

PARCO EOLICO "KERSONESUS"

COMUNE DI TEULADA

PROVINCIA DEL SUD SARDEGNA (SU)



STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

Elaborato:

ELABORAZIONI SIA

Relazione sulla pericolosità sismica di base

Codice elaborato:

TL_SIA_A016

Data: Marzo 2023

Il committente: Sardeolica s.r.l.

Coordinamento: FAD SYSTEM SRL - Società di ingegneria

Dott. Ing. Ivano Distinto

Dott. Ing. Carlo Foddis

Elaborazione SIA:

BIA s.r.l.

Società di ingegneria

Elaborato a cura di:

Dott.ssa Geol. Cosima Atzori

rev.	data	descrizione revisione	rev.	data	descrizione revisione
00	16/03/2023	Emissione per procedura VIA			

SOMMARIO

SOMMARIO.....	2
1. PREMESSA	4
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
3. STUDI ED INDAGINI DI RIFERIMENTO	5
4. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE	5
5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO	11
5.1. Successione pre-Ordoviciano medio della Zona esterna	12
5.1.1. Micasisti ad andalusite ("Scisti di M.Settibalas" Auct.)	12
5.1.2. Formazione di Bithia	12
5.1.3. Formazione di Nebida	13
5.1.4. Formazione di gonnesa	14
5.1.5. Formazione di Cabitza.....	16
5.2. Complesso plutonico del Carbonifero superiore-Permiano	18
5.2.1. Leucograniti equigranulari e leucograniti a granato	18
5.3. Corteo filoniano.....	18
5.4. Depositi Quaternari dell'area continentale.....	19
6. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	25
6.1. Lineamenti geomorfologici dell'area di studio	25
6.2. Definizione dell'area geomorfologicamente significativa	28
7. INQUADRAMENTO SISMICO	29
7.1. Azione sismica.....	30
7.2. Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento.....	30
7.3. Amplificazione stratigrafica e topografica.....	31
8. INDAGINI GEOGNOSTICHE.....	33
8.1. Indagini sismiche: MASW	33
8.1.1. Specifiche delle indagini svolte	35
8.1.2. Caratteristiche della strumentazione impiegata	36
8.1.3. Elaborazione dei dati.....	36
8.1.4. Categorie di sottosuolo - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)	36
8.2. Risultati delle indagini del sito TL_SISM_01-TURBINA TL02.....	38
8.2.1. M1-TL_SISM_01-TL02: MASW	38
8.3. RISULTATI DELLE INDAGINI SITO TL_SISM_02-TURBINA TL05.....	39
8.3.1. M2- TL_SISM_02-TL05: MASW	39
8.4. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO TL_SISM_03-TURBINA TL07	40
8.4.1. M3-TL_SISM_03-TL07: MASW	40
8.5. Indicazioni per la determinazioni dei parametri geomeccanici	41

8.5.1. Parametri di pericolosità sismica	42
9. CONCLUSIONI	42

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Localizzazione del progetto	6
Figura 2 Panoramica dal lato occidentale dell'area di studio	6
Figura 3 Localizzazione su foto aerea (Fonte RAS, 2016) dell'area interessata dal progetto, cavidotto e sottostazione.....	7
Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000	8
Figura 5 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore Nord	9
Figura 6 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore Sud	10
Figura 7 Schema tettonico-strutturale della Sardegna.....	11
Figura 8 Affioramento roccioso del Membro di Mattoppa (NEB1) a SE della TL_02.....	14
Figura 9 Membro del Calcare Ceroide, Formazione di Gonnese. GNN2	15
Figura 10 Membro del Calcare Ceroide, Formazione di Gonnese.....	16
Figura 11 Affioramento degli Scisti di Cabitza.	17
Figura 12 Leucograniti dell'unità Intrusiva di Villacidro.....	18
Figura 13 Affioramento di porfidi granitici nei pressi della TL_07	19
Figura 14 Depositi di versante, alla base granitoidi alterato (VLD).....	20
Figura 15 Coltri eluvio-colluviali, alla base Membro di Mattoppa (NEB)	20
Figura 16 Stralcio carta geologica (Fonte RAS).....	22
Figura 17 Faglia a basso angolo nei pressi della TL_03.....	24
Figura 18 Blande pieghe a scala decimetrica nei pressi della TL_02.....	24
Figura 19 Schema dell'evoluzione geomorfologica del complesso paleozoico (non in scala)	25
Figura 20 Morfologia del paesaggio nei pressi dell'area di Studio, dolci colline e larghe vallecicole nella parte occidentale del parco	26
Figura 21 Morfologia del paesaggio nei pressi dell'area di Studio, valli più incise nella parte orientale del parco.....	27
Figura 22 Morfologie erosive in corrispondenza dei tagli stradali	27
Figura 23 Carta della pericolosità sismica del territorio nazionale	29
Figura 24 Valori minimi della Vita nominale VN di progetto per i diversi tipi di costruzioni.	31

1. PREMESSA

Nell'ambito della redazione del Progetto Definitivo del Parco Eolico denominato "**KERSONESUS**" dislocato nel territorio comunale di Teulada – sub-regione del Sulcis-Iglesiente, Provincia del Sud Sardegna (SU), al fine di avere un quadro completo del contesto geologico e geotecnico è stata redatta la presente **Relazione sulla Pericolosità Sismica di Base**, la cui stesura ottempera quanto previsto dal D.M. del 17/01/2018 recante le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (di seguito NTC2018).

In data **08/11/2022** è stata eseguita una prospezione sismica eseguita con la tecnica MASW (stendimenti denominati M1 – M2 – M3) al fine di determinare la categoria di sottosuolo.

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

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

- 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.
- Circ. Min. LL.PP. n° 30483 del 24.09.1988 – Istruzioni per l'applicazione del D.M. LL.PP.11.03.1988.
- Raccomandazioni, programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, 1975 – Associazione Geotecnica Italiana.
- 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)
- 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.
- D.L. 3 aprile 2006, n. 152 e successive modificazioni - "Norme in materia ambientale".
- 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. STUDI ED INDAGINI DI RIFERIMENTO

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

- Carta Topografica I.G.M. scala in 1:25000
- Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000
- Carta Geologica dell'Italia in scala 1:100000
- Carta Geologica dell'Italia in scala 1:50.000 (CARG).
- Cartografia Geologica di base della R.A.S. in scala 1:25.000
- RAS - Carta dell'Uso del Suolo della Regione Sardegna, 2008
- I.S.P.R.A. - Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (legge 464/84)
- RAS – Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna, annali idrologici 1922-2009
- RAS – Autorità di Bacino - Piano Stralcio d'Assetto Idrogeologico
- RAS – Autorità di Bacino - Piano di Tutela delle Acque
- RAS – Autorità di Bacino - Piano Stralcio delle Fasce Fluviali
- 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 eseguita in data **08/11/2022** nella zona di interesse.

4. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE

Teulada è un comune del basso Sulcis che si affaccia nella costa più a Sud dell'Isola, comprende per esempio le cale di capo Malfatano, sovrastato da una torre spagnola e con uno stagno alle spalle, e Cala Zafferano, mentre a nord-ovest si trova la spiaggia is Arenas Blancas, parte meridionale della località Porto Pino (per buona parte in territorio di Sant'Anna Arresi), le cui dune sono accessibili da una strada dentro il poligono militare. Alle spalle della costa, situato sul fondo di una valle tra i rilievi coperti da foreste di lecci e sughere si trova il centro abitato.

L'inquadramento cartografico di riferimento è il seguente:

- Cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare I.G.M scala 1:25 000. Serie 25 -Fogli: **565 sez. III "Santadi"; 573 sez. IV "Teulada"**
- Carta Tecnica Regionale scala 1:10 000 - Foglio: **565130 "Is Carillus"; 565140 "Punta Sebera"; 573010 "Case Culurgioni"; 573020 "Teulada".**



Figura 1 Localizzazione del progetto



Figura 2 Panoramica dal lato occidentale dell'area di studio

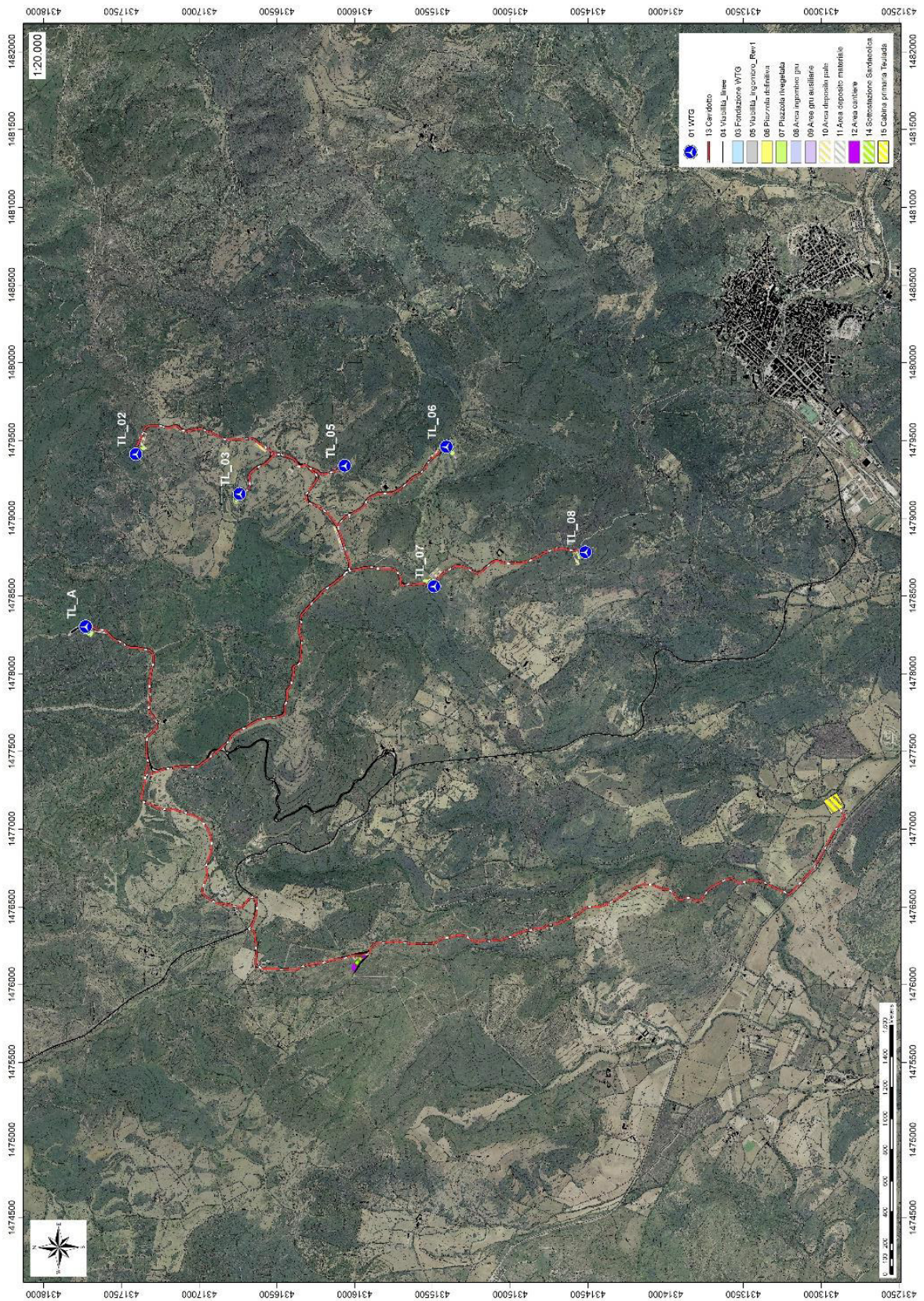


Figura 3 Localizzazione su foto aerea (Fonte RAS, 2016) dell'area interessata dal progetto, cavidotto e sottostazione.

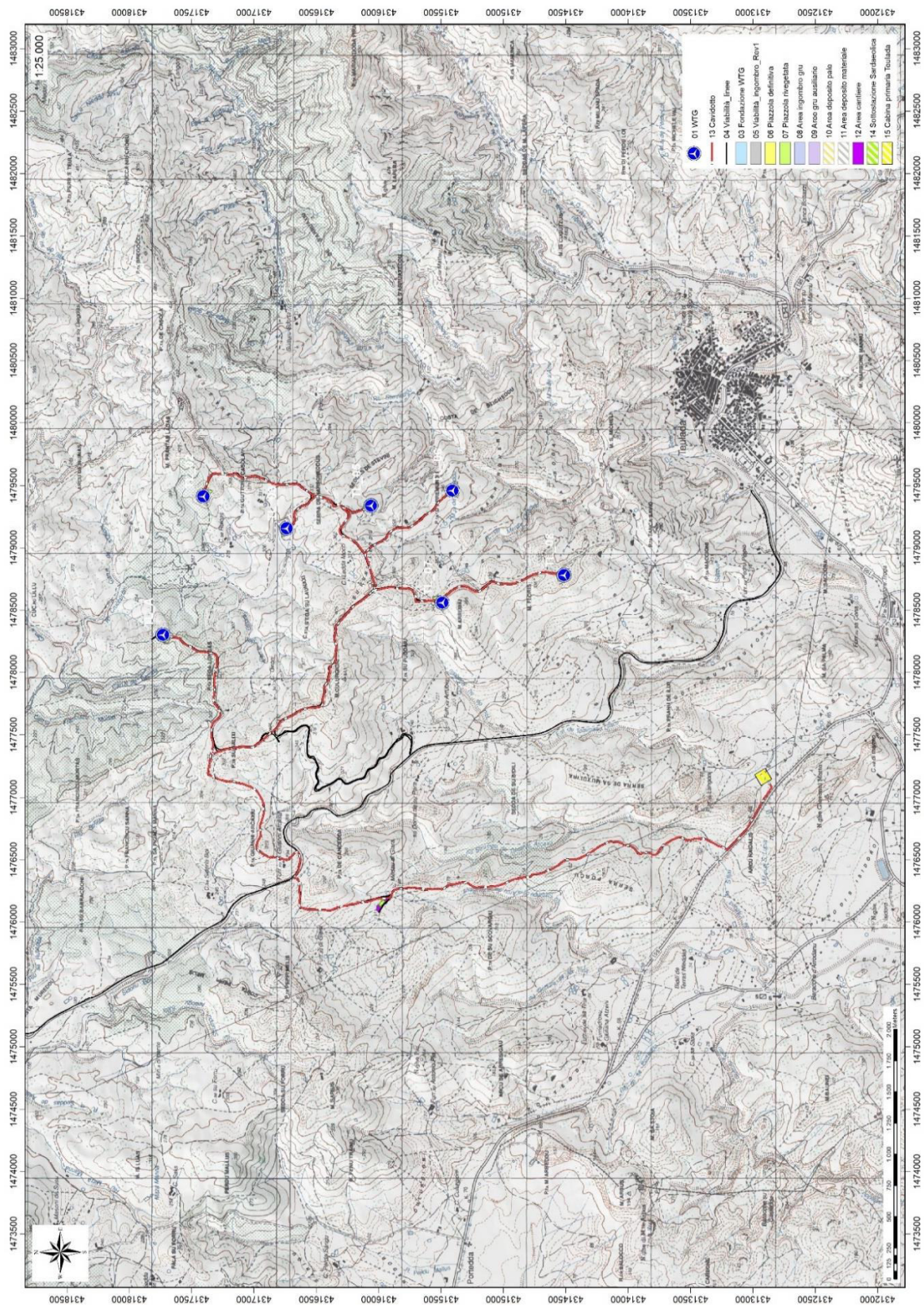


Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000

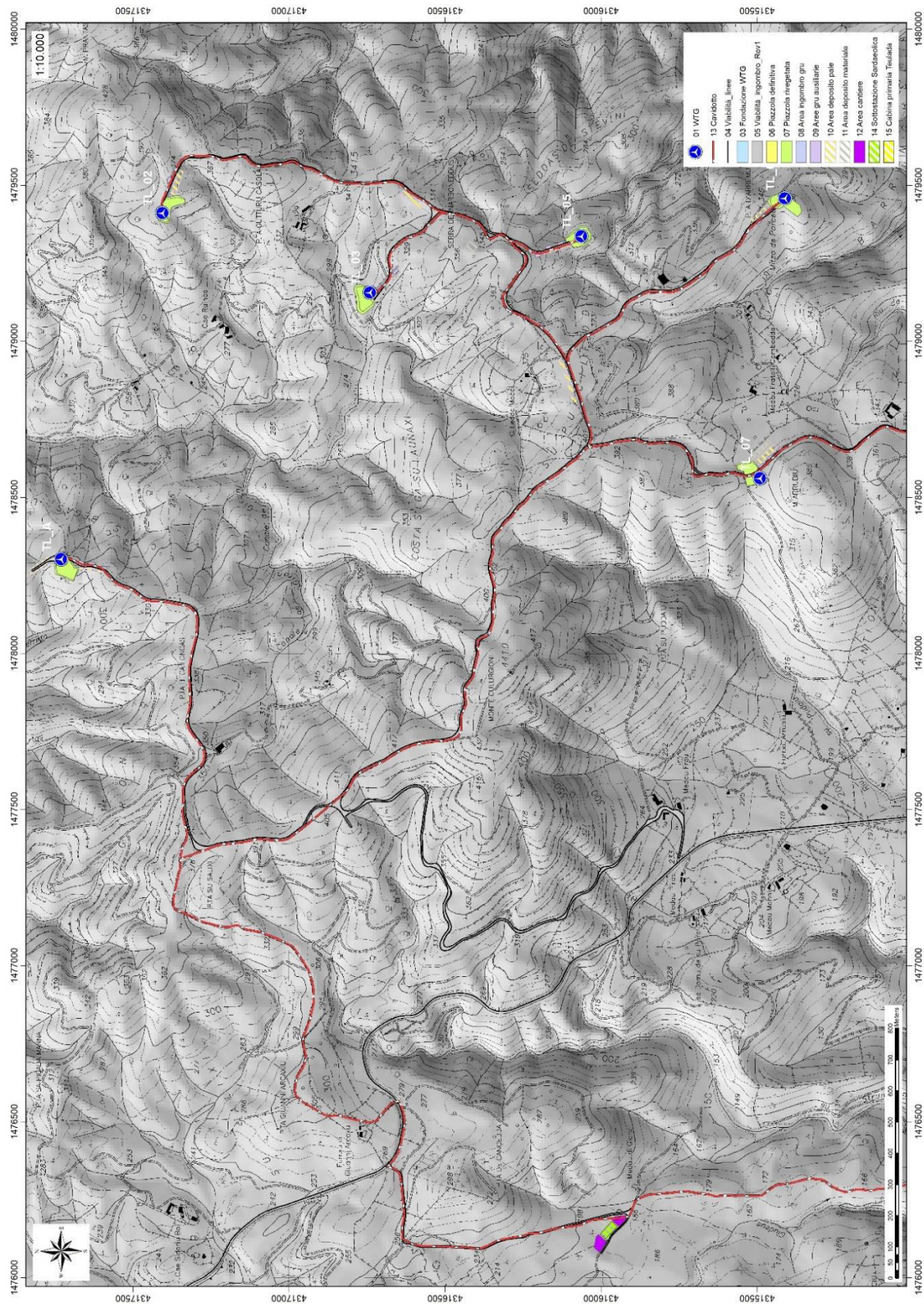


Figura 5 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore Nord

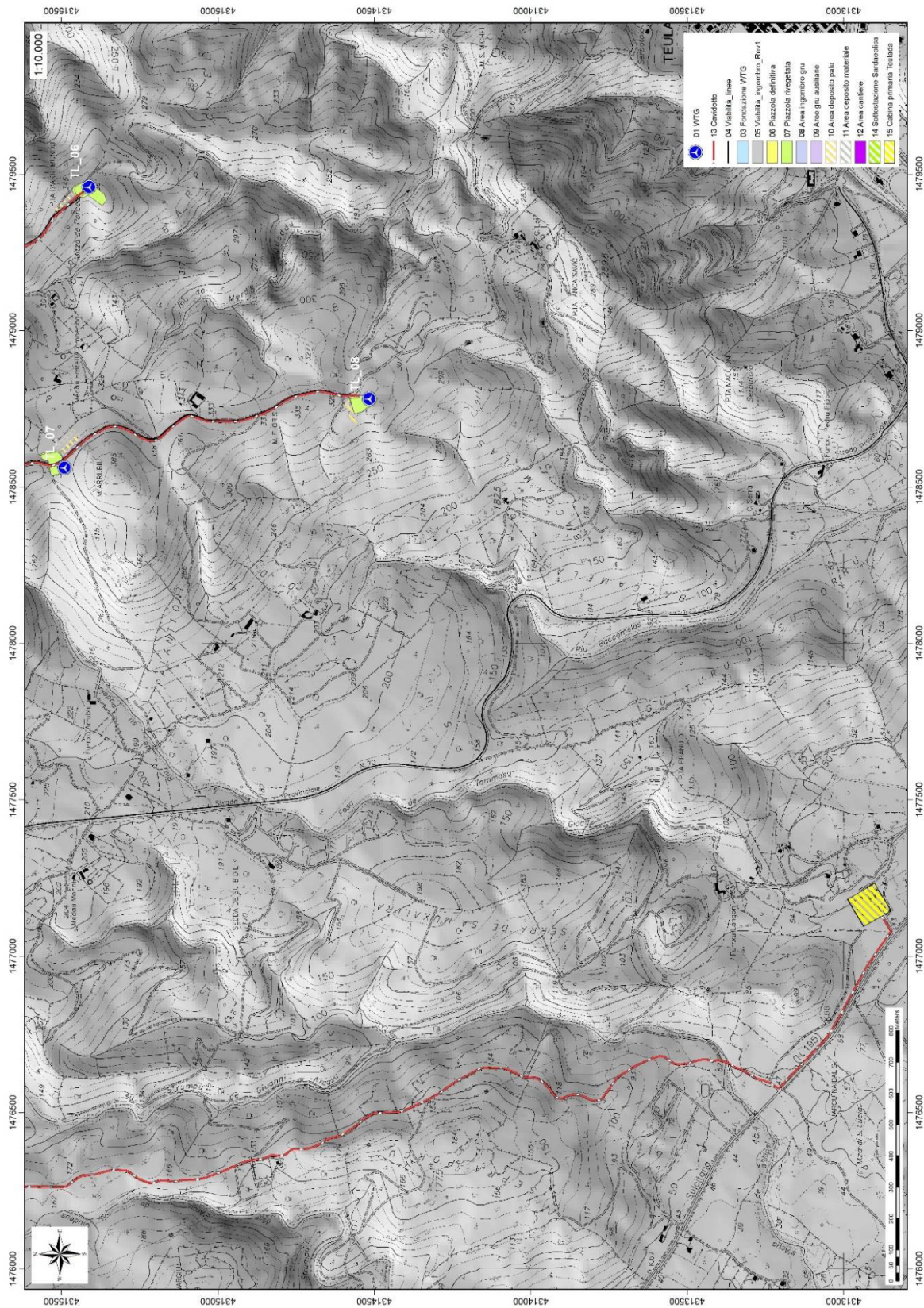


Figura 6 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore Sud

5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

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 rinvengono 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 nel Complesso metamorfico ercinico in facies degli scisti verdi e anchimetamorfico, nella Successione pre-Ordoviciano medio della Zona esterna.

Questa successione testimonia il passaggio da una piattaforma terrigena cambriana inferiore (Formazione di Bithia, Formazione di Nebida con intercalazioni di vulcaniti basiche e intermedie

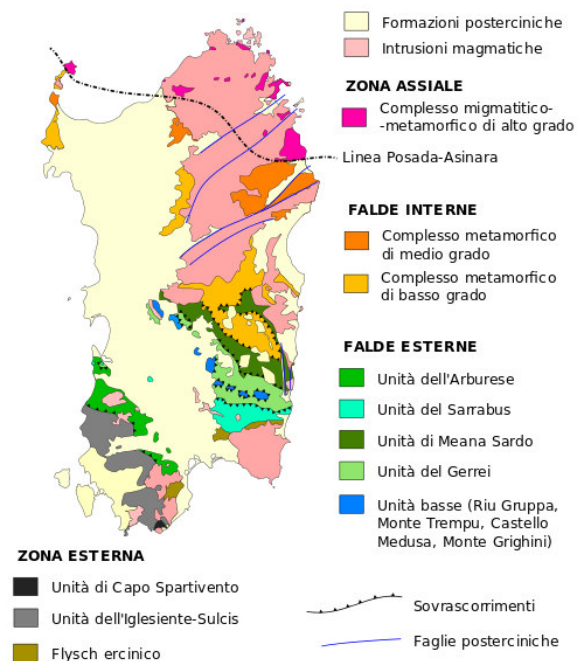


Figura 7 Schema tettonico-strutturale della Sardegna

probabilmente legate ad una concomitante fase di *rifting*, ad un ambiente lagunare con barre oolitiche (tetto della Formazione di Nebida).

I sedimenti prevalentemente terrigeni della Formazione di Nebida sono seguiti verso l'alto dalla potente successione carbonatica della Formazione di Gonnese, costituita da dolomie e calcari di piana tidale, frammentata a più riprese in bacini e zone di alto strutturale in seguito a fasi tettoniche distensive. Si passa quindi alla Formazione di Cabitza, che marca l'annegamento della piattaforma carbonatica.

Nella zona di Capo Spartivento affiorano dei micascisti ad andalusite ("Scisti di M. Settiballas" Auct.), i cui rapporti originari con la precedente successione rimangono incerti e che sono stati dubitativamente attribuiti al Precambriano.

5.1. SUCCESSIONE PRE-ORDOVICIANO MEDIO DELLA ZONA ESTERNA

5.1.1. MICASCISTI AD ANDALUSITE ("SCISTI DI M. SETTIBALLAS" AUCT.)

Si tratta di micascisti gneissici, caratterizzati da uno sviluppato layering composizionale definito dall'alternanza di livelli millimetrici granoblastici e lepidoblastici, che costituiscono alcuni affioramenti di limitata estensione presso Capo Spartivento. Gli effetti della ricristallizzazione metamorfica sono intensi e denotano un'evoluzione metamorfica polifasica. Si distinguono infatti almeno due eventi metamorfici: uno più antico, di medio grado e di alto gradiente termico, testimoniato da relitti deformati di andalusite, muscovite, biotite, granato e cordierite, ed uno più recente, relativo allo sviluppo della foliazione principale, che comporta la blastesi di biotite e muscovite. Sia l'età che i rapporti con il resto della successione cambriana sono incerti. Questi micascisti sono intrusi dai granitoidi ordoviciani; essi vengono considerati come i termini più antichi della successione e riferiti da alcuni Autori al Precambriano.

5.1.2. FORMAZIONE DI BITHIA

La Formazione di Bithia affiora esclusivamente in quest'area dell'Isola, lungo una stretta fascia attorno agli Ortogneiss di Capo Spartivento. Lo spessore reale non è valutabile a causa dell'intensa tettonizzazione, mentre lo spessore apparente supera i 600 m. Si tratta di una successione silicoclastica, prevalentemente costituita da filladi, metaquarzoareniti e metarenarie quarzitiche, a cui si intercalano metagrovacche, metaconglomerati e marmi. Sono inoltre presenti intercalazioni di metavulcaniti basiche e intermedie attribuite ad una fase di *rifting* precambriana.

I metaconglomerati affiorano in diverse località, ma sempre con spessori modesti (fino a qualche metro). Si tratta di originari conglomerati poligenici poco selezionati. I clasti, molto deformati e immersi in una matrice arenitica quarzoso-feldspatica, sono principalmente costituiti da frammenti

di quarziti sia grigie che nere (liditi), da quarzo di vena, e in subordine da elementi di originarie rocce vulcaniche e carbonatiche. I marmi affiorano in livelli che possono arrivare a 15-20 m di spessore; hanno colore grigio chiaro, contengono intercalazioni di calcescisti e sono spesso affetti da una intensa dolomitizzazione secondaria. La parte alta della successione è caratterizzata da metapeliti alternate a metarenarie quarzose, talora con stratificazione incrociata. La Formazione di Bithia viene interpretata come una successione terrigena, con tendenza regressiva, evolutasi su un margine. La Formazione di Bithia poggia sull'Ortogneiss di Capo Spartivento con contatto tettonico. I due complessi hanno, infatti, un diverso grado metamorfico: la deformazione del granitoide ordoviciano è avvenuta in condizioni anfibolitiche, mentre il metamorfismo principale della Formazione di Bithia si è sviluppato a temperature relativamente basse ed è associato ad un'intensa deformazione cataclastico-milonitica. La natura e la posizione del contatto della Formazione di Bithia con la sovrastante Formazione di Nebida è incerto. Sia per la sua posizione stratigrafica sottostante alla Formazione infracambriana di Nebida, sia per correlazioni con formazioni precambriane europee, la Formazione di Bithia è stata riferita al Precambriano superiore.

5.1.3. FORMAZIONE DI NEBIDA

Questa formazione è in prevalenza costituita da sedimenti terrigeni affetti da metamorfismo ercinico di grado molto basso ed affiora estesamente in tutto l'Iglesiente-Sulcis. Nell'Iglesiente e nel Sulcis settentrionale costituisce il termine più antico della successione affiorante, mentre nel Sulcis meridionale essa sormonta la Formazione di Bithia. La Formazione di Nebida è tradizionalmente suddivisa in due membri che sono, dal basso verso l'alto, il Membro di Matoppa ed il Membro di P.ta Manna.

Il Membro di Matoppa è costituito da originarie siltiti grigio chiare con intercalazioni di arenarie, arenarie quarzose, quarzo-areniti ed arcosi a grana fine, in livelli di alcuni dm (1 m al massimo) di spessore. Verso l'alto il grado di maturità diminuisce progressivamente, le diffuse intercalazioni arenitiche divengono più frequenti e di maggiore potenza, fino a passare a metarenarie quarzoso-micacee grigie, rossastre e verdi a grana grossa, alternate a metaquarzoareniti micacee e subordinati livelli di metasiltiti; la successione termina con metarenarie quarzoso-feldspatiche alternate a metarenarie quarzoso-micacee e metagrovacche con matrice carbonatica. In bibliografia sono state descritte numerose strutture sedimentarie, come stratificazioni e laminazioni parallele ed incrociate, gradazioni, bioturbazioni, *ripple mark*, *slumping*.

Direttamente sui depositi terrigeni e solo localmente sulle lenti calcaree si rinviene, seppure in modo discontinuo, un caratteristico orizzonte di calcari oolitici che costituisce la base del Membro di P.ta Manna. Il Membro di P.ta Manna è costituito da un'alternanza ritmica di metareniti, metasiltiti e metargilliti a cemento carbonatico e di metacalcari. Nelle metareniti sono diffuse strutture

sedimentarie quali stratificazione incrociata, *ripple mark* asimmetrici e bioturbazioni. I livelli carbonatici sono costituiti da metacalcari grigi biocostruiti, metacalcari oolitici e oncolitici, metacalcari nodulari variegati, metacalcari neri a ooidi e metacalcari grigi a incrociata. Nella parte alta della successione le intercalazioni carbonatiche divengono prevalentemente dolomitiche, con strutture da disseccamento (*mudcrack*) e tappeti algali (stromatoliti) che preannunciano i caratteri della sovrastante Dolomia rigata. Verso la sommità del Membro di P.ta Manna aumentano le intercalazioni carbonatiche e sono costituite generalmente da metadolomie, mentre i livelli silicoclastici sono principalmente costituiti da metargilliti e quarziti.



Figura 8 Affioramento roccioso del Membro di Mattoppa (NEB1) a SE della TL_02

5.1.4. FORMAZIONE DI GONNESA

La fine della deposizione silicoclastica e l'inizio di quella prevalentemente carbonatica marca il passaggio dalla Formazione di Nebida alla Formazione di Gonnese. Lo spessore della Formazione di Gonnese è estremamente variabile: da 180 a 480 m. La Dolomia rigata è costituita da metadolomie primarie e metacalcari ben stratificati, caratterizzati da ripetizioni cicliche di facies costituite da originari:

- a) fanghi carbonatici stratificati; b) stromatoliti laminate; c) stromatoliti laminate con pseudomorfi di gesso o anidride; d) pisoliti vadose e/o brecce da disseccamento; localmente sono presenti livelli oolitici o a pellets, anche silicizzati, e noduli di selce.
- b) L'ambiente di deposizione della Dolomia rigata corrisponde ad una piana di marea che si instaura su una morfologia piana o poco accidentata, in condizioni di clima caldo e arido. La distribuzione delle litofacies testimonia un graduale approfondimento del bacino di sedimentazione da N verso S. La parte del bacino nell'**area di studio** della Dolomia rigata si trovava infatti in condizioni prevalentemente subtidali, come suggerito dalla sostituzione della dolomia con calcari algali laminati.

Il Calcarea ceroide è costituito da metacalcari massicci di colore grigio, generalmente mal stratificati. Presenta quattro facies fondamentali: a) mudstone-wackestone con bioclasti; b) grainstone con ooliti e/o oncoliti, echinodermi e resti di trilobiti; c) boundstone criptoalgali, localmente boundstone scheletoalgali con archeociati; d) pisoliti vadose. Tali facies indicano ambienti che variano da supratidale a subtidale. La loro distribuzione rivela una morfologia a piattaforme e bacini connessa con una tettonica distensiva sin-sedimentaria. Il Calcarea ceroide è ritenuto paleontologicamente pressoché sterile; i rari resti fossili rinvenuti sono placche di echinodermi e frammenti di trilobiti.

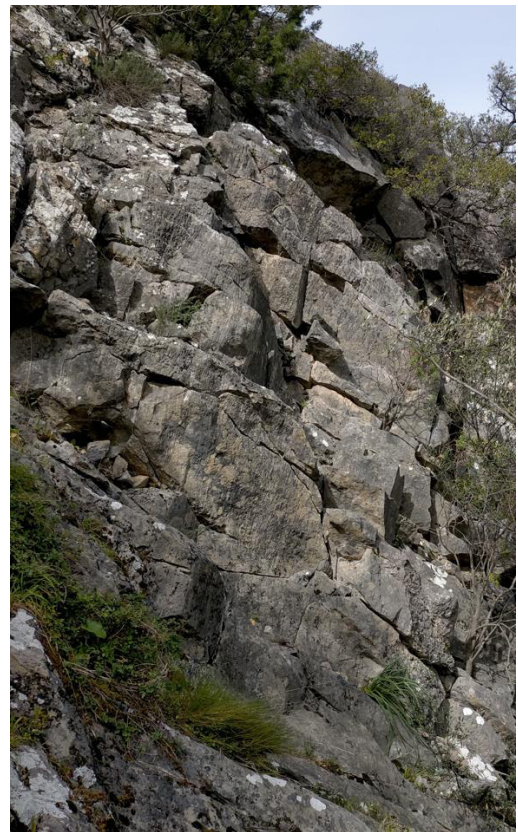


Figura 9 Membro del Calcarea Ceroide,
Formazione di Gonnese. GNN2

L'interruzione degli apporti terrigeni da E avrebbe determinato il prevalere della sedimentazione carbonatica. La presenza di archeociati nella parte alta della Dolomia rigata e del Calcarea ceroide permette di riferire l'intera Formazione di Gonnese al Cambriano inferiore.



Figura 10 Membro del Calcare Ceroide, Formazione di Gonnessa.

5.1.5. FORMAZIONE DI CABITZA

Questa formazione affiora nell'Iglesiente-Sulcis ed è stata suddivisa in due membri che dal basso sono: a) Calcare nodulare; b) Scisti di Cabitza. Nella recente proposta di questa formazione è stata poi denominata dal Prof. paleontologo Pillola "Gruppo di Iglesias", a sua volta suddiviso in Formazione di Campo Pisano e Formazione di Cabitza. Il Membro del Calcare nodulare poggia con contatto netto sul Calcare ceroide, localmente tramite una breccia ad elementi di Calcare ceroide o depositi argillitici vari. È costituito da una fitta alternanza di sottili livelli di metargilliti più o meno siltosi rossi e verdi, più raramente neri, metacalcari grigi e rosati con struttura nodulare e marne giallastre. Gandin all'interno di questo membro distingue tre litofacies: a) metacalcari massivi, ben stratificati con porzioni a lamine (prevalentemente *wackestone-packstone*); b) metacalcari nodulari più o meno marnosi e ricchi di resti fossili; c) alternanze di metacalcari ed originarie marne.

I metacalcari nodulari sono il litotipo più rappresentato e contengono abbondanti resti di echinodermi, trilobiti, *Chancelloria*, brachiopodi, spicole di spugne e hyolithidi. L'associazione di trilobiti indica la parte bassa del Cambriano medio. L'ambiente di deposizione del Calcare nodulare corrisponde ad un mare epicontinentale poco profondo e poco ossigenato, con apporti ritmici di materiale terrigeno fine. Questo tipo di sedimentazione testimonia l'inizio dell'annegamento della piattaforma carbonatica in conseguenza dell'attività tettonica distensiva all'inizio del Cambriano medio. Lo spessore di questo membro è variabile, da 20 a 60. Verso l'alto il Calcare nodulare passa agli Scisti di Cabitza. Si tratta di una caratteristica successione formata da ritmiche alternanze centimetriche e millimetriche di metargilliti e metasiltiti varicolori, raramente carbonatiche, con subordinati livelli di metarenarie, generalmente fini; la parte sommitale è localmente costituita da metarenarie fini e quarziti con frequenti laminazioni incrociate. Gli Scisti di Cabitza sono ricoperti in

discordanza dai sedimenti clastici ordoviciani ("Puddinga" Auct.) che marcano la cosiddetta *Discordanza Sarda*. Il loro limite superiore è quindi erosivo. Gli Scisti di Cabitza sono stati suddivisi da Gandin e Pillola (1985) in due intervalli: a) un intervallo inferiore, costituito principalmente da metasiltiti, metargilliti e metarenarie a grana fine, con strutture sedimentarie tipo laminazioni parallele e convolute, *ripple mark*, *flute cast* e piste riferibili a *Cruziana*, *Planolites* e *Helmitopsis*. Raramente, verso la base del membro affiorano lenti di metacalcari di colore vinaccia o verdolini; b) un intervallo superiore, costituito da originarie laminiti argilloso siltose con intercalazioni di quarzo-areniti micacee e metareniti. I caratteri sedimentologici dei due intervalli segnano un'evoluzione dell'ambiente da neritico a pelagico non molto profondo, con la deposizione del Calcarea nodulare si ha la frammentazione e l'annegamento della piattaforma carbonatica, a cui segue la deposizione degli Scisti di Cabitza, che segnano la fine della sedimentazione carbonatica e l'instaurarsi di una sedimentazione terrigena pelagica più profonda. Nella parte bassa della successione sono da tempo noti fossili del Cambriano medio: trilobiti, rari brachiopodi, carpoidi sia interi che in placche. Il rinvenimento di resti fossili nella parte medio-alta della formazione ha permesso di documentare con trilobiti il Cambriano superiore e l'Ordoviciano inferiore. Questa datazione è di particolare importanza poiché consente di precisare meglio l'età della Discordanza sarda dell'Iglesiente, che risulta così compresa tra l'Ordoviciano inferiore e l'Ordoviciano superiore (età dei primi livelli paleontologicamente datati trasgressivi sui depositi continentali della "Puddinga" Auct.) e di correlarla con la Discordanza sarrabese della Sardegna sud-orientale.



Figura 11 Affioramento degli Scisti di Cabitza.

5.2. COMPLESSO PLUTONICO DEL CARBONIFERO SUPERIORE-PERMIANO

5.2.1. LEUCOGRANITI EQUIGRANULARI E LEUCOGRANITI A GRANATO

I leucograniti affiorano diffusamente in tutti i settori del basamento sardo. Si contraddistinguono per l'omogeneità composizionale e per le tessiture debolmente orientate o quasi isotrope. Il trend generale delle intrusioni è generalmente discordante rispetto a quello delle rocce incassanti e a quello delle intrusioni precedenti. La direzione dominante varia da N-S a NE-SW. Le età radiometriche disponibili variano da 289 ± 1 Ma a 274 ± 9 Ma. Si tratta di granitoidi a tendenza leucocrata inequigranulare, a cui il quarzo globulare conferisce un aspetto tendenzialmente porfirico. Nella massa di fondo microcristallina spiccano inoltre fenocristalli subedrali di K-feldspato. La biotite cristallizzata in individui isolati di taglia attorno a 3 mm è in proporzioni modali non superiori a 5%. Sono caratterizzati da una grana media equigranulare, con K-feldspato equidimensionale di taglia sub-centimetrica, cristallizzato in individui policristallini che conferiscono alla roccia la caratteristica colorazione rosata. La biotite, di taglia non superiore a 2 mm, è in proporzioni modali non superiori al 7%. Le facies affioranti nel Sarrabus si differenziano dalle precedenti per la grana fine, per la tendenza ololeucocrata derivante dalla quasi totale assenza della biotite e per la tessitura in genere isotropa, ma talvolta anche orientata.



Figura 12 Leucograniti dell'unità Intrusiva di Villacidro

5.3. CORTEO FILONIANO

(fp) Filoni ed ammassi di porfidi granitici: sono costituiti da filoni con spessori generalmente non superiori a qualche decina di metri; hanno colore tipicamente rosso mattone o ocraceo. La struttura varia da afirica a porfirica per la presenza di fenocristalli di quarzo, feldspato potassico, oligoclasio

e subordinata biotite immersi in una massa di fondo quarzoso-feldspatica. La struttura è isotropa, e solo localmente orientata in corrispondenza delle salbande; l'età è riferibile al Carbonifero superiore - Permiano.

(fi) Filoni intermedio-basici: corpi filoniani dell'ordine di qualche metro, di colore bruno-verdastro e struttura subafirica, debolmente porfirica o microcristallina, con cristalli di plagioclasio e fencici alterati. Carbonifero superiore - Permiano.



Figura 13 Affioramento di porfidi granitici nei pressi della TL_07

(fq) Filoni idrotermali: sono costituiti da corpi filoniani di esiguo spessore (qualche metro) caratterizzati da quarzo, fluorite, barite, calcite e solfuri metallici (galena).

5.4. DEPOSITI QUATERNARI DELL'AREA CONTINENTALE

I depositi quaternari cartografati nell'area di studio sono generalmente poco rilevanti; sono rappresentati principalmente da depositi di versante, coltri eluvio-colluviali e depositi alluvionali.

(bna) Depositi alluvionali terrazzati: si tratta di sedimenti alluvionali a tessitura grossolana, come sabbie grossolane e ghiaie. I depositi difficilmente raggiungono spessori superiori ai 5 m, di ambiente di conoide o piana alluvionale e situati in prossimità dei corsi d'acqua. Olocene.

(a) Depositi di versante: sono costituiti da depositi monogenici, eterometrici e con clasti spigolosi e a varia granulometria accumulati essenzialmente per gravità alla base dei versanti rocciosi più ripidi. Gli affioramenti più estesi si rinvergono alla base dei versanti, oppure in corrispondenza dei compluvi dove formano delle falde di detrito piuttosto estese. Lo spessore di questi depositi solitamente è variabile ma non supera i 5 m. Olocene.



Figura 14 Depositi di versante, alla base granitoide alterato (VLD)

(b2) Coltri eluvio-colluviali: Si tratta di materiali derivati dal disfacimento in situ delle rocce in seguito mobilizzate da processi di versante, costituiti da depositi con percentuali variabili di sedimenti fini (sabbia e silt) più o meno pedogenizzati e arricchiti in frazione organica, con clasti eterometrici di varia litologia. Sono mescolati con sedimenti più grossolani, sempre subordinati. Lo spessore di questi depositi solitamente è abbastanza esiguo (nell'ordine massimo di qualche metro in prossimità dei compluvi). Olocene.



Figura 15 Coltri eluvio-colluviali, alla base Membro di Mattoppa (NEB)

(b) Depositi alluvionali: Si tratta di materiali che si rinvergono nei letti dei fiumi attualmente soggetti a processi di erosione, trasporto e rideposizione periodica. Sono costituiti da ghiaie poligeniche

eterometriche, talora in matrice sabbiosa con lenti sabbiose e sabbioso-ghiaiose poco continue. Sono tipici sedimenti di barra, sia longitudinale che laterale o mediana, non cementati. Olocene.

Nel caso specifico, turbine TL_A, TL_2, TL_3, TL_5, TL_6 e TL_8 andranno a poggiare nella formazione del Membro di Mattoppa (NEB), mentre la TL_7 andrà a poggiare sui granitoidi (VLD).

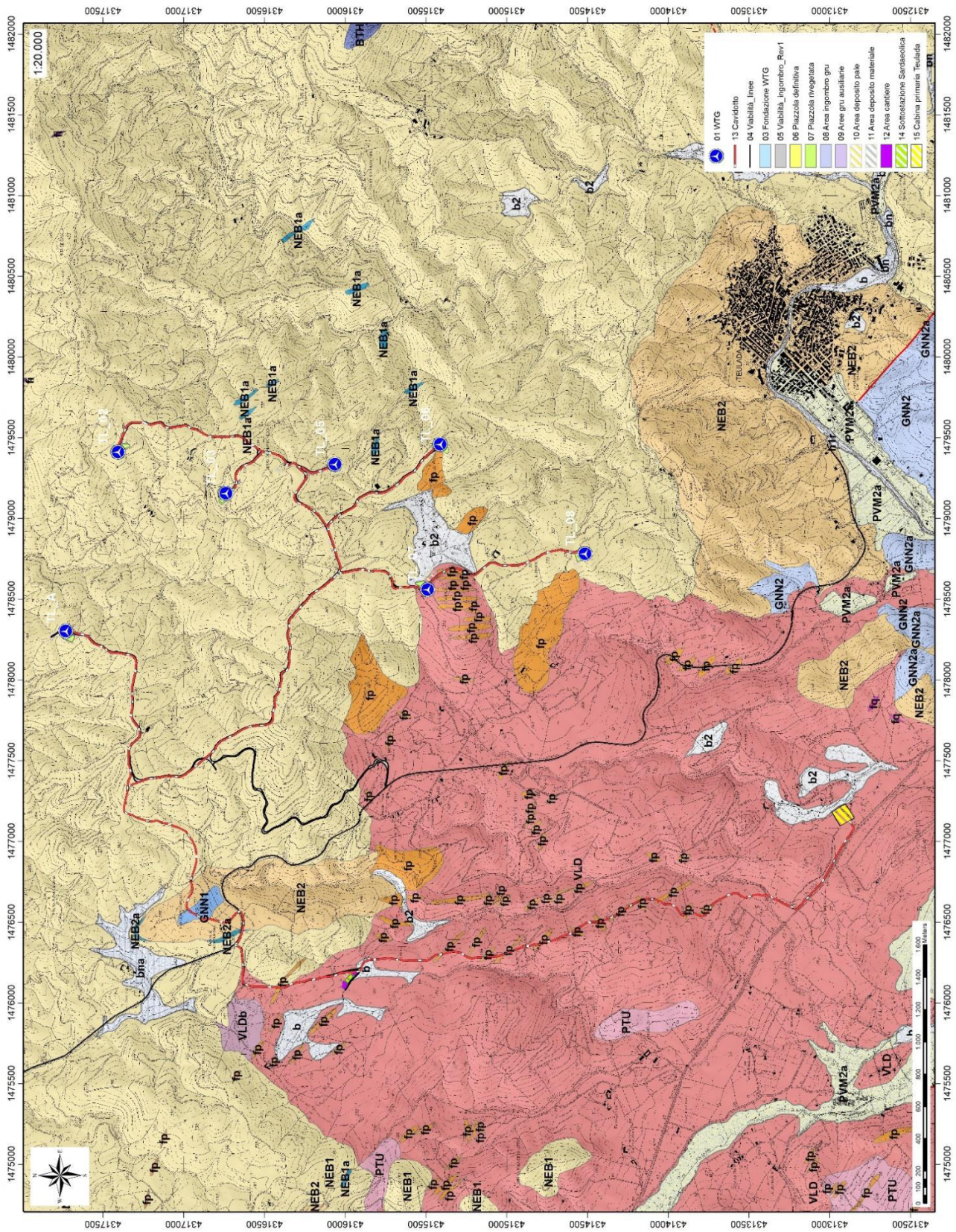


Figura 16 Stralcio carta geologica (Fonte RAS)

Le strutture delle litologie su cui ricade il parco eolico sono riconducibili a diversi eventi che caratterizzano la storia della Sardegna meridionale, le evidenze più antiche dei quali risalgono alla tettonica plicativa caledoniana (Fase sarda) è testimoniata nel Sulcis e nell'Iglesiente da una discordanza angolare tra le formazioni del Cambriano - Ordoviciano Inferiore e quelle dell'Ordoviciano Superiore. La Fase sarda si manifesta con deboli deformazioni caratterizzate da pieghe cilindriche a largo raggio di curvatura, di direzione assiale E-W, non riconoscibili alla scala dell'affioramento per la sovrapposizione sia delle pieghe coassiali E-W della I fase ercinica, sia di quelle di direzione N-S della II fase ercinica principale.

La prima fase Ercinica (F1) di più debole entità, caratterizzata da pieghe cilindriche a grande raggio di curvatura che si sovrappongono alle strutture di direzione assiale E-W della Fase caledoniana. Queste strutture, prive di scistosità, non sono molto evidenti anche perchè la fase N-S (fase ercinica principale) le ha deformate profondamente. La presenza di strutture E-W erciniche è plausibile sia per considerazioni di carattere regionale, sia per la forte immersione assiale verso N (50° - 70°) delle pieghe erciniche della fase N-S. I dati strutturali indicano che le suddette strutture si siano formate a partire da superfici già inclinate verso N, corrispondenti al fianco settentrionale della grande struttura di Nuxis-Santadi-Teulada, con a nucleo le metarenarie della formazione di Nebida.

La seconda fase deformativa Ercinica, strutturalmente la più importante poiché ha determinato il raccorciamento maggiore, è caratterizzata da pieghe isoclinali e subisoclinali di direzione assiale N-S di ampiezza variabile (con deviazioni di direzione NW-SE e talora coricate verso W), e da una foliazione di piano assiale (S2) ben sviluppata che nei litotipi siltitici e pelitici rappresenta l'anisotropia planare più evidente alla scala dell'affioramento. Da un punto di vista regionale le strutture prodottesi durante questa II Fase ercinica (fase principale) hanno una taglia minore rispetto alle pieghe E-W della I Fase ercinica, ma le loro caratteristiche rivelano raccorciamenti più importanti. Nei livelli a minore competenza si generano pieghe chiuse accompagnate da una caratteristica scistosità ("scistosità trasversale" Auct.) di direzione prevalente circa N-S.

La tettonica tardo-ercinica o post-collisionale (F3) dell'area di studio, come quella di tutta la Zona esterna, è caratterizzata da eventi deformativi minori rispetto a quelli della II Fase N-S che hanno prodotto raccorciamenti modesti, con piegamenti di direzione e stile variabile come kink, pieghe a scatola e a chevron, con assi di direzione N 70° e N 120° ed immersione variabile tra 15° e 30° . Il clivaggio (fracture cleavage e crenulation cleavage) è sviluppato soprattutto nelle parti più profonde delle successioni, in modo discontinuo, ed in funzione dei litotipi e della posizione entro le strutture maggiori. Talora sono presenti pieghe simili o subisoclinali. Anche se regionalmente non si sono prodotti effetti vistosi, localmente sono notevoli le complicazioni tettoniche.



Figura 17 Faglia a basso angolo nei pressi della TL_03.



Figura 18 Blande pieghe a scala decimetrica nei pressi della TL_02.

6. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Il territorio indagato è costituito sostanzialmente da una zona collinare, con rilievi subarrotondati e dislivelli dell'ordine di oltre 300 m tra monte e valle.

La forma prevalentemente pianeggiante dei versanti collinari dell'area di studio è il risultato della graduale demolizione del rilievo ercinico ad opera degli agenti erosivi, avvenuta alla fine dell'orogenesi ercinica, che ha portato alla formazione di una estesa superficie strutturale nota con il nome di "penepiano ercinico".

I successivi fenomeni di sollevamento tettonico, imputabili all'orogenesi alpina, hanno ridefinito la morfologia del paesaggio operando un ringiovanimento del rilievo. La superficie strutturale paleozoica si è quindi trovata ad una quota maggiore.

Questo ha innescato una nuova azione geomorfogenetica ad opera degli agenti atmosferici (acqua, vento in primis) che hanno rimodellato l'altopiano 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.

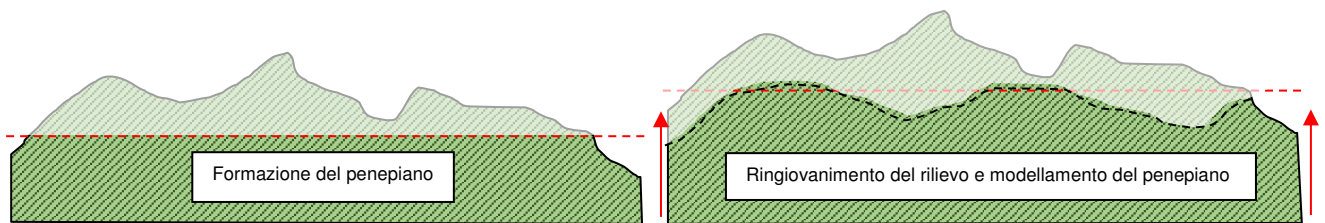


Figura 19 Schema dell'evoluzione geomorfologica del complesso paleozoico (non in scala)

I prodotti di erosione sia della prima fase che della seconda e attuale 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 delle litologie e dalle caratteristiche fisico-chimiche delle litologie presenti e dalla tipologia ed intensità degli agenti modellanti predominanti.

6.1. LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI DELL'AREA DI STUDIO

I paesaggi che circondano il parco fanno parte del massiccio del Sulcis, che si trova a cavallo dello spartiacque che separa i corsi d'acqua che scorrono verso il Mare di Sardegna a W da quelli che drenano verso la pianura del Campidano ed il Canale di Sardegna a E. Questo massiccio è caratterizzato da un'infrastruttura di rocce metamorfiche e magmatiche paleozoiche che in diversi periodi sono state interessate da intensi processi di spianamento.

Tali processi in genere si verificano nei pressi del livello del mare e dunque individuano un antico livello di base utile per poter stabilire l'esistenza di eventuali successivi fenomeni di sollevamento di un'area. Nel Sulcis questi processi hanno originato un vero e proprio altopiano, più tardi smembrato dall'erosione lineare. Attualmente, questa antica superficie di spianamento risulta conservata solo in alcuni tratti (ad es., in tutto il settore nordoccidentale del foglio ed in particolare a E di Serra Cannisoni, dove è ubicata a circa 500 m s.l.m.), benchè sia comunque riconoscibile in diversi altri settori, per la presenza di cime e crinali di uguale altezza.

Tuttavia, se l'esistenza di movimenti verticali appare incontestabile, più difficile risulta la collocazione cronologica di questo spianamento e dei successivi sollevamenti. Inoltre, considerando che sui fianchi del massiccio affiorano quasi ovunque i sedimenti della formazione del Cixerri (Eocene medio - ?Oligocene) che sono stati interessati anche da importanti dislocazioni deformative, è verosimile ritenere che tale superficie si sia modellata dopo tali movimenti. Non si tratta però della riesumazione della superficie di spianamento pre-formazione del Cixerri, visto che sia questa superficie sia la medesima formazione paleogenica sono deformate e spianate.

Non si hanno altre informazioni su questo modellamento, dato che non esistono sedimenti che lo ricoprono almeno in questo settore dell'Isola. La mancanza però di depositi continentali e soprattutto vulcanici del Miocene su questa superficie suggerirebbe che lo spianamento sia successivo anche a questi termini. L'approfondimento recente del massiccio del Sulcis è stato operato lungo le linee di debolezza strutturale verosimilmente per processi di erosione selettiva. Le valli attuali seguono le lineazioni, gli assi di scistosità ed i contatti tettonici.



Figura 20 Morfologia del paesaggio nei pressi dell'area di Studio, dolci colline e larghe vallecicole nella parte occidentale del parco



Figura 21 Morfologia del paesaggio nei pressi dell'area di Studio, valli più incise nella parte orientale del parco.



Figura 22 Morfologie erosive in corrispondenza dei tagli stradali

6.2. DEFINIZIONE DELL'AREA GEOMORFOLOGICAMENTE SIGNIFICATIVA

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.

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.

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.

7. INQUADRAMENTO SISMICO

La sismicità indica la frequenza e la forza con cui si manifestano i terremoti, ed è una caratteristica fisica del territorio. Sulla base delle conoscenze relative alla frequenza e all'energia associate ai terremoti che caratterizzano un territorio, si attribuisce un valore di probabilità al verificarsi di un evento sismico di una data magnitudo in un certo intervallo di tempo, possiamo definirne la pericolosità sismica. La pericolosità sismica sarà tanto più elevata quanto più probabile sarà il verificarsi di un terremoto di elevata magnitudo, a parità di intervallo di tempo considerato.

Le conseguenze di un terremoto dipendono anche dalle caratteristiche di resistenza delle costruzioni alle azioni di una scossa sismica. La predisposizione di una costruzione ad essere danneggiata si definisce vulnerabilità. Quanto più un edificio è vulnerabile (per tipologia, progettazione inadeguata, scadente qualità dei materiali e modalità di costruzione, scarsa manutenzione), tanto maggiori saranno le conseguenze.

Infine, la maggiore o minore presenza di beni esposti al rischio, la possibilità cioè di subire un danno economico, ai beni culturali, la perdita di vite umane, è definita esposizione. Il rischio sismico, determinato dalla combinazione della pericolosità, dalla vulnerabilità e dall'esposizione, è la misura dei danni attesi in un dato intervallo di tempo, in base al tipo di sismicità, di resistenza delle costruzioni e di antropizzazione (natura, qualità e quantità dei beni esposti).

Per quanto concerne la sismicità, ai sensi della normativa di settore citata in precedenza, il territorio comunale di **Nurri** ricade in Zona 4 a **bassa pericolosità**, vengono indicati i parametri sismici da utilizzare nelle verifiche secondo quanto previsto dalle NTC 2018.

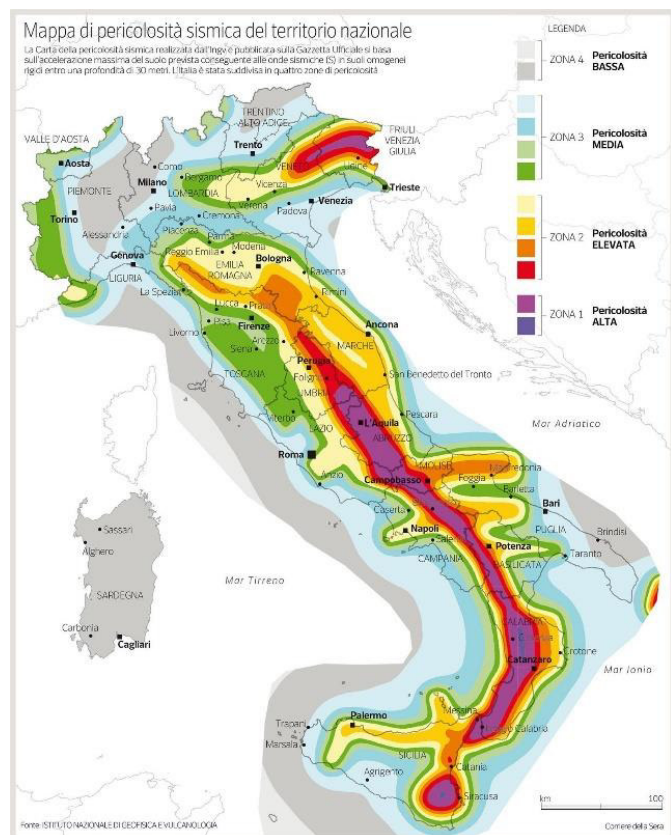


Figura 23 Carta della pericolosità sismica del territorio nazionale

7.1. AZIONE SISMICA

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla "**pericolosità sismica di base**" del sito di costruzione e sono funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale.

Dalla normativa vigente NTC2018 si evince che la pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A come definita al § 3.2.2), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR come definite nel § 3.2.1, nel periodo di riferimento VR, come definito nel § 2.4. inoltre, in alternativa è ammesso l'uso di accelerogrammi, purché correttamente commisurati alla pericolosità sismica locale dell'area della costruzione.

Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento PVR nel periodo di riferimento VR, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

a_g accelerazione orizzontale massima al sito;

F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

T_C^* valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.¹

Per i valori di a_g , F_0 e T_C^* necessari per la determinazione delle azioni sismiche, si fa riferimento agli Allegati A e B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008, pubblicato nel S.O. alla Gazzetta Ufficiale del 4 febbraio 2008, n.29, ed eventuali successivi aggiornamenti.

7.2. VITA NOMINALE, CLASSI D'USO E PERIODO DI RIFERIMENTO

La tipologia di costruzioni previste in progetto (NTC2018 - par.2.4) ha **vita nominale ≥ 50 anni** e appartiene alla **classe d'uso IV**.

¹ Per i valori di a_g , F_0 e T_C^* necessari per la determinazione delle azioni sismiche, si fa riferimento agli Allegati A e B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008, pubblicato nel S.O. alla Gazzetta Ufficiale del 4 febbraio 2008, n.29, ed eventuali successivi aggiornamenti.

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di V_N (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

Figura 24 Valori minimi della Vita nominale V_N di progetto per i diversi tipi di costruzioni.

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U :

$$V_R = V_N \times C_U$$

Il valore del coefficiente d'uso C_U è definito, al variare della classe d'uso, come mostrato in Tab. 2.4.II (Figura 5.3). Nel Caso specifico **$C_U = 2$** .

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_U	0,7	1,0	1,5	2,0

Tabella 1 Valori di coefficiente d'uso C_U

Il valore del periodo di riferimento è **$V_r = 100$**

7.3. AMPLIFICAZIONE STRATIGRAFICA E TOPOGRAFICA

Nel caso di pendii con inclinazione maggiore di 15° e altezza maggiore di 30 m, l'azione sismica di progetto deve essere opportunamente incrementata o attraverso un coefficiente di amplificazione topografica o in base ai risultati di una specifica analisi bidimensionale della risposta sismica locale, con la quale si valutano anche gli effetti di amplificazione stratigrafica

Per le aree di installazione delle turbine la **categoria topografica è la T1** a cui corrisponde un valore del fattore di amplificazione pari a 1.0.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Tabella 2 Categorie topografiche (NTC 2018 3.2 - Tab. 3.2.II)

Tab. 3.2.V – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Tabella 3 Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T (NTC 2018 3.2 - Tab. 3.2.V)

Al fine di definire l'azione sismica di progetto, basata sull'identificazione della categoria del sottosuolo di riferimento, si è voluto definire il parametro fondamentale per la "classificazione sismica dei terreni", e quindi per la determinazione della categoria, **corrispondente alla velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio VS_{30}** , valutata entro i primi 30 m di profondità dal piano campagna ma nel caso specifico relativa alla quota di imposta delle fondazioni.

Per tale scopo, in accordo agli approcci semplificati proposti dal D.M. 17/01/2018 - Tab. 3.2.II (Figura 5.4) la determinazione del parametro delle onde di taglio VS_{30} è stato stimato mediante misura delle velocità sismiche attraverso l'esecuzione di una prospezione geofisica MASW di seguito descritta in dettaglio.

8. INDAGINI GEOGNOSTICHE

Al fine di definire le caratteristiche fisico-meccaniche e sismiche dei terreni di sedime di cui al progetto in data 08.11.2022 dalla ditta GEOSERVICE Snc specializzata nel settore, è stata eseguita una prospezione sismica eseguita con la tecnica MASW.

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".

L'indagine sismica attiva con tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva, che attraverso la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs, è in grado di ricostruire una sismo-stratigrafia atta a permettere la definizione della categoria di suolo ai sensi del Decreto 17/01/2018.

Sono stati eseguiti di n°3 **stendimenti di sismica** con tecnica **MASW**. 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)
M1-TL_SISM_01-TL02	MASW	ESE-WNW	69,0
M2-TL_SISM_02-TL05	MASW	NW-SE	69,0
M3-TL_SISM_03-TL07	MASW	SE-NW	69,0

Tabella 4 Ubicazione degli stendimenti

8.1. 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

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

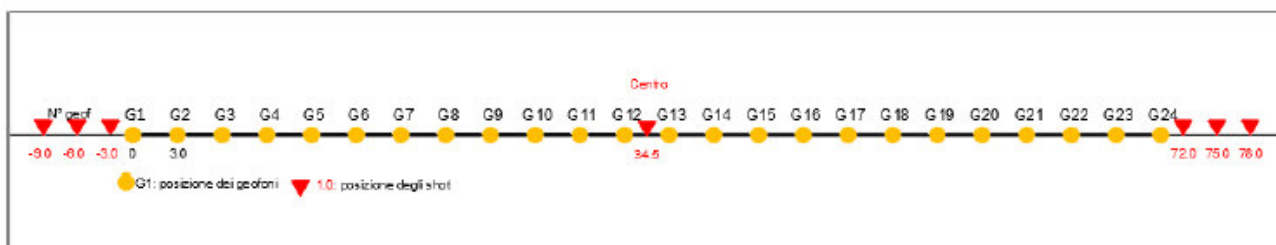
Le onde di Rayleigh decadono a profondità circa uguali alla lunghezza d'onda. Piccole lunghezze d'onda (alte frequenze) consentono di indagare zone superficiali mentre grandi lunghezze d'onda (basse frequenze) consentono indagini a maggiore profondità.

8.1.1. 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 2,0 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



8.1.2. CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, ci siamo avvalsi di una strumentazione di acquisizione DoReMi, prodotto dalla SARA electronicinstruments, 24bit con frequenza di campionamento 1000 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali SARA electronics con frequenza propria di 4.5 Hz. Per l'energizzazione è stata usata una mazza battente da 10 kg impattante su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg..

8.1.3. ELABORAZIONE DEI DATI

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.

8.1.4. 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>

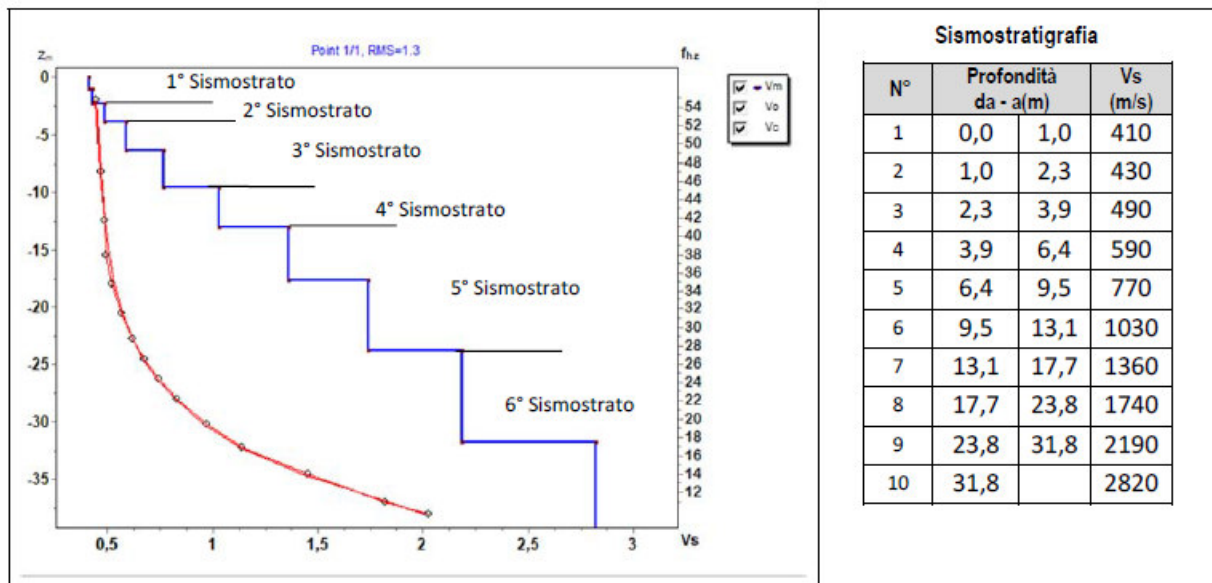
8.2. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO TL_SISM_01-TURBINA TL02

8.2.1. M1-TL_SISM_01-TL02: MASW

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M1-TL_SISM_01-TL02, 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 410 e 430 m/s, Terre mediamente addensate
2,3 – 3,9	2° sismostrato con Vs di 490 m/s, Terre molto addensate e/o rocce intensamente fratturate
3,9 – 9,5	3° sismostrato con Vs tra 590 e 770 m/s, Roccia tenera e/o intensamente fratturata
9,5 – 13,1	4° sismostrato con Vs di 1030 m/s, Substrato roccioso debolmente fratturato
13,1 – 23,8	5° sismostrato con Vs tra 1360 e 1740 m/s, Substrato roccioso sano
23,8–31,8	6° sismostrato con Vs tra 2190 e 2820 m/s, Substrato roccioso sano

MASW M1-TL_SISM_01-TL02 - 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, Vs,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 **9,5 m** ($V_s > 800$ m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **9,5 m** di profondità dal p.c. è pari a: $V_{s,eq} = 9,5/0,0171 = 557$ 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.

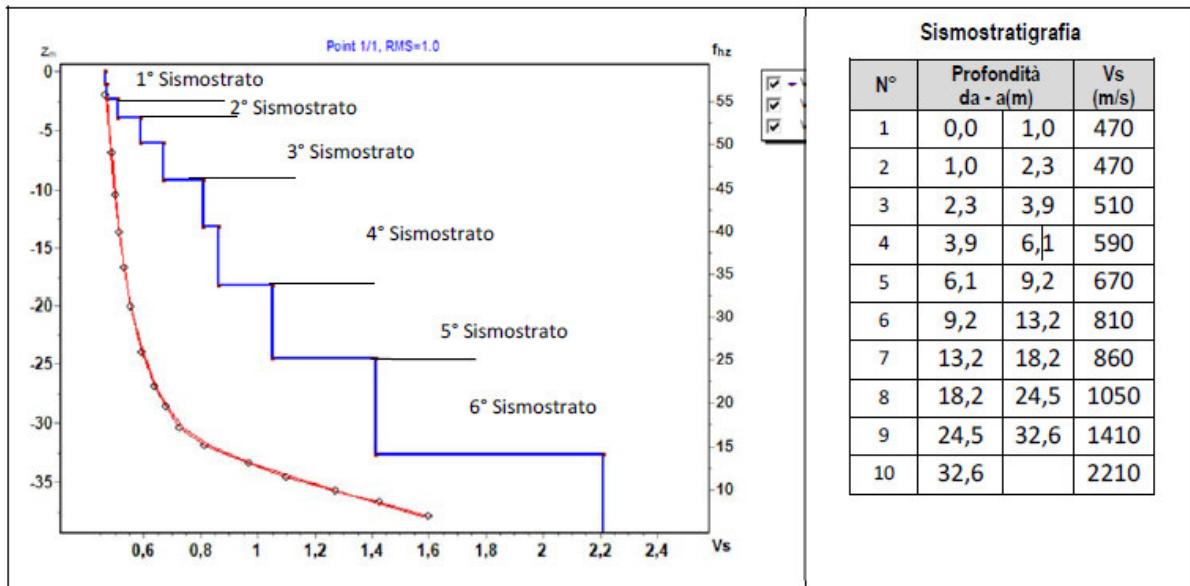
8.3. RISULTATI DELLE INDAGINI SITO TL_SISM_02-TURBINA TL05

8.3.1. M2- TL_SISM_02-TL05: MASW

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M2- TL_SISM_02-TL05, 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 di 470 m/s , Terre mediamente addensate
2,3 – 3,9	2° sismostrato con Vs di 510 m/s , Terre molto addensate e/o roccia intensamente fratturata
3,9 – 9,2	3° sismostrato con Vs tra 590 e 670 m/s , Roccia tenera e/o intensamente fratturata
9,2 – 18,2	4° sismostrato con Vs di 860 m/s , Substrato roccioso fratturato
18,2 – 24,5	5° sismostrato con Vs di 1050 m/s , Substrato roccioso debolmente fratturato
24,5 – 32,6	6° sismostrato con Vs tra 1410 e 2210 m/s , Substrato roccioso sano

MASW M2- TL_SISM_02-TL05 - 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, Vs,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 **9,2 m** ($V_s > 800$ m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **9,2 m** di profondità dal p.c. è pari a: $V_{S,eq} = 9,2/0,0164 = 561$ 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.

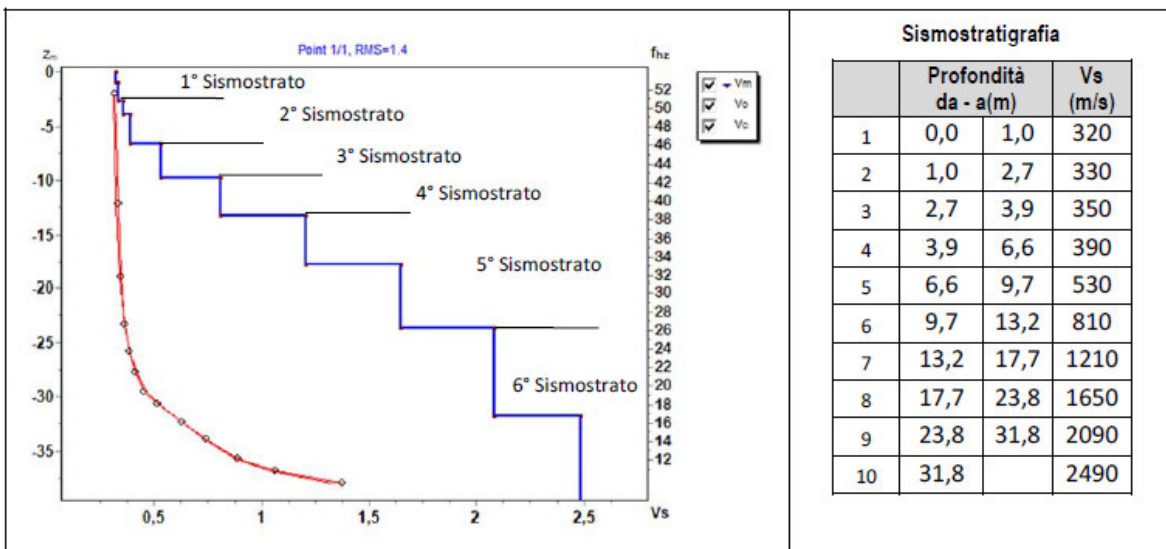
8.4. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO TL_SISM_03-TURBINA TL07

8.4.1. M3-TL_SISM_03-TL07: MASW

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M3-TL_SISM_03-TL07, 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 – 2,7	1° sismostrato con Vs tra 320 e 330 m/s , Terre mediamente addensate
2,7– 3,9	2° sismostrato con Vs di 350 m/s , Terre mediamente addensate
3,9 – 9,7	3° sismostrato con Vs tra 390 e 530 m/s , Roccia tenera e/o intensamente fratturata
9,7 – 13,2	4° sismostrato con Vs di 810 m/s , Substrato roccioso fratturato
13,2 – 23,8	5° sismostrato con Vs tra 1210 e 1650 m/s , Substrato roccioso da debolmente fratturato a sano
23,8 – 31,8	6° sismostrato con Vs tra 2090 e 2490 m/s , Substrato roccioso sano

MASW M3-TL_SISM_03-TL03 - 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, Vs,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 **9,7 m** ($V_s > 800$ m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **9,7 m** di profondità dal p.c. è pari a: **$V_{s,eq} = 9,7/0,0244 = 398$ 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.

8.5. INDICAZIONI PER LA DETERMINAZIONI DEI PARAMETRI GEOMECCANICI

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 litostratigrafico dell'area 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 andamento 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)
M1-TL_SISM_01-TL02	9,5	557	B
M2-TL_SISM_02-TL05	9,2	561	B
M3-TL_SISM_03-TL07	9,7	398	B

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
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 ai 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>

Tabella 5 Tabella 3.2.II del la NTC 2018

8.5.1. PARAMETRI DI PERICOLOSITÀ SISMICA

In base ai dati di localizzazione, tipologia dell'opera e classe d'uso si quindi sono calcolati i parametri sismici relativi alle verifiche SLO, SLD, SLV e SLC. :

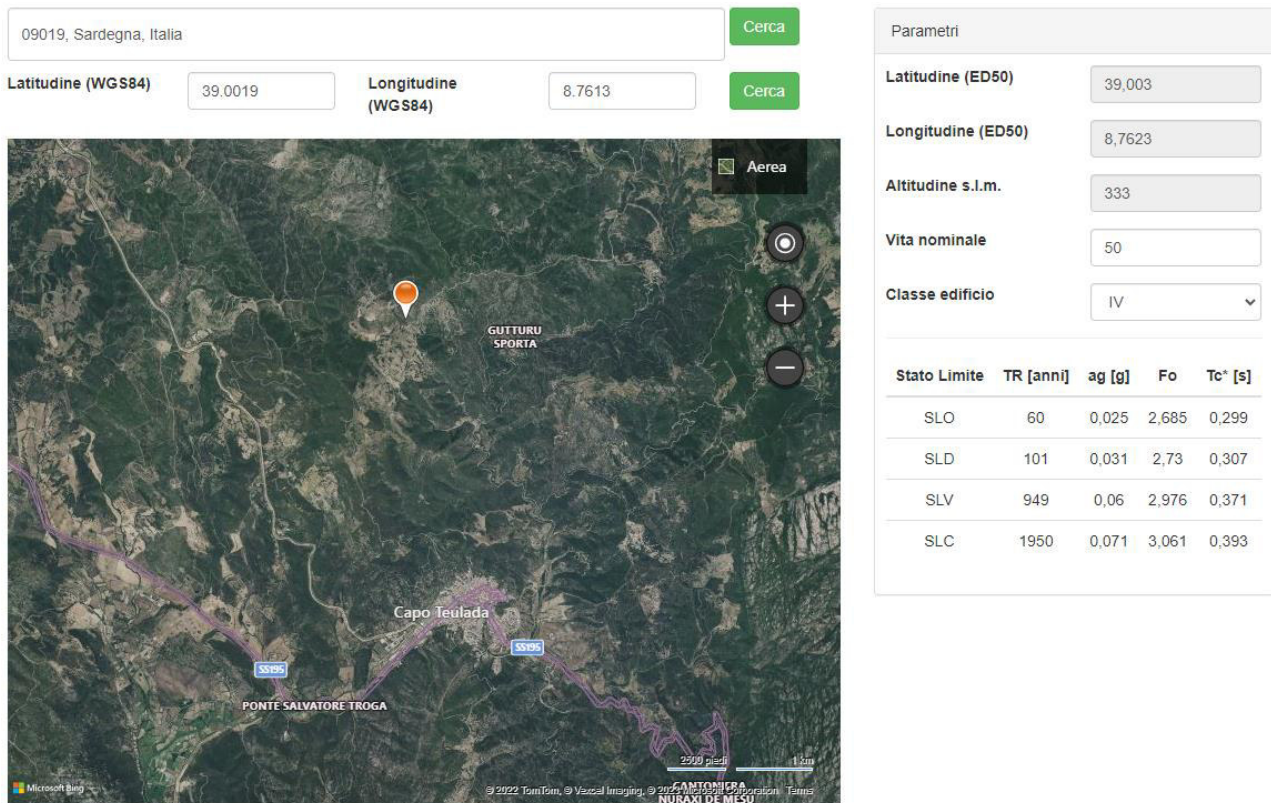


Figura 6.1: Parametri sismici in funzione delle coordinate geografiche del sito

dove:

Stati limite di esercizio

Stati limite ultimi

Stato Limite di Operatività (SLO) **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)**

accelerazione orizzontale

Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC)

Stato Limite di Danno (SLD)
spettro in acc.orizzontale

ag accelerazione orizzontale massima al sito

Fo valore massimo del fattore di ampl.dello spettro in

T*C periodo di inizio del tratto a velocità costante dello

9. CONCLUSIONI

Le indagini geofisiche MASW eseguite hanno permesso di definire le condizioni dei terreni secondo quanto richiesto dalle NTC 2018 in relazione alla pericolosità sismica di base.

I terreni investigati appartengono alla categoria di sottosuolo A – Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi, con velocità equivalenti superiori agli 800m/s e B – Rocce tenere e/o depositi a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con velocità equivalenti comprese tra 398m/s e 557m/s.



Figura 25 - ubicazione delle indagini