi dove verranno installate le turbine AG01, AG02 e AG03.

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 39 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

Lo sviluppo del reticolo idrografico è strettamente connesso alle caratteristiche chimico-fisiche delle rocce costituenti il substrato, e al controllo tettonico che si manifesta molto evidente su alcune linee di deflusso, spesso orientate NW-SE e NE-SW come le principali faglie.

Gli impluvi costituiscono essenzialmente le aste tributarie di primo e secondo ordine dei torrenti che scorrono più a valle: essi presentano carattere essenzialmente torrentizio con deflussi stagionali legati strettamente alle precipitazioni. Lungo i versanti a maggiore pendenza i corsi d'acqua assumono un elevato potere erosivo, mentre solamente a valle, in corrispondenza di aste di ordine intermedio sono evidenti fenomeni di deposizione di coltri alluvionali di spessore molto modesto.

Il progetto prevede l'installazione delle torri eoliche sugli alti topografici, e i corsi d'acqua presenti scorrono allontanandosi da queste aree. Ne consegue che, le aree in studio si collocano in concomitanza con gli spartiacque dei bacini idrografici dei fiumi che interessano la zona.

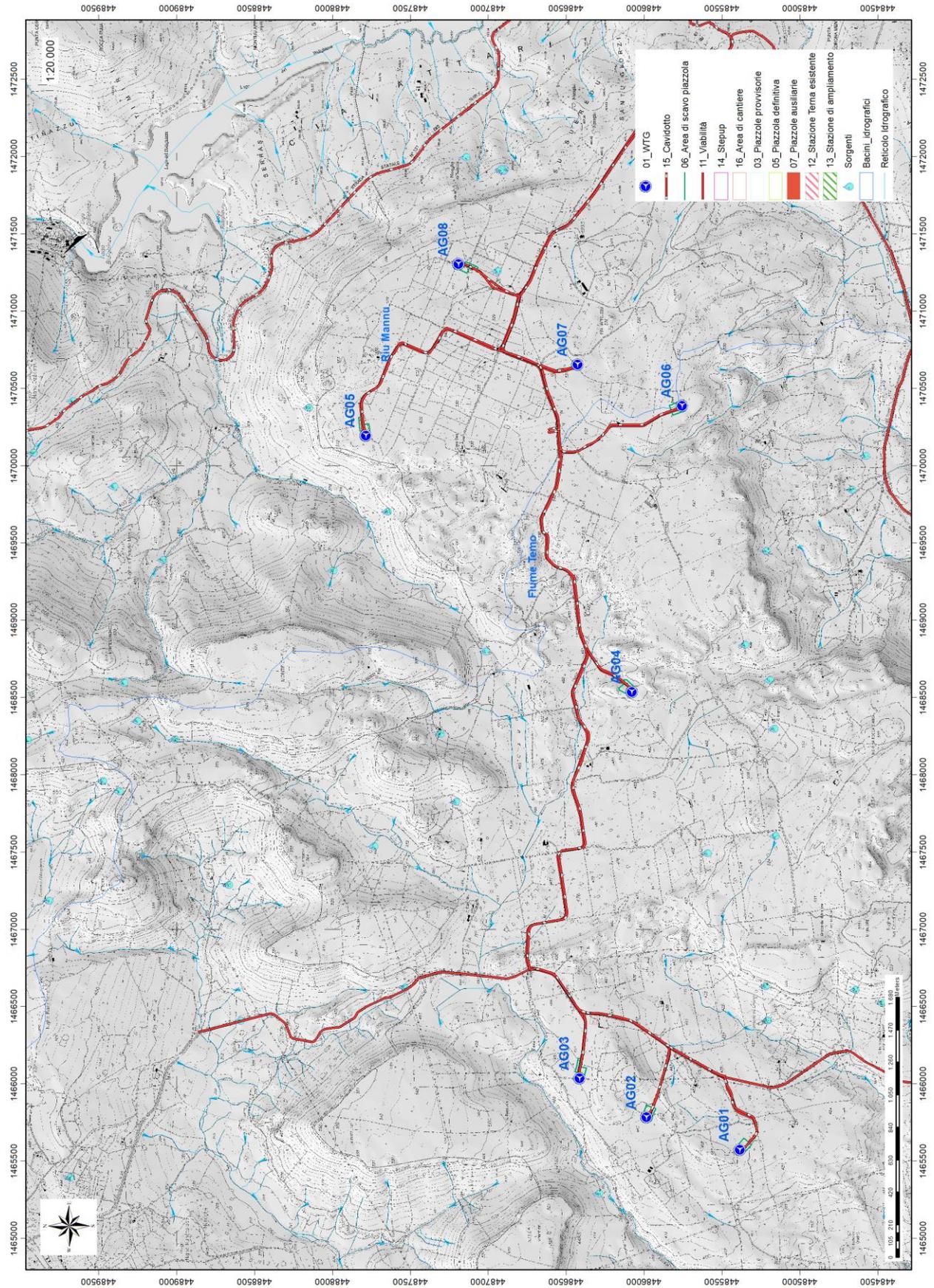


Figura 32 Reticolo idrico superficiale (Fonte RAS)

10.2. Caratteristiche delle acque sotterranee

Uno studio idrogeologico ha lo scopo di identificare lo schema di circolazione idrica sotterranea relativo ad una determinata area per poter ricavare informazioni circa i rapporti tra litotipi presenti, la presenza di acqua e le possibili conseguenze derivanti dalla realizzazione di un'opera.

Le rocce si presentano raramente compatte. La proprietà di contenere spazi vuoti tra gli elementi solidi che le compongono, detta porosità, esprime l'attitudine che ha la roccia ad immagazzinare ed a liberare acqua sotterranea.

Le litologie che circondano l'area di studio sono caratterizzate da permeabilità medio-bassa per fratturazione (Daciti). Da un censimento nell'Archivio Nazionale delle Indagini nel Sottosuolo ex Lg 464/1984 non sono presenti perforazioni per uso di acque sotterranee nell'area di interesse. Nelle immagini seguenti le schede di un pozzo (Cod.176535) nei pressi delle turbine AG01 e AG02 (immagine a sinistra) e di un pozzo (Cod.170169) situato nei pressi dell'area di installazione della turbina AG08 (immagine a destra).

| | | | | | |
|---|----------------------------|---|-------------------------|----------------------|----------------------------------|
|   | | Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale | | | |
| Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (Legge 464/1984) | | | | | |
| Dati generali | | Ubicazione indicativa dell'area d'indagine | | | |
| Codice: 176535 Regione: SARDEGNA Provincia: SASSARI Comune: THIESI Tipologia: PERFORAZIONE Opera: POZZO PER ACQUA Profondità (m): 110,00 Quota pc slm (m): 454,00 Anno realizzazione: 1996 Numero diametri: 0 Presenza acqua: SI Portata massima (l/s): 0,040 Portata esercizio (l/s): 0,020 Numero falde: 1 Numero filtri: 0 Numero piezometrie: 1 Stratigrafia: SI Certificazione(*): SI Numero strati: 3 Longitudine WGS84 (dd): 8,590981 Latitudine WGS84 (dd): 40,523731 Longitudine WGS84 (dms): 8° 35' 27,53" E Latitudine WGS84 (dms): 40° 31' 25,43" N (*)Indica la presenza di un professionista nella compilazione della stratigrafia | |  | | | |
| FALDE ACQUIFERE | | | | | |
| Progr | Da profondità (m) | A profondità (m) | Lunghezza (m) | | |
| 1 | 80,00 | 105,00 | 25,00 | | |
| MISURE PIEZOMETRICHE | | | | | |
| Data rilevamento | Livello statico (m) | Livello dinamico (m) | Abbassamento (m) | Portata (l/s) | |
| mag 1996 | 64,00 | ND | ND | ND | |
| STRATIGRAFIA | | | | | |
| Progr | Da profondità (m) | A profondità (m) | Spessore (m) | Età geologica | Descrizione litologica |
| 1 | 0,00 | 0,60 | 0,60 | ATTUALE | TERRENO AGRARIO |
| 2 | 0,60 | 95,00 | 94,40 | PRE-ELVEZIANO | TRACHIDADICI |
| 3 | 95,00 | 110,00 | 15,00 | PRE-ELVEZIANO | VITROTRACHIANDESITI (IGNIMBRITI) |

Figura 33 - Monografie dei pozzi censiti nell'Archivio Nazionale delle Indagini nel Sottosuolo

| ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale | | | | |
|--|--|----------------------|------------------|---------------|
| Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (Legge 464/1984) | | | | |
| Dati generali | Ubicazione indicativa dell'area d'indagine | | | |
| Codice: 170169 Regione: SARDEGNA Provincia: SASSARI Comune: BESSUDE Tipologia: PERFORAZIONE Opera: POZZO PER ACQUA Profondità (m): 150,00 Quota pc slm (m): 366,00 Anno realizzazione: 2001 Numero diametri: 1 Presenza acqua: SI Portata massima (l/s): 3,000 Portata esercizio (l/s): 0,003 Numero falde: 1 Numero filtri: 0 Numero piezometrie: 1 Stratigrafia: NO Certificazione(*): NO Numero strati: 0 Longitudine WGS84 (dd): 8,659869 Latitudine WGS84 (dd): 40,540939 Longitudine WGS84 (dms): 8° 39' 35,53" E Latitudine WGS84 (dms): 40° 32' 27,38" N (*)Indica la presenza di un professionista nella compilazione della stratigrafia | | | | |
| DIAMETRI PERFORAZIONE | | | | |
| Progr | Da profondità (m) | A profondità (m) | Lunghezza (m) | Diametro (mm) |
| 1 | 0,00 | 150,00 | 150,00 | 204 |
| FALDE ACQUIFERE | | | | |
| Progr | Da profondità (m) | A profondità (m) | Lunghezza (m) | |
| 1 | 145,00 | 150,00 | 5,00 | |
| MISURE PIEZOMETRICHE | | | | |
| Data rilevamento | Livello statico (m) | Livello dinamico (m) | Abbassamento (m) | Portata (l/s) |
| giu' 2001 | 35,00 | 145,00 | 110,00 | 3,000 |

Complessivamente, le pendenze dei versanti insieme alla bassa permeabilità di alcune litologie non sono favorevoli alla ritenzione delle acque meteoriche (vulcaniti terziarie), mentre in alcune litologie (calcari bioclastici) la permeabilità è alta per carsismo, oltre che per fratturazione. La circolazione idrica profonda è strettamente legata al grado di fratturazione dell'ammasso roccioso e alla sua permeabilità.

La permeabilità secondaria, o per fessurazione, viene acquisita dalla roccia a seguito della sua formazione.

Tale proprietà può esser limitata dalla presenza di riempimento delle fratture costituito da materiali derivanti dall'alterazione della roccia madre ad alta componente argillosa. Ne consegue che seppur presente una buona rete di fratture anche con importanti spaziature, la presenza di tali riempimenti limita fortemente il passaggio delle acque.

La parte superficiale dell'ammasso roccioso è generalmente più fratturata e pertanto con permeabilità più elevata rispetto alla parte più profonda meno interessata dalla fratturazione, al contatto tra le due si possono sviluppare delle risorgive che hanno carattere prettamente stagionale legato all'andamento pluviometrico generale.

Di seguito viene illustrato in uno schema il processo di infiltrazione accumulo e circolazione legato al regime delle piogge e caratterizzante le litologie vulcaniche nella porzione sommitale e di interesse alle opere del parco eolico. Gli afflussi che arrivano sul terreno sotto forma per lo più di piogge, più raramente e poco tempo di neve, in parte scorrono lungo la superficie in genere a lamina d'acqua per poi organizzarsi in deboli rivoli che si concentrano lungo gli impluvi fino a raggiungere il bordo dell'altopiano oltre il quale si riversano lungo valli strette a V ancora in evoluzione geomorfologica.

La frazione di acqua che non scorre in superficie in parte evapora e in parte si infila nel terreno e nella roccia sottostante scorrendo lungo le fratturazioni in maniera più o meno efficace in funzione del grado di apertura delle stesse, e in funzione della permeabilità della roccia.

Maggiore è la presenza di fratture, maggiore è la possibilità che l'acqua prosegua il suo percorso in profondità. Le falde acquifere e le conseguenti sorgenti che si hanno lungo i versanti e nei tagli erosivi sono per l'appunto legate principalmente alla presenza dei sistemi di frattura a diversa scala e dal materiale derivante dall'alterazione superficiale degli ammassi rocciosi.

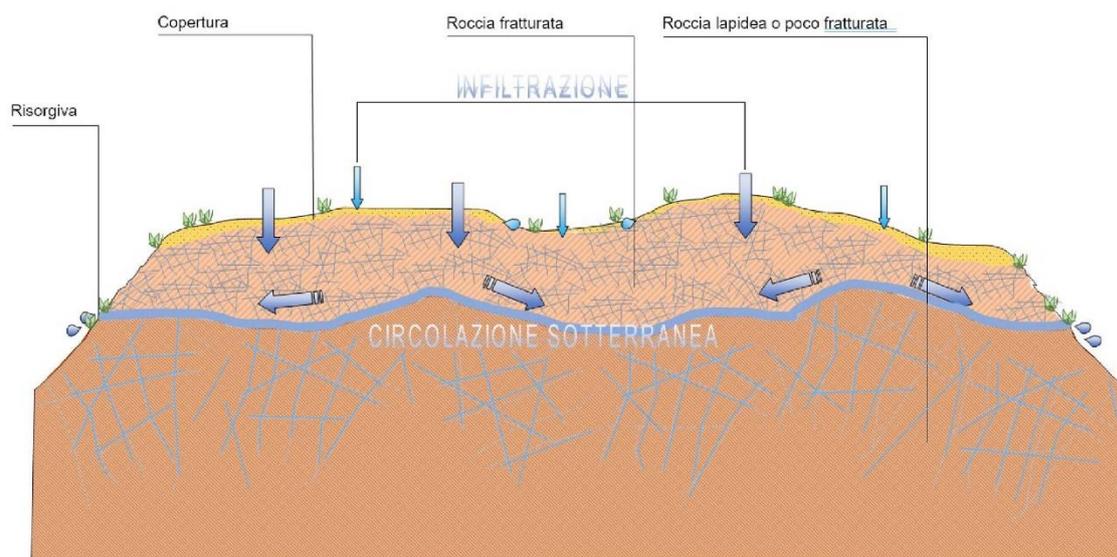


Figura 34 Schema esemplificativo, non in scala, dei processi di infiltrazione e deflusso sotterraneo

Nell'area di studio si possono distinguere:

1. litologie con permeabilità medio-alta, come le calcareniti della litofacies della Formazione di Mores (RESa), per via della fratturazione o del carsismo;
2. litologie con permeabilità medio-bassa per fratturazione, come le rocce delle vulcaniti terziarie: Unità di Monte Frusciu (FSI) Unità di Monte Longos (LGS), di Uri (UUI), di Villanova Monteleone (MLO), di Romana (OMN), di Pala Mantedda (MTD) e di Nuraghe Vittore (UNV).

Da un punto di vista idrogeologico le formazioni dell'area di studio possono essere divise in tre gruppi principali:

1. Rocce del Distretto vulcanico di Capo Marargiu, e di Osilo. È costituito da rocce poco permeabili per fratturazione (piroclastiti, lave andesitiche, ecc...) $K=1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-6}$ m/sec
2. Coperture della successione sedimentaria oligo-miocenica del Logudoro-Sassarese. Tali coperture sono costituite da litotipi a permeabilità medio-alta dovuta alla fratturazione e al carsismo delle rocce carbonatiche intercalate nelle successioni; $K= 1 \times 10^{-6}$ m/sec
3. Depositi quaternari. I depositi quaternari occupano aree molto limitate e raggiungono spessori poco significativi, la permeabilità è di tipo medio-alta per porosità. Le alluvioni terrazzate recenti hanno permeabilità medio-alta e sono di solito sede di una falda freatica di subalveo. I depositi di versante invece essendo in gran parte costituiti da una struttura clasto-sostenuta e scarsa matrice (falde di detrito), presentano una permeabilità molto elevata, in ogni caso i loro spessori esigui non garantiscono una potenza sufficiente per generare acquiferi significativi; $K=1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-6} \leq 1 \times 10^{-4}$ m/sec

Dalla carta della permeabilità dei suoli, resa disponibile dal Geoportale della Regione Autonoma della Sardegna, si evince che l'area di studio presenta nella zona di installazione delle turbine, una **permeabilità medio-bassa per fratturazione**, eccetto che per le aree in cui affiorano i depositi quaternari legati a gravità (al piede dei rilievi) che presentano permeabilità medio-alta per porosità. Nell'area del cavidotto invece la permeabilità risulta medio-bassa per fratturazione, e medio-alta per porosità.

10.3. Analisi della vulnerabilità degli acquiferi

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 44 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

Ai fini della tutela della risorsa idrica si è operata una valutazione qualitativa della vulnerabilità degli acquiferi presenti in relazione alle opere da realizzare e in relazione alle varie attività di cantiere.

Non sono presenti sorgenti alle quote di realizzazione delle opere che prevedono gli scavi più profondi (fondazioni degli aerogeneratori, piazzole e aree di deposito temporaneo) e la profondità dell'acquifero così come deriva dalle informazioni geologiche è tale che quest'ultimo non venga influenzato dalle opere in possesso e con il normale deflusso delle acque sotterranee. Altresì le opere in progetto non determinano per loro natura produzione di agenti inquinanti che possono riversarsi nella circolazione idrica sotterranea se non per accidentale guasto meccanico che andrà trattato con le opportune misure di salvaguardia dettate dal T.U. sull'Ambiente.

Occorre però segnalare in diversi punti del parco la presenza di ristagni d'acqua talvolta del volume di decine di metri cubi, detti ristagni sono con tutta probabilità dovuti alla scarsa permeabilità del terreno per presenza d'argilla dovuta all'alterazione delle rocce vulcaniche.

La loro presenza è stata segnalata spesso in prossimità delle turbine e talvolta (nel caso della AG07) in corrispondenza delle piazzole stesse.



Figura 35 Grande ristagno tra la AG02 e la AG03, coord. 40.52523, 8.59298



Figura 36 Ristagno pressi AG03, coord.40.52748, 8.59728



Figura 37 Ristagno situato nei pressi della AG06, coord.40.52404, 8.65069



Figura 38 Ristagno in corrispondenza della piazzola della AG07



Figura 39 Ristagno a valle della sorgente nei pressi della AG08

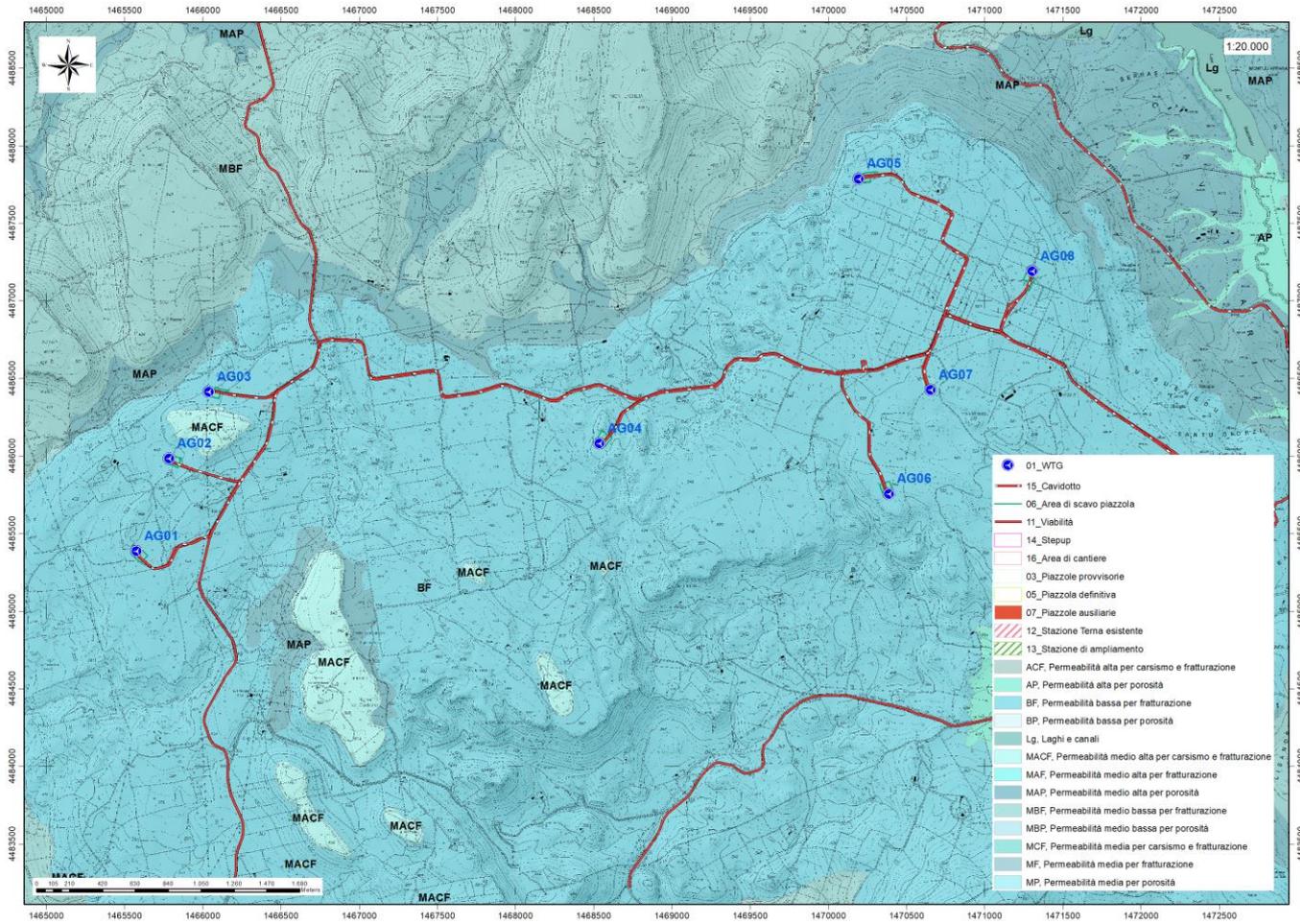


Figura 40 Carta delle Permeabilità dei Substrati e dei Suoli – area impianto (Fonte RAS)

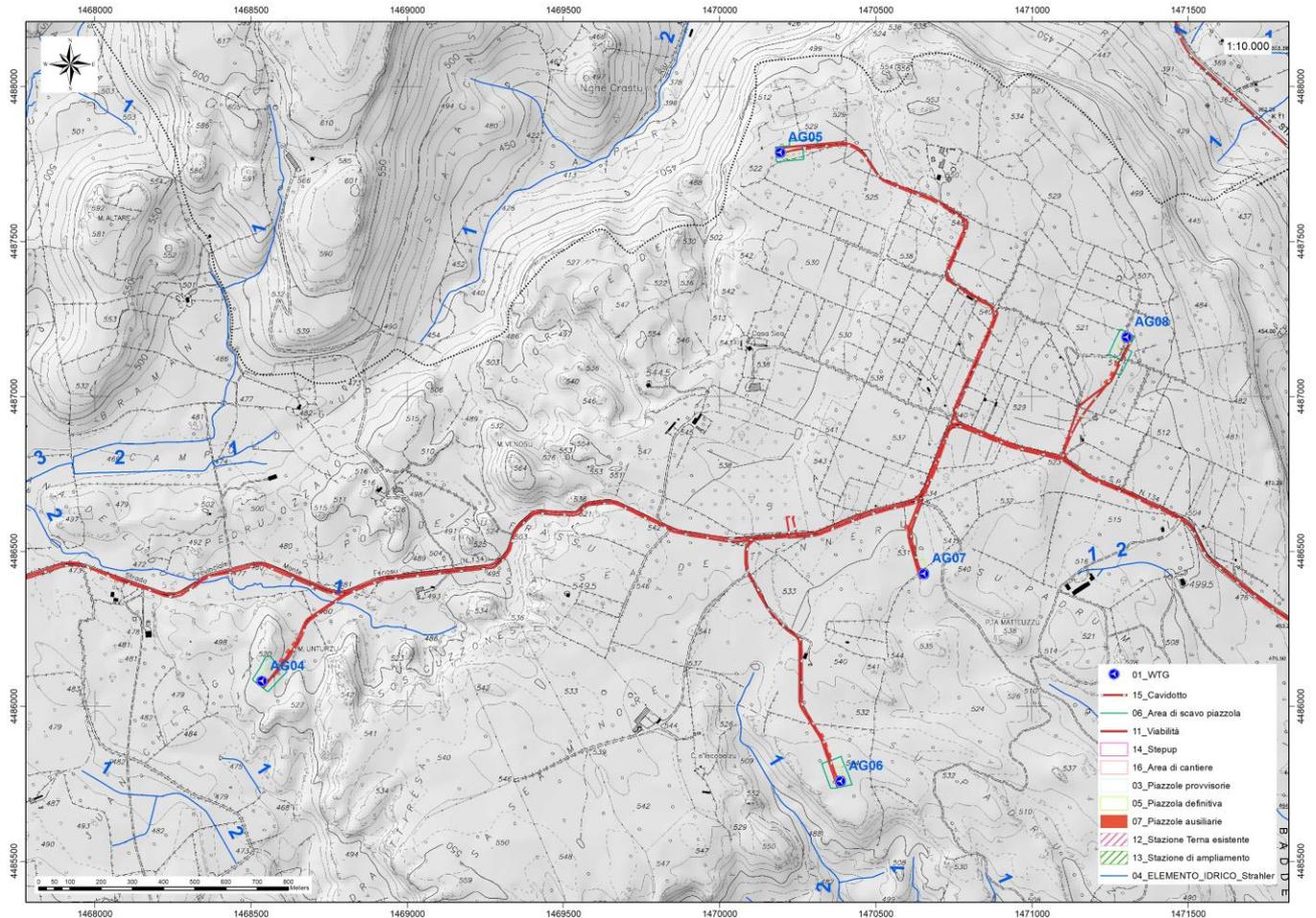


Figura 41 Reticolo idrografico numerato secondo l'ordine di Strahler

11. Inquadramento climatico

La definizione del clima è basata sull'analisi dei parametri meteorologici più comunemente studiati, quali la temperatura e le precipitazioni, il cui andamento è legato alle variazioni stagionali della circolazione atmosferica, considerando inoltre la ventosità, la nuvolosità e l'umidità relativa.

Il clima della Sardegna viene generalmente classificato come "Mediterraneo Interno", caratterizzato da inverni miti e relativamente piovosi ed estati secche e calde, con valori minimi invernali di alcuni gradi al di sotto dello zero e massimi estivi anche superiori ai +40 C.

Lungo le zone costiere, grazie alla presenza del mare, si hanno inverni miti con temperature che scendono raramente sotto lo zero. Anche nelle zone interne pianeggianti e collinari il clima è tipicamente mediterraneo, anche se a causa della maggior lontananza dal mare si registrano temperature invernali più basse ed estive più alte rispetto alle aree costiere.

Nelle zone più interne, come gli altopiani e le vallate spesso incastonate tra i rilievi, il clima acquista caratteri continentali con forti escursioni termiche, risultando particolarmente basse le minime invernali in caso di inversione termica, con temperature che possono scendere anche al di sotto dei -10/-12 C. Sui massicci montuosi nei mesi invernali nevicata frequentemente e le temperature scendono sotto lo zero, mentre nella stagione estiva il clima si mantiene fresco, soprattutto durante le ore notturne, e raramente fa caldo per molti giorni consecutivi.

La Sardegna inoltre è una regione molto ventosa; i venti dominanti sono quelli provenienti dal settore occidentale (Maestrale e Ponente) e, in minor misura quelli provenienti da quello meridionale (Scirocco).

Le precipitazioni sono distribuite in maniera variabile ed irregolare, con medie comprese tra i 400 e i 600 mm annui lungo le coste e valori pluviometrici che raggiungono e superano i 1000 mm annui (con locali picchi superiori ai 1300–1400 mm) in prossimità dei rilievi montuosi.

A causa del dominio sulla regione dei venti provenienti dai quadranti occidentali, mediamente la maggior frequenza di giorni di pioggia si riscontra nelle zone occidentali dell'isola, mentre in quelle orientali, trovandosi sottovento a questo tipo di circolazione a causa dell'orografia, si ha una minore frequenza di giornate piovose.

Tuttavia, le zone orientali sono spesso soggette a fortissime piogge, per cui gli accumuli medi annuali sono simili tra i due versanti.

| Periodo | Gen | Feb | Mar | Apr | Mag | Giu | Lug | Ago | Set | Ott | Nov | Dic | Totale annuale |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|----------------|
| 2018 | 49 | 126,4 | 169 | 46,4 | 250 | 64,8 | 0,6 | 42 | 48,2 | 155,6 | 179,8 | 68,4 | 1150,8 |
| 2017 | 89,4 | 71,2 | 29,8 | 24,6 | 1,8 | 17,8 | 2,6 | 0 | 73,4 | 3,8 | 69,6 | 213 | 597 |
| 2016 | 79,8 | 279 | 94,6 | 37,6 | 52,8 | 13,2 | 38,4 | 0 | 53 | 18,2 | 92 | 44 | 802,6 |
| 2015 | 92,8 | 239 | 99,4 | 27,4 | 21,6 | 49,8 | 2,4 | 23,6 | 41,4 | 140,8 | 78,6 | 5,6 | 822,4 |
| 2014 | 219,2 | 159,4 | 120,8 | 56,8 | 45,4 | 33,8 | 20,8 | 5,8 | 11,4 | 8,8 | 177,4 | 113 | 972,6 |
| 2013 | 264,8 | 142,6 | 168,8 | 91,6 | 91,8 | 4,4 | 3,4 | 9,6 | 60,2 | 105,4 | 166 | 63 | 1171,6 |
| 2012 | 49,4 | 68,4 | 20,4 | 101 | 168 | 0,4 | 0,6 | 0,4 | 33,6 | 217,4 | 204,2 | 67 | 930,8 |
| 2011 | 92,4 | 84,2 | 62 | 56,8 | 5,4 | 59,6 | 9,8 | 0 | 46,2 | 24,8 | 183,8 | 138,4 | 763,4 |
| 2010 | 150,2 | 88,2 | 111,2 | 71,4 | 95,2 | 82,8 | 0 | 10,8 | 3,2 | 114,2 | 364 | 182,2 | 1273,4 |
| 2009 | 167 | 74 | 62,4 | 127,8 | 8 | 48 | 0 | 0 | 85 | 67 | 113,4 | 169 | 921,6 |
| 2008 | 85 | 28,2 | 87,2 | 30,6 | 130,6 | 39 | 0 | 2 | 67,8 | 93,8 | 239,4 | 214,2 | 1017,8 |

Tabella 1 Andamento pluviometrico dell'area vasta (espresso in mm) ricavato dalla stazione pluviometrica di Villanova Monte Leone.

L'andamento climatico del territorio di **Thiesi** e le risorse idriche disponibili sono stati valutati sulla base dei dati forniti dalle stazioni meteorologiche dell'ARPAS presenti nel territorio comunale di Villanova Monte Leone e Romana, localizzate rispettivamente nel raggio di 32,7 e 11,8 km dal settore in esame.

L'andamento pluviometrico dell'area oggetto di studio (Tab.1) è stato ricavato dai dati pluviometrici relativi all'intervallo 2008-2018 estratti dagli Annali Idrologici dell'ARPAS reperibili dal Geoportale della R.A.S. delle stazioni di Villanova Monte Leone (anni 2008 – 2018), così come i dati termometrici, relativi però alle stazioni di Villanova Monte Leone (2012-2018) e Romana (2011-1995).

Per quanto riguarda i dati sull'evapotraspirazione, sono stati utilizzati i valori pubblicati dal Dipartimento Specialistico Regionale Idroclimatico (I.M.C.) dell'ARPAS.

Alla stazione di Alghero - Fertilia sono riferiti i dati sulla nuvolosità, e umidità relativa, estrapolati dalla Rete Mareografica dell'ISPRA, mentre i dati relativi alla ventosità sono stati estrapolati dai report climatologici mensili e annuali dell'ARPAS.

11.1. Precipitazioni

Nella Tab.2 sono esposti i dati relativi alle precipitazioni nell'intervallo 2008-2018 registrati nella stazione di Villanova Monteleone. Viene riportato il valore medio mensile e il totale annuale di precipitazioni (espresso in mm) nei periodi considerati. Per il periodo 2008-2018 si osserva che i valori di precipitazioni presentano valori inferiori nei mesi autunnali e invernali, e superiori per il periodo compreso tra maggio e agosto.

Nell'area studiata, la piovosità media annuale è pari a circa 947,64 mm per il periodo compreso tra il 2008 e il 2018.

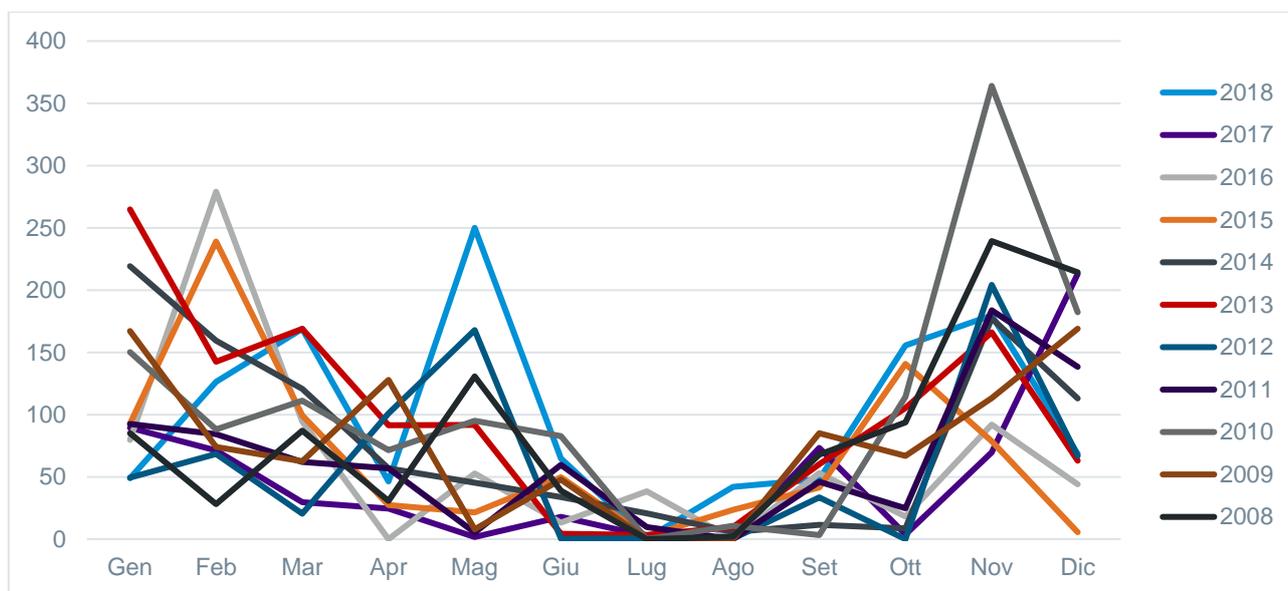


Tabella 2 Andamento della pluviometria mensile e annuale (nell'asse delle ordinate, in mm) per la stazione di Villanova Monteleone nel periodo 2008-2018.

L'andamento pluviometrico dell'area di Thiesi nell'arco dell'anno è caratterizzato dal minimo assoluto di piovosità nel periodo estivo e da un massimo in autunno e inverno, per cui i mesi più secchi sono quelli estivi mentre quelli più piovosi sono quelli invernali.

11.2. Temperature

I valori termometrici della stazione meteo di Thiesi, ricavati dal Dipartimento Specialistico Regionale Idroclimatico (I.M.C.) dell'ARPAS, sono illustrati nel grafico di Tabella 3 e sono relativi alla stazione di Villanova Monteleone per gli anni dal 2012 al 2018, a quella di Romana per l'intervallo 1995-2011. La temperatura media annua, calcolata con i valori medi mensili per il periodo 1995-2018, è di circa 13,9 °C. Il mese più freddo è Febbraio con una media di circa 6,5°C, mentre le temperature più elevate si riscontrano in Luglio e Agosto con circa 22,5 °C.

| Periodo | Gen | Feb | Mar | Apr | Mag | Giu | Lug | Ago | Set | Ott | Nov | Dic |
|-------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 2018 | 8,8 | 5,4 | 8,5 | 14,1 | 14,6 | 19,2 | 23,3 | 22,7 | 20,1 | 15,9 | 11,4 | 8,7 |
| 2017 | 5,2 | 9 | 10,3 | 11,8 | 16,8 | 22 | 23,7 | 25,7 | 17,6 | 15,8 | 9,7 | 0,5 |
| 2016 | 8,1 | 8,5 | 8,6 | 13,1 | 14,3 | 19,2 | 22,9 | 22,1 | 19,6 | 16 | 11,6 | 9,2 |
| 2015 | 7 | 5,7 | 8,9 | 12,1 | 16,9 | 20,7 | 24,7 | 23,1 | 19,3 | 15 | 11,5 | 9,1 |
| 2014 | 8 | 8,4 | 9 | 12,2 | 14,4 | 20,4 | 20,9 | 22,1 | 20,7 | 17,8 | 13,8 | 8,1 |
| 2013 | 6,6 | 4,7 | 8,9 | 12,3 | 13,1 | 17,9 | 23,2 | 23 | 19 | 18,1 | 9,8 | 8,2 |
| 2012 | 6,7 | 3,7 | 10,6 | 11,7 | 14,8 | 21,7 | 22,8 | 25,4 | 19,4 | 15,9 | 12,4 | 7,7 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| 1995-2011 | 6,4 | 6,7 | 7,4 | 9,3 | 12,2 | 15,2 | 17,6 | 17,8 | 14,7 | 12,3 | 9,6 | 7,4 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|-----|

Tabella 3 Temperature mensili (in °C) registrate nelle stazioni di Villanova Monteleone (2012-2018) e Romana (1995-2011).

Nel grafico di Figura 42 è illustrato l'andamento delle temperature medie mensili relative alla stazione di Villanova Monteleone (2012-2018) e Romana (1995-2011).

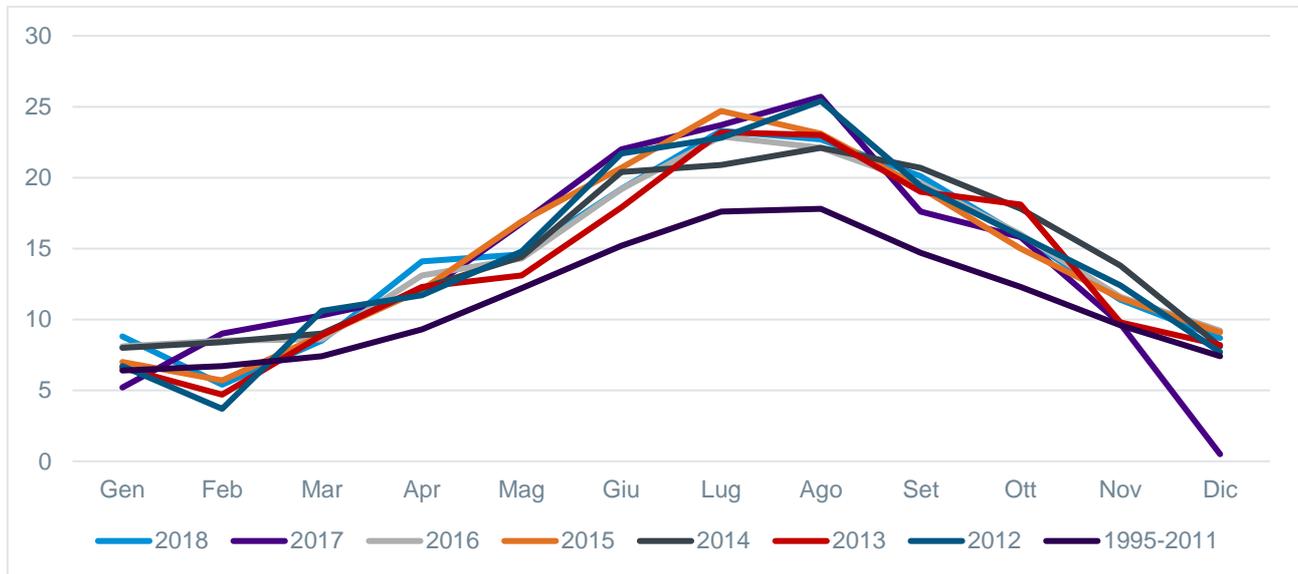


Figura 42 Temperature mensili (in °C, nell'asse delle ordinate) registrata nella stazione di Villanova Monteleone (2012-2018) e Romana (1995-2011).

11.3. Stima dell'evapotraspirazione

L' evapotraspirazione è uno dei parametri più significativi nell'ambito di un bilancio idrologico e rappresenta la perdita di una parte delle acque di precipitazione, per evaporazione dal suolo e per traspirazione della vegetazione. Viene calcolata tenendo conto della temperatura e delle precipitazioni, e viene influenzata dalla nuvolosità, dall'umidità relativa e dalla ventosità. Nel grafico di Figura 43 è illustrata l'evapotraspirazione per la zona di Thiesi ricavata dai dati reperibili sul WebGIS dell'ARPAS.

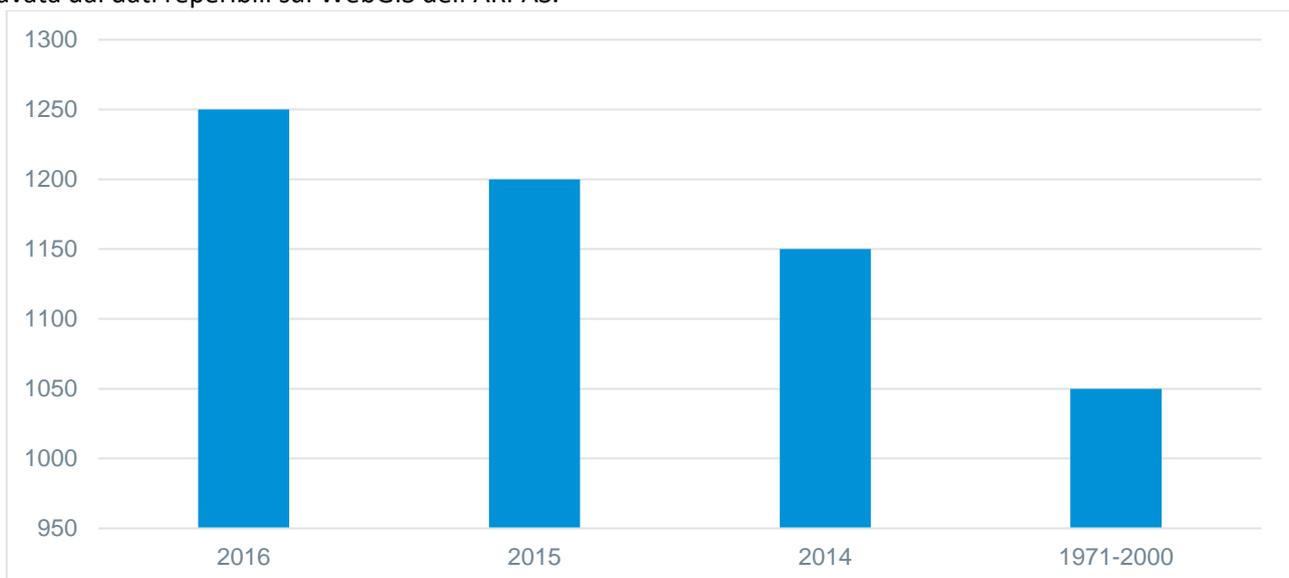


Figura 43 Evapotraspirazione (espressa in mm) per la zona di Thiesi.

La nuvolosità influenza il clima in quanto da essa dipende l'irraggiamento solare. In Tabella 4, sono rappresentati i valori mensili di condizioni di sereno (nuvolosità < 2/8), nuvoloso (2/8 < nuvolosità < 6/8) e coperto (nuvolosità > 6/8), espressi in okta (stima di quanti ottavi di cielo sono oscurati dalle nuvole) e riferiti al periodo 1961 – 1990 per la stazione di Fertilia.

| Gen | Feb | Mar | Apr | Mag | Giu | Lug | Ago | Set | Ott | Nov | Dic |
|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 4,7 | 4,7 | 4,6 | 4,5 | 3,8 | 3 | 1,7 | 2 | 2,9 | 3,6 | 4,4 | 4,6 |
| coperto | coperto | copert | copert | copert | sereno | sereno | sereno | sereno | coperto | coperto | coperto |

Tabella 4 Media mensile dei giorni di sereno, nuvoloso e coperto per il periodo 1961-1990, relativa alla stazione di Fertilia.

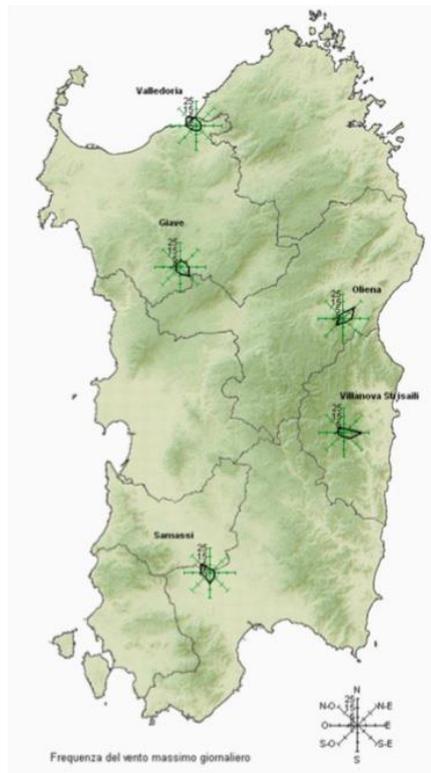


Figura 44 Ventosità media annuale per le stazioni meteorologiche relativa all'anno 2017 (mese giugno)

Dall'esame dei valori della tabella si evince che il massimo di giorni sereni si ha tra Giugno e Agosto mentre durante gli altri mesi è sempre presente una certa copertura. Il valore minimo di giornate nuvolose si ha nel mese di Luglio e il massimo si osserva nei mesi di Gennaio e Febbraio. Le giornate in condizioni di coperto raggiungono il massimo a Gennaio e minimo a Luglio. Il clima è influenzato anche dall'andamento del vento al suolo (ventosità), che viene definito analizzandone l'intensità, la direzione e la frequenza. Dall'analisi dei dati disponibili dalla Rete Mareografica dell'ISPRA, risulta che i venti provenienti dai quadranti settentrionali sono generalmente in netta dominanza, in particolare quello più frequente è il maestrale e il grecale. Dall'analisi dei dati disponibili dalla Rete Mareografica dell'ISPRA, risulta che i venti provenienti dai quadranti settentrionali e occidentali (maestrale e grecale) sono in netta dominanza, in particolare quello più frequente proviene da W. Per il periodo considerato (1971-2000) nella stazione di Fertilia le percentuali di calma per le 4 stagioni sono state il 36% per l'inverno, il 44% per la primavera, il 59% per l'estate e il 48% per l'autunno.

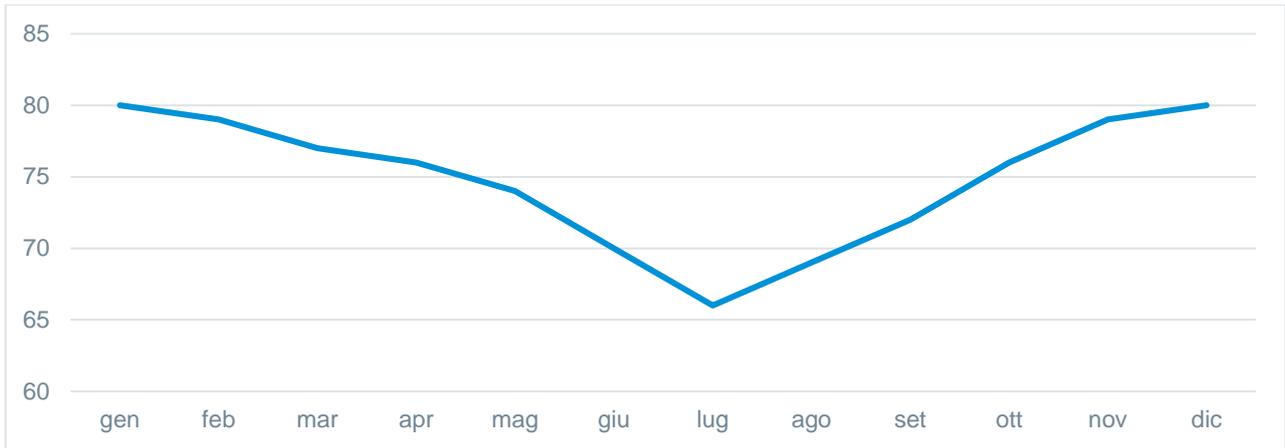


Figura 45 Umidità relativa per la stazione di Fertilia, per l'anno 1971-2000

L'ultima variabile significativa che condiziona l'evapotraspirazione è l'umidità relativa, ossia il rapporto tra la quantità di vapore d'acqua contenuta in una massa d'aria rispetto e quella massima potenziale in relazione alla sua temperatura. Dalla tabella soprastante che riporta i valori dell'umidità relativa media mensile ed annuale della stazione di Fertilia per il periodo 1971-2000, si nota che tale valore raggiunge valori più elevati nei mesi invernali (Novembre-Febbraio) e valori minimi nel mese di Luglio.

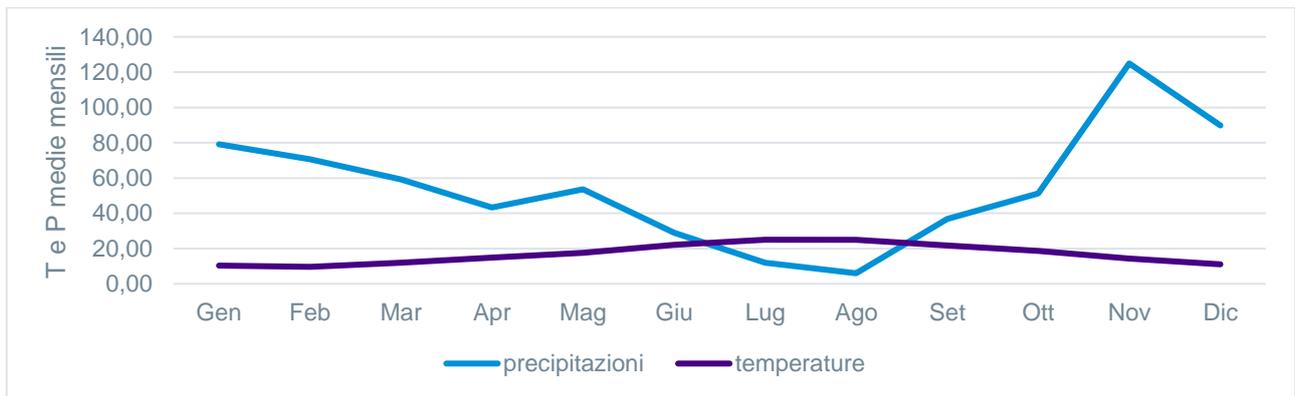


Figura 46 Diagramma ombrotermico (Walter e Lieth) per il settore di Thiesi

Il diagramma ombrotermico soprastante elaborato per il settore di **Thiesi**, a partire dai dati sulla temperatura media e precipitazioni medie, permette di comparare contemporaneamente i regimi medi mensili termici e pluviometrici nell'arco del periodo considerato. L'andamento delle curve consente di visualizzare che nei mesi estivi, dove la temperatura media mensile raggiunge valori superiori ai 22 °C, si hanno i valori di piovosità inferiori, mentre nei mesi invernali, dove le temperature medie mensili si attestano ai 7°C, si raggiungono le piovosità più elevate. Il clima è caratterizzato da un periodo caldo con scarsa piovosità e uno più freddo e piovoso. Nel grafico di si nota che la curva delle precipitazioni giace al di sotto di quella delle temperature nei mesi estivi, che rappresentano il periodo secco in quanto prevale l'evapotraspirazione rispetto agli apporti idrici.

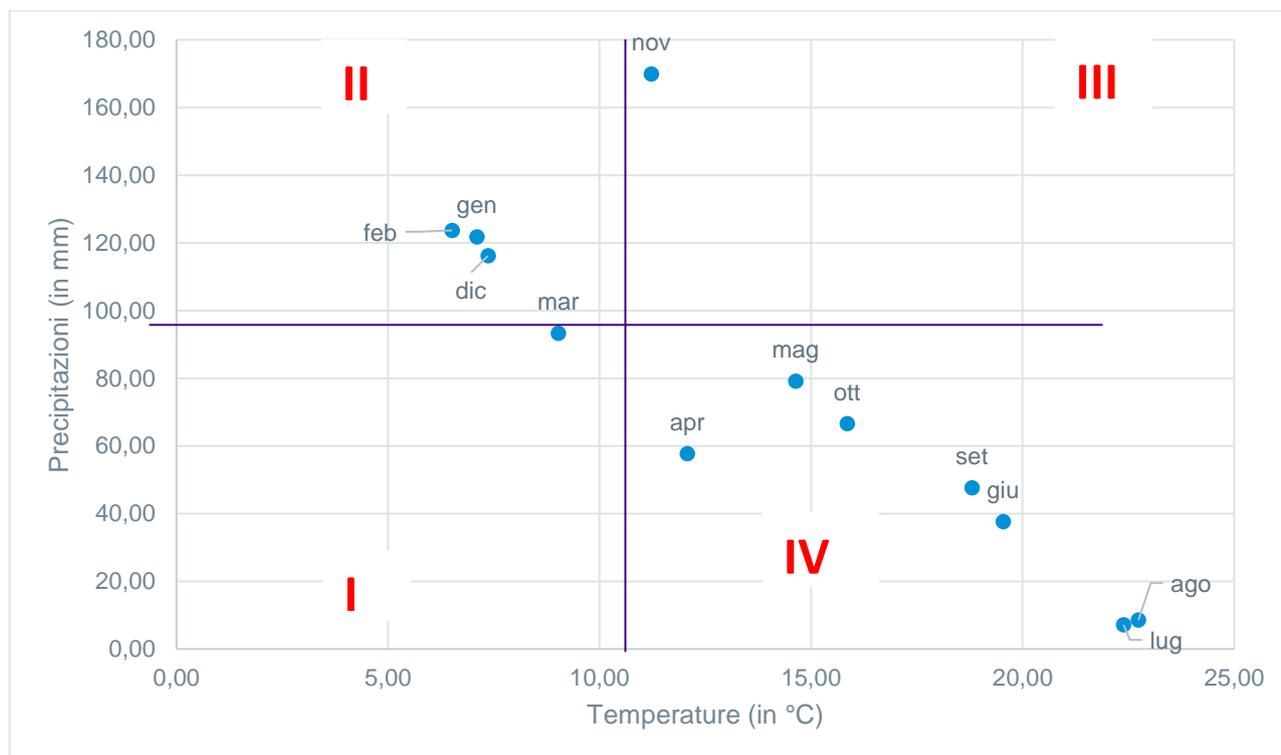


Figura 47 Climogramma relativo alla regione di Thiesi

L'analisi delle medie mensili di temperatura e piovosità relative al periodo 2012-2018 permette di classificare il clima dell'area di **Thiesi** come "mediterraneo con estate calda", nel quale la temperatura media annua (16 °C), per quattro mesi (Giugno-Settembre) supera i 21 °C, e le precipitazioni sono superiori ai 650 mm annui.

Dal climogramma (Fig.47) realizzato a partire dai valori medi di precipitazioni e temperature relativi al periodo 2012-2018 per l'area di **Thiesi**, nel quale i quadranti definiscono le diverse tipologie di climi, ossia freddo arido (I), freddo umido (II), caldo umido (III) e caldo arido (IV), è evidente che il settore in studio è caratterizzato da due periodi, uno lungo di caldo arido ed uno limitato freddo umido.

La classificazione fatta sul clima della regione, è confermata anche dall'indice di aridità medio di Demartonne stimato per l'area in oggetto che ricade nel settore da "secco – sub-umido" a "subumido" per il periodo considerato, con precipitazioni prevalenti nei mesi autunnali ed invernali e valori minimi nei mesi estivi, in concomitanza con i massimi termici annui.

L'analisi dei parametri meteorologici permette di confermare l'andamento climatico rilevato in quasi tutta la Sardegna, nettamente bistagionale con le stagioni caldo arida e fresca umida che si alternano nel corso dell'anno, intervallate da due brevi stagioni a carattere intermedio.

12. Inquadramento pedologico

Le tipologie di suolo sono legate per genesi alle caratteristiche delle formazioni geo-litologiche presenti e all'assetto idraulico di superficie nonché ai diversi aspetti morfologici, climatici e vegetazionali.

Poiché la litologia del substrato o della roccia madre ha una importanza fondamentale quale fattore nella pedogenesi dei suoli, le unità principali sono state delimitate in funzione delle formazioni geologiche prevalenti, e successivamente all'interno di esse sono state individuate unità, distinte dalla morfologia del rilievo, dall'acclività e dall'uso del suolo prevalente.

L'area di progetto ricade nei paesaggi sulle unità della Carta dei Suoli della Sardegna:

1. "Rocce effusive acide (andesiti, rioliti, riodaciti, ecc.) e intermedie (fonoliti) del Cenozoico e loro depositi di versante e colluviali" associate ai suoli dell'unità D3;

L'area di progetto dove verranno installate le turbine ricade nell'unità citata (D3), la stazione di accumulo nell'unità D3, mentre i cavidotti nelle unità D3, D5 e L1.

Tutte le turbine verranno installate in aree dove sono presenti suoli dell'unità D3 della Carta dei Suoli della Sardegna - Roccia affiorante e suoli a profilo A-C, A-R e subordinatamente A-Bw-C, poco profondi, da sabbioso franchi a franco argillosi, da permeabili a mediamente permeabili, neutri, saturi.

La porzione di viabilità e i cavidotti che collegano le turbine alla stazione di accumulo ricadono, oltre che nell'unità D3 sopra descritta, anche nelle:

2. Unità D5: Profili A-Bw-C, mediamente profondi, franco sabbioso argillosi, permeabili, da subacidi ad acidi, parzialmente desaturati.
3. Unità L1: Profili A-C e subordinatamente A-Bw-C, profondi, da sabbioso franchi a franco argillosi, da permeabili a poco permeabili, neutri, saturi.

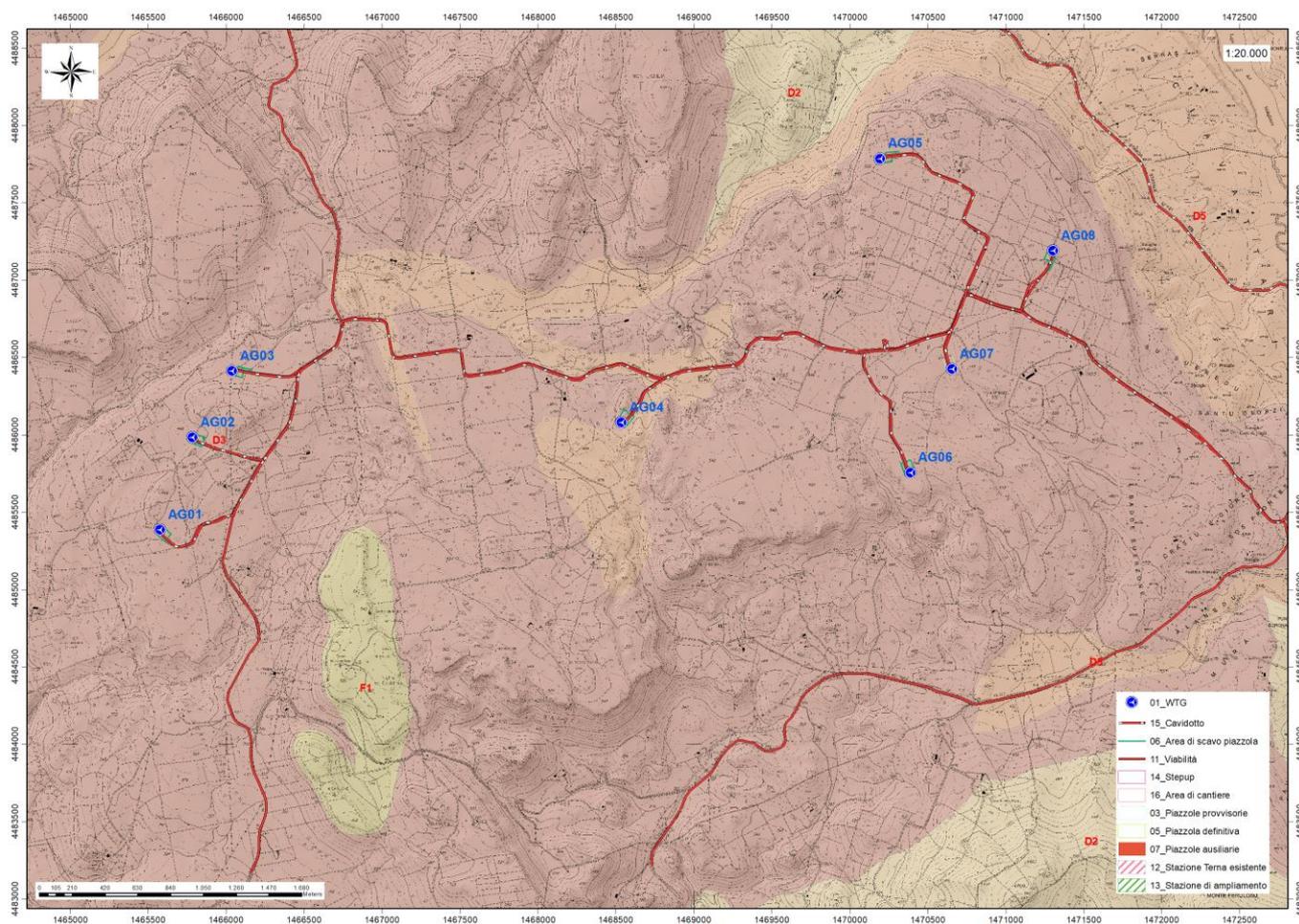


Figura 48 Carta dei Suoli (Fonte RAS)

13. Uso del Suolo

Dalla Carta dell'Uso del Suolo, resa disponibile dalla Regione Sardegna, si evince che l'ambito di progetto del Parco eolico "Thiesi" si inserisce in un contesto in cui il suolo ricade in vari livelli.

Intorno al lotto di interesse, nello specifico dell'area di installazione delle turbine, le destinazioni d'uso ricadono in ambiti quali Gariga (3232), Bosco di latifoglie (3111), Sugherete (31122), Aree a ricolonizzazione naturale (3241), Aree a pascolo naturale (321), Colture temporanee associate ad altre colture permanenti (2413).

In particolare, dall'analisi della cartografia esistente, si evince che ricadono:

1. nel livello **321**, classificato come "Aree a pascolo naturale", il punto di installazione della turbina AG02;
2. nel livello **3111**, classificato come "Bosco di latifoglie" il punto di installazione della turbina AG07 (vicino ad Area a Sugherete – 31122);
3. nel livello **2413**, classificato come "Colture temporanee associate ad altre colture permanenti" il punto di installazione della turbina AG01 (vicino ad Area a Gariga – 3232), AG06 e AG03 (vicino ad Aree a ricolonizzazione naturale – 3241);
4. nel livello **3232**, classificato come "Gariga", i punti di installazione delle turbine AG04 e AG08;
5. nel livello **31122**, classificato come "Sugherete", il punto di installazione della turbina AG05.

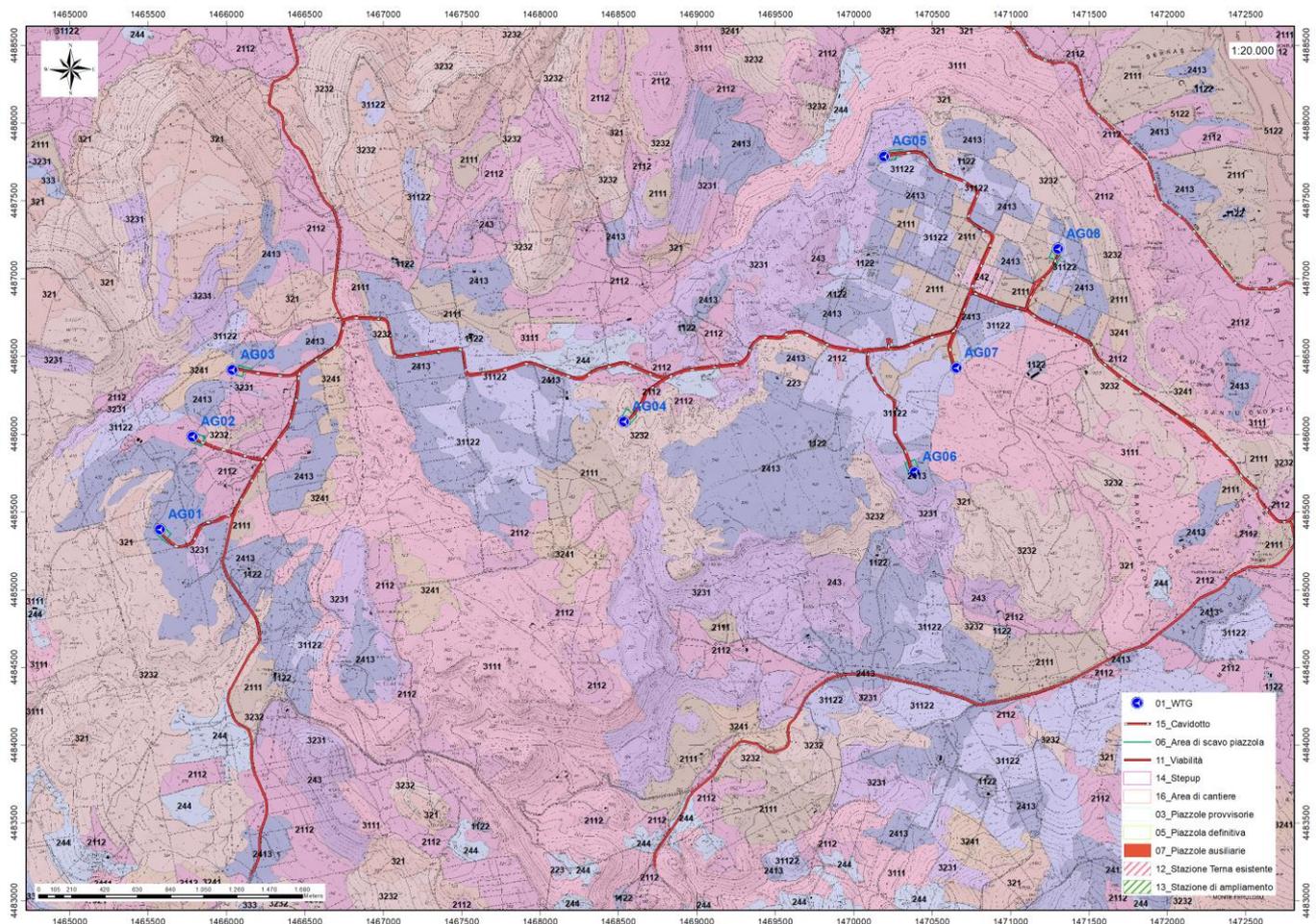


Figura 49 Stralcio della Carta dell'Uso del Suolo della Sardegna (2008, Fonte RAS).

14. Analisi dei vincoli gravanti sui terreni

14.1. Piano Stralcio D'Assetto Idrogeologico della Sardegna

Per quanto riguarda gli aspetti legati alla pericolosità idrogeologica, si sintetizzano gli esiti del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), che è stato redatto dalla Regione Sardegna ai sensi del comma 6 ter dell'art. 17 della Legge 18 maggio 1989 n. 183 e ss.mm.ii., adottato con Delibera della Giunta Regionale n. 2246 del 21 luglio 2003, approvato con Delibera n. 54/33 del 30 dicembre 2004 e reso esecutivo dal Decreto dell'Assessore dei Lavori Pubblici n. 3 del 21 febbraio 2005.

Il PAI ha valore di piano territoriale di settore e, in quanto dispone con finalità di salvaguardia di persone, beni, ed attività dai pericoli e dai rischi idrogeologici, prevale sui piani e programmi di settore di livello regionale (Art. 4 comma 4 delle Norme Tecniche di Attuazione del PAI). Inoltre (art. 6 comma 2 lettera c delle NTA), "le previsioni del PAI [...] prevalgono: [...] su quelle degli altri strumenti regionali di settore con effetti sugli usi del territorio e delle risorse naturali, tra cui i [...] piani per le infrastrutture, il piano regionale di utilizzo delle aree del demanio marittimo per finalità turistico-ricreative".

Il comune di **Thiesi** non ha ancora prodotto lo studio di dettaglio ex art.8 comma 2 delle Norme tecniche di Attuazione del PAI per l'intero territorio comunale, pertanto sono ancora in vigore le perimetrazioni precedentemente approvate.

L'area di progetto è parzialmente interessata nelle perimetrazioni di pericolosità geomorfologica del PAI.

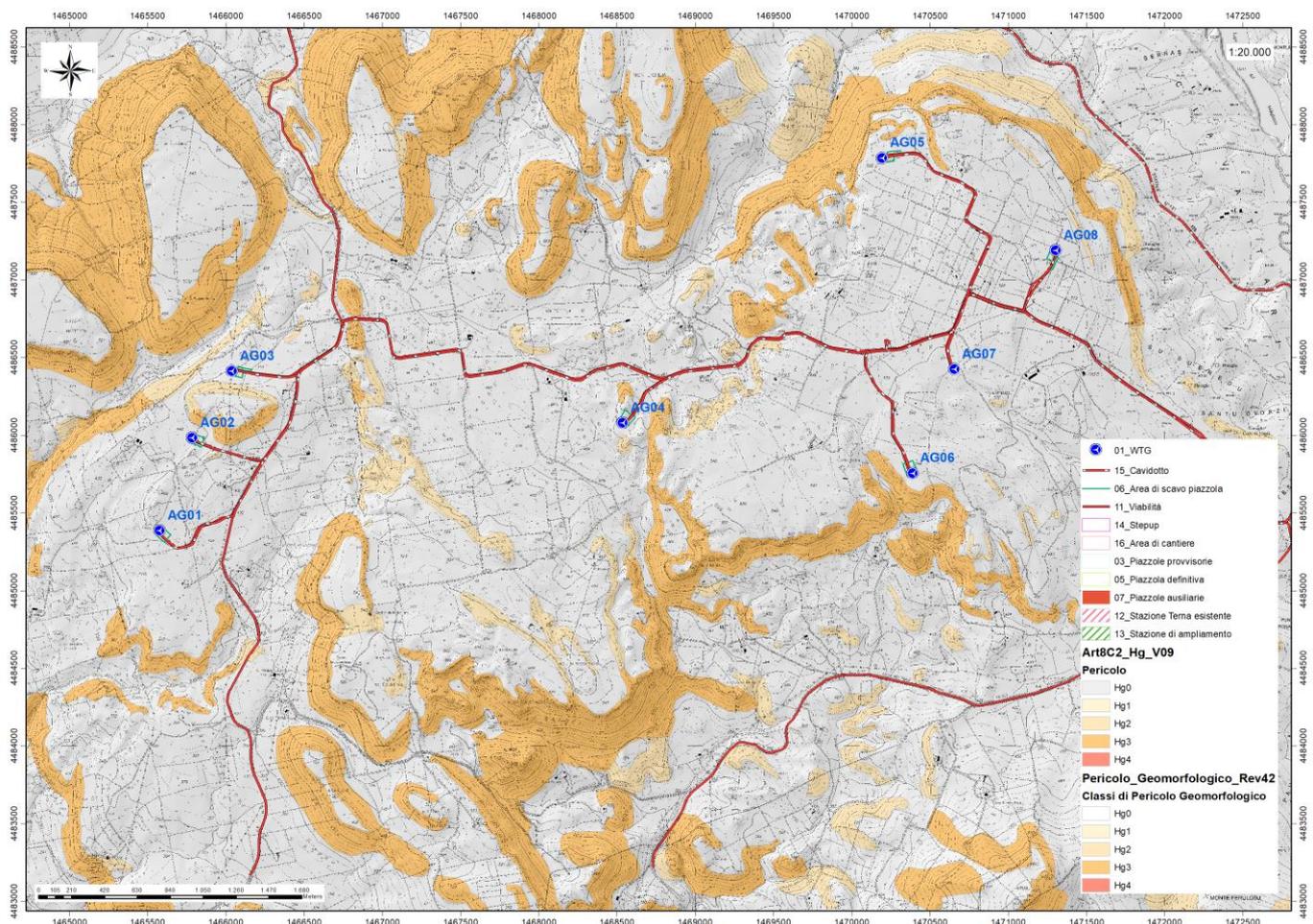


Figura 50 Inquadramento PAI Pericolosità da frana (Fonte RAS).

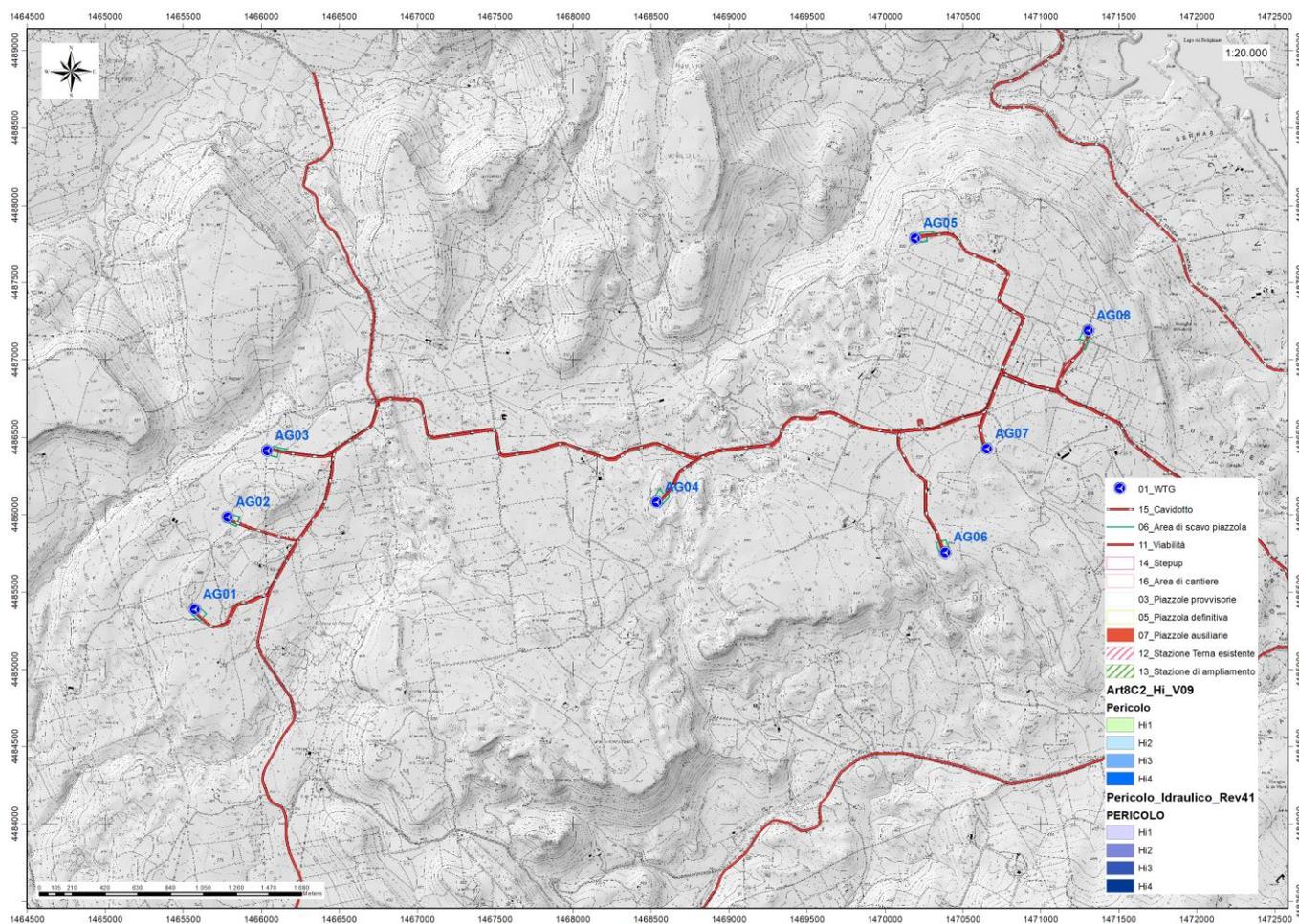


Figura 51 Inquadramento PAI Pericolosità idraulica (Fonte RAS).

Nello specifico del progetto, le turbine sono state posizionate in aree con pendenze minori o uguali al 15%. Generalmente tutto il complesso rappresentato da turbina, piazzola temporanea e permanente occupano aree subpianeggianti sufficientemente ampie da garantire la non influenza dell'opera con la dinamica del versante attiguo. Dai sopralluoghi effettuati in sito non si ha inoltre evidenza per quest'area di fenomeni franosi in atto o potenziali. La dinamica geomorfologica di versante è naturalmente presente ma senza manifestazioni importanti.

Nella carta tematica del P.A.I. relativa alla pericolosità geomorfologica resa disponibile dalla RAS, risulta che nel territorio comunale di **Thiesi** sono presenti diversi settori con diverso grado di pericolosità geomorfologica (Hg0, Hg1, Hg3 e Hg4), e di Rischio geomorfologico (Rg0, Rg1, Rg2 e Rg3) per fenomeni legati ad eventi franosi. Queste aree sono localizzate tutto attorno al centro abitato, sia lungo il cavidotto che vicino alle postazioni dove verranno realizzate le turbine.

Per quanto riguarda le turbine, pur essendo vicine ad aree con Hg1, Hg2 e Rg1 e Rg2, nessuna di esse ricade direttamente in queste aree: la turbina AG02, AG04, AG05, e AG06 si trovano adiacenti, rispettivamente, alle zone: Hg 1, Hg3, Rg1 e Rg2; Hg3 e Rg1; Hg3 e Rg1; Hg3 e Rg1 e Rg2.

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 59 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

Il settore a sud e a nord delle turbine AG01, AG02 e AG03 presenta una porzione della strada di accesso direttamente interessata da pericolo geomorfologico Hg2 e rischio geomorfologico Rg1 e Rg2, due tratti nella stessa area scorrono poi adiacenti nel limite a valle di aree a pericolosità Hg3.

Le turbine e il cavidotto non sono compresi nelle perimetrazioni di pericolosità geomorfologica del PAI, mentre piccoli tratti della connessione passano in corrispondenza di aree Hg2 e in prossimità di aree Hg3.

Per quanto concerne la pericolosità idraulica, nella carta tematica del P.A.I. relativa a questa tematica resa disponibile dalla RAS, **risulta che nel territorio comunale di Thiesi non sono presenti aree perimetrate.**

14.2. Art.30 Ter NTA PAI

Il territorio comunale di Thiesi non è stato ancora oggetto di uno Studio di dettaglio della pericolosità idraulica così come previsto dall'art.8 comma c delle NTA PAI, nelle more della realizzazione dello stesso pertanto, sono state istituite le fasce di prima salvaguardia secondo il comma 1 dell'art.30ter di seguito riportato.

1. Per i singoli tratti dei corsi d'acqua appartenenti al reticolo idrografico dell'intero territorio regionale di cui all'articolo 30 quater, per i quali non siano state ancora determinate le aree di pericolosità idraulica, con esclusione dei tratti le cui aree di esondazione sono state determinate con il solo criterio geomorfologico di cui all'articolo 30 bis, quale misura di prima salvaguardia finalizzata alla tutela della pubblica incolumità, è istituita una fascia su entrambi i lati a partire dall'asse, di profondità L variabile in funzione dell'ordine gerarchico del singolo tratto.

La fascia di rispetto dei corsi d'acqua in base al numero di Stralher equivale a:

| | |
|------------|------|
| Stralher 1 | 10m |
| Stralher 2 | 25m |
| Stralher 3 | 50m |
| Stralher 4 | 75m |
| Stralher 5 | 100m |
| Stralher 6 | 150m |
| Stralher 7 | 250m |
| Stralher 8 | 400m |

Nel caso specifico il Riu Melas (ordine Strahler 3) scorre nella turbina più vicina (AG03) a circa 280m di distanza, dei corsi minori, ovvero di ordine Strahler 1 e 2 scorrono tra la AG01 e la AG02 e a SW della AG06, a non meno di 150m di distanza da ciascuna turbina, non sono pertanto presenti corsi d'acqua nelle cui rispettive fasce di rispetto siano presenti le Turbine in progetto e/o le relative piazzole.

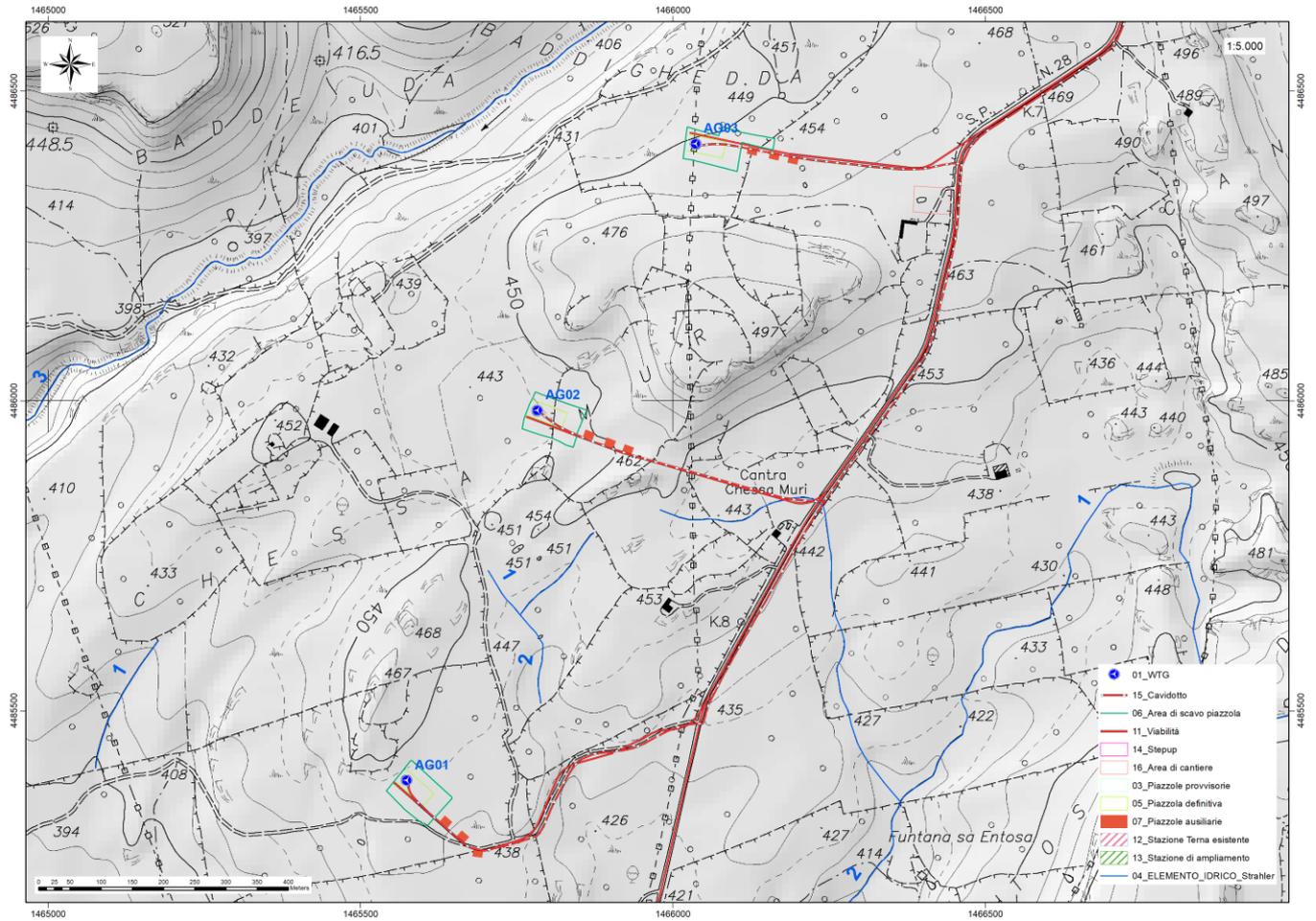


Figura 52 Reticolo idrografico numerato secondo l'ordine di Strahler

14.3. Inventario dei Fenomeni franosi

Per quanto riguarda il censimento dei siti franosi nell'ambito del Progetto IFFI, nell'inventario sono menzionate aree che ricadono nell'ambito territoriale del comune di **Thiesi**. In particolare, a N e NW di **Thiesi** sono state segnalate almeno 3 frane per crollo/ribaltamento diffuso che interessano le rocce carbonatiche (RESa). Si tratta di aree prossime all'abitato di **Thiesi**.

Tuttavia, le aree su cui verranno posizionate le turbine non ricadono nella perimetrazione I.F.F.I.

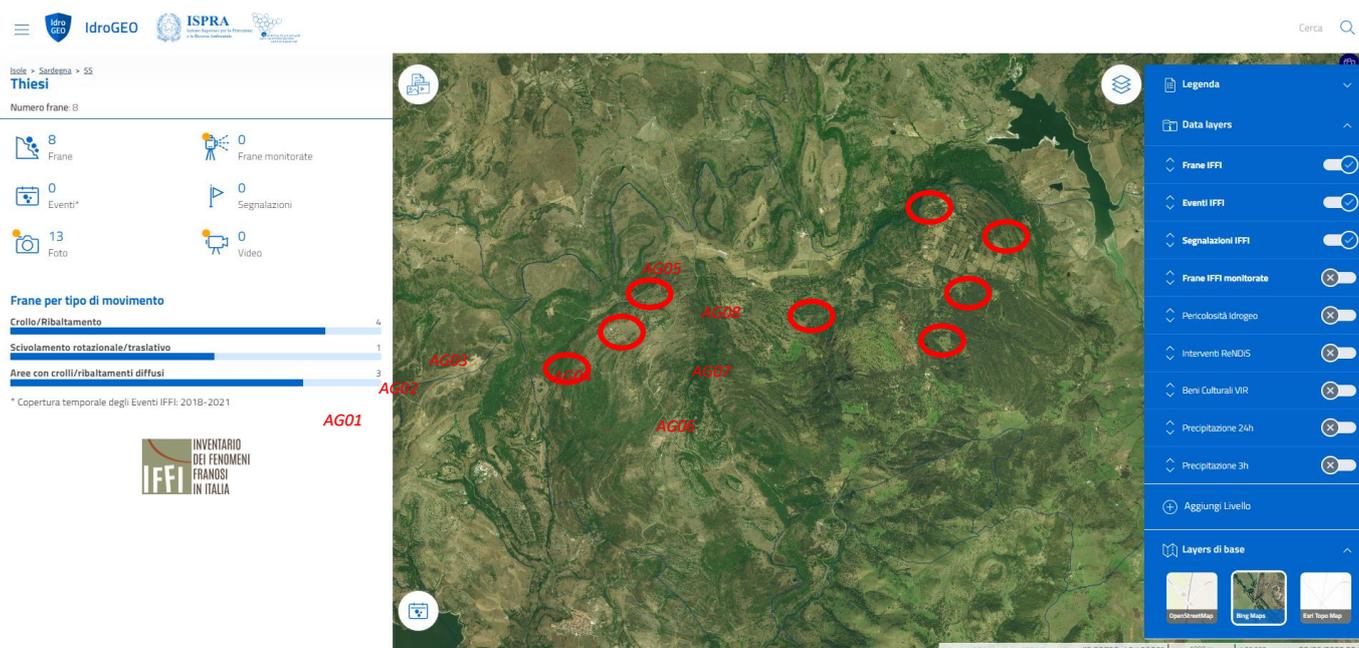


Figura 53 Archivio IFFI (Fonte ISPRA) in rosso l'area di intervento

14.4. Piano Stralcio delle Fasce Fluviali

Il Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF) definisce, per i principali corsi d'acqua della Sardegna, le aree inondabili e le misure di tutela per le fasce fluviali. A seguito dello svolgimento delle conferenze programmatiche, tenute nel mese di gennaio 2013, il Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino della Regione Sardegna, con Delibera n.1 del 20.06.2013, ha adottato in via definitiva il Progetto di Piano Stralcio delle Fasce Fluviali.

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

Con Delibera n. 2 del 17.12.2015, il Comitato Istituzionale dell'Autorità di bacino della Regione Sardegna, ha approvato in via definitiva, per l'intero territorio regionale, ai sensi dell'art. 9 delle L.R. 19/2006 come da ultimo modificato con L.R. 28/2015.

Per quanto riguarda le delimitazioni presenti nella cartografia del Piano Stralcio Fasce Fluviali, si evince che nel territorio comunale di **Thiesi** non sono presenti aree di fascia fluviale.

L'area di progetto non è compresa nelle perimetrazioni del PSFF.

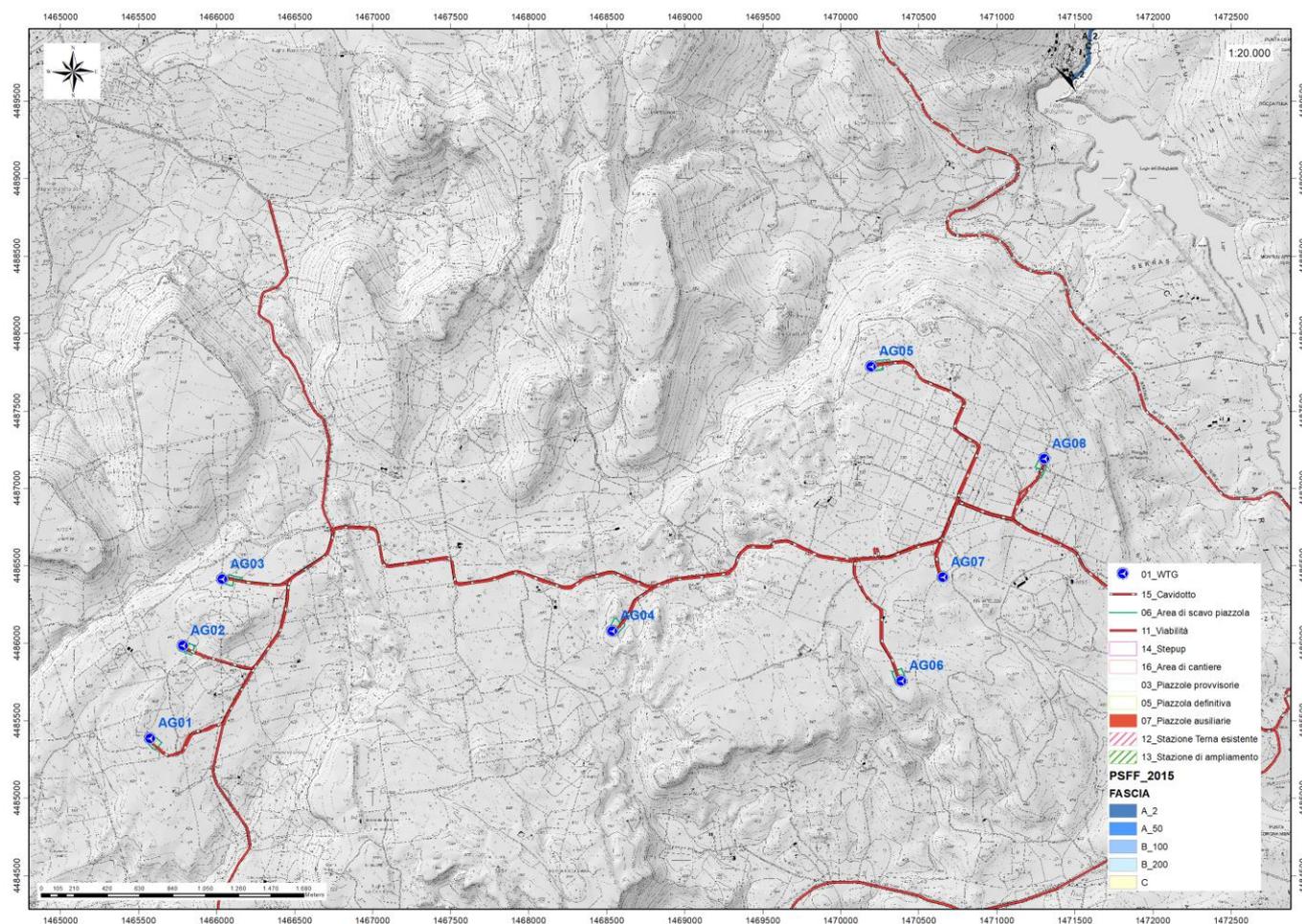


Figura 54 Stralcio perimetrazione Piano Stralcio fasce Fluviali PSFF 2015

14.5. Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA)

L'articolo 7 del D.Lgs. 23 febbraio 2010 n. 49 "Attuazione della Direttiva Comunitaria 2007/60/CE, relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni", che recepisce in Italia la Direttiva comunitaria 2007/60/CE, prevede che in ogni distretto idrografico, di cui all'art. 64 del D.Lgs.152/2006, sia predisposto il **Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni** (di seguito indicato come PGRA).

L'obiettivo generale del PGRA è la riduzione delle conseguenze negative derivanti dalle alluvioni sulla salute umana, il territorio, i beni, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche e sociali. Esso coinvolge pertanto tutti gli aspetti della gestione del rischio di alluvioni, con particolare riferimento alle misure non strutturali finalizzate alla prevenzione, protezione e preparazione rispetto al verificarsi degli eventi alluvionali; tali misure vengono predisposte in considerazione delle specifiche caratteristiche del bacino idrografico o del sottobacino interessato. Il PGRA individua strumenti operativi e di *governance* (quali linee guida, buone pratiche, accordi istituzionali, modalità di coinvolgimento attivo della popolazione) finalizzati alla gestione del fenomeno alluvionale in senso ampio, al fine di ridurre quanto più possibile le conseguenze negative.

Il territorio in studio non risulta essere interessato da perimetrazioni per rischio alluvioni.

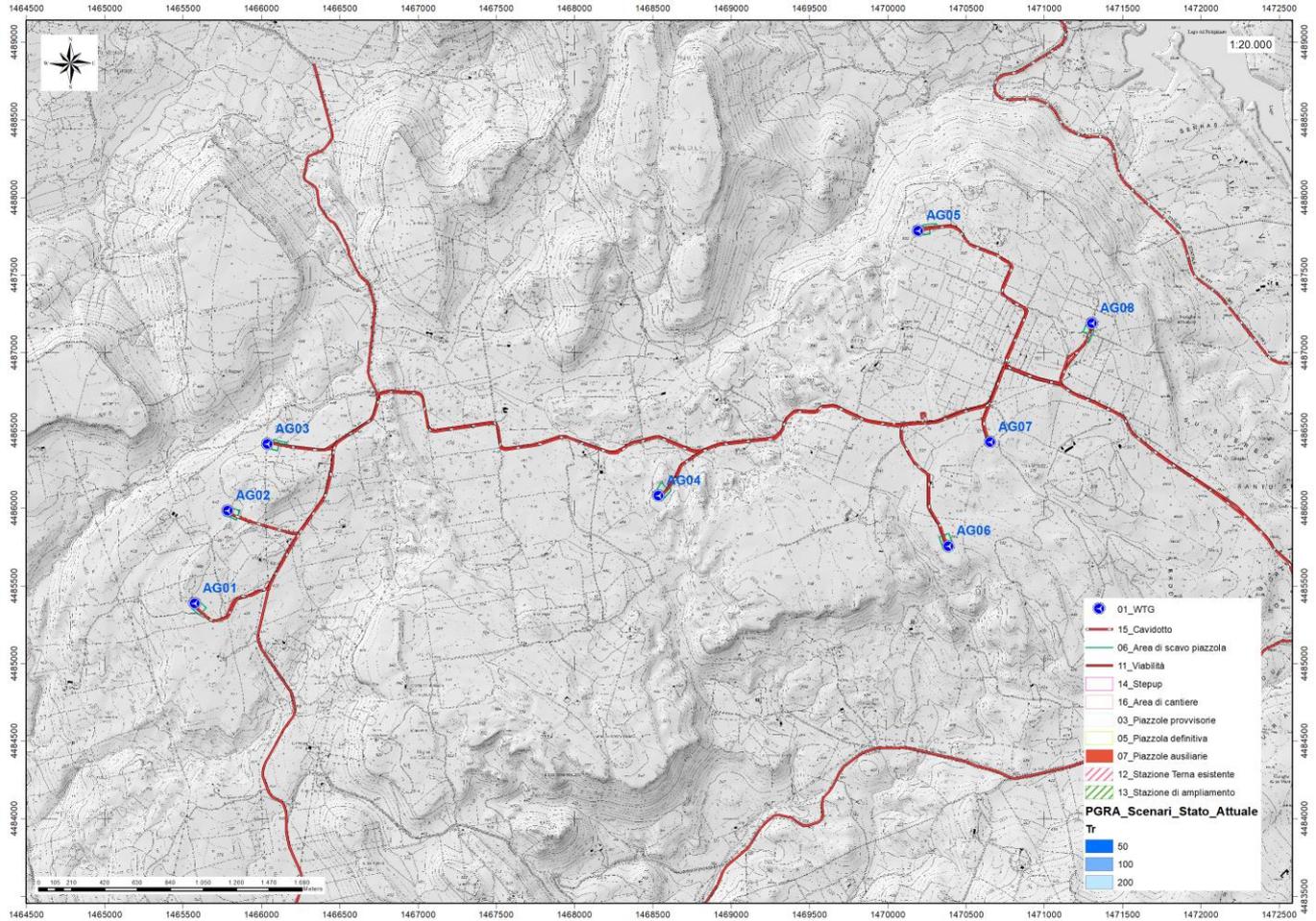


Figura 55 Stralcio perimetrazione PGRA 2021

15. Indagini geognostiche

La necessità di integrare le informazioni di tipo geologico e geotecnico derivanti da studi pregressi, dalla letteratura di settore e dai rilievi geologici e geostrutturali in sito, ha reso necessario predisporre un piano di indagini geognostiche propedeutiche alla definizione del modello geologico di riferimento di sito funzionale alle opere previste in progetto così come richiamato dalle Norme Tecniche sulle Costruzioni (NTC2018 - §Cap. 6.2.1).

L'obiettivo delle indagini realizzate è stato:

1. Definire la stratigrafia ed i rapporti tra le formazioni geologiche interessate dagli interventi;
2. Definire le caratteristiche fisico-meccaniche degli ammassi rocciosi coinvolti nelle opere in progetto;
3. Individuare la presenza di circolazione d'acqua sotterranea alle profondità di interesse in relazione ai volumi significativi delle opere (fondazioni, piazzole, trincee e rilevati stradali, stabilità dei pendii)

La metodica utilizzata è quella indiretta in sito, ovvero l'indagine geofisica, questa costituisce parte integrante delle indagini geognostiche dirette e indirette legate alla caratterizzazione dei terreni di fondazione. In particolare si pone come obiettivo la ricostruzione dell'assetto sismo-stratigrafico dei terreni sede di posa delle opere di fondazione nonché la classificazione del suolo di fondazione per le categorie semplificate indicate nel Decreto 17 gennaio 2018 - NTC 2018 aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni".

Sono stati eseguiti di n°3 **stendimenti di geoelettrica** (08 e 14 Giugno 2022), **3 stendimenti di sismica** con tecnica **MASW e rifrazione in onde P**. Tutte le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni, così come i 3 stendimenti geoelettrici, i quali hanno il medesimo centro degli allineamenti sismici ma sono leggermente più lunghi (93,0 m).

E' stato inoltre eseguito il Rilievo topografico tramite GPS differenziale STONEX S70G (geofoni, punti di shot, elettrodi /picchetti) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni di tomografia elettrica e sismica. Sono stati infine elaborati i dati ottenuti tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche con l'impiego di software specialistici.

| Stendimento | Metodo di indagine | Orientamento | Lunghezza (m) |
|-------------|--------------------------------|--------------|---------------|
| SMT01- AG02 | MASW | W-E | 69,0 |
| SMT01- AG02 | Sismica a rifrazione in onde P | W-E | 69,0 |
| SMT01- AG02 | Geoelettrica | W-E | 93,0 |
| SMT02- AG06 | MASW | SW-NE | 69,0 |
| SMT02- AG06 | Sismica a rifrazione in onde P | SW-NE | 69,0 |
| SMT02- AG06 | Geoelettrica | SW-NE | 93,0 |
| SMT03- AG05 | MASW | NW-SE | 69,0 |
| SMT03- AG05 | Sismica a rifrazione in onde P | NW-SE | 69,0 |
| SMT03- AG05 | Geoelettrica | NW-SE | 93,0 |

Tabella 5 Ubicazione degli stendimenti

15.1. Generalità sul metodo sismico a rifrazione

Il metodo sismico a rifrazione studia la velocità di propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo quando il terreno è sottoposto a sollecitazioni artificiali. La determinazione delle velocità si ottiene misurando i tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in diversi punti sulla superficie topografica. Operativamente i profili sismici si

eseguono disponendo sul terreno una serie di sensori (geofoni), posti ad un intervallo costante, collegati ad un sismografo mediante un cavo multipolare.

Dopo l'allestimento del dispositivo di ricezione si provvede a generare artificialmente vibrazioni impulsive in corrispondenza di punti prestabiliti lungo i profili: Nello stesso istante di partenza della vibrazione viene trasmesso al sismografo il comando di avvio della registrazione (trigger). Da questo istante inizia l'acquisizione digitale, con campionamento ad intervallo costante e predeterminato, dei segnali ricevuti dai sensori. L'interpretazione dei segnali e la ricostruzione del profilo di velocità delle onde P consiste di almeno due fasi ben distinte, e cioè l'interpretazione dei sismogrammi e l'interpretazione dei diagrammi tempi-istanze (dromocrone).

Nella prima fase i tempi di primo arrivo dei segnali sismici vengono letti direttamente sui sismogrammi di campagna visualizzati a monitor. I tempi letti in corrispondenza di ciascun canale (geofono), vengono memorizzati in appositi files che costituiscono i dati in input del software utilizzato. Per ciascun tiro, quindi, si ricostruisce un diagramma dei tempi di arrivo in funzione della distanza dal punto di tiro stesso.

L'interpretazione delle dromocrone consiste, quindi, nel suddividere la funzione tempi/distanze in segmenti a pendenza differente, indicativi della presenza di variazioni di velocità nel sottosuolo. Questa operazione viene eseguita ad un terminale videografico dove è possibile eseguire modifiche ed aggiustamenti continui dell'interpretazione.

Il numero di segmenti per ciascuna funzione equivale al numero di strati che costituiranno il modello interpretativo finale; modello che consiste in una stratigrafia del terreno basata sulle variazioni di velocità delle onde compressionali.

Nella maggior parte dei casi, comunque, si riscontrano variazioni stratigrafiche che non corrispondono a variazioni di tipo litologico in senso stretto, ma alla naturale variazione di compattezza dello stesso materiale che, per alterazione superficiale o per semplice decompressione, si presenta più allentato in prossimità della superficie rispetto alle zone più profonde.

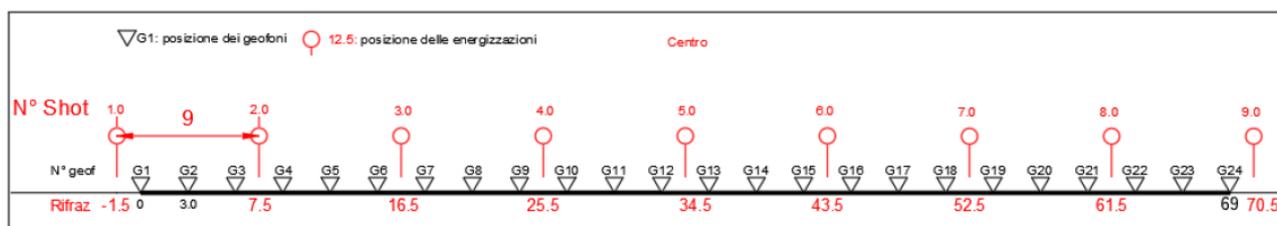
In questi casi per la modellizzazione del sottosuolo, risulta più adatta un'altra tecnica di elaborazione: la tecnica di elaborazione tomografica.

Con questa tecnica il sottosuolo viene suddiviso in elementi finiti di forma quadrata e di dimensioni estremamente piccole (dell'ordine di grandezza di decimetri) un software specifico, (nel nostro caso si è utilizzato il software RAYFRACT vers 4.01), che stima le velocità sismiche compatibili con ogni singolo elemento affinché i tempi di percorso dei vari fronti d'onda, generati nei punti di tiro disposti lungo il profilo, risultino il più possibile simili ai tempi misurati e letti sui sismogrammi. Il risultato che si ottiene è una griglia di valori di velocità dalla superficie fino alle massime profondità di indagine che caratterizzano i vari elementi in cui è stato suddiviso il sottosuolo.

Questa griglia di valori può essere, quindi utilizzata per rappresentare l'andamento nel sottosuolo delle varie litologie presenti mediante variazioni cromatiche associate alle variazioni di velocità o mediante linee di isovelocità.

15.1.1. Caratteristiche delle stese sismiche

Per tutte le basi sismiche sono state eseguite 9 energizzazioni intervallate ogni 3 geofoni secondo lo schema di acquisizione definito dalla specifiche tecniche.



| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 66 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

Figura 56 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 m

15.1.2. Caratteristiche della Strumentazione impiegata

Per l'esecuzione delle indagini è stato impiegato un sismografo GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 5.000 Hz (Rifrazione) e 1500 Hz (MASW) per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysic con frequenza propria di 4,5 Hz per un numero di canali pari a n° 24. Per l'energizzazione è stata impiegata una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg. La quota relativa di ciascun geofono-shot è stata rilevata tramite una livella digitale e GPS differenziale marca Stonex in modo da poter ricostruire la morfologia del terreno e utilizzarla in fase di elaborazione dei dati acquisiti.

15.1.3. Elaborazione dei dati

I dati delle prospezioni sono costituiti dalla geometria d'acquisizione (posizioni e quote relative dei punti scoppio e dei geofoni) e dai tempi di primo arrivo delle onde elastiche di compressione (onde P), determinati manualmente sulle registrazioni riprodotte a schermo (picking dei primi arrivi). La qualità dei dati è risultata nel complesso buona e il picking è stato realizzato facilmente per tutte le basi sismiche. L'inversione dei dati è stata eseguita secondo i criteri della tomografia sismica, mediante apposito software specialistico basato su tecniche di ottimizzazione non lineare. In particolare, l'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione è stata eseguita secondo il metodo tomografico impiegando il software Rayfract 4.01, che parte da un modello iniziale generato con la tecnica Deltat-V. Successivamente viene effettuata l'inversione iterativa del modello con la tecnica WET (Wavepath Eikonal Traveltime tomography processing) che analizza la propagazione dei vari fronti d'onda generati nei punti di tiro fino ad ogni geofono. Il modello stratigrafico ottenuto come insieme di elementi caratterizzati da una specifica velocità viene quindi rappresentato mediante il contour a linee di isovelocità. La colorazione dei vari elementi secondo una scala cromatica riferita a specifici intervalli di velocità facilita l'immediata visione dei risultati

15.2. Indagini sismiche: MASW

Metodologia

La geofisica osserva il comportamento delle onde che si propagano all'interno dei materiali. Un segnale sismico, infatti, si modifica in funzione delle caratteristiche del mezzo che attraversa. Le onde possono essere generate in modo artificiale attraverso l'uso di masse battenti, di scoppi, etc.

Moto del segnale sismico

Il segnale sismico può essere scomposto in più fasi ognuna delle quali identifica il movimento delle particelle investite dalle onde sismiche. Le fasi possono essere:

- P-Longitudinale: onda profonda di compressione;
- S-Trasversale: onda profonda di taglio;
- L-Love: onda di superficie, composta da onde P e S;
- R-Rayleigh: onda di superficie composta da un movimento ellittico e retrogrado.

Onde di Rayleigh – "R"

In passato gli studi sulla diffusione delle onde sismiche si sono concentrati sulla propagazione delle onde profonde (P,S) considerando le onde di superficie come un disturbo del segnale sismico da analizzare. Recenti studi hanno consentito di creare dei modelli matematici avanzati per l'analisi delle onde di superficie in mezzi a differente rigidità.

Analisi del segnale con tecnica MASW

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 67 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

Secondo l'ipotesi fondamentale della fisica lineare (Teorema di Fourier) i segnali possono essere rappresentati come la somma di segnali indipendenti, dette armoniche del segnale. Tali armoniche, per analisi monodimensionali, sono funzioni trigonometriche seno e coseno, e si comportano in modo indipendente non interagendo tra di loro. Concentrando l'attenzione su ciascuna componente armonica il risultato finale in analisi lineare risulterà equivalente alla somma dei comportamenti parziali corrispondenti alle singole armoniche. L'analisi di Fourier (analisi spettrale FFT) è lo strumento fondamentale per la caratterizzazione spettrale del segnale. L'analisi delle onde di Rayleigh, mediante tecnica MASW, viene eseguita con la trattazione spettrale del segnale nel dominio trasformato dove è possibile, in modo abbastanza agevole, identificare il segnale relativo alle onde di Rayleigh rispetto ad altri tipi di segnali, osservando, inoltre, che le onde di Rayleigh si propagano con velocità che è funzione della frequenza. Il legame velocità frequenza è detto spettro di dispersione. La curva di dispersione individuata nel dominio f-k è detta curva di dispersione sperimentale, e rappresenta in tale dominio le massime ampiezze dello spettro.

Modellizzazione

E' possibile simulare, a partire da un modello geotecnico sintetico caratterizzato da spessore, densità, coefficiente di Poisson, velocità delle onde S e velocità delle Onde P, la curva di dispersione teorica la quale lega velocità e lunghezza d'onda secondo la relazione:

$$v = \lambda \times \nu$$

Modificando i parametri del modello geotecnico sintetico, si può ottenere una sovrapposizione della curva di dispersione teorica con quella sperimentale: questa fase è detta di inversione e consente di determinare il profilo delle velocità in mezzi a differente rigidità.

Modi di vibrazione

Sia nella curva di inversione teorica che in quella sperimentale è possibile individuare le diverse configurazioni di vibrazione del terreno. I modi per le onde di Rayleigh possono essere: deformazioni a contatto con l'aria, deformazioni quasi nulle a metà della lunghezza d'onda e deformazioni nulle a profondità elevate.

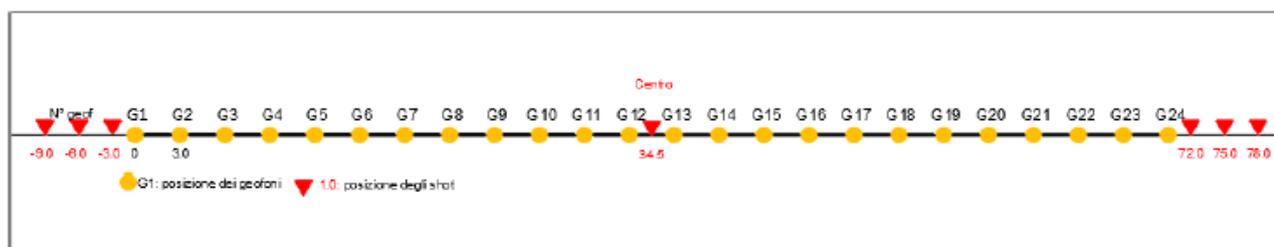
Profondità di indagine

Le onde di Rayleigh decadono a profondità circa uguali alla lunghezza d'onda. Piccole lunghezze d'onda (alte frequenze) consentono di indagare zone superficiali mentre grandi lunghezze d'onda (basse frequenze) consentono indagini a maggiore profondità.

15.1.4. Specifiche delle indagini svolte

L'indagine si sviluppa mediante la materializzazione sul terreno di una linea retta mediante la posa di una fettuccia metrica. A seguire vengono posizionati i geofoni intervallati ad una distanza pari a **3,0 m** in funzione anche della disponibilità di spazio. Esternamente alla stesa geofonica, da ora base sismica, a distanza di interesse che può essere pari ad un multiplo della distanza intergeofonica ma anche variabile (in funzione delle disponibilità di cantiere), sia in andata (ovvero in prossimità del geofono 1) che al ritorno (ovvero all'ultimo geofono posizionato sulla base sismica), vengono svolte delle energizzazioni mediante massa battente pari a Kg 10,0. Nel caso in esame, sono state svolte le energizzazioni in "andata" e in "ritorno" con distanza dal geofono 1 e dal geofono 24 crescente e pari a multipli della distanza intergeofonica (v. schema), oltre che una battuta al centro della base sismica.

Il numero di geofoni utile all'esecuzione ottimale di un'indagine M.A.S.W. è risultato, per il cantiere svolto, di 24 geofoni dei quali sono state utilizzate tutte le tracce. Il tempo dell'acquisizione è stato definito tra 1.00 e 2.00 secondi.

MASW: schema geometrico delle acquisizioni a 24 geofoni e interdistanza di 3,0 m**15.1.5. Caratteristiche della strumentazione impiegata**

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 1500 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysic con frequenza propria di 4,5 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24 canali.

Per l'energizzazione ci siamo avvalsi di una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

15.1.6. Interpretazione dei segnali acquisiti

Il metodo interpretativo della M.A.S.W. si compone dei seguenti passaggi di analisi dei segnali acquisiti:

- individuazione della variazione del segnale acquisito nel tempo
- analisi di Fourier con definizione dei contenuti spettrali acquisiti nei segnali
- stacking dello spostamento di fase con definizione delle velocità di rotazione retrograda compatibile con il campo di frequenza definita.

A posteriori dell'analisi matematica del segnale acquisito, definito un modello stratigrafico compatibile con la geologia locale, si provvede all'inversione della curva di dispersione ottenendo la sismo-stratigrafia.

L'elaborazione dei dati che ha prodotto il profilo di velocità è stata realizzata grazie all'impiego del software ZondST2D.

15.1.7. Categorie di sottosuolo - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)

Le "Norme Tecniche per le Costruzioni" – Decreto del 19/01/2018 definiscono le regole per progettare l'opera sia in zona sismica che in zona non sismica. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

h_i spessore dell' i -esimo strato;

$V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato H è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II. Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle NTC 2018. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

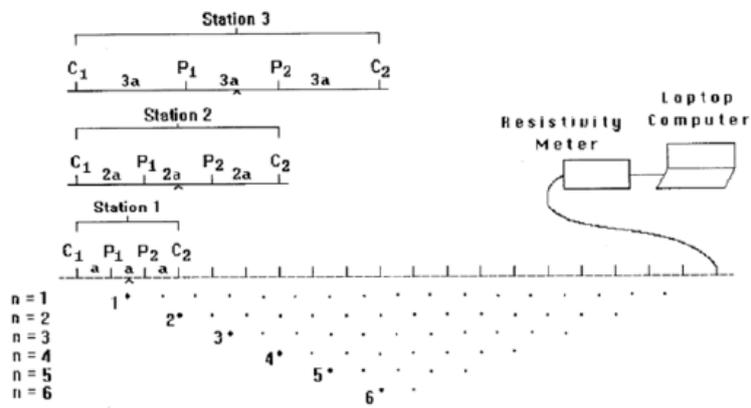
Tabella 3.2.II. Categorie di sottosuolo (Fonte NTC 2018)

| Categoria | Descrizione |
|-----------|---|
| A | <i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i> |
| B | <i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i> |
| C | <i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i> |
| D | <i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i> |
| E | <i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i> |

15.2. Tomografia elettrica

15.2.1. Tecnica e parametri utilizzati

Lo scopo dei metodi geofisici è quello di ottenere informazioni sulla natura e struttura del sottosuolo attraverso una serie di misure opportunamente effettuate in superficie. Il metodo utilizzato in questa indagine ricade fra i metodi geoelettrici "attivi", cioè quelli che utilizzano correnti elettriche artificialmente immesse nel terreno, con l'intento di misurare la resistività apparente degli strati attraversati dalla corrente elettrica. La tecnica tomografica si compone di uno stendimento costituito nel caso specifico da un massimo di 32 elettrodi posti ad un'interdistanza costante l'uno dall'altro, che vengono gestiti automaticamente dallo strumento di misura e commutati alternativamente come elettrodi di corrente e di misura di differenza di potenziale (d.d.p.). La metodologia permette l'acquisizione di una considerevole quantità di dati sulla resistività "apparente", rappresentativi sia delle variazioni laterali, che verticali lungo il profilo così da generare una Tomografia Elettrica lungo una linea sul terreno.



L'utilizzo appropriato dei programmi d'inversione consente l'elaborazione delle sezioni di resistività in grado di riprodurre accuratamente le variazioni del parametro fisico. La resistività rappresenta una proprietà fisica molto importante, poiché dipende da vari fattori quali, la natura dei terreni e delle rocce, la saturazione dell'acqua, la

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 70 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

porosità della roccia, e tutte le anomalie locali generate da strutture localizzate come cavità, corpi di discarica, tracce di dispersione d'inquinanti, etc..

La **profondità d'esplorazione** è variabile secondo il dispositivo e della risoluzione richiesta; mediamente è pari a circa 1/5 della lunghezza dello stendimento.

15.2.2. Geometria delle acquisizioni

Per ciascun stendimento sono state impiegate tre geometrie di acquisizione, come di seguito specificato:

- Quadripolo di Wenner
- Quadripolo di Wenner Schlumberger
- Quadripolo Dipolo-Dipolo

Ogni metodo utilizzato ha delle caratteristiche proprie e come tale tende meglio a rappresentare specifiche strutture presenti nel sottosuolo. In particolare:

1. Il quadripolo di Wenner (di seguito W) presenta caratteristiche per il quale risulta maggiormente idoneo nell'investigazione di strutture orizzontali (quali quelle sedimentarie o laviche).
2. Il quadripolo di Wenner-Schlumberger (di seguito WS) risulta essere un buon compromesso per l'investigazione sia di strutture orizzontali che verticali (faglie, dicchi, cavità),
3. Il quadripolo Dipolo-Dipolo (di seguito DD) è prevalentemente idoneo nell'investigazione di strutture verticale (faglie, dicchi, cavità), mentre risulta essere poco adatto in presenza di strutture orizzontali, quali quelle sedimentarie.

Il W e il WS si distinguono anche per un minore "rumore" delle acquisizioni, ossia una miglior rapporto tra segnale acquisito e disturbo della misura, nonché per una maggiore capacità di investigazione in profondità.

15.2.3. Strumentazione e attrezzatura utilizzata

La strumentazione utilizzata per lo studio è composta dai seguenti dispositivi:

- sistema di misurazione ed acquisizione formato da un georesistivimetro completo di unità di energizzazione ed un computer per la gestione automatica delle acquisizioni (apparecchiatura per tomografia elettrica Mod. Polares della PASI) che fornisce la corrente da immettere nel sottosuolo con una tensione in uscita di picco di $\pm 700V$ ed una corrente variabile fra 5 e 2.000 mA.;
- n° 2MUX per la gestione automatica delle acquisizioni in cui gli elettrodi collegati all'unità di acquisizione ed energizzazione sono in grado di funzionare alternativamente come elettrodi di corrente e di potenziale;
- N° 2 cavi per 16 elettrodi *cable A-B-M-N* con connettore per MUX
- 32 elettrodi in acciaio inox

15.2.4. Elaborazione dei dati e software

L'elaborazione tomografica consiste, nella suddivisione dello spazio bidimensionale della sezione in celle secondo uno schema definito con riferimento alla distribuzione e alla dispersione dei dati. Per ognuna delle celle è calcolata la resistività apparente che soddisfa il complesso delle misure eseguite, su questo schema è applicato il metodo d'ottimizzazione dei minimi quadrati modificando il modello di partenza, in maniera iterativa in modo che si riduca la differenza tra i valori di resistività apparente calcolati e quelli effettivamente misurati.

Il **grafico** che ne deriva è una sezione bidimensionale in cui le zone ad uguale resistività sono raffigurate da aree caratterizzate dal medesimo colore. Le tinte blu rappresentano resistività basse, poi si passa a colori che vanno dal verde al giallo e infine al rosso che rappresenta litologie a resistività via via sempre più alte. Le misure sperimentali sono state elaborate mediante uno specifico programma di interpretazione tomografica denominato "ZONDRES2D". Il programma d'interpretazione tomografica ZONDRES2D elabora un modello bidimensionale di resistività del sottosuolo che soddisfa i valori sperimentali acquisiti con le varie interdistanze dello stendimento.

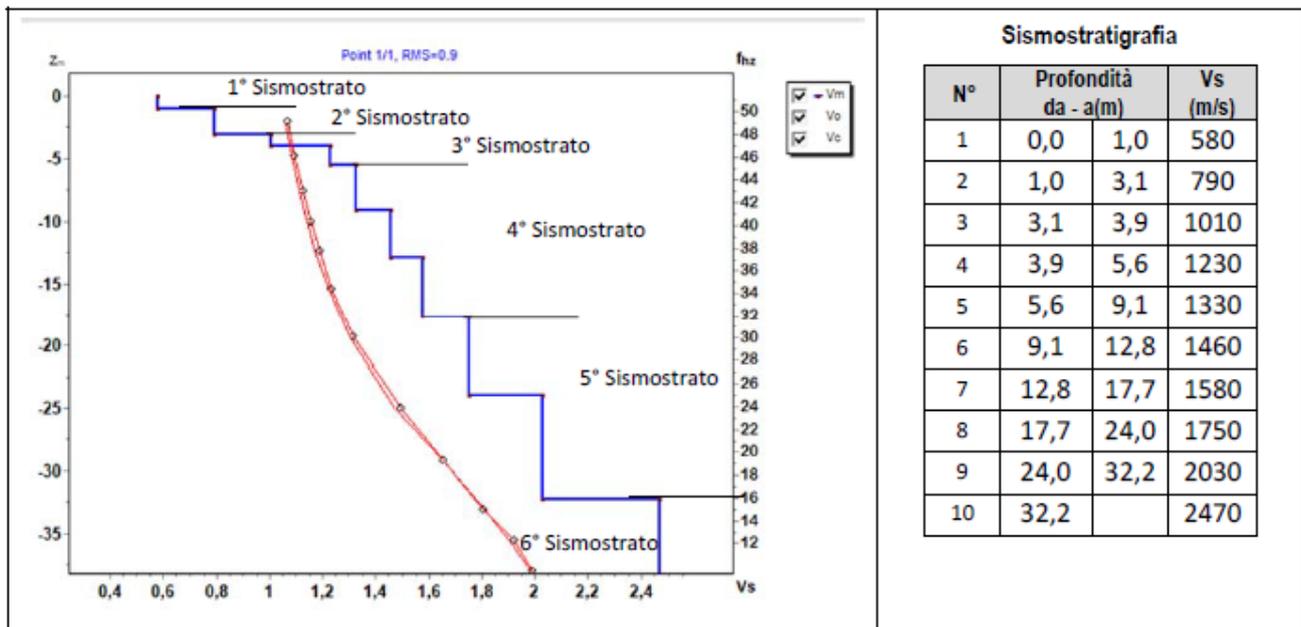
15.3. Risultati delle indagini del sito SMT01 (AG02)

15.3.1. Masw SMT01

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento SMT01, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

| Profondità [m sotto il pc] | Descrizione |
|----------------------------|---|
| 0 – 1,0 | 1° sismostrato con Vs di 580 m/s , Terre di copertura molto addensate |
| 1,0 – 3,1 | 2° sismostrato con Vs di 790 m/s , Roccia fratturata |
| 3,1 – 5,6 | 3° sismostrato con Vs tra 1010 e 1230 m/s , Substrato roccioso da fratturato a debolmente fratturato |
| 5,6 – 17,7 | 4° sismostrato con Vs tra 1330 e 1580 m/s , Substrato roccioso sano |
| 17,7 – 32,2 | 5° sismostrato con Vs tra 1750 e 2030 m/s , Substrato roccioso sano |
| >32,2 | 6° sismostrato con Vs di 2470 m/s , Substrato roccioso sano |

MASW SMT01 - PROFILO Vs



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

h_i spessore dell'*i*-esimo strato;

$V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **3,1 m** ($V_s > 800$ m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **3,1 m** di profondità dal p.c. è pari a: $V_{s,eq} = 3,1 / 0,004372 = 709$ m/s.

Ciò consente di classificare il terreno come **Categoria B** Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

Chiaramente in caso di realizzazione di fondazioni a profondità maggiore di 0,2 m da p.c. la classificazione del sottosuolo passa ad una **categoria A**

Nella **tabella seguente** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input Vs, e Vp e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

| Sismostrato | Prof/zona | CT* | Densità γ | Vp | Vs | Coefficiente di Poisson ν | Modulo di Young dinamico Ed | Modulo di Young statico Ed | Modulo di taglio G_0 | Modulo di comprimibilità o di Bulk - K |
|-------------|-----------|-------|----------------------|-------|-------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|--|
| | | | [Kg/m ³] | [m/s] | [m/s] | | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | 0-1,0 | terre | 1.700 | 1.160 | 580 | 0,33 | 1.530 | 184 | 569 | 1.530 |
| 2 | 1,0-3,1 | 10% | 1.900 | 1.580 | 790 | 0,33 | 3.158 | 316 | 1.187 | 3.158 |
| 3 | 3,1-5,6 | 15% | 2.000 | 2.240 | 1.120 | 0,33 | 6.688 | 1.003 | 2.511 | 6.688 |
| 4 | 5,6-17,7 | 20% | 2.200 | 2.910 | 1.455 | 0,33 | 12.415 | 2.483 | 4.658 | 12.415 |
| 5 | 17,7-32,2 | 25% | 2.300 | 3.780 | 1.890 | 0,33 | 21.908 | 5.477 | 8.218 | 21.908 |
| 6 | >32,2 | 30% | 2.400 | 4.940 | 2.470 | 0,33 | 39.051 | 11.715 | 14.642 | 39.051 |

Figura 57 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e N_{spt}, i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

15.3.2. Rifrazione SMT01 e Tomografia elettrica SMT01

Nella sezione di sismica a rifrazione **STM01** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

| Stendimento SMT01 | ONDE P | |
|---|----------------------|-----------------|
| Sismostrati | Profondità da pc (m) | Velocità in m/s |
| A: Unità delle terre di copertura (rippabili) | Da 0,0 a 1,0/1,5 | 400-800 |
| B: Unità delle rocce fratturate (rippabili) | Da 1,0/1,5 a 3,0/4,0 | 800-1600 |
| C: Unità delle rocce da fratturate a debolmente fratturate (rippabili con difficoltà) | Da 3,0/4,0 a 5,0/8,0 | 1600-2200 |
| D: Unità delle rocce da debolmente fratturate a sane (non rippabili) | Da 5,0/8,0 a 26,0 | 2200-4500 |

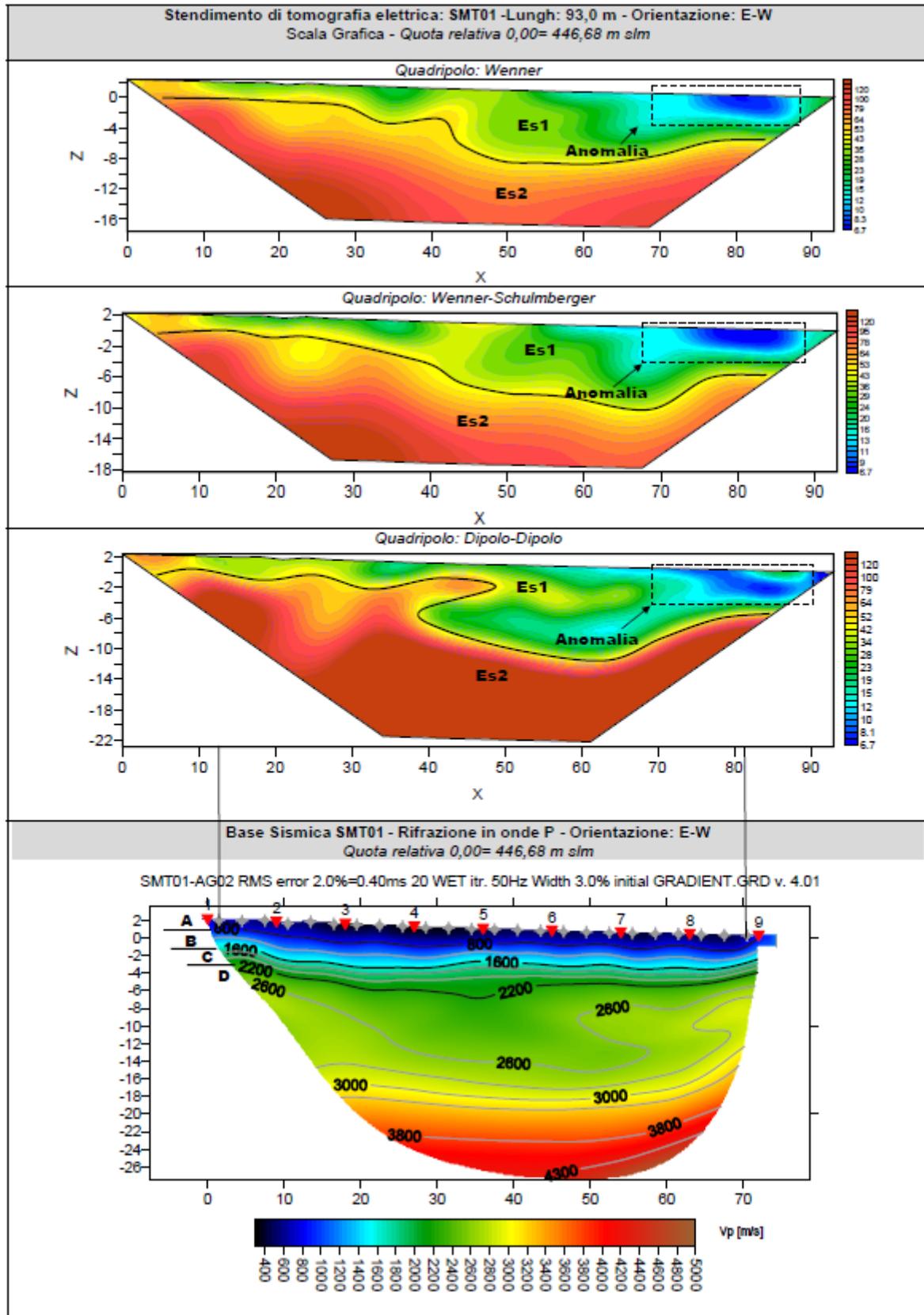
Dall'esame della sezione sismica si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 4500 m/s. Il sismostrato A presenta spessori molto ridotti (tra 1,0 e 1,5 metri da p.c) e un andamento parallelo al piano campagna. Il sismostrato B, caratterizzato da rocce fratturate ancora rippabili presenta anch'esso un comprese tra 3,0 e 4,0 m dal p.c. Il sismostrato C (limite dei materiali rippabili) si osserva invece fino alla profondità di circa 5,0/8,0 m di profondità dal p.c e rappresenta un substrato lapideo meno fratturato del precedente e quindi rippabile con difficoltà. Il sismostrato D (materiali non rippabili) si osserva invece fino alla profondità massima di indagine (26,0 m

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 73 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

dal p.c) ed è composto da materiali lapidei compatti non rippabili, i quali sono caratterizzati da velocità alte. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle V_p con alcune variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso. In particolare si osserva che nella parte centrale della sezione si ha un settore caratterizzato da velocità inferiori fino alla profondità di 12,0 m. dal p.c, dovute probabilmente alla presenza di materiali rocciosi maggiormente alterati/fratturati.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 3,0 e 4,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre già a 5,0 e 8,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

Le sezioni di tomografia elettrica **SMT01**, realizzate con le tre differenti geometrie di acquisizione, sono caratterizzate nel complesso da leggere variazioni di resistività da cui si può distinguere la presenza di un primo elettrostrato (ES1) di spessore compreso tra 4,0 e 8,0 metri riconducibile alla coltre di terreni/rocce alterate/fratturate caratterizzati da valori di resistività bassi, tra 6 e 50 $\Omega \cdot m$, ben distinguibile con le tutte e 3 le acquisizioni. In tale sismostrato, in corrispondenza della parte destra delle sezioni, si osservano delle anomalie caratterizzate dai valori più bassi di resistività, riconducibile alla probabile presenza di materiale maggiormente alterato (v. argillificazione). Segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori medio bassi di resistività (tra 50 e 140 $\Omega \cdot m$) riconducibile alla presenza del substrato litoide più compatto. Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione, mette in evidenza che in entrambe le acquisizioni si riconosce un settore nella parte centrale della sezione caratterizzata da materiali rocciosi con caratteristiche fisico meccaniche più scadenti rispetto alle zone più esterne dovuta probabilmente alla presenza di materiali alterati/fratturati, mentre solo nelle acquisizioni di tomografia elettrica si riconosce una zona tra le progressive 70,0 m e 85,0 m caratterizzata dai valori più bassi di resistività, riconducibile alla probabile presenza di materiale maggiormente alterato (v. argillificazione).



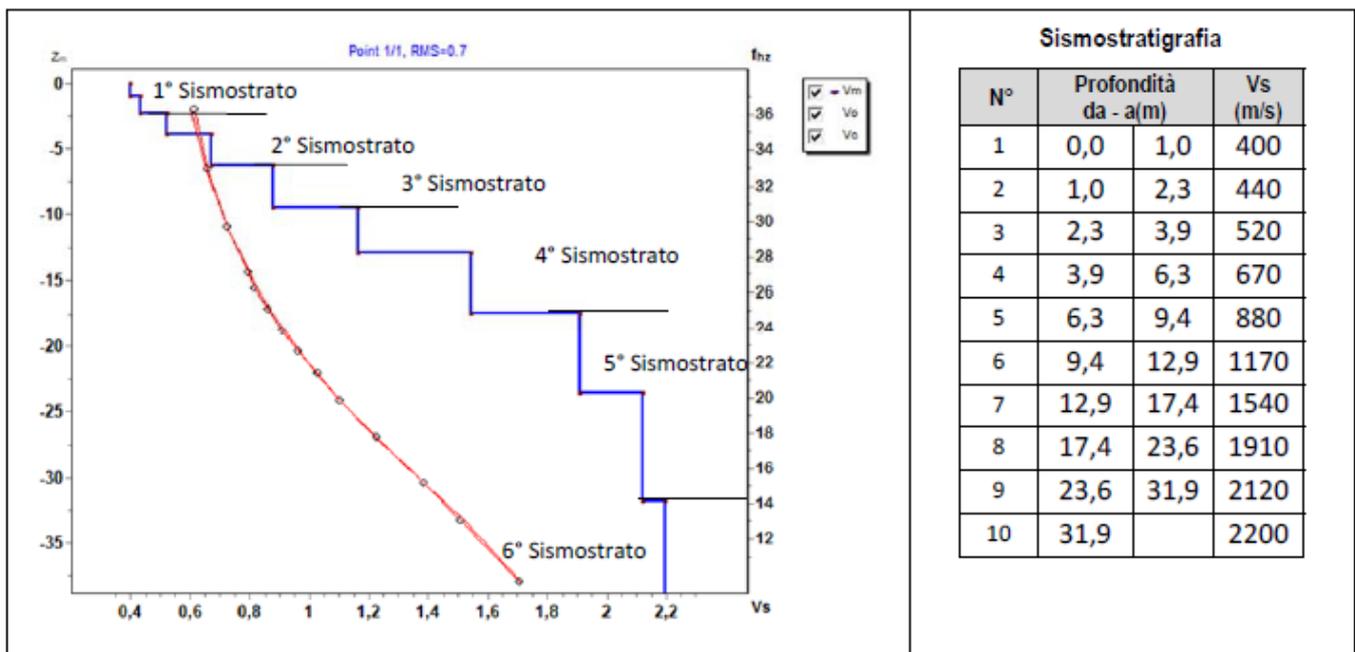
15.4. Risultati delle indagini del sito SMT02 (AG06)

15.4.1. Masw SMT02

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento SMT02, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

| Profondità [m sotto il pc] | Descrizione |
|----------------------------|--|
| 0 – 2,3 | 1° sismostrato con Vs tra 400 e 440 m/s , Terre mediamente addensate |
| 2,3 – 6,3 | 2° sismostrato con Vs tra 520 e 670 m/s , Rocce fratturate |
| 6,3 – 9,4 | 3° sismostrato con Vs di 880 m/s , Substrato roccioso fratturato |
| 9,4 – 17,4 | 4° sismostrato con Vs tra 1170 e 1540 m/s , Substrato roccioso da fratturato a sano |
| 17,4 – 31,9 | 5° sismostrato con Vs tra 1910 e 2120 m/s , Substrato roccioso sano |
| >31,9 | 6° sismostrato con Vs di 2200 m/s , Substrato roccioso sano |

MASW SMT02 - PROFILO Vs



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

h_i spessore dell' i -esimo strato;

$V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **6,3 m** ($V_s > 800$ m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **6,3 m** di profondità dal p.c. è pari a: $V_{s,eq} = 6,3 / 0,012101 = 520$ m/s.

Ciò consente di classificare il terreno come **Categoria B Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti**, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

Nella **tabella seguente** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input Vs, e Vp e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

| Sismostrato | Prof/zona | CT* | Densità γ | Vp | Vs | Coefficiente di Poisson ν | Modulo di Young dinamico Ed | Modulo di Young statico Ed | Modulo di taglio G_0 | Modulo di comprimibilità o di Bulk - K |
|-------------|-----------|-------|----------------------|-------|-------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|--|
| | | | [Kg/m ³] | [m/s] | [m/s] | | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | 0-2,3 | terre | 1.600 | 840 | 420 | 0,33 | 755 | 91 | 284 | 755 |
| 2 | 2,3-6,3 | 10% | 1.800 | 1.190 | 595 | 0,33 | 1.697 | 170 | 637 | 1.697 |
| 3 | 6,3-9,4 | 15% | 2.000 | 1.760 | 880 | 0,33 | 4.129 | 619 | 1.549 | 4.129 |
| 4 | 9,4-17,4 | 20% | 2.200 | 2.710 | 1.355 | 0,33 | 10.768 | 2.154 | 4.040 | 10.768 |
| 5 | 17,4-31,9 | 25% | 2.300 | 4.030 | 2.015 | 0,33 | 24.899 | 6.225 | 9.336 | 24.899 |
| 6 | >31,9 | 30% | 2.400 | 4.400 | 2.200 | 0,33 | 30.980 | 9.294 | 11.621 | 30.980 |

Figura 58 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e N_{spt}, i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

15.4.2. SMT02: Rifrazione e Tomografia elettrica

Nella sezione di sismica a rifrazione **SMT02** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

| Stendimento SMT02 | ONDE P | |
|---|------------------------|-----------------|
| Sismostrati | Profondità da pc (m) | Velocità in m/s |
| A: Unità delle terre di copertura (rippabili) | Da 0,0 a 1,0/2,0 | 400-800 |
| B: Unità delle rocce fratturate (rippabili) | Da 1,0/2,0 a 2,0/6,0 | 800-1600 |
| C: Unità delle rocce da fratturate a debolmente fratturate (rippabili con difficoltà) | Da 2,0/6,0 a 4,0/9,5 | 1600-2200 |
| D: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (non rippabili) | Da 4,0/9,5 a 16,0/20,0 | 2200-4000 |

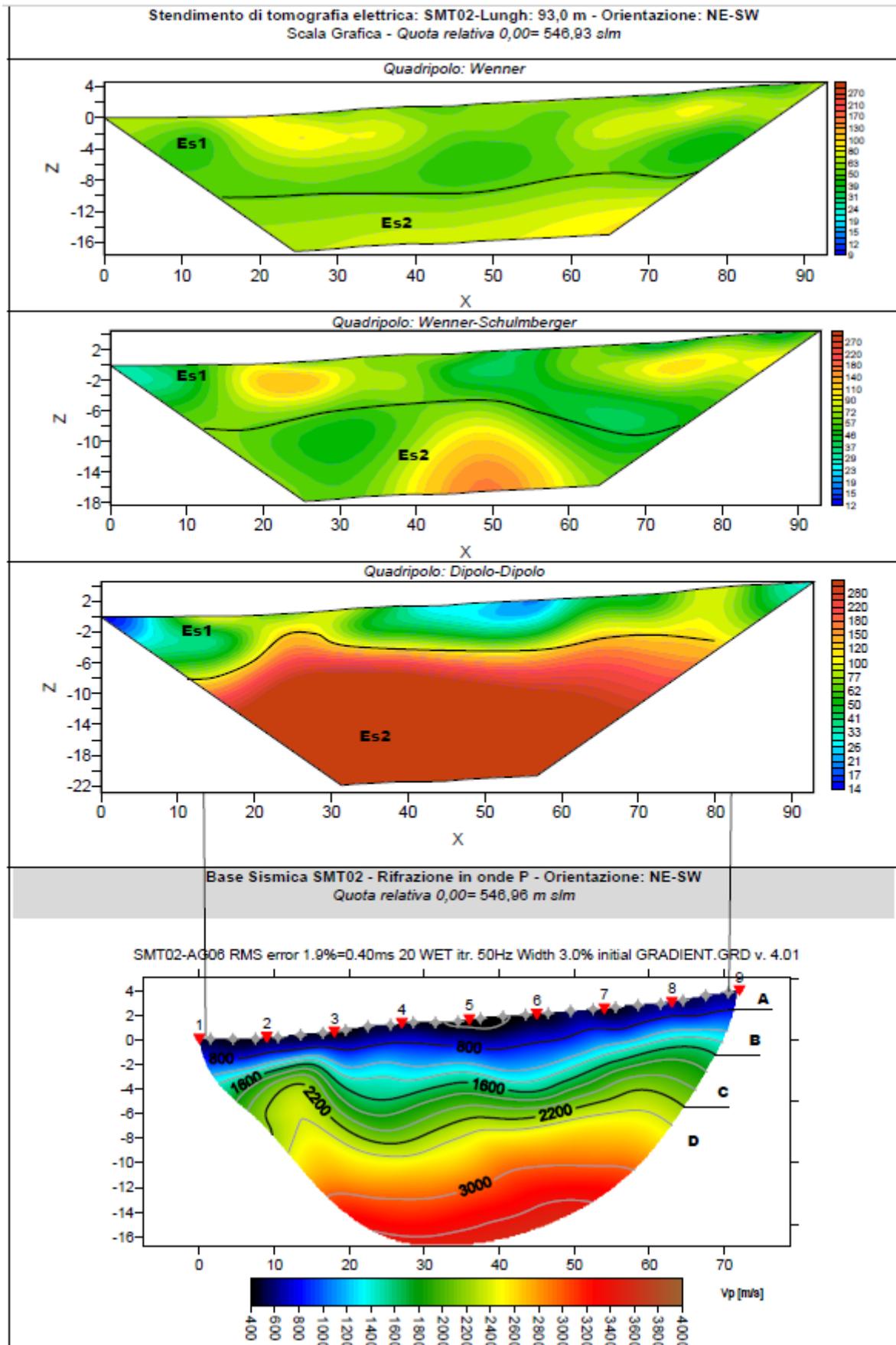
Dall'esame della sezione sismica si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 4000 m/s. Il sismostrato A presenta spessori ridotti (tra 1,0 e 2,0 metri dal p.c) e un andamento parallelo al piano campagna. Il sismostrato B, caratterizzato da rocce fratturate ancora rippabili presenta un andamento parallelo al piano campagna per gran parte della sezione ad esclusione del tratto iniziale in cui presenta spessori nettamente inferiori, infatti in tale area si rileva già alla profondità di 2,0 m, mentre nel resto della sezione si riscontra a profondità comprese tra 4,0 e 6,0 metri di profondità dal p.c. Il sismostrato C (limite dei materiali rippabili) caratterizzato da rocce con grado di fratturazione inferiore rispetto al precedente, segue l'andamento del sismostrato B e si osserva fino a profondità

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 77 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

comprese tra 4,0/9,0 m di profondità dal p.c e rappresenta un substrato lapideo con un grado di fratturazione inferiore del precedente sismostrato e quindi rippabile con difficoltà. Il sismostrato D (materiali non rippabili) si osserva invece fino alla profondità massima di indagine compresa tra 16,0 e 20,0 m dal p.c ed è composto da materiali lapidei compatti non rippabili caratterizzati da velocità alte. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp con alcune variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 2,0 e 6,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre già a profondità comprese tra 4,0 e 9,5 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile. Si precisa che le profondità minori a cui si osservano i materiali rippabili con difficoltà e non rippabili si trovano esclusivamente nelle zone più esterne della sezione, in particolare nella parte iniziale. Le sezioni di tomografia elettrica **SMT02**, realizzate con le tre differenti geometrie di acquisizione, sono caratterizzate nel complesso da leggere variazioni di resistività da cui si può distinguere la presenza di un primo elettrostrato (ES1) di spessore compreso tra 4,0 e 10,0 metri riconducibile alla coltre di terre e rocce alterate/fratturate caratterizzato da valori di resistività medio bassi, compresi tra 9 e 100 $\Omega \cdot m$, ben distinguibile con le tutte e 3 le acquisizioni. In tale elettrostrato si osservano tra le progressive 20,0-30,0 metri e 70,0-80,0 metri delle zone caratterizzate dalla presenza di roccia con caratteristiche fisico meccaniche migliori rispetto alla zona centrale, la quale presenta sicuramente una maggiore quantità di materiale terrigeno e/o roccia maggiormente alterata e fratturata. A partire da profondità comprese tra 4,0 e 10,0 m dal piano campagna segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori più alti di resistività (tra 100 e 300 $\Omega \cdot m$) riconducibile alla presenza di uno strato litoide più compatto. La geometria di acquisizione Dipolo-Dipolo risulta quella che, nel contesto litologico in esame, porta ad una ricostruzione geologico-stratigrafica più attendibile e simile ai risultati ottenuti con la sismica a rifrazione.

Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione conferma che a partire dal piano campagna si riscontra la presenza di materiale terrigeno e rocce fratturate fino a profondità comprese tra 4,0 e 10,0 metri dal piano campagna, in particolare si osserva che nelle zone esterne della sezione si ha una prevalenza di materiali rocciosi con caratteristiche fisico meccaniche migliori rispetto alla zona centrale, la quale è caratterizzata da una maggiore quantità di materiale terrigeno e/o roccia maggiormente alterata e/o fratturata. Dalle profondità comprese tra 4,0 e 10,0 metri dal piano campagna si incontra invece uno strato litoide più compatto caratterizzato da velocità medio alte delle Vp e valori di resistività maggiori rispetto ai materiali sovrastanti.



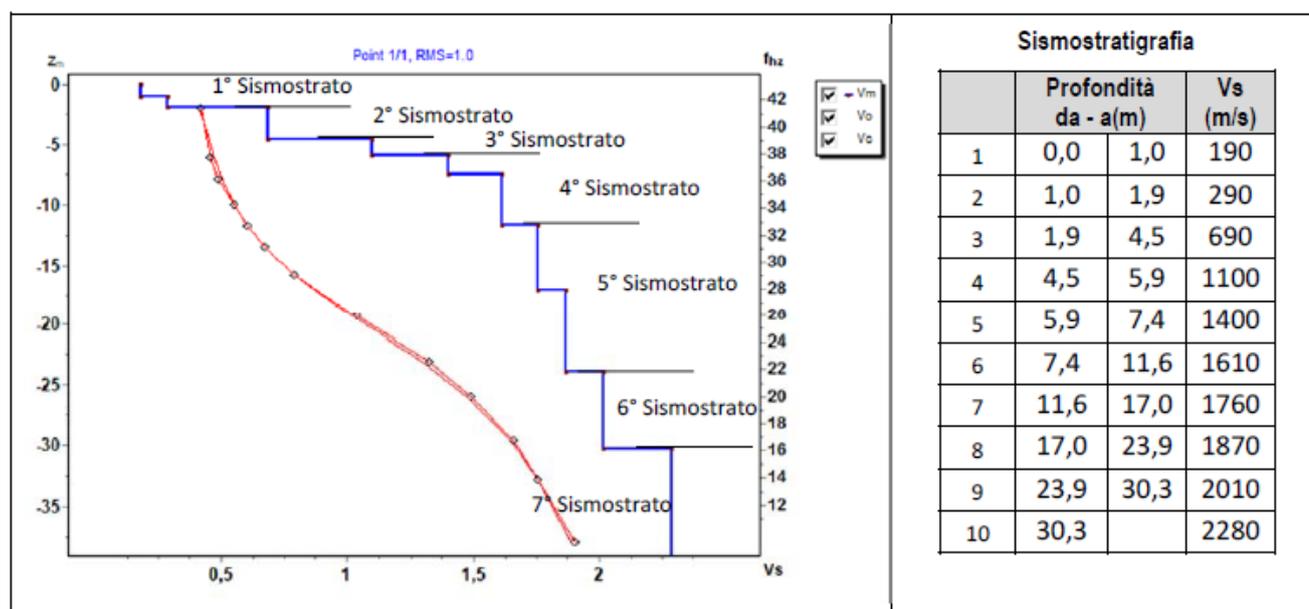
15.5. Risultati delle indagini del sito SMT03

15.5.1. Masw SMT03

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento SMT03, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

| Profondità [m sotto il pc] | Descrizione |
|----------------------------|--|
| 0,0 – 1,9 | 1° sismostrato con Vs tra 190 e 290 m/s, Terre debolmente addensate |
| 1,9 – 4,5 | 2° sismostrato con Vs di 690 m/s, Roccia fratturata |
| 4,5 – 5,9 | 3° sismostrato con Vs di 1100 m/s, Substrato roccioso fratturato |
| 5,9 – 11,6 | 4° sismostrato con Vs tra 1400 e 1610 m/s, Substrato roccioso da fratturato a sano |
| 11,6 – 23,9 | 5° sismostrato con Vs tra 1760 e 1870 m/s, Substrato roccioso sano |
| 23,9 – 30,3 | 6° sismostrato con Vs di 2010 m/s, Substrato roccioso sano |
| >30,3 | 7° sismostrato con Vs > di 2280 m/s, Substrato roccioso sano |

MASW SMT03 - PROFILO Vs



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

h_i spessore dell' i -esimo strato;

$V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **4,5 m** ($V_s > 800$ m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **4,5 m** di profondità dal p.c. è pari a: $V_{s,eq} = 4,5 / 0,012294 = 366$ m/s.

Ciò consente di classificare il terreno come **Categoria B Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti**, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

Nella **tabella seguente** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input Vs, e Vp e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

| Sismostrato | Prof/zona | CT* | Densità γ | Vp | Vs | Coefficiente di Poisson ν | Modulo di Young dinamico Ed | Modulo di Young statico Ed | Modulo di taglio G ₀ | Modulo di comprimibilità o di Bulk - K |
|-------------|-----------|-----------|----------------------|-------|-------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--|
| | | | [Kg/m ³] | [m/s] | [m/s] | | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | 1 | 0-1,9 | terre | 1.600 | 480 | 240 | 245 | 29 | 88 | 245 |
| 2 | 2 | 1,9-4,5 | 10% | 1.900 | 1.380 | 690 | 2.412 | 241 | 902 | 2.412 |
| 3 | 3 | 4,5-5,9 | 15% | 2.100 | 2.200 | 1.100 | 6.777 | 1.016 | 2.540 | 6.777 |
| 4 | 4 | 5,9-11,6 | 20% | 2.200 | 3.010 | 1.505 | 13.288 | 2.658 | 4.982 | 13.288 |
| 5 | 5 | 11,6-23,9 | 25% | 2.300 | 3.630 | 1.815 | 20.202 | 5.051 | 7.581 | 20.202 |
| 6 | 6 | 23,9-30,3 | 30% | 2.400 | 4.020 | 2.010 | 25.861 | 7.758 | 9.699 | 25.861 |
| 7 | 7 | >30,3 | 30% | 2.400 | 4.560 | 2.280 | 33.274 | 9.982 | 12.474 | 33.274 |

Figura 59 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e N_{spt}, i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia

di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

15.6.2. Rifrazione SMT03 – Aerogeneratore AG05

Nella sezione di sismica a rifrazione **SMT03** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

| Stendimento SMT03 | ONDE P | |
|---|-------------------------|-----------------|
| | Profondità da pc (m) | Velocità in m/s |
| Sismostrati | | |
| A: Unità delle terre di copertura (rippabili) | Da 0,0 a 1,0/2,0 | 400-800 |
| B: Unità delle rocce fratturate (rippabili) | Da 1,0/2,0 a 4,0/6,0 | 800-1600 |
| C: Unità delle rocce da fratturate a debolmente fratturate (rippabili con difficoltà) | Da 4,0/6,0 a 6,0/10,0 | 1600-2200 |
| D: Unità delle rocce da debolmente fratturate a sane (non rippabili) | Da 6,0/10,0 a 20,0/21,0 | 2200-4500 |

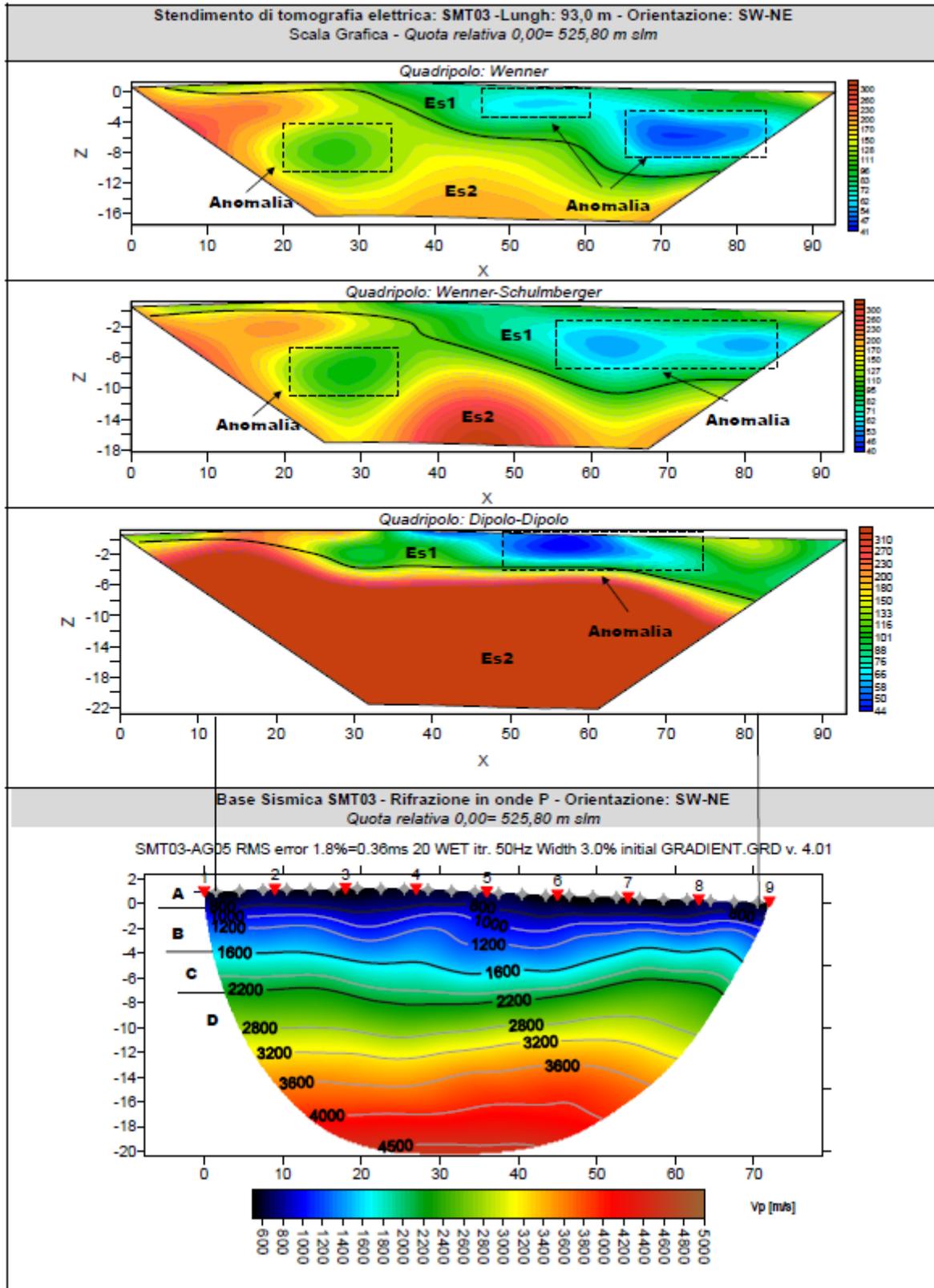
Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 4500 m/s. Il sismostrato A presenta spessori molto ridotti (tra 1,0 e 2,0 metri dal p.c) e un andamento parallelo al piano campagna. Il sismostrato B, caratterizzato da rocce fratturate ancora rippabili, presenta anch'esso un andamento parallelo al piano campagna e leggerissime variazioni di spessore, si rileva fino a profondità comprese tra 4,0 e 6,0 m dal p.c. Il

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 81 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

sismostrato C (limite dei materiali rippabili) segue anch' esso lo stesso andamento dei due precedenti sismostrati con leggere variazioni di spessore, si rileva fino alla profondità di 6,0 e 10,0 m dal piano campagna. Il sismostrato D (materiali non rippabili) si osserva invece fino alla profondità di circa 20,0/21,0 m di profondità dal p.c e rappresenta un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità alte (2200-4500 m/s). Dall'osservazione della sezione sismica si osserva un aumento graduale delle Vp con alcune leggerissime variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 4,0 e 6,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre già a profondità comprese tra 6,0 e 10,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile. Le sezioni di tomografia elettrica **SMT03**, realizzate con le tre differenti geometrie di acquisizione, sono caratterizzate nel complesso da leggere variazioni di resistività da cui si può distinguere la presenza di un primo elettrostrato (ES1) di spessore compreso tra 1,0 e 10,0 metri riconducibile alla coltre di terreni e rocce alterate/fratturate caratterizzati da resistività medio bassa, con valori tra 40 e 100 $\Omega \cdot m$, ben distinguibile con le tutte e 3 le acquisizioni. In tale elettrostrato si osservano alcune anomalie rappresentate dai valori resistività più bassi riconducibili alla presenza di acqua e/o all' argillificazione del materiale in posto. A partire da profondità comprese tra 1,0 e 10,0 m dal piano campagna segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori più alti di resistività (tra 100 e 300 $\Omega \cdot m$) riconducibile alla presenza del substrato litoide più compatto. In tale elettrostrato, nelle geometrie di acquisizione Wenner e Wenner-Schulmberger e in corrispondenza delle progressive 20,0 e 35,0 m, si osserva una anomalia caratterizzata da valori di resistività inferiori dovuta alla probabile presenza di materiale con un grado di alterazione (v.argillificazione) maggiore rispetto alle zone adiacenti.

Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione conferma che a partire dal piano campagna si riscontra la presenza di materiale terrigeno e rocce alterate/fratturate fino a profondità comprese tra 1,0 e 10,0 metri, per poi passare a materiali litoidi più sani e compatti caratterizzati da velocità alte delle Vp e valori di resistività maggiori.



La prospezione geofisica attraverso l'impiego delle tecniche MASW, sismica a rifrazione in onde P e tomografia elettrica ha permesso di ricostruire con un buon grado di precisione l'assetto lito-stratigrafico delle aree in esame e dedurre le caratteristiche sismiche.

Per quanto riguarda le MASW, lungo gli stendimenti si evince la presenza di sismostrati con velocità V_s crescente con la profondità sino ad incontrare il bed rock con andamenti e spessori indicati nei precedenti paragrafi. La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per i differenti siti di indagine, che si ricorda sarà anche funzione del piano di posa delle fondazioni è riportata nel seguente schema riassuntivo:

| Sigla Stendimento | Profondità substrato [m] | V_{seq} [m/s] | Categoria sottosuolo (NTC2018) |
|-------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------|
| SMT01-AG02 | 3,1 | 709 | B |
| SMT02-AG06 | 6,3 | 520 | B |
| SMT03-AG05 | 4,5 | 366 | B |

I dati derivati dalla MASW messi in correlazione con le bibliografiche indicate nei precedenti paragrafi hanno permesso di determinare i parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni e per correlazione ottenere una preliminare definizione dei parametri di resistenza al taglio. L'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione e di tomografia elettrica ha permesso di ricostruire l'assetto sismostratigrafico dei terreni. Nei precedenti paragrafi si illustrano i differenti sismostrati individuati dai quali è possibile distinguere i terreni delle coperture dal substrato roccioso. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 5,0 e 8,0 m dal p.c. per SMT01, tra 4,0 e 9,5 m dal p.c. per SMT02 e tra 6,0 e 10,0 m dal p.c. per SMT03, i terreni risultano non rippabili. L'impiego congiunto della tecnica della tomografia elettrica lungo il medesimo allineamento della sismica a rifrazione ha permesso di identificare lungo i vari stendimenti i diversi elettrostrati riportati e descritti nei precedenti paragrafi, caratterizzati in ogni caso da range abbastanza ridotti e valori di resistività generalmente medio bassi. Nelle varie sezioni si sono messe in evidenza delle anomalie caratterizzate da valori di resistività inferiori rispetto al resto della sezione, che nel contesto in esame possono essere interpretate come dei settori caratterizzati dalla presenza di materiale maggiormente alterato (argillificazione)/fratturato rispetto alla roccia adiacente e/o alla presenza d'acqua. Per quanto sopra considerato il contesto geologico in esame in fase di progettazione definitiva/esecutiva si consiglia di eseguire delle indagini geognostiche e geofisiche di maggiore dettaglio (in es. sondaggi a carotaggio e geofisica eseguita con stendimenti ubicati a raggiera rispetto al centro della torre eolica).

Tavola 1 : INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA DI INDAGINE

Progetto: Parco eolico Thiesi (SS)

Scala 1:20,000

Legenda

○ AREA DI INDAGINE

**Figura 60 - Ubicazione delle indagini geofisiche**

Tavola 2 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE SMT01-AEROGENERATORE AG02

Progetto: Parco eolico Thiesi (SS)

Scala 1:500

Legenda

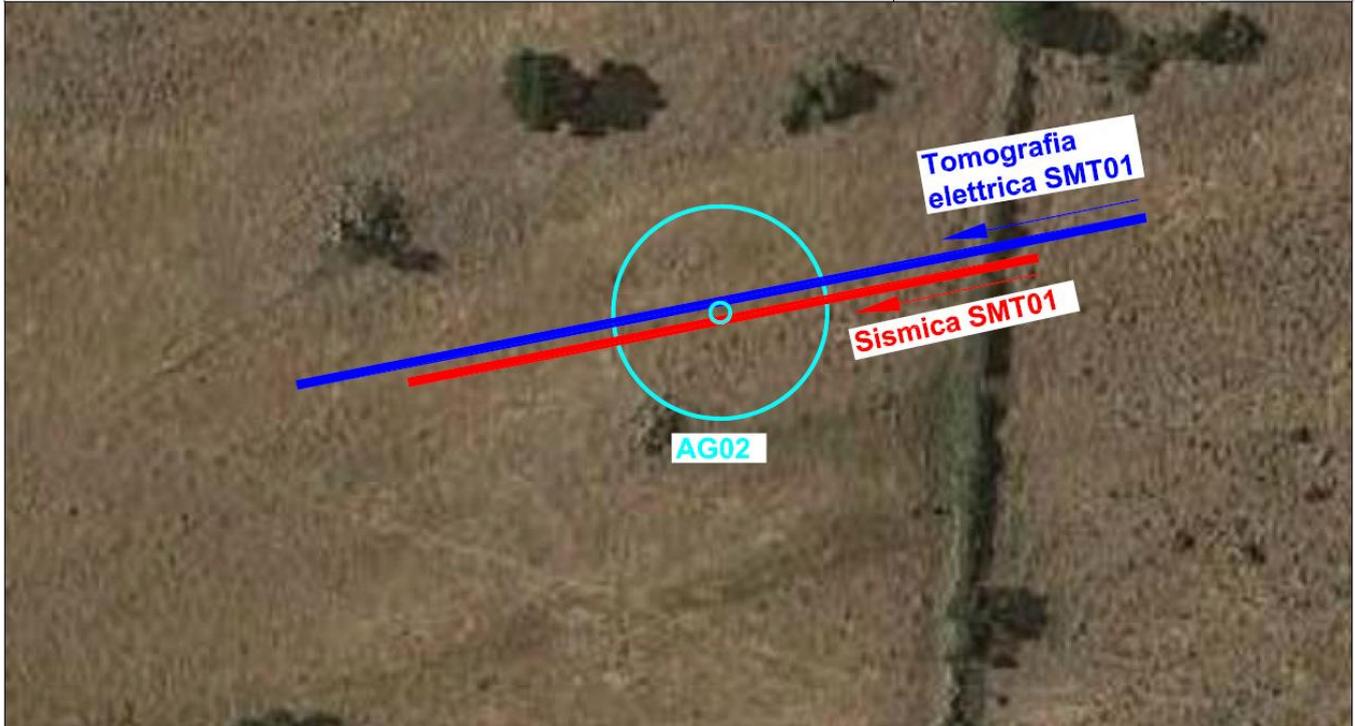
Stendimento Sismico SMT01 - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento Geoelettrico SMT01 - Lunghezza = 93,0 m

→ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

→ Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

○ Aerogeneratore



**Tavola 3 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI
GEOFISICHE SMT02-AEROGENERATORE AG06**

Progetto; Parco eolico Thiesi (SS)

Scala 1:500

Legenda

Stendimento Sismico SMT02 - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento Geoelettrico SMT02 - Lunghezza = 93,0 m

—> Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo
geofono—> Direzione stendimento geoelettrico dal primo
all'ultimo elettrodo

○ Aerogeneratore



Tavola 4 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE SMT03-AEROGENERATORE AG05

Progetto: Parco eolico Thiesi (SS)

Scala 1:500

Legenda

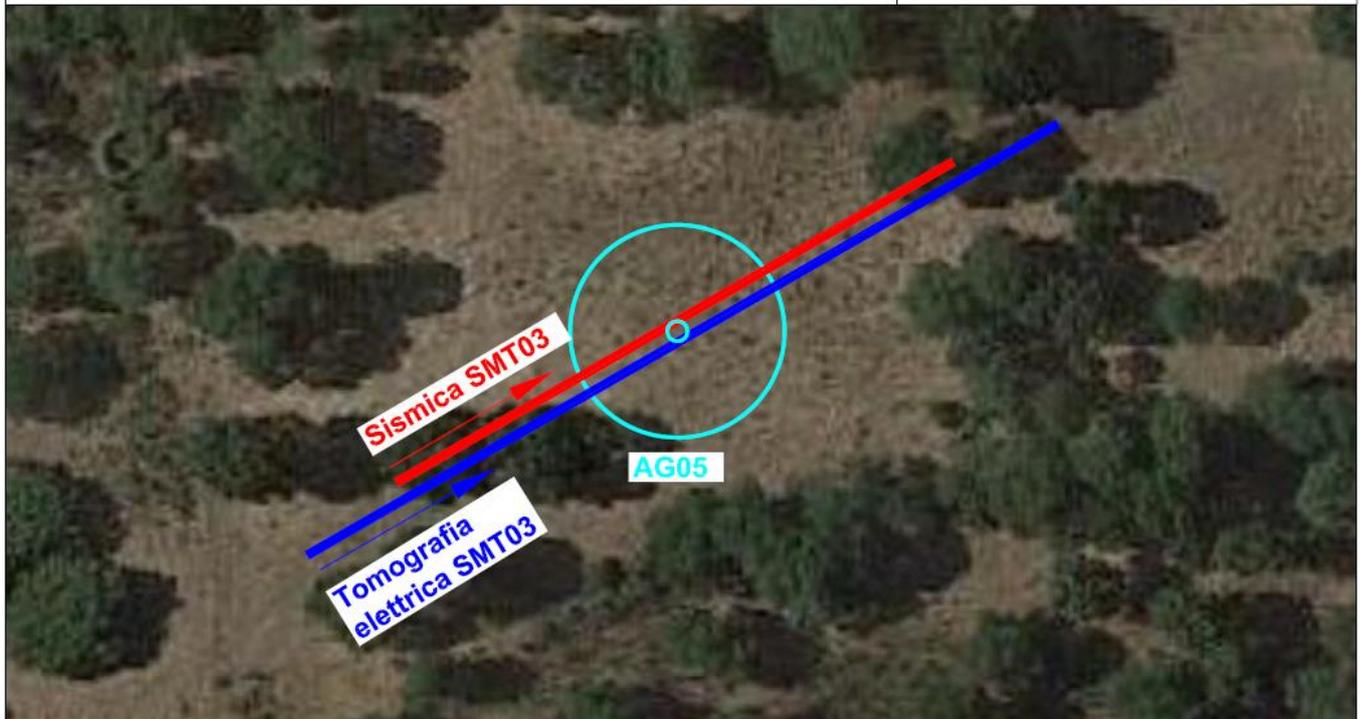
Stendimento Sismico SMT03 - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento Geoelettrico SMT03 - Lunghezza = 93,0 m

— Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

— Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

○ Aerogeneratore

**Stendimento SMT02-AG06 stazione tomografia elettrica e sismica**

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 88 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

16. Modellazione geologica

16.1. Caratterizzazione geostrutturale degli ammassi rocciosi

Per la definizione dei parametri geotecnici del substrato roccioso al quale la fondazione delle turbine si appoggia, è stato adoperato il criterio di caratterizzazione dell'ammasso roccioso di Hoek-Brown generalizzato (1995), supportato dai dati geostrutturali rilevati in sito in pareti esposte, laddove disponibili, dai dati derivanti dai sondaggi geognostici.

Sulla base di tale classificazione, il cui criterio di rottura è definito dalla relazione seguente:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} (mb (\sigma'_3 / \sigma_{ci}) + s)^a$$

dove:

σ'_1 e σ'_3 = sforzi efficaci principali rispettivamente massimo e minimo a rottura;

mb = costante d'ammasso

s ed a = costanti d'ammasso

σ_{ci} = resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta

è stato possibile risalire ai parametri di coesione e angolo di attrito interno secondo Mohr- Coulomb.

Tale metodologia si basa su caratteristiche proprie dell'ammasso, valutabili tramite osservazioni in sito o con l'ausilio di tabelle sviluppate sulla base di una vasta raccolta di dati pubblicati in letteratura, attraverso cui è possibile stimare con una certa precisione i parametri di coesione e angolo di attrito interno necessari alle verifiche di stabilità, valutando i seguenti parametri:

1. Resistenza a compressione monoassiale (Intact Uniaxial Compressive Strength – IUCS) stimata su base empirica (Fig.60) e su valori di Point Load.
2. Stima dell'indice GSI (Geological Strength Index) in base alle caratteristiche geologiche dell'ammasso: tale indice, introdotto da Hoek, Kaiser e Bawden (1995), può esser definito sulla base delle caratteristiche dell'ammasso (Fig. 61) o sulla base di un controllo diretto con l'indice RMR della classificazione di Bieniawski.
3. Determinazione della costante m_i (Funzione del tipo di roccia): i valori delle costanti caratteristiche della roccia (σ_{ci} e m_i) vengono generalmente definiti sulla base di apposite prove di laboratorio, ma in assenza delle suddette, è possibile fare riferimento alla tabella di Fig.62, che riassume i valori della costante m_i per diversi tipi di roccia.

| CLASSE [*] | DESCRIZIONE | RESISTENZA A COMPRESIONE MONOASSIALE (MPa) | INDICE DI RESISTENZA (POINT LOAD) (MPa) | VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA IN SITO | ESEMPI |
|------------|---------------------------------|--|---|---|---|
| R6 | Resistenza estremamente elevata | > 250 | > 10 | Un campione può essere scheggiato solamente con un martello geologico | Basalto intatto, silice, selce, diabase, gneiss granito, quarzite |
| R5 | Resistenza molto elevata | 100-250 | 4-10 | Un campione richiede molti colpi di un martello geologico per essere fratturato | Anfibolite, arenaria basalto, gabbro, gneiss, granodiorite calcare, marna riolite, tufi |
| R4 | Resistenza elevata | 50-100 | 2-4 | Un campione richiede più di un martello geologico per essere fratturato | Calcare, marna, fillite, arenaria, scisto, argillite |
| R3 | Resistenza media | 25-50 | 1-2 | Non può essere raschiato o spellato con un coltellino, un campione può essere fratturato con un solo colpo mediante un martello geologico | Argillite, carbone, calcestruzzo, scisto, siltite |
| R2 | Resistenza bassa | 5-25 | [**] | Con difficoltà può essere spellato con un coltellino, una intaccatura superficiale può essere procurata con un colpo inferto mediante la punta di un martello geologico | Calcare bianco, salgemma |
| R1 | Resistenza molto bassa | 1-5 | [**] | Si frantuma per effetto di alcuni colpi con la punta di un martello geologico, può essere spellato mediante un coltellino | Rocce estremamente alterate o alterate |
| R0 | Resistenza estremamente bassa | 0.25-1 | [**] | Intagliato con l'unghia di un pollice | Miloniti, cataclasi |

[*] In accordo a Brown E.T. Rock characterization, testing and monitoring - ISRM suggested methods, pp. 171-183. Oxford, Pergamon (1981).
 [**] La prova meccanica point load su rocce con resistenza a compressione monoassiale inferiore a 25 MPa fornisce risultati poco attendibili.

Figura 61 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia

| DESCRIZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO PER LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI RESISTENZA | CONDIZIONI SUPERFICIALI | MOLTO BUONE | BUONE | COPRITE | SCALDATE | SILICE | SILICE | SILICE | SILICE | SILICE | SILICE |
|--|-------------------------|-------------|-------|---------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| STRUTTURA | | | | | | | | | | | |
| | | BVG | B/G | B/F | B/P | B/VP | | | | | |
| | | VBVG | VB/G | VB/F | VB/P | VB/VP | | | | | |
| | | BDVG | BD/G | BD/F | BD/P | BD/VP | | | | | |
| | | DVG | D/G | D/F | D/P | D/VP | | | | | |

| INDICE GEOLOGICO DI RESISTENZA GSI (Geological Strength Index) | CONDIZIONI SUPERFICIALI | MOLTO BUONE | BUONE | COPRITE | SCALDATE | SILICE | SILICE | SILICE | SILICE | SILICE | SILICE |
|--|-------------------------|-------------|-------|---------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| STRUTTURA | | | | | | | | | | | |
| | | 80 | 70 | | | | | | | | |
| | | 60 | 50 | | | | | | | | |
| | | 40 | 30 | | | | | | | | |
| | | 20 | 10 | | | | | | | | |

Figura 62 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso

Sulla base di queste caratteristiche si ottengono i seguenti valori di mb , s , a :

$$mb = mi [(GSI-100)/28]$$

$$s = e [(GSI-100)/(9-3D)]$$

$$a = 0,5 \text{ (per GSI >25)}$$

tramite i quali si stimano coesione e angolo di attrito interno secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb:

$$\sigma'1 = (2c' \cos \phi' / 1 - \sin \phi') + (1 + \sin \phi' / 1 - \sin \phi') \sigma'3$$

I valori coesione e di angolo di attrito interno ottenuti attraverso l'applicazione di tale classificazione sono in generale rispondenti alla tipologia litologica interessata.

È utile sottolineare che esistono delle correlazioni dirette fra i valori di GSI e il valore RMR del sistema di classificazione di Bieniawski

| TIPO DI ROCCIA | CLASSE | GRUPPO | TESSITURA | | | |
|----------------|------------------------|--------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------|--------------------|
| | | | GROSSOLANA | MEDIA | FINE | MOLTO FINE |
| SEDIMENTARIE | Clastiche | | Conglomerato (22) | Arenaria 19 Grovacche (18) | Siltite 9 | Argillite 4 |
| | Non clastiche | Organogene | | Calcare bianco (7) Carbone (8-21) | | |
| | | Carbonatiche | Breccia(20) | Calcare Sparitico (10) | Calcare Micritico 8 | |
| | | Chimiche | | Gesso 16 | Anidride 13 | |
| METAMORFICHE | Non foliate | | Marmo 9 | Hornfels (19) | Quarzite 24 | |
| | Leggermente foliate | | Migmatite (30) | Anfibolite 25-31 | Miloniti (6) | |
| | Foliate* | | Gneiss 33 | Scisti 4-8 | Filliti (10) | Scisti argillosi 9 |
| IGNEE | Chiare | | Granito 33 | | Riolite (16) | Ossidiana (19) |
| | Scure | | Granodiorite (30) | | Dacite (17) | |
| | | | Diorite (28) | | Andesite 19 | |
| | | | Gabbro 27 | Dolerite (19) | Basalto (17) | |
| | | Norite 22 | | | | |
| | Effusive piroclastiche | | Agglomerato (20) | Breccia (18) | Tufo (15) | |

Questi valori sono validi per campioni di roccia intatta portati a rottura applicando il carico normale alla stratificazione o scistosità. Il valore di m, sarà sensibilmente inferiore se la rottura avviene lungo un piano di debolezza

Figura 63 Valori della costante mi per diversi tipi di roccia

| <p>Criterio di rottura empirico</p> $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_{u(r)}\sigma_3 + s\sigma_{u(r)}^2}$ <p>σ_1 = tensione efficace principale massima σ_3 = tensione efficace principale minima $\sigma_{u(r)}$ = resistenza a compressione monoassiale m ed s: costanti empiriche</p> | COSTANTI DEL MATERIALE: m, s | <p>ROCCIE CARBONATICHE CON CLIVAGGIO CRISTALLINO BEN SVILUPPATO</p> <p>Dolomite, calcare e marmo.</p> | <p>ROCCIE ARGILLOSE LITIFICATE</p> <p>Argillite, siltite, scisti argillosi con clivaggio ben marcato.</p> | <p>ROCCIE ARENACEE CON ELEVATA CRISTALLIZZAZIONE E LIMITATO SVILUPPO DI CLIVAGGIO PER CRISTALLIZZAZIONE</p> <p>Arenarie e quarzite</p> | <p>ROCCIE CRISTALLINE IGNEE E GRANA FINE</p> <p>Andesite, dolerite, diabase e riolite</p> | <p>ROCCIE IGNEE A GRANA GROSSOLANA E ROCCIE CRISTALLINE METAMORFICHE</p> <p>Amfibolite, gabbro, gneiss, novite, quarzo-clorite</p> |
|---|------------------------------|---|---|--|---|--|
| <p>CAMPIONI DI ROCCIA INTATTA</p> <p>Campioni di laboratorio senza discontinuità (matrice rocciosa)</p> <p>Indice CSIR: RMR = 100</p> <p>Indice NGI: Q = 500</p> | <p>m</p> <p>s</p> | <p>7.00</p> <p>1.00</p> | <p>10.00</p> <p>1.00</p> | <p>15.00</p> <p>1.00</p> | <p>17.00</p> <p>1.00</p> | <p>25.00</p> <p>1.00</p> |
| <p>AMMASSO ROCCIOSO DI OTTIMA QUALITÀ</p> <p>Ammasso roccioso indisturbato con giunti non alterati di spaziatura compresa fra 1 e 3 m</p> <p>Indice CSIR: RMR = 65</p> <p>Indice NGI: Q = 100</p> | <p>m</p> <p>s</p> | <p>2.40</p> <p>0.082</p> | <p>3.43</p> <p>0.062</p> | <p>5.14</p> <p>0.062</p> | <p>5.82</p> <p>0.062</p> | <p>8.56</p> <p>0.062</p> |
| <p>AMMASSO ROCCIOSO DI BUONA QUALITÀ</p> <p>Roccia sana o leggermente alterata, leggermente disturbato con giunti di spaziatura compresa fra 1 e 3 m.</p> <p>Indice CSIR: RMR = 65</p> <p>Indice NGI: Q = 10</p> | <p>m</p> <p>s</p> | <p>0.575</p> <p>0.00293</p> | <p>0.821</p> <p>0.00293</p> | <p>1.231</p> <p>0.00293</p> | <p>1.395</p> <p>0.00293</p> | <p>2.052</p> <p>0.00293</p> |
| <p>AMMASSO ROCCIOSO DI DISCRETA QUALITÀ</p> <p>Numerose famiglie di giunti moderatamente alterati, con spaziature comprese fra 0.3 e 1 m.</p> <p>Indice CSIR: RMR = 44</p> <p>Indice NGI: Q = 1</p> | <p>m</p> <p>s</p> | <p>0.128</p> <p>0.00009</p> | <p>0.183</p> <p>0.00009</p> | <p>0.275</p> <p>0.00009</p> | <p>0.311</p> <p>0.00009</p> | <p>0.458</p> <p>0.00009</p> |
| <p>AMMASSO ROCCIOSO DI QUALITÀ SCADENTE</p> <p>Numerosi giunti alterati con spaziatura compresa fra 30 e 500 mm, alcuni con riempimento. Detrito di roccia pulita compattata.</p> <p>Indice CSIR: RMR = 23</p> <p>Indice NGI: Q = 0.1</p> | <p>m</p> <p>s</p> | <p>0.029</p> <p>0.000003</p> | <p>0.041</p> <p>0.000003</p> | <p>0.061</p> <p>0.000003</p> | <p>0.069</p> <p>0.000003</p> | <p>0.102</p> <p>0.000003</p> |
| <p>AMMASSO ROCCIOSO DI QUALITÀ MOLTO SCADENTE</p> <p>Numerosi giunti molto alterati con spaziatura inferiore a 50 mm e con riempimento. Detrito di roccia con materiale fine.</p> <p>Indice CSIR: RMR = 3</p> <p>Indice NGI: Q = 0.01</p> | <p>m</p> <p>s</p> | <p>0.007</p> <p>0.0000001</p> | <p>0.010</p> <p>0.0000001</p> | <p>0.015</p> <p>0.0000001</p> | <p>0.017</p> <p>0.0000001</p> | <p>0.025</p> <p>0.0000001</p> |

CSIR (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) Organizzazione Scientifica ed Industriale di Ricerca (Bieniawski 1974)
NGI Norway Geotechnical Institute (Barton 1974)

Figura 64 Correlazione fra valori di m, s, indice RMR, ed il tipo di roccia.

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 92 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

L'analisi delle caratteristiche geomeccaniche in sito degli ammassi rocciosi interessati dal progetto e l'applicazione del metodo di Hoek-Brown per la definizione dei parametri geotecnici del substrato roccioso ha portato alla classificazione di nr. **1 tipologia** tra le litologie che caratterizzano le formazioni presenti, appartenente alla **Unità del Monte Frusciu**.

Per il calcolo degli indici e della relativa trasformazione in parametri di coesione e angolo di attrito interno secondo Mohr- Coulomb è stato utilizzato il software RocData vers.3.0 della Rocscience Inc.

Di seguito si riportano gli schemi di analisi degli ammassi rocciosi e i relativi diagrammi di Mohr –Coulomb, in base alle osservazioni su campo e unitamente ai dati ottenuti dalle prospezioni geofisiche, si è ipotizzata una variazione del grado di fratturazione del substrato al variare della profondità divisa in **5 strati**, che vanno dalle “terre debolmente addensate” al “substrato roccioso sano”.

Nello specifico: nel livello S1, che come da descrizione sulla relazione geofisica viene indicato come “terre debolmente addensate”, è stato considerato un valore estremamente basso di sgci (valore indicativo della resistenza a compressione uniassiale) poiché non si tratta di un materiale litoide.

Nei livelli S2 e S3 l'sgci è stato riportato come da osservazioni e classifica speditiva di campo in base al fatto che “il campione di roccia si rompe con pochi colpi di martello” (rif. Fig.49).

Nei livelli S4 e S5 il valore sgci cresce poiché si passa gradualmente dalla roccia fratturata al substrato roccioso sano e inalterato. Il secondo valore che varia al variare della profondità è il GSI, tale valore dà indicazioni sullo stato di fratturazione della roccia, in questo caso unicamente nel livello S1 non si è tenuto conto di questo valore poiché trattasi di terre sciolte, mentre dal livello S2 al livello S5 si passa da “disintegrated” a “intact or massive”(rif Fig.50). *Si tratta di valori stimati in base a indagini indirette e a osservazioni su campo, pertanto da confermare puntualmente in fase di progettazione esecutiva.*

Unità del Monte Frusciu

Standard ISRM = R4 Un campione richiede pochi colpi di martello per essere fratturato

Instabilità= scivolamenti planari e a cuneo

Ammasso roccioso= da mediamente fratturato a molto fratturato

Struttura= stratificata

Alterazione= mediamente alterata

Spaziatura totale delle discontinuità (s)=0,1 m

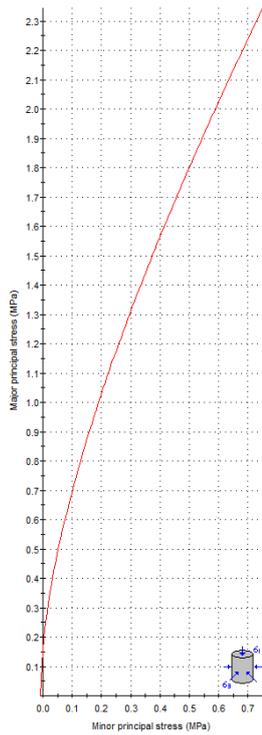
Lunghezza media del giunto = >3 m

Pareti – mediamente alterate

Riempimento – sciolto

Roccia – asciutta

Analysis of Rock/Soil Strength using RocData



Hoek-Brown Classification
 intact uniaxial compressive strength = 3 MPa
 GSI = 49 $m_i = 7$ Disturbance factor = 0

Hoek-Brown Criterion
 $m_b = 1.133$ $s = 0.0035$ $a = 0.506$

Mohr-Coulomb Fit
 cohesion = 0.132 MPa friction angle = 27.25 deg

Rock Mass Parameters
 tensile strength = -0.009 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.170 MPa
 global strength = 0.433 MPa
 modulus of deformation = 1635.16 MPa

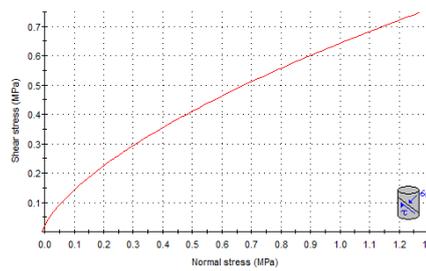
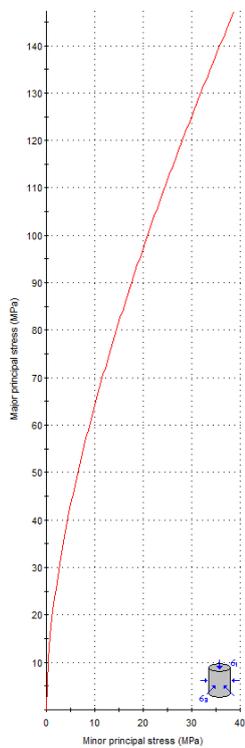


Figura 65 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S1

Analysis of Rock/Soil Strength using RocData



Hoek-Brown Classification
 intact uniaxial compressive strength = 50 MPa
 GSI = 40 $m_i = 50$ Disturbance factor = 0

Hoek-Brown Criterion
 $m_b = 5.066$ $s = 0.0013$ $a = 0.511$

Mohr-Coulomb Fit
 cohesion = 7.738 MPa friction angle = 32.06 deg

Rock Mass Parameters
 tensile strength = -0.011 MPa
 uniaxial compressive strength = 1.654 MPa
 global strength = 15.707 MPa
 modulus of deformation = 3976.35 MPa

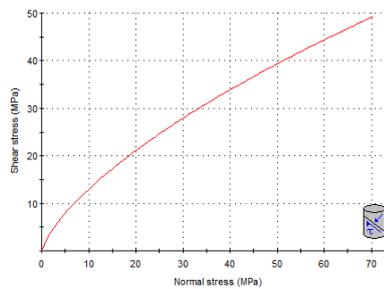


Figura 66 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S2

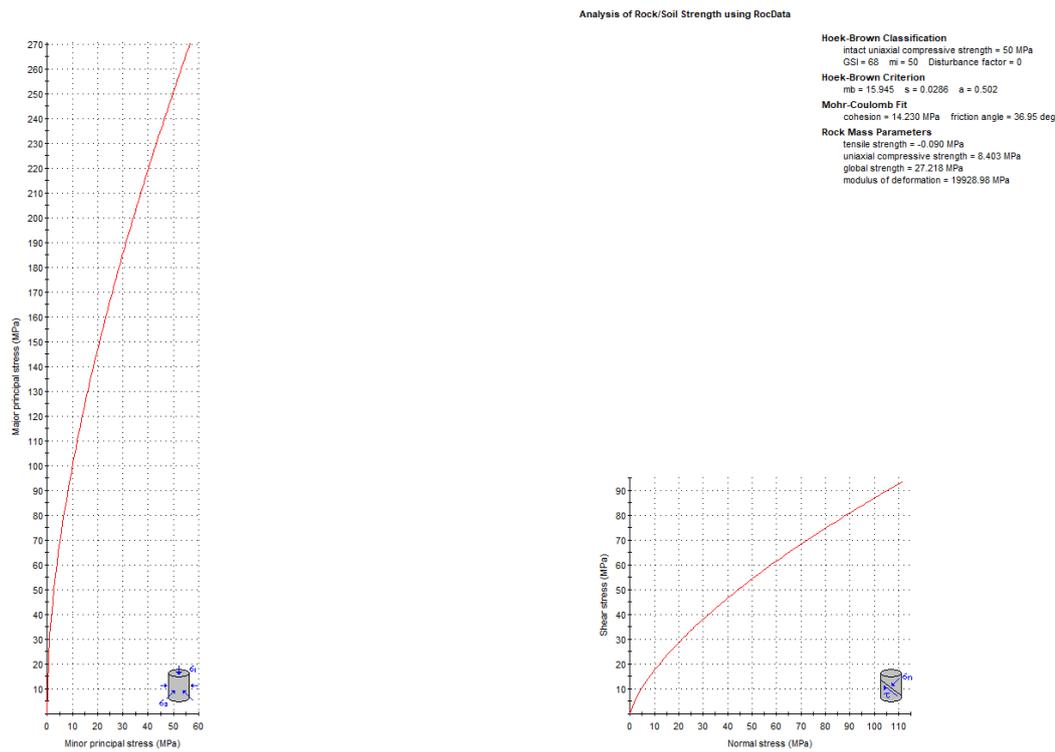


Figura 67 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S3

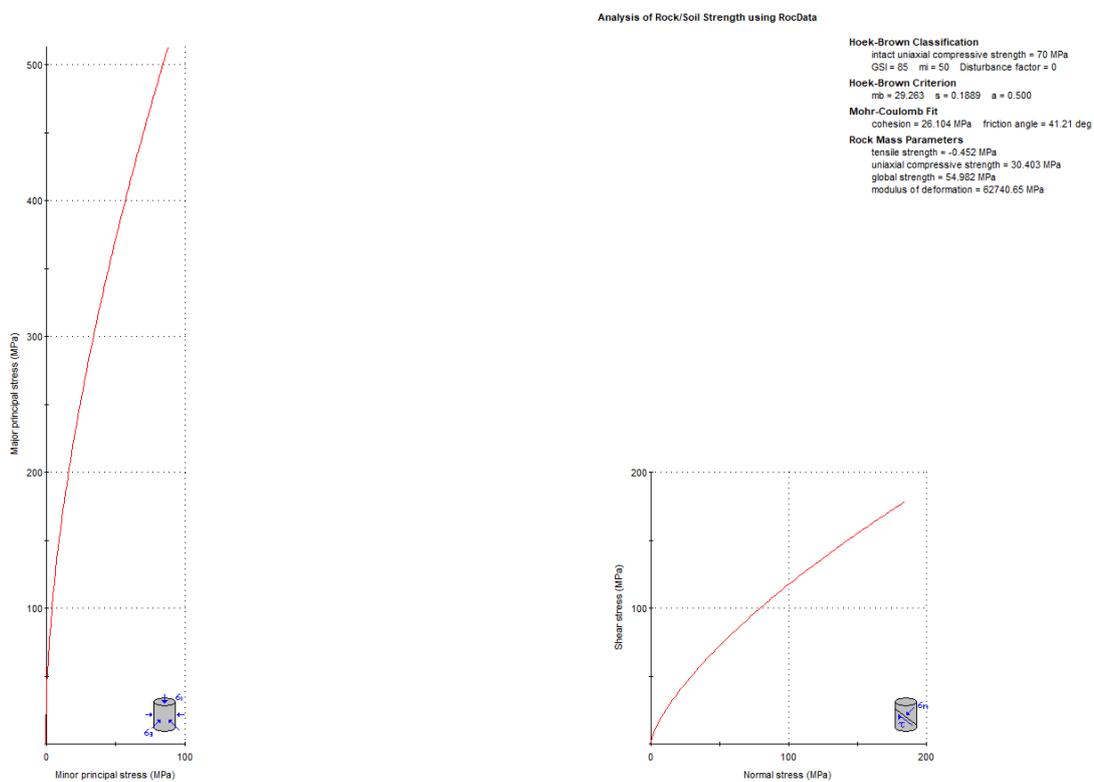


Figura 68 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S4

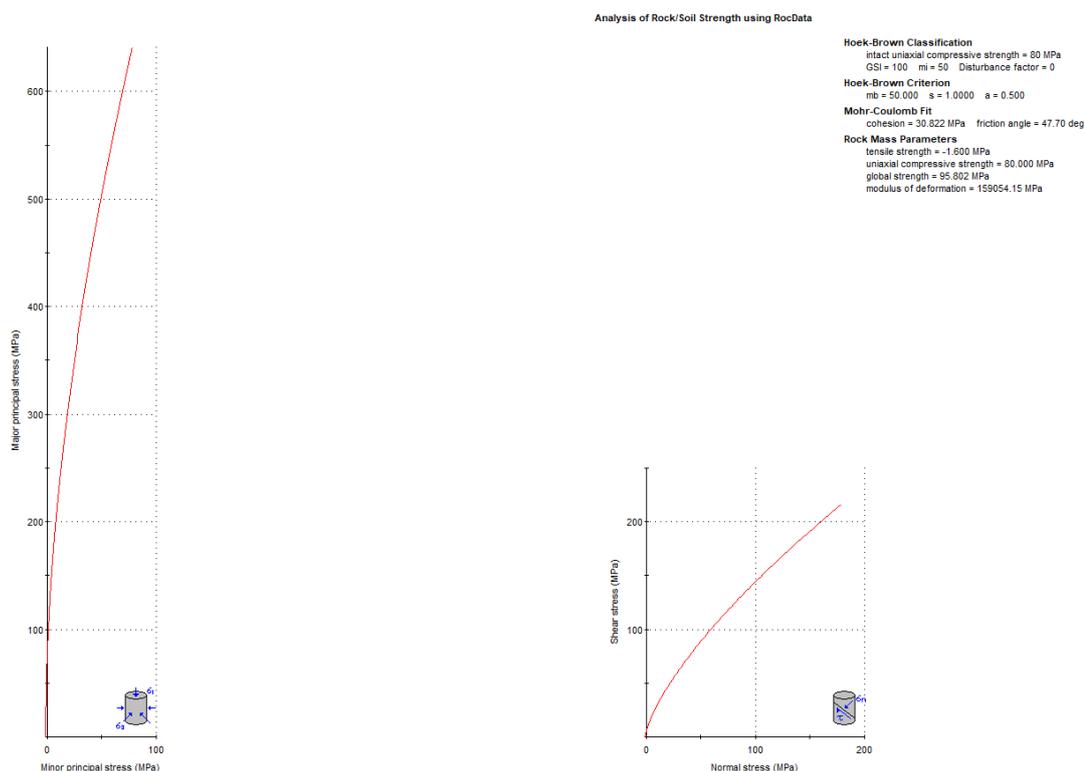


Figura 69 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S5

16.2. Viabilità di impianto e sottostazione

La viabilità di impianto è stata scelta utilizzando dei tracciati preesistenti che verranno adeguatamente ridefiniti nelle sezioni nella misura utile e funzionale al servizio destinato con particolare riferimento alla fase di realizzazione del parco ove avverrà la maggior se non totale movimentazione di carichi e mezzi. La stessa viabilità sarà mantenuta in fase di esercizio.

La viabilità dovrà sopportare un peso per asse pari a 20,5 tonnellate/metro quadro, una pressione massima di circa 2 kg/cm. La carreggiata dovrà essere pari a 5 metri. La pendenza longitudinale massima della viabilità per strade con fondo sterrato o ghiaioso deve essere in condizioni ordinarie del 10% circa, la pendenza potrà essere del 12 % (16% pendenza massima in alcuni tratti) sia in rettilineo che in curva. La pendenza longitudinale minima sarà superiore o al più uguale al 0.5% per permette una rapida evacuazione delle acque superficiali dal manto stradale, che sarà in ogni caso permeabile. Si esclude l'uso di bitume.

Sostanzialmente tutta la viabilità si snoda lungo substrato roccioso con presenza in taluni casi di una copertura superficiale di terreno vegetale e /o roccia degradata con spessori variabili **da 0,00m a 4,00m**.

Per quanto riguarda a scavabilità del substrato roccioso esso nelle varie facies presenti e nella parte superficiale risulta quasi sempre da fratturato a molto fatturato per cui facilmente scavabile con ripper e martellone.

La possibile presenza di alcune saccature a forte componente argillosa suggerisce di prevedere opere di smaltimento delle acque superficiale adeguatamente dimensionate.

Il tracciato del cavidotto si snoda lungo aree pianeggianti e tracciati stradali esistenti. Il cavidotto in progetto andrà a interessare le coperture sedimentarie e vulcaniche del Miocene costituito dalle **Unità di Su Suerzu**, di **Uri**, di **Nuraghe Vittore** e dai **depositi quaternari**.

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 96 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

17. Modello geologico di sito

Sulla base di quanto emerso dai rilievi e dalle indagini in sito, nell'approccio progettuale, stante il contesto geologico si evidenziano le seguenti criticità a cui sarà necessario prestare la opportuna attenzione nella progettazione esecutiva dell'opera e nelle varie fasi di realizzazione.

L'analisi di tali fattori è funzionale alla progettazione e ha lo scopo di valutare la risposta del terreno ai nuovi carichi ed individuare azioni correttive o accorgimenti tali da limitarne gli effetti. Nello specifico:

1. Azioni sulle pareti e stabilità dei fronti. Lo scavo stesso, in quanto genera depressione, può innescare locali smottamenti in corrispondenza degli orizzonti meno competenti a causa di fenomeni di detensionamento determinati dall'asportazione del materiale durante l'escavazione, sia in relazione ai livelli meno competenti sia alle direzioni del sistema di fratturazione che può generare componenti a franapoggio. La profonda deformazione che le metamorfiti hanno subito genera variazioni di giacitura anche nell'ordine del metro pertanto si ritiene importante in fase di realizzazione degli scavi di fondazione eseguire un dettagliato rilievo geostrutturale finalizzato all'esclusione di ogni possibile rischio di crollo e/o slittamento di porzioni di parete.
2. Circolazione idrica sotterranea secondaria o indotta e/o stagnazione di acque di pioggia – pur se non è stata rilevata in fase di indagine, vanno considerati gli effetti dell'eventuale presenza d'acqua alla quota di imposta delle fondazioni in relazione ad una possibile circolazione idrica indotta dai fenomeni di detensionamento dovuti agli scavi, con particolare riferimento alla stagionalità degli apporti idrici e del relativo flusso negli ambiti più superficiali. In tal caso, in fase esecutiva, sarà opportuno provvedere a mantenere lo scavo asciutto mediante l'installazione di pompe adeguatamente dimensionate per la portata da emungere.

L'analisi ha permesso di fatto di definire il modello geologico del sito ed in particolare, in relazione alle diverse condizioni geologiche e geostrutturali rilevate, è stato individuato **nr.1 modello geologico rappresentativo** descritto di seguito:

Modello Geologico 01

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati degli stendimenti geofisici SMT01, SMT02 e SMT03 e i dati dei rilievi geomeccanici "Scanline-1" e "Scanline-2".

A partire dal piano campagna dopo un primo spessore di circa 1,6m in terre debolmente addensate si incontra un livello superficiale di roccia fratturata dallo spessore di circa 2,5m, il sottostante substrato roccioso fratturato prosegue fino ad una profondità di circa 2,5 m arrivando a profondità che possono variare dai 6m ai 9m da piano campagna. Da circa 6m-9m da piano campagna fino a circa 17m il substrato roccioso passa da fratturato a sano.

Dall'analisi dell'ammasso in situ, la roccia si presenta stratificata, e, pur mediamente resistente, è debolmente affetta da alterazione fisica. La spaziatura massima tra le fratture che pervadono l'ammasso roccioso è di 0,3 m, la minima è 0,1m. Sono state rilevate diverse famiglie di giunti, ma la principale è sicuramente quella influenzata dalle direzioni di flusso durante la messa in posto.

L'impiego congiunto della tecnica della tomografia elettrica lungo il medesimo allineamento della sismica a rifrazione ha permesso di identificare lungo i vari stendimenti i diversi elettrostrati riportati e descritti nei precedenti paragrafi, caratterizzati in ogni caso da range abbastanza ridotti e valori di resistività generalmente medio bassi. Nelle varie sezioni si sono messe in evidenza delle anomalie caratterizzate da valori di resistività inferiori rispetto al resto della sezione, che nel contesto in esame possono essere interpretate come dei settori caratterizzati dalla presenza di materiale maggiormente alterato (argillificazione)/fratturato rispetto alla roccia adiacente e/o alla presenza d'acqua. Per quanto sopra considerato il contesto geologico in esame in fase di progettazione definitiva/esecutiva si consiglia di eseguire delle indagini geognostiche e geofisiche di maggiore

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 97 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

dettaglio (in es. sondaggi a carotaggio e geofisica eseguita con stendimenti ubicati a raggiera rispetto al centro della torre eolica).

00.00m - 1.60m Terre debolmente addensate
01.60m - 4.10m Roccia fratturata
04.10m – 7.50m Substrato roccioso fratturato
7.50m – 17.00 Substrato roccioso da fratturato a sano
17.00m – in poi Substrato roccioso sano

| Thiesi - MODELLO GEOLOGICO 01 | | | | | | |
|-------------------------------|---------|--------------------------------|------------------------|------------------------------------|---|------------------------------|
| Dati Parametri Resistenza | | | | | | |
| Tipo di Terreno | | S1- Terre debolmente addensate | S2 – Roccia fratturata | S3 – Substrato roccioso fratturato | S4- Substrato roccioso da fratturato a sano | S5 – Substrato roccioso sano |
| Descrizione | | | | | | |
| Peso di volume | [kg/mc] | 1650 | 1850 | 2000 | 2200 | 2300 |
| Peso di volume saturo | [kg/mc] | 1750 | 1950 | 2100 | 2300 | 2400 |
| Angolo di attrito interno | [°] | 27,25 | 32,06 | 36,95 | 41,21 | 47,70 |
| Coesione | [Mpa] | 0,132 | 7,738 | 14,230 | 26,104 | 30,822 |
| Dati Parametri Deformabilità | | | | | | |
| Modulo elastico | [Mpa] | 750 | 2450 | 5400 | 12000 | 22000 |
| Coefficiente di Poisson | [] | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 |
| Modulo di taglio (G) | [Mpa] | 200 | 700 | 2000 | 4500 | 9500 |
| Velocità onde di taglio Vs | [m/sec] | 500 | 700 | 900 | 1400 | 1900 |

| | | | | |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|
| BENTU Energy Srl | Geol. Cosima Atzori | N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-18 | Rev 0 | Pagina 98 di 98 |
|------------------|---------------------|------------------------------------|-------|--------------------|

18. Conclusioni: criticità geologiche e suggerimenti operativi

Lo studio condotto finalizzato ad individuare le caratteristiche geologiche, geomorfologiche idrogeologiche e geostrutturali dell'area di interesse alle opere di progetto ha permesso, attraverso il rilievo diretto in sito, le indagini geognostiche e l'interpretazione sinergica tra le informazioni derivate, di definire **nr. 1 modello geologico ai sensi delle NTC 2018 rappresentativo delle diverse condizioni del sito, con particolare riferimento alle posizioni degli aerogeneratori e alla viabilità di accesso e di servizio al sito.**

Per quanto concerne l'installazione degli aerogeneratori, gli stessi prevedono opere fondanti costituite da plinti circolari a sezione troncoconica il cui piano di posa è previsto ad una profondità di riferimento di 5m da piano campagna.

L'analisi geologica ha restituito per queste profondità di scavo una condizione generalmente rappresentata da ammassi rocciosi da molto fratturati a fratturati in relazione alla tipologia litologica come definito nei diversi modelli geologici individuati.

In ordine al grado di fratturazione si identificano le seguenti criticità alle quali tener conto in fase di progettazione esecutiva quando i modelli geologici individuati verranno confermati da indagini specifiche e puntuali sui siti di imposta dei singoli aerogeneratori:

1. Azioni sulle pareti e stabilità dei fronti: Lo scavo stesso, in quanto genera depressione, può innescare locali smottamenti in corrispondenza degli orizzonti meno competenti a causa di fenomeni di detensionamento determinati dall'asportazione del materiale durante l'escavazione, sia in relazione ai livelli meno competenti sia alle direzioni del sistema di fratturazione che può generare componenti a franapoggio.
2. La profonda deformazione che le metamorfiti hanno subito genera variazioni di giacitura anche nell'ordine del metro pertanto si ritiene importante in fase di realizzazione degli scavi di fondazione eseguire un dettagliato rilievo geostrutturale puntuale finalizzato all'esclusione di ogni possibile rischio di crollo e/o slittamento di porzioni di parete.
3. Circolazione idrica sotterranea secondaria o indotta e/o stagnazione di acque di pioggia: pur se non è stata rilevata in fase di indagine, vanno considerati gli effetti dell'eventuale presenza d'acqua alla quota di imposta delle fondazioni in relazione ad una possibile circolazione idrica indotta dai fenomeni di detensionamento dovuti agli scavi, con particolare riferimento alla stagionalità degli apporti idrici e del relativo flusso negli ambiti più superficiali delle coltri di **depositi di flusso piroclastico**. In tal caso, in fase esecutiva, sarà opportuno provvedere a mantenere lo scavo asciutto mediante l'installazione di pompe adeguatamente dimensionate per la portata da emungere.

Per quanto riguarda la scavabilità del substrato roccioso esso, nelle facies presenti e nella parte superficiale, risulta quasi sempre da fratturato a molto fratturato per cui facilmente scavabile con ripper e martellone.

Il tracciato del cavidotto si snoda lungo aree pianeggianti e tracciati stradali esistenti. Il cavidotto in progetto andrà a interessare il litologie appartenenti alla **Successione sedimentaria oligo-miocenica del Logudoro-Sassarese** e dai depositi quaternari. Non sono previste fondazioni profonde pertanto non si rilevano particolari criticità salvo il controllo del deflusso delle acque superficiali essendo posizionata alle pendici di un versante.