

FEBBRAIO 2023

GIUDECCA WIND S.R.L.



**WIND FARM GIUDECCA – IMPIANTO
EOLICO DA 72 MW**

**COMUNE DI MANDAS, GERGEI E
VILLANOVAFRANCA (SUD SARDEGNA)**

Località “Riu Mortoriu”

ELABORATI TECNICI DI PROGETTO

ELABORATO R07

RELAZIONE GEOLOGICA

Mortoriana

Progettista

Ing. Laura Maria Conti – Ordine Ing. Prov. Pavia n. 1726

Coordinamento

Eleonora Lamanna

Matteo Lana

Codice elaborato

2799_5298_GIUD_PD_R07_Rev0_RELGEO.docx



Memorandum delle revisioni

Cod. Documento	Data	Tipo revisione	Redatto	Verificato	Approvato
2799_5298_GIUD_PD_R07_Rev0_RELG EO.docx	02/2023	Prima emissione	G.d.L.	EL	L.Conti

Gruppo di lavoro

Nome e cognome	Ruolo nel gruppo di lavoro	N° ordine
Laura Conti	Direttore Tecnico - Progettista	Ord. Ing. Prov. PV n. 1726
Corrado Pluchino	Responsabile Tecnico Operativo	Ord. Ing. Prov. MI n. A27174
Eleonora Lamanna	Coordinamento Progettazione, Studio Ambientale, Studi Specialistici	
Matteo Lana	Coordinamento Progettazione Civile	
Andrea Amantia	Geologo - Progettazione Civile	
Riccardo Festante	Tecnico competente in acustica	ENTECA n. 3965
Carla Marcis	Ingegnere per l'Ambiente ed il Territorio, Tecnico competente in acustica	Ord. Ing. Prov. CA n. 6664 – Sez. A ENTECA n. 4200
Ali Basharзад	Progettazione civile e viabilità	Ord. Ing. Prov. PV n. 2301
Giancarlo Carboni	Geologo	Ord. Geologi Sardegna n. 497
Mauro Aires	Ingegnere Civile – Progettazione Strutture	Ord. Ing. Prov. Torino – n. 9588
Fabio Lassini	Ingegnere Civile Ambientale – Progettazione Civile	Ord. Ing. Prov. MI n. A29719
Vincenzo Gionti	Ingegnere Civile Ambientale – Progettazione Civile	
Marco Iannotti	Ingegnere Civile Idraulico	
Lia Buvoli	Biologa – Esperto GIS – Esperto Ambientale	

Montana S.p.A.

Via Angelo Carlo Fumagalli 6, 20143 Milano
Tel. +39 02 54 11 81 73 | Fax +39 02 54 12 98 90

Milano (Sede Certificata ISO) | Brescia | Palermo | Cagliari | Roma | Siracusa

C. F. e P. IVA 10414270156
Cap. Soc. 600.000,00 €

www.montanambiente.com





Elena Comi	Biologa – Esperto GIS – Esperto Ambientale	Ord. Nazionale Biologi n. 060746 Sez. A
Lorenzo Griso	Esperto GIS – Esperto Ambientale Junior	
Sara Zucca	Architetto – Esperto GIS – Esperto Ambientale	
Andrea Mastio	Ingegnere per l’Ambiente e il Territorio – Esperto Ambientale Junior	
Andrea Delussu	Ingegnere Elettrico – Progettazione Elettrica	
Matthew Piscedda	Esperto in Discipline Elettriche	
Francesca Casero	Esperto Ambientale e GIS Junior	

Montana S.p.A.

Via Angelo Carlo Fumagalli 6, 20143 Milano
Tel. +39 02 54 11 81 73 | Fax +39 02 54 12 98 90

Milano (Sede Certificata ISO) | Brescia | Palermo | Cagliari | Roma | Siracusa

C. F. e P. IVA 10414270156
Cap. Soc. 600.000,00 €

www.montanambiente.com





INDICE

1. PREMESSA	6
1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL SITO	7
2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO	9
2.1 GEOLOGIA GENERALE DELL'AREA VASTA	9
2.2 SUCCESSIONE STRATIGRAFICA DELL'AREA DI STUDIO	11
2.2.1 Basamento paleozoico.....	11
2.2.2 Cenozoico	11
2.2.3 Quaternario	13
2.3 DESCRIZIONE GEOLOGICA DEL SETTORE INTERESSATO DAGLI AEROGENERATORI	14
3. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	21
4. IDROGEOLOGIA	22
4.1 IDROGRAFIA	22
4.1.1 Caratteri generali	22
4.1.2 Idrografia locale	22
4.2 IDROGEOLOGIA LOCALE.....	22
4.3 CONSIDERAZIONI SUL PERICOLO GEOLOGICO	25
4.4 PERICOLO GEOMORFOLOGICO	25
4.5 PERICOLO IDRAULICO	25
5. TETTONICA	26
5.1 FAGLIE ATTIVE E CAPACI (ITHACA).....	27
5.1.1 Faglia di Samassi	28
5.1.2 Faglia di San Sperate.....	28
5.1.3 Faglia di San Gavino-Sardara	29
6. DESCRIZIONE DELLE INDAGINI GEOFISICHE MASW	30
6.1 RISULTATI DELLE INDAGINI SISMICHE MASW	30
6.2 APPLICABILITÀ DEL METODO SEMPLIFICATO	32
6.3 VS EQUIVALENTE	32
6.4 CORRELAZIONI GEOTECNICHE DA INDAGINI SISMICHE MASW	32
6.4.1 Correlazione ϕ -Vs	32
6.4.2 Correlazione Cu-Vs.....	33
6.4.3 Portanza	33
6.4.4 Tabelle dei parametri geotecnici estrapolati dalle indagini sismiche	33
6.5 RISULTATI DELLA SISMICA A RIFRAZIONE.....	35
6.5.1 Sismostratigrafia da rifrazione	35
6.6 MODULI DINAMICI	38
6.6.1 Modulo di Young (Ey)	38
6.6.2 Modulo di Taglio o di Rigidità (G).....	38
6.6.3 Modulo compressibilità volumetrica (Ev).....	39
6.6.4 Coefficiente di Poisson (ν)	39
6.6.5 Tabelle dei moduli dinamici	39
6.7 SCAVABILITÀ DEL SUBSTRATO	41



7.	RISPOSTA SISMICA	42
7.1	SISMICITÀ STORICA	42
7.2	TRACCE DI PALEOSISMICITÀ.....	43
7.3	SISMICITÀ STORICA	44
7.4	CARATTERIZZAZIONE SISMOGENETICA	47
8.	PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE	48
8.1	DEFINIZIONE DELLA CATEGORIA DEL SUOLO DI FONDAZIONE.....	49
8.2	PARAMETRIZZAZIONE SISMICA E AZIONE SISMICA	50
9.	MODELLO GEOLOGICO E GEOTECNICO DI RIFERIMENTO	53
9.1	STRATIGRAFIA SCHEMATICA E PARAMETRIZZAZIONE GEOTECNICA	53
9.2	STRATIGRAFIA AREA DI SEDIME TIPICA	53
9.3	PIANO DI INDAGINI PER LA PROGETTAZIONE DEFINITIVA.....	54
10.	CONCLUSIONI	57
	APPENDICE: INDAGINI SISMICHE MASW	58

ELABORATI GRAFICI

TAVOLA R07_T01 Planimetria indagini

TAVOLA R07_T02 Carta geologica

ALLEGATO/APPENDICE

APPENDICE Indagini sismiche MASW



1. PREMESSA

Il progetto in esame riguarda la realizzazione di un nuovo Parco Eolico della potenza complessiva di 72 MW, che prevede l'installazione di n. 12 aerogeneratori da 6,0 MW, da installarsi nei territori comunali di Mandas, Gergei e Villanovafranca, nella Provincia del Sud Sardegna.

Si precisa che l'attribuzione dei Comuni alla Provincia del Sud Sardegna fa riferimento alla situazione amministrativa attuale (L.R. n. 2 del 4 febbraio 2016 - "Riordino del sistema delle autonomie locali della Sardegna").

Con la LR n.7 del 12 aprile 2021 la Regione Sardegna viene riorganizzata in 8 Province: Città Metropolitana di Sassari, Città Metropolitana di Cagliari, Nord-Est Sardegna, Ogliastra, Sulcis Iglesiente, Medio Campidano, Nuoro e Oristano, pertanto i Comuni interessati dalle opere ricadrebbero nella Provincia del Medio Campidano (Villanovafranca) e nella nuova Città Metropolitana di Cagliari (Mandas e Gergei). Tale legge è però stata impugnata dal governo italiano, che ha bloccato l'iter di attuazione in attesa del pronunciamento della Corte costituzionale e il 12 marzo 2022 la Consulta si è pronunciata a favore della Regione Autonoma della Sardegna, dando di fatto il via libera alla re-istituzione delle Province. Pertanto, allo stato attuale dovrebbero essere attive le nuove Province, che di fatto non lo sono in quanto sono in attesa dei pronunciamenti referendari dei residenti dei Comuni di confine e il rinvio al 2025 della data per "l'effettiva operatività di Città metropolitane e Province", con un'ulteriore coda di sei mesi, necessaria per l'auspicata elezione diretta dei Consigli comunali e metropolitani¹.

La Società Proponente è la Giudecca Wind 1 S.R.L., con sede legale in Via Friuli Venezia Giulia 75, 30030 Pianiga (VE).

Tale opera si inserisce nel quadro istituzionale di cui al D.Lgs. 29 dicembre 2003, n. 387 "Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità" le cui finalità sono:

- promuovere un maggior contributo delle fonti energetiche rinnovabili alla produzione di elettricità nel relativo mercato italiano e comunitario;
- promuovere misure per il perseguimento degli obiettivi indicativi nazionali;
- concorrere alla creazione delle basi per un futuro quadro comunitario in materia;
- favorire lo sviluppo di impianti di microgenerazione elettrica alimentati da fonti rinnovabili, in particolare per gli impieghi agricoli e per le aree montane.

La Soluzione Tecnica Minima Generale (STMG) elaborata, prevede che l'impianto eolico venga collegato in antenna a 150 kV sulla sezione a 150 kV di una futura Stazione Elettrica (SE) di Trasformazione RTN 380/150 kV da inserire in entra – esce alla linea RTN 380 kV "Ittiri - Selargius". Tale SE è in progetto in un'area posta a circa 20 km in direzione Sud-Ovest dal layout.

La connessione tra la SE Terna e il parco eolico verrà realizzata mediante una linea interrata AT a 150 kV, di circa 20 km, tra lo stallo dedicato in stazione Terna e la sottostazione elettrica utente (SSEU) dove avverrà la trasformazione AT/MT. La cabina generale MT raccoglierà i cavi provenienti dai singoli aerogeneratori.

Nel suo complesso il parco di progetto sarà composto da:

- N° 12 aerogeneratori della potenza nominale di 6.0 MW ciascuno
- Dalla viabilità di servizio interna realizzata in parte ex-novo e in parte adeguando strade comunali e/o agricole esistenti
- Dalle opere di regimentazione delle acque meteoriche

¹ <https://www.lanuovasardegna.it/regione/2022/11/08/news/le-nuove-province-sarde-saranno-operative-solo-fra-quattro-anni-1.100139202>

- Da un cavidotto di tensione pari a 30 kV interrato
- Da una cabina MT SSE utente interna all'area del parco
- Da una stazione utente di trasformazione 30/150 kV
- Da una connessione in antenna a 150 kV ad una costruenda SE
- Dalle reti tecnologiche per il controllo del parco

A tal fine il presente documento costituisce la **Relazione Tecnica Generale** del progetto.

1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL SITO

Il parco eolico in progetto si estende nei territori comunali di Villanovafranca, Mandas e Gergei, al di fuori dei centri abitati. Il progetto prevede l'installazione di n. 12 aerogeneratori così collocati (Figura 1.1):

- n. 4 aerogeneratori in Comune di Mandas;
- n. 1 aerogeneratore in Comune di Gergei;
- n. 7 aerogeneratori in Comune di Villanovafranca.

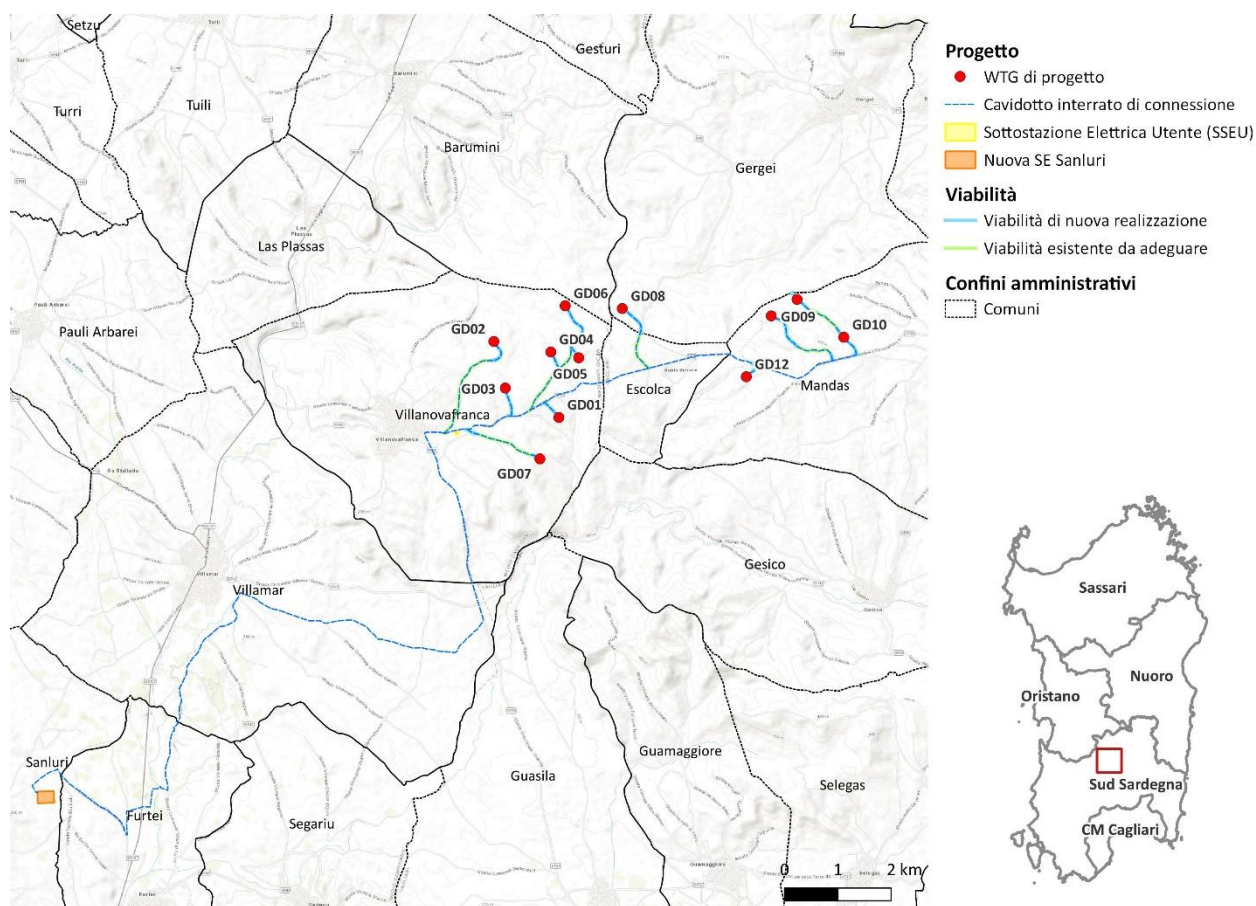


Figura 1.1: Localizzazione a scala regionale, provinciale e comunale dell'impianto proposto.

La sottostazione di trasformazione sarà ubicata nel territorio comunale di Villanovafranca, complessivamente la linea di connessione attraverserà i territori comunali di Mandas, Escolca, Villanovafranca, Villamar, Furtei e Sanluri.

Le coordinate degli aerogeneratori previsti sono riportate in Tabella 1-1.

Tabella 1-1: Coordinate degli aerogeneratori previsti (EPSG 3003).

WTG	X	Y
GD01	1503242,9	4388449,4
GD02	1502022,8	4389874,9
GD03	1502237,6	4389001,8
GD04	1503091,0	4389678,0
GD05	1503614,9	4389569,8
GD06	1503361,1	4390544,8
GD07	1502887,2	4387673,9
GD08	1504431,1	4390492,8
GD09	1507225,4	4390355,4
GD10	1508587,2	4389955,3
GD11	1507710,3	4390664,1
GD12	1506758,2	4389214,5

L'accesso al sito avverrà mediante strade pubbliche esistenti a carattere nazionale e provinciale partendo dal vicino porto industriale Cagliari o in alternativa da quello poco più distale di Portovesme.

All'interno dell'area dell'impianto verranno utilizzate come viabilità primaria le strade statali SS128 e SS197; la Strada Provinciale SP36 rappresenta il perno delle viabilità secondaria, permettendo di raggiungere facilmente le aree per la costruzione degli aerogeneratori, mediante strade secondarie (asfaltate e/o sterrate) esistenti e mediante la realizzazione di apposite piste.

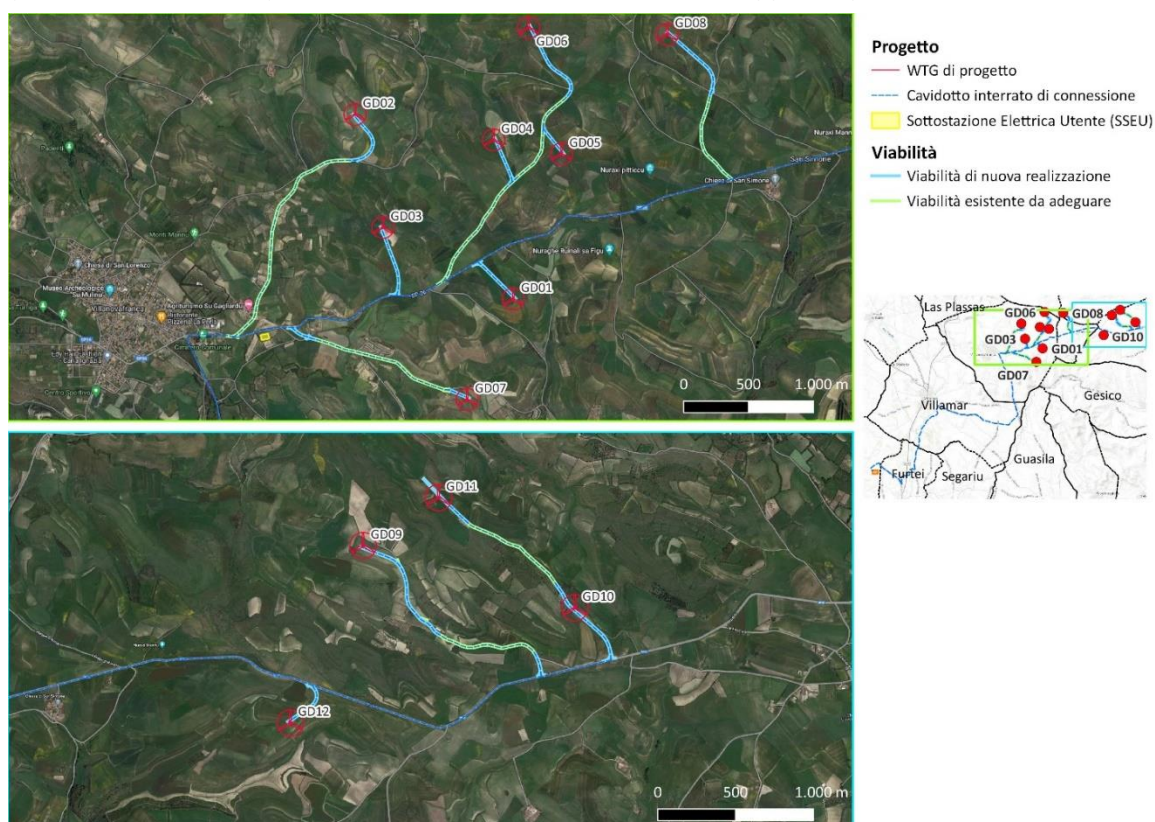


Figura 1.2: Inquadramento della viabilità di progetto.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

2.1 GEOLOGIA GENERALE DELL'AREA VASTA

L'area in studio ricade nel Foglio della Carta Geologica d'Italia 226 "Mandas" (scala 1:100.000) e nel Foglio CARG della Carta Geologica d'Italia 540 "Mandas" (scala 1:50.000), si estende nella regione della Marmilla che rappresenta il margine nord-orientale del graben del Campidano, generatosi durante la fase distensiva che interessa buona parte dell'isola a partire dal Miocene superiore fino al Plio-Pleistocene. In questa regione affiorano prevalentemente terreni sedimentari della successione oligo-miocenica del Campidano-Sulcis (Formazione di Nurallao, Formazione della Marmilla, Marne di Gesturi) legata al rift oligo-miocenico sardo noto come "Fossa sarda", le quali poggiano in discordanza sul basamento paleozoico rappresentato dalla Formazione di Pala Manna.

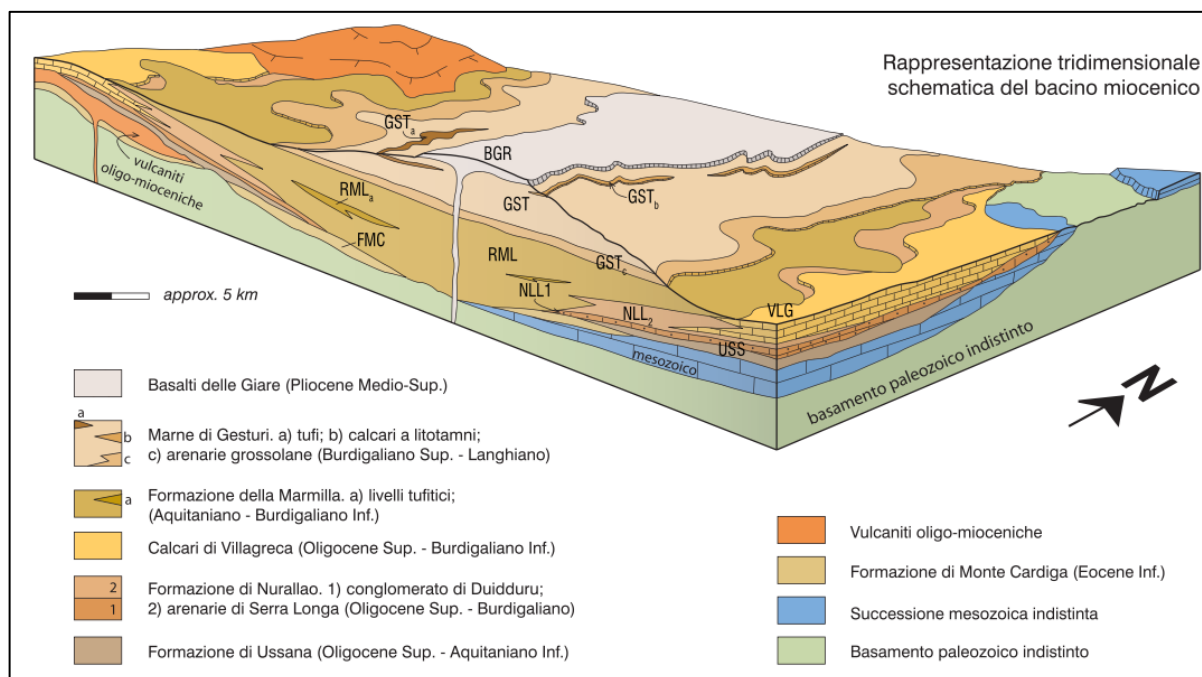


Figura 2.1: Schema dei rapporti stratigrafici (Estratto da Foglio CARG 540 "Mandas").

Per la Sardegna, gli affioramenti Paleozoici costituiscono il basamento su cui insistono le formazioni geologiche studiate nell'area, questi non sono direttamente affioranti nell'area interessata dalla realizzazione degli aerogeneratori, ma sono affioranti nel settore orientale dell'area vasta in studio.

Gli affioramenti paleozoici diffusi in Sardegna, e i suoi principali elementi strutturali sono suddivisi in, "Batolite granitico tardo-ercinico", il "Complesso Metamorfo di Alto Grado", le "Falde interne", le "Falde esterne", la "Zona esterna" e le Coperture post - erciniche (Barca & Maxia, 1982), in particolare nell'area oggetto di questo lavoro sono rappresentate le unità delle "Falde Esterne" e il Complesso intrusivo tardo paleozoico.

Gli affioramenti paleozoici diffusi nell'Isola testimoniano l'originario sviluppo del basamento cristallino paleozoico, la successiva intensa attività tettonica ha portato all'apertura del graben noto come Fossa Sarda, limitato a oriente dai rilievi paleozoici (horst).

Nell'area oggetto di questo lavoro sono rappresentate le unità delle "Falde Esterne" e il Complesso intrusivo tardo paleozoico.



Le prime sono caratterizzate da coperture metasedimentarie di età compresa tra il Cambriano e il Carbonifero inferiore, messe in posto durante le fasi di compressione dell'Orogenesi ercinica durante movimenti di direzione da NE a SW, in seguito piegate da un tardivo e debole metamorfismo.

Nella zona l'unità tettonica è costituita da varie formazioni metamorfosate prevalentemente sedimentarie denominate Arenarie di San Vito (metarenarie generalmente quarzoso - micacee o quarzoso - feldspatiche, alle quali spesso si intercalano livelli di metasiltiti e metargilliti, conglomerati poligenici ed eterometrici e metasiltiti carboniose).

Il Complesso intrusivo tardo Paleozoico è composto da un'associazione plutonica calcicalina metalluminosa caratterizzata da una grande eterogeneità compositiva, essendo rappresentato da gabbri, dioriti, tonaliti, granodioriti, monzograniti, e leucograniti. Tali litologie occupano l'intera area montana e pedemontana posta a nord del territorio comunale.

Inoltre, le litologie del Paleozoico sono state marcate dalla tettonica ercinica, i sedimenti più recenti affioranti nell'area in esame sono stati deformati dalla tettonica trascorrente oligo-miocenica, in conseguenza agli eventi geodinamici connessi con l'apertura del Mediterraneo occidentale.

All'Eocene segue un periodo di instabilità tettonica durante le fasi dell'orogenesi alpina che hanno favorito, a partire dall'Oligocene Superiore, sia l'ingressione marina nella fossa campidanese con conseguente formazione di depositi tipici di questo ambiente che un'intensa attività eruttiva da riolitica a basaltica in tutto il settore centro-occidentale dell'isola.

La sedimentazione marina riprende nel Miocene medio sulle potenti sequenze vulcaniche e clastiche sintettoniche. In questo periodo un'estesa area con andamento circa nord-sud, che va dal Logudoro al Campidano di Monastir-Furtei, è caratterizzata da un'imponente tettonica che originerà il "Rift Sardo", contemporanea all'attività vulcanica del ciclo calcicalino, con produzione di litotipi effusivi ed esplosivi di composizione basalto-andesitica e riolitica, i cui primi esempi sono attribuibili alla base del Miocene (Aquitano).

Le fasi vulcaniche che caratterizzano il settore in esame sono date dalla serie Andesitica (Oligocene inferiore) del ciclo vulcanico calcicalino oligo-miocenico. In questo periodo si manifesta una tettonica transtensiva che riattiva le faglie erciniche con conseguente risalita di magmi cristallini. In contemporanea alla messa in posto del ciclo vulcanico, si verifica un'importante tettonica trascorrente, con faglie trascorrenti sinistre orientate NE-SW e faglie destre minori in direzione E-W. La tettonica trascorrente ha creato una serie di bacini di pull-apart colmati dalle successive sequenze vulcanoclastiche, e rappresenta la più importante fase compressiva dopo l'orogenesi ercinica. La compressione ha generato una sedimentazione di tipo continentale nel settore in esame, che sfuma a sedimentazione marina nel resto dell'isola, nota come 1° ciclo sedimentario marino del Burdigaliano medio-superiore.

A partire dal Burdigaliano superiore inizia una nuova fase trasgressiva con la deposizione della successione sedimentaria del 2° ciclo miocenico, discordante non solo sui depositi del 1° ciclo, ma anche sul basamento paleozoico. La successione inizia con conglomerati e arenarie e prosegue con depositi marini più distali, costituiti da marne in alternanza ad arenarie fini. Spesso tra i due cicli si interpongono potenti depositi vulcanici, presenti nella Sardegna centrale in poche località, ma comuni nella parte settentrionale dell'isola. Gran parte di quest'attività vulcanica si esaurisce al Burdigaliano superiore, ma ancora nel Langhiano sono segnalate manifestazioni vulcaniche, anche all'interno del Foglio Mandas.

Nell'area la ripresa della sedimentazione avviene con una scarsa produzione di depositi grossolani basali che, dove presenti, mostrano peraltro un limitato spessore. La distinzione della base del II ciclo miocenico è a volte difficoltosa a causa della somiglianza litologica tra la formazione della Marmilla, a tetto del 1° ciclo, e la base della successione discordante costituita nel Foglio dalle "Marne di Gesturi", nonché per l'assenza di depositi vulcanici interposti.

Ad occidente dell'area in studio si distende la piana del Campidano, la sua formazione è dovuta ad una continuazione della tettonica distensiva Pliocenica, anche se l'intensità andava sempre più scemando, mostrando rigetti assai più modesti (intorno ai 10-20 m al massimo). Nonostante la continuità di



sedimentazione la Fossa del Campidano si distingue dalla Fossa Sarda perché contiene la formazione di Samassi (complesso marnoso-arenaceo-conglomeratico continentale, potente 400-500 m), sintettica, tipica di un ambiente di sedimentazione in rapida subsidenza, formatasi soprattutto a spese dei sedimenti Miocenici. Tutto ciò documenta quindi un forte sollevamento della serie miocenica ai bordi del Campidano, e per contro, un abbassamento del Campidano.

Nel Quaternario l'attività erosiva e di trasporto dei torrenti determinano l'attuale configurazione del settore in esame. L'area è stata quindi interessata da una fase di continentalità, nella quale i fenomeni erosivi sono stati preponderanti.

Nel plio-quaternario si è poi avuta la messa in posto delle coperture basaltiche visibili presso la Giara di Gesturi e nel Pranu Siddi; quest'ultimo evento magmatico è ben distinto dal ciclo magmatico sardo oligo-miocenico.

I sedimenti quaternari attualmente osservabili in affioramento sono di modesto spessore e limitati dalle incisioni di paleoalvei, l'intensità di tali incisioni non trovano giustificazione nella modesta energia dei torrenti attuali, questi in passato, in condizioni climatiche ben più umide di quelle attuali, dovevano essere delle vere e proprie fiumare.

2.2 SUCCESIONE STRATIGRAFICA DELL'AREA DI STUDIO

2.2.1 Basamento paleozoico

Gli affioramenti paleozoici sono limitati al settore a est di Mandas, e sono essenzialmente rappresentati da alternanze di metasiltiti e metarenarie micacee dalla Formazione di Pala Manna (PMN), la quale costituisce il basamento della successione terziaria su cui insistono le fondazioni degli aerogeneratori in progetto. In misura minore dagli affioramenti di metapeliti carboniose con livelli di diaspri neri (liditi) e di metacalcari grigi della Formazione degli Scisti a Graptoliti (SGA).

2.2.2 Cenozoico

Il miocene in affioramento è il risultato della sedimentazione principalmente marina del 1° ciclo miocenico dove si passa dai sedimenti clastici d'ambiente continentale della Formazione di Ussana (USS), ai sedimenti marino transizionali della Formazione di Nurallao (NLL), mentre al 2° ciclo miocenico è riferibile la Formazione delle Marne di Gesturi. Questi sedimenti sono riconducibili litologicamente a vari ambienti marini, da mediamente profondi a circa litorali. Infatti, alla base dei rilievi paleozoici rappresentano la paleo-linea di costa miocenica, per poi passare a litologie meno terrigene, in prevalenza marnose, verso il Golfo di Cagliari. I litotipi miocenici scompaiono verso il golfo di Cagliari sotto i sedimenti marini quaternari ed emergono nuovamente nelle colline di Cagliari.

Formazione di Nurallao

La Formazione di Nurallao (NLL) è spessa oltre 200 metri e costituita da successioni arenaceo-conglomeratiche, talora con componente vulcanica, di ambiente transizionale e marino. Si tratta di una formazione litologicamente eterogenea e riconducibili ad ambienti sedimentari diversi, documentati da facies transizionali, fino a facies pelagiche.

La parte sommitale è formata prevalentemente da arenarie più o meno grossolane con stratificazione incrociata, arenarie siltose a grana fine che passano a marne e conglomerati poligenici ed eterometrici (Arenarie di Serra Longa), mentre i livelli inferiori – basali denominati "Conglomerati di Duidduru" sono costituiti da conglomerati poligenici e sabbie con locali livelli biocalcarenitici con sporadica componente vulcanica. Costituiscono in parte il substrato dell'abitato di Barrali ed è abbondantemente presente presso l'area in studio.

Il contenuto fossilifero e la posizione stratigrafica di questa successione indicano un intervallo di tempo dall'Oligocene superiore fino al Burdigaliano inferiore.

Formazione della Marmilla (RML)

Costituisce una successione sedimentaria caratteristica della porzione centro-meridionale del bacino sedimentario del I ciclo miocenico. È costituita da un'alternanza da decimetrica a metrica, spesso monotona, di siltiti e arenarie, spesso marne siltitiche, con stratificazione parallela e abbondante contenuto in foraminiferi e altri organismi planctonici. Talvolta si rinvencono bancate inferiori al metro di arenarie medio-grossolane. Nel settore compreso tra Gergei, Gesico e Barumini, sono frequenti banchi di arenaria grossolana a forte componente vulcanoclastica e scarsa cementazione carbonatica (tufiti arenacee) associati a livelli di tufi cineritici contenenti localmente pomici alterate.

Marne di Gesturi

La serie miocenica prevalentemente affiorante è quella della Formazione delle Marne di Gesturi, costituiscono la parte sommitale della successione miocenica del settore. La successione è sovente ricoperta da spesse coltri di depositi colluviali, con formazione di notevoli spessori di suolo che ne impediscono una buona esposizione.

È costituita da una successione prevalentemente marnoso-arenacea (GST), al cui interno sono stati distinti: conglomerati basali e sabbie di ambiente transizionale, banchi calcarenitici e, nella parte alta, livelli piroclastici e tufiti. Si tratta prevalentemente di una successione, potente alcune centinaia di metri, costituita da un'alternanza monotona di marne arenacee e siltitiche con subordinate intercalazioni di arenarie.

Alla base in genere si rinvencono depositi clastici grossolani, conglomerati, arenarie e sabbie con matrice argillosa. Il conglomerato affiora in modo assai discontinuo, assume raramente spessori superiori ad 1 m, generalmente in lenti, ha carattere matrice-sostenuto, con matrice arenacea, ma localmente appare ben cementato da abbondante cemento carbonatico.

Le marne di Gesturi poggiano in discordanza sulle sottostanti formazioni del I ciclo miocenico, sia sulla formazione della Marmilla che su quella di Nurallao, e talvolta direttamente sul basamento paleozoico.

Il tetto della formazione è sempre eroso e talvolta ricoperto dagli espandimenti basaltici pliocenici.

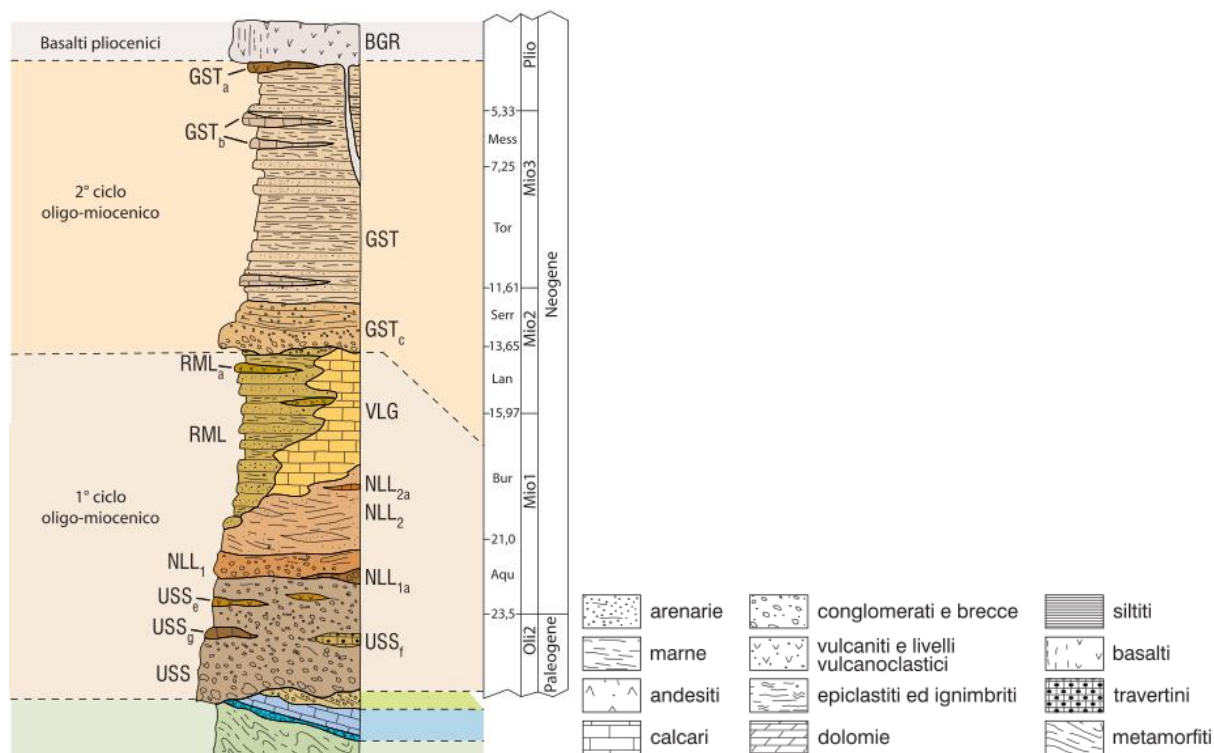


Figura 2.2: Colonna stratigrafica delle successioni terziarie (Estratto da Foglio CARG 540 “Mandas”).

2.2.3 Quaternario

Depositi alluvionali terrazzati

Durante l’inizio dell’Olocene nell’area in studio si formano dei depositi alluvionali terrazzati (bna) riconducibili ad un ambiente di dominio alluvionale e fluviale. Questi depositi sono costituiti da ghiaie con subordinate sabbie e hanno uno spessore variabile di circa 4-5 metri. Si ritrovano in genere nei fondovalle in corrispondenza di fiumi e torrenti e bordano i rilievi paleozoici e le colline mioceniche.

Depositi colluviali

Agli ultimi 10.000 anni e in condizioni climatiche relativamente più calde, si deve la formazione dei depositi eluvio – colluviali olocenici (b2) costituiti da detriti grossolani immersi in matrice sabbioso – silteosa, generalmente sciolti, di spessore generalmente ridotto tanto che in carta sono stati riportati i corpi più rilevanti.

Depositi alluvionali

Il divagare dei corsi d’acqua, nel corso del Quaternario, ha portato alla formazione delle zone di pianura costituite da depositi alluvionali ghiaiosi olocenici (ba) di granulometria da media a grossolana con lenti sabbiose, sciolti, molto permeabili. Le caratteristiche di questi sedimenti, costituiti da elementi a granulometria prevalentemente sabbiosa e sabbioso conglomeratica, sono formate da quarzo, feldspato potassico, tracce di biotite e frammenti litici di dimensioni almeno decimetriche. I ciottoli sono in genere piuttosto elaborati, di forma generalmente irregolare, di litologia prevalentemente metamorfica e subordinatamente granitica, poiché questi ultimi, presentando diffusi fenomeni di alterazione, si disgregano sotto l’azione del trasporto idrico e a causa dei fenomeni pedogenetici. Il colore rossastro di questi depositi è legato ai fenomeni di ossidazione della frazione argillosa in ambiente subaereo con formazione di ematite.



2.3 DESCRIZIONE GEOLOGICA DEL SETTORE INTERESSATO DAGLI AEROGENERATORI

Nell'area in questione si rinvencono delle alternanze deposizionali riconducibili alla "formazione di Nurallao", affiora nell'area con sostanziale continuità da Siurgus Donigala a Donori. Altri importanti affioramenti caratterizzano poi l'area tra Ortacesus, Pimentel e Nuraminis. Precedentemente questa formazione era in parte conosciuta come "arenarie di Gesturi", ma per omonimia con le "marne di Gesturi", in accordo con le norme internazionali, il nome è stato così modificato. Inoltre, la parte conglomeratica basale della formazione, seppure di ambiente marino, era talvolta associata alla formazione di Ussana.

Marca l'inizio delle deposizioni sedimentarie marine ed è suddivisa in due membri in base alla profondità di sedimentazione, quindi all'ambiente di deposizione: "conglomerato di Duidduru" (NLL 1) e "arenarie di Serra Longa" (NLL 2).

Il conglomerato di Duidduru consiste in depositi conglomeratici a ciottoli eterometrici da arrotondati a subarrotondati, in matrice spesso carbonatica, con locali lenti arenacee e rare intercalazioni di biocalcareni. La composizione dei depositi rispecchia quella del substrato rimaneggiato, costituito in prevalenza dalle arenarie di San Vito dell'Unità tettonica del Sarrabus e localmente da rocce granitoidi (Donori). La matrice è grossolana, mediamente cementata. Localmente presenta blocchi di dimensioni di alcune decine di metri cubi di rocce metamorfiche, interpretati come olistoliti franati lungo scarpate di faglia attive sui bordi del bacino di sedimentazione.

Il membro delle arenarie di Serra Longa consiste di arenarie, da molto a poco cementate, con locale presenza di livelli di ciottoli paleozoici; talora, si passa a vere e proprie sabbie molto pulite, che, come il membro sottostante, vengono ampiamente cavate. Localmente sono presenti livelli di calcareniti e/o arenarie carbonatiche fossilifere (NLL 2a) di spessore solitamente non superiore ai 50 cm. Raramente si rinvencono al suo interno ciottoli e blocchi di litologie appartenenti al basamento paleozoico, testimoni di un'intensa attività erosiva sui bordi del bacino di sedimentazione.

Lo spessore complessivo della formazione di Nurallao è piuttosto variabile, ma sembrerebbe non superare i 100 m. Rappresenta la prima testimonianza di sedimentazione in ambiente marino, in ambienti da transizionali a prossimali-litorali contigui a quelli continentali della formazione di Ussana durante il "1 ciclo".

Verso l'alto e lateralmente per parziale eteropia, questa formazione passa a quella della Marmilla (RML) ed ai calcari di Villagreca (VLG).

In particolare, nell'area in studio si rinvencono alternanze di arenaree poco cementate, quasi sciolte (sabbie) con livelli arenacei decisamente più competenti, distribuite in lenti sub orizzontali con spessore da decimetrico a più che decimetrico, almeno in parte sub affiorante nell'area in studio.

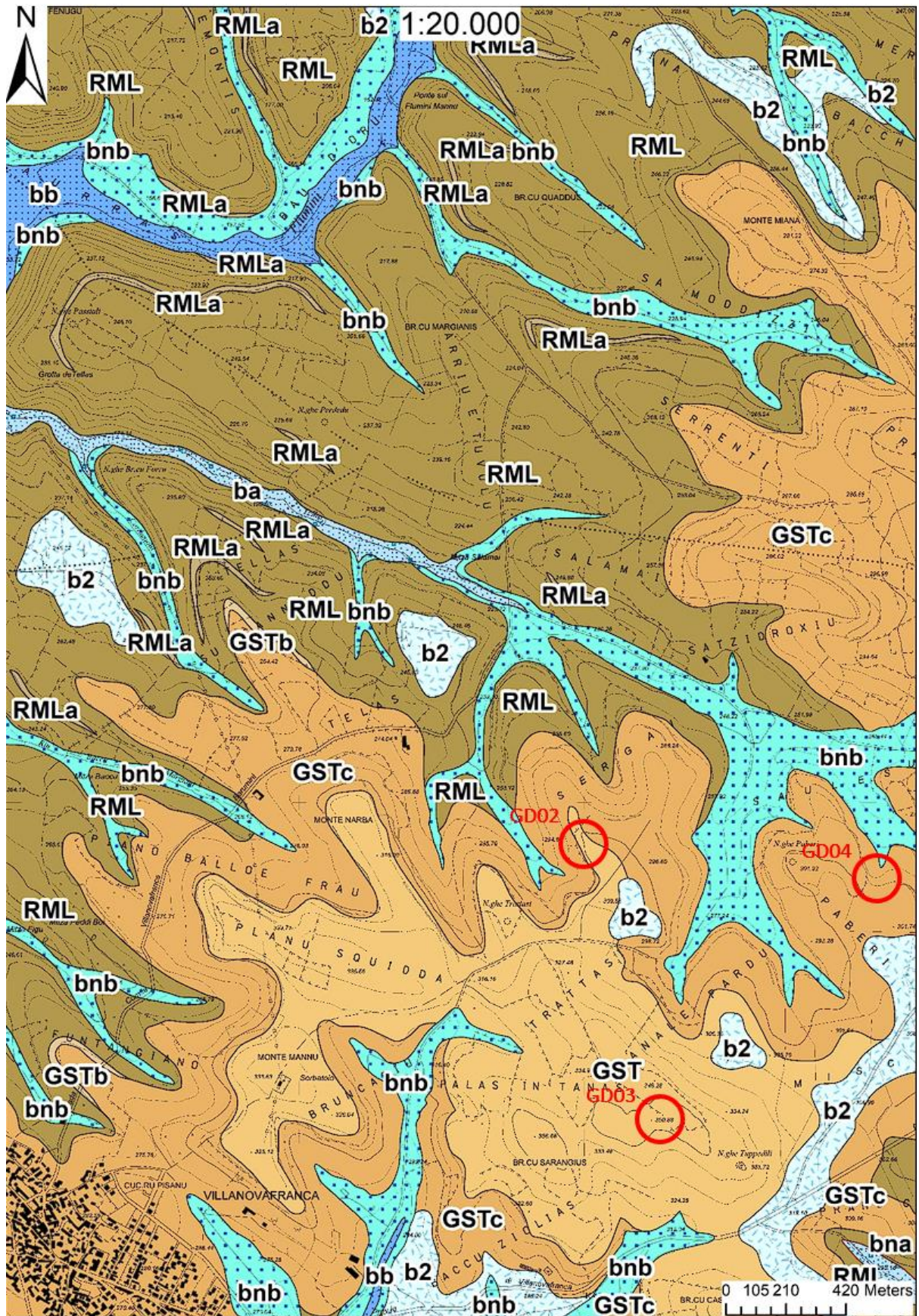


Figura 2.3: Cartografia geologica di dettaglio, aerogeneratori GD02, GD03 e GD04.

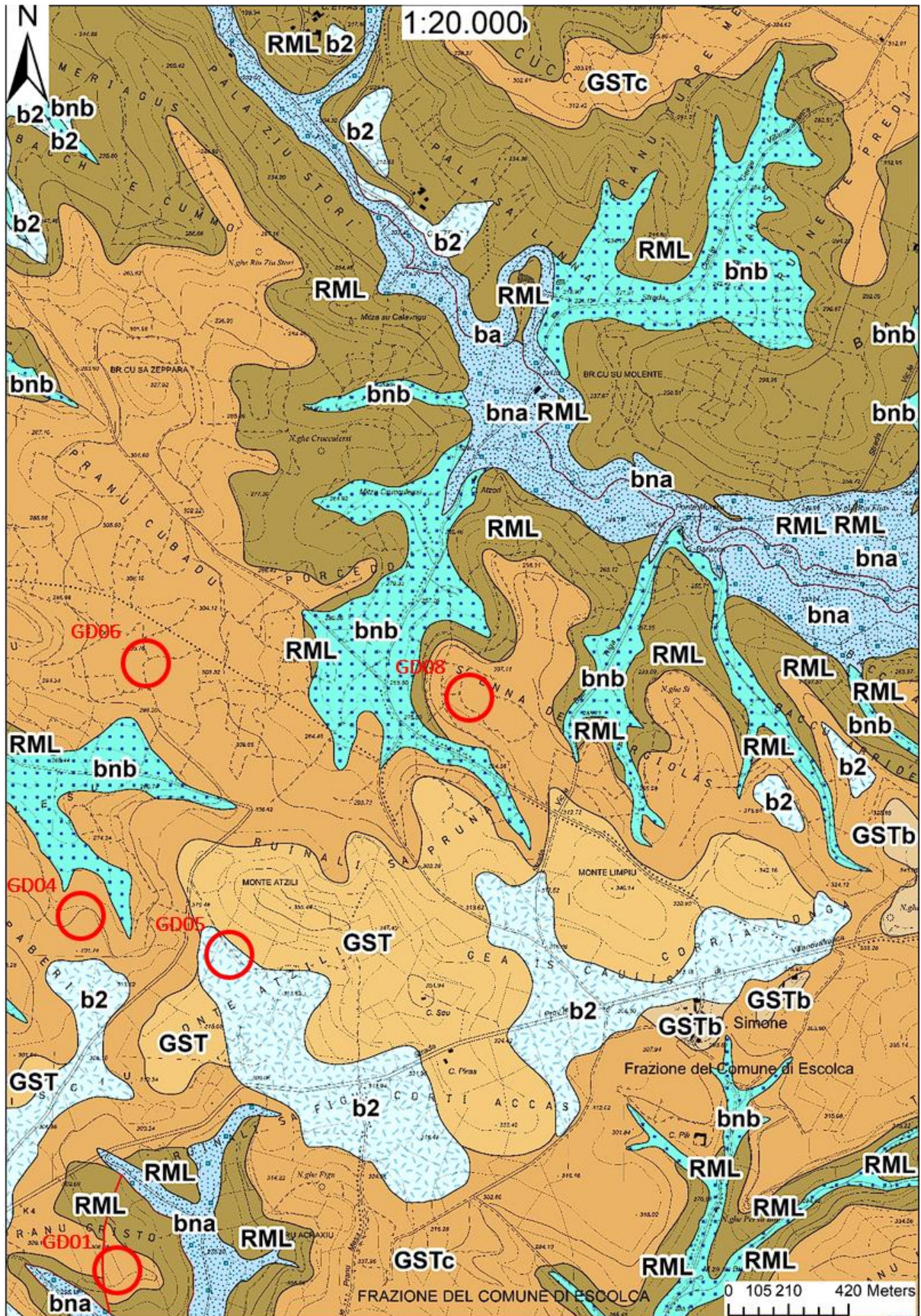


Figura 2.4: Cartografia geologica di dettaglio, aerogeneratori GD01, 04, 05, 06 e 08.

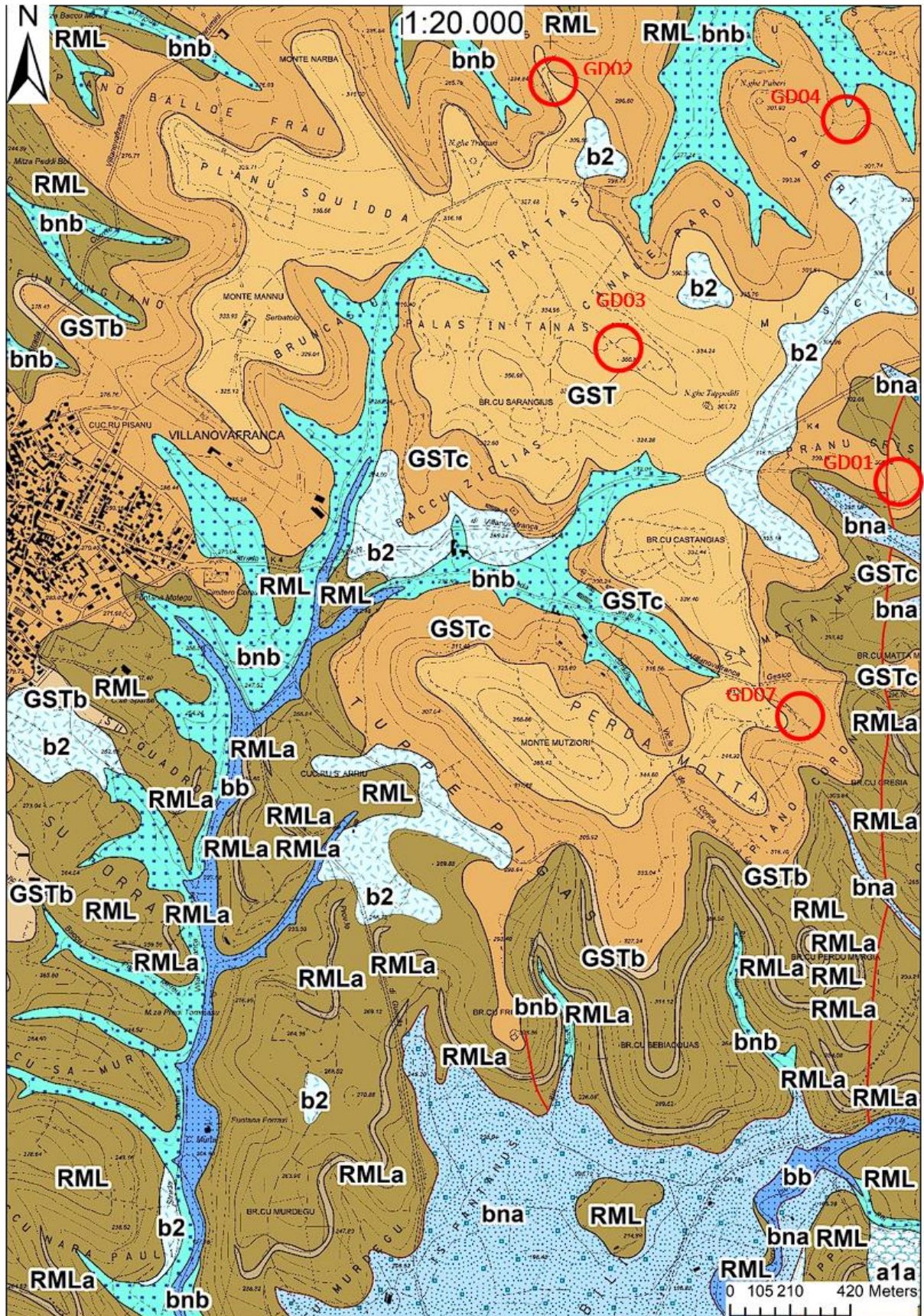


Figura 2.5: Cartografia geologica di dettaglio, aerogeneratori GD01, 02, 03, 04 e 07.

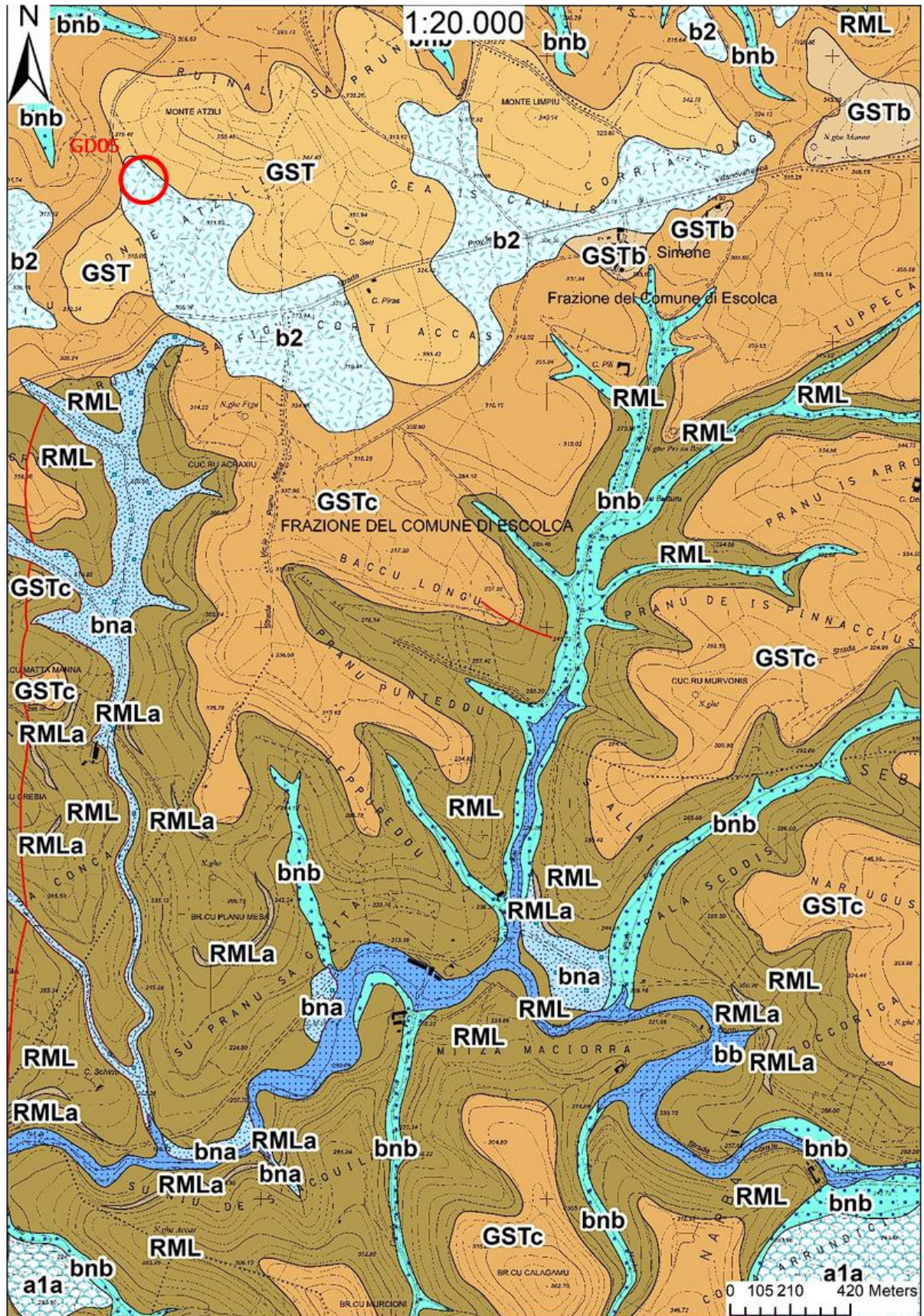


Figura 2.6: Cartografia geologica di dettaglio, aerogeneratore GD05.

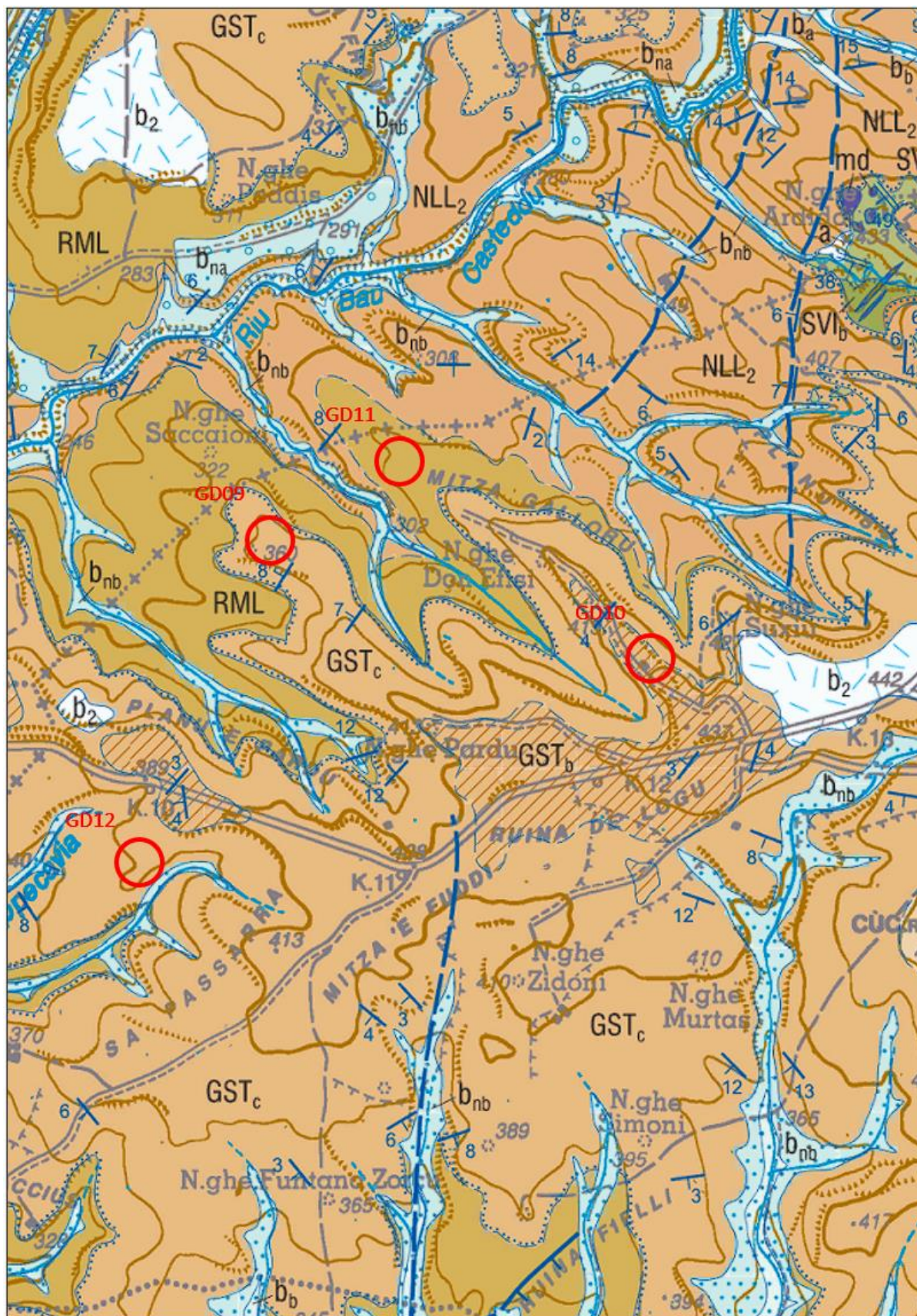


Figura 2.7: Cartografia di dettaglio, aerogeneratori GD09, 10, 11 e 12.

Legenda


















-  faglie certe
-  b - Depositi alluvionali. OLOCENE
-  ba - Depositi alluvionali. Ghiaie da grossolane a medie. OLOCENE
-  bb - Depositi alluvionali. Sabbie con subordinati limi e argille. OLOCENE
-  bn - Depositi alluvionali terrazzati. OLOCENE
-  b2 - Coltri eluvio-colluviali. Detriti immersi in matrice fine, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti, arricchiti in frazione organica. OLOCENE
-  bna - Depositi alluvionali terrazzati. Ghiaie con subordinate sabbie. OLOCENE
-  bnb - Depositi alluvionali terrazzati. Sabbie con subordinati limi ed argille. OLOCENE
-  a1 - Depositi di frana. Corpi di frana. OLOCENE
-  a1a - Depositi di frana. Corpi di frana antichi. OLOCENE
-  GSTa - Litofacies nelle MARNE DI GESTURI. Tufi pomicei intercalati ed arenarie feldspatiche a tetto della formazione di Gesturi. BURDIGALIANO SUP. - LANGHIANO MEDIO
-  GSTb - Litofacies nelle MARNE DI GESTURI. Livelli di arenarie bioclastiche e calcareniti a litotamni. BURDIGALIANO SUP. - LANGHIANO MEDIO
-  GSTc - Litofacies nelle MARNE DI GESTURI. Generalmente alla base della formazione, arenarie grossolane e conglomerati. BURDIGALIANO SUP. - LANGHIANO MEDIO
-  GST - MARNE DI GESTURI. Marne arenacee e siltitiche giallastre con intercalazioni di arenarie e calcareniti contenenti faune a pteropodi, molluschi, foraminiferi, nannoplancton, frammenti ittiolitici, frustoli vegetali. BURDIGALIANO SUP. - LANGHIANO MEDIO
-  RMLa - Litofacies nella FORMAZIONE DELLA MARMILLA. Intercalazioni di tufi biancastrì e livelli arenacei con forte componente vulcanoclastica. AQUITANIANO - BURDIGALIANO INF.
-  RML - FORMAZIONE DELLA MARMILLA. Marne siltose alternate a livelli arenacei da mediamente grossolani a fini, talvolta con materiale vulcanico rimaneggiato. AQUITANIANO - BURDIGALIANO INF.
-  NLL2 - Arenarie di Serra Longa (FORMAZIONE DI NURALLAO). Arenarie da grossolane a micro-conglomeratiche, con intercalazioni di arenarie siltose. OLIGOCENE SUP. - BURDIGALIANO?

Figura 2.8: Legenda della cartografia geologica.



3. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

La geomorfologia e l'evoluzione delle forme del territorio in studio sono direttamente influenzate dall'assetto geologico-strutturale e dagli eventi geodinamici occorsi durante il Terziario e quelli climatici del Quaternario antico e recente.

Infatti, nell'Oligocene superiore, quando il blocco Sardo-Corso faceva parte della Placca Sud-Europea, la collisione nord-appenninica ha prodotto una tettonica a carattere essenzialmente trascorrente di tipo transtensivo che ha favorito la formazione di nuovi rilievi i quali hanno creato una variazione al reticolo idrografico preesistente. Gli eventi tettonici del Pliocene superiore, conseguenti all'evoluzione geodinamica del Tirreno e la formazione della Fossa del Campidano, hanno portato alla formazione di nuovi rilievi strutturali e hanno accentuato le forme di quelli già preesistenti. Inoltre, la tettonica di tipo distensivo del Plio-quaternaria, ha innescato un vulcanismo di tipo fissurale che ha portato alla formazione del complesso vulcanico del Monte Arci.

In particolare, si osserva che il paesaggio è per lo più collinare, con quote massime di circa 450 m s.l.m., a conseguenza diretta del sollevamento plio-pleistocenico, alternato a valli più o meno incise derivanti dal risultato di processi alluvionali e fluviali che, attivi durante tutto il Quaternario, in condizioni climatiche differenti dalle attuali, hanno dato luogo a ripe di erosione fluviale, meandri, terrazzi fluviali e coni di deiezione. L'acclività dei versanti è fortemente influenzata dal diverso comportamento litotecnico delle facies siltoso-marnose, marnoso-arenacee, intercalate con calcari organogeni e da depositi vulcanici facenti parte delle formazioni mioceniche come quella di Nurallo, della Marmilla, di Gesturi etc. che, per effetto della diversa predisposizione all'erosione, portano all'evoluzione di versanti regolari o interrotti da rotture di pendio più o meno accentuate. Il reticolo idrografico dell'area, costituito da corsi d'acqua, che scorrono prevalentemente su litologie mioceniche, è a carattere prevalentemente torrentizio stagionale e presenta un pattern sub-dendritico, indicativo di un controllo tettonico derivante da un sistema di fratture più o meno parallele secondo le principali faglie direttrici del campidano.



4. IDROGEOLOGIA

4.1 IDROGRAFIA

4.1.1 Caratteri generali

Tutte le acque dolci che si trovano in Sardegna sono da collegarsi direttamente con la caduta di piogge il cui quantitativo non è scarso, essendo pari in media a quasi 19 miliardi di m³ all'anno. Una considerevole aliquota di dette acque è però destinata a ritornare rapidamente all'atmosfera per effetto dell'evapotraspirazione che, in Sardegna, è particolarmente elevata, dati gli alti valori raggiunti dalla temperatura, l'elevata percentuale dei giorni sereni e la frequenza con cui soffiano i venti. Un'altra frazione considerevole viene trattenuta direttamente dalla vegetazione. Ciononostante, l'acqua restante rappresenta almeno la metà di quella originariamente pervenuta, o scorre sulla superficie emersa dell'isola e si infiltra nel sottosuolo alimentando le falde acquifere. A causa di tale regime di precipitazioni i corsi d'acqua in Sardegna non possono essere considerati dei fiumi veri e propri, in quanto anche i principali hanno un carattere nettamente torrentizio con portate minime o nulle per la maggior parte dell'anno, brevi e violente piene nel periodo piovoso.

4.1.2 Idrografia locale

Il Flumendosa scorre, in questa porzione di territorio, in un alveo impostato prevalentemente sulle metamorfite paleozoiche, con direzione S-SE. Sulla destra idrografica, all'altezza di Villanovatulo, costeggia un ristretto lembo dell'altopiano del Sarcidano, sulla sinistra i Tacchi di Esterzili e Santa Maria. L'asta principale scende in valli profonde e tortuose seguendo un tracciato in buona parte condizionato da lineamenti tettonici prevalentemente orientati N150°.

Il Flumini Mannu nasce dal Tacco di Laconi con il nome di Riu di Sarcidano e in pochi chilometri cambia frequentemente denominazione: Riu Roledu, Riu San Sebastiano, Riu Mannu e, in prossimità di Isili, Flumini Mannu. I suoi affluenti nel tratto iniziale vengono alimentati dalle numerose sorgenti dislocate sul Tacco; come il Riu Faccioni che prende origine dall'omonima sorgente e il Riu Cannas che raccoglie le acque delle "Funtane" Cannas, Girdiera e Picca Linna.

Superata la stretta di Is Barrocos, il Flumini Mannu scorre nell'alta Marmilla ricevendo dalla destra idrografica gli apporti dei torrenti che provengono dalla Giara di Gesturi, il Riu Sellu e il Riu Pazzola; mentre dalla sinistra affluisce il Riu Murera che raccoglie i deflussi del M. Carrogas e della Giara di Serri. Sempre dalla sinistra idrografica nel settore meridionale proviene il Riu Mannu e più a valle il Riu Lanessi, che in quest'area è l'affluente di maggiore rilevanza.

4.2 IDROGEOLOGIA LOCALE

I litotipi più largamente diffusi nell'area (calcarei marnosi e marne calcaree del Miocene inferiore e medio) consentono una infiltrazione generalmente limitata. Questi litotipi, infatti, risultano essere da scarsamente a mediamente permeabili (drenaggio lento) sia per porosità sia da fessurazione per fratturazione. Ciò è testimoniato anche dalla quasi totale assenza di sorgenti naturali perenni, per lo più dovute a locali fatturazioni dello strato superficiale o a lame d'acque scorrenti tra due strati contigui o lungo i piani di dislocazione più o meno verticali nei litotipi più competenti, altrimenti le sorgenti si formano in falde scorrenti dentro i corpi alluvionali quaternari più o meno coerenti.

Poiché la capacità di immagazzinamento degli acquiferi è data dalla permeabilità per porosità dei livelli sabbiosi, ma anche alla permeabilità per fessurazione dei litotipi più competenti, si ha un processo di alimentazione delle falde piuttosto lungo. Si tratterebbe quindi di acque sotterranee la cui formazione è legata all'accumularsi di acqua nell'arco di decenni, in tal modo le falde risentono poco dei periodi siccitosi che si intervallano a pochi anni di distanza l'uno dall'altro, ma sono legate a cicli idrologici più ampi, almeno decennali.

In generale è possibile individuare due principali complessi idrogeologici: uno più superficiale dato dal “complesso sedimentario”, e uno più profondo indicato come “complesso miocenico”.

Al “Complesso sedimentario” vi appartengono i corpi alluvionali olocenici che seguono le valli dei corsi d’acqua, e in misura minore ai depositi alluvionali terrazzati. Sono caratterizzati da permeabilità generalmente medio-alta: maggiore nei livelli più superficiali, minore nei livelli profondi per la presenza di livelli argillosi poco permeabili.

Al “Complesso sedimentario Miocenico” sono ascrivibili le successioni marnose, argillose ed arenacee del Miocene inferiore-medio, con permeabilità medio bassa per porosità negli orizzonti marnoso-argillosi e permeabilità medio-alta per porosità nei livelli sabbiosi. Nel complesso, visto e considerato il tipo di materiale, particolarmente consistente e compatto, si evince una permeabilità di basso grado.

A causa delle caratteristiche geologiche, ma soprattutto morfologiche e strutturali, l’assetto idrogeologico dell’area si presenta alquanto complesso. Gli acquiferi, prevalentemente fessurati, pur essendo dotati in qualche caso di buona potenzialità, non hanno in genere continuità areale, in quanto frazionati da limiti tettonici e morfologici.

Le falde freatiche, diffuse soprattutto nei fondivalle e nelle zone pianeggianti in terreni terziari, hanno scarsa rilevanza, mentre di maggior interesse sono gli acquiferi profondi delle formazioni carbonatiche e marnoso-arenacee.

Nella successione miocenica l’acquifero più produttivo è principalmente costituito dalle arenarie conglomeratiche della formazione di Nurallao poggianti sul basamento paleozoico. Il loro spessore (fino a 200 m) e la notevole estensione (da Isili fino a Barumini), sono fattori favorevoli per un buon immagazzinamento.

Poiché la roccia non è un corpo omogeneo, è intuibile che all’interno di una stessa roccia varino sia le caratteristiche chimico-fisiche che le proprietà idrogeologiche. Vista la possibile disomogeneità, la permeabilità per litotipi considerati, non è rappresentata da un unico valore del coefficiente “K” ma da un intervallo di questo.

All’interno dell’area cartografata sono stati individuati cinque complessi, o unità litologiche, distinti caratterizzati da differenti intervalli di permeabilità “K” (in m/s), le unità idrogeologiche sono state divise secondo le seguenti classi di permeabilità:

- Impermeabile ($K < 10^{-7}$ cm/sec);
- Scarsamente permeabile ($10^{-4} > K > 10^{-7}$ cm/sec);
- Mediamente permeabile ($10 > K > 0.4$ cm/sec);
- Altamente permeabile ($K > 10$ cm/sec).

Accorpando le unità geologiche aventi in comune caratteri di permeabilità omogenei, sui cui insistono le opere in progetto è possibile distinguere 2 “Unità Idrogeologiche” principali:

- Unità delle alluvioni oloceniche
- Unità sabbiosa conglomeratica miocenica

Per brevità le singole Unità Idrogeologiche verranno successivamente descritte con il nome di Unità 1 fino alla 2.

Unità 1

Molto poco diffuse nell'area in studio. È composta prevalentemente da termini litologici granulari, sciolti o scarsamente cementati, generalmente eterometrici e talvolta monogenici, formanti la copertura detritica e alluvionale olocenica dei principali corsi d'acqua.

Il flusso idrico sotterraneo è favorito dalla porosità dei sedimenti e generalmente, in funzione della presenza o meno di materiali clastici fini (argille, limi) il grado di permeabilità varia da medio ad alto. I principali acquiferi, di tipo freatico, sono localizzati nelle aree prossimali ai principali corsi d'acqua nei quali lo spessore dello strato detritico-alluvionale può risultare di qualche metro.

Da mediamente e molto permeabile.

Unità 2

Sequenza deposizionale sedimentaria terrigena, costituita da marne, argille ed arenarie del Miocene inf-med. Permeabilità bassa nei livelli marnosi ed argillosi, alta nei livelli arenaceo-sabbiosi. Prevalentemente costituita dal complesso sabbioso conglomeratico della Formazione di Nurallao: sabbie da fini a molto fini debolmente cementate e conglomerati in matrice arenacea con cementazione da debole a elevata. La permeabilità, media per porosità interstiziale, nelle facies conglomeratiche può ridursi fino a scarsa per l'aumento del grado di cementazione.

Da poco permeabile a impermeabile.

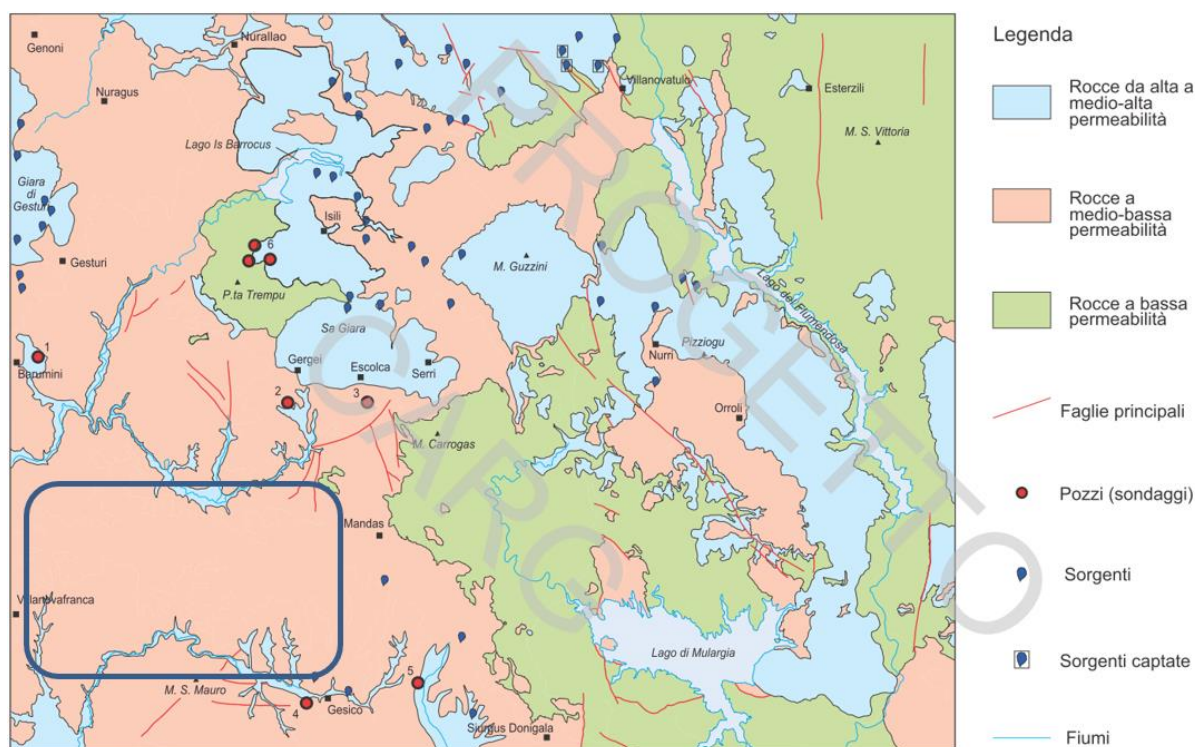


Figura 4.1: Schema idrogeologico del Foglio CARG 540 "Mandas".



4.3 CONSIDERAZIONI SUL PERICOLO GEOLOGICO

Gli studi effettuati non hanno evidenziato condizioni di pericolosità idrogeologiche per i settori in cui si intende ubicare gli aerogeneratori in progetto, così come già indicata nella relativa cartografia del Piano di Assetto Idrogeologico dove non si indicano condizioni di rischio per l'area in oggetto.

4.4 PERICOLO GEOMORFOLOGICO

L'area interessata dalla progettazione degli aerogeneratori è caratterizzata dalla presenza di colline aventi una acclività modesta di circa il 5%.

Dai sopralluoghi effettuati non si sono riscontrati fenomeni franosi, sia inattivi che stabilizzati (naturalmente o artificialmente), ne vengono segnalati nella cartografia PAI del portale geografico regionale aree a pericolo geomorfologico.

In generale il contesto geomorfologico litologico e giaciturale dell'area fanno sì che vi sia una molto bassa propensione al dissesto. Pertanto, non si rilevano criticità per quanto riguarda un eventuale rischio frana in quest'area.

4.5 PERICOLO IDRAULICO

I settori individuati per l'ubicazione degli aerogeneratori non sono contemplati a pericolo idrogeologico nello studio del Piano di Assetto Idrogeologico e nel Piano Stralcio delle Fasce Fluviali. Comunque, questi settori ricadono in corrispondenza di alti morfologici, pertanto in condizioni di sicurezza per quanto riguarda il pericolo alluvioni. Alcuni elementi della viabilità di nuova realizzazione, tuttavia, sono attraversati dalle fasce di pericolosità idraulica del PAI. Queste interferenze sono trattate in dettaglio nell'elaborato tecnico 2799_5298_GIUD_PD_R08_Rev0_RELAZIONEIDRAULICA.



5. TETTONICA

Il settore in esame è interessato dalla vasta copertura sedimentaria Terziaria, depositatasi durante l'Oligocene e il Miocene all'interno del vasto bacino di sedimentazione noto come Fossa Sarda.

Il bacino di sedimentazione era strettamente legato al contesto strutturale, l'impostazione tettonica del settore riflette l'andamento tettonico generale della Fossa Sarda, caratterizzata da un alto strutturale ad Est sbloccato e ribassato da una serie di faglie a prevalente direzione N-S. un mare formatosi durante il distacco del blocco sardo-corso dalla costa franco-spagnola. Si veniva così a creare un rift che costituiva il centro di un bacino sedimentario Oligo-Miocenico, che nella parte media dell'isola, si espande longitudinalmente dal Golfo dell'Asinara a nord al Golfo di Cagliari a sud per una lunghezza superiore ai 200 Km e con una larghezza di 40-50 Km. La Fossa Sarda caratterizzata da un alto strutturale ad Est sbloccato e ribassato da una serie di faglie a prevalente direzione N-S.

Attualmente il graben del Campidano si sovrappone alla depressione Oligo-Miocenica nel suo settore sud-occidentale; il riempimento del bacino Oligo-Miocenico è formato da circa 1500 m di sedimenti, di un'età compresa tra l'Oligocene medio-superiore e il Miocene inferiore.

In particolare, le faglie affioranti nell'area sono quasi esclusivamente le faglie a direzione cosiddetta "campidanese", quindi circa NNW, nonostante questa denominazione sia fuorviante proprio perché si tratta di strutture attive prima del "Graben del Campidano" durante il Plio-Pleistocene. Queste faglie interessano anche la successione miocenica. A nord dell'area in studio (Guasila e Selegas) il contatto tra le formazioni del I e II ciclo oligo-miocenico è dislocato da una faglia con orientazione circa N120E, immergente per circa 80° verso SW, con rigetto verticale di almeno 100 m. Talvolta interessano il contatto tra le formazioni mioceniche ed il basamento ercinico.

Lo stesso motivo tettonico (faglie immergenti verso SW che limitano blocchi di basamento "inclinati" verso E) è riconoscibile anche nella fascia orientata NW-SE tra gli abitati di Villagreca e Ortacesus. Vi affiorano in diverse località sia metamorfiti che rocce intrusive del basamento cristallino ercinico, per cui sono state desunte diverse faglie sepolte dalla coltre quaternaria e anche dalle formazioni mioceniche del I e II ciclo.

Un quadro riassuntivo delle strutture precedenti alla strutturazione dei bacini miocenici evidenzia una riattivazione nel tempo dei lineamenti orientati N150E, responsabili anche della strutturazione dei bacini miocenici e della fossa pliocenica del Campidano, già legati alla deformazione tardo-ercinica. Alcune di queste faglie non sembrano interessare le coperture eoceniche.

In accordo con diversi autori si possono distinguere due cicli tettono-sedimentari principali: un I ciclo che va dall'Oligocene superiore al Burdigaliano medio; ed un II ciclo che va dal Burdigaliano superiore a tutto il Langhiano, scarsamente affiorante nell'area vasta in studio in quanto quasi completamente eroso, probabilmente durante il Quaternario. Questa distinzione corrisponde da un punto di vista cronostratigrafico con le fasi "syn-rift" e "postrift". Il limite tra i due cicli è in genere marcato da una discordanza angolare e talvolta da depositi clastici grossolani. Inoltre, il I ciclo è caratterizzato da una diffusa tettonica sin-sedimentaria, quasi assente nel II ciclo.

Sebbene in tutta l'Isola sia descritta un'importante tettonica di età pliocenica, responsabile della strutturazione della Fossa del Campidano nell'area vasta in studio l'unica struttura sicuramente ascrivibile ad un'attività tettonica plio-pleistocenica è la Faglia di Nuraminis, che immerge verso W e ribassa a tetto le marne di Gesturi.

L'analisi dell'approfondimento della valle del Flumendosa, che incide gli altopiani con i basalti tardo-pliocenici, mostra un sollevamento generale del "pilastro tettonico" del Sarcidano-Gerrei di circa 300 m negli ultimi 2,5 Ma circa. È probabile che questo approfondimento, sicuramente legato anche alle variazioni del livello di base marino innescato dai grandi eventi glaciali quaternari, sia stato coevo di un'attività tettonica responsabile anche della forte inversione del rilievo testimoniata dalle giare basaltiche.

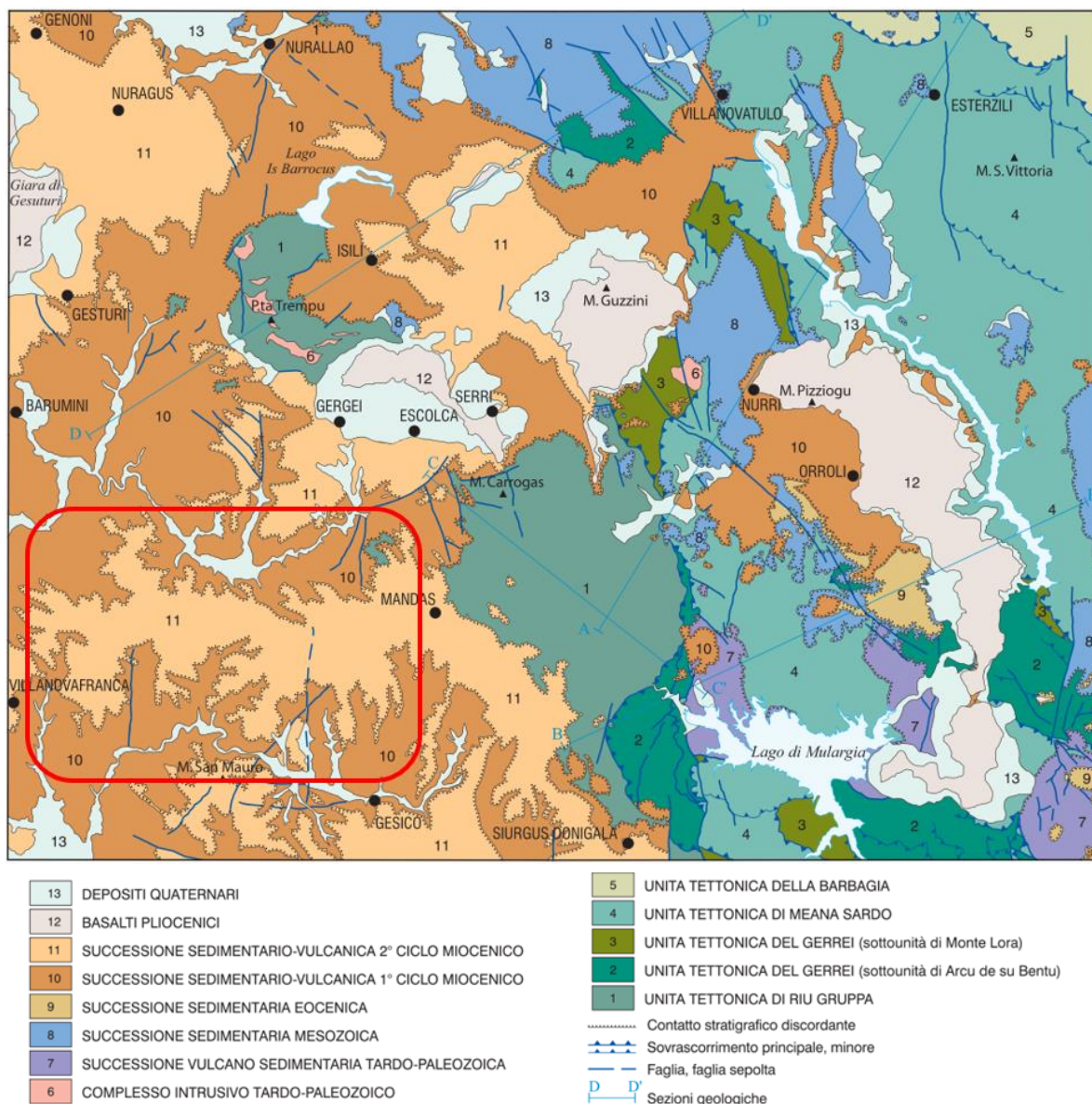


Figura 5.1: Schema strutturale del basamento ercinico del foglio 540 (estratto dalle note illustrative CARG).

5.1 FAGLIE ATTIVE E CAPACI (ITHACA)

ITHACA (ITaly HAZards from CAPable faults) costituisce il Catalogo delle faglie capaci in Italia.

Il Catalogo ITHACA colleziona le informazioni disponibili sulle faglie capaci che interessano il territorio italiano sulla base di una revisione critica della letteratura disponibile.

In particolare, l'area dista circa 25 km dalla Faglia di San Sperate, circa 23 km dalla Faglia di Samassi e a circa 24 km dalla Faglia di San Gavino-Sardara, tutte sul margine orientale del Graben del Campidano e con documentata attività tarso-quaternaria (Barca et alii, 2011).



5.1.1 *Faglia di Samassi*

La Faglia di Samassi corrisponde ad una struttura secondaria parallela alla faglia maestro che delimita il margine nord-orientale del Campidano Graben, bacino tettonico originato dall'affondamento della porzione meridionale della Fossa Sarda o Rift Sarda (Cherchi & Montadert, 1982; Assorgia et al., 1997; Funedda et al., 2000; Carmignani et al., 2001; Casula et al., 2001; Oggiano et al., 2009), si è concluso nel Plio-Quaternario con una fase estensiva relativa all'evoluzione del bacino tirrenico meridionale (Casula et al., 2001; Cocco, 2013 e riferimenti ivi). Il graben è stato riempito da una successione vulcano-sedimentaria (Formazione Samassi, Pecorini & Pomesano Cherchi, 1969) di età pliocenica superiore/pleistocenica, il cui fondale si estende a profondità variabili da 900 m (settore sud) a 1100 m (settore nord) (Cocco, 2013). La Faglia di Samassi si estende al di sotto della pianura in prossimità del settore assiale con andamento sinuoso, parallela alla Faglia di Monastir, la faglia principale che delimita lo scavo. A partire dal comune di Samassi fino a SSE, la faglia si trova ai margini di una superficie terrazzata in parte ricoperta da depositi alluvionali del Pleistocene superiore (Formazione Portovesme) e da depositi alluvionali dell'Olocene. La faglia corre lungo il margine del terrazzo che nel settore compreso tra Samassi e Serramanna delimita il corso ordinario del corso d'acqua Flumini Mannu. Procedendo ulteriormente a S dopo Serramanna, la scarpata morfologica del terrazzo tende progressivamente ad abbassarsi. La Faglia di Samassi termina a N di Decimomannu, dove incrocia l'estremità del Riu Mannu di San Sperate, affluente di sinistra del Flumini Mannu. La faglia è stata mappata sulla base dell'interpretazione del Foglio CARG 547-Villacidro (Barca et al., 2011) tra la sua estremità settentrionale e l'area immediatamente a sud di Serramanna. L'estensione della faglia fino a Decimomannu (non riportata nel Foglio di Carico 556-Assemini) deriva da Casula et al. (2001). La Faglia di Samassi è stata inserita in catalogo considerando la vicinanza alla superficie della sua terminazione e il suo raggio di attività (Plio-Quaternario), come indicato da Casula et al. (2001).

5.1.2 *Faglia di San Sperate*

La Faglia di San Sperate corrisponde ad una struttura secondaria parallela alla faglia maestro che delimita il margine nord-orientale del Graben del Campidano, bacino tettonico originato dall'affondamento della porzione meridionale della Fossa Sarda o Rift Sarda (Cherchi & Montadert, 1982; Assorgia et al., 1997; Funedda et al., 2000; Carmignani et al., 2001; Casula et al., 2001; Oggiano et al., 2009), si è concluso nel Plio-Quaternario con una fase estensiva relativa all'evoluzione di il bacino tirrenico meridionale (Casula et al., 2001; Cocco, 2013 e ivi riferimenti). Il graben è stato riempito da una successione vulcano-sedimentaria (Formazione Samassi, Pecorini & Pomesano Cherchi, 1969) di età pliocenica superiore/pleistocenica, il cui fondale si estende a profondità variabili da 900 m (settore sud) a 1100 m (settore nord) (Cocco, 2013). La Faglia di San Sperate si estende nella zona pianeggiante compresa tra B.cu Oru e la zona a NE di San Sperate, con andamento grosso modo parallelo alla Faglia di Monastir, la faglia principale che delimita il graben del Campidano. La faglia presenta lungo il suo primo tratto un andamento attorno a NNW-SSE collocandosi ai margini del conoide alluvionale costituito da depositi ghiaiosi appartenenti alla Sintema di Portovesme (Pleistocene superiore), che, partendo dall'ex Stagno Serrenti, si apre sulla pianura verso SW. Tale porzione di faglia è stata mappata sulla base dell'interpretazione del Foglio CARG 547 Villacidro. Il tratto successivo, che parte all'incirca dall'incrocio con il Riu Malu, non riportato nel Foglio CARG 547 Villacidro, deriva da Casula et al. (2001). Qui gli Autori segnalano la presenza di una struttura minore, subparallela alle faglie di confine del graben. La Faglia di San Sperate è stata inserita in catalogo in considerazione della vicinanza alla superficie topografica della sua terminazione e del suo raggio di attività (Plio-Quaternario), come indicato da Casula et al. (2001). La faglia si trova anche nei pressi della faglia Nuraminis, immersione ad ovest, descritta nel Foglio CARG 548-Senorbi come una struttura attiva nel Plio-Pleistocene (Funedda et al., 2012).

5.1.3 Faglia di San Gavino-Sardara

La Faglia Sardara-San Gavino corrisponde al margine nord-orientale del Graben del Campidano e si sviluppa parallelamente alle faglie di Monastir e Isili, queste faglie principali hanno controllato l'evoluzione del margine orientale del Graben del Campidano a partire dall'Oligocene superiore. La faglia si estende vicino alla superficie in base all'interpretazione di Casula et al. (2001). Secondo questi Autori la faglia corrisponde al margine nord-orientale del settore centrale del Campidano, riempito da depositi plio-quadernari. La traccia di faglia è stata in gran parte derivata dal Foglio CARG 547-Villacidro, che indica numerose strutture interrante derivate in gran parte dalle campagne di esplorazione di idrocarburi condotte in diversi settori del Campidano. La faglia corrisponde a una struttura sepolta senza nome estesa diversi chilometri al di sotto della pianura e che mostra una buona sovrapposizione con due faglie riportate in Casula et al. (2001) classificato come attivo nell'intervallo Plio-Quaternario. La Faglia Sardara-San Gavino è stata inserita nel catalogo in considerazione della vicinanza alla superficie della sua terminazione e del raggio di attività (Plio-Quaternario) ipotizzato da Casula et al. (2001).

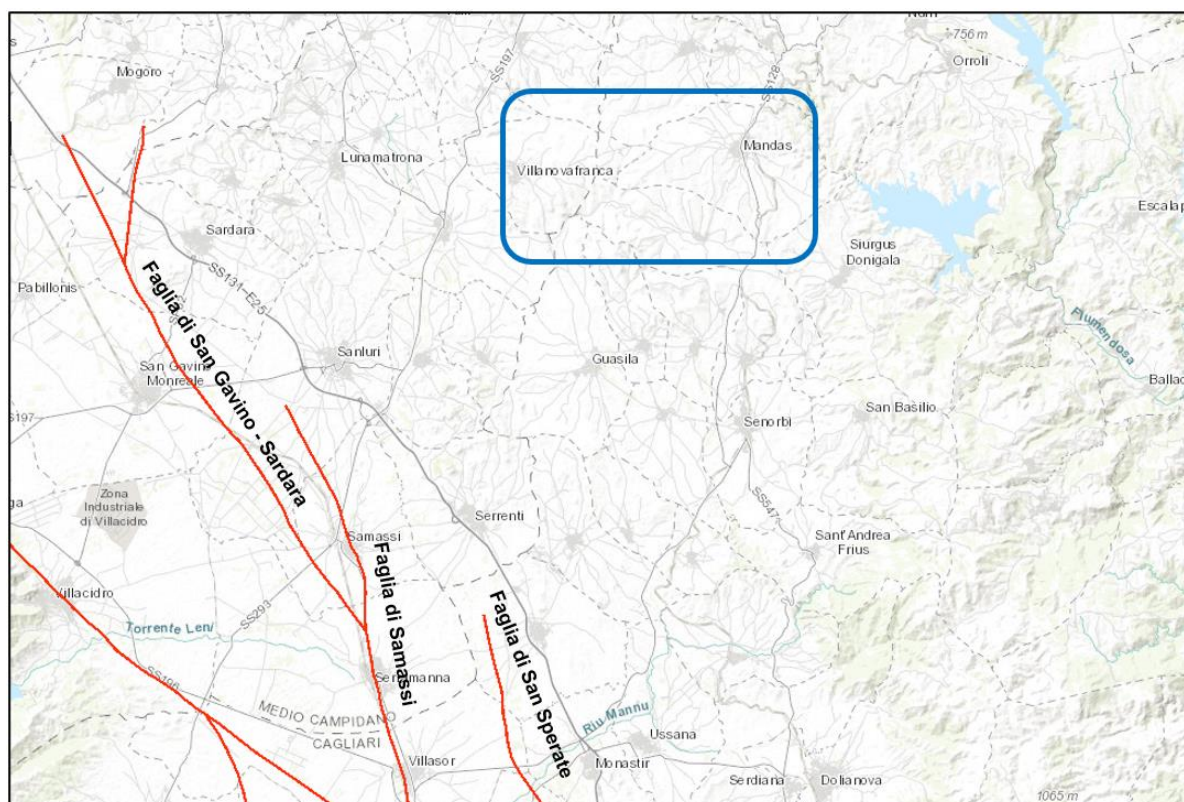


Figura 5.2: Faglie attive e capaci (ITHACA) prossime all'area in studio.

6. DESCRIZIONE DELLE INDAGINI GEOFISICHE MASW

Nell'area interessata dal progetto sono state eseguite n° 3 indagini sismiche con metodologia MASW per la determinazione della stratigrafia sulla base delle Vs misurate e la categoria del sottosuolo ai sensi delle NTC 2018.

Le prove sono state ubicate in modo da poter investigare i settori geologicamente più rappresentativi dell'area in studio, e poter così procedere ad una valutazione dell'idoneità dei terreni interessati dalle fondazioni degli aerogeneratori.



Figura 6.1: Ubicazioni delle indagini geofisiche MASW su stralcio geologico.

Tabella 6.1: Ubicazione prove sismiche MASW.

COORDINATE UTM IN FORMATO WGS84 FUSO 32S			
Sito in studio	Coordinate Est [m]	Coordinate Nord [m]	Quota [m s.l.m.]
MASW 1	502 393	4 387 444	336
MASW 2	502 523	4 389 910	319
MASW 3	508 341	4 390 219	410

6.1 RISULTATI DELLE INDAGINI SISMICHE MASW

L'analisi del profilo sismico per il calcolo delle Vs equivalenti è stata effettuata utilizzando un modello composto da sismostrati come di seguito rappresentati in tabella.

Tabella 6.2: Risultati indagine sismiche MASW:

STRATIGRAFIA Vs MASW 1								
Strati	Profondità (m)	Spessore (m)	Descrizione	Vs (m/s)	$2\gamma^2$ (kN/m ³)	R (kPa)	F (Hz)	T (s)
1	1,7	1,7	Marne di Gesturi	761	22,6	17187	323	0,009
2	3,8	2,1		757	22,6	17074	397	0,011
3	6,3	2,5		716	22,2	15926	448	0,014
4	9,2	2,9		615	21,4	13169	446	0,019
5	12,5	3,3		611	21,4	13062	504	0,022
6	16,2	3,7		678	21,9	14877	627	0,022
7	20,4	4,2		776	22,7	17611	815	0,022
8	25	4,6	Marne di Gesturi massive	845	23,2	19590	972	0,022
9	-	-		893	23,5	20991	-	-

STRATIGRAFIA Vs MASW 2								
Strati	Profondità (m)	Spessore (m)	Descrizione	Vs (m/s)	γ (kN/m ³)	R (kPa)	F (Hz)	T (s)
1	1,7	1,7	Suolo	349	18,6	6486	148	0,019
2	3,8	2,1	Marne di Gesturi	453	19,8	8987	238	0,019
3	6,3	2,5		481	20,1	9686	301	0,021
4	9,2	2,9		637	21,6	13761	462	0,018
5	12,5	3,3		720	22,3	16037	594	0,018
6	16,2	3,7		722	22,3	16093	668	0,02
7	20,4	4,2		761	22,6	17187	799	0,022
8	25	4,6	Marne di Gesturi massive	847	23,2	19648	974	0,022
9	-	-		942	23,8	22440	-	-

STRATIGRAFIA VS MASW 3								
Strati	Profondità (m)	Spessore (m)	Descrizione	Vs (m/s)	γ (kN/m ³)	R (kPa)	F (Hz)	T (s)
1	1,7	1,7	Marne di Gesturi	537	20,7	11116	228	0,013
2	3,8	2,1		537	20,7	11116	282	0,016
3	6,3	2,5		531	20,6	10961	332	0,019
4	9,2	2,9		527	20,6	10858	382	0,022
5	12,5	3,3		544	20,8	11297	449	0,024
6	16,2	3,7		571	21	12002	528	0,026
7	20,4	4,2		619	21,4	13276	650	0,027
8	25	4,6		668	21,9	14603	768	0,028
9	-	-		713	22,2	15843	-	-

² Keceli (2012) $\gamma = 4,3 \cdot Vs^{0,25}$

6.2 APPLICABILITÀ DEL METODO SEMPLIFICATO

Le NTC 2018 prescrivono che il metodo semplificato basato sulle categorie di sottosuolo precedentemente descritte, possa essere applicato solo in assenza del fenomeno noto come “inversione delle velocità”, ovvero quando si verificano contemporaneamente le seguenti 4 condizioni secondo le indicazioni sperimentali “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica” (ICMS):

1. un terreno rigido che in profondità sovrasta un terreno soffice con un rapporto $V_s \text{ rig.}/V_s \text{ sof.}$ superiore a 1.5;
2. la differenza tra le V_s dei due terreni è maggiore di 200 m/s;
3. lo spessore dello strato a velocità minore è maggiore di 5 m;
4. la V_s dello strato più rigido è maggiore o uguale a 500 m/s.

Le indagini sismiche MASW hanno sempre riscontrato la presenza di un substrato con velocità delle V_s sempre maggiore di 100 m/s senza riscontrano significativi fenomeni di inversione delle velocità delle V_s ; pertanto, sulla base dei riscontri ottenuti finora nell’area interessata dal progetto è possibile applicare la procedura semplificata ai sensi delle NTC 2018.

6.3 V_s EQUIVALENTE

L’indagine MASW 1 ha individuato la presenza di un substrato rigido superficiale con $V_s > 800$ m/s entro i primi 30 m di profondità; pertanto, la velocità della V_s equivalente è stata calcolata utilizzando le V_s misurate dal piano di posa della fondazione (ipotesi -3 m dal p.c.) fino al substrato rigido con $V_s > 800$ m/s.

L’indagine MASW 2 non ha individuato la presenza di un substrato rigido superficiale con $V_s > 800$ m/s entro i primi 30 m di profondità; pertanto, la velocità della V_s equivalente è stata calcolata utilizzando le V_s misurate fino a 30 m di profondità dal piano di posa della fondazione (ipotesi -3 m dal p.c.).

Resta sempre in capo al progettista l’utilizzo della categoria di sottosuolo di riferimento da utilizzare in funzione delle scelte progettuali.

Tabella 6.3: V_s equivalente e categoria di sottosuolo misurata MASW.

CATEGORIA DI SOTTOSUOLO INDIVIDUATA		
Sito	V_s equivalente (m/s)	Categoria
MASW 1	692	B
MASW 2	592	B
MASW 3	594	B

6.4 CORRELAZIONI GEOTECNICHE DA INDAGINI SISMICHE MASW

In via assolutamente preliminare e puramente indicativa è possibile utilizzare i valori di velocità delle V_s per estrapolare dei parametri geotecnici. Utili in una prima fase di dimensionamento e verifica delle opere³.

6.4.1 Correlazione φ - V_s

La correlazione per il calcolo dell’angolo di resistenza al taglio direttamente in funzione di V_s , valore normalizzato per la pressione litostatica, è ripresa da Uzielli et al. (2013) e Mayne (2014) e consente di definire il range dei valori di picco:

- limite superiore: $\varphi = 3,9 \cdot V_s^{0,44}$

³ Tratto da “Stima dei parametri geotecnici in geofisica applicata” di Roccaforte-Cucinotta – Ed. Dario Flaccovio.

- limite inferiore: $\varphi = 3,9 \cdot (Vs^{0,44}) - 6,2$

6.4.2 Correlazione Cu-Vs

La correlazione per il calcolo della coesione non drenata (Cu in kPa) può essere calcolata con la formula di Dickenson (1990) valida per argille tenere:

$$Cu = (Vs/23)^{1/0.475}$$

6.4.3 Portanza

La capacità portante dei terreni di fondazione (qult in kPa) in funzione di Vs si può calcolare secondo Keceli (2012):

$$q_{ult} = 0,43 \cdot Vs^{1,25}$$

Il carico ammissibile si stima in base ad un fattore di sicurezza Fs applicato nella formula precedente che porta:

$$q_{amm} = 0,123 \cdot Vs^{1,25} \quad \text{per } Vs < 400 \text{ m/s}$$

$$q_{amm} = 0,143 \cdot Vs^{1,25} \quad \text{per } 400 \text{ m/s} < Vs < 700 \text{ m/s}$$

6.4.4 Tabelle dei parametri geotecnici estrapolati dalle indagini sismiche

Tabella 6.4: Parametri geotecnici da indagini sismiche MASW.

PARAMETRI GEOTECNICI DA VS MASW 1						
P	Vs	ϕ_{min}	ϕ_{max}	Cu	qult	qamm
[m]	[m/s]	[°]	[°]	kPa	[kN/m ²]	[kN/m ²]
1.7	761	66,1	72,3	1582	1719	572
3.8	757	65,9	72,1	1565	1707	568
6.3	716	64,1	70,3	1392	1593	530
9.2	615	59,6	65,8	1010	1317	438
12.5	611	59,4	65,6	997	1306	434
16.2	678	62,5	68,7	1241	1488	495
20.4	776	66,7	72,9	1649	1761	586
25	845	69,5	75,7	1972	1959	651
-	893	71,3	77,5	2216	2099	698



PARAMETRI GEOTECNICI DA VS MASW 2						
P	Vs	ϕ_{\min}	ϕ_{\max}	Cu	q _{ult}	q _{amm}
[m]	[m/s]	[°]	[°]	kPa	[kN/m ²]	[kN/m ²]
1.7	349	45,1	51,3	307	649	186
3.8	453	51,3	57,5	531	899	299
6.3	481	52,8	59	602	969	322
9.2	637	60,6	66,8	1088	1376	458
12.5	720	64,3	70,5	1408	1604	533
16.2	722	64,4	70,6	1416	1609	535
20.4	761	66,1	72,3	1582	1719	572
25	847	69,5	75,7	1982	1965	653
-	942	73,2	79,4	2480	2244	746

PARAMETRI GEOTECNICI DA VS MASW 2						
P	Vs	ϕ_{\min}	ϕ_{\max}	Cu	q _{ult}	q _{amm}
[m]	[m/s]	[°]	[°]	kPa	[kN/m ²]	[kN/m ²]
1.7	537	55,8	62	759	1112	370
3.8	537	55,8	62	759	1112	370
6.3	531	55,5	61,7	742	1096	365
9.2	527	55,3	61,5	730	1086	361
12.5	544	56,1	62,3	780	1130	376
16.2	571	57,5	63,7	864	1200	399
20.4	619	59,8	66	1024	1328	442
25	668	62	68,2	1203	1460	486
-	713	64	70,2	1379	1584	527

6.5 RISULTATI DELLA SISMICA A RIFRAZIONE

Mediante l'analisi dei primi arrivi delle onde rifratte prodotte durante le energizzazioni eseguite per le MASW è possibile elaborare una sismostratigrafia mediante onde V_p , con la semplificazione di una stratigrafia piano parallela.

In questo modo si sono potuti ottenere ulteriori parametri utili per la caratterizzazione del sito in studio⁴.

6.5.1 Sismostratigrafia da rifrazione

Tabella 6.5: Sismografia da rifrazione

SISMOSTRATIGRAFIA MASW 1		
Suolo	$V_p = 331 \text{ m/s}$	0.0 – 0.8 m
Marne di Gesturi	$V_p = 1408 \text{ m/s}$	0.8 m – 6.0 m
Marne di Gesturi massive	$V_p = 2439 \text{ m/s}$	6.0 m -

SISMOSTRATIGRAFIA MASW 2		
Suolo	$V_p = 482 \text{ m/s}$	0.0 – 1.3 m
Marne di Gesturi	$V_p = 1176 \text{ m/s}$	1.3 m – 5.5 m
Marne di Gesturi massive	$V_p = 2080 \text{ m/s}$	5.5 m -

SISMOSTRATIGRAFIA MASW 3		
Suolo	$V_p = 533 \text{ m/s}$	0.0 – 2.2 m
Marne di Gesturi	$V_p = 1026 \text{ m/s}$	2.2 m – 5.5 m
Marne di Gesturi massive	$V_p = 1905 \text{ m/s}$	5.5 m -

⁴ $V_x = m_x = d_x - d_0 / t_x - t_0$

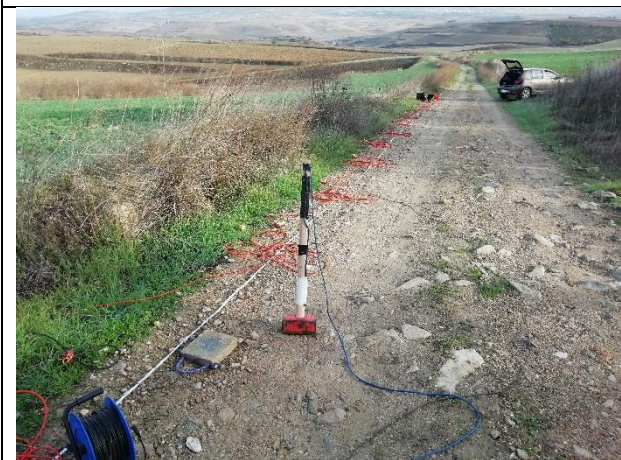
V_x = velocità dell'orizzonte sismico; m = coefficiente angolare curva di interpolazione lineare della dromocrona di riferimento; d_0 e d_x distanze geofoniche iniziale e finale di registrazione della dromocrona di riferimento; t_0 e t_x tempi di ritardo iniziale e finale della dromocrona di riferimento.

$H_x = d_x / 2 \cdot (V_x - V_0 / V_x + V_0)^{0.5}$

H_x = spessore dell'orizzonte sismico; d_x distanza geofonica al punto di "ginocchio"; V_x e V_0 velocità del primo e secondo orizzonte sismico.



esecuzione MASW 1



esecuzione MASW 2



esecuzione MASW 3

Tabella 6.6: Tempi primi arrivi.

PRIMI ARRIVI DA MASW 1		PRIMI ARRIVI DA MASW 2		PRIMI ARRIVI DA MASW 3	
Geofono (m)	Tempo (ms)	Geofono (m)	Tempo (ms)	Geofono (m)	Tempo (ms)
0	0,1	0	0,1	0	0,1
2	6,9	2	4,4	2	3,6
4	12,1	4	8,3	4	6,1
6	13,7	6	9,4	6	9,4
8	15,4	8	10,8	8	15
10	16,5	10	13,3	10	16,8
12	18,1	12	16	12	18,9
14	19,2	14	16,7	14	19,3
16	19,2	16	18,5	16	21,1
18	20,2	18	19,4	18	21,8
20	20,6	20	20,2	20	22,9
22	21,9	22	21,5	22	23,3
24	22,9	24	21,9	24	25,3
26	24	26	22,1	26	26,9
28	25	28	24,4	28	28,2
30	25,6	30	25,4	30	28,3
32	26,5	32	26	32	29,9
34	27,3	34	27,9	34	30,6
36	28,5	36	28,3	36	31,7
38	28,5	38	29	38	31,9
40	29,8	40	30,6	40	33,9
42	30,6	42	31	42	34,6
44	31,5	44	31,7	44	35,7
46	32	46	32,9	46	36,3

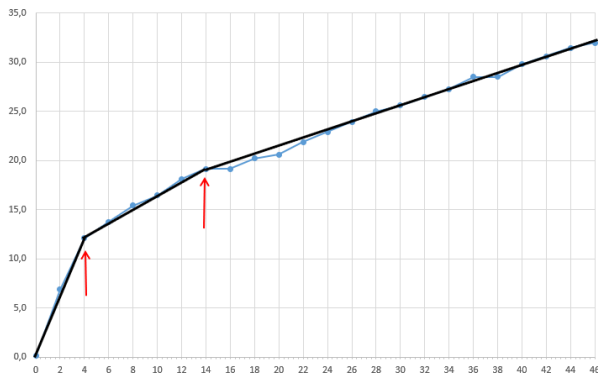


Figura 6.2: Dromocrona MASW 1

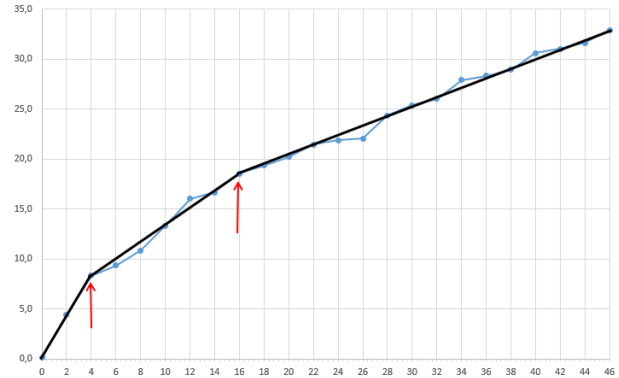


Figura 6.3: Dromocrona MASW 2

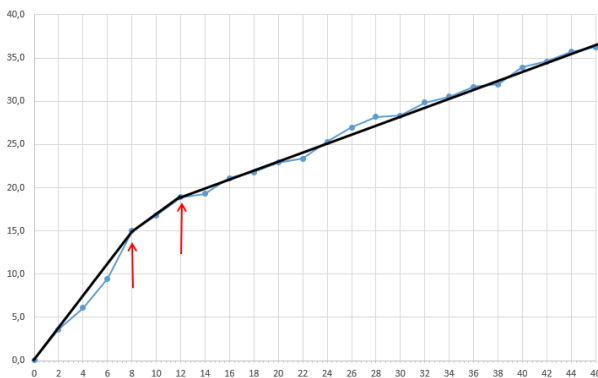


Figura 6.4: Dromocrona MASW 3

6.6 MODULI DINAMICI

Per la caratterizzazione del sito e del terreno in esame, specialmente in termini di deformabilità dei materiali in associazione ai dati geotecnici, può essere utile fornire ulteriori parametri che le prove eseguite sono in grado di ricavare, oltre ai dati delle velocità di propagazione delle onde sismiche (V_p e V_s) nel sottosuolo. I moduli elastici dinamici del terreno possono infatti contribuire ad una migliore definizione dei carichi e delle spinte da parte di manufatti sul terreno di fondazione.

Le principali costanti elastiche legate alle velocità di propagazione delle onde sismiche sono:

6.6.1 Modulo di Young (E_y)

Esprime la resistenza di un corpo alla deformazione lineare quando lo si sottopone ad uno sforzo di dilatazione o compressione, esso è pari a:

$$E = V_s^2 \rho \cdot \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)}$$

6.6.2 Modulo di Taglio o di Rigidità (G)

Esprime la resistenza di un corpo alle variazioni lineari di forma quando lo si sottopone ad uno sforzo di taglio puro, esso è pari a:

$$G = \rho V_s^2$$

6.6.3 Modulo compressibilità volumetrica (E_v)

Esprime la resistenza di un corpo alla deformazione volumetrica quando lo si sottopone ad uno sforzo di dilatazione o compressione, esso è pari a:

$$E_v = \rho \cdot \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$$

6.6.4 Coefficiente di Poisson (ν)

Esprime la misura della deformazione totale subita da un corpo, esso è pari a:

$$\nu = 0.5 \frac{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}$$

Il coefficiente di Poisson è fondamentale; esso è un parametro adimensionale che offre un criterio di valutazione della deformazione totale che può subire una roccia o un terreno, ed è legato al grado di litificazione, alla porosità ed al grado di saturazione della roccia stessa.

In linea di massima, una roccia massiccia può avere un rapporto di Poisson da circa 0.15 sino a 0.30 (valori tipici attorno a 0.25), mentre materiali inconsolidati (silt ed argille) hanno tipicamente valori tra 0.35 e 0.45. Le sabbie presentano valori molto variabili (da 0.3 sino quasi al valore massimo teorico di 0.5). L'idea di massima è che tanto più "sciolto" ed "inconsistente" è un materiale tanto più alto è il valore del modulo di Poisson (sino appunto al massimo teorico di 0.5 – valore valido per i fluidi).

6.6.5 Tabelle dei moduli dinamici

Tabella 6.7: Moduli dinamici da indagini sismiche.

MODULI DINAMICI DA MASW 1						
P	Vp	Vs	E	G	En	n
[m]	[m/s]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
1.7	330	761	5644	1334	-1527	1,12
3.7	1410	757	3420	1318	2815	0,3
6.2	1410	716	3084	1163	2959	0,33
9.2	2440	615	2422	826	11899	0,47
12.5	2440	611	2387	814	11894	0,47
16.2	2440	678	2999	1029	11949	0,46
20.4		776	5574	1394	-	-
25		845	6752	1688	-	-
-		893	7646	1911	-	-



MODULI DINAMICI DA MASW 2						
P	Vp	Vs	E	G	En	n
[m]	[m/s]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
1.7	480	349	434	231	129	-0,06
3.8	1180	453	1174	415	2263	0,41
6.3	1180	481	1331	475	2226	0,4
9.2	2080	637	2589	894	8338	0,45
12.5	2080	720	3372	1177	8257	0,43
16.2	2080	722	3392	1185	8254	0,43
20.4		761	5335	1334	-	-
25		847	6788	1697	-	-
-		942	8622	2156	-	-

MODULI DINAMICI DA MASW 3						
P	Vp	Vs	E	G	En	n
[m]	[m/s]	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
1.7	530	537	-	609	-	-
3.8	1030	537	1599	609	1428	0,31
6.3	1030	531	1566	593	1442	0,32
9.2	1900	527	1702	583	6806	0,46
12.5	1900	544	1824	627	6809	0,46
16.2	1900	571	2027	699	6806	0,45
20.4		619	3352	838	-	-
25		668	3979	995	-	-
-		713	4607	1152	-	-

6.7 SCAVABILITÀ DEL SUBSTRATO

Attraverso l'utilizzo di tabelle note in letteratura, che correlano la velocità delle onde P e il grado di rippabilità e scavabilità delle formazioni si può determinare il grado di approfondimento senza l'ausilio di esplosivo. Esiste una significativa correlazione tra la velocità con cui le onde sismiche attraversano la roccia e l'efficienza di scavo delle macchine utilizzate.

La figura mostra un diagramma per determinare l'efficienza di scavo (volume scavato in m³/20 min) in relazione alla velocità delle onde di compressione (Shimoto et alii, 1970, da OYO Corporation 1978). La comparazione mostra che l'efficienza di scavo di una pala o del ripper diminuisce in funzione dell'aumento di velocità delle onde di compressione.

Con l'utilizzo di un escavatore con pala a cucchiaio la scavabilità dei terreni è possibile, indipendentemente dalla formazione per quei sismo-strati che hanno velocità massime di 900 m/sec. Al di sopra di questa velocità e per valori massimi di 1.400 m/sec si deve far utilizzo di martelloni pneumatici.

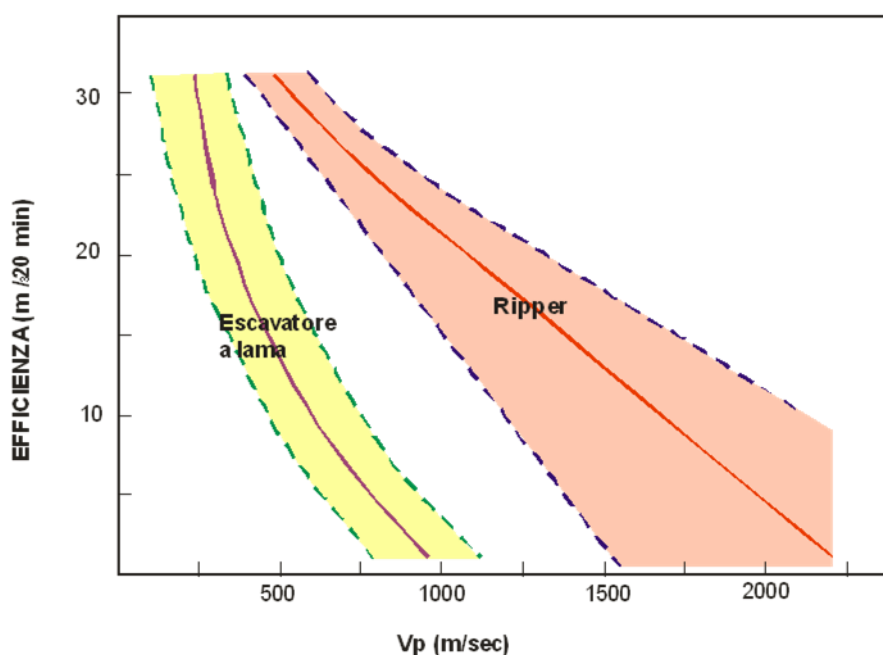


Figura 6.5: Grafico sui limiti di scavabilità dei terreni da onde Vp.

Sulla base dei risconti avuti dalle sismiche a rifrazione, il sito investigato con l'indagine sismica MASW 1 dovrà essere lavorato con martellone pneumatico, mentre i siti investigati con le MASW 2 e 3 sono al limite della scavabilità con lama; pertanto, è presumibile l'uso del martellone anche in questi siti.

7. RISPOSTA SISMICA

Le NTC 2018 fissa i criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e aggiorna le norme tecniche per le costruzioni nelle medesime zone.

L'art. 2 dell'Ordinanza OPCM 3274 del 2003 prevede che siano le Regioni, sulla base dei Criteri generali indicati dallo Stato ad individuare, formare ed aggiornare l'elenco delle zone sismiche.

Le Zone Sismiche sono fissate in numero di quattro, in funzione di quattro valori significati delle accelerazioni sismiche di progetto. Tutta la Sardegna appartiene alla Zona Sismica 4. L'assegnazione a tutto il territorio regionale della Sardegna a questa zona è stata in seguito confermata nell'Ordinanza del 2006 (OPCM 3519).

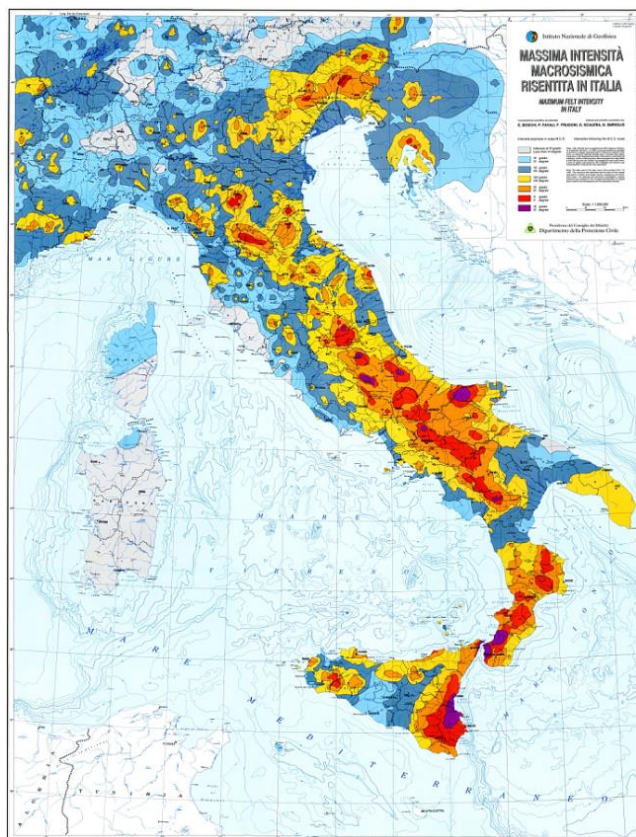
7.1 SISMICITÀ STORICA

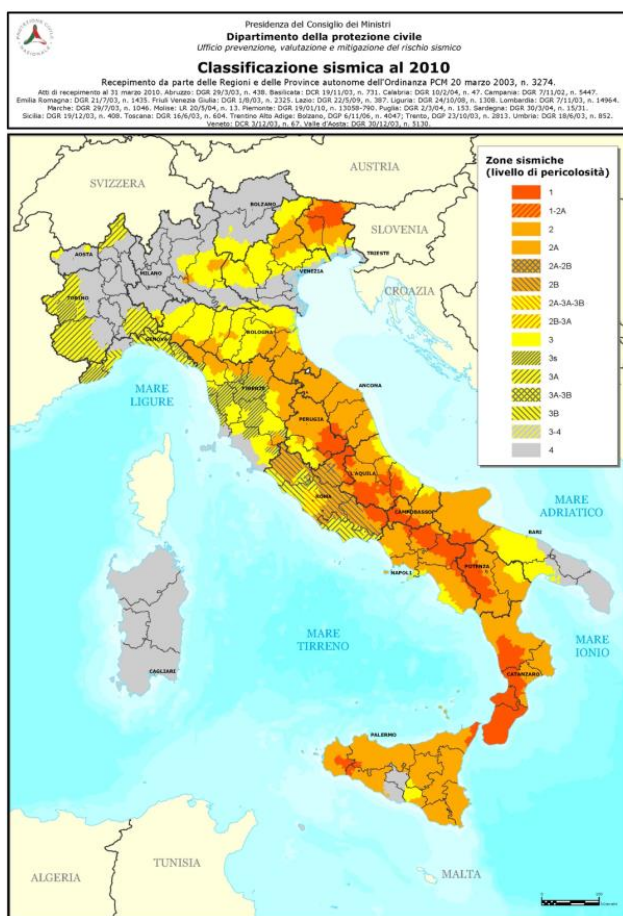
La caratterizzazione della sismicità di un territorio richiede, in primo luogo, una approfondita e dettagliata valutazione della storia sismica, definita attraverso l'analisi di evidenze storiche e dati strumentali riportati nei cataloghi ufficiali.

La sismicità storica dell'area interessata dall'opera in progetto è stata analizzata consultando i cataloghi più aggiornati, considerando un intervallo temporale che va dal mondo antico all'epoca attuale.

Attualmente la sismicità di una certa porzione di territorio italiano viene definita sulla base di determinati coefficienti organizzati e definiti sulla base di alcune leggi che hanno cercato di dare ordine ad un insieme disordinato e pur vasto di un insieme di elementi che non sempre permettevano di esprimere con esattezza e completezza la sismicità di un certo territorio. Questa è in funzione della distribuzione geografica dei terremoti, frequenza, intensità, energia, natura, e la loro correlazione con gli elementi geologici. L'acquisizione e l'elaborazione di tutti questi fattori rimane assai difficile e complessa; quindi, l'elemento principale su cui ci si basa per definire la sismicità di un territorio è l'attitudine di una regione ad essere soggetta ai terremoti in relazione agli effetti prodotti dalle scosse.

Una ricostruzione su base storica della sismicità di una certa regione presenta dei limiti tangibili, in particolar modo per la Sardegna dove gli eventi tettonici si sono susseguiti su scale di tempo sicuramente molto più dilatate rispetto ad altre zone d'Italia o del Mediterraneo. A ciò si lega la scarsità di fonti documentarie, le quali essendo fondamentalmente legate all'uso della scrittura, non possono essere pertanto testimoniati dai popoli nuragici; pertanto, eventuali eventi anche disastrosi non hanno lasciato testimonianze dirette. La sismologia storica in Sardegna si scontra quindi con difficoltà notevoli, ciononostante recenti studi archeologici sui crolli delle torri nuragiche evidenziano tracce di paleo sismicità lungo alcune principali direttrici tettoniche, a ulteriore testimonianza di come la grossolana definizione della Sardegna come "terra asismica" si scontri con evidenti tracce di una certa vivacità tettonica, passata ma anche recente. In parte testimoniata dalla cartografia prodotta dal Gruppo Nazionale per





la Difesa dai Terremoti (GNDT), uno dei Gruppi Nazionali di ricerca scientifica di cui si avvale il Servizio Nazionale della Protezione Civile, in una carta prodotta nel 1996, sulla base degli eventi sismici descritti nei cataloghi nazionali parte della Sardegna settentrionale veniva indicata come soggetta a scosse del V grado M.C.S. con tempi di ritorno $T=475$ anni.

Anche la carta della “Massima intensità macrosismica risentita in Italia” del 1995 viene indicata parte della Gallura settentrionale come soggetta ad eventi sismici passati del VI grado M.C.S.

Vediamo come gli studi basati sulla sismicità storica, per quanto parziali e incompleti sulla Sardegna quantomeno individuano nell'Isola settori soggetti a possibili eventi tellurici di una certa consistenza, ma in tempi più recenti sia con l'emanazione dell'O.P.C.M. 3274, e ora con il D.M. 14 gennaio 2008 la Sardegna viene nella sua totalità classificata in zona 4, pur non essendo stato effettuato uno studio specifico sul picco di accelerazione PGA atteso.

In tempi più recenti la disponibilità di fonti storiche di vario tipo permette la ricostruzione di una cronistoria di una serie di eventi sismici.

7.2 TRACCE DI PALEOSISMICITÀ

Sporadici studi sono stati compiuti in tal senso, per lo più concentrati nella Sardegna settentrionale, ritenuta come più “promettente” dal punto di vista di eventuali tracce di una paleosismicità per via della sua relativamente recente attività effusiva Plio-Quaternaria, le ultime della Sardegna, fenomeni diagnostici di una possibile attività tettonica ancora in corso. La ricerca ha riguardato lo studio di tracce in crolli, dislocamenti e torsioni nei caratteristici monumenti megalitici sardi (Nuraghi e Domus de Janas)

Le analisi condotte fino a questo momento hanno evidenziato un certo riscontro tra la distribuzione di danneggiamenti strutturali e trend omogenei nell'orientazione dei crolli di torri nuragiche e la loro disposizione lungo faglie di importanza regionale, correlata ad attività vulcanica Plio-Quaternaria relativamente recente.

Gli studi noti allo scrivente hanno interessato la Sardegna settentrionale e nello specifico parte del Logudoro e del Goceano; pertanto, non possono essere efficacemente rappresentative del territorio regionale, ciononostante è evidente come uno studio sistematico potrebbe rivelare notevoli informazioni dal punto di vista dell'attività tettonica regionale, ancora oggi sottovalutata.

La Sardegna meridionale è una delle zone dell'isola maggiormente soggette a fenomeni sismici; infatti, sono stati registrati diversi terremoti storici:

7.3 SISMICITÀ STORICA

1616 – Il primo terremoto storico noto in Sardegna, venne avvertito a Cagliari il 4 giugno del 1616, testimoniato da una piccola iscrizione marmorea nel Duomo: “A.D. 4 juni terremotus factus est 1616”.

Recenti studi hanno dimostrato come l’evento abbia interessato un’area piuttosto vasta, che si estendeva nel settore sud-orientale della Sardegna l’evento colpì il litorale di Villasimius, il golfo di Cagliari, le torri di Cala Pira, San Luigi, l’Isola di Serpentara, di Porto Giunco, l’Isola dei Cavoli, di Cala Caterina, di Capo Boi, di Cala Regina fino a Monte Fenegu.

Testimonianze dell’epoca riferiscono veri e propri momenti di panico tra la popolazione dell’hinterland cagliaritano.

Il sisma creò danni a strutture esistenti, infatti recenti studi basati sul ritrovamento di documenti datati tra agosto e dicembre del 1616 testimoniano la necessità di dover procedere al restauro di otto torri difensive, “resosi necessario per le lesioni determinate da una scossa di terremoto avvenuta appunto nel giugno precedente”.

Dai dati noti è possibile ipotizzare una scossa piuttosto forte, con una intensità compresa tra il 6° e il 7° grado della scala Mercalli (magnitudo \approx 6.1).

L’ubicazione dell’epicentro rimane incerta, a seconda degli studiosi viene indicato nei pressi di Siliqua nella zona di Acquafredda, più recentemente lo si ipotizza in mare aperto, non distante dalla costa. In questo caso il sisma sarebbe quindi una conseguenza della dinamica del bacino del Tirreno meridionale.

1771 – Il secondo venne avvertito prevalentemente a Cagliari, ma anche a Iglesias e nell’Isola di San Pietro la sera del 17 agosto del 1771. Il sisma di media entità approssimativamente del 4° grado Mercalli (magnitudo \approx 4) non produsse danni, ma gli effetti furono ben percepiti nelle abitazioni con vibrazioni nelle strutture in legno, oscillazioni di vetri, vasellame e mobilia.

L’epicentro di queste due manifestazioni sismiche è individuato a circa 30 Km a Nord-Ovest di Cagliari, nella località di “s’Acqua Cotta” tra Villasar e Villacidro dove si hanno delle manifestazioni idrotermali in corrispondenza di una faglia profonda.

1855 – la letteratura ci tramanda assai pochi dati a proposito di questo evento sismico: sentito leggermente a Sanluri e Gergei, con probabile epicentro nella zona di Sardara, dove vi è una faglia molto estesa.

1977 – il 18 settembre del 1977, alle 11.45 viene percepita una scossa di terremoto classificata del 7° grado della scala Mercalli (magnitudo \approx 6.1) nella Sardegna meridionale, in particolare a Cagliari, ma la scossa viene ben percepita anche ad Oristano. Le cronache riferiscono che la scossa crea panico tra la popolazione, molte persone si riversano nelle strade e cinque malati di cuore finiscono all’ospedale per crisi cardiaca, i centralini dei vigili del fuoco e delle forze dell’ordine vengono intasati.

L’epicentro viene individuato al largo dell’Isola di Sant’Antioco ed è legato all’attività di un vulcano sottomarino che si trova a 3000 metri di profondità, battezzato con il nome “Quirino”.

2006 – il 23 marzo 2006 alle 23,45 una scossa di terremoto è stata registrata a Cagliari e nei centri sud-occidentali dell’Isola, avvertita nella notte a Cagliari e nei centri limitrofi. La Rete Sismica Nazionale, INGV, ha registrato un sisma di magnitudo 3,4 sulla scala Richter. L’epicentro è stato localizzato al largo di Capo Spartivento. I comuni interessati sono stati Pula, Villa San Pietro, Domus de maria, Sarroch, Teulada, Capoterra, Santadi, Sant’Anna Arresi, Piscinas, Nuxis, Cagliari, Masainas, Villaperuccio, Giba, Elmas, Quartu S.Elena, Quartucciu, Selargius, Narcao, Assemini.

Allo stato attuale per lo studio della sismicità storica ci si avvale anche dei seguenti database:

- Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015 (CPTI15), redatto dal Gruppo di lavoro CPTI 2015 dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Questo catalogo riporta dati parametrici omogenei, sia macrosismici che strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima (I_{max}) ≥ 5 o con magnitudo (M_w) ≥ 4.0 d'interesse relativi al territorio italiano.
- DataBase Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15), realizzato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Questo catalogo riporta un set omogeneo di dati di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti e relativo ai terremoti con intensità massima (I_{max}) ≥ 5 avvenuti nel territorio nazionale e in alcuni paesi confinanti (Francia, Svizzera, Austria, Slovenia e Croazia).

La finestra cronologica coperta dal catalogo CPTI15 e dal database DBMI15 va dall'anno 1000 d.C. circa a tutto il 2014 d.C., ed offre per ogni terremoto una stima il più possibile omogenea della localizzazione epicentrale (Latitudine, Longitudine), dei valori di Intensità massima ed epicentrale, della magnitudo momento e della magnitudo calcolata dalle onde superficiali.

Per la compilazione del CPTI15 sono stati ritenuti di interesse solo i terremoti avvenuti in Italia e quelli che, pur essendo stati localizzati in aree limitrofe, potrebbero essere stati risentiti con intensità significativa all'interno dei confini dello stato.

In Figura 7.1 è mostrata una mappa delle localizzazioni dei terremoti storici presenti nel catalogo CPTI15 relativi alla regione Sardegna e altri noti da studi storici locali.

In generale, dalla consultazione di questo catalogo si evidenzia che l'area interessata dal progetto presenta una sismicità storica molto bassa. Il catalogo CPTI15 riporta solo due eventi di magnitudo $\leq 5M_w$ (1924 e 1948). In occasione dell'evento del 1948 sono state osservate intensità pari a 6MCS in alcune località della Sardegna Nord-Occidentale. I terremoti più recenti (avvenuti nel 2000, 2004 e 2006), tutti di $M_w < 5$ e localizzati in mare, hanno prodotto in terraferma effetti di modesta intensità.

In conclusione, la distribuzione dei terremoti storici nell'area di interesse del progetto, estratti dal catalogo CPTI15 (Fig. 3/A) e dal database DBMI15 (Fig. 3/B), dimostra che la zona in studio è caratterizzata da un livello di sismicità molto basso, sia dal punto di vista della frequenza di eventi, che dei valori di magnitudo.

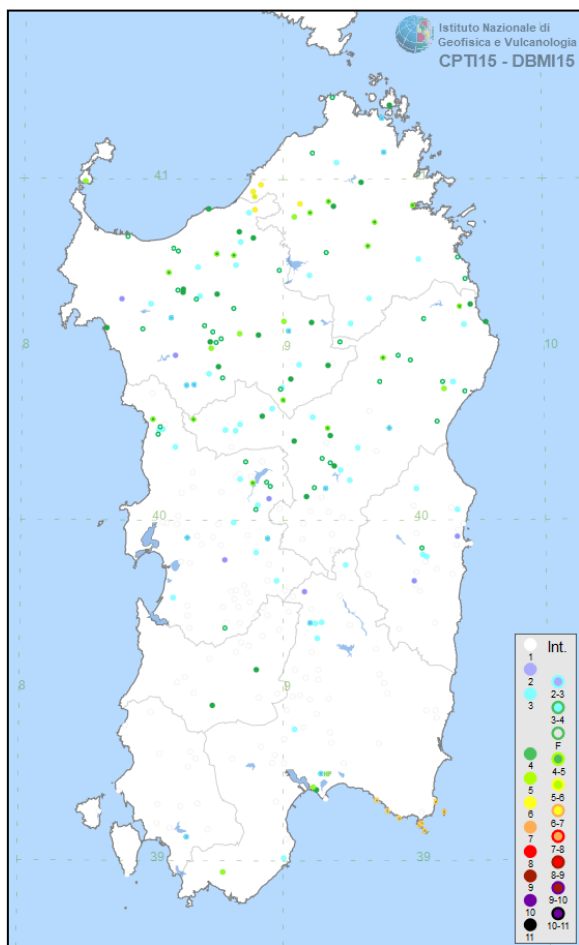


Figura 7.1: Epicentri da catalogo INGV.

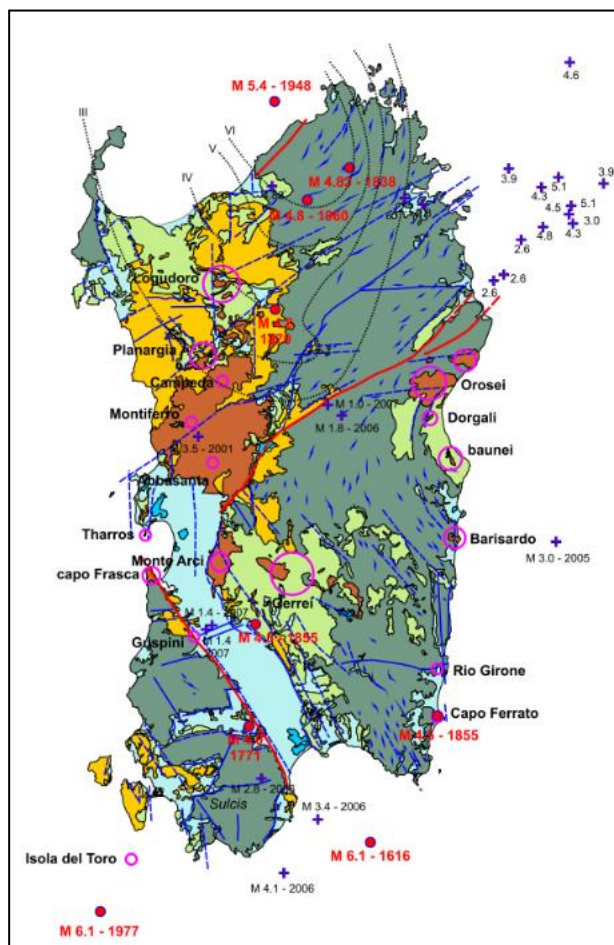


Figura 7.2: Principali epicentri su schema strutturale.

7.4 CARATTERIZZAZIONE SISMOGENETICA

La caratterizzazione sismogenetica dell'area in studio è stata elaborata considerando la recente Zonazione Sismogenetica, denominata ZS9, prodotta dall'INGV (Meletti C. e Valensise G., 2004). Questa zonazione è considerata, nella recente letteratura scientifica, il lavoro più completo e aggiornato a livello nazionale.

Dall'analisi dei risultati riportati nella ZS9 si può evidenziare che la regione interessata dal progetto non è caratterizzata da nessuna area sorgente di particolare rilievo.

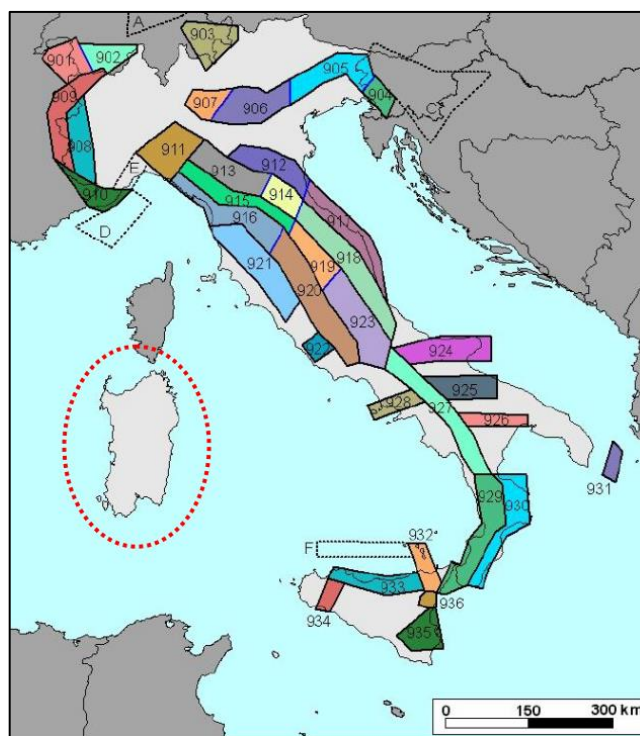


Figura 7.3: Mappa della Zonazione Sismogenetica ZS9 dell'Italia.

8. PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

Le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) già con il D.M. 14/01/2008, recentemente sostituito dal DM del 17/01/2018, si introduceva il concetto di pericolosità sismica di base in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

La “pericolosità sismica di base”, nel seguito chiamata semplicemente pericolosità sismica, costituisce l’elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche da applicare alle costruzioni e alle strutture connesse con il funzionamento di opere come i metanodotti.

Allo stato attuale, la pericolosità sismica del territorio nazionale è definita su un reticolo di riferimento e per diversi intervalli di riferimento (periodo di ritorno).

Il reticolo di riferimento delle NTC 2018 suddivide l’intero territorio italiano in maglie elementari di circa 10 Km per 10 Km, per un totale di 10751 nodi, definiti in termini di coordinate geografiche. Per ciascun nodo del reticolo di riferimento e per ciascuno dei periodi di ritorno (T_r) considerati dalla pericolosità sismica, sono forniti tre parametri per la definizione dell’azione sismica di progetto:

- a_g accelerazione orizzontale massima attesa al bedrock con superficie topografica orizzontale (espressa in $g/10$);
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_c^* periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale (espresso in s).

Da un punto di vista normativo, pertanto, la pericolosità sismica di un sito dipende dalla posizione dell’opera rispetto ai nodi del reticolo di riferimento.

Le accelerazioni orizzontali massime attese al bedrock (a_g) non sono più valutate genericamente sulla base dell'appartenenza del comune in cui realizzare l'opera ad una zona sismica, ma sono calcolate in funzione dell'effettiva posizione geografica del sito ove sarà realizzata l’opera.

In particolare, la classificazione sismica del territorio nazionale è articolata in 4 zone a diverso grado di sismicità espresso dal parametro a_g = accelerazione orizzontale massima convenzionale su suolo di categoria A.

La Sardegna è classificata come categoria 4.

I valori convenzionali di a_g espressi come frazione dell'accelerazione di gravità g , da adottare in ciascuna delle zone sismiche del territorio nazionale sono riferiti ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni ed assumono i valori riportati nella tabella sottostante.

Tabella 8.1: Valori massimi di a_g attesi per zona sismica.

ZONA	VALORE DI a_g
1	0.35 g
2	0.25g
3	0.15g
4	0.05g

8.1 DEFINIZIONE DELLA CATEGORIA DEL SUOLO DI FONDAZIONE

Le NTC 2018 definiscono l'azione sismica considerando un periodo di ritorno (T_r) che è funzione della probabilità di superamento di un valore di accelerazione orizzontale (P_{Vr}) nel periodo di riferimento dell'opera (V_r).

Il periodo di riferimento dell'opera (V_r) si ottiene dal prodotto tra la Vita Nominale (V_n), intesa come il numero di anni nel quale l'opera è utilizzata allo scopo a cui è stata destinata, e il Coefficiente d'uso (C_u), funzione della Classe d'uso della costruzione.

Pertanto, per l'opera in oggetto in questo studio sono stati assunti i seguenti parametri:

- Vita Nominale (VN) di 50 anni;
- Cautelativamente si è utilizzata la Classe d'uso più gravosa IV;
- Categoria topografica: T1 in corrispondenza aree sub-pianeggianti o pendii con acclività $< 15^\circ$.

Le probabilità di superamento di un valore di accelerazione orizzontale (P_{Vr}) nel periodo di riferimento dell'opera (V_r) sono funzione dell'importanza dell'opera e dello stato limite considerato.

La sismicità della regione Sardegna risulta molto bassa, sia i dati storici che quelli strumentali non evidenziano criticità nella pericolosità sismica di base, pertanto, nelle NTC 2018 (cfr. Allegato B, Tabella 2) si ritiene ragionevole assumere per l'intera isola un valore uniforme di accelerazione orizzontale massima al bedrock (a_g).

Il territorio in argomento e tutta la Sardegna, come sopra riportato, è classificato in Zona 4 come zona sismica di riferimento, caratterizzata da un valore a_g dell'accelerazione massima al suolo con probabilità di superamento al 10% in 50 anni pari a $a_g = 0.05g$.

È tuttavia importante sottolineare che le suddette valutazioni delle possibilità amplificative sono di tipo monodimensionale e non tengono conto delle caratteristiche morfologiche dei siti, (valli strette, versanti acclivi, creste, cucuzzoli etc.) che possono invece indurre importanti effetti amplificativi, soprattutto a causa dei fenomeni di focalizzazione delle onde sismiche.

L'azione sismica è caratterizzata da 3 componenti traslazionali, due orizzontali ed una verticale

A seconda delle diverse categorie di suolo ed in ordine all'amplificazione stratigrafica sono da considerare i seguenti Coefficienti S_s e S_c .

Tabella 8.2: Componenti orizzontali S_s e C_c per categorie di sottosuolo.

CATEGORIA DI SOTTOSUOLO	S_s	C_c
A	1.00	1.00
B	$1.00 \leq 1.40 - 0.40 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1.20$	$1.10 \cdot (T^*c)^{-0.20}$
C	$1.00 \leq 1.70 - 0.60 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1.50$	$1.05 \cdot (T^*c)^{-0.33}$
D	$0.90 \leq 2.40 - 1.50 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1.80$	$1.25 \cdot (T^*c)^{-0.50}$
E	$1.00 \leq 2.00 - 1.10 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1.60$	$1.15 \cdot (T^*c)^{-0.40}$

I valori dei parametri caratteristici dello spettro di risposta elastico per il calcolo delle azioni sismiche orizzontali secondo le Norme tecniche per le costruzioni sono quelli di seguito indicati:

Tabella 8.3: Valori caratteristici dello spettro di risposta.

CATEGORIA DI SOTTOSUOLO	S	T _B	T _C	T _D
A B C D E	1.00	0.05	0.15	1.00

Dove S è il fattore amplificativo e T_B, T_C e T_D sono i tempi (durate) relativi ai vari tratti dello spettro di risposta corrispondente a ciascuna categoria di profilo stratigrafico.

La normativa sismica vigente evidenzia, per il calcolo delle azioni sismiche di progetto e la valutazione dell'amplificazione del moto sismico, come i diversi profili stratigrafici del sottosuolo, in base alle loro caratteristiche di spessore e di rigidità sismica (prodotto della densità per la velocità delle onde sismiche trasversali), possono amplificare il moto sismico in superficie rispetto a quello indotto alla loro base: il fattore moltiplicativo delle azioni sismiche orizzontali di progetto dipende cioè dalla natura, dallo spessore e soprattutto dalla velocità di propagazione delle onde di taglio V_{sh} all'interno delle coperture.

I valori dei parametri che definiscono la forma dello spettro di risposta al sito dovrebbero derivare da accurate indagini di risposta sismica locale: in mancanza di tali studi nelle Norme tecniche per le costruzioni si definiscono per questo aspetto cinque indicate con le lettere A, B, C, D, E (non sono più contemplate le S1 ed S2), categorie di suolo di fondazione a diversa rigidità sismica caratterizzate da velocità V_{s30} (definito come il valore medio della velocità di propagazione delle onde sismiche trasversali o di taglio nei primi 30 metri sotto la base della fondazione) decrescenti e quindi da effetti amplificativi crescenti.

I terreni presenti nell'area investigata rientrano nella Categoria di sottosuolo "B".

8.2 PARAMETRIZZAZIONE SISMICA E AZIONE SISMICA

Le NTC 2018 stabiliscono il principio per cui le azioni sismiche sulle costruzioni si stabiliscono in relazione alla pericolosità del sito definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g su roccia (suolo tipo A) e del corrispondente spettro di risposta elastico.

Per accelerazione massima attesa si intende il picco del segnale che ha una probabilità PVR di essere superato in un periodo di riferimento VR (ad esempio molti codici considerano la probabilità del 10% in 50 anni come riferimento per il progetto).

L'azione sismica, per il sito di edificazione e per la tipologia di costruzione definita (vita nominale, coefficiente d'uso), deve essere valutata relativamente allo Stato Limite da considerare.

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR, cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono riportate in tabella:

Tabella 8.4: PVR per i diversi stati limite.

STATI LIMITE	PVR	
	PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO NEL PERIODO DI RIFERIMENTO V _r	
Stati limite di esercizio (SLE)	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi (SLU)	SLV	10%
	SLC	5%

Fissata la probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR per ciascun Stato Limite considerato, va determinato il periodo di ritorno dell'evento sismico da considerare.

A tal fine si utilizza la seguente formula e la relativa tabella:

$$TR = -VR / \ln(1 - PVR) = -C, VR / \ln(1 - PVR)$$

A seconda dei diversi stati limite si ottengono i seguenti tempi di ritorno TR in funzione del tipo di costruzione e classe d'uso. Secondo quanto indicato dal progettista vengono indicati: Vita nominale > 50 anni (fabbricato di tipo 2) e di Classe IV (opere strategiche).

Tabella 8.5: Tempi di ritorno per opere di classe IV.

STATI LIMITE	TEMPI DI RITORNO T _R (ANNI)	
SLE	SLO	60
	SLD	100
SLU	SLV	949
	SLC	1950

In corrispondenza dei diversi stati limite si riportano di seguito i valori dei parametri:

Tabella 8.6: Parametri di pericolosità sismica.

		A _G (G)	F ₀	TC* (SEC)
SLE	SLO	0.254	2.69	0.301
	SLD	0.313	2.73	0.307
SLU	SLV	0.599	2.98	0.370
	SLC	0.707	3.06	0.393

Nell'area interessata dal progetto si riscontra la presenza di una sottile copertura di suoli ricoprente un substrato roccioso da mediamente a piuttosto massivo, tendente a diventare sempre più massivo e compatto in profondità.

Vista la tipologia del substrato, può essere omessa la verifica alla liquefazione dei terreni.

Per quanto attiene all'amplificazione determinata dalle condizioni morfologiche del sito considerato che:

- Gli aerogeneratori sono ubicati in settore sub-pianeggianti o caratterizzati da una blanda acclività, generalmente contenuta entro 5-6°;
- Le fondazioni in progetto poggeranno presumibilmente su di un substrato litoide piuttosto competente;
- L'andamento delle Vs misurate indica che la rigidità del substrato cresce più o meno costantemente al crescere della profondità;
- Le condizioni stratigrafiche e morfologiche consentono l'utilizzo del metodo semplificato;
- La categoria di sottosuolo dell'area in cui si hanno in progetto gli aerogeneratori può essere indicata in via preliminare come "B";

La normativa in queste condizioni prevede che debba essere considerato un possibile effetto d'amplificazione dell'onda sismica, anche se contenuto, ma visto l'assetto topografico si ritiene che la morfologia possa attuare dei limitati fenomeni di d'amplificazione topografica di categoria "T1": ST=1,0.

Tabella 8.7: Parametri sismici di progetto.

		S	TB	TC	TD	FV	CC	SS
SLE	SLO	1.20	0.141	0.422	1.702	0.580	1.398	1.200
	SLD	1.20	0.143	0.428	1.725	0.652	1.393	1.200
SLU	SLV	1.20	0.166	0.497	1.840	0.983	1.341	1.200
	SLC	1.20	0.174	0.522	1.883	1.099	1.326	1.200

L'azione sismica di progetto tenuto conto dell'effetto morfologico presenterà un'amplificazione limitata rispetto al valore massimo atteso agli stati limite sarà quindi:

- SLO: $agT = S * ag * ST = 1,20 * 0,254 * 1,0 = 0,31 \text{ g} = 3,1 \text{ m/s}^2$
- SLD: $agT = S * ag * ST = 1,20 * 0,313 * 1,0 = 0,38 \text{ g} = 3,8 \text{ m/s}^2$
- SLV: $agT = S * ag * ST = 1,20 * 0,599 * 1,0 = 0,72 \text{ g} = 7,2 \text{ m/s}^2$
- SLC: $agT = S * ag * ST = 1,20 * 0,707 * 1,0 = 0,85 \text{ g} = 8,5 \text{ m/s}^2$

Ai sensi della normativa (articolo 3.2.3.3 "Spostamento orizzontale e velocità orizzontale del terreno") si ottengono i valori massimi dello spostamento (d_g) e della velocità orizzontali (v_g) del suolo, previsti a livello del piano di fondazione attraverso le espressioni:

- SLO: $dg = 0,025 * S * TC * TD * agT = 0,025 * 1,20 * 0,422 * 1,702 * 3,1 = 0,07 \text{ cm}$
- SLD: $dg = 0,025 * S * TC * TD * agT = 0,025 * 1,20 * 0,428 * 1,725 * 3,8 = 0,08 \text{ cm}$
- SLV: $dg = 0,025 * S * TC * TD * agT = 0,025 * 1,20 * 0,497 * 1,840 * 7,2 = 0,20 \text{ cm}$
- SL: $dg = 0,025 * S * TC * TD * agT = 0,025 * 1,20 * 0,522 * 1,883 * 8,5 = 0,25 \text{ cm}$

- SLC: $vg = 0,16 * S * TC * agT = 0,16 * 1,20 * 0,422 * 3,1 = 0,25 \text{ cm/s}$
- SLC: $vg = 0,16 * S * TC * agT = 0,16 * 1,20 * 0,428 * 3,8 = 0,31 \text{ cm/s}$
- SLC: $vg = 0,16 * S * TC * agT = 0,16 * 1,20 * 0,497 * 7,2 = 0,69 \text{ cm/s}$
- SLC: $vg = 0,16 * S * TC * agT = 0,16 * 1,20 * 0,522 * 8,5 = 0,85 \text{ cm/s}$

In prospettiva sismica, l'area a livello di superficie sono da ritenersi, in osservanza dell'Ordinanza P.C.M. N.3274 e del DM 14/09/05, ad incremento sismico molto basso.

9. MODELLO GEOLOGICO E GEOTECNICO DI RIFERIMENTO

Sulla base della stratigrafia locale generale nota da dati di letteratura supportata dall'esecuzione di specifiche indagini, hanno permesso la definizione del modello geologico di dettaglio locale atto a definire il volume significativo di terreno influenzato dalle fondazioni delle opere in progetto.

I valori geotecnici indicati sono basati sull'osservazione dell'andamento delle indagini eseguite in un determinato sito, e precedentemente descritte.

I valori geotecnici di riferimento indicati in stratigrafia sono stati mediati dallo scrivente, eventualmente ridotti rispetto a quanto ottenuto dalle correlazioni empiriche precedentemente illustrate, al fine di poter ottenere un modello geotecnico veritiero, ma ragionevolmente cautelativo del sito studiato.

9.1 STRATIGRAFIA SCHEMATICA E PARAMETRIZZAZIONE GEOTECNICA

Nelle tabelle sottostanti viene rappresentata la ricostruzione stratigrafica con parametrizzazione geotecnica dei siti interessati dalle opere in progetto.

I parametri rappresentati nelle tabelle sono:

- P: profondità strato (tetto-letto);
- γ : Peso unità di volume (kg/m^3);
- ϕ : Angolo di attrito ($^\circ$);
- C: Coesione (kg/m^3);
- C_u : Coesione non drenata (kg/m^3);
- E_d : Modulo Edometrico (kg/m^3);
- E_y : Modulo Elastico (kg/m^3).

9.2 STRATIGRAFIA AREA DI SEDIME TIPICA

L'analisi combinata della sismica ad onde di superficie MASW e a rifrazione ha permesso, tramite specifiche correlazioni empiriche, di poter fornire una stratigrafia di dettaglio e una parametrizzazione geotecnica di massima del substrato.

Pertanto, sulla base di quanto premesso, la litostratigrafia e la relativa parametrizzazione geotecnica ha il solo scopo di verificare che il terreno tipo di sedime che ospiterà gli aerogeneratori possa essere effettivamente in grado di poter sostenere i carichi indotti dalle fondazioni, senza cedimenti tali da poter comprometterne la stabilità.

In caso di progettazione definitiva si provvederà a svolgere una esaustiva campagna di indagini per ogni sito in modo da poter procedere ad una puntuale ed accurata caratterizzazione stratigrafica e geotecnica.

I parametri geotecnici indicati nella tabella sottostante, sono stati ottenuti utilizzando i valori geotecnici caratteristici, in alcuni casi ulteriormente ridotti in via cautelativa dallo scrivente, in modo da poter essere ragionevolmente certi che i valori utilizzati nella progettazione strutturale siano ampiamente verificati.

Per il livello alluvionale si è cautelativamente posto coesione nulla, trattando le terre come esclusivamente incoerenti.

Per il substrato lapideo si sono utilizzati dei valori notevolmente ridotti rispetto a quanto ottenute con le formule empiriche precedentemente illustrate.

Tabella 9.1: Stratigrafia geologica e geotecnica di massima.

STRATO	PARAMETRI		VALORI CARATTERISTICI
Marne alterate da 0 a -2.0 m	peso di volume	γ	20.9 kN/mc
	Coesione	c'	0.0 kPa
	Angolo attrito	φ'	50°
	Coesione non drenata	C_u	0.0 kPa
	Modulo Edometrico	E_d	200 MPa
	Modulo Elastico	E_y	250 MPa
Marne massive da -2.0 m a f.s.	peso di volume	γ	21.4 kN/mc
	Coesione	c'	300 kPa
	Angolo attrito	φ'	60°
	Coesione non drenata	C_u	500 kPa
	Modulo Edometrico	E_d	1000 MPa
	Modulo Elastico	E_y	1250 Mpa

9.3 PIANO DI INDAGINI PER LA PROGETTAZIONE DEFINITIVA

Come riportato nelle premesse di questa relazione preliminare, i caratteri geolitologici, geotecnici e la configurazione stratigrafica del sito d'intervento, che hanno rivestito forma preliminare ed il più possibile verosimile in questa fase, sulla base delle fonti a disposizione e delle indagini eseguite, saranno ulteriormente definiti, e con maggior dettaglio, a seguito dei risultati di indagini geognostiche e geotecniche, da eseguirsi in sito ed in laboratorio.

La tipologia di lavorazioni e di opere da realizzarsi, che in termini di carichi trasmessi al terreno possono essere correlati essenzialmente alla realizzazione delle fondazioni degli aerogeneratori e delle opere infrastrutturali connesse (cabine elettriche di trasformazione, distribuzione, ecc.), indicano che la profondità da indagare in maniera diretta attraverso la realizzazione di sondaggi geognostici da ubicare nei siti d'insediamento degli aerogeneratori, possa essere estesa fino ad almeno 4m m di profondità dal piano di campagna, con prelievo di campioni negli orizzonti attraversati più significativi, da esaminare in laboratorio.

Si presume che le fondazioni andranno a poggiare su di un substrato costituito da marne arenacee della Formazioni di Gesturi, la caratterizzazione geotecnica si basa pertanto su prove adatte a terreni granulari. In quest'ultimo caso si ritiene improbabile che si rinvenano dei livelli coesivi.

Nel caso in cui il sondaggio intercetti una falda superficiale, si provvederà ad allestire un piezometro per il monitoraggio della stessa al fine di definire eventuali interazioni con la fondazione stessa.

Risulta necessario, a supporto della predisposizione della relazione sismica (definizione della categoria del sottosuolo secondo le NTC 2018), oltre che per una più completa caratterizzazione e distinzione geostatigrafica del sottosuolo, la realizzazione di indagini sismiche tramite il metodo MASW, da realizzarsi circa in posizione centrale nell'area interessata dalle fondazioni degli aerogeneratori e delle infrastrutture che dovranno essere realizzate.

Al fine di definire l'andamento stratigrafico con adeguato dettaglio dell'intera area di sedime, verranno eseguite per ogni sito di indagine due sezioni sismiche in modalità tomografica disposte a croce centrata sulla fondazione, in modo da poter definire con adeguato dettaglio l'intero sito di sedime, correlando la stratigrafia del carotaggio con le risultanze sismiche ed estendere il valore puntuale della perforazione a carotaggio.

Risulta necessaria la realizzazione di prove penetrometriche pesanti DPSH e prove di carico su piastra lungo le piste di accesso, al fine di determinare la capacità portante dei terreni stradali, degli eventuali



strati di rilevato, nonché delle pavimentazioni e delle piazzole destinate ad ospitare il cantiere per la messa in opera degli aerogeneratori.

Per il corretto dimensionamento degli impianti di messa a terra si provvederà ad eseguire delle indagini geoelettriche con configurazione Wenner, atte a poter misurare la resistività del terreno. Per quanto riguarda la misura della resistività dei suoli si propone che vengano eseguite sempre con la configurazione di Wenner ma in modalità tomografica. In questo modo le misure eseguite potranno essere elaborate con specifico software in grado di restituire una sezione elettrostratigrafica 2D, utile nella definizione dell'assetto geologico di dettaglio dei siti d'interesse. Abbinando alle misure di resistività anche delle misure di caricabilità (Polarizzazione Indotta) si possono avere anche ulteriori informazioni sull'assetto idrogeologico locale. La profondità d'indagine presunta per questo tipo di indagine è di circa 10-15 m.

Per il raggiungimento degli obiettivi sopra esposti, si prevede, pertanto, di impostare il seguente piano di indagini:

Realizzazione di sondaggi a carotaggio continuo (diam. 101 mm): realizzazione di perforazioni con profondità minima di 30 m dal piano di campagna;

- Prove di laboratorio su terre:
 - esecuzione di prove di taglio diretto con scatola di Casagrande;
 - prove edometriche su campioni coesivi;
 - determinazione dei limiti di Atterberg con analisi granulometrica;
- Prove di laboratorio su roccia:
 - esecuzione di prove di carico concentrato Point Load Test;
 - esecuzione determinazione di massa volumica;
- Prove in sito:
 - esecuzione di SPT in fori di sondaggio;
 - esecuzione di DPSH lungo le piste di accesso e nell'area destinata ad ospitare la piazzola per la messa in opera degli aerogeneratori;
 - esecuzione di indagini sismiche a rifrazione con modalità tomografica;
 - esecuzione di indagini geoelettriche per la definizione della resistività dei suoli.

Tale lista costituisce un elenco indicativo e non esaustivo, ci si riserva di aggiornare le indagini proposte sulla base delle risultanze che si avranno dalle perforazioni a carotaggio.

DESCRIZIONE DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOTECNICHE PREVISTE

IMPIANTO DI CANTIERE PER INDAGINI GEOGNOSTICHE, compreso l'approntamento in deposito delle attrezzature, degli accessori, dei ricambi e dei consumi; compreso il carico su automezzo, lo scarico in cantiere, il montaggio, lo smontaggio a lavori ultimati, il carico su automezzo e lo scarico in deposito; compreso il trasporto dal deposito al cantiere di lavoro, compreso il ritorno a vuoto; o trasporto delle stesse da cantiere a deposito, compresa l'andata a vuoto; compreso il trasferimento del personale
PERFORAZIONE ad andamento verticale o con inclinazione fino ad un massimo di 15° dalla verticale, eseguita a rotazione a carotaggio continuo, con carotieri di diametro da 85 mm fino a 101 mm, in terreno a granulometria fine quali argille, limi sabbiosi e rocce tenere; compreso l'onere dell'estrazione delle carote e la loro conservazione in apposite cassette catalogatrici queste escluse e compensate a parte; compresa la tubazione di rivestimento del foro; per le seguenti profondità, misurate a partire dal piano campagna, comprese tra: m 0,00 e m 15,00 massimo
PERFORAZIONI, sia a carotaggio continuo sia a distruzione di nucleo, eseguite in rocce dure che richiedono l'impiego di corone diamantate; per profondità fino a m 40,00 e per i seguenti diametri della corona diametro fino a mm 145
PRELIEVO DI CAMPIONE INDISTURBATO, compatibilmente con la natura dei terreni, nel corso di sondaggi, con l'impiego di campionatore a parete sottile spinto a pressione; compreso l'onere della fornitura di fustella zincata, della paraffinatura per eseguire la sigillatura e del trasporto al laboratorio di analisi indicato dal committente; per le profondità seguenti dal piano di campagna: da m 0,00 a m 15,00
ESECUZIONE DI PROVE SPT (STANDARD PENETRATION TEST) all'interno dei fori di sondaggio; eseguite con campionatore tipo RAYMOND del diametro di 2" ; per le seguenti profondità misurate da piano di campagna: da m 0,00 a m 15,00
PROVA SISMICA ATTIVA TIPO MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave) per la determinazione di curve di dispersione delle onde superficiali di tipo Rayleigh generate con idonei sistemi, e registrate con 24 geofoni verticali aventi periodo di oscillazione 4.5 Hz disposti secondo geometria lineare con "offset" non inferiore a 2 volte il G-spacing e collegati ad un sismografo multicanale a memoria incrementale Compreso l'analisi dei dati nel dominio FK (frequency-wave number) per la determinazione di curve di dispersione delle onde superficiali di tipo Rayleigh redatti in grafici Vfase – Hz, l'inversione del modello di rigidità del sottosuolo fino a raggiungimento del miglior "fitting" tra i dati sperimentali e teorici, la relazione riepilogativa contenente: - le procedure di esecuzione della prova, - grafici di acquisizione (serie temporali), Vfase – Hz, - eventuale restituzione di profili Vs del sottosuolo, - calcolo del valore di Vs,eq ai sensi del D.M. 17 gennaio 2018. - approntamento e trasporto delle attrezzature e loro installazione c/o ciascuna linea di sondaggio sismico MASW per ogni sondaggio MASW, comprensivo di relazione, grafici e misura del parametro Vs30 Compreso trasporto, installazione e smontaggio attrezzature
PROFILO SISMICO A RIFRAZIONE eseguito con apparecchiatura elettronica digitale ad alta precisione a 24 canali, stesa dei cavi, undici punti di energizzazione con massa battente, lettura dei primi arrivi, analisi diretta ed inversa delle onde longitudinali mediante software di tomografia sismica in grado di individuare i diversi rifrattori, il calcolo delle velocità apparenti, la definizione dei diversi strati in spessori e velocità, la costruzione di dettaglio delle relative sismosezioni, relazione riepilogativa e quanto altro occorra per dare il lavoro finito.
PROVA DI CARICO SU PIASTRA, eseguita secondo le norme CNR anno XXVI n. 146, con un ciclo di carico e scarico fino ad un massimo di 450 kPa e ricarico fino ad un massimo di 350 kPa.
PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO, da definire in funzione del materiale rinvenuto dai sondaggi geognostici.



10. CONCLUSIONI

Lo studio geologico evidenzia come le fondazioni degli aerogeneratori in progetto si inseriscano in un contesto stratigrafico caratterizzato da affioramenti marnoso arenacei del Miocene, con uno spessore presunto che può arrivare oltre i 100 m, ricoprenti il basamento paleozoico.

La stratigrafia litotecnica di riferimento dell'area è stata ottenuta mediante l'esecuzione di tre indagini sismiche MASW abbinata ad una rifrazione semplificata ad una sola battuta. L'analisi combinata di queste due metodologie di indagini sismiche ha permesso di investigare i siti con adeguato dettaglio, consentendo inoltre di avere una parametrizzazione geotecnica di massima fino a circa 15 m di profondità mediante l'utilizzo di formule empiriche che si basano sulla misura delle velocità V_s e V_p , nonché di avere una indicazione dell'andamento stratigrafico tipico dell'area in esame (anche ai fini della definizione della risposta sismica) fino a circa 30 m di profondità.

Gli aerogeneratori in progetto sono ubicati negli alti morfologici di colline che caratterizzano il sito in studio, con fianchi generalmente a debole pendenza in cui si riscontra una sottile copertura alluvionale nei fondovalle e sottili suoli argillosi nelle loro sommità che ricoprono le successioni calcareo-marnose, che tendono a diventare sempre più massive in profondità.

L'analisi del pericolo geologico per le aree destinate ad ospitare gli aerogeneratori ha evidenziato un contesto geomorfologico stabile rispetto a fenomeni di dissesto gravitativo, inoltre non si rilevano possibili future alterazioni del deflusso delle acque di scorrimento superficiale.

L'assetto idrogeologico sotterraneo non si ritiene che potrà essere alterato dalla realizzazione delle opere, poiché non si sono avuti riscontri della presenza di acquiferi superficiali che possano essere interessati dagli scavi, ad ogni modo si dovrà avere la massima attenzione affinché eventuali emergenze idriche vengano verificate durante l'esecuzione della campagna di indagini geognostiche per l'eventuale progettazione definitiva.

Sulla base di quanto precedentemente esposto, il substrato roccioso destinato ad ospitare le fondazioni degli aerogeneratori si presenta, nel suo complesso, in grado di poter sostenere i carichi indotti dalla struttura senza particolari deformazioni o cedimenti.

Nel complesso non si riscontrano elementi ostativi per quanto riguarda l'esecuzione del progetto in esame.

APPENDICE: INDAGINI SISMICHE MASW

L'esecuzione di indagini sismiche ha lo scopo di ottenere informazioni di tipo geotecnico sul comportamento fisico-meccanico dei corpi geologici investigati, attraverso la determinazione dei relativi parametri, ed informazioni di tipo geologico sui caratteri strutturali e stratigrafici del volume del sottosuolo indagato.

Si tratta di uno dei metodi attualmente più utilizzati per l'esplorazione in profondità del sottosuolo e consiste nel creare delle onde artificiali nel terreno (energizzazione) battendo una piastra poggiata a terra con una mazza. Le indagini geognostiche che utilizzano le metodologie sismiche sfruttano le proprietà dei terreni di farsi attraversare dalle onde sismiche a diversa velocità; questa dipende da molti fattori, quali la natura mineralogica della roccia, il grado di cementazione e di fatturazione, la porosità, il contenuto in acqua o in gas, ecc.

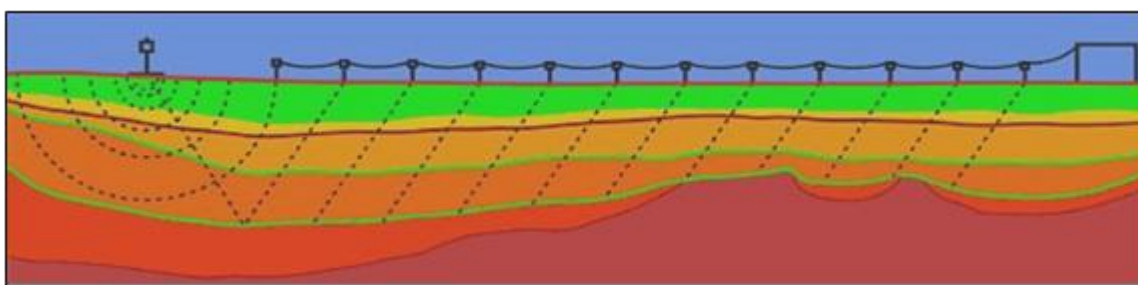


Figura 10.1: Rappresentazione schematica di una tipica prospezione sismica.

Caratteristiche strumentali

La strumentazione utilizzata è costituita da un Sismografo DAQLink III (Seismic Source U.S.A.) con convertitore A/D a 24 bit, numero di canali da 3 a 24, ampio range dinamico 144db, output dei dati in SEG-Y, SEG-2 o ASCII, opzione per test dei geofoni ed accelerometri, lunghezza di registrazione fino a 4 mld di campioni, intervalli di campionamento: 0.0208, 0.0625, 0.125, 0.250, 0.500, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00, 16.00 ms. L'intero sistema di acquisizione è conforme alle specifiche ASTM D5777-00 (2006) (Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation); l'energizzazione del terreno è stata effettuata mediante l'utilizzo di una massa battente (mazza di 10 kg con starter su piattello di battuta).

Per la ricezione delle onde longitudinali (P), durante l'indagine sismica, sono stati usati geofoni verticali a lungo periodo (4.5 Hz).



Figura 10.2: A sinistra sismografo DaqLinkIII, a destra le operazioni di acquisizione.

Generalità sulle indagini sismiche mediante onde di superficie

La necessità dettata dalle NTC 2018 di fornire una solida stima della velocità di propagazione delle onde S nel sottosuolo ha dato un forte slancio alla diffusione di tecniche basate sull'analisi della dispersione delle onde di superficie (Rayleigh e Love). La dispersione rappresenta una deformazione di un treno d'onde dovuta ad una variazione di propagazione di velocità con la frequenza. In un mezzo stratificato le varie componenti (lunghezza d'onda, quindi frequenza $\lambda = v/f$ del segnale sismico) si propagano ad una velocità diversa in funzione delle caratteristiche del mezzo. Le componenti a frequenza minore (lunghezza d'onda maggiore) penetrano più in profondità e sono quindi influenzate dagli strati più profondi rispetto a quelle a frequenza maggiore (lunghezza d'onda minore) che risentono delle proprietà fisiche dei livelli superficiali, e presentano normalmente più elevate velocità di fase.

Metodologia MASW

La tecnica MASW consente di misurare la velocità delle onde di taglio V_s sfruttando il carattere dispersivo delle onde di Rayleigh quando queste si propagano in un mezzo stratificato.

La dispersione consiste nella variazione della velocità di fase a diverse frequenze, con l'aumento della lunghezza d'onda (abbassamento di frequenza) la profondità coinvolta dalla propagazione dell'onda è via via maggiore.

È quindi possibile, impiegando onde di un certo intervallo di frequenza, caratterizzare le proprietà acustiche dei terreni sino ad una certa profondità. Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali.

Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga. Questa proprietà si chiama dispersione.

Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (V_s), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

Questo tipo di analisi fornisce i parametri fondamentali comunemente utilizzati per valutare la rigidità superficiale, una proprietà critica per molti studi geotecnici.

L'intero processo comprende tre passi successivi: L'acquisizione delle onde superficiali (ground roll), la costruzione di una curva di dispersione (il grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza) e l'inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle V_s .

Il metodo si sviluppa attraverso la determinazione delle proprietà dispersive del mezzo individuabili dall'analisi dello spettro di velocità dei dati. Il range di frequenza si sviluppa comunemente tra i 5 Hz e i 70 Hz, fornendo informazioni sino a profondità di circa 30 m a seconda della rigidità del suolo: la profondità massima di penetrazione è determinata dalla relazione fra velocità di propagazione dell'onda e più bassa frequenza identificabile.

Questa tipologia di prospezione si realizza con uno stendimento sismico costituito da 12/24 o più geofoni allineati a distanza intergeofonica variabile tipicamente fra 1 e 5 m (la lunghezza dello stendimento incide sulla focalizzazione del segnale nello spettro di velocità) che registrano le onde sismiche generate in corrispondenza di X punti di energizzazione effettuati tipicamente ad una distanza compresa fra 2 m e 20 m dal primo geofono.

L'obiettivo della registrazione è quindi l'individuazione del treno di onde superficiali (Rayleigh), che a causa della stratificazione del mezzo subisce una dispersione le cui modalità sono direttamente correlate alla velocità delle onde di taglio S .

L'acquisizione delle onde di Rayleigh può essere fatta mediante geofoni verticali (come nel nostro caso), oppure mediante geofoni orizzontali con asse posto parallelo (radiale) allo stendimento (in entrambi i casi si utilizza una sorgente verticale - piastra-martello).

Rayleigh Wave

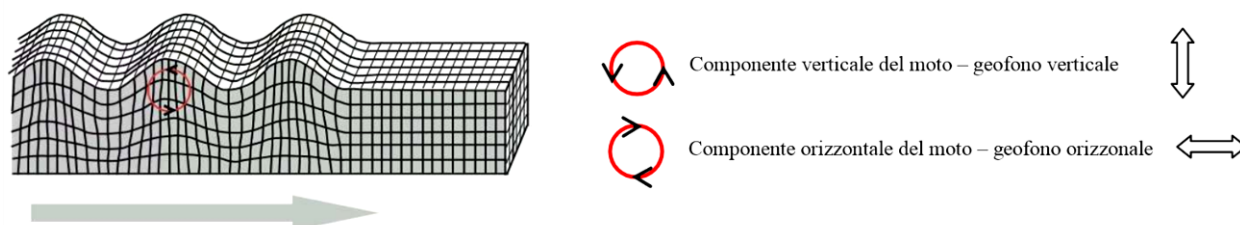


Figura 10.3: Schematizzazione onda di Rayleigh.

Schema operativo acquisizioni MASW

Sulla base delle caratteristiche morfologiche del sito, è stato posizionato lo stendimento sismico, in parte nell'area d'ingombro della struttura. L'analisi è stata eseguita adottando la seguente configurazione:

- N° geofoni: 24 con frequenza propria di risonanza 4,5 Hz;
- Distanza intergeofonica: 2.0 m per complessivi 46 m di stendimento;
- Offset di battuta: n° 1 battuta disposta a -4.0 m dall'ultimo geofono.

Per quanto riguarda l'acquisizione sono state utilizzate le seguenti impostazioni:

- Tempo di acquisizione: 1.0 s;
- Frequenza di campionamento: 1000 Hz;
- Periodo di campionamento: 1.0 ms.

L'analisi dei dati acquisiti dalla metodologia avviene attraverso le seguenti fasi:

1. Calcolo dello spettro di velocità; 2. Individuazione del modo fondamentale e degli eventuali superiori; 3. Calcolo della curva di dispersione mediante modellazione diretta, cioè attribuzione degli spessori e delle velocità relative, sulla base di dati riguardanti il sito acquisiti precedentemente tramite indagini dirette o bibliografia. In alternativa picking della curva di dispersione, cioè selezione dei punti che si ritengono appartenere ad un determinato modo; 4. Inversione della curva di dispersione e conseguente individuazione del profilo di velocità V_s .

Gli spettri di velocità risultano dominati dal modo fondamentale delle onde di Rayleigh.

Nella Tabella e nelle Figure sottostanti vengono riportati: l'andamento del profilo di velocità; gli spessori; le relative velocità V_s (dalle onde di Rayleigh) e la densità stimati, ricordando che, come in tutti i metodi geofisici, può essere ottenuta solo una stima del modello sismostratigrafico a causa del problema della non univocità.

La rappresentazione grafica dei risultati dell'indagine Masw viene rappresentata attraverso i diagrammi dello spettro di dispersione, il quale indica come le onde di superficie si disperdono nel terreno individuando anche i "modi superiori", dovuti generalmente alla presenza di discontinuità stratigrafiche.

L'andamento stratigrafico delle V_s viene rappresentato con un digramma dove sono indicate alle diverse profondità investigate le rispettive velocità V_s a cui si sovrappone l'andamento della curva di dispersione data da una successione di pallini verdi.

Rigidità sismica (R)

La rigidità sismica è un parametro legato all'amplificazione sismica locale; tanto più alto risulta R tanto minore sarà l'incidenza del danno dovuto al sisma:

$$R = \gamma \cdot V_s$$

Dove:

- γ = peso di volume naturale;
- V_s = Velocità di taglio.

Frequenza fondamentale di Nakamura (F0)

$$F_0 = \frac{V_s}{4H}$$

Dove:

- H = spessore dello strato.
- Velocità delle onde longitudinali (V_s)

Categorie del sottosuolo di fondazione

Nei paragrafi che si riportano nel seguito sono riassunti i dati medi principali desunti dall'indagine. Nel calcolo della "Velocità equivalente" $V_{s_{eq}}$ si è tenuto conto di tutti gli strati rilevati nei profili completi riportati in precedenza. La $V_{s_{eq}}$ rappresenta la media ponderata della distribuzione delle velocità di taglio per una profondità H sotto il piano di fondazione e si ottiene applicando la seguente formula:

$$V_{s_{eq}} = \frac{H}{\sum_{strato=1}^N \frac{h_{(strato)}}{V_{s_{(strato)}}}}$$

Dove N è il numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo spessore $h_{(strato)}$ e dalla velocità delle onde $S_{(strato)}$.

Per H si intende la 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 depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s_{eq}}$ è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Il parametro $V_{s_{eq}}$ consente di stabilire la classe di suolo come stabilito alle NTC del 2018 e sono riportate nella tabella che segue.

CATEGORIE DI SOTTOSUOLO DI FONDAZIONE SECONDO LE NTC DEL 2018

CATEGORIA	DESCRIZIONE
A	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.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	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.
D	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 m/s e 180 m/s.
E	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 30m.

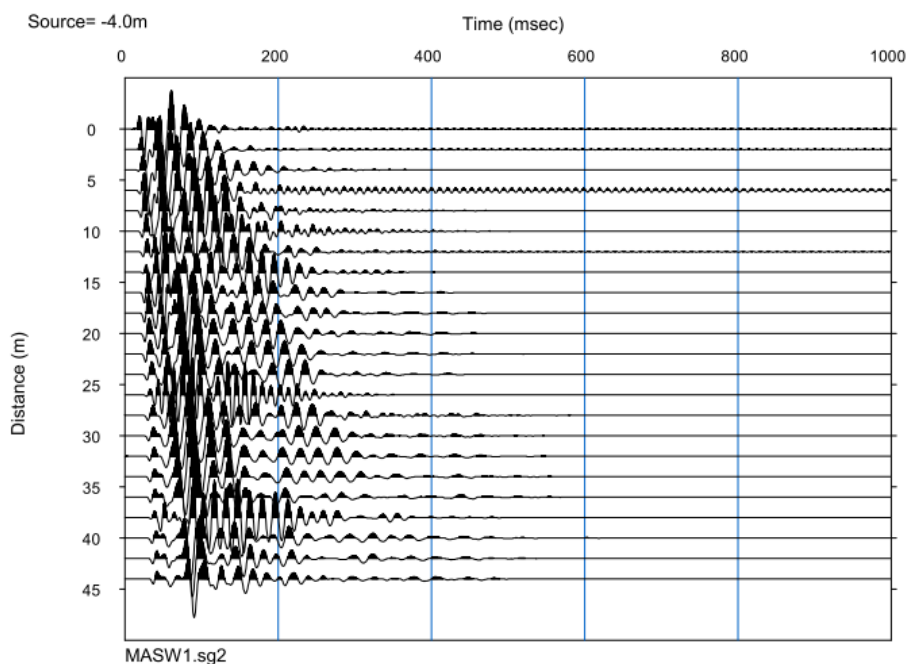


Figura 10.4: Sismogramma MASW 1.

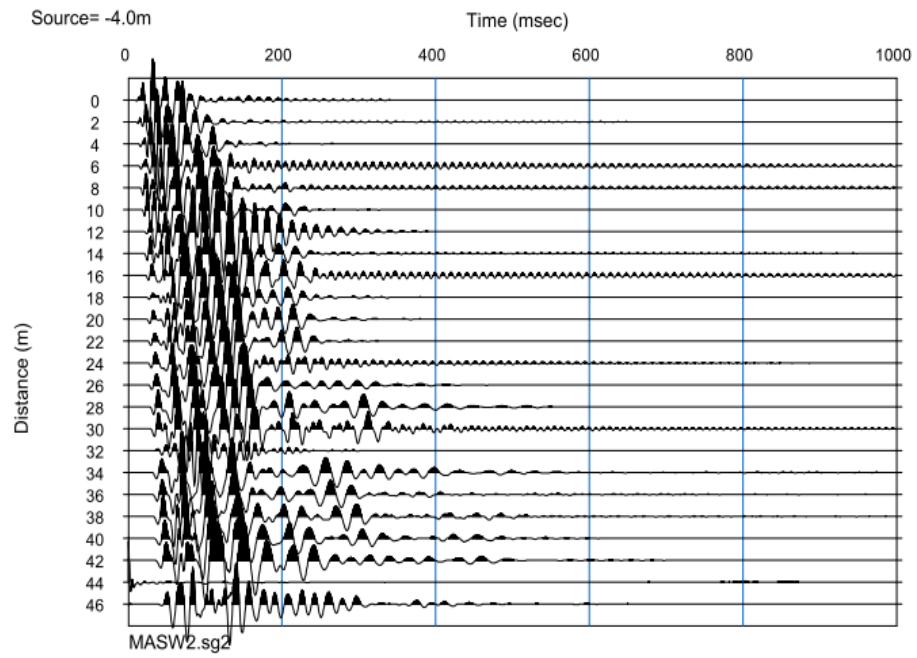


Figura 10.5: Sismogramma MASW 2.

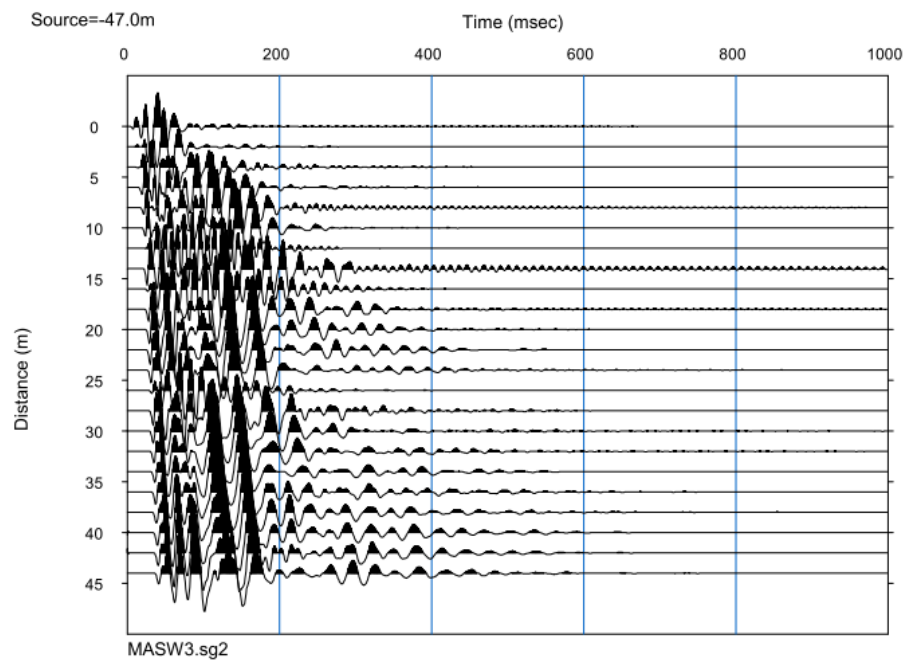


Figura 10.6: Sismogramma MASW 3.

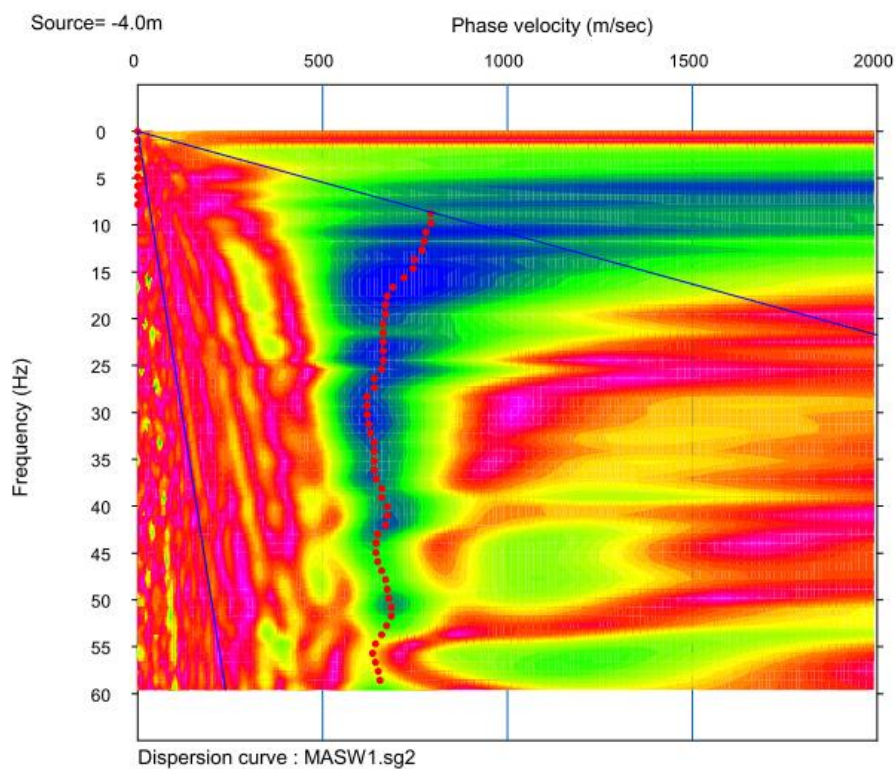


Figura 10.7: Spettro dispersione MASW 1.

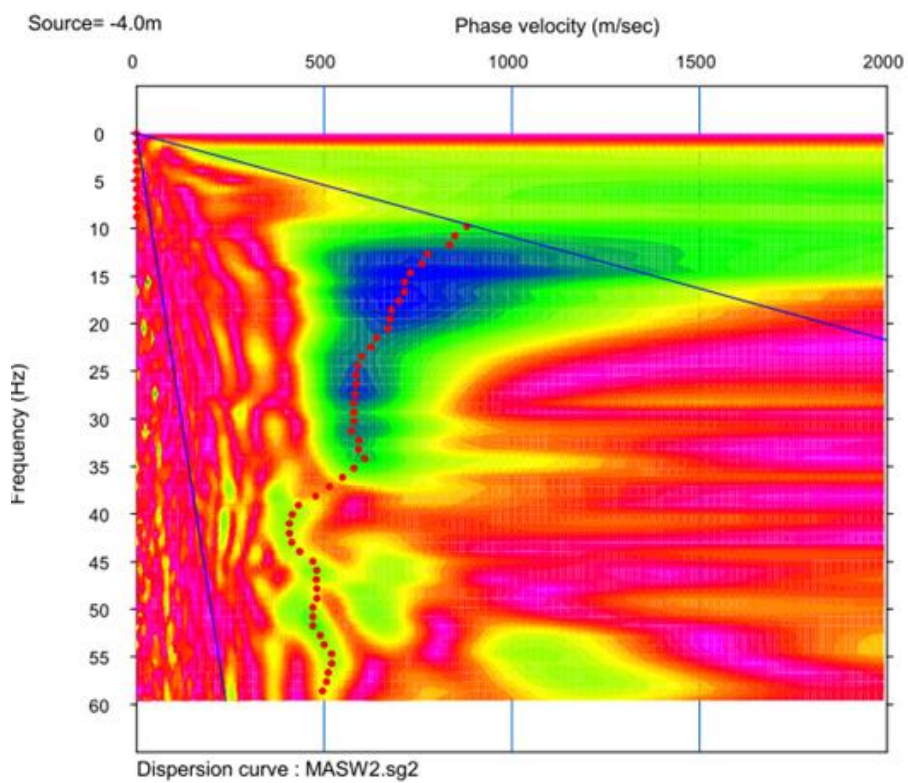


Figura 10.8: Dispersione MASW 2.

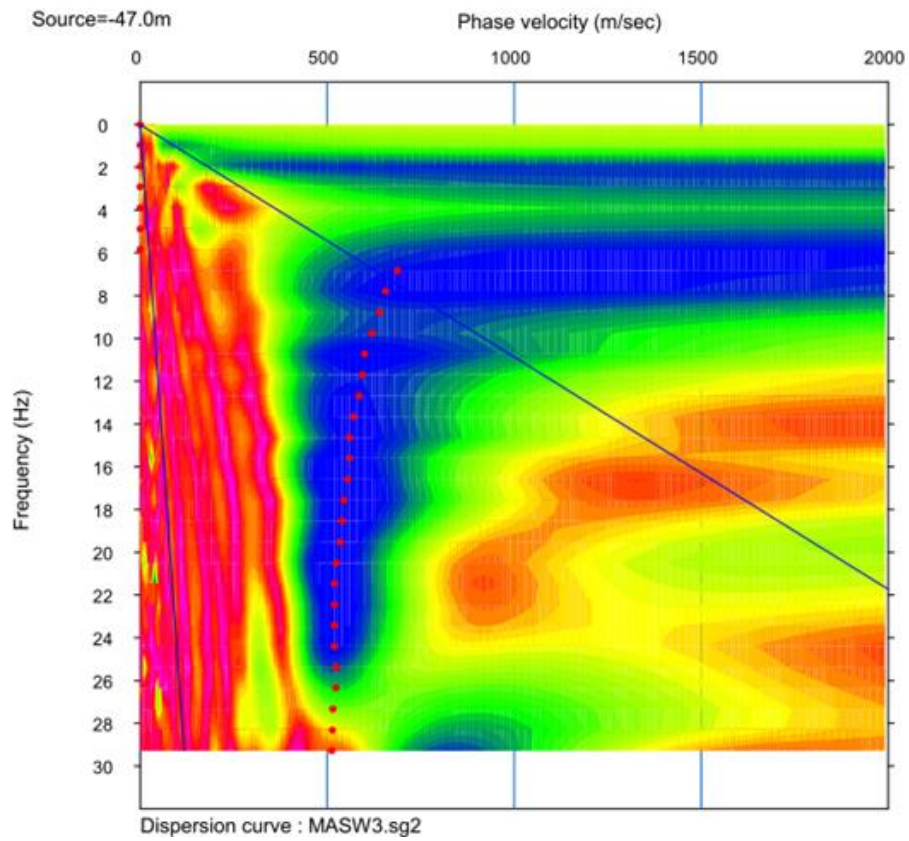


Figura 10.9: Spettro dispersione MASW 3.

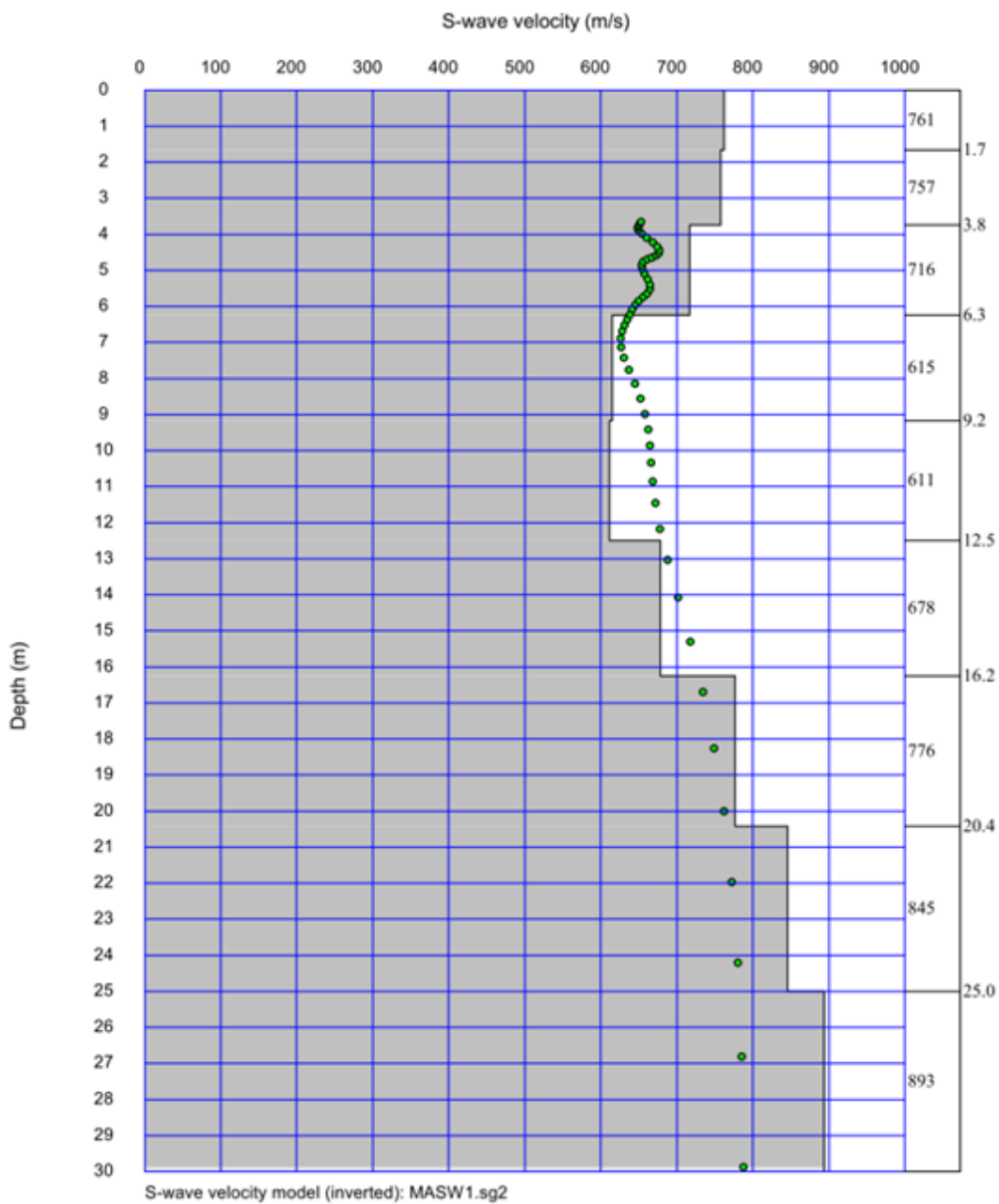


Figura 10.10: Profilo Vs MASW 1.

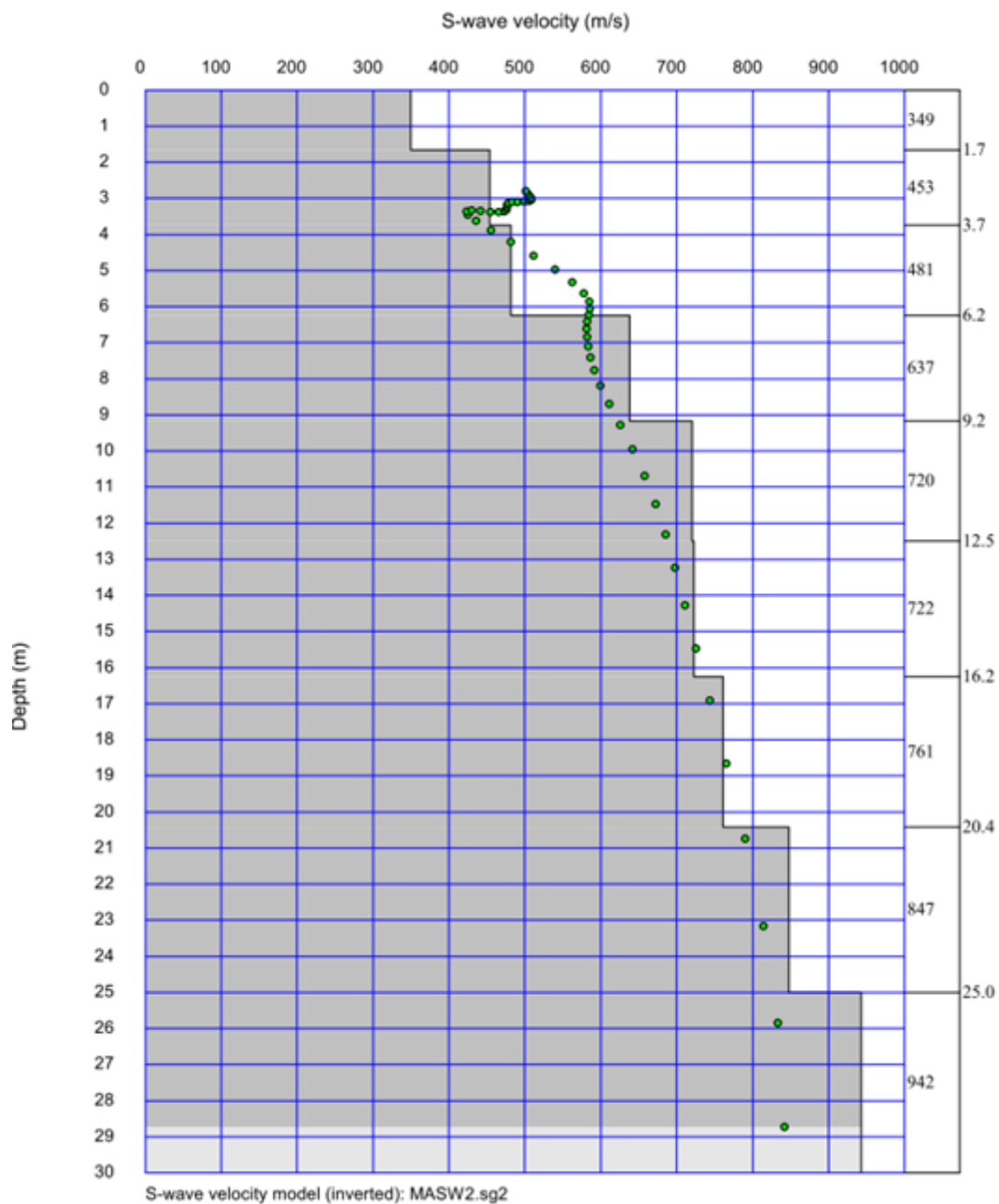


Figura 10.11: Profilo Vs MASW 2.

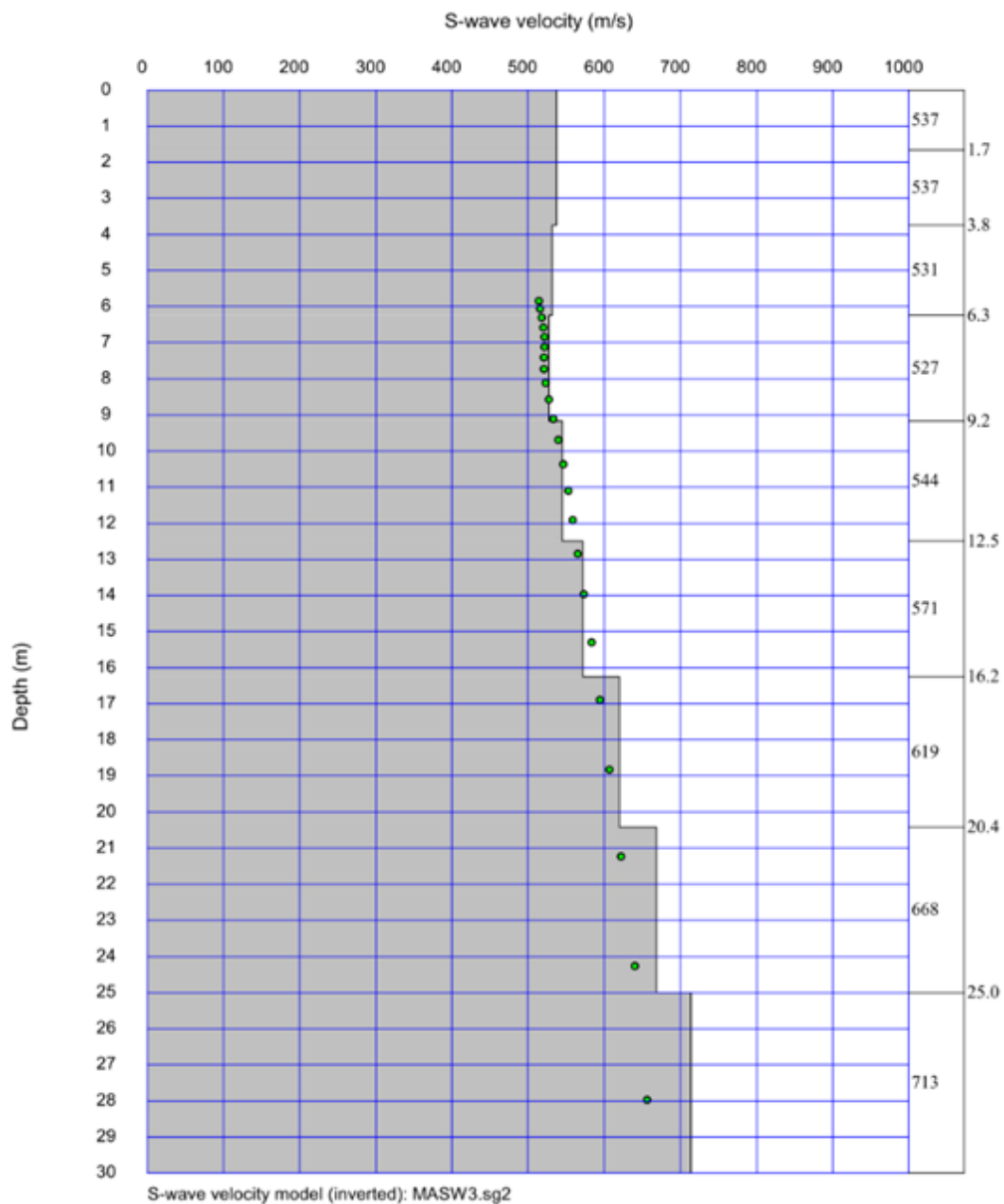
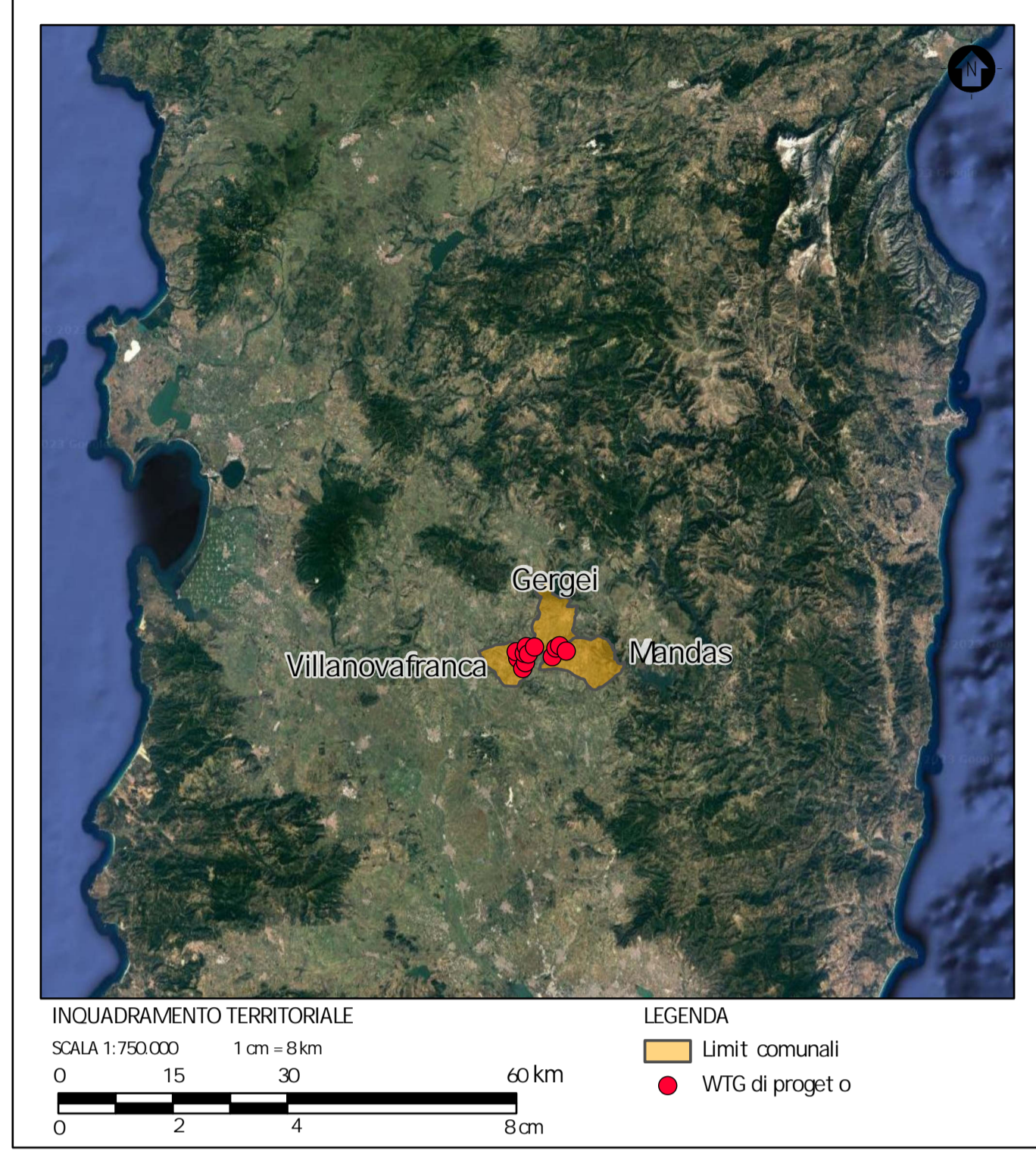
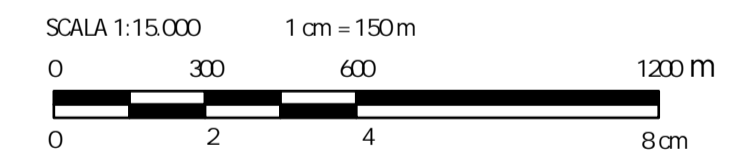


Figura 10.12: Profilo Vs MASW 3.



LEGENDA OPERE DI PROGETTO

- WTG di progetto
- Piazzola
- Area temporanea di cantiere
- Cavidot o interrato di connessione
- Viabilità di nuova realizzazione
- Viabilità esistente da adeguare
- Area di deposito temporaneo
- Sotostazione elettrica utente (SSEU)
- Planimetria Ubicazione Indagini Geologiche
- PROFILO SISMICO



0	300	600	1200	8m			
0							
REV	DESCRIZIONE			ML	EL	LC	02/2023
				DESIGN	CONTROL	APPROV	DATA

Montana

Montana S.p.A.
Via Carlo Angelo Furmagli, 6
20143 Milano
Milano (sede cart. f. cata ISO) | Brescia | Palermo | Cagliari | Roma | Siracusa

Gruppo
GIUECCA WIND
GRUPPO BIELLO

GIUECCA WIND S.R.L.
VIA FRIULI VENEZIA GIULIA 75, 30030 PIANIGA (VE)
C.F. 04692770276

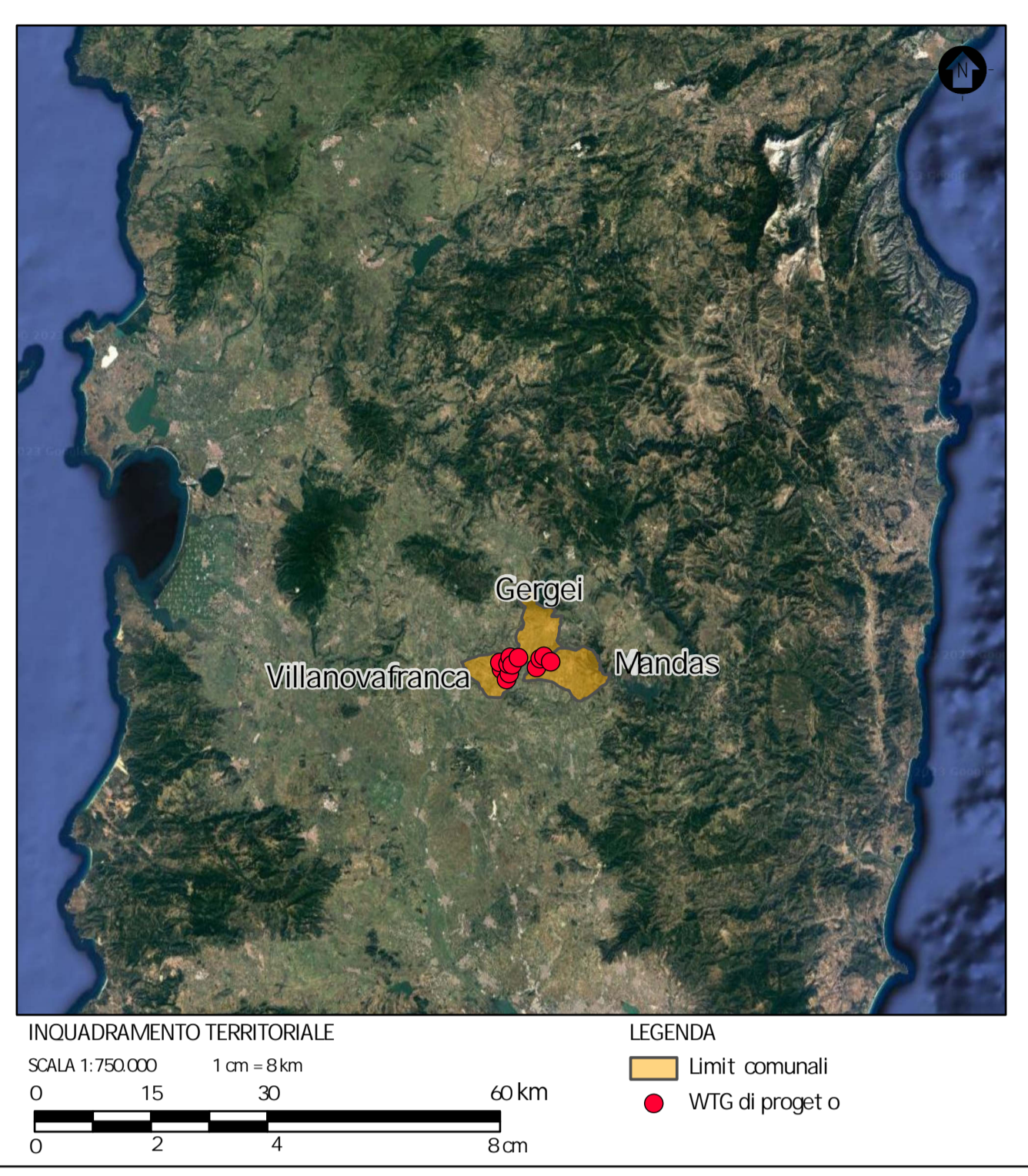
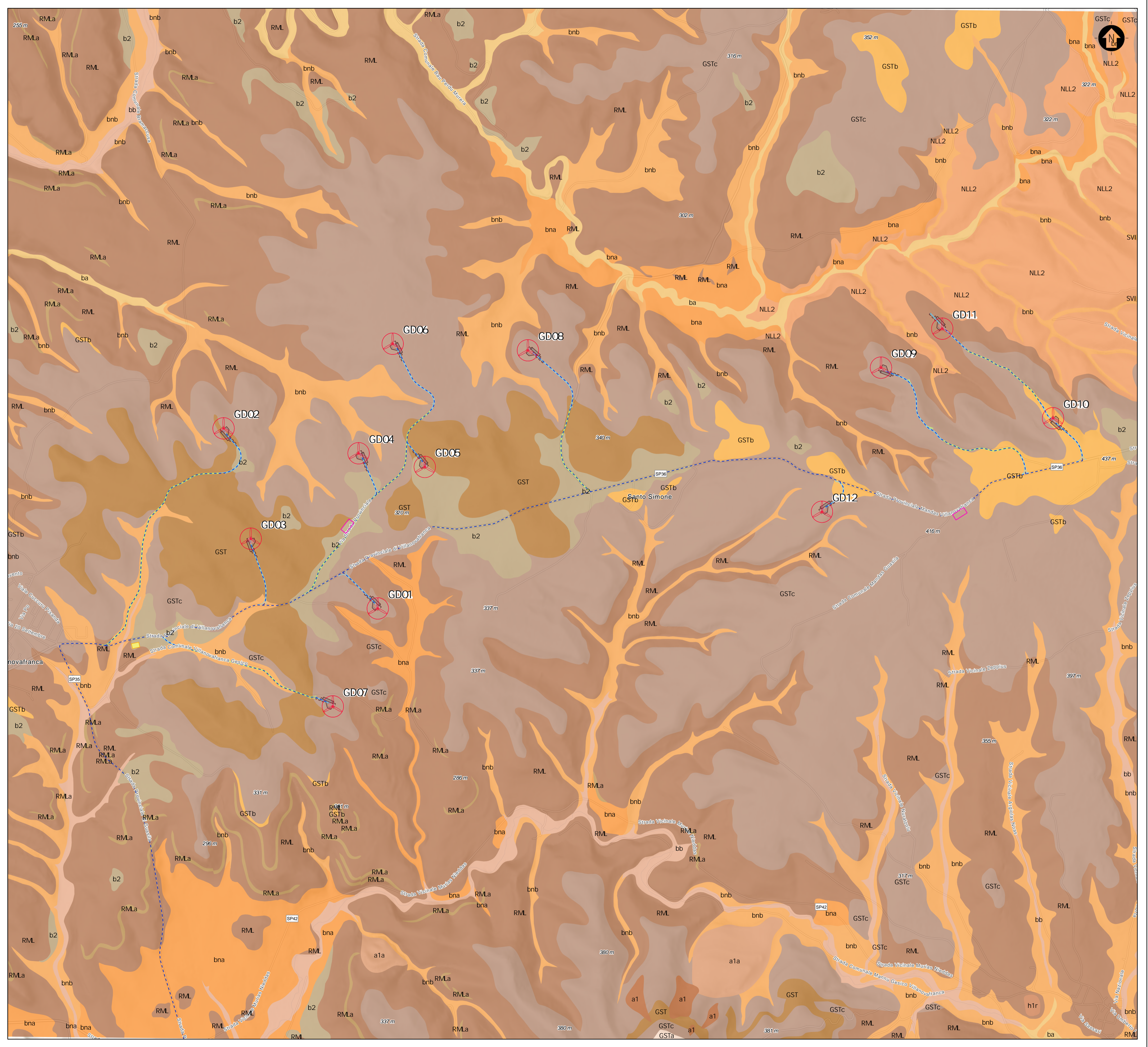
Progettato da: **ING. LAURA CONTI**
iscritta all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Pavia n. 1726

Oggetto: **WIND FARM GIUECCA - IMPIANTO EOLICO DA 72 MW**
Comune di Mandas, Gergei e Villanovafranca (SU)

Tavola: **PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI GEOLOGICHE**

N. Tav: **RO7_T01**

Rev. 01: 2799_5298_GIUD_PD_RO7_T01_Rev01_PIANINDAGINI
E' VIETATA LA RIPRODUZIONE DI QUESTO DOCUMENTO SENZA PREVENTIVA AUTORIZZAZIONE SCRITTA DELLA MONTANA SPA

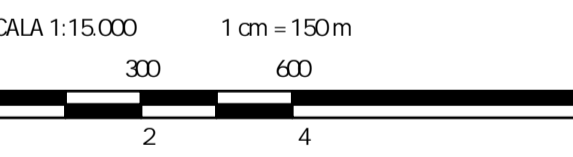


LEGENDA OPERE DI PROGETTO

- WTG di progetto
- Piazzola
- Area temporanea di cantiere
- Cavidot o interrato di connessione
- Viabilità esistente da adeguare
- Viabilità di nuova realizzazione
- Area di deposito temporaneo
- Sot. ostacolo elet. ric. utente (SEU)

Carta geologica

- GST - MARNE DI GESTURI. Marne arenacee e silti t. giallastre con intercalazioni di arenarie e calcareniti; contenenti faune a pteropodi, molluschi, foraminiferi, nauplioplanchton, frammenti di olli di frusti vegetali. BURDIGALIANO SUP - LANGHIANO MEDIO
- GStA - Litofacies nelle MARNE DI GESTURI. Tuf. pomice intercalati ed arenarie feldspatiche a t. o. della formazione di Gesturi. BURDIGALIANO SUP - LANGHIANO MEDIO
- GSTb - Litofacies nelle MARNE DI GESTURI. Livelli di arenarie biotizzate e calcareniti a litotami. BURDIGALIANO SUP - LANGHIANO MEDIO
- GSTc - Litofacies nelle MARNE DI GESTURI. Generalmente alla base della formazione, arenarie grossolane e conglomerati. BURDIGALIANO SUP - LANGHIANO MEDIO
- NLL2 - Arenarie di Serra Longa (FORMAZIONE DI NURALLAO). Arenarie da grossolane a micro-conglomerate, con intercalazioni di arenarie siltose. OLOCENE SUP - BURDIGALIANO INF.
- RML - FORMAZIONE DELLA MARMILLA. Marne siltose alternate a livelli arenacei da mediamente grossolani a fini, talvolta con materiale vulcanico rimaneggiato. ACQUITANIANO - BURDIGALIANO INF.
- RMLa - Litofacies nella FORMAZIONE DELLA MARMILLA. Intercalazioni di tuf. biancastri e livelli arenacei con forte componente vulcanoclastica. ACQUITANIANO - BURDIGALIANO INF.
- SVI - ARENARIE DI SAN VITO. Alternanze irregolari di metarquarzeniti, metarenarie micacee e metapeliti. CAMBRIANO MEDIO - ORDONVICIANO INF.
- a1 - Depositi di frana. Corpi di frana. OLOCENE
- a1a - Depositi di frana. Corpi di frana antichi. OLOCENE
- b2 - Coltri eluvio-colluviali. Detriti immersi in matrice fine, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti, arricchiti in frazione organica. OLOCENE
- ba - Depositi alluvionali. Ghiaie da grossolane a medie. OLOCENE
- bb - Depositi alluvionali. Sabbie con subordinati limi e argille. OLOCENE
- bna - Depositi alluvionali terrazzati. Ghiaie con subordinate sabbie. OLOCENE
- bnb - Depositi alluvionali terrazzati. Sabbie con subordinati limi ed argille. OLOCENE
- htr - Depositi antropici. Materiali di riporto e aree bonificate. OLOCENE



REV	DESCRIZIONE	FC	EL	LC	DATA
0					02/2023

Montana Montana S.p.A. Tel. +39 02 54118173 P.IVA 1044270156
 Via Carlo Angelo Fumagalli, 6 Fax +39 02 54128950 www.montanaindustria.com Cap. Soc. 100.000.000 €
 20143 Milano Milano (sede cart. f. cata ISO) | Brescia | Palermo | Cagliari | Roma | Siracusa

Committente: **GIUECCA WIND S.R.L.**
 VIA FRIULI VENEZIA GIULIA 75, 30030 PIANIGA (VE)
 C.F. 04692770276

Progettato da: **ING. LAURA CONTI**
 iscritta all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Pavia n. 1726

Oggetto: **WIND FARM GIUECCA - IMPIANTO EOLICO DA 72 MW**
 Comune di Mandas, Gergei e Villanovafranca (SU)

Titolo: **CARTA GEOLOGICA** N. Tav. **R07_T02**

Rev. file: 2799_5298_GIUD_PD_R07_T02_RivO_CARTAGEOLOGICA Scala: 1:15.000

E' VIETATA LA RIPRODUZIONE DI QUESTO DOCUMENTO SENZA PREVENTIVA AUTORIZZAZIONE SCRITTA DELLA MONTANA SPA