

**PROGETTO:** NURRI IR" INTEGRALE RICOSTRUZIONE DEL PARCO EOLICO DI NURRI (SU)  
INTERVENTO DI REPOWERING CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORI  
ESISTENTI E RELATIVA RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE

Elaborato:

Relazione Geologica

Codice Elaborato

NIR.REL11

Scala

Formato elaborato

PROPONENTE



**EDISON**  
EDF GROUP

EDISON RINNOVABILI Spa  
Foro Buonaparte, 31  
20121 Milano MI

Timbro e firma

Timbro e firma

REDATTORE



**Dott. Geol. Cosima Atzori**

Studio Tecnico di Geologia Applicata all'Ingegneria e all'Ambiente  
Loc. Scala Sa Perda sn, 09028 SESTU (CA)  
info@gaiac consulting.eu

Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato
02					
01					
00	08/2023	Emissione per validazione	Cosima Atzori		

## INDICE

	<b>Pag.</b>
<b>LISTA DELLE TABELLE</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DELLE FIGURE</b>	<b>3</b>
<b>1 PREMESSA</b>	<b>5</b>
<b>2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO</b>	<b>6</b>
<b>3 STUDI E INDAGINI DI RIFERIMENTO</b>	<b>7</b>
<b>4 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE</b>	<b>8</b>
<b>5 CARATTERISTICHE DI PROGETTO DELL'OPERA</b>	<b>12</b>
<b>6 INQUADRAMENTO GEOLOGICO</b>	<b>14</b>
6.1 DESCRIZIONE DEL CONTESTO GEOLOGICO DELL'AREA VASTA OGGETTO DI INTERVENTO	14
6.1.1 Unità tettonica di Riu Gruppa	15
6.1.2 Unità tettonica del Gerrei	16
6.1.3 Unità tettonica di Meana Sardo	19
(SVI) Arenarie di San Vito	19
(MSV) Formazione di Monte Santa Vittoria	19
(ORR) Formazione di Orroeledu	20
6.1.4 Corteo filoniano.	20
6.1.5 Successione vulcano-sedimentaria Tardo-Paleozoica	20
6.1.6 Successione sedimentaria Mesozoica	21
6.1.7 Successione sedimentaria Terziaria	21
6.2 Successione vulcano-sedimentaria Miocenica	22
<b>6.2 SUCCESSIONE VULCANICA PLIOCENICA</b>	<b>23</b>
<b>6.3 DEPOSITI QUATERNARI DELL'AREA CONTINENTALE</b>	<b>23</b>
<b>7 ANALISI DELLE CONDIZIONI GEOSTRUTTURALI GENERALI</b>	<b>27</b>
<b>8 ANALISI QUALITATIVA DI STABILITÀ DELL'AMMASSO ROCCIOSO</b>	<b>28</b>
8.1 CARATTERIZZAZIONE GEOSTRUTTURALE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI	29
<b>9 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO</b>	<b>34</b>
9.1 LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI DELL'AREA DI STUDIO	34
9.2 DEFINIZIONE DELL'AREA GEOMORFOLOGICAMENTE SIGNIFICATIVA	37
<b>10 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO</b>	<b>40</b>
10.1 SCHEMA DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA SUPERFICIALE E SOTTERRANEA	40
10.2 CARATTERISTICHE E DINAMICHE DELLE ACQUE SOTTERRANEE	42
10.3 ANALISI DELLA VULNERABILITÀ DEGLI ACQUIFERI	43
<b>11 INQUADRAMENTO CLIMATICO</b>	<b>45</b>
11.1 PRECIPITAZIONI	46
11.2 TEMPERATURE	46
11.3 STIMA DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE	47
<b>12 INQUADRAMENTO PEDOLOGICO</b>	<b>53</b>
<b>13 USO DEL SUOLO</b>	<b>55</b>
<b>14 ANALISI DEI VINCOLI GRAVANTI SUI TERRENI</b>	<b>57</b>
14.1 PIANO STRALCIO D'ASSETTO IDROGEOLOGICO DELLA SARDEGNA	57
14.2 ART.30 TER NTA PAI	60
14.3 INVENTARIO DEI FENOMENI FRANOSI	62
14.4 PIANO STRALCIO DELLE FASCE FLUVIALI	62

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

---

14.5	PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONI (PGRA)	64
<b>15</b>	<b>INDAGINI GEOGNOSTICHE</b>	<b>66</b>
15.1	GENERALITÀ SUL METODO SISMICO A RIFRAZIONE	66
15.1.1	Caratteristiche delle stese sismiche	67
15.1.2	Caratteristiche della Strumentazione impiegata	67
15.1.3	Elaborazione dei dati	68
15.2	INDAGINI SISMICHE: MASW	68
15.3	SPECIFICHE DELLE INDAGINI SVOLTE	69
15.4	CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA	69
15.5	INTERPRETAZIONE DEI SEGNALI ACQUISITI	69
15.6	CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)	70
15.7	UBICAZIONE DELLE INDAGINI ESEGUITE	71
15.8	RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO M1-R1	72
15.8.1	Masw M1	72
15.8.2	Sismica a rifrazione R1	73
15.9	RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO M2-R2	75
15.9.1	Masw M2	75
15.9.2	Sismica a rifrazione R2	76
15.10	RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO M3-R3	78
15.10.1	Masw M3	78
15.10.2	Sismica a rifrazione R3	79
15.11	RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO M4-R4	81
15.11.1	Masw M4	81
15.11.2	Sismica a rifrazione R4	82
<b>16</b>	<b>MODELLO GEOLOGICO DI SITO</b>	<b>84</b>
16.1	MODELLO GEOLOGICO 01	85
<b>17</b>	<b>CONCLUSIONI: CRITICITÀ GEOLOGICHE E SUGGERIMENTI OPERATIVI</b>	<b>86</b>

## LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1 Andamento pluviometrico dell'area vasta (espresso in mm) ricavato dalle stazioni pluviometriche di Nurri e di Escalaplano (per gli anni 2013 e 2015)	45
Tabella 2 Andamento della pluviometria mensile e annuale (nell'asse delle ordinate, in mm) per le stazioni di Nurri (e Escalaplano per gli anni 2013 e 2015) nel periodo 2008-2018.	46
Tabella 3 Temperature mensili (in °C) registrate nella stazione di Senorbì per gli anni dal 2018 e 2012, in quella di Gersei per il 2017, Sadali per gli anni 2016-2013, e presso la stazione di Nurri per il periodo 1995-2011.	46
Tabella 4 Media mensile e annuale dei giorni di sereno, nuvoloso e coperto per il periodo 1922-1992, relativa alla stazione di Cagliari – Elmas	50
Tabella 6 Ubicazione degli stendimenti	66
Tabella 7 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	73
Tabella 8 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	76
Tabella 9 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	79
Tabella 9 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	82

## LISTA DELLE FIGURE

Figura 1 Localizzazione del progetto	8
Figura 2 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, quadro d'unione	9
Figura 3 Inquadramento topografico su I.G.M. scala 1:25000	10
Figura 4 Paesaggio caratteristico dell'area di studio	11
Figura 5 Schema tettonico-strutturale della Sardegna	14
Figura 6 UNITA' TETTONICA DI RIU GRUPPA – Formazione di Pala Manna	16
Figura 7 Schema Tettonico dell'area di studio (tratto da Funedda et al., 2013. Note Illustrative Foglio CARG Mandas)	17
Figura 8 UNITA' TETTONICA DEL GERREI – Scisti a Graptoliti – (SGA)	19
Figura 9 Formazione del Monte Santa Vittoria (MSV)	20
Figura 10 Formazione di Ussana	22
Figura 11 Depositi di versante, ciottoli in Muschelkalk (sx) e in SGA e PMN (dx)	24
Figura 12 Carta Geologica del sito (settore Nord)	25
Figura 13 Legenda della Carta Geologica	26
Figura 14 Tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione	28
Figura 15 Tipologia di frana: 1. Crollo; 2. Ribaltamento; 3. Scivolamento	28
Figura 16 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia	30
Figura 17 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso	30
Figura 18 Valori della costante mi per diversi tipi di roccia	31
Figura 19 Correlazione fra valori di mi, s, indice RMR, ed il tipo di roccia.	32
Figura 20 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti per la formazione dei Basalti delle Giare	33
Figura 21 Schema dell'evoluzione geomorfologica del complesso paleozoico (non in scala)	34
Figura 22 sezione geologica dell'area vasta. vedasi l'evidenza della superficie di spianamento base d'appoggio del successivo espandimento lavico (Progetto CARG)	34
Figura 23 Morfologia del paesaggio paleozoico nei ressi dell'area di Studio.	35
Figura 24 Particolare del tableau basaltico e sue cornici (vista da turbina NIR14)	36
Figura 25 Particolare del tableau basaltico a NW . Monte Guzzini e C.ru Casas (dicco)	36
Figura 26 Legenda Carta Geomorfológica	39

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

---

Figura 27 Reticolo Idrografico	41
Figura 28 Schema esemplificativo, non in scala, dei processi di infiltrazione e deflusso sotterraneo	43
Figura 29 Carta delle Permeabilità dei Substrati e dei Suoli (Fonte RAS)	44
Figura 30 Temperature mensili (in °C, nell'asse delle ordinate) registrata nella stazione di Senorbi (anni 2012 e 2018), Gergei (2017), Sadali (anni 2013-2016), e nella stazione di Nurri (1995-2011).	47
Figura 31 Bilancio idro-meteorologico per il periodo ottobre 2020-marzo 2021 (espressa in mm).	48
Figura 32 Bilancio idro-meteorologico per il periodo aprile 2021-settembre 2021 (espressa in mm).	49
Figura 33 Ventosità media giornaliera e frequenza del vento massimo giornaliero relativa all'anno 2017 (mese giugno).	50
Figura 34 Diagramma ombrotermico (Walter e Lieth) per il settore di Buddusò (dati pluviometrici e termici relativi all'anno 2021).	51
Figura 35 Climogramma relativo alla regione di Nurri	51
Figura 36 Carta dei Suoli (Fonte RAS)	54
Figura 37 Stralcio della Carta dell'Uso del Suolo della Sardegna (2008, Fonte RAS).	56
Figura 38 Inquadramento PAI Pericolosità da frana (Fonte RAS)	58
Figura 39 Inquadramento PAI Pericolosità idraulica (Fonte RAS, Comune di Buddusò)	59
Figura 40 Reticolo idrografico numerato secondo l'ordine di Stralher	61
Figura 41 Archivio IFFI (Fonte ISPRA): frane censite nell'area vasta	62
Figura 42 Stralcio perimetrazione Piano Stralcio fasce Fluviali PSFF 2015	63
Figura 43 Stralcio perimetrazione PGRA 2021	65
Figura 44 Geometria di acquisizione - sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0	67
Figura 45 Geometria di acquisizione - MASW con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0	69

## **1 PREMESSA**

Nell'ambito della redazione del Progetto Definitivo del Parco Eolico denominato "**GUZZINI**" dislocato nel territorio comunale di **Nurri** Provincia del Sud Sardegna (SU), al fine di avere un quadro maggiormente dettagliato del contesto geologico, geomorfologico e idrogeologico in relazione alle opere e alla loro potenziale interazione con le matrici suolo, sottosuolo e acque è stata redatta la presente **Relazione Geologica**, la cui stesura ottempera quanto previsto dal D.M. del 17/01/2018 recante le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (di seguito NTC), con l'obiettivo di evidenziare, le caratteristiche geologico-morfologiche e il comportamento fisico-meccanico dei terreni interessati dalle opere in progetto attraverso:

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

## **2   NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

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

1. D.M LL.PP. 11.03.1988 "Norme Tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii attuali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione in applicazione della Legge 02.02.1974 n°64.
2. Circ. Min. LL.PP. n° 30483 del 24.09.1988 – Istruzioni per l'applicazione del D.M. LL.PP.11.03.1988.
3. Raccomandazioni, programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, 1975 – Associazione Geotecnica Italiana.
4. D.M. Infrastrutture 17.01.2018 - Norme Tecniche per le Costruzioni. (6.2.1 – Caratterizzazione e modellazione geologica del sito, 6.4.2 Fondazioni superficiali)
5. Circ. Min. Infrastrutture e Trasporti 21.01.2019 n°7 – Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 17.01.2018.
6. D.L. 3 aprile 2006, n. 152 e successive modificazioni - "Norme in materia ambientale"
7. Norme di attuazione del PAI aggiornate al 2023 con la Deliberazione n. 12 del 21/12/2021, pubblicata sul BURAS n. 72 del 30/12/2021 e successivamente approvate con la Deliberazione di Giunta Regionale n. 15 del 22/11/2023

### **3 STUDI E INDAGINI DI RIFERIMENTO**

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

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

I dati a disposizione sono stati integrati con le informazioni derivanti dai sopralluoghi effettuati dalla scrivente in sito e dagli esiti della campagna di indagini geognostiche eseguite rispettivamente in data 05-06/07/2023 nella zona di interesse.

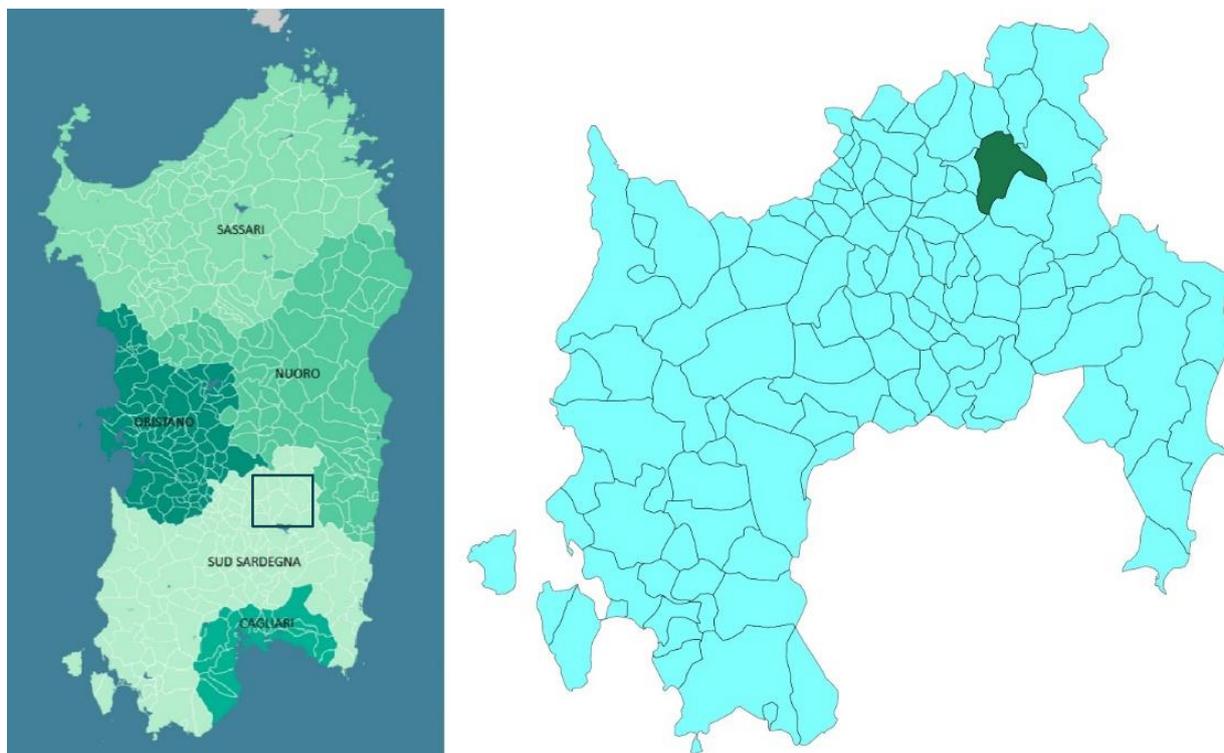
## **4 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE**

Nurri è un comune della provincia del Sud Sardegna situato nella Sardegna centro-meridionale, e confina con il comune di Esterzili, Isili, Mandas, Orroli, Sadali, Serri, Siurgus Donigala e Villanova Tulo. L'area che interessa le opere in progetto è situata nel territorio a nord-ovest dell'abitato di Nurri.

Il territorio comunale di Nurri fu abitato già in epoca prenuragica, nuragica, punica e romana, per la presenza nel territorio di numerose Domus de Janas e di diversi nuraghi. Accanto al paese si trovava la città punico-romana di Biora, distrutta dai Goti, di cui rimangono alcuni resti, come alcuni ruderi, mosaici e tombe. Il paese attuale fu fondato probabilmente dai profughi di Biora intorno al 550 d.C.

Nel Medioevo il paese appartenne al Giudicato di Cagliari e fece parte della curatoria di Siurgus. Alla caduta del giudicato (1258) passò sotto il dominio pisano e dal 1324 sotto quello aragonese. Gli aragonesi nel 1604 incorporarono il paese nel ducato di Mandas, feudo dei Maza. In epoca sabauda la signoria passò ai Tellez-Giron d'Alcantara, ai quali fu riscattato nel 1839 con la soppressione del sistema feudale.

Ai sensi della Legge Regionale n. 9 del 12 luglio 2001, che ha previsto l'istituzione delle nuove province sarde, il comune di Nurri, che era in provincia di Nuoro, avrebbe dovuto essere aggregato alla neonata provincia del Medio Campidano; con successiva Legge Regionale n. 10 del 13 ottobre 2003 si stabilì invece che passasse a quella di Cagliari, di cui fece parte fino alla successiva riforma del 2016.



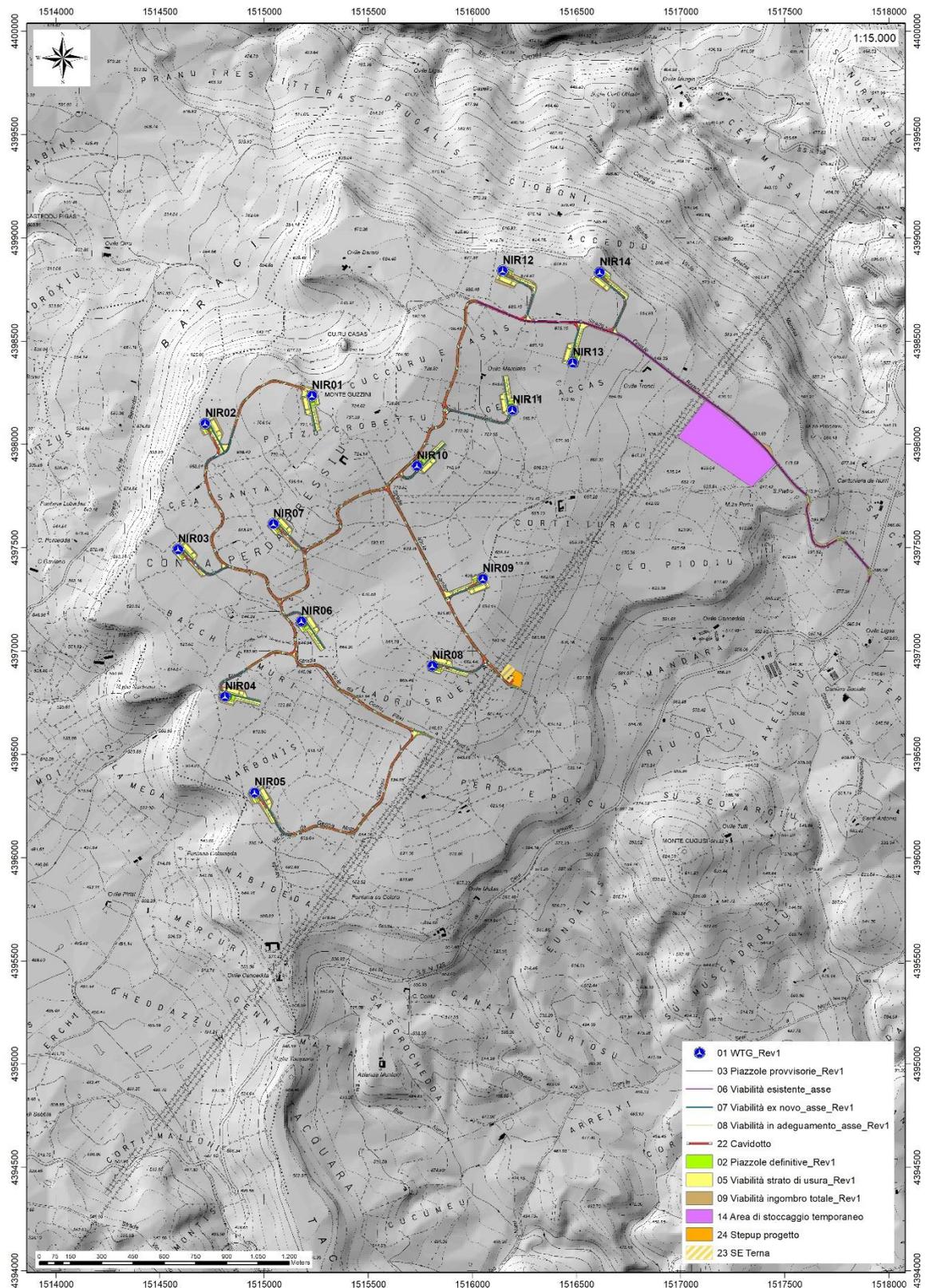
**Figura 1 Localizzazione del progetto**

L'inquadramento cartografico di riferimento è il seguente:

1. Cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare I.G.M scala 1:25 000. Serie 25 -Fogli: **540 sez. I** "Nurri".
2. Carta Tecnica Regionale scala 1:10 000 - Fogli: **540070 "Nurri"**.

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**



**Figura 2 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, quadro d'Unione**

# "NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE

## Relazione Geologica

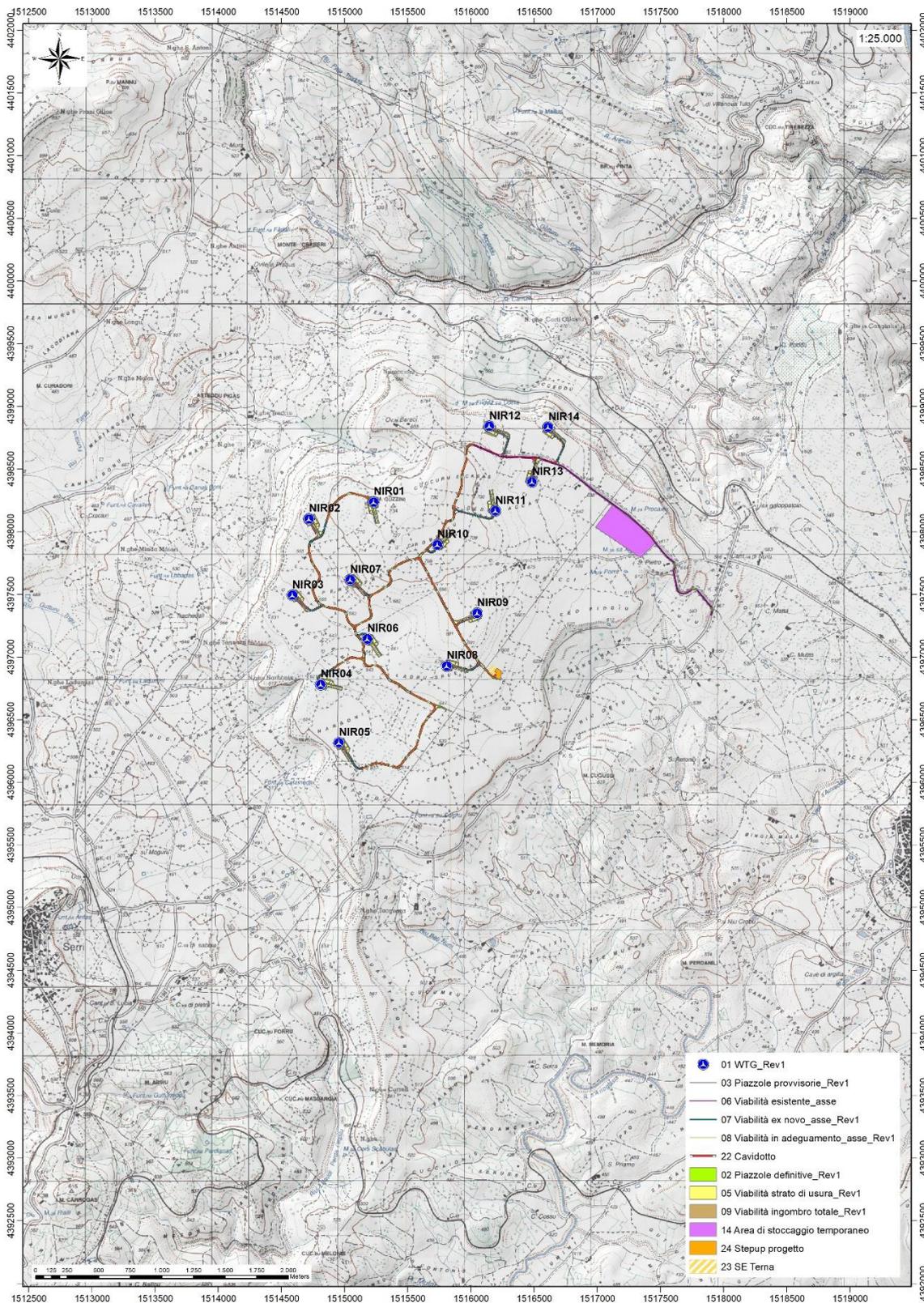


Figura 3 Inquadramento topografico su I.G.M. scala 1:25000

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

---



**Figura 4 Paesaggio caratteristico dell'area di studio**

## **5 CARATTERISTICHE DI PROGETTO DELL'OPERA**

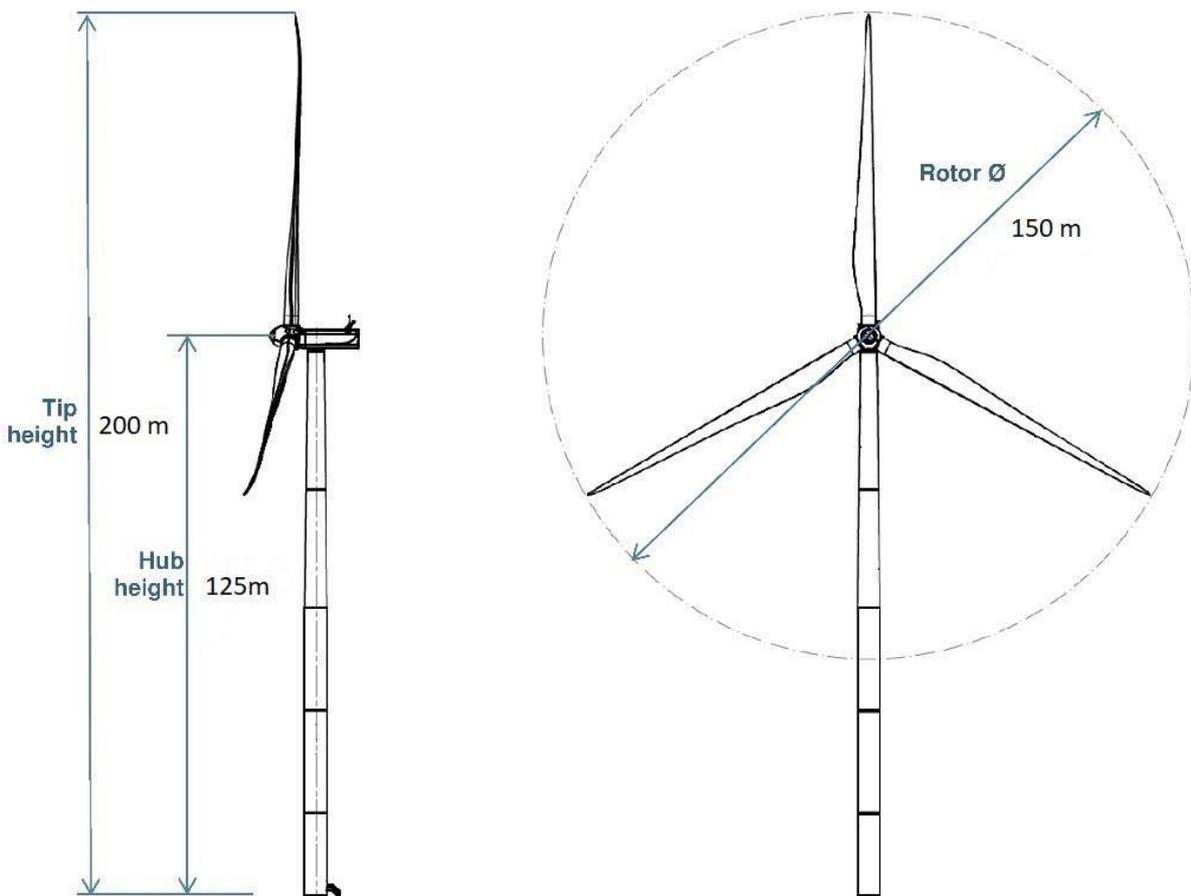
Il nuovo parco eolico, denominato "GUZZINI", sarà composto da 14 aerogeneratori di ultima generazione ad asse orizzontale di potenza pari a 6,6 MW ciascuno, per una potenza di picco di 92,4 MW ed una potenza in immissione di 90,0 MW, nel rispetto della domanda di connessione e così come riportato nella STMG n°202101471 rilasciata da TERNA in data 22.12.2022. Tale riduzione di potenza si potrà con i sistemi di controllo elettronico in dotazione agli aerogeneratori. Il nuovo parco, che si estenderà su un'area di circa 600 ha, si comporrà di quattordici aerogeneratori, denominati in ordine crescente da NIR01 a NIR14 (N.I.R. Nurri Integrata Ricostruzione), tutti ricadenti su terreni di privati.

L'impianto sarà del tipo grid-connected e l'energia elettrica prodotta sarà riversata completamente in rete, salvo gli autoconsumi di centrale.

La produzione di energia elettrica sarà garantita dai 14 aerogeneratori che saranno montati su torri tubolari di acciaio che avranno il mozzo del rotore a un'altezza da terra di 125 metri dal piano campagna, diametro delle pale di 150 metri e l'altezza massima dal suolo di ogni macchina (compresa la massima estensione da terra della terna di pale) sarà pertanto di 200 metri con un'area spazzata di 17'671 m<sup>2</sup>.

Per l'alimentazione dei servizi ausiliari (Illuminazione, Videocontrollo, Monitoraggio impianto) del parco eolico, sarà richiesta al Distributore una fornitura dedicata in bassa tensione da 50 kW.

Gli aerogeneratori previsti sono macchine con potenza nominale pari a 6,6 MW, orientati sopravento, con controllo attivo del pitch delle pale e dello yaw della navicella.



Il rotore (rotor) del generatore è composto da tre pale ognuna di lunghezza pari a 73,65 metri. Nel complesso, il gruppo rotante ha un diametro di 150 metri, e spazza un'area pari a 17'671 metri quadrati. Il mozzo del generatore sarà collocato ad un'altezza di 125 metri (hub height), mentre l'altezza massima raggiunta da ogni generatore (tip height), inclusa l'altezza massima da terra delle pale, sarà di 200 metri.

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

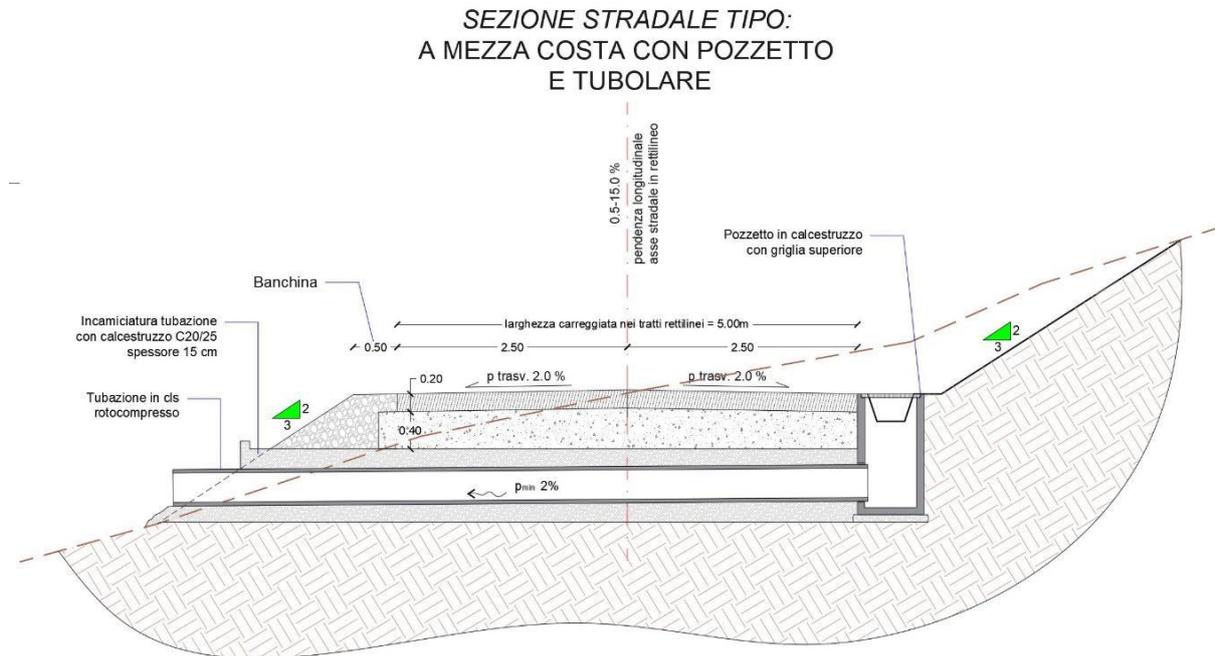
**Relazione Geologica**

Ognuna delle tre pale è controllata da un gruppo di motoriduttori che ne regolano il pitch generando l'effetto di portanza necessario a ottimizzare la coppia rotante generata dal flusso del vento o, in caso di fermo macchina, a garantire assieme al freno lo stazionamento del rotore per manutenzione o non disponibilità della rete.

La navicella su cui è montato il gruppo rotore comprensivo delle pale, sarà montata sulla torre con una ralla di brandeggio (yaw), anch'essa controllata da un gruppo di motoriduttori che orienteranno il generatore sopravento rispetto al vento, massimizzando la captazione del flusso d'aria da parte della superficie del rotore. Sulla navicella sarà inoltre installato un gruppo di sensori che, collegati al sistema di controllo, governerà orientamento della navicella, inclinazione delle pale, freno dell'albero motore e ogni altra attività del generatore.

La viabilità interna del parco eolico sarà caratterizzata dalla larghezza minima della carreggiata di 5,0 m oltre 0,50 m per parte di cunetta in terra e dovrà essere caratterizzata da una portanza minima di 2 kg/cm<sup>2</sup> e sopportare un carico per asse del camion pari a 12 t.

Nella figura seguente è riportata una sezione stradale tipo a mezza costa:



Si rimanda agli elaborati specialistici di progetto per ogni ulteriore dettaglio.

## 6 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

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

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

### 6.1 DESCRIZIONE DEL CONTESTO GEOLOGICO DELL'AREA VASTA OGGETTO DI INTERVENTO

A partire dal Paleozoico si sono susseguiti una serie di eventi geologici sviluppatasi nell'arco di circa mezzo miliardo di anni, che hanno reso la Sardegna una delle regioni geografiche più antiche del Mediterraneo centrale e, morfologicamente e cronologicamente eterogenea. L'isola riflette una storia geologica molto articolata, che testimonia, in maniera più o meno completa, alcuni dei grandi eventi geodinamici degli ultimi 400 milioni di anni. L'orogenesi Caledoniana, la più antica, le cui tracce si rinvencono principalmente nel nord della Gran Bretagna e nella Scandinavia occidentale, fu causata dalla progressiva chiusura dell'oceano Giapeto, a seguito della collisione dei continenti Laurentia, Baltica e Avalonia, dando così origine al super continente Laurussia.

La successiva fase dell'orogenesi Ercinica (o Varisica) ha avuto corso a partire dal Carbonifero, circa 350 Ma fa e si è protratta fino al Permiano determinando un'estesa catena montuosa ubicata tra il Nord America e l'Europa. Quest'orogenesi ha prodotto in Sardegna tre zone metamorfiche principali. Procedendo dal nucleo orogenetico verso l'avanzata si trovano le zone dette: Assiale (Sardegna NE) – a Falde interne (Sardegna centrale) - a Falde esterne (Sardegna SW).

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

Si tratta di plutoni messi in posto durante le fasi estensionali di collasso gravitativo della catena ercinica, e che caratterizzano l'area di studio.

L'area di studio ricade nella zona a Falde Esterne del basamento varisico sardo; principalmente è costituita dalle metamorfiti di basso grado, appartenenti all'Unità Tettonica del Gerrei, dalle metamorfiti dell'Unità tettonica di Meana Sardo e da quelle dell'unità di Riu Gruppa, dalle coperture sedimentarie eoceniche, **dalle rocce della successione vulcano-sedimentaria Miocenica, e dai depositi quaternari.**

Le Unità Tettoniche affioranti sono costituite da originarie successioni sedimentarie e vulcaniche di età compresa tra il Cambriano e il Carbonifero inferiore.

L'impilamento tettonico delle Falde esterne, nell'area di studio, vede alla base L'Unità tettonica di Riu Gruppa, su cui sovrascorre l'Unità del Gerrei a sua volta sovrascorsa dall'Unità di Meana Sardo. Queste tre unità tettoniche sono caratterizzate da significative differenze nella

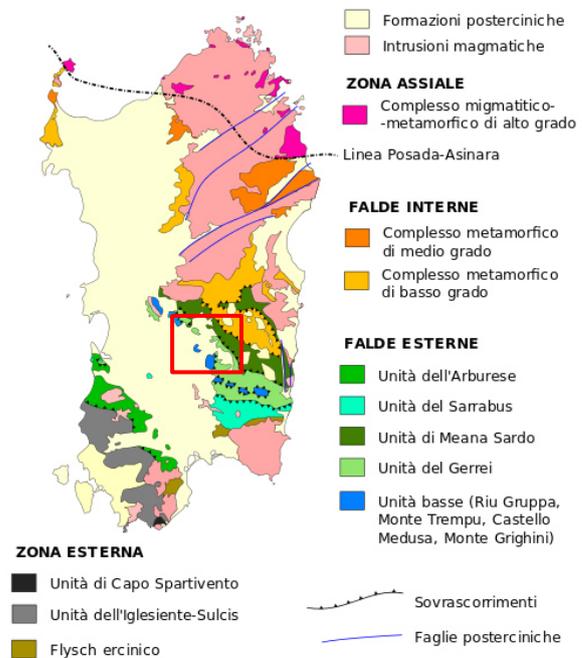


Figura 5 Schema tettonico-strutturale della Sardegna

successione stratigrafica, soprattutto nella successione vulcanica dell'Ordoviciano medio.

L'Unità tettonica del Gerrei è divisa in due sottounità: la Sottounità di Arcu de su Bentu e la Sottounità di M. Lora. Le due sottounità si caratterizzano per la presenza dei Porfiroidi nella sottounità di Arcu de su Bentu e delle Vulcaniti di Monte Santa Vittoria in quella di Monte Lora.

Le unità tettoniche sono interessate da una serie di fasi plicative compressive, tardo compressive e distensive che generano sistemi di pieghe e una foliazione pervasiva di piano assiale. Tra le strutture plicative maggiori che interessano il settore di studio vi è l'Antiforme del Flumendosa al cui nucleo affiora l'unità tettonica di Riu Gruppa.

Il basamento varisco è stato interessato da più fasi di emersione a partire dal Permiano; nel Cretaceo si ha nuovamente emersione, che sembra aver interessato tutta l'isola, che ha generato una lacuna che comprende quasi tutto il Paleocene, ricoperta dai depositi trasgressivi dell'Eocene inferiore e del Miocene, **dai prodotti dell'attività vulcanica Pliocenica, e dalle coperture dei depositi quaternari costituiti da depositi di versante coltri eluvio colluviali e depositi alluvionali.**

### 6.1.1 Unità tettonica di Riu Gruppa

È l'unità tettonica più profonda dell'area vasta, che affiora tra Mandas e Orroli. La successione litostratigrafica è caratterizzata da metamorfismo lievemente maggiore rispetto alle unità sovrastanti. Le attribuzioni cronostatigrafiche sono unicamente basate sulle analogie litologiche con le formazioni delle altre unità. Con questo criterio è comunque possibile ricostruire una successione che dal Cambriano arriva al Carbonifero inferiore. Le successioni presenti sono descritte in ordine cronostatigrafico (dalla formazione più antica verso la più giovane).

**(MGM) Metarcese di Genna Mesa:** si tratta di metarcese, metagrovacche arcosiche grigio chiare e grigio-verdastre in strati da medi a molto spessi. Si tratta di sedimenti ben selezionati, a granulometria da fine a grossa, con elementi di quarzo, feldspatici detritici e rari litici in matrice quarzoso-sericitica. Localmente le metarcese passano a metaquarzoareniti a grana fine, con intercalazioni da centimetriche a decimetriche di metapeliti scure, e rare intercalazioni di metaconglomerati minuti a elementi di quarziti, e talora sono presenti rocce silicizzate. Stratigraficamente, poggiano sulla formazione di Monte Santa Vittoria mentre il passaggio verso la soprastante formazione degli Scisti a graptoliti avviene per comparsa di metasiltiti fini e metapeliti. Lo spessore è difficilmente valutabile per via dell'intensa deformazione, ma presumibilmente è compreso tra 0 e 80 metri, anche se tale valutazione è relativa allo spessore apparente. L'età Ordoviciano superiore è attribuita per analogia con le altre unità tettoniche in quanto non sono stati rinvenuti fossili.

**(SGA) Scisti a graptoliti:** sono costituiti da una sequenza di filladi quarzifere e filladi scure o nere, raramente verdastre, cui localmente sono intercalati livelli di diaspri neri ("liditi") in strati medi o molto sottili. Alle filladi sono associati livelli di metacalcari grigi completamente ricristallizzati spesso con aspetto nodulare (**SGAa**). Le facies più carboniose sono frequenti in prossimità del contatto con i livelli carbonatici o con la soprastante formazione dei marmi di Asuni. Lo spessore non è valutabile a causa dell'intensa deformazione, ma apparentemente è almeno di 200 m. Il contatto superiore è netto sia con i marmi di Asuni, per la comparsa di livelli carbonatici, che con la Formazione di Pala Manna, per comparsa di metasedimenti clastici grossolani.

L'età è ascrivibile al Siluriano – Devoniano Medio per analogia con le corrispondenti litologie affioranti nelle unità tettoniche più superficiali.

**Marmi di Asuni (ASU):** si tratta di alternanze di marmi in banchi molto spessi, di colore variabile tra il grigio e il bianco, spesso venati con sottili livelli di filladi scure. Presentano aspetto fortemente scistoso, e sono costituiti da un'intercalazione irregolare di livelli di marmi dolomitici e metadolomie grigie. Lo spessore varia tra 0 e 100 m, e superiormente passano per contatto stratigrafico a metaquarzoareniti grigie a grana medio-grossolana, e localmente sono in contatto con metaconglomerati a clasti di diaspri neri ("liditi") appartenenti alla formazione di Pala Manna. L'età è riferita al Devoniano medio – Carbonifero inferiore per via della sua posizione stratigrafica e per analogia con livelli affioranti in altre unità tettoniche (Calcari di Villasalto), in quanto gli unici fossili rinvenuti sono rari articoli di crinoide molto deformati.

**Formazione di Pala Manna (PMN):** si tratta di metaquarzoareniti grigio-scure a grana medio-grossa, con sottili livelli filladici. Sono associate a metagrovacche e metarenarie litiche, metasiltiti grigio-scure con sottili lamine filladiche nere e metapeliti scure omogenee, con intercalazioni centimetriche di metareniti grigio-verdi a grana fine. A queste litologie sono intercalate lenti di metaconglomerati poligenici, in matrice pelitico-arenacea, costituiti da clasti da millimetrici a centimetrici di quarzo, originarie quarzoareniti (**PMNb**) spesso scure, peliti e diaspri neri ("liditi"). Localmente i metaconglomerati sono costituiti esclusivamente da clasti di diaspri neri (**PMNa**) con uno spessore di alcune decine di metri. Il limite superiore è sempre tettonico, quando è in contatto con le altre unità tettoniche, altrimenti è interrotto da una discordanza basale. Lo spessore non è valutabile in quanto non affiora la base della formazione interessata da sovrascorrimenti. La successione è attribuita al Carbonifero inferiore in base alle analogie litologiche e per la posizione stratigrafica rispetto alle altre formazioni.



**Figura 6 UNITA' TETTONICA DI RIU GRUPPA – Formazione di Pala Manna**

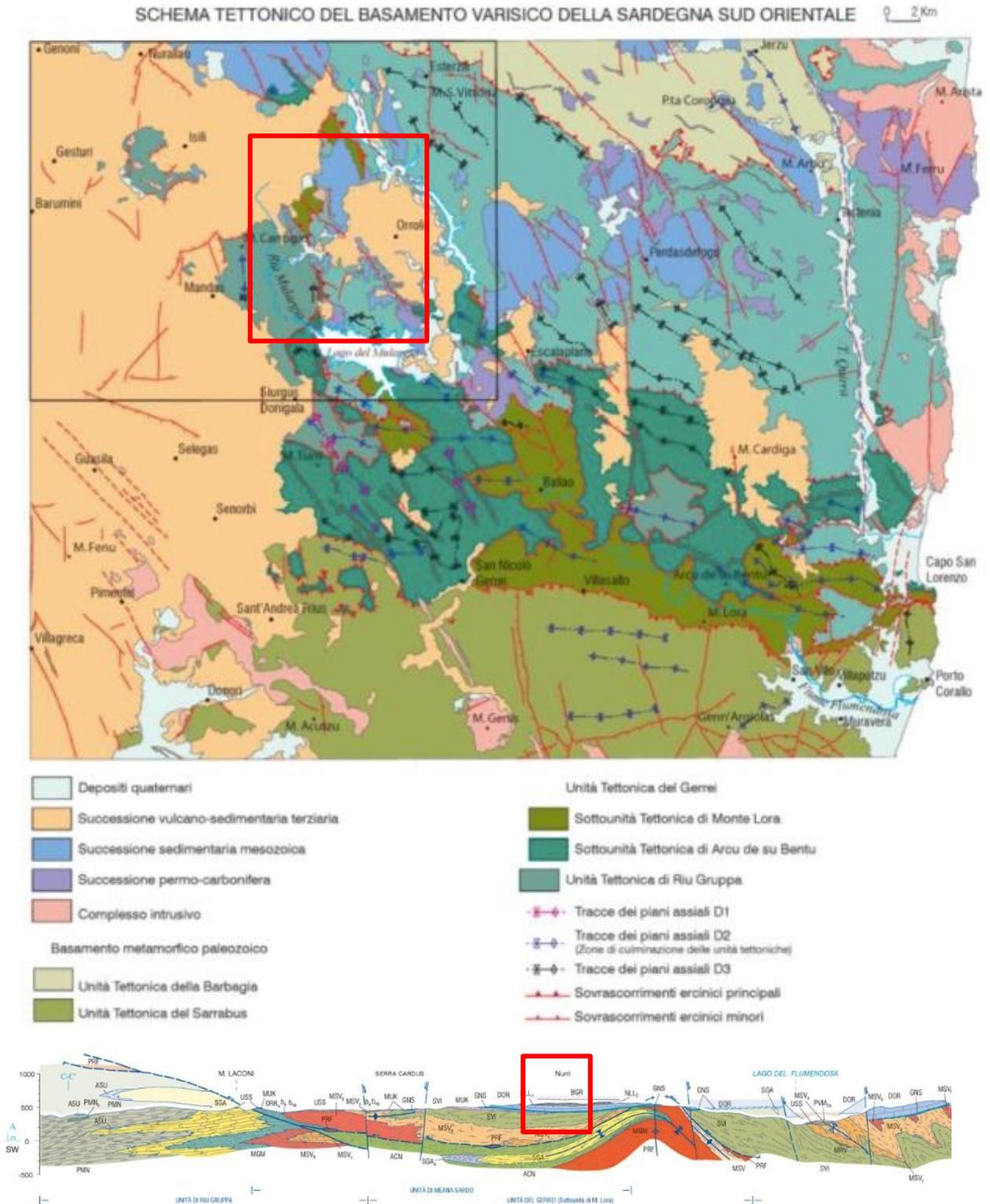
### **6.1.2 UNITÀ TETTONICA DEL GERREI**

Questa unità tettonica è divisa in due sottounità: la Sottounità di M. Lora e la Sottounità di Arcu de su Bentu, geometricamente inferiore alla precedente. Le modeste differenze tra le successioni di queste due sottounità riguardano i sedimenti dell'Ordoviciano superiore e il complesso vulcano-sedimentario dell'Ordoviciano medio, che risulta costituito da metaepiclastiti, metandesiti e porfiroidi nella sottounità di Monte Lora, e da porfiroidi in quella di Arcu de su Bentu. Le successioni presenti sono descritte in ordine cronostatigrafico (dalla formazione più antica verso la più giovane).

**(SVI) Arenarie di San Vito:** questa formazione, che affiora a S e a O dell'abitato di Orroli, è costituita da metaquarzoareniti e, più raramente, metarenarie feldspatiche, di color grigio chiaro, grigio-verdastro o nocciola chiaro. Si tratta di rocce a granulometria fine, ben selezionate, in strati molto sottili o medi, raramente metrici, ricche in miche detritiche e matrice cloritico-sericitica, e una componente litica rappresentata da frammenti di metamorfiti. Le metarenarie formano regolari alternanze, da centimetriche a metriche, con metasiltiti e metapeliti grigio-verdastre e raramente metapeliti scure. Localmente affiorano metaquarzoareniti grigio-chiare, massive, in bancate di alcuni metri di spessore. Lo spessore delle Arenarie di San Vito nell'Unità tettonica del Gerrei è difficilmente valutabile a causa delle intense strutture plicative isoclinali e del contatto di base sempre tettonico. A causa dell'intensa deformazione, le strutture riconoscibili sono costituite quasi sempre dalla foliazione. L'età della formazione è riferita al Cambriano medio- Ordoviciano inferiore sulla base di associazioni ad acritarchi riconosciuti in altre aree.

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**



**Figura 7 Schema Tettonico dell'area di studio (tratto da Funedda et al., 2013. Note Illustrative Foglio CARG Mandas)**

**(MSV) Formazione di Monte Santa Vittoria:** affiora nella zona centro-occidentale dell'area vasta ed è costituita da metavulcaniti a chimismo intermedio e basico, metaepiclastiti, rare metarenarie feldspatiche e metaconglomerati. La scistosità, evidenziata dalla isoorientazione dei fenocristalli, è sempre penetrativa e traspare quasi sempre le originarie superfici di deposizione. Lo spessore della formazione non è determinabile ma quello apparente è superiore al centinaio di metri. Il contatto di base della formazione sulla Formazione di San Vito, e quello superiore coi Porfiroidi, permettono di attribuire queste metavulcaniti all'Ordoviciano medio per via della posizione stratigrafica.

**(PRF) Porfiroidi (Auct.):** Si tratta di metavulcaniti che affiorano esclusivamente nell'Unità tettonica del Gerrei, originariamente costituite da tufi e ignimbriti a composizione riolitica e riocacitica con struttura occhiadina per via dei porfiroclasti di K-feldspato, plagioclasio e quarzo con dimensioni di 0,5-1 cm immersi in una massa di fondo sericitico-cloritica (**PRF**). Sono presenti livelli rimaneggiati arcocici, e in generale i depositi hanno giacitura massiva, il cui colore varia dal verdastro al giallo e rosa per alterazione. Una particolare litofacies, i Porfiroidi a grossi fenocristalli (**PRFa**) è caratterizzata da una struttura marcatamente occhiadina per la presenza di grossi porfiroclasti di feldspato potassico rosa di dimensioni massime di 7 cm in matrice filladica rosa, verde o rossa. Lo spessore della formazione, che non presenta foliazione pervasiva, è molto variabile sia per cause tettoniche che deposizionali, ma dove sono visibili i contatti di letto e tetto è inferiore al centinaio di metri. Per via della sua posizione stratigrafica sopra le Arenarie di San Vito o il Metaconglomerato di Muravera sotto, e sotto le Metarcose di Genna Mesa, l'età della successione è riferibile all'Ordoviciano medio.

**(MGM) Metarcose di Genna Mesa:** questa formazione è costituita da metaconglomerati quarzosi a granulometria arenitica e clasti dei sottostanti porfiroidi alla base della successione, e da metareniti stratificate o massive, poco mature e a granulometria da fine a grossolana con grani di quarzo e K-feldspato millimetriche, e metarcose mature e quarzoareniti ben stratificate. Lo spessore è variabile, ma non supera i 15 m.

Il contatto con le successioni inferiori è discordante (cartograficamente), mentre quello superiore sfuma con la soprastante formazione degli Argilloscisti di Rio Canoni. Per via di questa continuità e per la presenza di rari articoli di crinoide, l'età della formazione è attribuita all'Ordoviciano superiore (Caradoc).

**(ACN) Argilloscisti di Rio Canoni:** alla base, la formazione è costituita da metarenarie fini grigio scuro, con rari livelli più grossolani, seguiti da metasiltiti talora carboniose di colore grigio-nocciola caratteristiche per la presenza di vacuoli limonitizzati dovuti a dissoluzione di resti fossili. Lo spessore della formazione è inferiore a 20 m, e il contatto inferiore con le metarcose di Genna Mesa è concordante, mentre quello superiore con i sedimenti siluro-devonici è netto. Il contenuto fossilifero di questa formazione, ricco in briozoi, brachiopodi, crinoidi, gasteropodi e trilobiti, permette di attribuire questa formazione all'Ashgill (Ordoviciano superiore).

**(SGA) Scisti a Graptoliti (Auct.):** costituiti da metapeliti scure (giallastre o grigie per alterazione), intercalate a livelli di quarziti nere ("liditi") (**SGA**). Sono presenti lenti discontinue di metacalcri nodulari (**SGAa**) di massimo 5 m di lunghezza e 2 di spessore, interstratificate nella successione. Lo spessore è assai variabile per via dell'intensa deformazione, infatti i contatti sono spesso laminati tettonicamente. L'età della successione è riferibile al Siluriano - Devoniano medio grazie alla ricca associazione fossilifera a graptoliti, conodonti, scifocrinoidi, crinoidi, tentaculiti e trilobiti.



**Figura 8 UNITA' TETTONICA DEL GERREI – Scisti a Graptoliti – (SGA)**

### **6.1.3 UNITÀ TETTONICA DI MEANA SARDO**

Affiora nella parte sud-orientale dell'area di studio e si trova in contatto tettonico con la sottostante unità tettonica del Gerrei. Le successioni presenti sono descritte in ordine cronostratigrafico (dalla formazione più antica verso la più giovane).

**(SVI) Arenarie di San Vito:** questa formazione è costituita da metarenarie fini di colore grigio-verde oliva, metasiltiti, quarziti e metargilliti, e un livello di metaconglomerati a elementi di quarzo e metarenarie in matrice filladica intercalati nella parte mediana della successione. La parte alta della formazione è caratterizzata da livelli da centimetrici a decimetrici di metapeliti varicolori da grigio a viola scuro, ed è ricoperta in discordanza dal metaconglomerato di Muravera o direttamente dalla Formazione di Monte Santa Vittoria. La base della formazione invece non è mai esposta, in quanto è tagliata dal contatto basale tettonico con la sottostante unità del Gerrei. Lo spessore della formazione, seppur interessata da diversi raddoppi tettonici, è superiore ai 100 m. L'età della successione è attribuita al Cambriano medio – Ordoviciano inferiore, sulla base dei fossili di acritarchi rinvenuti.

**(MSV) Formazione di Monte Santa Vittoria:** è costituita da un complesso vulcanico-epiclastico suddiviso in tre litofacies: metaepiclastiti grossolane con ciottoli di metarioliti, metagrovacche vulcaniche e metandesiti, e metarioliti afiriche.

Le metaepiclastiti (**MSVa**) sono rappresentate da metagrovacche litiche, metarenarie vulcaniche e metaconglomerati, a scarsa selezione e con grani spigolosi immersi in matrice quarzoso-sericitica.

Le metagrovacche e metandesiti (**MSVb**) sono rappresentate da metaepiclastiti verdastre, prevalentemente metagrovacche, massive o in banchi di alcuni metri di spessore, con abbondanti frammenti litici che le conferiscono un aspetto macchiato. Sono intercalate a metavulcaniti grigio scure a composizione da andesitica a basaltica.

Le metarioliti afiriche (**MSVc**) presentano colore bianco-giallastro con rari cristalli di feldspato potassico immersi in una massa di fondo microcristallina più o meno sericitica o silicizzata, con tessitura finemente scistosa e intensamente piegate.

Le tre litofacies sopra descritte sono correlabili con le formazioni di Manixeddu, Serra Tonnai e Monte Corte Cerbos affioranti nella Barbagia. L'età attribuita è Ordoviciano medio.



Figura 9 Formazione del Monte Santa Vittoria (MSV)

**(ORR) Formazione di Orroledu** costituito da alternanze di metarenarie e metasiltiti grigie, distinte in due litofacies: alla base, metagrovacche e metarenarie arcose e metaconglomerati (**ORRa**) matrice-sostenuti, con clasti di quarzo bianco e nero e frammenti litici mediamente arrotondati, di dimensioni massime di 1-2 cm, in matrice quarzosa biancastra; metarenarie e metasiltiti varicolori grigio-nocciola, scarsamente selezionate, e interessate da clivaggio ardesiaco penetrativo, e aspetto vacuolare nelle frazioni più fini a causa della dissoluzione di fossili. Talora sono presenti livelli di originari metacalcari tipo *mudstone*. Lo spessore è estremamente variabile in quanto il contatto di base è trasgressivo. La successione viene riferita all'Ordoviciano superiore per la presenza di brachiopodi, articoli di crinoidi, briozoi, ostracodi, gasteropodi, trilobiti e conodonti.

#### 6.1.4 CORTEO FILONIANO.

**(fp) Filoni ed ammassi di porfidi granitici:** sono costituiti da filoni con spessori generalmente non superiori a qualche decina di metri; e dimensioni variabili tra qualche metro e parecchie centinaia di metri, orientati secondo direzioni N-S e NNW-SSE.

Presentano struttura isotropa porfirica per presenza di fenocristalli di K-feldspato, quarzo e rare biotite e muscovite, immersi in una massa di fondo granofirica. L'età è riferibile al Carbonifero superiore - Permiano.

#### 6.1.5 SUCCESSIONE VULCANO-SEDIMENTARIA TARDO-PALEOZOICA

La successione permiana è costituita da rocce sedimentarie e vulcaniche, sebbene nell'area di studio affiori solo la serie sedimentaria, rappresentata dalla formazione di Rio su Luda.

**(LUD) Formazione di Rio su Luda:** costituita da conglomerati, epivulcanoclastiti ed argilliti con rari livelli carbonatici. La porzione basale (**LUDa**) è costituita da un conglomerato poligenico eterometrico con clasti scarsamente elaborati di metamorfiti e quarzo, massivo con alcune strutture canalizzate, che giace in discordanza sul basamento ercinico. Lo spessore varia da pochi a 30 m, anche se può apparire maggiore per via di alcune faglie dirette. L'età di questo deposito è attribuita al Permiano inferiore per via dei resti fossili rinvenuti nelle litofacies superiori.

### **6.1.6 SUCCESSIONE SEDIMENTARIA MESOZOICA**

La successione sedimentaria mesozoica è costituita da due sintemi separati da una discordanza: il sintema triassico, che include depositi continentali (Buntsandstein Auct.) e calcari neritici (Muschelkalk Auct.), e quello giurassico che comprende sedimenti fluviali e transizionali (Formazione di Genna Selole), e calcari dolomitici di piattaforma neritica (formazione di Dorgali).

**(BUN) Buntsandstein Auct.:** è costituita da un conglomerato basale poligenico rossastro con abbondante matrice sabbiosa, con clasti di quarzo e metamorfiti del basamento in minore quantità. Tale deposito è sormontato da un'alternanza centimetrica e decimetrica di argilliti marnose, siltiti e subordinate arenarie rossastre o grigio-verdi, con strutture evaporitiche tipo *halite casts* alla base degli strati marnosi.

Presenta una giacitura suborizzontale e uno spessore non superiore a 20 m. Il contatto inferiore è sempre discordante, mentre quello superiore è netto col Muschelkalk. In base alle associazioni fossilifere e a quelle sporopolliniche, la formazione viene attribuita al Triassico medio (Anisico).

**(MUK) Muschelkalk Auct.:** la formazione include calcari stratificati con laminazioni e tracce di bioturbazioni, dolomie e calcari dolomitici mal stratificati, di colore grigio-giallastro e nocciola, che nella porzione superiore della successione possono esser silicizzati. Sono riconoscibili diverse strutture sedimentarie, dalle laminazioni ai ripple mark, e nella parte alta prevalgono i calcari tipo mudstone e wackestone. Lo spessore massimo della formazione è di 20 m, con un limite inferiore netto, e quello superiore erosivo, che passa per discordanza sia ai depositi giurassici che a quelli terziari. L'età è Triassico medio (Ladinico).

**(GNS) Formazione di Genna Selole:** questa formazione, di esiguo spessore (0 – 30 m), è costituita da conglomerati monogenici quarzosi, con intercalazioni di quarzoareniti biancastre e argille bianche o grigio-chiare caoliniche, a clasti ben arrotondati del basamento (quarzo, liditi, porfidi, quarziti, ecc...), con strutture sedimentarie. Sono spesso associate argille grigie o bianche, con rari livelli di conglomerati monogenici quarzosi e frammenti di lignite nera. Il contatto inferiore è sempre discordante, mentre quello superiore è concordante con i calcari della formazione di Dorgali soprastante. Nelle frazioni siltose e argillose sono conservati i resti vegetali e pirite, e alla base del conglomerato affiorano paleosuoli ricchi in ossidi e idrossidi di ferro. Sulla base delle paleoflore l'età attribuita alla formazione è il Giurassico medio (Dogger).

**(DOR) Formazione di Dorgali:** è costituita da depositi tabulari suborizzontali o debolmente inclinati che formano degli altipiani detti "Tacchi". La parte basale è formata da calcari marnosi e marne giallastro-grigie, con locali intercalazioni arenacee e siltitico-argillitiche grigio-verdastre, seguiti da dolomie e calcari dolomitici da biancastri fino a nocciola o rossastri, fossiliferi, in banchi decimetrici o metrici. La formazione, che presenta uno spessore massimo di 50 m, ricopre in discordanza quella di Genna Selole, mentre il limite superiore è sempre erosivo con le successioni soprastanti (formazioni di Ussana, Nurallao e basalti delle Giare). In base all'associazione fossilifera (gasteropodi, ostracodi, lamellibranchi e brachiopodi), la formazione viene riferita al Giurassico medio-superiore (Dogger – Malm).

### **6.1.7 SUCCESSIONE SEDIMENTARIA TERZIARIA**

La successione sedimentaria terziaria, che poggia sul basamento paleozoico in discordanza, è ben rappresentata dalle coperture dell'Eocene inferiore.

**(FMCa) Formazione di Monte Cardiga – Litofacies delle arenarie:** nell'area di studio questa formazione affiora in strati tabulari direttamente discordanti sui depositi mesozoici o direttamente su quelli paleozoici. Si tratta della litofacies basale (FMCa) ad arenarie a cemento carbonatico o siliceo ben stratificate, e conglomerati poligenici grossolani in bancate di oltre 1 m di spessore, a prevalenti clasti elaborati del basamento paleozoico con quarzo, liditi e porfidi, in abbondante matrice arenacea. Alle arenarie, spesso gradate e laminate, sono intercalati livelli marnosi fossiliferi (gasteropodi, lamellibranchi, frustoli vegetali) di spessore 0,5 m. Lo spessore di questa litofacies varia tra 15 e 30 m, e l'età è riferibile all'Eocene inferiore (Ypresiano).

## **6.2 SUCCESSIONE VULCANO-SEDIMENTARIA MIOCENICA**

**(USS) Formazione di Ussana:** affiora nella parte centro-orientale dell'area vasta. La formazione è costituita da conglomerati clasto-sostenuti, fortemente eterometrici e poligenici, e da arenarie poco classate organizzate in banchi grossolani, con sporadici livelli argillosi, e intercalazioni di livelli discontinui di piroclastiti e arenarie vulcanoclastiche (**USSe**), travertini (**USSf**) e calcari lacustri (**USSg**). La frazione conglomeratica è prevalente, e presenta clasti elaborati di dolomie e calcari mesozoici ed eocenici e arenarie eoceniche, e rari clasti del basamento paleozoico, con scarsa matrice sabbiosa o argillosa e buon grado di compattazione. Il contatto di base è discordante sul basamento paleozoico, sui depositi mesozoici e eocenici, mentre il contatto superiore con la formazione di Nurallao è graduale. La formazione presenta spessore variabile da pochi metri a 150 m, e contiene diverse associazioni fossilifere che permettono di riferirla all'Oligocene superiore – Miocene inferiore (Aquitano inferiore).



**Figura 10 Formazione di Ussana**

**(NLL) Formazione di Nurallao:** affiora a SE e a W di Nurri, ed è composta da un membro basale fossilifero noto come "conglomerato di Duidduru" (**NLL1**) di spessore variabile tra 0 e 30 m, costituito da depositi conglomeratici eterometrici a ciottoli e blocchi di tutte le formazioni precedenti, organizzati in livelli decimetrici alternati a livelli di arenarie grossolane stratificate e con differente grado di cementazione.

Il membro sommitale della formazione è rappresentato dalle arenarie di Serra Longa (**NLL2**), costituite da arenarie e conglomerati minuti con stratificazione parallela e incrociata, che passano lateralmente e verso l'alto ad arenarie grossolane a cemento carbonatico. Le arenarie costituiscono grossi banchi, e sono composte da elementi moderatamente selezionati di quarzo e feldspati, grano-sostenuti, intercalate a livelli conglomeratici decimetrici, e areniti e ruditi bioclastiche in strati spessi da 1 a 10 m. Lo spessore del membro varia da pochi metri fino a superare 100 m. Per il ricco contenuto fossilifero (turrnellidi, coralli, foraminiferi, ostreidi, pettinidi, echinidi, ecc...) la formazione è datata Oligocene superiore – Burdigaliano inferiore.

**(GST) Marne di Gesturi:** è costituita da una successione prevalentemente marnoso-arenacea (GST), al cui interno sono distinti: conglomerati basali e sabbie di ambiente transizionale (GSTc), banchi di calcareniti ad alghe (*Lithothamnium*) (GSTb), e, nella parte superiore, livelli piroclastici e tuffiti (GSTa). Sebbene questa formazione possa raggiungere spessori superiori ai 200 m, nell'area di studio i conglomerati basali non eccedono il metro, mentre i banchi di calcareniti presentano uno spessore costante di 3 m e una continuità laterale notevole, e i livelli tuffitici raggiungono spessori massimi di 20 m.

Le Marne di Gesturi poggiano in discordanza sulle sottostanti formazioni del I ciclo miocenico o direttamente sul basamento paleozoico, e il tetto è sempre eroso. Per via dell'abbondante contenuto in foraminiferi, ostracodi, pteropodi, bivalvi ed echinidi, l'età attribuita a tali depositi è Burdigaliano superiore – Langhiano medio.

**(ARX) Formazione di Aragixi** – si tratta di piccoli lembi di vulcaniti piroclastiche, principalmente tufi a struttura porfirica per frammenti litici immersi in massa di fondo criptocristallina, tufi pomicei e cineritici, generalmente con un buon grado di litificazione. La composizione sembrerebbe dacitica, e il colore varia dal grigio al rossastro. La formazione presenta spessori intorno al metro, al massimo 15 m, con affioramenti che poggiano in discordanza sul basamento paleozoico o sulla formazione di Ussana, mentre il limite superiore è sempre eroso. L'età, stimata con datazioni radiometriche, indica un intervallo compreso tra l'Aquitano superiore e il Burdigaliano inferiore.

## 6.2 SUCCESSIONE VULCANICA PLIOCENICA

**(BGR) Basalti delle Giare:** costituiscono espandimenti tabulari che possono raggiungere estensioni di oltre 20 kmq, come nel caso di Nurri e Orroli. I basalti **(BGR)** sono spesso associati a accumuli di piroclastiti scoriacee **(BGRa)**. Generalmente il deposito è costituito da una breccia basale sormontata da bancate decametriche di lava. Le lave sono vescicolate e presentano incluse olocristalline chiare a composizione feldspatica, e scuri di composizione magmatica simile a quella della lava stessa.

Lo spessore della formazione è compreso tra 5 e 30 m, che risulta formata da diverse colate sovrapposte. Le datazioni radiometriche hanno fornito un'età Pliocene medio-superiore.

I vari espandimenti sembrano corrispondere ad altrettanti apparati vulcanici che hanno eruttato separatamente, dei quali si possono osservare localmente la forma, i dicchi alimentatori (M.te Guzzini) e i prodotti piroclastici eruttati in prossimità della zona di alimentazione.

L'assenza di paleosuoli e di superfici alterate all'interno della successione vulcanica suggerisce la messa in posto in un unico episodio eruttivo. I prodotti piroclastici **(BGRa)** sono costituiti da accumuli di piroclastiti scoriacee, composti da lapilli e bombe a fuso di dimensioni decimetriche. Alla base delle colate sono presenti livelli di scorie autoclastiche (clinker) generatesi per scomposizione in blocchi della lava. Localmente si osservano fenomeni di alterazione termica sul substrato marnoso miocenico di appoggio generati dal contatto con la lava incandescente. La sequenza tipica di questi depositi prevede una porzione basale della colata costituita da una breccia, mentre nella parte alta si hanno bancate anche decimetriche di lava massiva. Il senso di scorrimento della colata è evidenziato dalla presenza di bolle allungate.

È la litologia sulla quale si sviluppa l'intero parco eolico.

## 6.3 DEPOSITI QUATERNARI DELL'AREA CONTINENTALE

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

**(bna) Depositi alluvionali terrazzati:** si tratta di sedimenti alluvionali a tessitura grossolana, come sabbie grossolane e ghiaie. I depositi difficilmente raggiungono spessori superiori ai 5 m, di ambiente di conoide o piana alluvionale e situati in prossimità dei corsi d'acqua. Sono strettamente correlati ad un reticolo idrografico molto simile a quello attuale di cui costituiscono i letti di piena straordinaria o le piane alluvionali. Olocene.

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

**(a<sub>1</sub>, a<sub>1a</sub>) Depositi di frana:** si dividono in corpi di frana antichi e recenti. Corpi di frana antichi: estesi accumuli gravitativi, che di solito non presentano indizi di attività, affiorano diffusamente ai bordi dei rilievi tabulari basaltici, in corpi di estensione e di spessore molto variabile.  
Corpi di frana recenti: si tratta di movimenti limitati per estensione e spessore che interessano i tratti più acclivi dell'area.



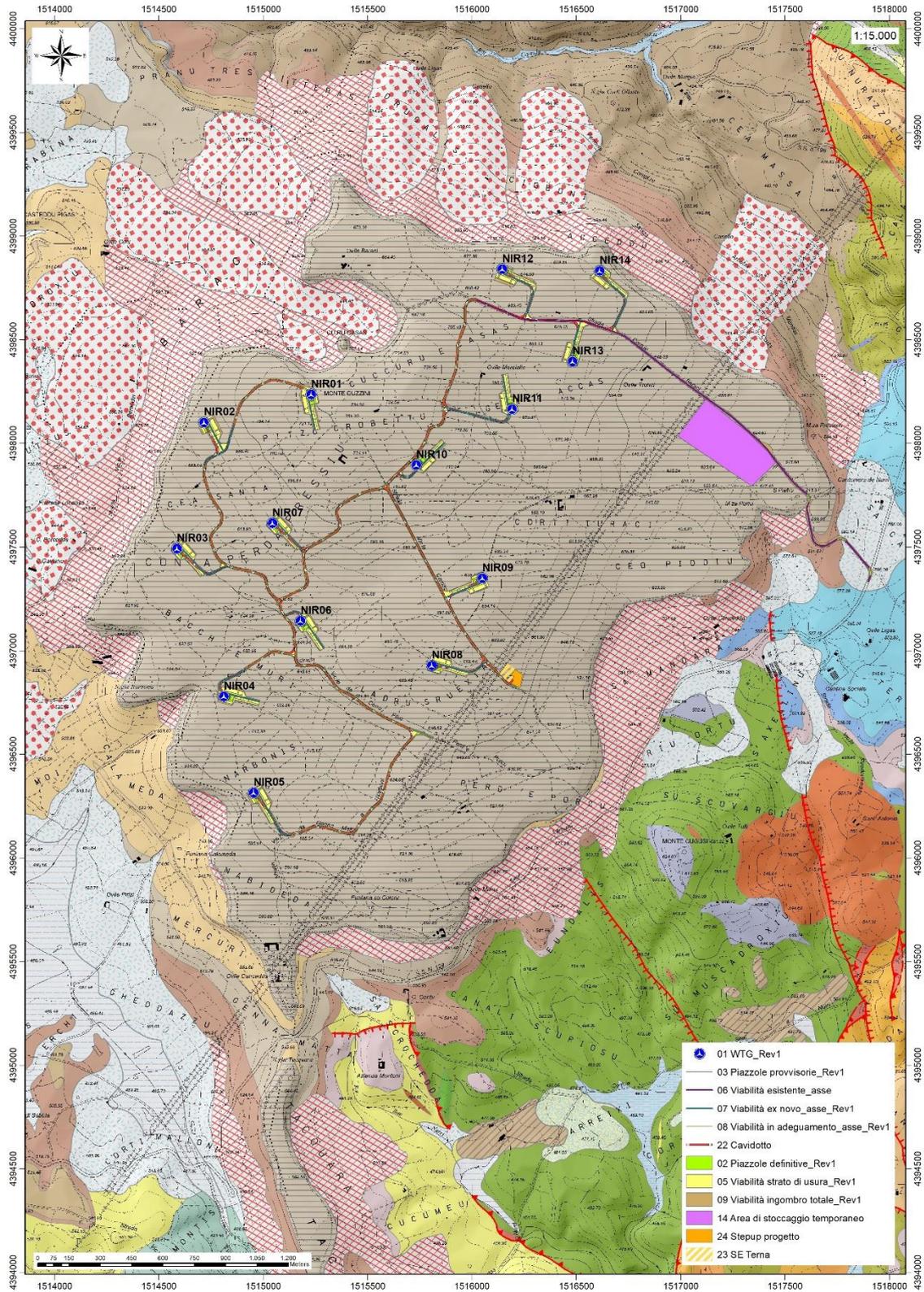
**Figura 11 Depositi di versante, ciottoli in Muschelkalk (sx) e in SGA e PMN (dx)**

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

**(b) Depositi alluvionali:** Si tratta di materiali che si rinvengono nei letti dei fiumi attualmente soggetti a processi di erosione, trasporto e rideposizione periodica. Sono costituiti da ghiaie poligeniche eterometriche, talora in matrice sabbiosa con lenti sabbiose e sabbioso-ghiaiose poco continue. Sono tipici sedimenti di barra, sia longitudinale che laterale o mediana, non cementati. Olocene.

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**



**Figura 12 Carta Geologica del sito (settore Nord)**

# "NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE

## Relazione Geologica



Figura 13 Legenda della Carta Geologica

## **7 ANALISI DELLE CONDIZIONI GEOSTRUTTURALI GENERALI**

L'area di studio è caratterizzata dall'affioramento di un tableau basaltico "giara" di spessore variabile tra i 5 e 30m in appoggio alla sottostante Formazione di Nurallao.

(BGR) Basalti delle Giare: costituiscono espandimenti tabulari che possono raggiungere estensioni di oltre 20 kmq, come nel caso di Nurri e Orroli. I basalti (BGR) sono spesso associati a accumuli di piroclastiti scoriacee (BGRa). Generalmente il deposito è costituito da una breccia basale sormontata da bancate decametriche di lava. Le lave sono vescicolate e presentano incluse olocristalline chiare a composizione feldspatica, e scuri di composizione magmatica simile a quella della lava stessa.

Lo spessore della formazione è compreso tra 5 e 30 m, che risulta formata da diverse colate sovrapposte. Le datazioni radiometriche hanno fornito un'età Pliocene medio-superiore.

È la litologia sulla quale si sviluppa l'intero parco eolico.

L'area vasta è caratterizzata da faglie con direzione principale WNW – ESE, talora normali, e da sovrascorrimenti, e piegamenti sovrapposti (a direzione NNW-SSE e E-W) nella zona di interesse.

Di queste strutture tettoniche presenti, le faglie determinano il controllo tettonico delle principali valli incise. La giacitura dei piani è variabile. Nei diversi siti di installazione la dinamica metamorfica e geostrutturale ha creato piani di scistosità e fratturazione a diversa scala. I movimenti tettonici hanno ripiegato i materiali più coesivi (metapeliti e metargilliti) e fratturato quelli più coerenti (metasiltiti, metarenarie, metaconglomerati, metaconglomerati).

Tutte le turbine eoliche sono posizionate sul plateau basaltico.

## 8 ANALISI QUALITATIVA DI STABILITÀ DELL'AMMASSO ROCCIOSO

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

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

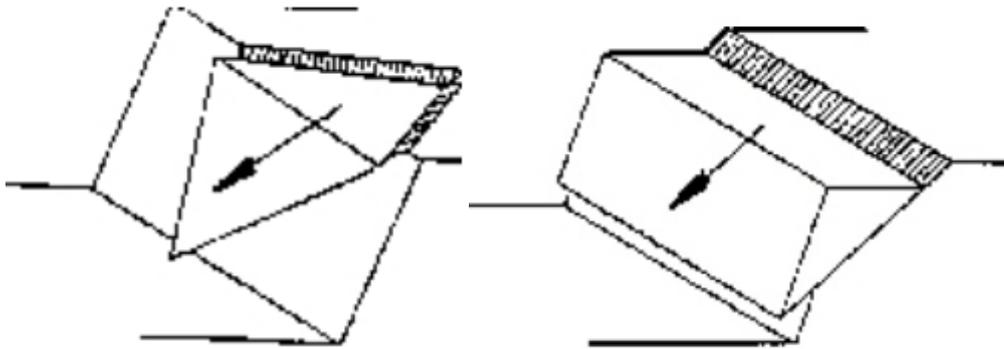


Figura 14 Tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione

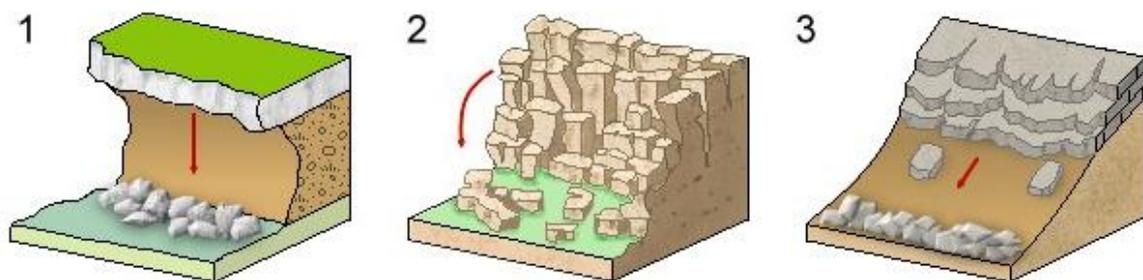


Figura 15 Tipologia di frana: 1. Crollo; 2. Ribaltamento; 3. Scivolamento

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

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

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

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

## 8.1 CARATTERIZZAZIONE GEOSTRUTTURALE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

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

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

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

dove:

$\sigma'_1$  e  $\sigma'_3$  = sforzi efficaci principali rispettivamente massimo e minimo a rottura;

$mb$  = costante d'ammasso

$s$  ed  $a$  = costanti d'ammasso

$\sigma_{ci}$  = resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\sigma'_1 = (2c' \cos \varphi' / 1 - \sin \varphi') + (1 + \sin \varphi' / 1 - \sin \varphi') \sigma'_3$$

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

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

# "NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE

## Relazione Geologica

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

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

Figura 16 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia

DESCRIZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO PER LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI RESISTENZA	CONDIZIONI SUPERFICIALI					INDICE GEOLOGICO DI RESISTENZA GSI (Geological Strength Index)
	MOLTO BUONE	BUONE	DISCRETE	SCADENTE	MOLTO SCADENTE	
<p>Sulla base dell'apparenza della roccia, scegliere la categoria che si pensa sia la migliore descrizione delle condizioni "medie" dell'ammasso indurito presente in sito. Da notare che la superficie visibile della roccia ottenuta da una rotazione esplosiva può dare una impressione fuorviante sulla qualità della roccia sottostante. Occorre pertanto correggere opportunamente la valutazione delle caratteristiche dell'ammasso roccioso per tenere in conto il cuneo arretrato dallo scavo con esplosivo. A questo riguardo può essere utile l'esame di carotaggi ottenuti da perforazioni a carotaggio continuo con corona diamantata o l'osservazione della superficie creata da uno scavo realizzato con tecniche di abbattimento controllato. È inoltre importante ricordare che il criterio di rottura di Hoek-Brown dovrebbe essere applicato dove la dimensione del "volume unitario" di ammasso roccioso risulta piccola in confronto alle dimensioni dello scavo in considerazione.</p>	<p>CONDIZIONI SUPERFICIALI</p> <p>CONDIZIONI SUPERFICIALI</p> <p>CONDIZIONI SUPERFICIALI</p> <p>CONDIZIONI SUPERFICIALI</p> <p>CONDIZIONI SUPERFICIALI</p>					<p>Dalle sigle, determinate con la tabella riportata precedentemente che descrivono la struttura e le condizioni superficiali dell'ammasso roccioso, selezionare l'appropriata casella della presente tabella. Stimare il valore medio GSI delle linee di uguale valore di GSI che attraversano la casella di riferimento. A quest'ultimo riguardo non è importante essere troppo precisi, indicare per GSI un valore compreso tra 30 e 42 è molto più realistico che indicare GSI=35.</p>
<p>STRUTTURA</p> <p>A BLOCCHI - Ammasso roccioso indurito costituito da blocchi cubici, formati da tre famiglie di discontinuità tra loro ortogonali, con un elevato grado di mutuo incastro.</p> <p>CON MOLTI BLOCCHI - Ammasso roccioso parzialmente disintegrato con blocchi angolari, mutuamente incastriati, con più sfaccettature formate da quattro o più famiglie di discontinuità.</p> <p>A BLOCCHI/DISTURBATA - Ammasso roccioso con blocchi angolari formati dall'intersezione di molte famiglie di discontinuità.</p> <p>DISINTEGRATA - Ammasso roccioso molto fratturato e con basso grado di mutuo incastro formato da un insieme di blocchi rocciosi angolari e arrotondati.</p>	<p>STRUTTURA</p> <p>A BLOCCHI - Ammasso roccioso indurito costituito da blocchi cubici, formati da tre famiglie di discontinuità tra loro ortogonali, con un elevato grado di mutuo incastro.</p> <p>CON MOLTI BLOCCHI - Ammasso roccioso parzialmente disintegrato con blocchi angolari, mutuamente incastriati, con più sfaccettature formate da quattro o più famiglie di discontinuità.</p> <p>A BLOCCHI/DISTURBATA - Ammasso roccioso con blocchi angolari formati dall'intersezione di molte famiglie di discontinuità.</p> <p>DISINTEGRATA - Ammasso roccioso molto fratturato e con basso grado di mutuo incastro formato da un insieme di blocchi rocciosi angolari e arrotondati.</p>					<p>STRUTTURA</p> <p>A BLOCCHI - Ammasso roccioso indurito costituito da blocchi cubici, formati da tre famiglie di discontinuità tra loro ortogonali, con un elevato grado di mutuo incastro.</p> <p>CON MOLTI BLOCCHI - Ammasso roccioso parzialmente disintegrato con blocchi angolari, mutuamente incastriati, con più sfaccettature formate da quattro o più famiglie di discontinuità.</p> <p>A BLOCCHI/DISTURBATA - Ammasso roccioso con blocchi angolari formati dall'intersezione di molte famiglie di discontinuità.</p> <p>DISINTEGRATA - Ammasso roccioso molto fratturato e con basso grado di mutuo incastro formato da un insieme di blocchi rocciosi angolari e arrotondati.</p>
<p>DIMINUIZIONE DEL GRADO DI MUTUO INCASTRO DELL'AMMASSO ROCCIOSO</p>	<p>DIMINUIZIONE DELLA QUALITÀ SUPERFICIALE DELL'AMMASSO ROCCIOSO</p>					<p>DIMINUIZIONE DEL GRADO DI MUTUO INCASTRO DELL'AMMASSO ROCCIOSO</p>
<p>B/VG</p> <p>VB/VG</p> <p>BD/VG</p> <p>D/VG</p>	<p>B/G</p> <p>VB/G</p> <p>BD/G</p> <p>D/G</p>	<p>B/F</p> <p>VB/F</p> <p>BD/F</p> <p>D/F</p>	<p>B/P</p> <p>VB/P</p> <p>BD/P</p> <p>D/P</p>	<p>B/VP</p> <p>VB/VP</p> <p>BD/VP</p> <p>D/VP</p>	<p>80</p> <p>70</p> <p>60</p> <p>50</p> <p>40</p> <p>30</p> <p>20</p> <p>10</p>	

Figura 17 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

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

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

**Figura 18 Valori della costante mi per diversi tipi di roccia**

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

<p>Criterio di rottura empirico</p> $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{170 \sigma_{u(r)} \sigma_3 + 80^2 \sigma_{u(r)}^2}$ <p><math>\sigma_1</math> = tensione efficace principale massima  <math>\sigma_3</math> = tensione efficace principale minima  <math>\sigma_{u(r)}</math> = resistenza a compressione monoassiale  m ed s: costanti empiriche</p>	COSTANTI DEL MATERIALE: m, s	<p>ROCCIE CARBONATICHE CON CLIVAGGIO CRISTALLINO BEN SVILUPPATO</p> <p>Dolomite, calcare e marmo.</p>	<p>ROCCIE ARGILLOSE LITIFICATE</p> <p>Argillite, siltite, siltiti argillose con clivaggio ben marcato.</p>	<p>ROCCIE ARENACEE CON ELEVATA CRISTALLIZZAZIONE E LIMITATO SVILUPPO DI CLIVAGGIO PER CRISTALLIZZAZIONE</p> <p>Arenaria e quarzite</p>	<p>ROCCIE CRISTALLINE IGNEE E GRANA FINE</p> <p>Andesite, dolerite, diabase e norite</p>	<p>ROCCIE IGNEE A GRANA GROSSOLANA E ROCCIE CRISTALLINE METAMORFICHE</p> <p>Amfibolite, gabbro, gneiss, norite, quarzo-diorite</p>
<p>CAMPIONI DI ROCCIA INTATTA</p> <p>Campioni di laboratorio senza discontinuità (matrice rocciosa)</p> <p>Indice CSIR: RMR = 100 Indice NGI: Q = 500</p>	<p>m</p> <p>s</p>	<p>7.00</p> <p>1.00</p>	<p>10.00</p> <p>1.00</p>	<p>15.00</p> <p>1.00</p>	<p>17.00</p> <p>1.00</p>	<p>25.00</p> <p>1.00</p>
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI OTTIMA QUALITÀ</p> <p>Ammasso roccioso indisturbato con giunti non alterati di spaziatura compresa fra 1 e 3 m</p> <p>Indice CSIR: RMR = 85 Indice NGI: Q = 100</p>	<p>m</p> <p>s</p>	<p>2.40</p> <p>0.082</p>	<p>3.43</p> <p>0.082</p>	<p>5.14</p> <p>0.082</p>	<p>5.82</p> <p>0.082</p>	<p>8.56</p> <p>0.082</p>
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI BUONA QUALITÀ</p> <p>Roccia sana o leggermente alterata, leggermente distur- bato con giunti di spaziatura compresa fra 1 e 3 m.</p> <p>Indice CSIR: RMR = 65 Indice NGI: Q = 10</p>	<p>m</p> <p>s</p>	<p>0.575</p> <p>0.00293</p>	<p>0.821</p> <p>0.00293</p>	<p>1.231</p> <p>0.00293</p>	<p>1.395</p> <p>0.00293</p>	<p>2.052</p> <p>0.00293</p>
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI DISCRETA QUALITÀ</p> <p>Numerose famiglie di giunti moderatamente alterati, con spaziature comprese fra 0.3 e 1 m.</p> <p>Indice CSIR: RMR = 44 Indice NGI: Q = 1</p>	<p>m</p> <p>s</p>	<p>0.128</p> <p>0.00009</p>	<p>0.183</p> <p>0.00009</p>	<p>0.275</p> <p>0.00009</p>	<p>0.311</p> <p>0.00009</p>	<p>0.458</p> <p>0.00009</p>
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI QUALITÀ SCADENTE</p> <p>Numerosi giunti alterati con spaziatura compresa fra 30 e 500 mm, alcuni con riempimento. Detrito di roccia pul- ta compattata.</p> <p>Indice CSIR: RMR = 23 Indice NGI: Q = 0.1</p>	<p>m</p> <p>s</p>	<p>0.029</p> <p>0.000003</p>	<p>0.041</p> <p>0.000003</p>	<p>0.061</p> <p>0.000003</p>	<p>0.069</p> <p>0.000003</p>	<p>0.102</p> <p>0.000003</p>
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI QUALITÀ MOLTO SCADENTE</p> <p>Numerosi giunti molto alterati con spaziatura inferiore a 50 mm e con riempimento. Detrito di roccia con mate- riale fine.</p> <p>Indice CSIR: RMR = 3 Indice NGI: Q = 0.01</p>	<p>m</p> <p>s</p>	<p>0.007</p> <p>0.0000001</p>	<p>0.010</p> <p>0.0000001</p>	<p>0.015</p> <p>0.0000001</p>	<p>0.017</p> <p>0.0000001</p>	<p>0.025</p> <p>0.0000001</p>

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

Figura 19 Correlazione fra valori di mi, s, indice RMR, ed il tipo di roccia.

# "NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE

## Relazione Geologica

L'analisi delle caratteristiche geomeccaniche in sito degli ammassi rocciosi interessati dal progetto e l'applicazione del metodo di Hoek-Brown per la definizione dei parametri geotecnici del substrato roccioso ha portato alla classificazione delle principali litologie che caratterizzano le formazioni presenti.

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

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

*Si tratta di valori stimati in base a indagini indirette e a osservazioni su campo, pertanto da confermare puntualmente in fase di progettazione esecutiva.*

### Formazione dei Basalti delle Giare

Standard ISRM = R5 Un campione richiede molti colpi di martello geologico per essere fratturato

Instabilità= scivolamenti planari e a cuneo, per crollo

Ammasso roccioso= da poco a fratturato

Struttura= massiva

Alterazione= da poco a debolmente alterata

Pareti – poco alterate

Riempimento – sciolto

Roccia – da asciutta a umida

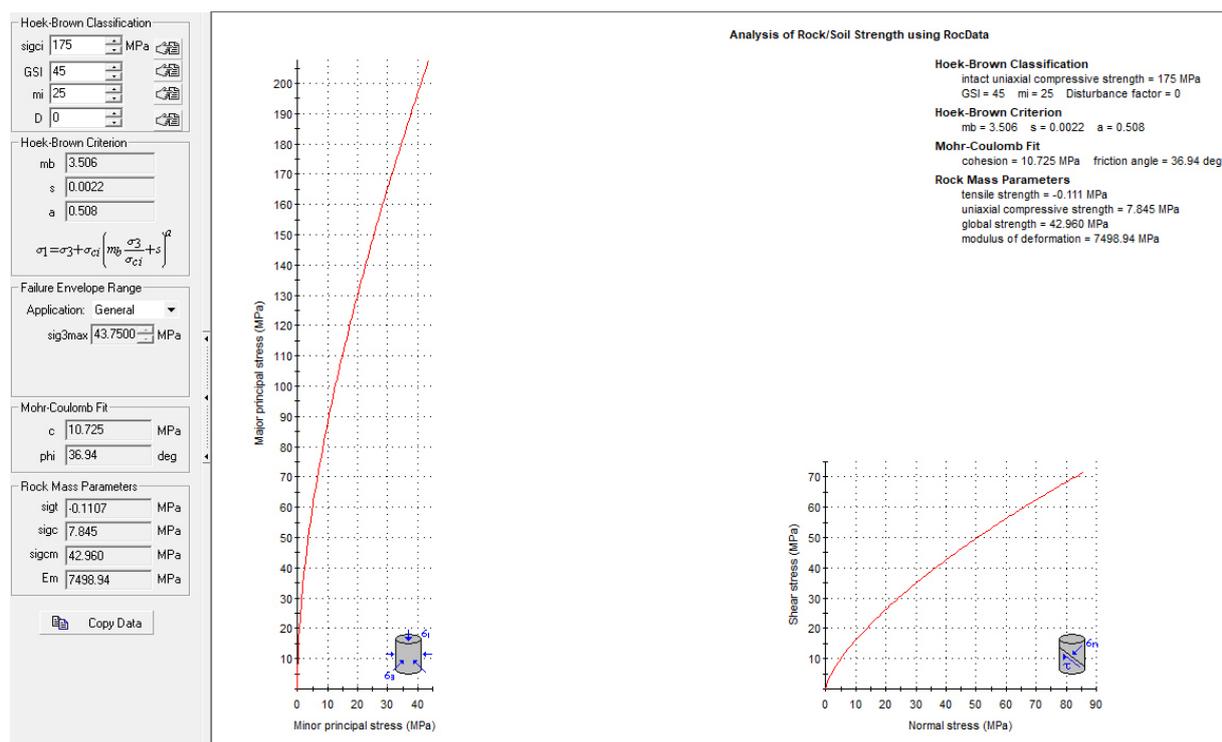


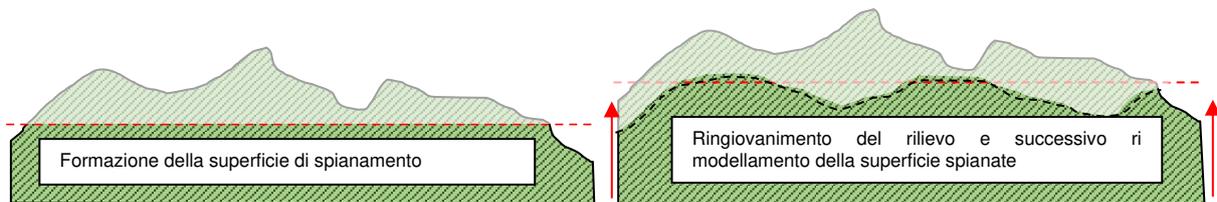
Figura 20 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti per la formazione dei Basalti delle Giare

## 9 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

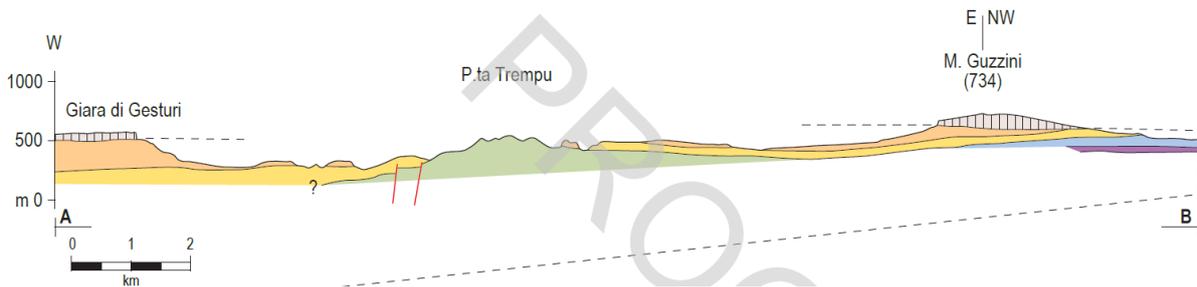
La forma prevalentemente pianeggiante di alcuni rilievi presenti nei pressi dell'area di studio sulle litologie plioceniche a nord e paleozoiche a sud est è il risultato della graduale demolizione del rilievo ad opera degli agenti erosivi, avvenuta in diverse fasi temporali, che ha portato alla formazione di una estesa superficie strutturale nota con il nome di "peneplano ercinico" sulle litologie paleozoiche.

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

Questo ha innescato una nuova azione geomorfogenetica ad opera degli agenti atmosferici (acqua, vento in primis) che hanno rimodellato l'altopiano così come lo conosciamo, ovvero solcato da profonde incisioni vallive che riprendono le linee di fratturazione tettoniche, che isolano il settore montano distinguendolo nettamente dalle aree pianeggianti circostanti.



**Figura 21 Schema dell'evoluzione geomorfologica del complesso paleozoico (non in scala)**



**Figura 22 sezione geologica dell'area vasta. vedasi l'evidenza della superficie di spianamento base d'appoggio del successivo espandimento lavico (Progetto CARG)**

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

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

### 9.1 LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI DELL'AREA DI STUDIO

La geomorfologia dell'area vasta è caratterizzata dalla presenza di una estesa superficie di spianamento che è tuttora ben preservata al di sotto dei basalti delle Giare. Essa taglia indistintamente tutte le formazioni pre-basaltiche giungendo ad interessare il basamento. Questa morfologia che interessava larga parte della Sardegna meridionale,

# "NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE

## Relazione Geologica

---

costituisce la base di partenza alla successiva evoluzione dell'area. Rappresenta la testimonianza di un'importante fase erosiva, verificatesi al livello del mare e successivamente sollevata da movimenti tettonici.

La messa in posto dei plateaux basaltici su questa superficie e il successivo sviluppo di un reticolo idrografico spesso a controllo tettonico hanno determinato la morfologia attuale dell'area vasta con rilievi tabulari sub-orizzontali spesso isolati come testimoni di un antico espandimento lavico che interessava diverse centinaia di kmq.

I tratti geomorfologici del settore sud est di studio sono dati da estesi rilievi collinari del basamento paleozoico, incisi dai corsi d'acqua principali e dai loro affluenti. I corsi d'acqua incidono il basamento paleozoico, formando valli con versanti poco acclivi. Il basamento paleozoico che affiora nell'area di studio appare inciso da un reticolo idrografico impostato sui principali lineamenti strutturali, tale aspetto è fortemente connesso con l'evoluzione tettonica dell'intero settore e in particolar modo con l'evoluzione oligo-miocenica e plio-quadernaria.

Le superfici morfologiche principali sono rappresentate da modesti rilievi sub arrotondati e dai resti di un altipiano profondamente disseccato dai processi erosivi lineari. L'originale superficie di spianamento è conservata solo per alcuni tratti mentre nella maggior parte dell'area è riconoscibile solo da rilievi di uguale altezza. I rilievi principali hanno altezze intorno ai 450-500 metri (Genna Ruina 457 m, Monte Piddu 494 m, Bruncu Crabili 475 m, Serra S'Astula 506m) e il Monte Guzzini (734m) ; lo stesso lungo il perimetro termina con orli di scarpata subverticali che tendono ad arretrare per fenomeni franosi di crollo-ribaltamento.

Il reticolo idrografico dell'area di studio mostra valli quasi sempre poco incassate, con prevalente andamento N-S. Alcuni corsi d'acqua presentano un caratteristico andamento a meandri ereditati nel basamento paleozoico per la sovrapposizione a seguito dell'asportazione delle coperture sedimentarie terziarie o, in qualche caso, influenzati dalla litologia. I versanti vallivi modellati negli scisti paleozoici sono localmente asimmetrici.

E' presente un'area caratterizzata da numerosi picchi e creste rocciose costituiti dai litotipi più resistenti del basamento paleozoico (Monte Santa Vittoria Fm.), in quest'area sono presenti nelle parti più impervie anche falde di detrito e canali con scariche di detrito.

Laddove invece le litologie sono più tenere e nei depositi quaternari si osservano morfologie erosive come superfici con solchi di ruscellamento e di dilavamento concentrato. La terminazione del cavidotto e la relativa sottostazione a est del parco poggiano ancora sul tavolato basaltico ad una quota di circa 680mslm



**Figura 23** Morfologia del paesaggio paleozoico nei rami dell'area di Studio.

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

---



**Figura 24 Particolare del tableau basaltico e sue cornici (vista da turbina NIR14)**



**Figura 25 Particolare del tableau basaltico a NW . Monte Guzzini e C.ru Casas (dicco)**

## **9.2 DEFINIZIONE DELL'AREA GEOMORFOLOGICAMENTE SIGNIFICATIVA**

La predisposizione naturale di un territorio a fenomeni di instabilità legata alle dinamiche geomorfologiche deriva in generale dall'interazione di diversi fattori come natura geologica dei terreni, loro assetto sia deposizionale che geostrutturale, circolazione delle acque superficiali e sotterranee con la morfologia, cioè la geometria del territorio. L'area oggetto di intervento, in base delle caratteristiche suddette non presenta allo stato attuale evidenze di dissesto di natura geologico-geomorfologica in atto, mentre, potenziali fenomeni di dissesto potrebbero presentarsi con la naturale evoluzione del pendio.

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

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

---

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

**Legenda**

**Geomorfolinee**

-  Alveo artificiale
-  Alveo con recente tendenza all'approfondimento
-  Antica direzione di scorrimento
-  Canale di esondazione
-  Corso fluviale estinto
-  Corso fluviale estinto incerto
-  Cresta
-  Orlo di scarpata di erosione fluviale o di terrazzo fra 5 e 10 metri
-  Orlo di scarpata di erosione fluviale o di terrazzo inferiore a 5 metri
-  Orlo di scarpata di erosione fluviale o di terrazzo superiore ai 10 metri
-  Scarpata di erosione
-  Solco da ruscellamento concentrato
-  Superficie degradata da disboscamento o decespugliamento
-  Vallecchia a V
-  Vallecchia a conca
-  Vallecchia piatta

**Faglia**

-  Faglia Certa
-  Faglia Diretta Certa
-  Faglia Diretta Presunta
-  Faglia Inversa Certa
-  Faglia Inversa Presunta
-  Faglia Presunta
-  Faglia Trascorrente Destra Certa
-  Faglia Trascorrente Destra Presunta
-  Faglia Trascorrente Sinistra Certa
-  Faglia Trascorrente Sinistra Presunta
-  Sovrascorrimento Principale Certo
-  Sovrascorrimento Principale Presunto
-  Sovrascorrimento Secondario Certo
-  Sovrascorrimento Secondario Presunto

**Points**

**SymbolID**

-  0
-  1
-  01 WTG
-  00\_Layout\_con\_tracciali\_2021-04-20
-  02 Area di sorvolo
-  03 Cavidotto
-  04 Strade linee
-  05 Strade poligoni
-  06 Plinto
-  07 Piazzole
-  08 Sottostazione

**Depositi quaternari dell'area continentale**

-  Coltri eluvio-colluviali. Detriti immersi in matrice fine, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti, arricchiti in frazione organica. OLOCENE
-  Depositi alluvionali terrazzati. Ghiaie con subordinate sabbie. OLOCENE
-  Depositi alluvionali terrazzati. Sabbie con subordinati limi ed argille. OLOCENE
-  Depositi alluvionali. Ghiaie da grossolane a medie. OLOCENE
-  Depositi alluvionali. Sabbie con subordinati limi e argille. OLOCENE
-  Depositi antropici. Materiali di riporto e aree bonificate. OLOCENE
-  Depositi di frana. Corpi di frana antichi. OLOCENE
-  Depositi di versante. Detriti con clasti angolosi, talora parzialmente cementati. OLOCENE
-  Litofacies nel Subintema di Portoscuso (SINTEMA DI PORTOVESME). Ghiaie alluvionali terrazzate da medie a grossolane, con subordinate sabbie. PLEISTOCENE SUP.

**Litologie del substrato**

-  Rocce prevalentemente calcaree
-  Rocce rudittiche (ghiaie e conglomerati)
-  Rocce effusive e vulcanoclastiche
-  Rocce prevalentemente arenitiche (arenarie e sabbie)
-  Rocce metamorfiche scistose

**Figura 26 Legenda Carta Geomorfologica**

## **10 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO**

Secondo la classificazione dei bacini sardi riportata nel Piano di Assetto Idrogeologico, il comune di Nurri è incluso nel Sub – Bacino n° 7 Flumendosa-Campidano-Cixerri.

Il reticolo idrografico su queste litologie è impostato su un sistema di valli e compluvi, spesso delimitati da scarpate rocciose originatesi a seguito di processi di dilavamento e scalzamento al piede non più attivi nelle condizioni attuali.

### **10.1 SCHEMA DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA SUPERFICIALE E SOTTERRANEA**

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

L'impianto è posizionato su di un altopiano basaltico avente superficie sub orizzontale. Sul tavolato non sono presenti linee di deflusso preferenziale in ragione della sua natura litologica e della connessa fratturazione. Il sistema idrografico che verrà descritto interessa pertanto l'area vasta.

A parte il Flumendosa, che scorre a oriente dell'area di interesse, sono presenti alcuni corsi d'acqua che costeggiano l'area di studio.

Tra questi, il Riu Carrulo che scorre con direzione E-W verso il Lago Flumendosa., che scorrono con direzione circa NW-SE, e più a sud si riversano nel Lago Mulargia.

Il Riu Mulargia scorre nella parte orientale dell'area. In esso convergono gli affluenti Riu Gravelloni, e il Riu Orracesus a sud delle medesime. Anche il Riu Arroglasia confluisce nel Riu Mulargia, e scorre nell'area compresa tra la zona di installazione delle torri e l'abitato di Nurri.

A sud si citano il Riu Bau Nurri che confluisce nel Riu Arroglasia, il Riu Paudi Perda Ollastu mentre ad ovest il Riu Funtana Pardu, il Riu Gutturu Tigu.

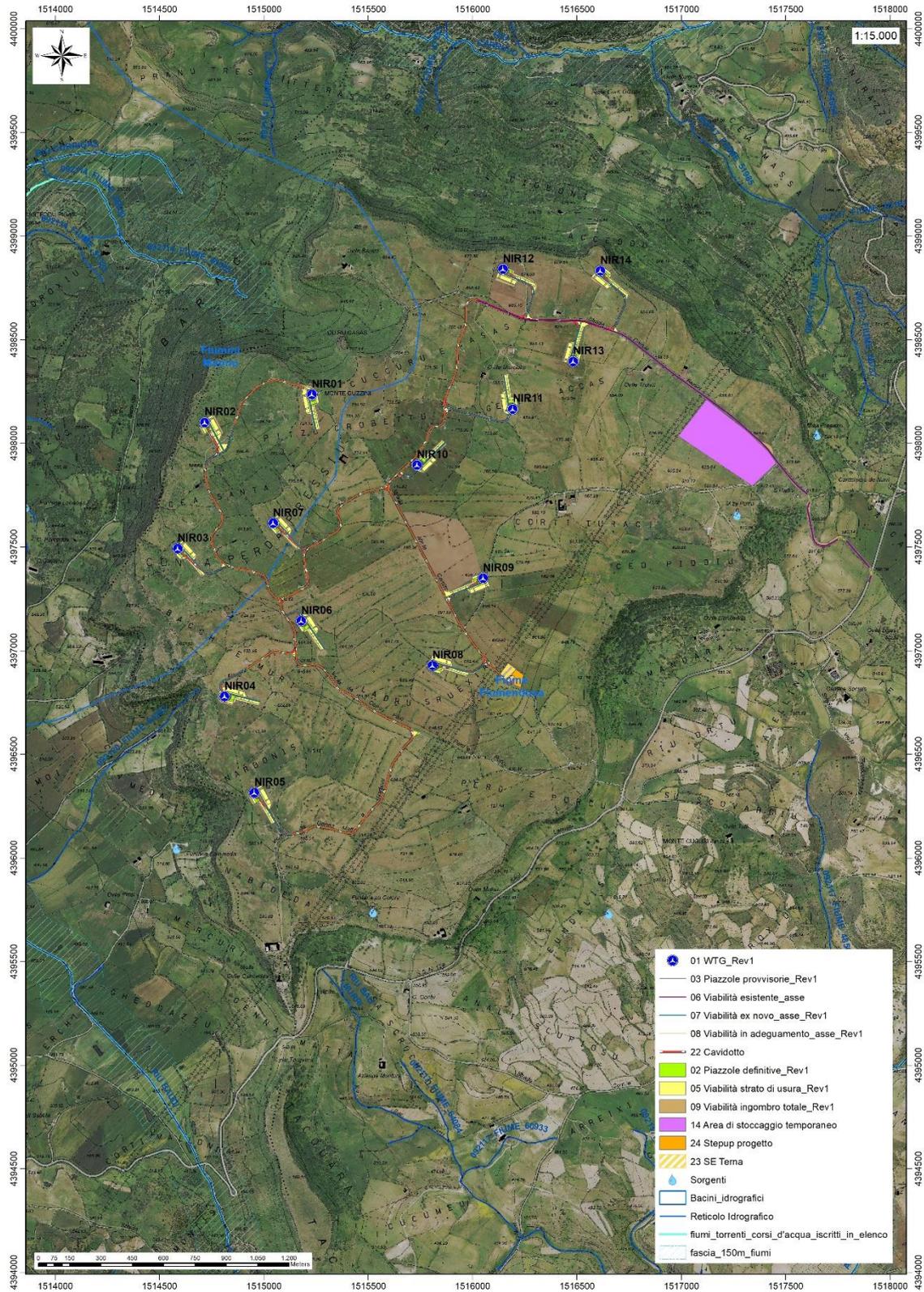
Lo sviluppo del reticolo idrografico è strettamente connesso alle caratteristiche chimico-fisiche delle rocce costituenti il substrato, e al controllo tettonico che si manifesta molto evidente su alcune linee di deflusso, spesso orientate NW-SE come le principali faglie.

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

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

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**



**Figura 27 Reticolo Idrografico**

## **10.2 CARATTERISTICHE E DINAMICHE DELLE ACQUE SOTTERRANEE**

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

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

Il basamento paleozoico è costituito principalmente da litologie impermeabili e di conseguenza nel complesso sfavorevoli alla ritenzione delle acque meteoriche. A causa dell'acclività dei versanti, i suoli mancano quasi del tutto su molti rilievi, questo è particolarmente evidente in corrispondenza del basamento Paleozoico. L'impermeabilità del bacino, l'acclività dei versanti con la concentrazione stagionale delle precipitazioni, possono determinare deflussi unitari fra i maggiori di tutti i corsi d'acqua della Sardegna soprattutto in corrispondenza degli eventi alluvionali, che interessano con una certa cadenza, gran parte della Sardegna orientale. Complessivamente, le forti pendenze dei versanti non sono favorevoli alla ritenzione delle acque meteoriche: la circolazione idrica profonda è di modesta entità e strettamente legata al grado di fratturazione dell'ammasso roccioso.

Le litologie che interessano l'area di progetto presentano una permeabilità secondaria o anche detta per fessurazione, acquisita dalla roccia a seguito della sua formazione.

Tale proprietà può esser limitata dalla presenza di riempimento delle fratture costituito da materiali derivanti dall'alterazione della roccia madre ad alta componente argillosa. Ne consegue che seppur presente una buona rete di fratture anche con importanti spazature, la presenza di tali riempimenti limita fortemente il passaggio delle acque. La parte superficiale dell'ammasso roccioso è generalmente più fratturata e pertanto con permeabilità più elevata rispetto alla parte più profonda meno interessata dalla fratturazione, al contatto tra le due si possono sviluppare delle risorgive che hanno carattere prettamente stagionale legato all'andamento pluviometrico generale. Nel caso di studio le risorgive sono presenti alla base del versante Ovest, su litologie marnoso-calcaree notoriamente più permeabili in contatto con quelle paleozoiche.

La conformazione idrogeologico-strutturale dell'area, in cui prevalgono acquiferi fessurati e frammentati dalla tettonica e dalla geomorfologia articolata in alti e incisioni favorisce la nascita di **emergenze naturali** che per l'area di interesse hanno portate esigue e piuttosto variabili alcune invece presentano deflussi apprezzabili come ad esempio **Funtana Lobadas**, **Canali Bonu**, **Ladumini** con 0,10 l/sec e **Cavalleri** con 0,15 l/sec situate a ovest del tavolato a contatto tra le marne e le intercalazioni calcareo-arenacee.

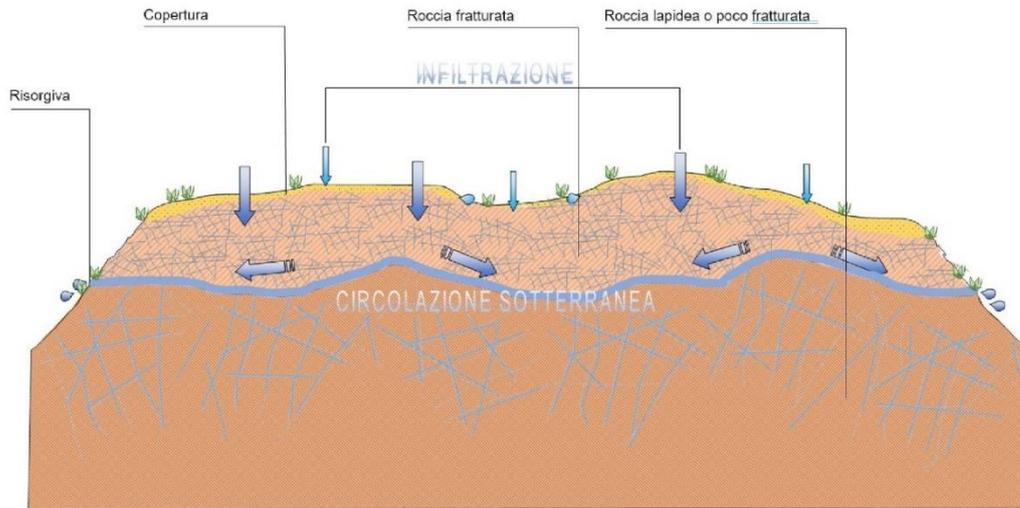
Di seguito viene illustrato in uno schema il processo di infiltrazione accumulo e circolazione legato al regime delle piogge e caratterizzante in analogia misura sia le litologie metamorfiche che quelle intrusive nella porzione sommitale e di interesse alle opere del parco eolico.

Gli afflussi che arrivano sul terreno sotto forma per lo più di piogge, più raramente e poco tempo di neve, in parte scorrono lungo la superficie in genere a lamina d'acqua per poi organizzarsi in deboli rivoli che si concentrano lungo gli impluvi fino a raggiungere il bordo dell'altopiano oltre il quale si riversano lungo valli strette a V ancora in evoluzione geomorfologica.

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

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

Dalla carta della permeabilità dei suoli, resa disponibile dal Geoportale della Regione Autonoma della Sardegna, si evince che l'area di studio presenta nella zona di installazione delle turbine, una permeabilità media per fratturazione.



**Figura 28 Schema esemplificativo, non in scala, dei processi di infiltrazione e deflusso sotterraneo**

Nell'area di studio si possono distinguere:

- litologie con permeabilità alta – medio-alta, come i Basalti delle Giare (BGR), le Dolomie (DOR e MUK), per via della fratturazione o del carsismo;
- litologie con permeabilità medio-bassa, come le formazioni di Nurallao (NLL) e di Genna Selole (GNS), che si presentano mediamente permeabili per porosità, fratturazione, grado di cementazione o per via della presenza di livelli argillosi;
- litologie con permeabilità bassa, come i depositi eluvio-colluviali, i depositi marnoso-arenacei-siltosi delle marne di Gesturi (GST), le vulcaniti della formazione di Aragixi (ARX), i conglomerati della formazione di Ussana (USS) e le rocce del basamento paleozoico (SGA, MSV, ORR, ecc...), la cui permeabilità è influenzata dalla presenza di livelli impermeabili o da scarsa fratturazione.
- Da un punto di vista idrogeologico le formazioni dell'area di studio possono essere divise in tre gruppi principali:
- Basamento Paleozoico. È costituito da rocce massive e scistose semipermeabili per fratturazione (porfiroidi, porfidi, quarziti, metarenarie...), da rocce impermeabili (filladi, metapeliti), e da rocce permeabili (calcarei e calcari marnosi). Complessivamente la permeabilità del basamento metamorfico è scarsa, con Coefficienti di Permeabilità variabili tra 10<sup>-7</sup> e 10<sup>-9</sup>.
- Coperture eoceniche e oligo-mioceniche. Tali coperture sono costituite da litotipi a permeabilità medio-alta dovuta sia alla porosità delle arenarie e dei conglomerati che alla permeabilità per fratturazione e carsismo delle rocce carbonatiche intercalate nelle successioni.
- Depositi quaternari. I depositi quaternari occupano aree molto limitate e raggiungono spessori poco significativi, la permeabilità è di tipo medio-alta per porosità. Le alluvioni terrazzate recenti hanno permeabilità medio-alta e sono di solito sede di una falda freatica di subalveo. I depositi di versante invece essendo in gran parte costituiti da una struttura clasto-sostenuta e scarsa matrice (falde di detrito), presentano una permeabilità molto elevata, in ogni caso i loro spessori esigui non garantiscono una potenza sufficiente per generare acquiferi significativi.

### **10.3 ANALISI DELLA VULNERABILITÀ DEGLI ACQUIFERI**

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

Non sono presenti sorgenti alle quote di realizzazione delle opere che prevedono gli scavi più profondi (fondazioni degli aerogeneratori, piazzole e aree di deposito temporaneo) e la profondità dell'acquifero così come deriva dalle informazioni geologiche è tale che quest'ultimo non venga influenzato dalle opere in possesso e con il normale deflusso delle acque sotterranee. Altresì le opere in progetto non determinano per loro natura produzione di agenti inquinanti che possono riversarsi nella circolazione idrica sotterranea se non per accidentale guasto meccanico

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

che andrà trattato con le opportune misure di salvaguardia dettate dal T.U. sull'Ambiente.

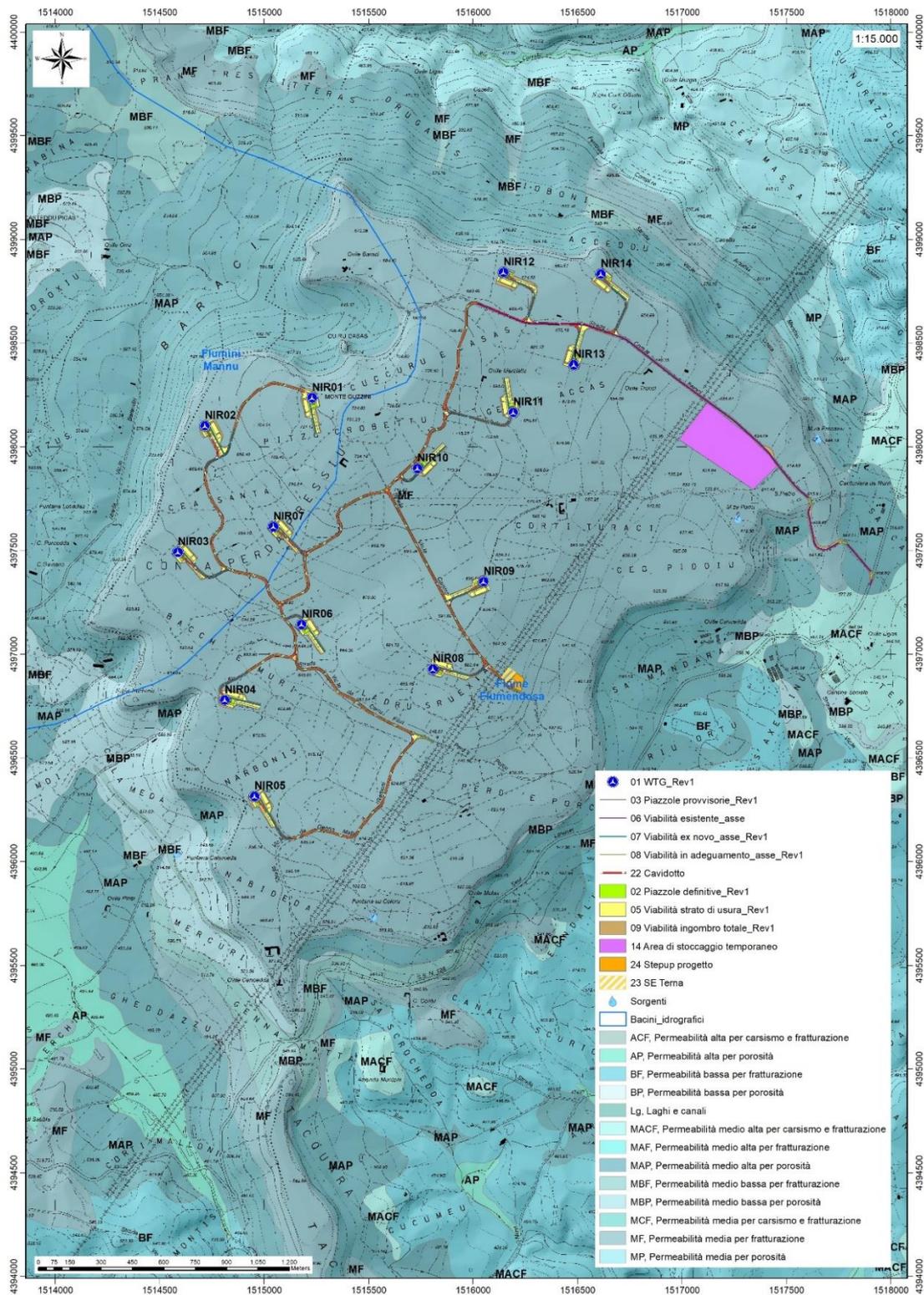


Figura 29 Carta delle Permeabilità dei Substrati e dei Suoli (Fonte RAS)

## 11 INQUADRAMENTO CLIMATICO

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

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

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

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

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

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

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

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

L'andamento climatico del territorio di Nurri e le risorse idriche disponibili sono stati valutati sulla base dei dati forniti dalle stazioni meteorologiche dell'ARPAS presenti nel territorio comunale di Nurri, Escalaplano, Senorbì, Sadali e Gergei, localizzate nel raggio di 17-32 km dal settore in esame.

L'andamento pluviometrico dell'area oggetto di studio (Tab.1) è stato ricavato dai dati pluviometrici relativi all'intervallo 2008-2018 estratti dagli Annali Idrologici dell'ARPAS reperibili dal Geoportale della R.A.S. delle stazioni di Nurri e Escalaplano, così come i dati termometrici, relativi però alle stazioni di Nurri, Senorbì, Sadali e Gergei.

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

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

Periodo	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Totale annuale
2018	29,2	74,6	146,4	81,7	132,4	114,6	0,4	146,2	44,3	139,4	169,2	11,8	1090,2
2017	104,1	92,3	9,8	40,2	0	4,2	1,4	1	1,2	3,8	61,2	88	407,2
2016	0	0	20,6	30,9	37,3	4	1,4	0	66,5	11,1	89,9	158,8	420,4
2015	47,6	77,8	69,4	8	69,4	19,4	63,2	27,2	75,8	123,8	20,4	4,8	606,8
2014	160,3	65,5	97,2	43,4	43	21,6	13,2	0	0,2	17,8	89,6	91,6	643,4
2013	53,6	69	109,8	31	12	2,2	69,2	35,6	33,2	13,6	332,8	79,6	841,6
2012	38,2	69,6	3,6	89,8	76,2	0	0,2	2,4	26,3	78	101,1	51,2	536,6
2011	46,4	127,8	71,6	26,6	66,8	37,6	6,8	0,4	77	13,4	258	95,6	828
2010	158,8	81,2	41,2	78,6	78,4	57,4	3,4	5,2	16,6	79	171,2	116,6	887,6
2009	161	89,6	68,8	122	43	23,6	17	9	122	43,6	48,2	81,2	829
2008	47	15,6	74,4	70,6	58	23	5,2	0	51,4	86,2	154,6	95,8	681,8

Tabella 1 Andamento pluviometrico dell'area vasta (espresso in mm) ricavato dalle stazioni pluviometriche di Nurri e di Escalaplano (per gli anni 2013 e 2015)

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

**11.1 PRECIPITAZIONI**

Nella Tab.2 sono esposti i dati relativi alle precipitazioni nell'intervallo 2008-2018 registrati nella stazione di Nurri e di Escalaplano (per gli anni 2013 e 2015). Viene riportato il valore medio mensile e il totale annuale di precipitazioni (espresso in mm) nei periodi considerati. Per il periodo 2008-2018 si osserva che i valori di precipitazioni presentano valori inferiori nei mesi autunnali e invernali, e superiori per il periodo compreso tra maggio e agosto (Tab.2). Nell'area studiata, la piovosità media annuale è pari a circa 706,6 mm per il periodo compreso tra il 2008 e il 2018.

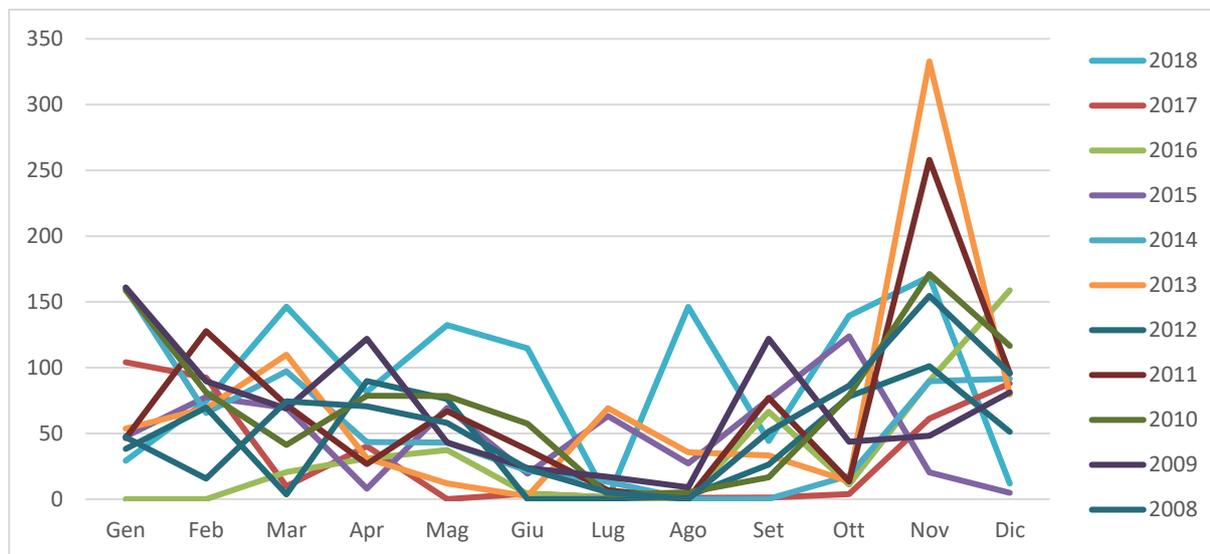


Tabella 2 Andamento della pluviometria mensile e annuale (nell'asse delle ordinate, in mm) per le stazioni di Nurri (e Escalaplano per gli anni 2013 e 2015) nel periodo 2008-2018.

L'andamento pluviometrico dell'area di Nurri nell'arco dell'anno è caratterizzato dal minimo assoluto di piovosità nel periodo estivo e da un massimo in autunno e inverno, per cui i mesi più secchi sono quelli estivi mentre quelli più piovosi sono quelli invernali (Tab. 2).

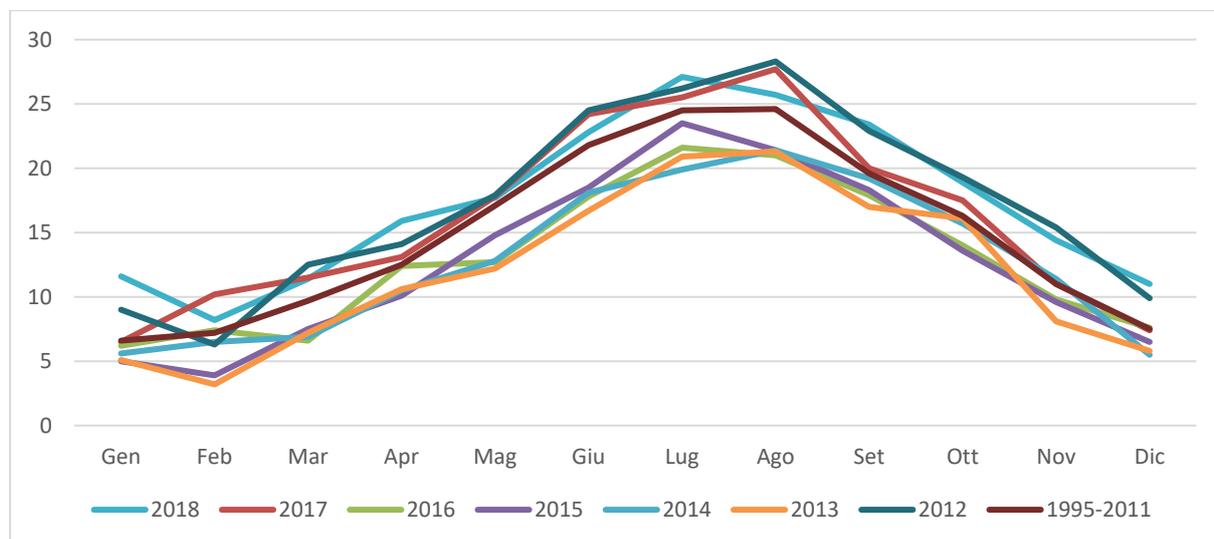
**11.2 TEMPERATURE**

I valori termometrici della stazione meteo di Nurri, ricavati dal Dipartimento Specialistico Regionale Idroclimatico (I.M.C.) dell'ARPAS, sono illustrati nel grafico di Tab. 3 e sono relativi alla stazione di Senorbi per gli anni dal 2012 e 2018, a quella di Sadali per gli anni dal 2013 al 2016, a quella di Gergei per l'anno 2017, e alla stazione di Nurri per l'intervallo 1995-2011. La temperatura media annua, calcolata con i valori medi mensili per il periodo 1995-2018, è di circa 14,5 °C. Il mese più freddo è Febbraio con una media di circa 6,6°C, mentre le temperature più elevate si riscontrano e Luglio e Agosto con circa 23,6 °C.

Periodo	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
<b>2018</b>	11,6	8,2	11,4	15,9	17,7	22,8	27,1	25,7	23,4	18,9	14,4	11
<b>2017</b>	6,5	10,2	11,5	13,1	17,8	24,2	25,5	27,7	20	17,5	11	7,4
<b>2016</b>	6,2	7,4	6,6	12,4	12,7	17,8	21,6	21	17,9	14	9,8	7,6
<b>2015</b>	5	3,9	7,5	10,1	14,8	18,5	23,5	21,4	18,3	13,6	9,6	6,5
<b>2014</b>	5,6	6,5	6,9	10,5	12,8	18,1	19,9	21,4	19,2	15,7	11,4	5,5
<b>2013</b>	5,1	3,2	7,2	10,6	12,2	16,7	20,9	21,3	17	16,1	8,1	5,8
<b>2012</b>	9	6,3	12,5	14,1	17,9	24,5	26,2	28,3	22,9	19,3	15,4	9,9
<b>1995-2011</b>	6,6	7,2	9,7	12,5	17,1	21,8	24,5	24,6	19,6	16,3	11	7,5

Tabella 3 Temperature mensili (in °C) registrate nella stazione di Senorbi per gli anni dal 2018 e 2012, in quella di Gergei per il 2017, Sadali per gli anni 2016-2013, e presso la stazione di Nurri per il periodo 1995-2011.

Nel grafico sottostante è illustrato l'andamento delle temperature medie mensili per il periodo 1995-2011 registrate nella stazione di Nurri, Senorbi per gli anni 2012 e 2018, Gergei per l'anno 2017, e Sadali per gli anni 2013 - 2016.



**Figura 30 Temperature mensili (in °C, nell'asse delle ordinate) registrata nella stazione di Senorbi (anni 2012 e 2018), Gergei (2017), Sadali (anni 2013-2016), e nella stazione di Nurri (1995-2011).**

### 11.3 STIMA DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE

L' evapotraspirazione è uno dei parametri più significativi nell'ambito di un bilancio idrologico e rappresenta la perdita di una parte delle acque di precipitazione, per evaporazione dal suolo e per traspirazione della vegetazione. Viene calcolata tenendo conto della temperatura e delle precipitazioni, e viene influenzata dalla nuvolosità, dall'umidità relativa e dalla ventosità.

Nelle Figure 31 e 32 sono illustrati i bilanci idro-meteorologici mensili rispettivamente per il periodo ottobre 2020 – marzo 2021 e aprile 2021 – settembre 2021 per la Sardegna, ricavati dal Dipartimento Meteorologico dell'ArpaS. Il bilancio idro-meteorologico si esprime come differenza tra il cumulato di precipitazione ed il cumulato dell'evapotraspirazione di riferimento (ET0) stimata con il metodo Hargreaves-Samani.

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORI ESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

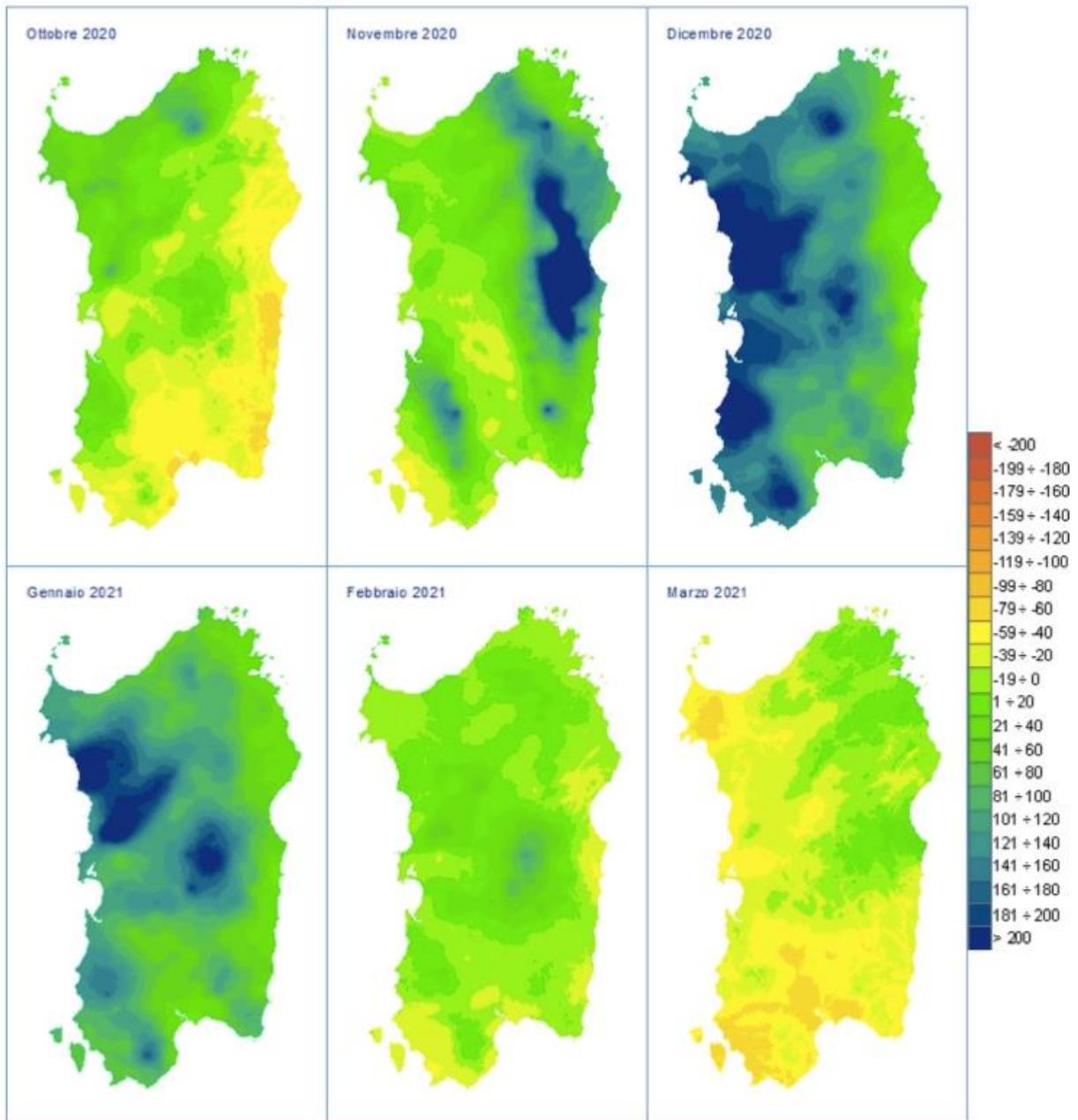


Figura 31 Bilancio idro-meteorologico per il periodo ottobre 2020-marzo 2021 (espressa in mm).

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

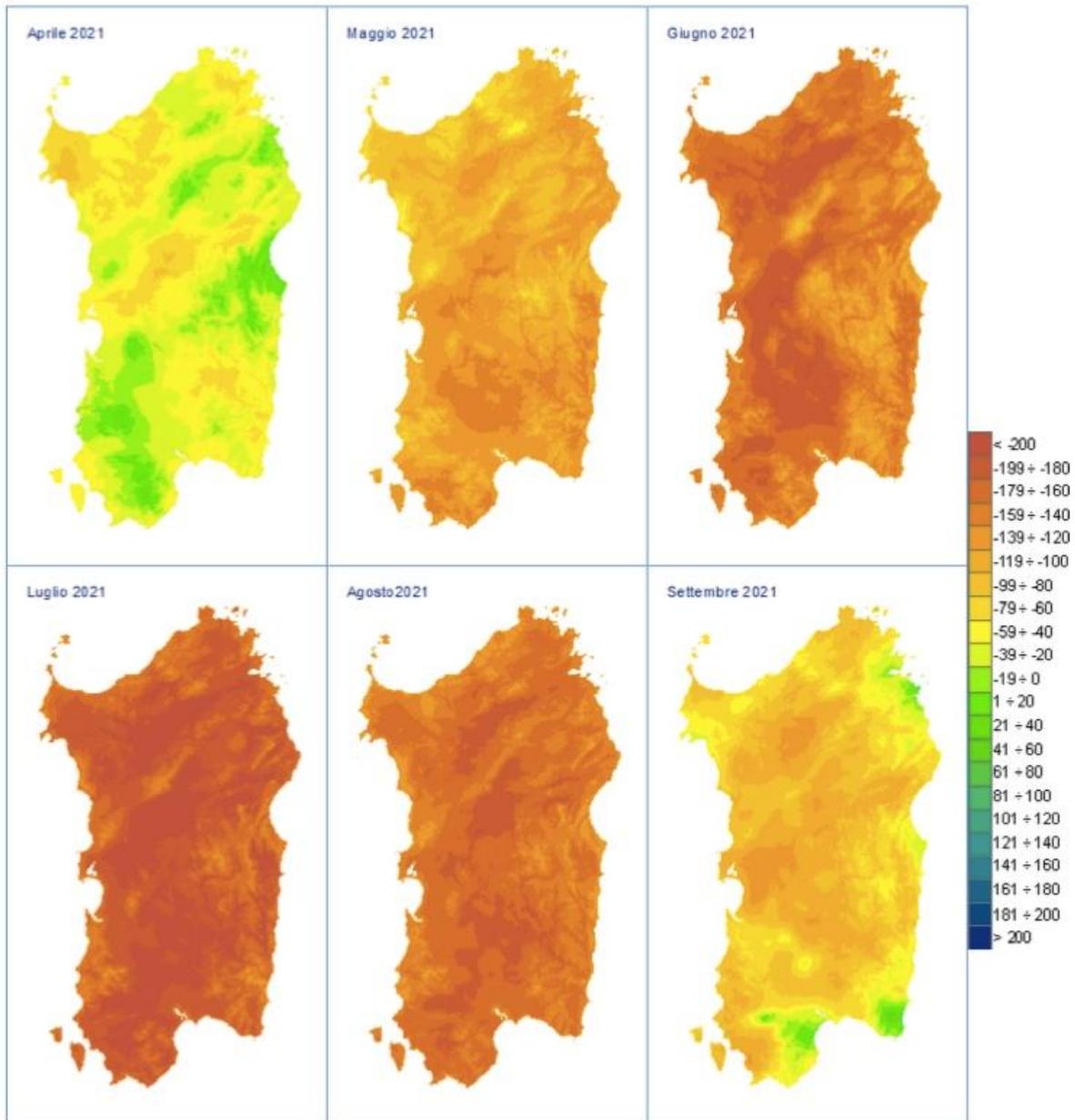


Figura 32 Bilancio idro-meteorologico per il periodo aprile 2021-settembre 2021 (espressa in mm).

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

La nuvolosità influenza il clima in quanto da essa dipende l'irraggiamento solare. Nella tabella 6, sono rappresentati il numero medio mensile e annuo dei giorni in condizioni di sereno (nuvolosità < 2/8), nuvoloso (2/8 < nuvolosità < 6/8) e coperto (nuvolosità > 6/8), riferiti al periodo 1922 – 1992 per la stazione di Cagliari-Elmas.

**Tabella 4 Media mensile e annuale dei giorni di sereno, nuvoloso e coperto per il periodo 1922-1992, relativa alla stazione di Cagliari – Elmas**

Nuvolosità	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Media annuale
<b>sereno</b>	6	5	6	7	8	12	22	18	10	6	6	7	113
<b>nuvoloso</b>	14	13	15	14	14	14	7	10	14	17	17	15	164
<b>coperto</b>	11	10	10	9	9	4	2	3	6	7	7	9	88

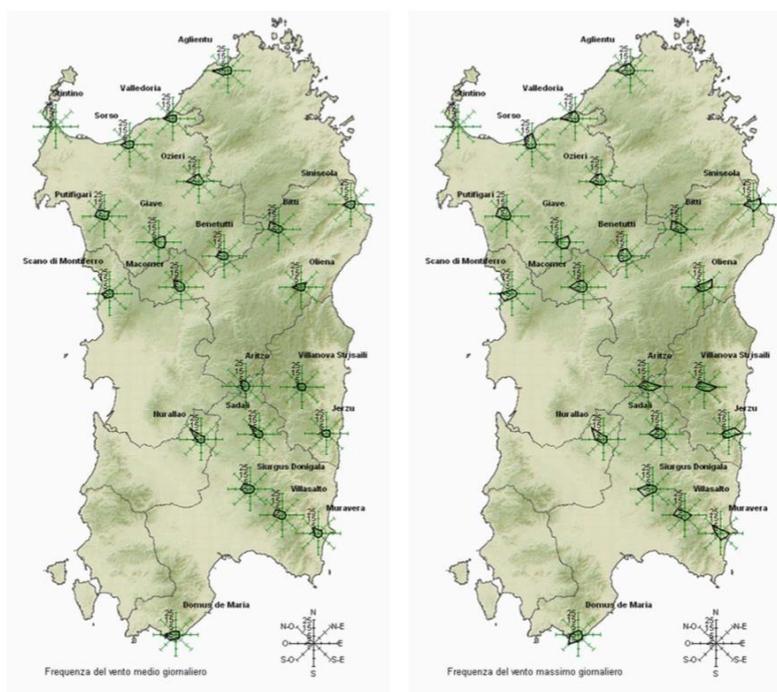
Dall'esame dei valori della tabella si evince che il massimo di giorni sereni si ha in Luglio e Agosto mentre il minimo si registra nei mesi tra Ottobre e Aprile. Il valore minimo di giornate nuvolose si ha nel mese di Luglio e il massimo si osserva nei mesi di Ottobre e Novembre. Le giornate in condizioni di coperto raggiungono il massimo a Gennaio e minimo a Luglio. I dati relativi alla media annua, indicano che si ha circa il 30 % di giornate con tempo sereno, il 25 % di giornate a cielo coperto, e il 45% di giornate nuvolose.

Il clima è influenzato anche dall'andamento del vento al suolo (ventosità), che viene definito analizzandone l'intensità, la direzione e la frequenza.

Il clima è influenzato anche dall'andamento del vento al suolo (ventosità), che viene definito analizzandone l'intensità, la direzione e la frequenza.

Dall'analisi dei dati disponibili dalla Rete Mareografica dell'ISPRA, risulta che i venti provenienti dai quadranti settentrionali sono generalmente in netta dominanza, in particolare quello più frequente proviene da NW.

Dai report annuali emessi dall'ARPAS per l'anno 2017, è nelle stazioni vicine all'area di studio il vento prevalente non ha avuto una direzione realmente dominante, con direzioni prevalenti dai quadranti orientali per le stazioni situate sul settore est della Sardegna e occidentali per le altre. L'intensità prevalente è quella compresa tra 2-6 m/s (debole), con alcuni picchi fino a 27 m/s (moderato-forte), o di burrasca.

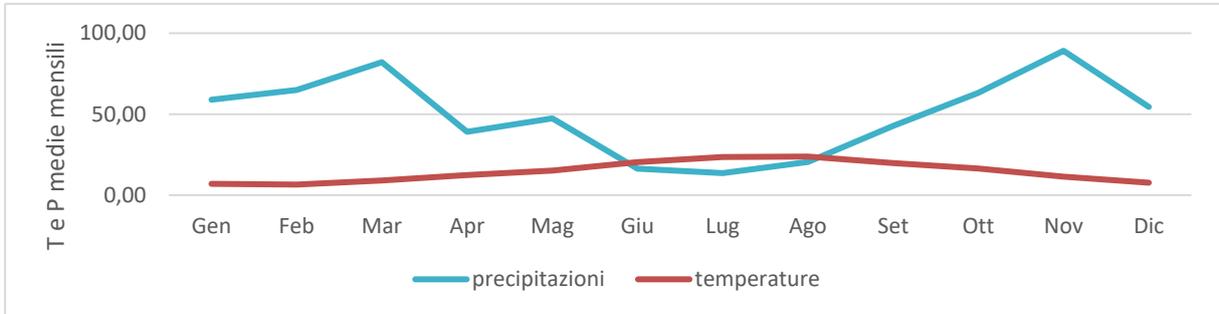


**Figura 33 Ventosità media giornaliera e frequenza del vento massimo giornaliero relativa all'anno 2017 (mese giugno).**

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

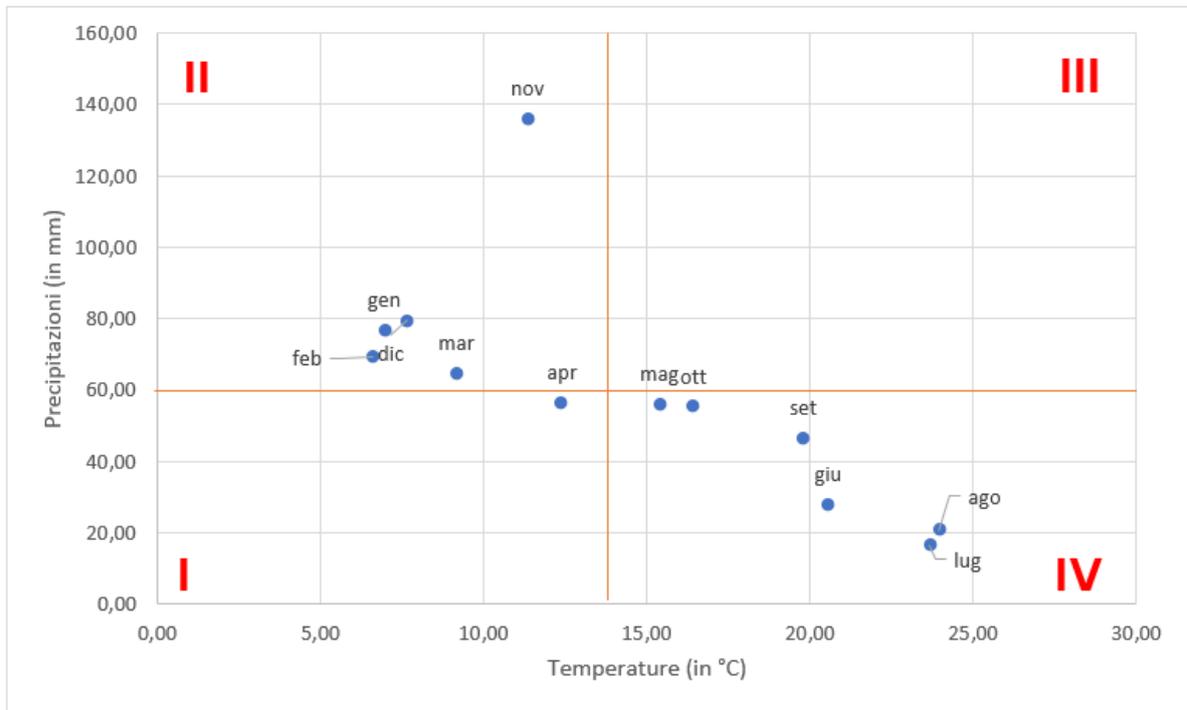
**Relazione Geologica**

L'ultima variabile significativa che condiziona l'evapotraspirazione è l'umidità relativa, ossia il rapporto tra la quantità di vapore d'acqua contenuta in una massa d'aria rispetto e quella massima potenziale in relazione alla sua temperatura. Dalla tabella soprastante (Fig.35) che riporta i valori dell'umidità relativa media mensile ed annuale della stazione di Cagliari-Elmas per l'anno 1975, si nota che tale valore raggiunge valori più elevati nei mesi invernali (Dicembre-Gennaio) e valori minimi nel mese di Luglio.



**Figura 34 Diagramma ombrotermico (Walter e Lieth) per il settore di Buddusò (dati pluviometrici e termici relativi all'anno 2021).**

Il diagramma ombrotermico elaborato per il settore di Nurri (Fig. 37), a partire dai dati sulla temperatura media e precipitazioni medie, permette di comparare contemporaneamente i regimi medi mensili termici e pluviometrici nell'arco del periodo considerato.



**Figura 35 Climogramma relativo alla regione di Nurri**

# "NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE

## Relazione Geologica

---

L'andamento delle curve consente di visualizzare che nei mesi estivi, dove la temperatura media mensile raggiunge valori superiori ai 22 °C, si hanno i valori di piovosità inferiori, mentre nei mesi invernali, dove le temperature medie mensili si attestano ai 7°C, si raggiungono le piovosità più elevate.

Il clima è caratterizzato da un periodo caldo con scarsa piovosità e uno più freddo e piovoso. Nel grafico di Tab.10 si nota che la curva delle precipitazioni giace al di sotto di quella delle temperature nei mesi estivi, che rappresentano il periodo secco in quanto prevale l'evapotraspirazione rispetto agli apporti idrici.

L'analisi delle medie mensili di temperatura e piovosità relative al periodo 2012-2018 permette di classificare il clima dell'area di Nurri come "mediterraneo con estate calda", nel quale la temperatura media annua (14 °C), per quattro mesi (Giugno-Settembre) supera i 22 °C, e le precipitazioni sono superiori ai 650 mm annui.

Dal climogramma (Fig.37) realizzato a partire dai valori medi di precipitazioni e temperature relativi al periodo 2012-2018 per l'area di Nurri, nel quale i quadranti definiscono le diverse tipologie di climi, ossia freddo arido (I), freddo umido (II), caldo umido (III) e caldo arido (IV), è evidente che il settore in studio è caratterizzato da due periodi, uno lungo di caldo arido ed uno limitato freddo umido.

La classificazione fatta sul clima della regione, è confermata anche dall'indice di aridità medio di Demartonne stimato per l'area in oggetto che ricade nel settore da "secco – sub-umido" a "subumido" per il periodo considerato. L'analisi dei parametri meteorologici permette di confermare l'andamento climatico rilevato in quasi tutta la Sardegna, nettamente bistagionale con le stagioni caldo arida e fresca umida che si alternano nel corso dell'anno, intervallate da due brevi stagioni a carattere intermedio.

## **12 INQUADRAMENTO PEDOLOGICO**

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

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

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

- "metamorfiti (scisti, scisti arenacei, argilloscisti, ecc...) del Paleozoico e relativi depositi di versante", associati a suoli dell'unità B2.;
- "calcari, calcari dolomitici del Paleozoico e del Mesozoico e relativi depositi di versante", cui sono associati suoli dell'unità A1;
- "rocce intrusive (graniti, granodioriti, leucograniti, ecc...) del Paleozoico e relativi depositi di versante, cui sono associati suoli dell'unità C1;
- "marne, arenarie e calcari marnosi del Miocene e relativi depositi di versante", cui sono associati suoli dell'unità G1;
- "marne, arenarie e calcari marnosi del Miocene e relativi depositi colluviali", cui sono associati suoli dell'unità G2;
- "marne, arenarie e calcari marnosi del Miocene e relativi depositi colluviali", cui sono associati suoli dell'unità G3;
- "rocce effusive basiche (basalti) del Pliocene superiore e del Pleistocene e relativi depositi di versante e colluviali", cui sono associati suoli dell'unità E2.

L'area di progetto dove verranno installate le turbine ma anche cavidotto e stazione di consegna ricadono nell'unità E2 Profili A-Bw-R, A-R e subordinatamente A-Bt-C e roccia affiorante, da poco profondi a profondi, franco argillosi, permeabili, neutri, saturi.

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

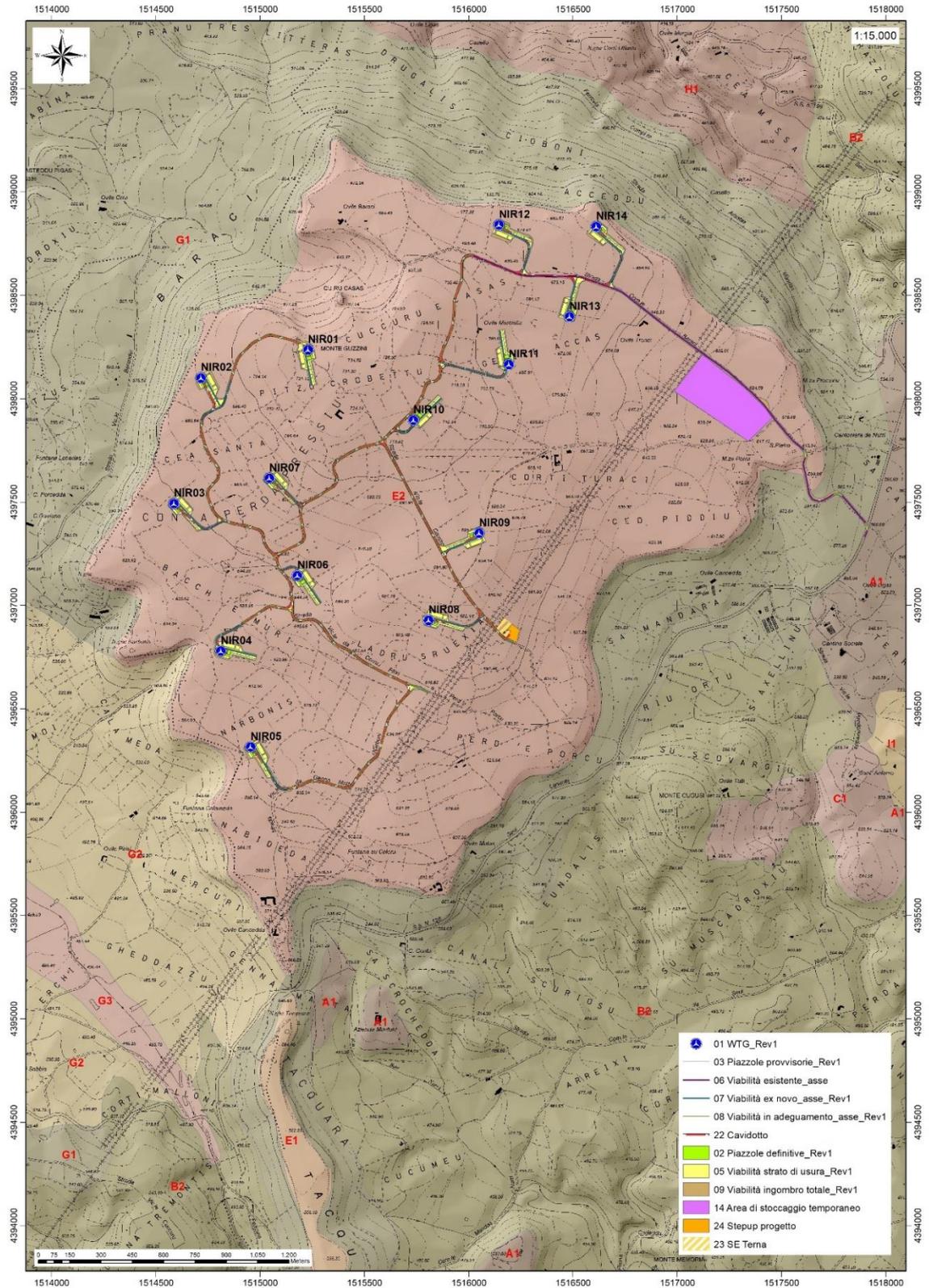


Figura 36 Carta dei Suoli (Fonte RAS)

## **13 USO DEL SUOLO**

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

Intorno al lotto di interesse, nello specifico dell'area di installazione delle turbine, le destinazioni d'uso ricadono in ambiti quali Prati artificiali (2112), Seminativi semplici e colture artificiali a pieno campo (2121), e Seminativi in aree non irrigue (2111).

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

nel livello 2112, classificato come "Prati artificiali", i punti di installazione delle turbine NIR 4, NIR 7, NIR 8, NIR 14 e la sottostazione;

nel livello 2111, classificato come "Seminativi in aree non irrigue" i punti di installazione delle turbine NIR 5, NIR 6, NIR 9, NIR 10, NIR 11, NIR 12, NIR 13.

Nel livello 321, classificato come Aree a pascolo naturale i punti di installazione delle turbine NIR 1, NIR 2, NIR 3.

# "NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE

## Relazione Geologica

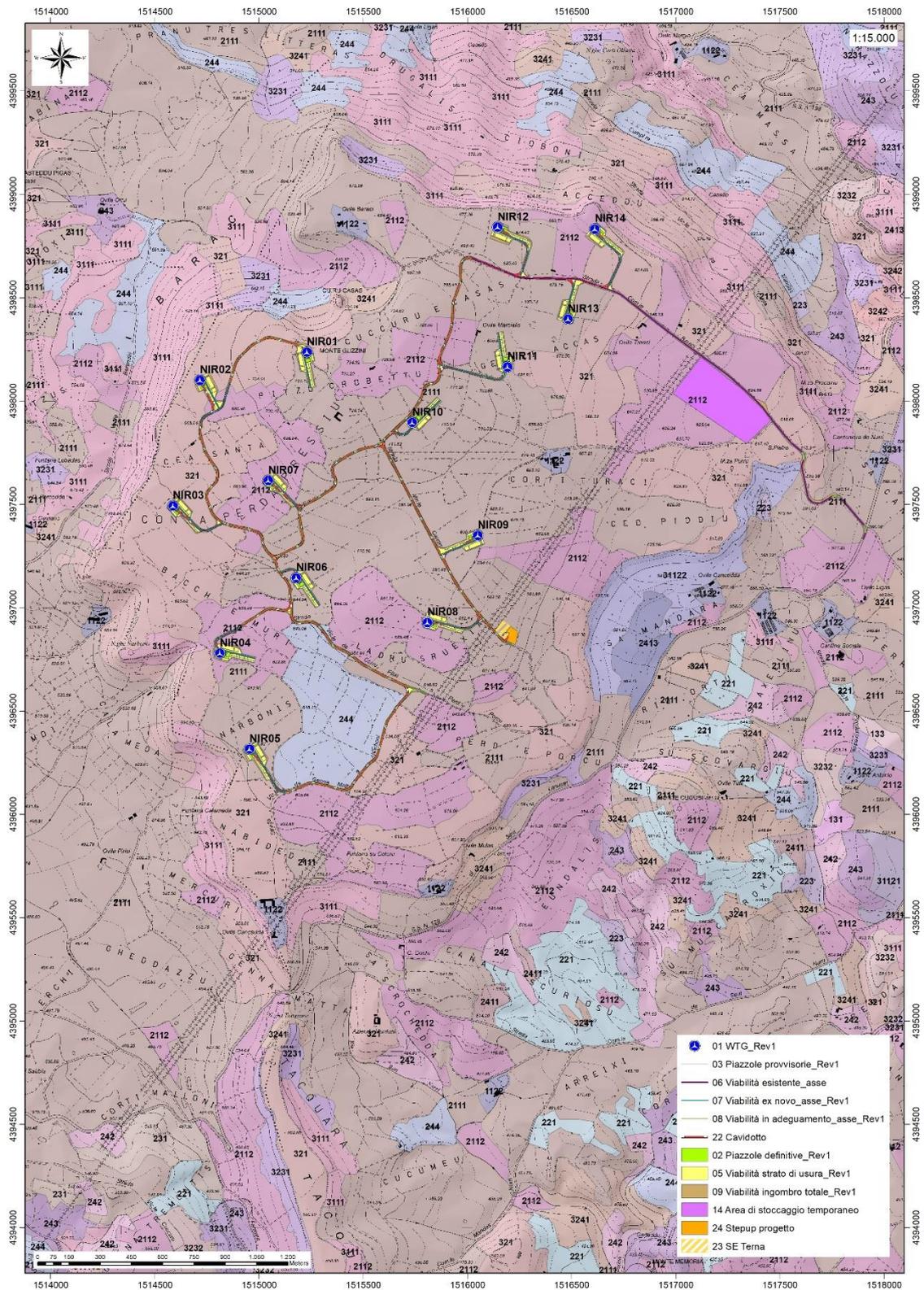


Figura 37 Stralci della Carta dell'Uso del Suolo della Sardegna (2008, Fonte RAS).

## **14 ANALISI DEI VINCOLI GRAVANTI SUI TERRENI**

### **14.1 PIANO STRALCIO D'ASSETTO IDROGEOLOGICO DELLA SARDEGNA**

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

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

Il comune di Nurri non ha ancora redatto lo studio di dettaglio ex art.8 comma 2 delle Norme tecniche di Attuazione del PAI se non per una parte relativa al centro abitato di non interesse all'area di studio, pertanto sono ancora in vigore le perimetrazioni precedentemente approvate.

#### **L'area di progetto non è interessata nelle perimetrazioni di pericolosità geomorfologica del PAI.**

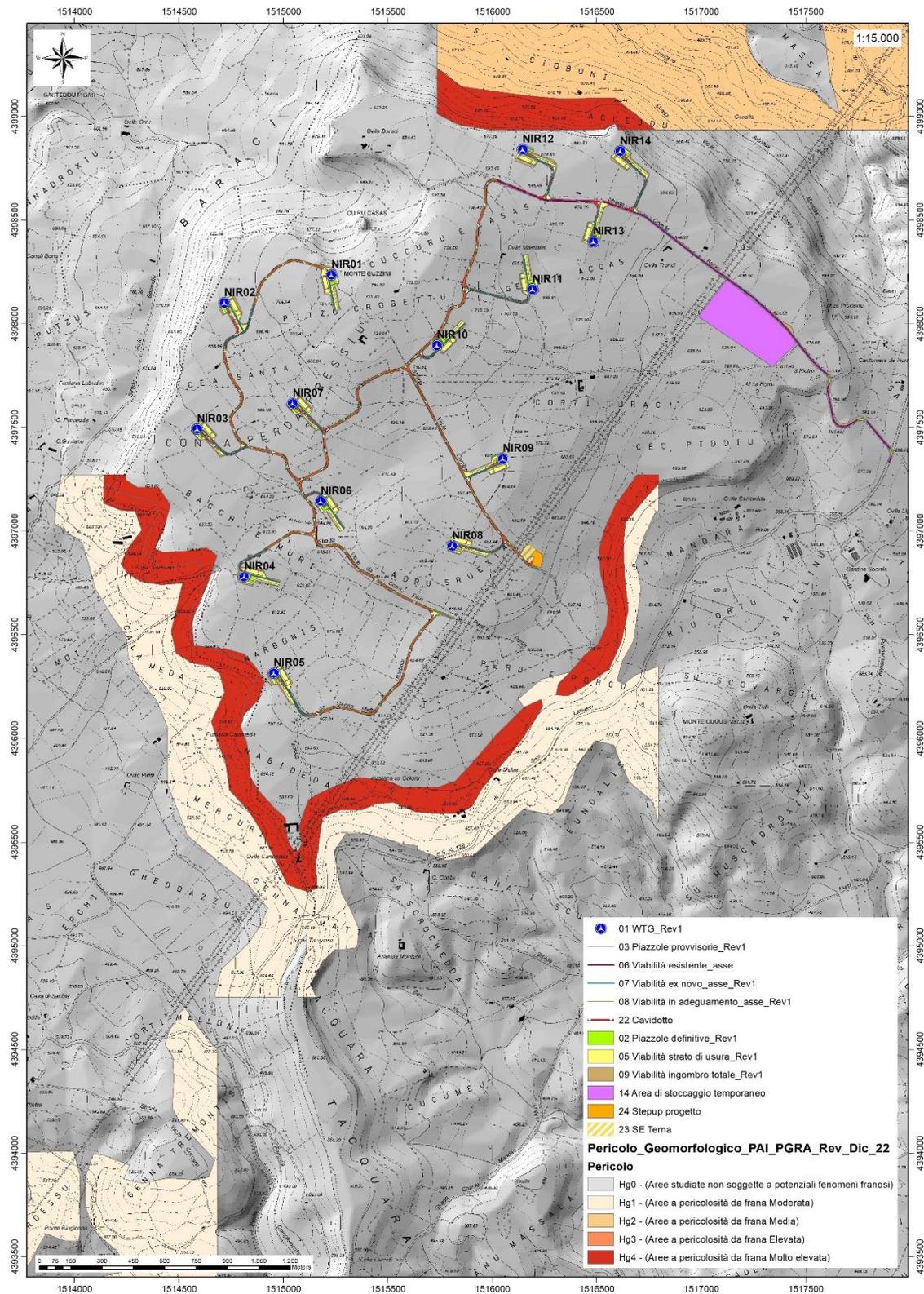
Nello specifico del progetto, le turbine sono state posizionate in aree con pendenze minori o uguali al 15%. Generalmente tutto il complesso rappresentato da turbina, piazzola temporanea e permanente occupano aree subpianeggianti sufficientemente ampie da garantire la non influenza dell'opera con la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

Per quanto concerne la pericolosità idraulica, nella carta tematica del P.A.I. di cui all'aggiornamento 2022 di seguito viene riportato l'involuppo delle aree attualmente vigenti e di quelle proposte in ragione di quanto disposto all'art.23 comma 14. Da tale sovrapposizione **risulta che nel territorio interessato dal progetto non sono presenti aree interferenti con pericolosità idraulica e nello specifico:**

1. Nessuna turbina o sua pertinenza (piazzola temporanea o permanente), tratto di viabilità o di cavidotto ricadono in aree a pericolosità idraulica;

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

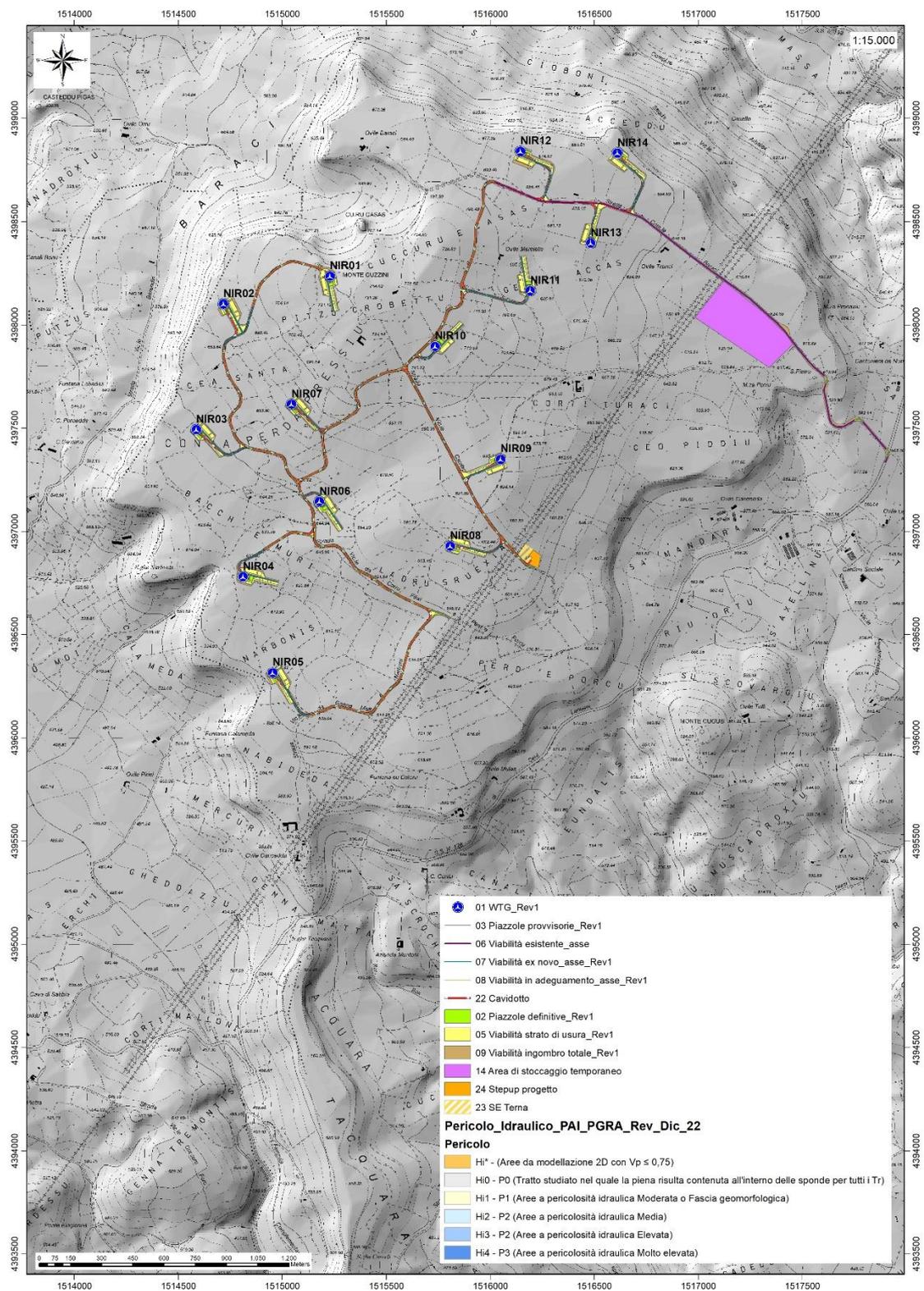
**Relazione Geologica**



**Figura 38 Inquadramento PAI Pericolosità da frana (Fonte RAS)**

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**



**Figura 39 Inquadramento PAI Pericolosità idraulica (Fonte RAS, Comune di Buddusò)**

## **14.2 ART.30 TER NTA PAI**

Il territorio comunale di Nurri non è stato oggetto di uno Studio di dettaglio della pericolosità idraulica così come previsto dall'art.8 comma c delle NTA PAI attualmente in fase di istruttoria. In attesa di tale definizione sono state istituite le fasce di prima salvaguardia secondo il comma 1 dell'art.30ter di seguito riportato.

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

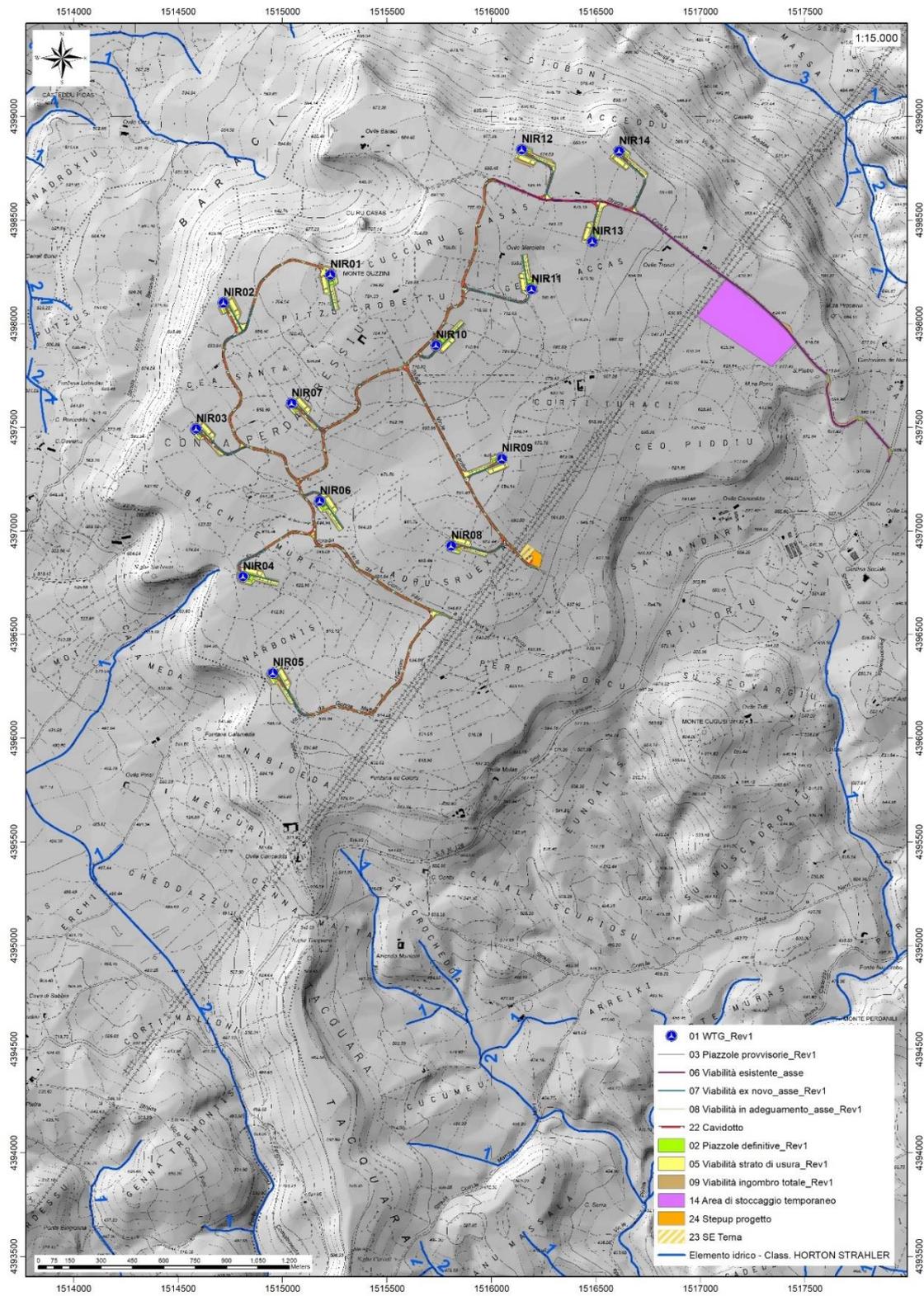
La fascia di rispetto dei corsi d'acqua in base al numero di Stralher equivale a:

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

Nell'area di intervento non sono presenti aste fluviali ascrivibili alle fasce di rispetto sopracitate.

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**



**Figura 40 Reticolo idrografico numerato secondo l'ordine di Strahler**

# "NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORI ESISTENTI E RELATIVA RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE

## Relazione Geologica

### 14.3 INVENTARIO DEI FENOMENI FRANOSI

Per quanto riguarda il censimento dei siti franosi nell'ambito del Progetto IFFI, nell'inventario sono menzionate aree che ricadono nell'ambito territoriale del comune di **Nurri**.

In particolare, tutta l'area dei versanti del tableau basaltico è interessata da fenomeni franosi relitti e quiescenti. Localmente per naturale evoluzione regressiva del pendio si manifestano crolli o smottamenti isolati o diffusi.

**Le turbine attualmente installate e oggetto di dismissione, quelle in progetto e le opere di connessione si trovano al di fuori di tali aree.**

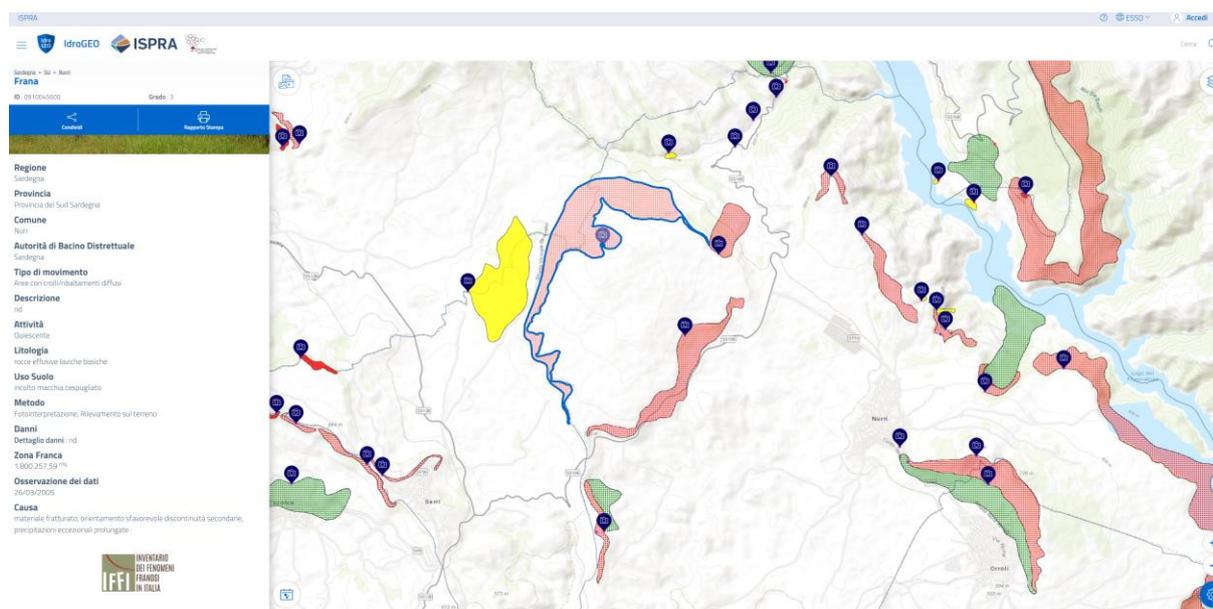


Figura 41 Archivio IFFI (Fonte ISPRA): frane censite nell'area vasta

### 14.4 PIANO STRALCIO DELLE FASCE FLUVIALI

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

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

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

**Le turbine, le opere di connessione e la sottostazione non ricadono in aree perimetrate da PSFF**

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

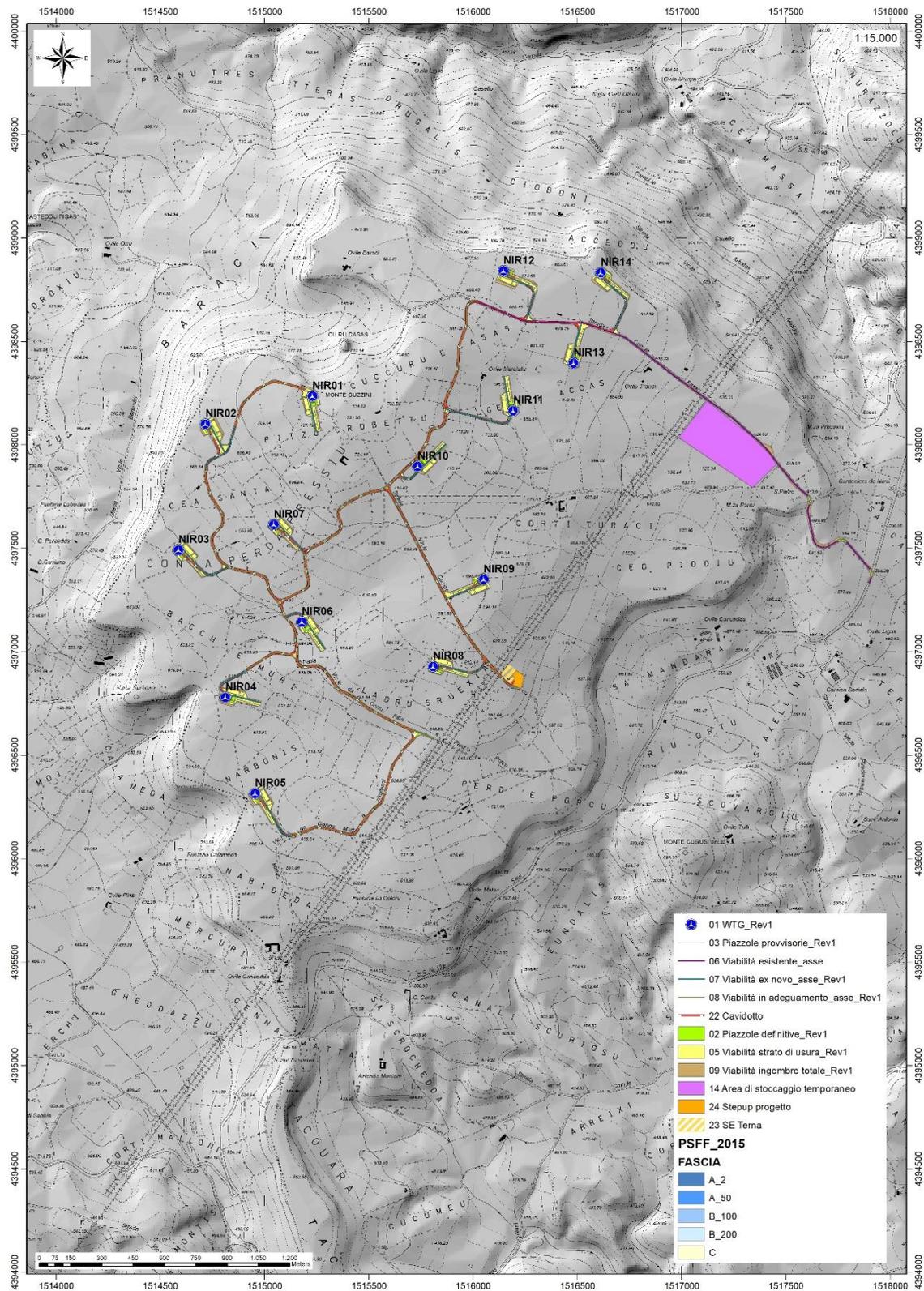


Figura 42 Stralcio perimetrazione Piano Stralcio fasce Fluviali PSFF 2015

## **14.5 PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONI (PGRA)**

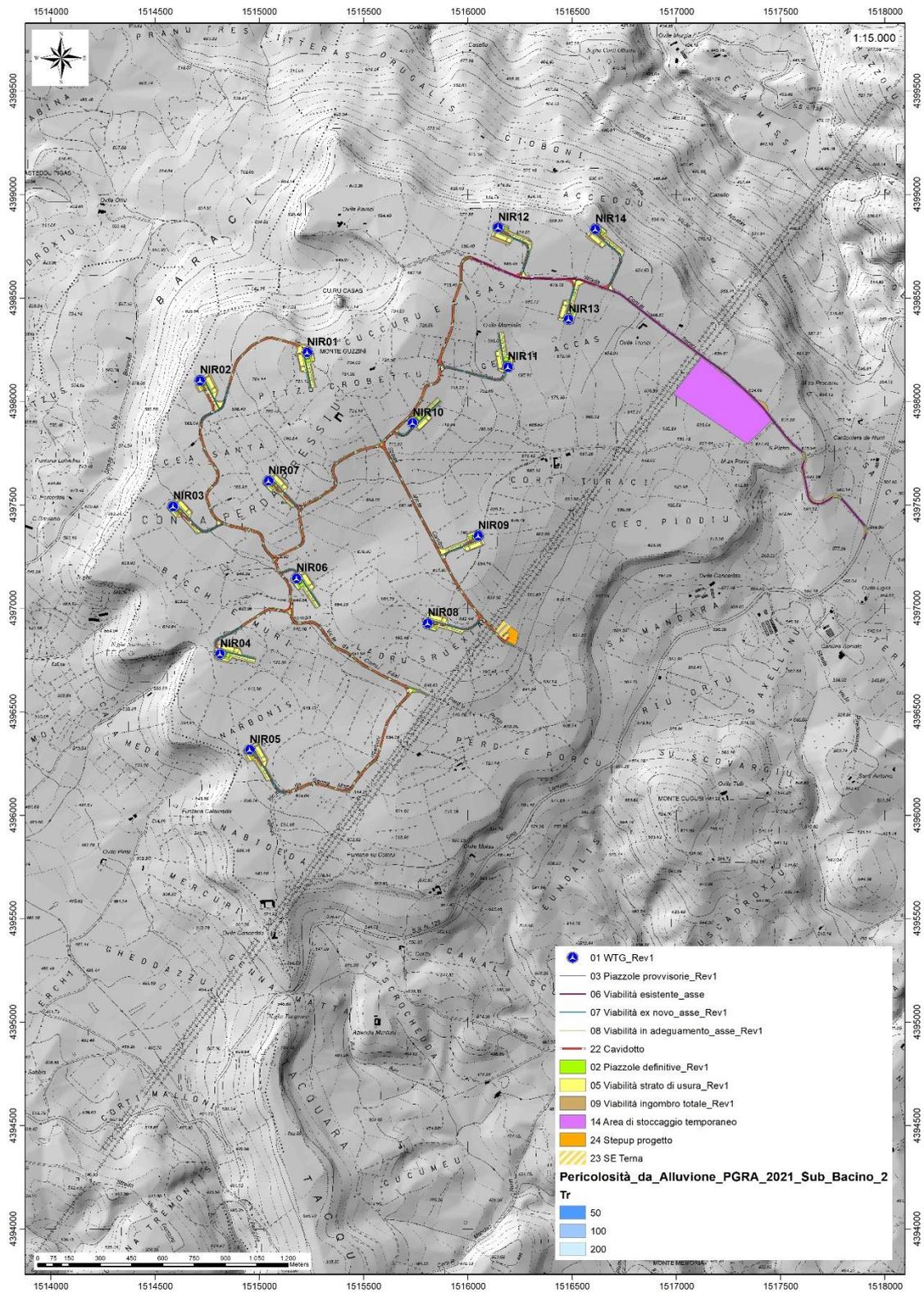
L'articolo 7 del D.Lgs. 23 febbraio 2010 n. 49 "Attuazione della Direttiva Comunitaria 2007/60/CE, relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni", che recepisce in Italia la Direttiva comunitaria 2007/60/CE, prevede che in ogni distretto idrografico, di cui all'art. 64 del D.Lgs.152/2006,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

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

**Le turbine, le opere di connessione e la sottostazione non ricadono in aree perimetrate da PGRA**

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**



**Figura 43 Stralcio perimetrazione PGRA 2021**

## 15 INDAGINI GEOGNOSTICHE

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

L'obiettivo delle indagini realizzate è stato:

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

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

Sono stati eseguiti di n°4 **stendimenti di sismica** con tecnica **MASW e rifrazione in onde P**. Tutte le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni, i quali hanno il medesimo centro degli allineamenti sismici ma sono leggermente più lunghi (69,0 m).

È stato inoltre eseguito il Rilievo topografico tramite GPS (geofoni, punti di shot, elettrodi /picchetti) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni di sismica.

Sono stati infine elaborati i dati ottenuti tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche con l'impiego di software specialistici.

Stendimento	Metodo di indagine	Orientamento	Geofoni/Picchetti	Interdistanza tra geofoni (m)	Lunghezza (m)
<b>R 1 (SM01)</b>	Rifrazione	SE-NO	24	3,00	69,0
<b>R 2 (SM02)</b>	Rifrazione	SE-NO	24	3,00	69,0
<b>R 3 (SM03)</b>	Rifrazione	SSO-NNE	24	3,00	69,0
<b>R 4 (SM04)</b>	Rifrazione	SSE-NNO	24	3,00	69,0
<b>M 1 (SM01)</b>	MASW	SE-NO	24	3,00	69,0
<b>M 2 (SM02)</b>	MASW	SE-NO	24	3,00	69,0
<b>M 3 (SM03)</b>	MASW	SSO-NNE	24	3,00	69,0
<b>M 4 (SM04)</b>	MASW	SSE-NNO	24	3,00	69,0

Tabella 5 Ubicazione degli stendimenti

### 15.1 GENERALITÀ SUL METODO SISMICO A RIFRAZIONE

Il metodo sismico a rifrazione studia la velocità di propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo quando il terreno è sottoposto a sollecitazioni artificiali. La determinazione delle velocità si ottiene misurando i tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in diversi punti sulla superficie topografica. Operativamente i profili sismici si eseguono disponendo sul terreno una serie di sensori (geofoni), posti ad un intervallo costante, collegati ad un sismografo mediante un cavo multipolare.

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

Nella prima fase i tempi di primo arrivo dei segnali sismici vengono letti direttamente sui sismogrammi di campagna visualizzati a monitor. I tempi letti in corrispondenza di ciascun canale (geofono), vengono memorizzati in appositi

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

files che costituiscono i dati in input del software utilizzato. Per ciascun tiro, quindi, si ricostruisce un diagramma dei tempi di arrivo in funzione della distanza dal punto di tiro stesso.

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

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

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

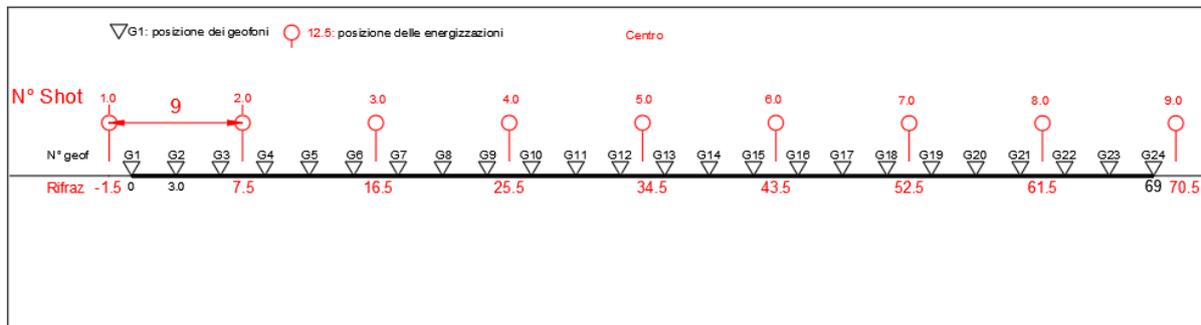
In questi casi per la modellizzazione del sottosuolo, risulta più adatta un'altra tecnica di elaborazione: la tecnica di elaborazione tomografica.

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

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

### 15.1.1 Caratteristiche delle stese sismiche

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



**Figura 44 Geometria di acquisizione - sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0**

### 15.1.2 Caratteristiche della Strumentazione impiegata

Per l'esecuzione delle indagini è stato impiegato un sismografo DoReMi, prodotto dalla SARA electronicinstruments, 24bit con frequenza di campionamento 5000 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali SARA electronics con frequenza propria di 4.5 Hz.

Per l'energizzazione è stata usata una mazza battente da 10 kg impattante su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

La quota relativa di ciascun geofono-shot è stata rilevata tramite una livella digitale e GPS differenziale marca Stonex in modo da poter ricostruire la morfologia del terreno e utilizzarla in fase di elaborazione dei dati acquisiti.

### 15.1.3 Elaborazione dei dati

I dati delle prospezioni sono costituiti dalla geometria d'acquisizione (posizioni e quote relative dei punti scoppio e dei geofoni) e dai tempi di primo arrivo delle onde elastiche di compressione (onde P), determinati manualmente sulle registrazioni riprodotte a schermo (picking dei primi arrivi). La qualità dei dati è risultata nel complesso buona e il picking è stato realizzato facilmente per tutte le basi sismiche. L'inversione dei dati è stata eseguita secondo i criteri della tomografia sismica, mediante apposito software specialistico basato su tecniche di ottimizzazione non lineare.

In particolare, l'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione è stata eseguita secondo il metodo tomografico impiegando il software Rayfract 4.01, che parte da un modello iniziale generato con la tecnica Deltat-V. Successivamente viene effettuata l'inversione iterativa del modello con la tecnica WET (Wavepath Eikonal Traveltime tomography processing) che analizza la propagazione dei vari fronti d'onda generati nei punti di tiro fino ad ogni geofono. Il modello stratigrafico ottenuto come insieme di elementi caratterizzati da una specifica velocità viene quindi rappresentato mediante il contour a linee di isovelocità. La colorazione dei vari elementi secondo una scala cromatica riferita a specifici intervalli di velocità facilita l'immediata visione dei risultati.

## 15.2 INDAGINI SISMICHE: MASW

### **Metodologia**

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

### **Moto del segnale sismico**

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

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

### **Onde di Rayleigh – "R"**

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

### **Analisi del segnale con tecnica MASW**

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

onde di Rayleigh si propagano con velocità che è funzione della frequenza. Il legame velocità frequenza è detto spettro di dispersione. La curva di dispersione individuata nel dominio f-k è detta curva di dispersione sperimentale, e rappresenta in tale dominio le massime ampiezze dello spettro.

### **Modellizzazione**

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

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

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

### **Modi di vibrazione**

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

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

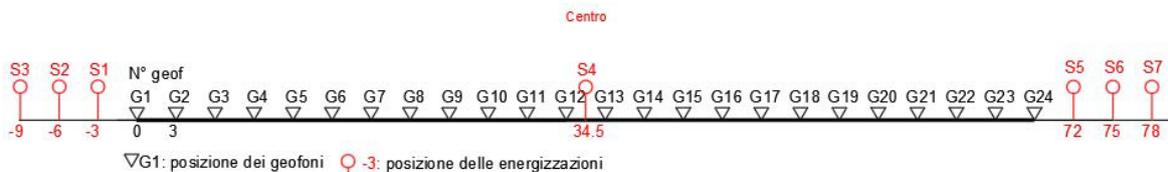
**Profondità di indagine**

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

### 15.3 SPECIFICHE DELLE INDAGINI SVOLTE

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

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



**Figura 45 Geometria di acquisizione - MASW con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0**

### 15.4 CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

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

### 15.5 INTERPRETAZIONE DEI SEGNALI ACQUISITI

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

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

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

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

## 15.6 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)

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

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

con:

$h_i$  spessore dell' $i$ -esimo strato;

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

$N$  numero di strati;

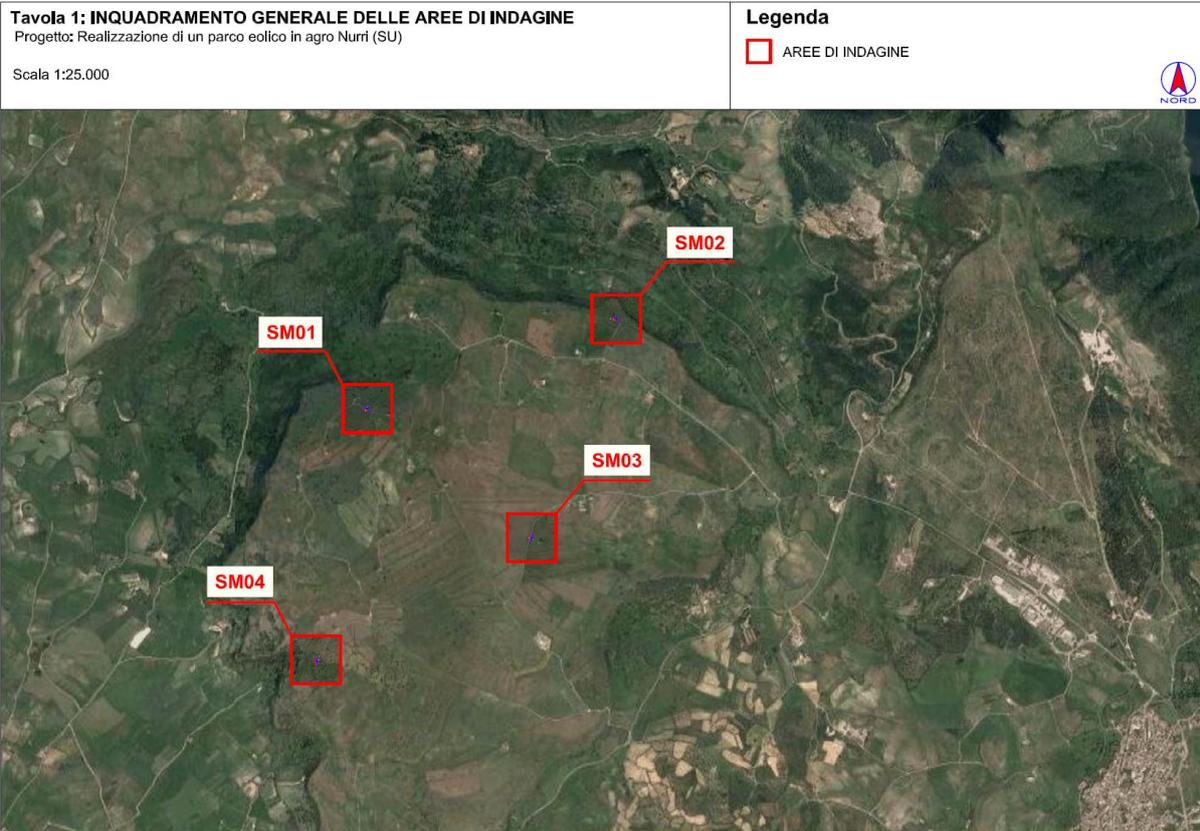
$H$  profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato  $H$  è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione. Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II. Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle NTC 2018. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

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

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> 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	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> 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	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

## 15.7 UBICAZIONE DELLE INDAGINI ESEGUITE



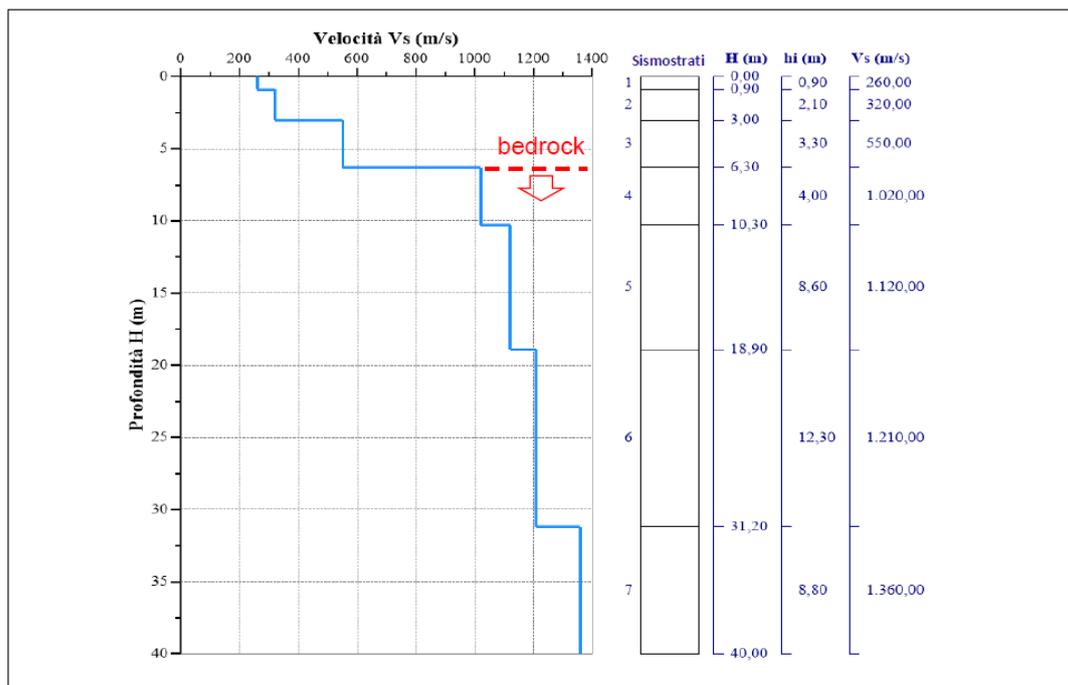
## 15.8 RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO M1-R1

### 15.8.1 Masw M1

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M1, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0 - 0,9	1° sismostrato con Vs di 260 m/s Terre poco addensate
0,9 - 3,0	2° sismostrato con Vs di 320 m/s Terre mediamente addensate
3,0 - 6,3	3° sismostrato con Vs di 550 m/s Terre da mediamente addensate a molto addensate
6,3 - 10,3	4° sismostrato con Vs di 1020 m/s Substrato roccioso intensamente fratturato
10,3 - 18,9	5° sismostrato con Vs di 1120 m/s Substrato roccioso da intensamente a moderatamente fratturato
18,9 - 31,2	6° sismostrato con Vs di 1210 m/s Substrato roccioso da leggermente fratturato a sano
31,2 - 40,0	7° sismostrato con Vs di 1360 m/s Substrato roccioso sano

MASW M1-PROFILO Vs



Sismostratigrafia e calcolo Vs eq

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	Vs (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	Hi/Vs (s)
1	0,90	0,90	260,00	0,90	0,90	0,00346
2	3,00	2,10	320,00	3,00	2,10	0,00656
3	6,30	3,30	550,00	6,30	3,30	0,00600
4	10,30	4,00	1020,00	10,30	4,00	
5	18,90	8,60	1120,00	18,90	8,60	
6	31,20	12,30	1210,00	30,00	11,10	
7	40,00	8,80	1360,00	0,00	0,00	

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

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

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

con:

$h_i$  spessore dell'i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle  $V_s$  si pone come profondità del substrato 6,30 m ( $V_s > 800$  m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 6,30 m di profondità dal p.c. è pari a:  $V_{s,eq} = 6,30/0,0160 = 393,16$  m/s che dà luogo ad una categoria B, ossia:

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

**Tabella 6 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche**

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità $\gamma$	$V_p$	$V_s$	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico $E_d$	Modulo di Young statico $E_d$	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0 - 0,9	terre	1.800	520	260	0,33	324	39	118	324
2	0,9 - 3,0	terre	2.000	640	320	0,33	549	66	206	549
3	3,0 - 6,3	terre	2.100	1.100	550	0,33	1.697	204	637	1.697
4	6,3 - 10,3	12%	2.200	2.040	1020	0,33	6.100	732	2.285	6.100
5	10,3 - 18,9	15%	2.350	2.240	1120	0,33	7.865	1.180	2.952	7.865
6	18,9 - 31,2	22%	2.400	2.420	1210	0,33	9.375	2.063	3.511	9.375
7	31,2 - 40,0	25%	2.450	2.720	1360	0,33	12.082	3.020	4.531	12.082

\*CT: coefficiente di trasformazione (per la roccia)

**15.8.2 Sismica a rifrazione R1**

Dall'esame della sezione si riconoscono **4 unità sismostratigrafiche** principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 2800 m/s.

Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 2,1 e 3,0 metri da p.c e un andamento analogo al piano campagna.

Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta leggere variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 3,0 e 7,0 m dal p.c.

Il sismostrato C costituito da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 3,6 e 14,1 m di profondità dal p.c.

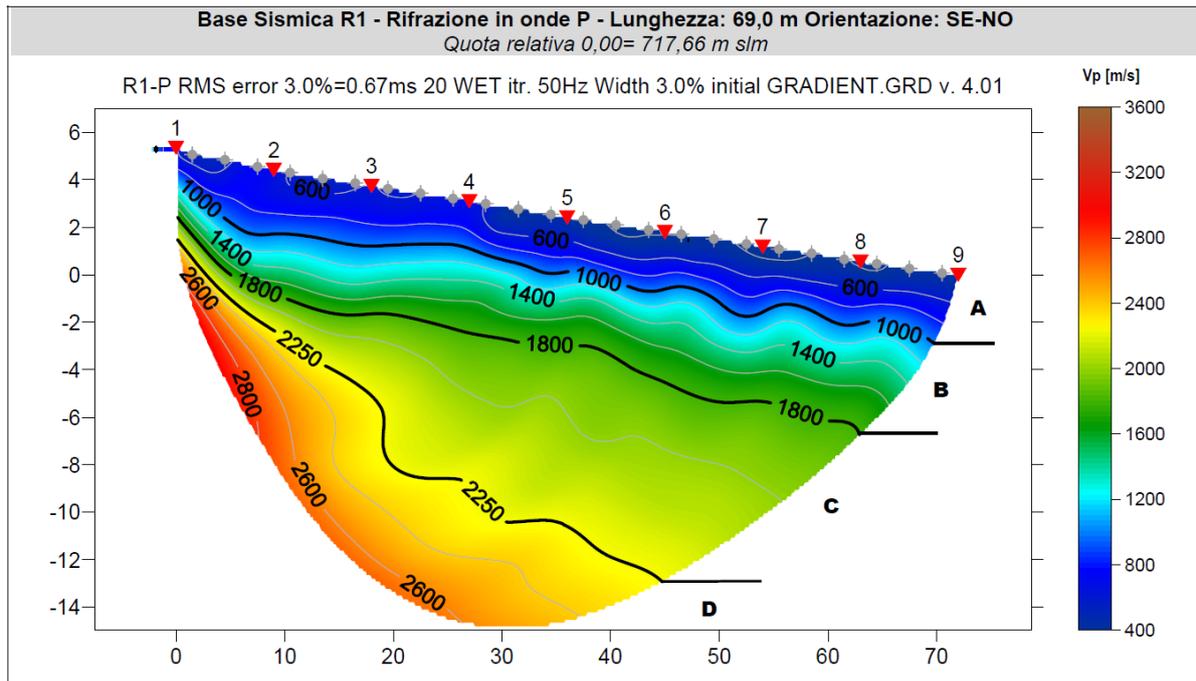
Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità  $V_p$  medie e si riscontra fino alle massime profondità di indagine comprese tra 15,0/20,0 m dal p.c. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle  $V_p$  con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 3,0 e 7,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 3,6 e 14,1 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 5,0 e 7,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre già a profondità comprese tra 6,0 e 10,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

Stendimento R1	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 2,1/3,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 2,1/3,0 a 3,0/7,0	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 3,0/7,0 a 3,6/14,1	1800-2250
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 3,6/14,1 a 15,0-20,0	2400-2800



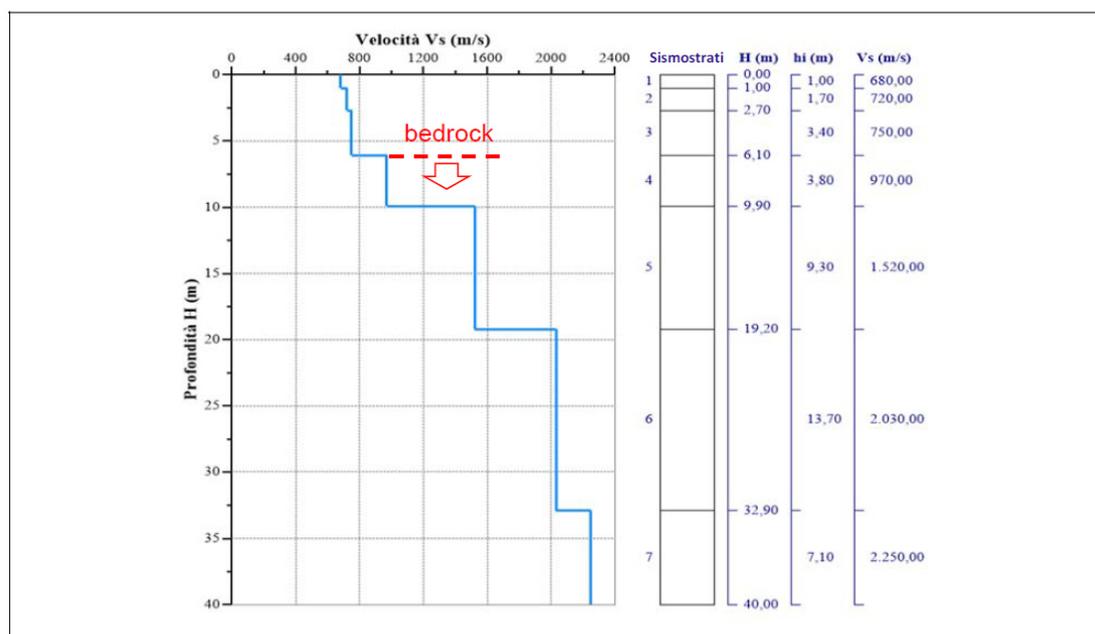
## 15.9 RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO M2-R2

### 15.9.1 Masw M2

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M2, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0 - 1,0	1° sismostrato con Vs di 680 m/s Terre poco addensate
1,0 - 2,7	2° sismostrato con Vs di 720 m/s Terre mediamente addensate
2,7 - 6,1	3° sismostrato con Vs di 750 m/s Terre da addensate a molto
6,1 - 9,9	4° sismostrato con Vs di 970 m/s Substrato roccioso intensamente fratturato
9,9 - 19,2	5° sismostrato con Vs di 1520 m/s Substrato roccioso da mediamente a leggermente fratturato
19,2 - 32,9	6° sismostrato con Vs di 2030 m/s Substrato roccioso sano
32,9 - 40,0	7° sismostrato con Vs di 2250 m/s Substrato roccioso sano

**MASW M2-PROFILO Vs**



**Sismostratigrafia e calcolo Vs eq**

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	Vs (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	Hi/Vs (s)
1	1,00	1,00	680,00	1,00	1,00	0,00147
2	2,70	1,70	720,00	2,70	1,70	0,00236
3	6,10	3,40	750,00	6,10	3,40	0,00453
4	9,90	3,80	970,00	9,90	3,80	
5	19,20	9,30	1520,00	19,20	9,30	
6	32,90	13,70	2030,00	30,00	10,80	
7	40,00	7,10	2250,00	0,00	0,00	

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

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

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

con:

$h_i$  spessore dell'i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle  $V_s$  si pone come profondità del substrato **6,10 m** ( $V_s > 800$  m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **6,10 m** di profondità dal p.c. è pari a:  $V_{s,eq} = 6,10/0,0083 = 729,23$  m/s che dà luogo ad una categoria B, ossia:

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

**Tabella 7 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche**

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità $\gamma$	$V_p$	$V_s$	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico $E_d$	Modulo di Young statico $E_d$	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0 - 1,0	terre	1.800	1.360	680,00	0,33	2.216	267	834	2.216
2	1,0 - 2,7	terre	2.000	1.440	720,00	0,33	2.766	333	1.040	2.766
3	2,7 - 6,1	terre	2.100	1.500	750,00	0,33	3.148	380	1.177	3.148
4	6,1 - 9,9	12%	2.200	1.940	970,00	0,33	5.521	663	2.069	5.521
5	9,9 - 19,2	15%	2.350	3.040	1520,00	0,33	14.475	2.171	5.433	14.475
6	19,2 - 32,9	22%	2.400	4.060	2030,00	0,33	26.371	5.802	9.895	26.371
7	32,9 - 40,0	25%	2.450	4.500	2250,00	0,33	33.078	8.270	12.406	33.078

\*CT: coefficiente di trasformazione (per la roccia)

**15.9.2 Sismica a rifrazione R2**

Dall'esame della sezione si riconoscono **4 unità sismostratigrafiche** principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 3200 m/s.

Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 1,0 e 2,0 metri da p.c. e un andamento leggermente irregolare rispetto al piano campagna.

Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta leggere variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 2,0 e 5,2 m dal p.c.

Il sismostrato C costituito da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 3,0 e 9,0 m di profondità dal p.c.

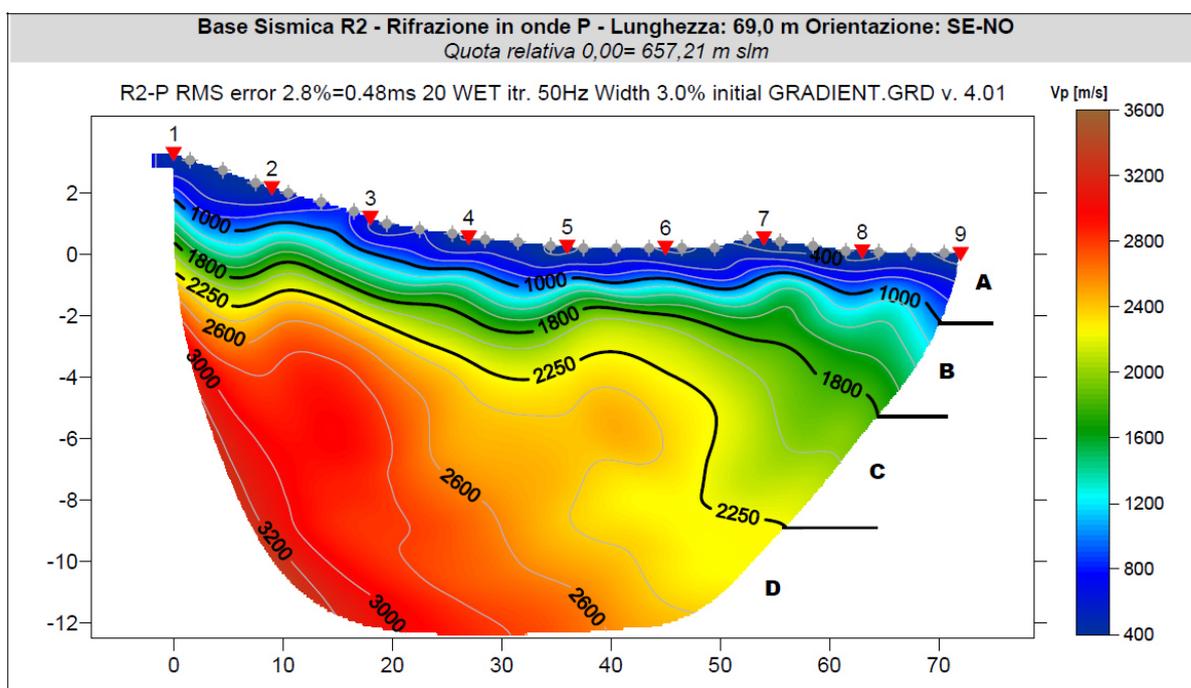
Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità medioalte e si riscontra fino alle massime profondità di indagine comprese tra 12,2/16,0 m dal p.c. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento graduale delle  $V_p$  con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso: si può notare come dalla progressiva 45 m della sezione le velocità  $V_p$  siano minori, presentando una diminuzione laterale delle velocità rilevate; il materiale presente presenta delle qualità elastomeccaniche inferiori.

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 2,0 e 5,2 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 3,0 e 9,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

Stendimento R2	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,0/2,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,0/2,0 a 2,0/5,2	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 2,0/5,2 a 3,0/9,0	1800-2250
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 3,0/9,0 a 12,2-16,0	2250-3200



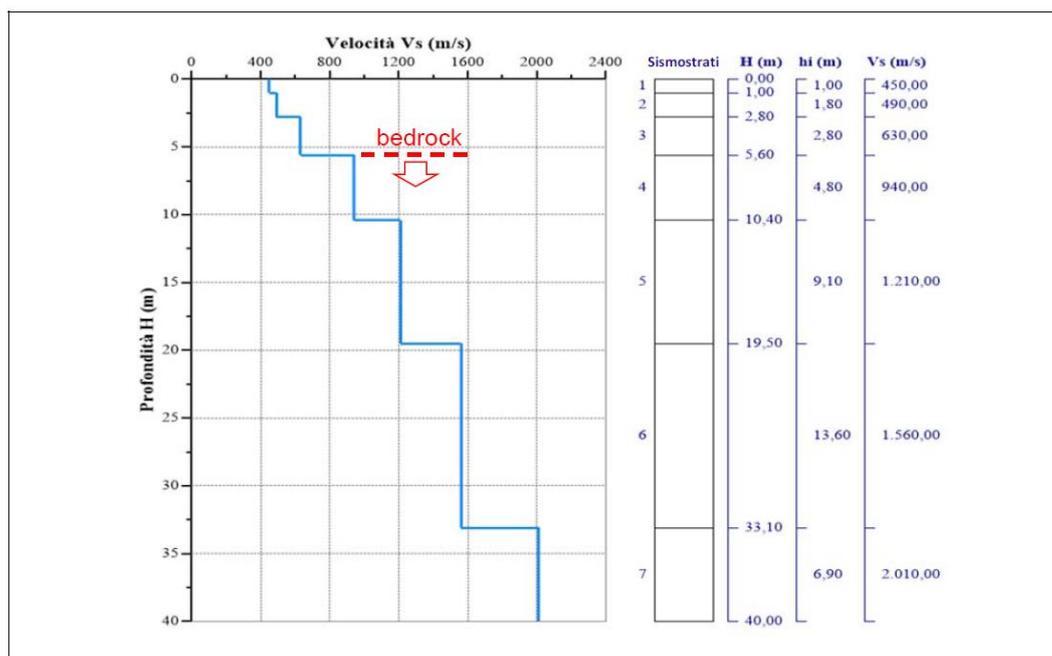
## 15.10 RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO M3-R3

### 15.10.1 Masw M3

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M3, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0 - 1,0	1° sismostrato con Vs di 450 m/s Terre poco addensate
1,0 - 2,8	2° sismostrato con Vs di 490 m/s Terre mediamente addensate
2,8 - 5,6	3° sismostrato con Vs di 630 m/s Terre molto addensate
5,6 - 10,4	4° sismostrato con Vs di 940 m/s Substrato roccioso intensamente fratturato
10,4 - 19,5	5° sismostrato con Vs di 1210 m/s Substrato roccioso mediamente fratturato
19,5 - 33,1	6° sismostrato con Vs di 1560 m/s Substrato roccioso da poco fratturato a sano
33,1 - 40,0	7° sismostrato con Vs di 2010 m/s Substrato roccioso sano

**MASW M3-PROFILO Vs**



**Sismostratigrafia e calcolo Vs eq**

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	Vs (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	Hi/Vs (s)
1	1,00	1,00	450,00	1,00	1,00	0,00222
2	2,80	1,80	490,00	2,80	1,80	0,00367
3	5,60	2,80	630,00	5,60	2,80	0,00444
4	10,40	4,80	940,00	10,40	4,80	
5	19,50	9,10	1210,00	19,50	9,10	
6	33,10	13,60	1560,00	30,00	10,50	
7	40,00	6,90	2010,00	0,00	0,00	

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

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

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

con:

$h_i$  spessore dell'i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle  $V_s$  si pone come profondità del substrato **5,60 m** ( $V_s > 800$  m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **5,60 m** di profondità dal p.c. è pari a:  **$V_{s,eq} = 5,6/0,0103 = 541,58$  m/s** che dà luogo ad una categoria B, ossia:

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

**Tabella 8 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche**

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità $\gamma$	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0 - 1,0	terre	1.800	900	450	0,33	971	117	363	971
2	1,0 - 2,8	terre	2.000	980	490	0,33	1.285	155	481	1.285
3	2,8 - 5,6	terre	2.100	1.260	630	0,33	2.226	268	834	2.226
4	5,6 - 10,4	12%	2.200	1.880	940	0,33	5.188	623	1.942	5.188
5	10,4 - 19,5	15%	2.350	2.420	1210	0,33	9.179	1.377	3.442	9.179
6	19,5 - 33,1	22%	2.400	3.120	1560	0,33	15.573	3.426	5.845	15.573
7	33,1 - 40,0	25%	2.450	4.020	2010	0,33	26.400	6.600	9.895	26.400

\*CT: coefficiente di trasformazione (per la roccia)

**15.10.2 Sismica a rifrazione R3**

Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 3000 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 1,3 e 2,8 metri da p.c e un andamento leggermente irregolare rispetto al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta leggere variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 3,2 e 6,5 m dal p.c. Il sismostrato C composto da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 5,0 e 9,3 m di profondità dal p.c. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità medioalte e si riscontra fino alle massime profondità di indagine comprese tra 10,0/14,0 m dal p.c. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

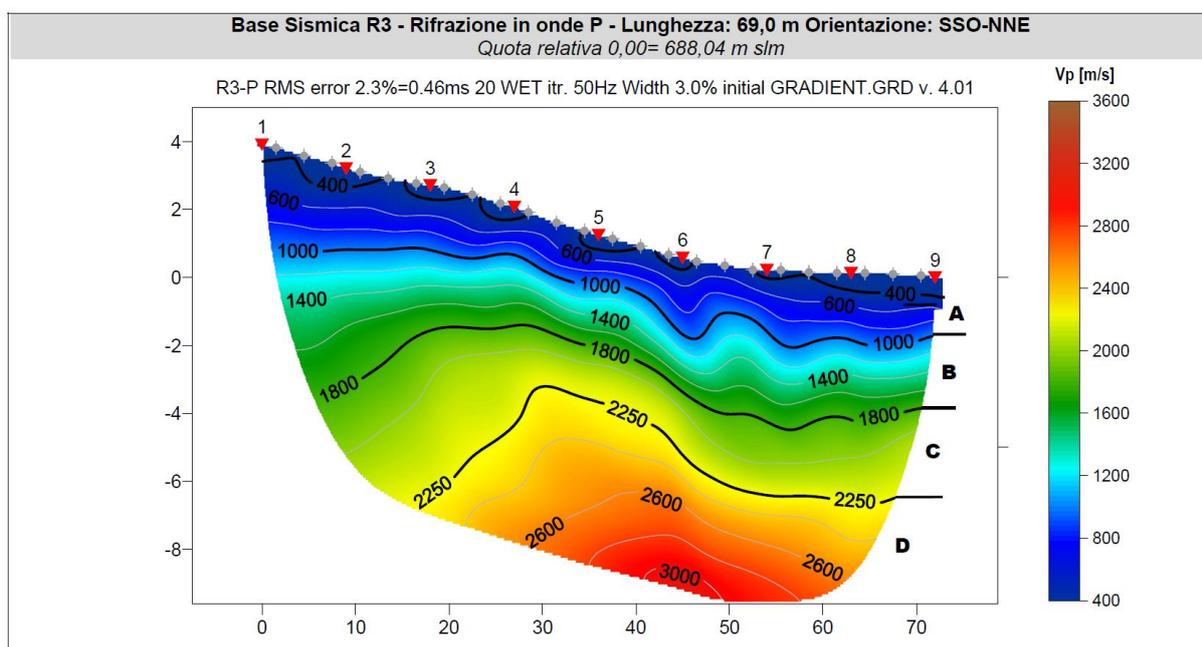
In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 3,2 e 6,5 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 5,0 e 9,3 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

comprese tra 4,0 e 5,0 m dal p.c i terreni risultano difficilmente rippabili, mentre a profondità comprese tra 5,0 e 6,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

Stendimento R3	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,3/2,8	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,3/2,8 a 3,2/6,5	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 3,2/6,5 a 5,0/9,3	1800-2250
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 5,0/9,3 a 10,0-14,0	2250-3000



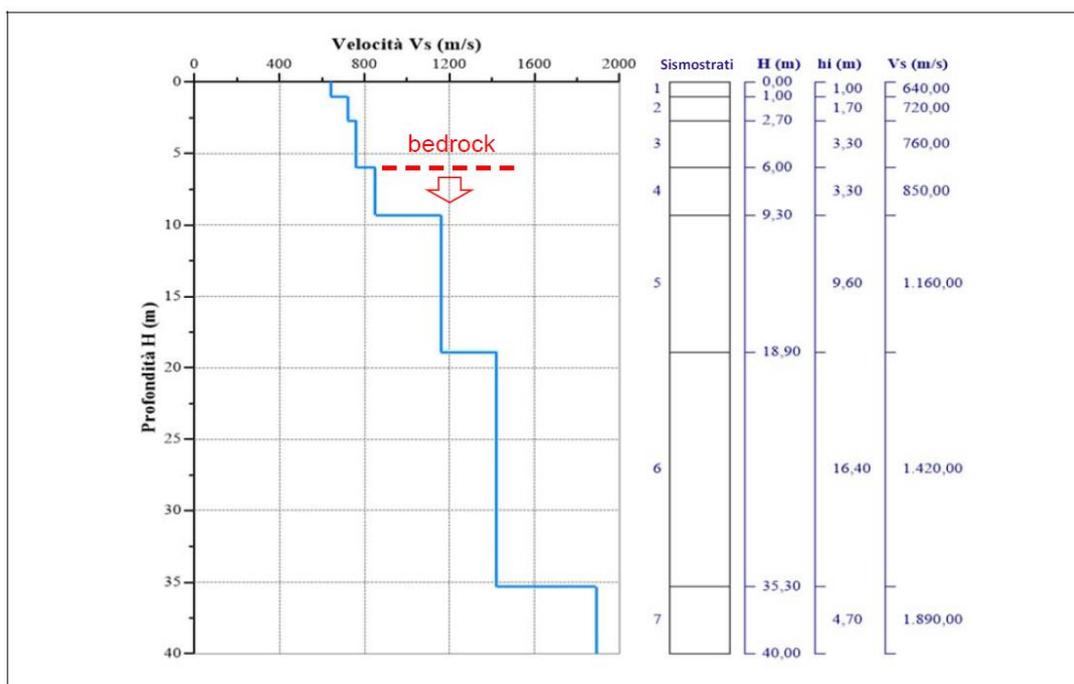
## 15.11 RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO M4-R4

### 15.11.1 Masw M4

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M4, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0 - 1,0	1° sismostrato con Vs di 640 m/s Terre addensate
1,0 - 2,7	2° sismostrato con Vs di 720 m/s Terre molto addensate
2,7 - 6,0	3° sismostrato con Vs di 760 m/s Substrato roccioso intensamente fratturato
6,0 - 9,3	4° sismostrato con Vs di 850 m/s Substrato roccioso intensamente fratturato
9,3 - 18,9	5° sismostrato con Vs di 1160 m/s Substrato roccioso da fratturato a sano
18,9 - 35,3	6° sismostrato con Vs di 1420 m/s Substrato roccioso sano
35,3 - 40,0	7° sismostrato con Vs di 1890 m/s Substrato roccioso sano

**MASW M4-PROFILO Vs**



**Sismostratigrafia e calcolo Vs eq**

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	Vs (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	Hi/Vs (s)
1	1,00	1,00	640,00	1,00	1,00	0,00156
2	2,70	1,70	720,00	2,70	1,70	0,00236
3	6,00	3,30	760,00	6,00	3,30	0,00434
4	9,30	3,30	850,00	9,30	3,30	
5	18,90	9,60	1160,00	18,90	9,60	
6	35,30	16,40	1420,00	30,00	11,10	
7	40,00	4,70	1890,00	0,00	0,00	

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

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

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

con:

$h_i$  spessore dell'i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle  $V_s$  si pone come profondità del substrato **6,00 m** ( $V_s > 800$  m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **6,00 m** di profondità dal p.c. è pari a:  $V_{s,eq} = 6,0/0,0082 = 725,89$  m/s che dà luogo ad una categoria A, ossia:

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

**Tabella 9 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche**

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità $\gamma$	$V_p$	$V_s$	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico $E_d$	Modulo di Young statico $E_d$	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0 - 1,0	terre	1.800	1.280	640	0,33	1.961	236	736	1.961
2	1,0 - 2,7	terre	2.000	1.440	720	0,33	2.766	333	1.040	2.766
3	2,7 - 6,0	terre	2.100	1.520	760	0,33	3.236	390	1.216	3.236
4	6,0 - 9,3	12%	2.200	1.700	850	0,33	4.237	508	1.589	4.237
5	9,3 - 18,9	15%	2.350	2.320	1160	0,33	8.434	1.265	3.158	8.434
6	18,9 - 35,3	22%	2.400	2.840	1420	0,33	12.906	2.839	4.835	12.906
7	35,3 - 40,0	25%	2.450	3.780	1890	0,33	23.340	5.835	8.748	23.340

\*CT: coefficiente di trasformazione (per la roccia)

### 15.11.2 Sismica a rifrazione R4

Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 2800 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 0,4 e 1,3 metri da p.c e un andamento leggermente irregolare rispetto al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta un andamento simile al precedente e si rileva fino a profondità comprese tra 3,0 e 4,0 m dal p.c. Il sismostrato C costituito da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 5,0 e 7,0 m di profondità dal p.c. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità medio-alte e si riscontra fino alle massime profondità di indagine comprese tra 13,0/15,2 m dal p.c.

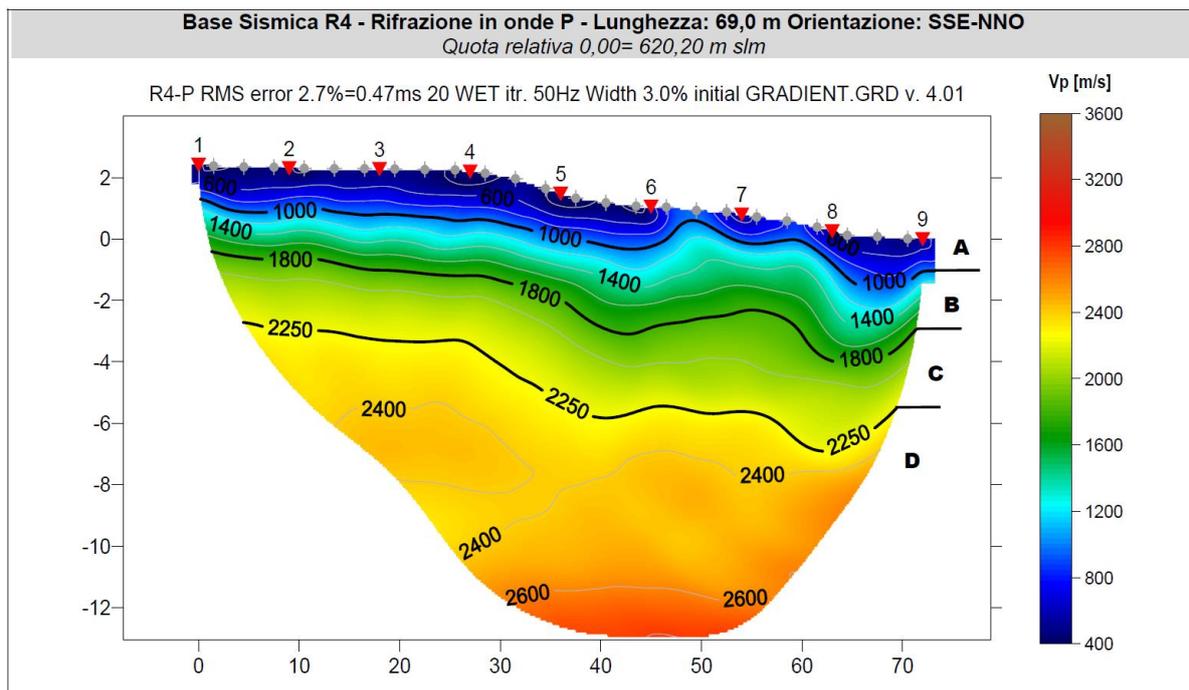
Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle  $V_p$  con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 3,0 e 4,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 5,0 e 7,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile. comprese tra 4,0 e 5,0 m dal p.c i terreni risultano difficilmente rippabili, mentre a profondità comprese tra 5,0 e 6,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

Stendimento R4	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 0,4/1,3	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 0,4/1,3 a 3,0/4,0	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 3,0/4,0 a 5,0/7,0	1800-2250
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 5,0/7,0 a 13,0-15,2	2250-2800



## **16 MODELLO GEOLOGICO DI SITO**

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

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

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

L'analisi ha permesso di fatto di definire il modello geologico del sito ed in particolare, in relazione alle diverse condizioni geologiche e geostrutturali rilevate, è stato individuato **nr.01 modello geologico rappresentativo** descritto di seguito:

in generale l'intera area interessata dal progetto è interessata da un substrato roccioso da fratturato a sano costituito dalle facies basaltiche descritte nei capitoli precedenti al cui letto ( profondità variabile dai 2 ai 30m) poggiano senza soluzione di continuità le facies marnoso- calcaree della formazione di Gesturi, costituite da conglomerati, marne e calcareniti.

**"NURRI IR" PARCO EOLICO DI NURRI (SU) INTERVENTO DI REPOWERING  
CON SOSTITUZIONE DEGLI AEROGENERATORIESISTENTI E RELATIVA  
RIDUZIONE DEL NUMERO DELLE MACCHINE**

**Relazione Geologica**

**16.1 MODELLO GEOLOGICO 01**

Sulla base dei dati ricavati dalle indagini geognostiche e dalla classificazione degli ammassi rocciosi si definiscono i parametri geotecnici rappresentativi del modello geologico che andrà confermato in sede di progettazione esecutiva con indagini più dettagliate sui singoli siti di imposta delle fondazioni.

Pertanto, nell'ottica dell'individuazione di un modello geologico rappresentativo del sito si propone il seguente schema:

0,00 - 2,00m	depositi eluvio-colluviali / roccia fortemente alterata (regolite) <b>(S1)</b>
2,00 - 3,00m	substrato roccioso da fortemente fratturato a fratturato <b>(S2)</b>
3,00 -3,60m	substrato roccioso da fratturato a poco fratturato <b>(S3)</b>
3,60m –10,30m	substrato da poco fratturato a sano <b>(S4)</b>
10,30m - 20,00m	substrato roccioso sano <b>(S5)</b>

MODELLO GEOLOGICO 01						
Dati Parametri Resistenza						
Tipo di Terreno		S1	S2	S3	S4	S5
Descrizione		Depositi eluvio-colluviali/roccia fortemente alterata	Substrato roccioso da fortemente fratturato a fratturato	Substrato roccioso da fratturato a poco fratturato	Substrato roccioso da fratturato a sano	Substrato roccioso sano
Peso di volume**	[kg/mc]	1.800	2.000	2.100	2.200	2.350
Peso di volume saturo**	[kg/mc]	1.900	2.100	2.100	2.200	2.350
Angolo di attrito* interno	[°]	30,12	34,60	36,94	38,25	45
Coesione*	[Mpa]	0.05	0,524	1,072	1,254	2,5
Dati Parametri Deformabilità						
Modulo elastico **	[Mpa]	39	66	204	732	1180
Coefficiente di Poisson**	[]	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)**	[Mpa]	118	206	637	2.235	2.952
Velocità onde di taglio Vs**	[m/sec]	260	320	550	1020	1120

\*Valori ricavati da interpolazioni su ROCDATA da confermare con indagini dirette e puntuali

\*\* Valori ricavati da dati derivati dalle indagini geofisiche da confermare con indagini dirette e puntuali

## **17 CONCLUSIONI: CRITICITÀ GEOLOGICHE E SUGGERIMENTI OPERATIVI**

Lo studio condotto finalizzato ad individuare le caratteristiche geologiche, geomorfologiche idrogeologiche e geostrutturali dell'area di interesse alle opere di progetto ha permesso, attraverso il rilievo diretto in sito, le indagini geognostiche e l'interpretazione sinergica tra le informazioni derivate, di definire **nr. 01 modello geologico ai sensi delle NTC 2018 rappresentativo delle diverse condizioni del sito, con particolare riferimento alle posizioni degli aerogeneratori e alla viabilità di accesso e di servizio al sito.**

Per quanto concerne l'installazione degli aerogeneratori, gli stessi prevedono opere fondanti costituite da plinti circolari a sezione troncoconica il cui piano di posa è previsto ad una profondità di riferimento di circa 4m da piano campagna.

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

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

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

Per quanto riguarda la scavabilità del substrato roccioso esso, nelle facies presenti e nella parte superficiale, per uno spessore variabile da 0 a 6m risulta quasi sempre fratturato per cui facilmente scavabile con ripper e martellone. Il tracciato del cavidotto si snoda lungo aree pianeggianti e tracciati stradali esistenti. Il cavidotto in progetto andrà a interessare le litologie appartenenti alle facies basaltiche e dai depositi colluviali.

Non sono previste fondazioni profonde, pertanto, non si rilevano particolari criticità salvo il controllo del deflusso delle acque superficiali.

COMUNE DI NURRI  
PROVINCIA SUD SARDEGNA

RELAZIONE TECNICA SULLE  
INDAGINI GEOFISICHE  
(M.A.S.W - Sismica a Rifrazione)  
*Realizzazione di un Parco Eolico in agro di Nurri (SU)*

N° Tavola	Scala Disegno	Data	Data Aggiornamento	Redatto:
<b>R1</b>	varie	26/07/2023	--	A.Carcangiu M. Usai

Oggetto:	Scala Plottaggio	CTB
<b>RELAZIONE TECNICA</b>	1.1	--

**Committente:**

Ing. Bruno Manca  
Loc. Riu Is Piras SNC - 09040 Serdiana (CA)  
P.I. 02926980927

**Cantiere:** Comune di Nurri (SU)



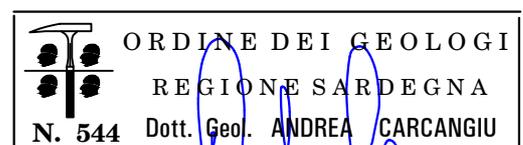
**GEOSERVICE**

**GEOSERVICE S.r.l.**

Sede: Località Su Moriscau - 09028 Sestu (CA)  
Sede legale: Via D. Cimarosa, 22 - 09050 Villa San Pietro (CA)  
Capitale Sociale: € 20.000,00  
Tel. 3474032606; Fax: 1782206528;  
P.IVA/C.F.: 03008730925 - R.E.A.: 239536 di Cagliari  
mail: [info@geoservicesardegna.com](mailto:info@geoservicesardegna.com);  
PEC: [geoservice.sas@pec.it](mailto:geoservice.sas@pec.it)  
[www.geoservicesardegna.com](http://www.geoservicesardegna.com)  
L'Amministratore 

Il Direttore Tecnico

Dott. Geol. Andrea Carcangiu



Collaboratore 

Dott. Marco Usai

## Sommario

1	PREMESSA .....	2
2	PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE.....	3
3	RILIEVO TOPOGRAFICO .....	3
4	INDAGINI SISMICHE: MASW .....	9
4.1	Tecnica e parametri utilizzati .....	9
4.2	Strumentazione utilizzata.....	10
4.3	Elaborazione dei dati.....	10
4.4	CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018).....	12
4.5	VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI.....	14
4.6	DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE.....	15
5	SISMICA A RIFRAZIONE.....	17
5.1	Strumentazione utilizzata.....	17
5.2	Elaborazione dei dati.....	18
5.3	Valutazione della escavabilità delle rocce.....	21
5.4	RISULTATI INDAGINI DEL SITO SM01.....	23
5.4.1	MASW M1 (SM01).....	23
5.5	RISULTATI INDAGINI DEL SITO SM02.....	25
5.5.1	MASW M2 (SM02).....	25
5.6	RISULTATI INDAGINI DEL SITO SM03.....	27
5.6.1	MASW M3 (SM03).....	27
5.7	RISULTATI INDAGINI DEL SITO SM04.....	29
5.7.1	MASW M4 (SM04).....	29
6	RISULTATI DELLE INDAGINI R1 .....	31
6.1.1	Sismica a Rifrazione R1.....	31
7	RISULTATI DELLE INDAGINI R2 .....	33
7.1.1	Sismica a Rifrazione R2.....	33
8	RISULTATI DELLE INDAGINI R3 .....	35
8.1.1	Sismica a Rifrazione R3.....	35
9	RISULTATI DELLE INDAGINI R4 .....	37
9.1.1	Sismica a Rifrazione R4.....	37
10	INDICAZIONI PER LA DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI.....	39
11	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	40

## **1 PREMESSA**

La presente relazione redatta su incarico dell'Ing. Bruno Manca, descrive le attività delle indagini geofisiche per il progetto di realizzazione del Parco Eolico "Nurri" sito in agro del comune di Nurri (SU).

Le prospezioni geofisiche sono state realizzate impiegando la metodologia sismica; seguono le specifiche e le caratteristiche delle metodologie impiegate:

1. L'indagine sismica con tecnica MASW (Multichannel Analysis of SurfaceWaves) è una tecnica di indagine non invasiva che, attraverso la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , è in grado di ricostruire una sismo-stratigrafia atta a permettere la definizione della categoria di suolo ai sensi del DM 17/01/2018.
2. L'indagine sismica a rifrazione con acquisizione ed elaborazione tomografica in onde longitudinali (P) permette di ricostruire l'andamento stratigrafico, nel senso di spessori elastomogenei, andando a stimare lo stato di addensamento e/o fratturazione del terreno investigato. È molto utile anche per classificare la cosiddetta "rippabilità" degli ammassi rocciosi e per ottenere per via indiretta una classificazione dell'ammasso roccioso.

A supporto della progettazione geotecnica e strutturale, tramite le MASW sono stati determinati sulla base di correlazioni bibliografiche i parametri elastici dinamici derivati dalle indagini sismiche e il modulo statico di deformazione.

Come previsto dal Piano Indagini di progetto sono stati realizzati in totale n° 4 stendimenti di MASW, n°4 stendimenti di sismica a rifrazione in onde P.

Fanno parte integrante della presente relazione i seguenti allegati:

- Tavola 1. Planimetria generale ubicazione indagini – scala 1:25.000
- Tavole 2-3-4-5. Planimetria di dettaglio ubicazione indagini geofisiche – scala 1:1.000
- Allegato 1. MASW: Sismogramma acquisiti - spettri velocità di fase/frequenza - Curve di dispersione
- Allegato 2. Sismica a rifrazione: dromocrone osservate e calcolate e raggi sismici
- Allegato 3. Documentazione fotografica indagini geofisiche.

## 2 PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE

Le prospezioni geofisiche sono state articolate secondo il seguente programma, mentre le acquisizioni in campo sono state realizzate nei giorni 5 e 6 Luglio 2023:

1. Esecuzione di n°4 stendimenti complessivi, rispettivamente:
  - n°4 stendimenti costituiti da sismica con tecnica MASW
  - n°4 stendimenti costituiti da sismica con tecnica a rifrazione in onde P
  - le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni
2. Rilievo topografico tramite GPS differenziale STONEX S70G (geofoni, punti di shot) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni di tomografia elettrica e sismica.
3. Elaborazione dei dati tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche con l'impiego di software specialistici.

L'ubicazione generale è riportata nella **Tavola 1**, mentre quella di dettaglio nelle **Tavole 2, 3, 4, e 5**.

Nella seguente tabella si riporta il quadro riassuntivo delle indagini svolte, con le sigle identificative (tra parentesi la denominazione indicata nel Piano Indagini Geognostiche), la direzione di esecuzione (da geofono iniziale a finale) e la loro lunghezza complessiva.

**Tabella 1. Quadro riassuntivo delle indagini svolte**

Stendimento	Metodologie	Orientamento	Geofoni	Interdistanza (m)	Lunghezza (m)
R1 (SM01)	Rifrazione	SE-NO	24	3,0	69,0
R2 (SM02)	Rifrazione	SE-NO	24	3,0	69,0
R3 (SM03)	Rifrazione	SSO-NNE	24	3,0	69,0
R4 (SM04)	Rifrazione	SSE-NNO	24	3,0	69,0
M1 (SM01)	MASW	SE-NO	24	3,0	69,0
M2 (SM02)	MASW	SE-NO	24	3,0	69,0
M3 (SM03)	MASW	SSO-NNE	24	3,0	69,0
M4 (SM04)	MASW	SSE-NNO	24	3,0	69,0

## 3 RILIEVO TOPOGRAFICO

Di seguito si riportano i dati del rilievo topografico in termini di coordinate Gauss Boaga e quote assolute in m s.l.m. e relative in m da p.c. eseguito tramite GPS differenziale Stonex S70G di ciascun geofono e shot/energizzazione degli stendimenti di sismica a rifrazione in onde P e MASW.

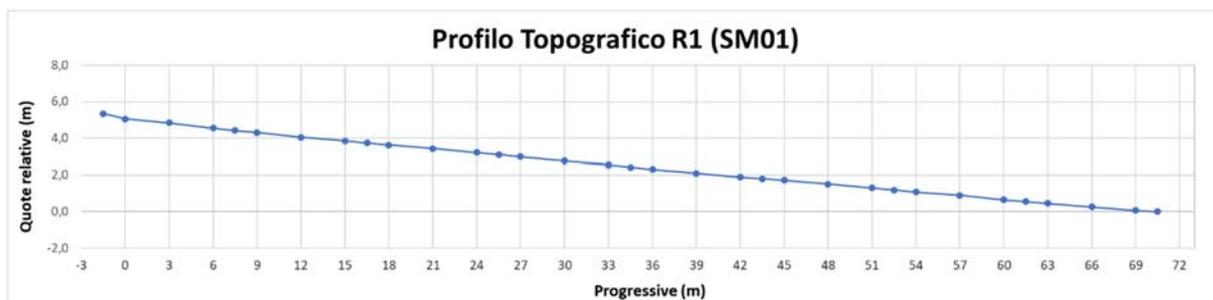
**Legenda:**

G1: Nome Geofono; S1: Nome Shot/energizzazione  
 Est/Nord: Longitudine e Latitudine, Coordinate Gauss Boaga  
 QA-QR: Quote altimetriche assolute (m.s.l.m) e relative in (m.p.c)

**Tabella 2. Dati topografici sismica a rifrazione R1 (SM01)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	QA: Quota Assoluta (m.s.l.m)	QR: Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,50	1515152,15	4398264,68	723,01	5,35
G1	0,00	1515149,45	4398265,98	722,72	5,06
G2	3,00	1515146,77	4398267,45	722,50	4,84
G3	6,00	1515144,07	4398268,75	722,21	4,55
S2	7,50	1515142,77	4398269,45	722,08	4,42
G4	9,00	1515141,47	4398270,14	721,96	4,30
G5	12,00	1515138,84	4398271,54	721,71	4,05
G6	15,00	1515136,17	4398272,94	721,52	3,86
S3	16,50	1515134,81	4398273,67	721,40	3,74
G7	18,00	1515133,44	4398274,40	721,28	3,62
G8	21,00	1515130,96	4398275,79	721,09	3,43
G9	24,00	1515128,25	4398277,13	720,87	3,21
S4	25,50	1515126,91	4398277,84	720,76	3,10
G10	27,00	1515125,57	4398278,56	720,65	2,99
G11	30,00	1515122,98	4398279,88	720,42	2,76
G12	33,00	1515120,37	4398281,28	720,20	2,54
S5	34,50	1515119,01	4398281,99	720,08	2,42
G13	36,00	1515117,65	4398282,70	719,97	2,31
G14	39,00	1515115,03	4398284,16	719,76	2,10
G15	42,00	1515112,35	4398285,43	719,55	1,89
S6	43,50	1515111,05	4398286,20	719,46	1,80
G16	45,00	1515109,76	4398286,97	719,37	1,71
G17	48,00	1515107,16	4398288,26	719,17	1,51
G18	51,00	1515104,47	4398289,68	718,96	1,30
S7	52,50	1515103,12	4398290,35	718,85	1,19
G19	54,00	1515101,76	4398291,02	718,74	1,08
G20	57,00	1515099,22	4398292,49	718,56	0,90
G21	60,00	1515096,56	4398293,86	718,31	0,65
S8	61,50	1515095,23	4398294,57	718,22	0,56
G22	63,00	1515093,91	4398295,27	718,12	0,46
G23	66,00	1515091,29	4398296,61	717,93	0,26
G24	69,00	1515088,68	4398298,00	717,73	0,07
S9	70,50	1515091,29	4398296,66	717,66	0,00

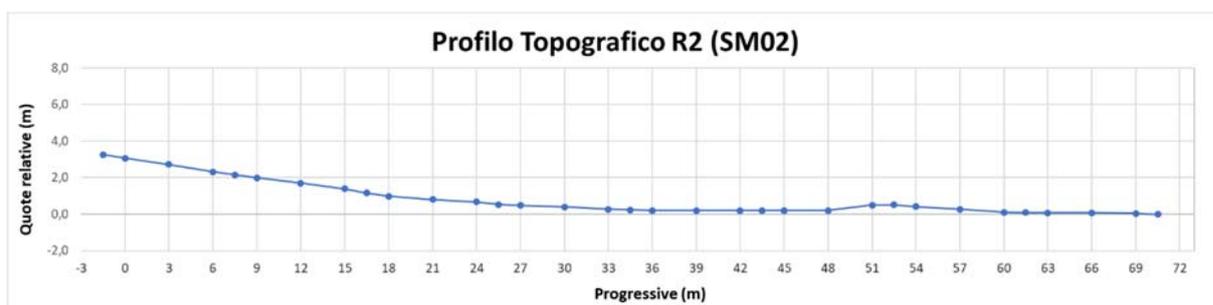
*Profilo topografico R/1*



**Tabella 3. Dati topografici sismica a rifrazione R2 (SM02)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota Assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,50	1516642,51	4398803,45	660,47	3,26
G1	0,00	1516641,50	4398804,80	660,27	3,06
G2	3,00	1516639,82	4398807,05	659,94	2,73
G3	6,00	1516638,00	4398809,51	659,53	2,32
S2	7,50	1516637,07	4398810,74	659,36	2,15
G4	9,00	1516636,14	4398811,97	659,20	1,99
G5	12,00	1516634,56	4398814,03	658,91	1,70
G6	15,00	1516632,55	4398816,43	658,60	1,39
S3	16,50	1516631,63	4398817,62	658,38	1,17
G7	18,00	1516630,71	4398818,81	658,20	0,99
G8	21,00	1516628,93	4398820,92	658,01	0,80
G9	24,00	1516626,92	4398823,30	657,88	0,67
S4	25,50	1516626,86	4398823,36	657,75	0,54
G10	27,00	1516626,80	4398823,43	657,69	0,48
G11	30,00	1516623,12	4398828,12	657,61	0,40
G12	33,00	1516621,25	4398830,46	657,48	0,27
S5	34,50	1516620,14	4398831,52	657,45	0,24
G13	36,00	1516619,03	4398832,59	657,41	0,20
G14	39,00	1516617,24	4398834,63	657,41	0,20
G15	42,00	1516615,19	4398837,11	657,41	0,20
S6	43,50	1516614,32	4398838,34	657,41	0,20
G16	45,00	1516613,44	4398839,58	657,42	0,21
G17	48,00	1516611,42	4398841,81	657,42	0,21
G18	51,00	1516609,45	4398843,82	657,70	0,49
S7	52,50	1516608,43	4398845,00	657,72	0,51
G19	54,00	1516607,40	4398846,18	657,62	0,41
G20	57,00	1516605,67	4398848,57	657,48	0,27
G21	60,00	1516603,64	4398851,00	657,31	0,10
S8	61,50	1516602,77	4398852,09	657,30	0,09
G22	63,00	1516601,89	4398853,18	657,28	0,07
G23	66,00	1516600,17	4398855,51	657,28	0,07
G24	69,00	1516598,16	4398857,93	657,25	0,04
S9	70,50	1516599,88	4398855,61	657,21	0,00

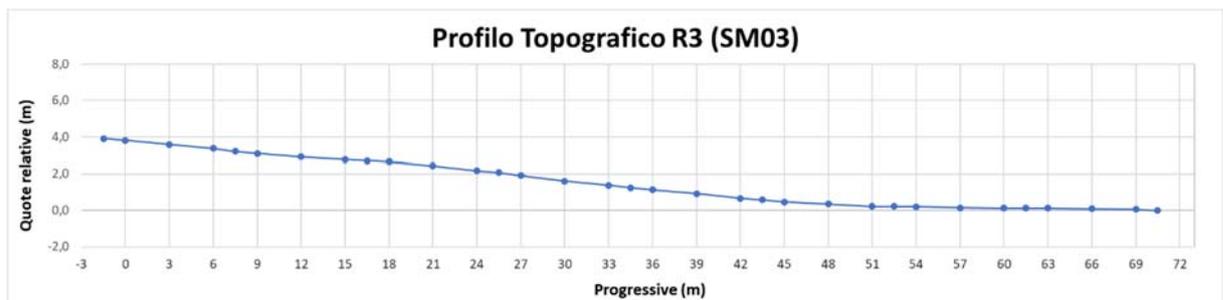
*Profilo topografico R/2*



**Tabella 4. Dati topografici sismica a rifrazione R3 (SM03)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,50	1516101,40	4397462,87	691,95	3,91
G1	0,00	1516101,86	4397465,17	691,86	3,82
G2	3,00	1516102,69	4397468,20	691,62	3,58
G3	6,00	1516103,15	4397470,50	691,41	3,37
S2	7,50	1516103,63	4397472,20	691,25	3,21
G4	9,00	1516104,10	4397473,90	691,15	3,11
G5	12,00	1516104,86	4397476,95	690,96	2,92
G6	15,00	1516105,57	4397479,83	690,81	2,77
S3	16,50	1516105,95	4397481,28	690,75	2,71
G7	18,00	1516106,34	4397482,72	690,69	2,65
G8	21,00	1516107,73	4397485,70	690,48	2,44
G9	24,00	1516108,40	4397489,00	690,22	2,18
S4	25,50	1516108,77	4397490,40	690,12	2,08
G10	27,00	1516109,13	4397491,81	689,96	1,92
G11	30,00	1516109,59	4397494,23	689,65	1,61
G12	33,00	1516110,45	4397497,39	689,41	1,37
S5	34,50	1516110,73	4397498,80	689,29	1,25
G13	36,00	1516111,00	4397500,20	689,18	1,14
G14	39,00	1516111,99	4397503,23	688,96	0,92
G15	42,00	1516113,18	4397506,06	688,71	0,67
S6	43,50	1516113,36	4397507,58	688,62	0,58
G16	45,00	1516113,53	4397509,11	688,51	0,47
G17	48,00	1516114,34	4397512,01	688,39	0,35
G18	51,00	1516114,77	4397514,72	688,26	0,22
S7	52,50	1516115,23	4397515,96	688,26	0,22
G19	54,00	1516115,69	4397517,19	688,26	0,22
G20	57,00	1516116,21	4397520,43	688,19	0,15
G21	60,00	1516117,05	4397523,48	688,17	0,13
S8	61,50	1516117,47	4397524,90	688,17	0,13
G22	63,00	1516117,90	4397526,33	688,17	0,13
G23	66,00	1516118,43	4397529,15	688,14	0,10
G24	69,00	1516119,15	4397531,09	688,10	0,06
S9	70,50	1516119,63	4397532,03	688,04	0,00

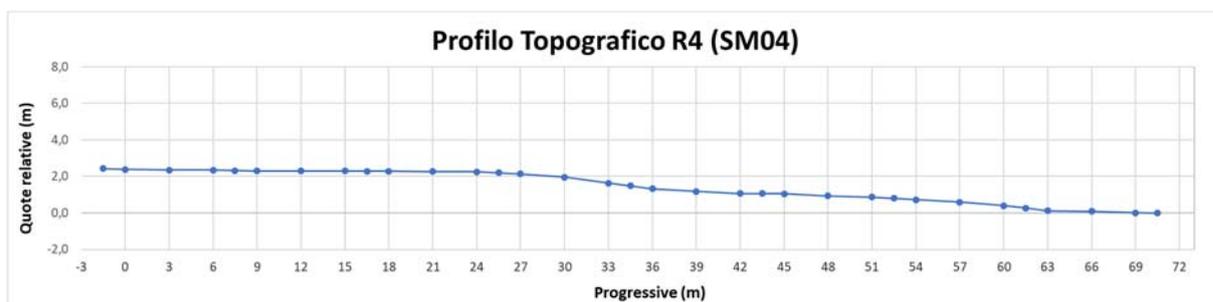
*Profilo topografico R/3*



**Tabella 5. Dati topografici sismica a rifrazione R4 (SM04)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,50	1514802,79	4396786,35	622,62	2,42
G1	0,00	1514803,53	4396783,58	622,58	2,38
G2	3,00	1514804,36	4396780,50	622,55	2,35
G3	6,00	1514805,11	4396777,74	622,54	2,34
S2	7,50	1514805,45	4396776,27	622,51	2,31
G4	9,00	1514805,79	4396774,80	622,50	2,30
G5	12,00	1514806,53	4396771,90	622,49	2,29
G6	15,00	1514807,34	4396769,09	622,49	2,29
S3	16,50	1514807,73	4396767,67	622,48	2,28
G7	18,00	1514808,12	4396766,24	622,48	2,28
G8	21,00	1514808,97	4396763,31	622,46	2,26
G9	24,00	1514809,75	4396760,52	622,45	2,25
S4	25,50	1514810,19	4396758,96	622,39	2,20
G10	27,00	1514810,64	4396757,41	622,34	2,14
G11	30,00	1514811,33	4396754,87	622,16	1,96
G12	33,00	1514812,22	4396751,91	621,83	1,64
S5	34,50	1514812,67	4396750,54	621,68	1,48
G13	36,00	1514813,12	4396749,17	621,53	1,33
G14	39,00	1514813,99	4396746,40	621,38	1,18
G15	42,00	1514814,71	4396743,58	621,27	1,07
S6	43,50	1514815,02	4396742,06	621,25	1,06
G16	45,00	1514815,33	4396740,54	621,24	1,04
G17	48,00	1514816,02	4396737,70	621,13	0,93
G18	51,00	1514816,63	4396734,74	621,07	0,88
S7	52,50	1514817,06	4396733,35	621,00	0,80
G19	54,00	1514817,50	4396731,97	620,92	0,72
G20	57,00	1514817,96	4396729,09	620,78	0,59
G21	60,00	1514818,76	4396726,22	620,59	0,39
S8	61,50	1514819,10	4396724,72	620,46	0,26
G22	63,00	1514819,44	4396723,22	620,32	0,12
G23	66,00	1514820,18	4396720,31	620,28	0,08
G24	69,00	1514821,28	4396716,31	620,21	0,01
S9	70,50	1514820,54	4396719,22	620,20	0,00

*Profilo topografico R/4*



**STENDIMENTO M1 (SM01)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota Assoluta (m.s.l.m)
G1	0,00	1515149,45	4398265,98	722,72
G24	69,00	1515088,68	4398298,00	717,73

**STENDIMENTO M2 (SM02)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota Assoluta (m.s.l.m)
G1	0,00	1516641,50	4398804,80	660,27
G24	69,00	1516598,16	4398857,93	657,25

**STENDIMENTO M3 (SM03)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota Assoluta (m.s.l.m)
G1	0,00	1516101,86	4397465,17	691,73
G24	69,00	1516119,15	4397531,09	688,10

**STENDIMENTO M4 (SM04)**

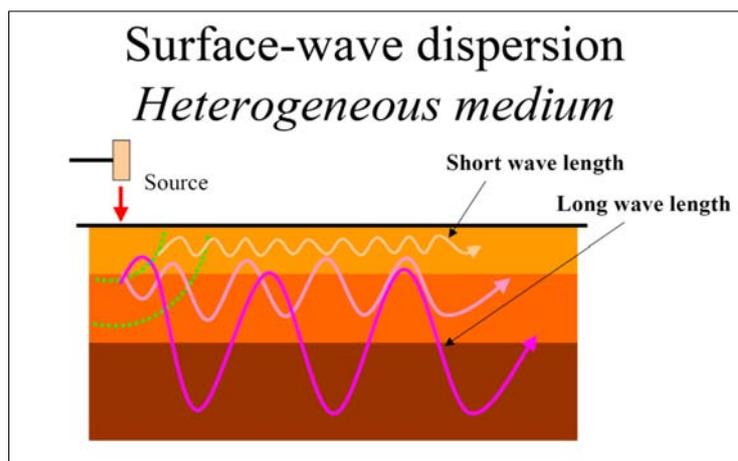
Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota Assoluta (m.s.l.m)
G1	0,00	1514803,53	4396783,58	622,46
G24	69,00	1514821,28	4396716,31	620,21

## 4 INDAGINI SISMICHE: MASW

### 4.1 Tecnica e parametri utilizzati

“Il metodo MASW (Multichannel Analysis of SurfaceWaves) è una tecnica di indagine non invasiva, che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs, basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidezza della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, ovvero onde con diverse lunghezze d'onda si propagano a diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.” (da *Caratterizzazione sismica dei suoli con il metodo MASW (Multichannel Analysis of SurfaceWaves – V. Roma 2006)*). L'indagine svolta ha visto l'applicazione della tecnica M.A.S.W. di tipo attivo, ossia misura del comportamento dei terreni a seguito di un'energizzazione.



da SAGEEP2003

L'indagine si sviluppa mediante la materializzazione sul terreno di una linea retta mediante la posa di una fettuccia metrica. A seguire vengono posizionati i geofoni intervallati ad una distanza pari a 3,0 m e 2,5 in funzione anche della disponibilità di spazio. Esternamente alla stesa geofonica, da ora base sismica, a distanza di interesse che può essere pari ad un multiplo della distanza intergeofonica ma anche variabile (in funzione delle disponibilità di cantiere), sia in andata (ovvero in prossimità del geofono 1) che al ritorno (ovvero all'ultimo geofono posizionato sulla base sismica) vengono svolte delle energizzazioni mediante massa battente pari a kg 10,0. Nel caso in esame, sono state svolte le energizzazioni in “andata” e “ritorno” con distanza dal geofono 1 e dal geofono 24 crescente e pari a multipli della distanza intergeofonica (v. schema).

Il metodo risulta efficace se la base sismica è ubicata su piano a pendenza costante e per una stratificazione piano parallela al piano topografico. Al fine di svolgere al meglio la campagna geofisica M.A.S.W., è utile che lo sviluppo lineare della base sismica sia limitata in lunghezza secondo i siti.

La maggior profondità di caratterizzazione raggiunta è legata alla minor frequenza registrata. Come già indicato nella figura, una frequenza alta caratterizza gli strati superficiali. La registrazione delle frequenze minori è destinata ai geofoni più lontani dalla sorgente.

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

**Schema 1.** Schema geometrico di acquisizione dei dati per gli stendimenti di lunghezza L=69,0 m



#### 4.2 **Strumentazione utilizzata**

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

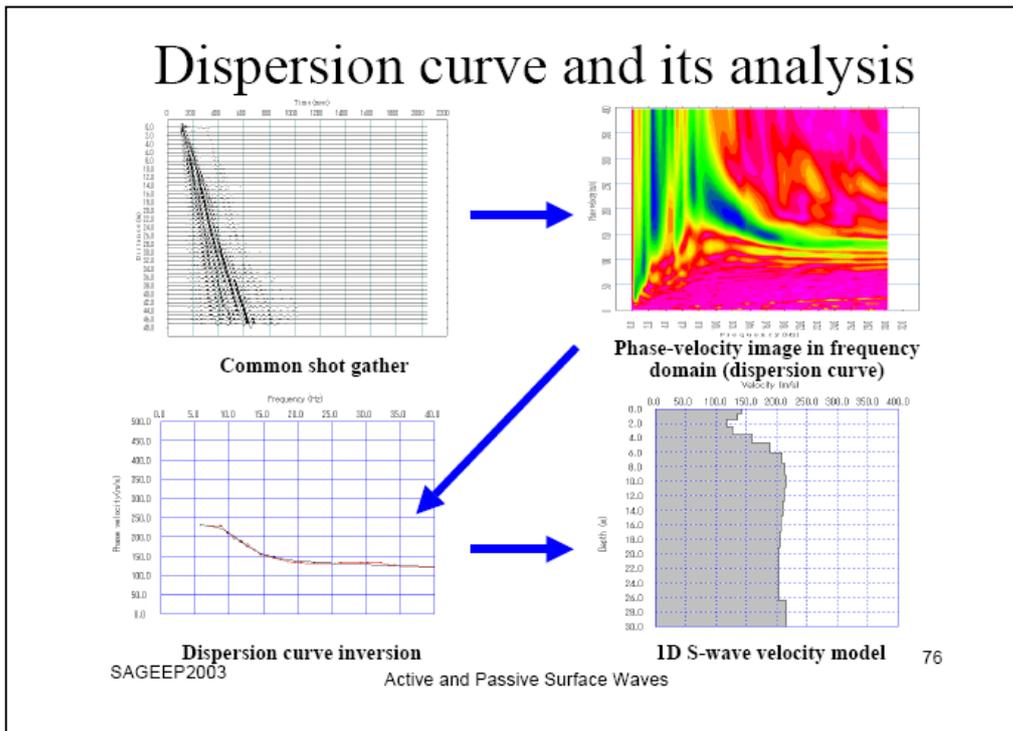
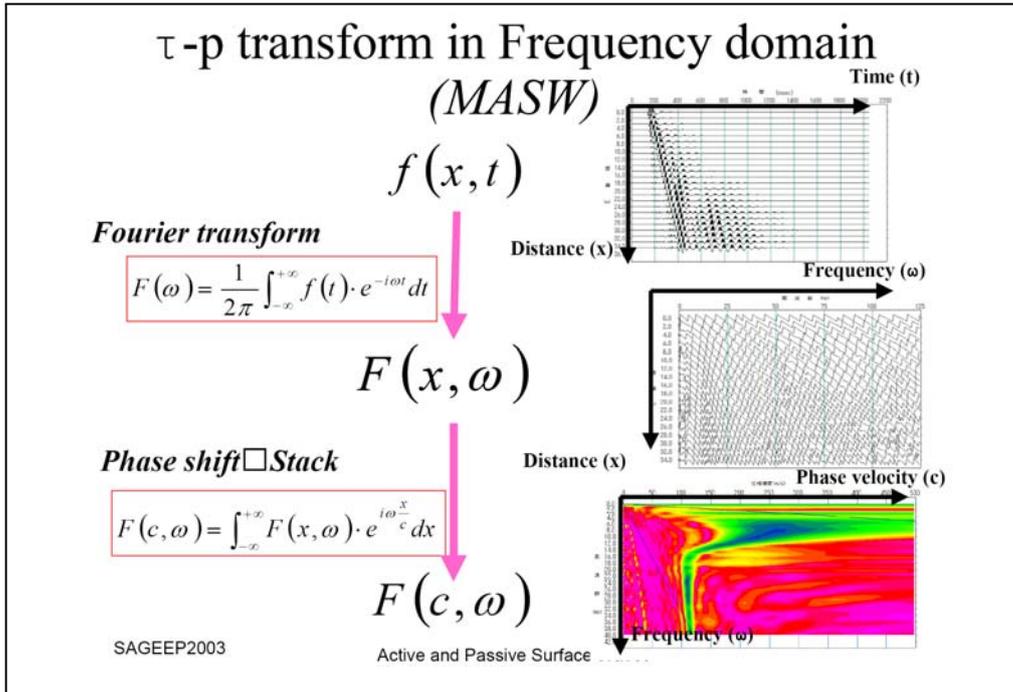
#### 4.3 **Elaborazione dei dati**

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

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

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

A seguire è indicato il procedimento di elaborazione che ha prodotto il profilo di velocità grazie all'impiego del software ZondST2D.



#### 4.4 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)

Le “Norme Tecniche per le Costruzioni” – Decreto del 19/01/2018 definiscono le regole per progettare l’opera sia in zona sismica che in zona non sismica.

Per la valutazione delle azioni sismiche di progetto deve essere valutata l’influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto nel suolo superficiale.

Ai fini della definizione dell’azione sismica di progetto, l’effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3 del citato Decreto. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II del suddetto decreto, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio,  $V_s$ . I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità  $V_s$  per l’approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2 del Decreto.

I valori di  $V_s$  sono ottenuti mediante specifiche prove, tra le quali le MASW costituiscono la metodologia maggiormente adoperata.

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

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

con:

$h_i$  spessore dell’*i*-esimo strato;

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

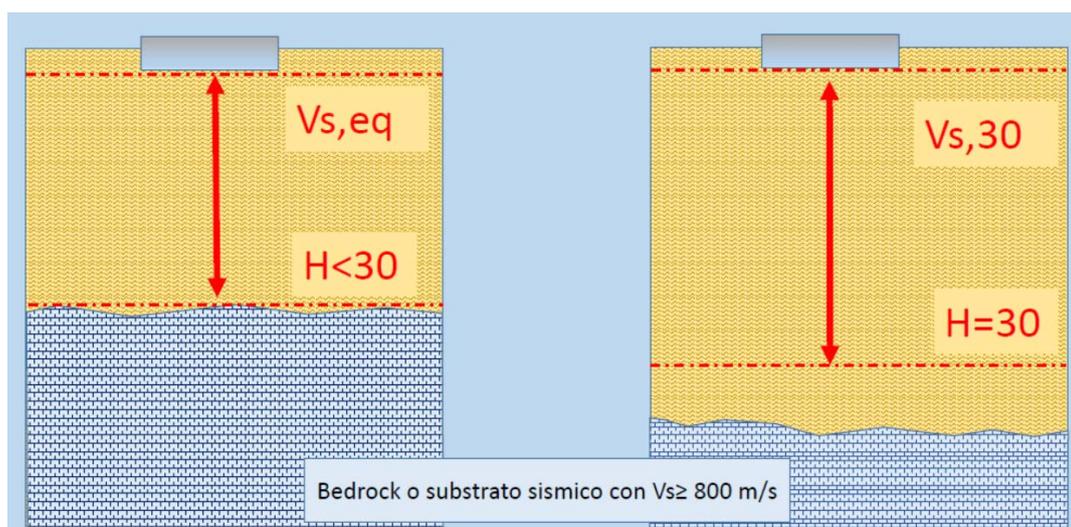
$N$  numero di strati;

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

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

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  $V_{s,30}$ , ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Schema di Calcolo delle  $V_{s,eq}$  e delle  $V_{s,30}$



Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II.

Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle NTC 2018. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

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

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

#### 4.5 VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI

Nella seguente tabella si riportano i valori di velocità delle onde P ed S dei principali litotipi riferibili anche al contesto geologico in esame (Fonte: Hearey e Brooks 1991, Bala et al 2005, Corrao e Coco 2006, bibliografia specialistica reperibile in rete).

Litotipi	Vp [m/s] min-max	Vs [m/s] min-max
<b>TERRENI E ACQUA</b>		
Alluvioni	400 - 2000	200 - 800
Sabbia asciutta	200 - 1000	80 - 400
Sabbia satura (in funzione anche del grado di saturazione)	600 - 2300	250 - 450
Sabbia siltosa	600 - 1900	200 - 600
Sabbia e ghiaia	300 - 1800	300 - 600
Limo	650 - 1250	240 - 480
Argilla	1000 - 2500	300 - 600
Argilla sabbiosa	600 - 2500	200 - 450
Acqua	1450 - 1500	0
<b>ROCCE SEDIMENTARIE</b>		
Argillite	2100 - 4400	550 - 2100
Arenaria	1500 - 6000	950 - 3100
Arenaria fratturate	800 - 2100	360 - 950
Calcarea	2000 - 7000	1000 - 3300
Calcarea fratturato	750 - 1500	330 - 1000
Calcarenite	1400 - 4400	800 - 2500
Calcarenite fratturata	600 - 1300	330 - 800
Marna	1500 - 4500	600 - 1.500
<b>ROCCE IGNEE</b>		
Basalto	1800 - 5000	1000 - 3000
Basalto fratturato	950 - 1350	480 - 700
Granitoidi	1600 - 5000	900 - 3000
Granitoidi fratturati	1000 - 1750	500 - 900
Piroclastite coerente	750 - 2500	350 - 1100
Piroclastite incoerente	350 - 1000	160 - 450

In particolare si ricorda che le velocità delle onde P misurate per terreni perfettamente saturi ( $S_r = 100\%$ ) dipendono talora in maniera decisiva dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale e perciò tale valore può non essere rappresentativo delle proprietà meccaniche del materiale in questione. Invece le velocità delle onde S sono caratteristiche delle vibrazioni trasmesse prevalentemente dal solo scheletro solido e perciò rappresentative delle proprietà meccaniche del terreno. Ne consegue che per alcuni terreni al di sotto della falda le uniche onde in grado di fornire informazioni precise sulla rigidità del terreno sono quelle di taglio (S).

#### 4.6 DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE

Di seguito si indicano le correlazioni bibliografiche che possono essere utilizzate per il calcolo dei parametri di deformazione dinamici calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input  $V_p$ ,  $V_s$  e densità per ciascun sismostrato definito dalle indagini geofisiche.

$$\text{Coefficiente di Poisson } \nu = \frac{V_p^2 - 2 V_s^2}{2 (V_p^2 - V_s^2)}$$

$$\text{Modulo di Young dinamico } E_d = \gamma V_s^2 [(3V_p^2 - 4 V_s^2)/(V_p^2 - V_s^2)]$$

$$\text{Modulo di taglio (rigidità) } G_0 = \gamma V_s^2$$

$$\text{Modulo di comprimibilità o di Bulk } K = \gamma (V_p^2 - 4/3 V_s^2)$$

##### Determinazione del modulo di Young statico $E_s$

Per la determinazione del modulo di Young statico  $E_s$  dal modulo dinamico  $E_{din}$  si può applicare la nota relazione proposta da Rzhovsky e Novik (1971) valida per i moduli misurati in MPa o Kg/cm<sup>2</sup>:

$$E_{stat} = \frac{E_{din} - 0.97}{8.3}$$

Per gli ammassi rocciosi la bibliografia specialistica suggerisce di applicare un coefficiente pari a 0,8-1,0 per la roccia integra e un coefficiente via via più basso per quelle fratturate in relazione al grado di fratturazione.

$$E_{stat} = E_{din} \times (0.3/1.0)$$

Si sottolinea tuttavia come i valori ottenuti con la suddetta formulazione sia un modulo di elasticità e quindi non può essere utilizzato per determinare ad esempio cedimenti di fondazione quando il carico delle fondazioni dà luogo a elevate deformazioni (superiori al limite di elasticità) poiché in quei casi la componente plastica è predominante su quella elastica.

##### Correlazioni con $N_{spt}$ e parametri geotecnici

Nella letteratura specializzata sono ormai reperibili moltissime correlazioni tra il numero di colpi ( $N_{spt}$ ) del Penetrometro Standard e la velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ). Le principali correlazioni sono di tipo esponenziale, con  $N_{spt} = (V_s/\alpha)^\beta$  con i coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  variabili in funzione del tipo di terreno. Si ricorda che il numero di colpi di cui si parla è quello necessario per far avanzare di 30 cm nel terreno la punta del campionatore Raymond standard.

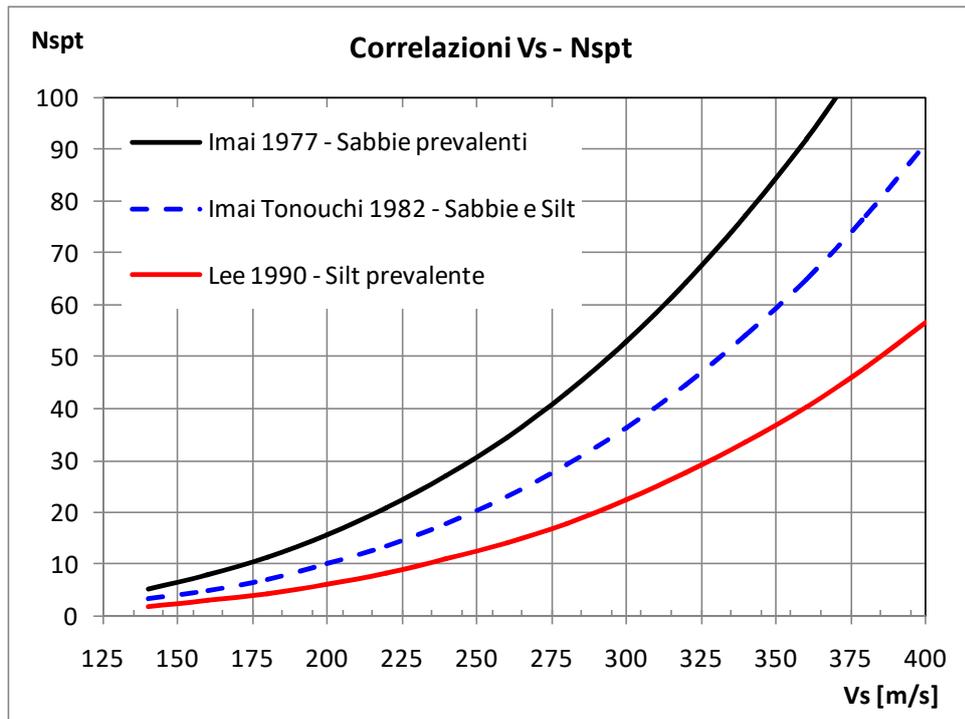
A tale scopo si illustrano le correlazioni proposte da Imai 1977, Imai e Tonuchi (1982) e Lee (1990) valide per tre differenti tipologie di terreni che caratterizzano in genere tutti i terreni:

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

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{97,0}\right)^{3,184} \text{ valida per i terreni misti sabbioso-siltosi - Imai e Tonuchi (1982)}$$

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{114,43}\right)^{3,226} \text{ valida per terreni prevalentemente fini/siltosi - Lee (1990)}$$

*Dove:  $N_{spt}$  = numero di colpi del Penetrometro Standard e  $V_s$  = Velocità delle onde di taglio*



Noto il valore di Nspt si calcolano i seguenti parametri geotecnici dei terreni:

Parametri geotecnici	Metodologie – Relazioni
Resistenza al taglio $\phi$	<p><u>Terreni sabbiosi</u> Entro i 6 m di profondità- Peck-Hanson&amp;Thornburn, <math>\phi = 0,28 Nspt + 27,2</math> Oltre i 6 m di profondità- Japanese National Railway, <math>\phi = 0,30 Nspt + 27</math></p> <p><u>Terreni: sabbie fini o limose</u> <math>\phi = \sqrt{15Nspt} + 15</math></p>
Modulo di deformazione $E$ (o di Young)	<p><b>Schmertmann</b> (valido per sabbie e terreni prevalentemente sabbiosi) <math>E(Kg/cm^2) = 2B Nspt</math> dove <math>B=4</math> (sabbia fine), <math>B=6</math> (sabbia media), <math>B=10</math> (sabbia grossolana)</p> <p><b>D'Appolonia et Alii.</b> (valido per sabbia+ghiaia e sabbie sovraconsolidate) <math>E (Kg/cm2) = 7,71 Nspt + 191</math> (ghiaia + sabbia)</p> <p><b>Tornaghi</b> (valido per sabbia + ghiaia) <math>E (MPa) = B \sqrt{Nspt}</math> (<math>B=7</math> MPa)</p>

## 5 SISMICA A RIFRAZIONE

In ambito d'indagini indirette l'esplorazione geofisica di sismica a rifrazione in onde P risulta tra le metodologie più affermate e meglio sperimentate. Il metodo si basa sugli effetti di rifrazione del segnale sismico in corrispondenza dell'interfaccia tra un mezzo soprastante a velocità sismica minore rispetto ad uno strato sottostante al primo con velocità sismica inferiore.

La tecnica di prospezione sismica a rifrazione consiste nella misura dei tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in un punto in superficie (punto di energizzazione/sparo), in corrispondenza di una molteplicità di ricevitori (geofoni) disposti allineati sulla superficie topografica.

Varie metodologie di interpretazione si sono susseguite nel tempo, passando dalle valutazioni di spessori e velocità in funzione del tempo all'intercetta fino a giungere alle più classiche interpretazioni mediante il General Reciprocal Method di Palmer '72.

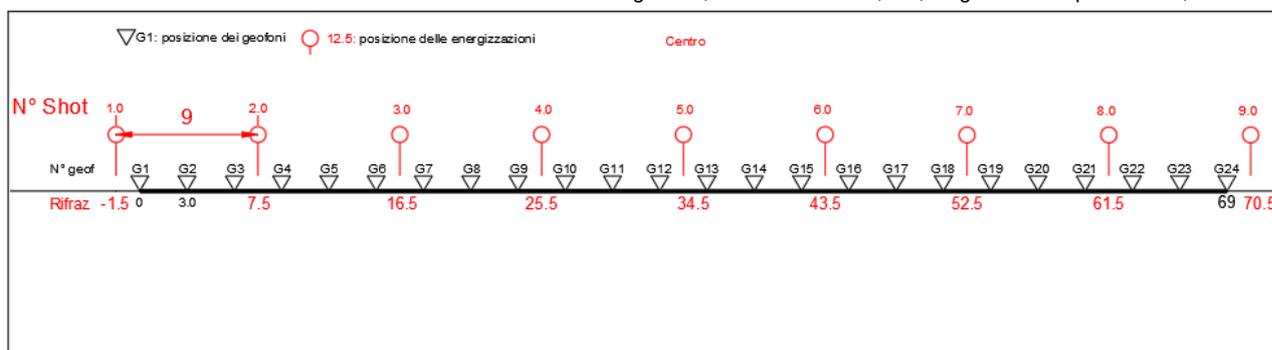
Lo studio della propagazione delle onde sismiche consente di valutare le proprietà fisico - meccaniche dei terreni e il grado di addensamento e/o la compattezza dei materiali da queste attraversati.

Le profondità raggiunte sono al massimo la metà della distanza compresa tra lo shot esterno e l'ultimo geofono della stesa sismica sviluppata. È comunque generalmente considerato che la profondità esplorata non superi 1/3 dello sviluppo geometrico sopradescritto. La capacità risolutiva in termini di spessore degli strati sismici viene ad essere valutato in circa il 25/30% della distanza geofonica.

Nel caso in esame, in funzione della lunghezza degli stendimenti sono state eseguite 9 energizzazioni-shot rispettivamente per tutti gli stendimenti, al fine di meglio descrivere la geometria degli orizzonti rifrattori lungo l'intera base sismica come meglio specificato nello schema di seguito rappresentato.

### Schema delle acquisizioni di sismica a rifrazione in onde P

**Schema 3:** Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 m



### 5.1 Strumentazione utilizzata

Per l'indagine eseguita è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello DoReMi a 24 bit, prodotto dalla SARA electronics instruments, con frequenza di campionamento 5000 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della SARA electronics con frequenza propria di 10 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24 per tutti gli stendimenti.

Per l'energizzazione delle onde P ci siamo avvalsi di una mazza battente da 10,0 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2,0 kg.

La quota relativa di ciascun geofono-shot è stata rilevata tramite GPS differenziale STONEX S70G in modo da poter ricostruire la morfologia del terreno e utilizzarla in fase di elaborazione dei dati acquisiti.

## 5.2 Elaborazione dei dati

I dati delle prospezioni sono costituiti dalla geometria d'acquisizione (posizioni e quote relative dei punti scoppio e dei geofoni) e dai tempi di primo arrivo delle onde elastiche di compressione (onde P), determinati manualmente sulle registrazioni riprodotte a schermo (picking dei primi arrivi).

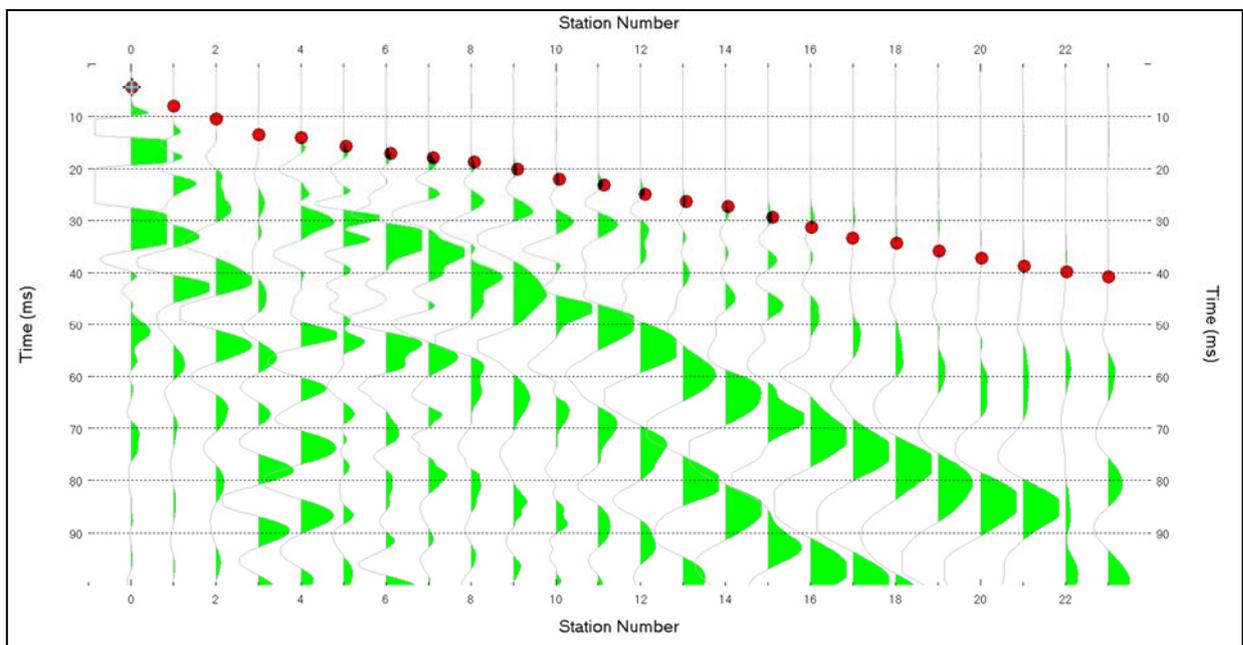
La qualità dei dati è risultata nel complesso buona e il picking è stato realizzato facilmente per tutte le basi sismiche. Nelle figure che seguono si riportano alcune schermate delle operazioni eseguite.

L'inversione dei dati è stata eseguita secondo i criteri della tomografia sismica, mediante apposito software specialistico basato su tecniche di ottimizzazione non lineare. La sovrapposizione tra dromocrone sperimentali e calcolate ha portato a valori ottimi con valori dell'RMS<5%.

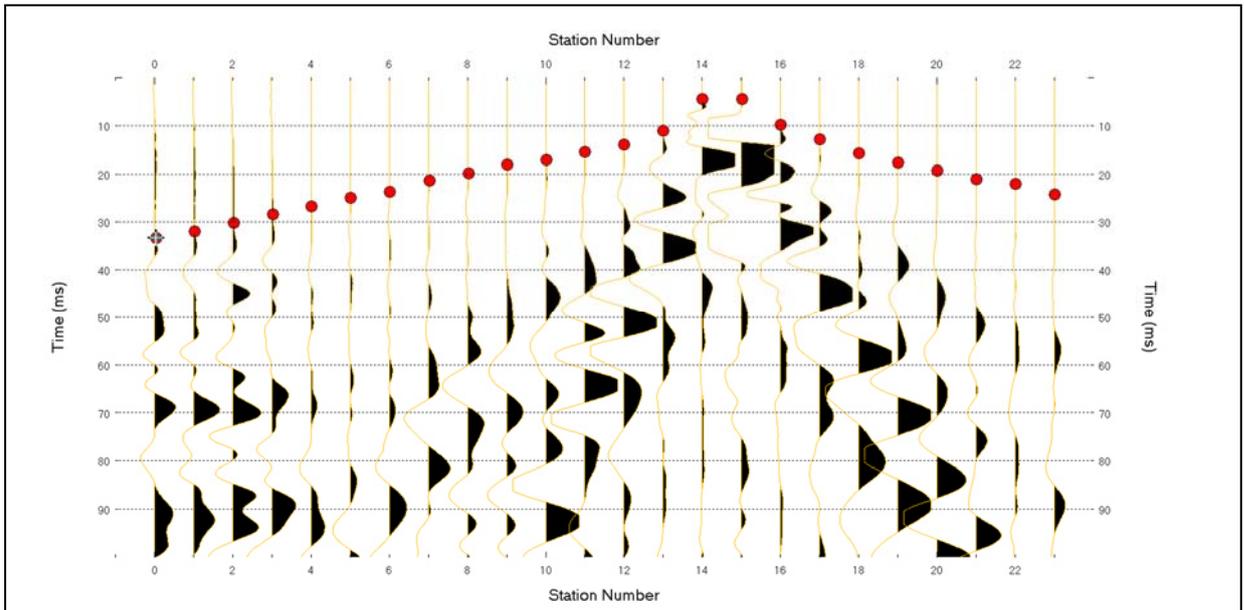
In particolare, l'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione è stata eseguita secondo il metodo tomografico impiegando il software Rayfract4.01, che parte da un modello iniziale generato con la tecnica Deltat-V. Successivamente viene effettuata l'inversione iterativa del modello con la tecnica WET (Wavepath Eikonal Traveltime tomography processing) che analizza la propagazione dei vari fronti d'onda generati nei punti di tiro fino ad ogni geofono.

Il modello stratigrafico ottenuto come insieme di elementi caratterizzati da una specifica velocità viene quindi rappresentato mediante il contour a linee di isovelocità. La colorazione dei vari elementi secondo una scala cromatica riferita a specifici intervalli di velocità facilita l'immediata visione dei risultati

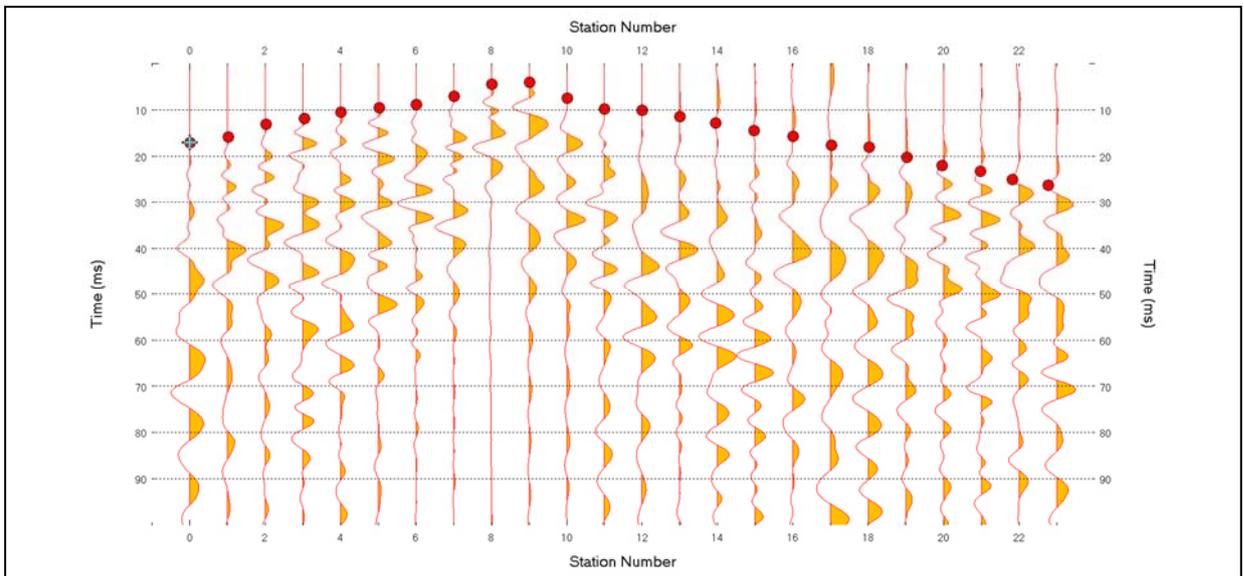
**Figura 1:** Sismogramma shot a -1,5 m di R1 (SM01)



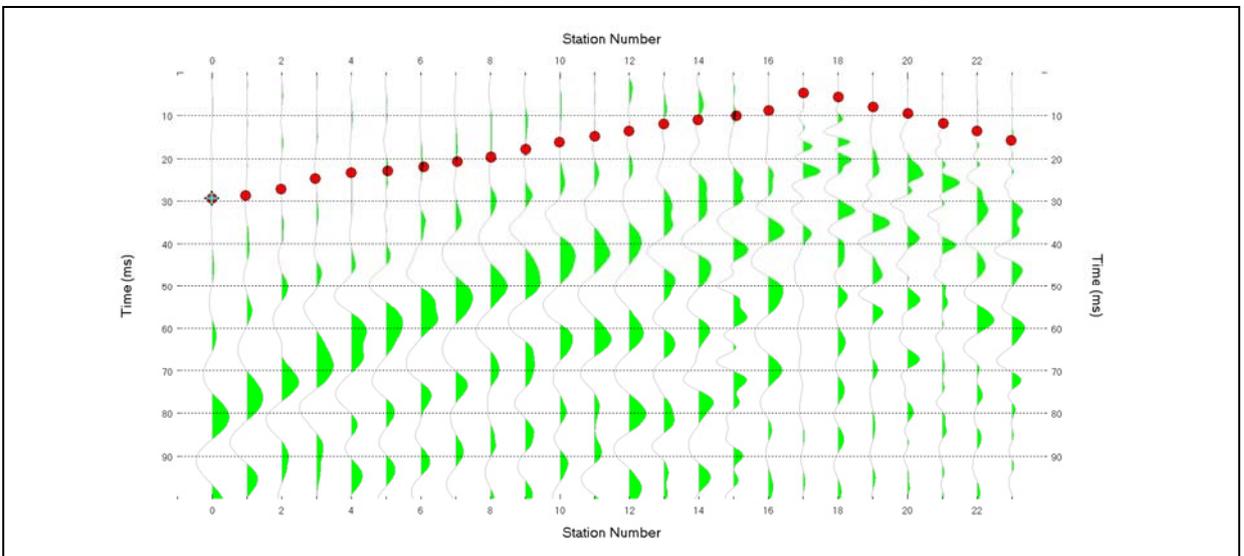
**Figura 2:** Sismogramma shot a 43,5 m di R1 (SM01)



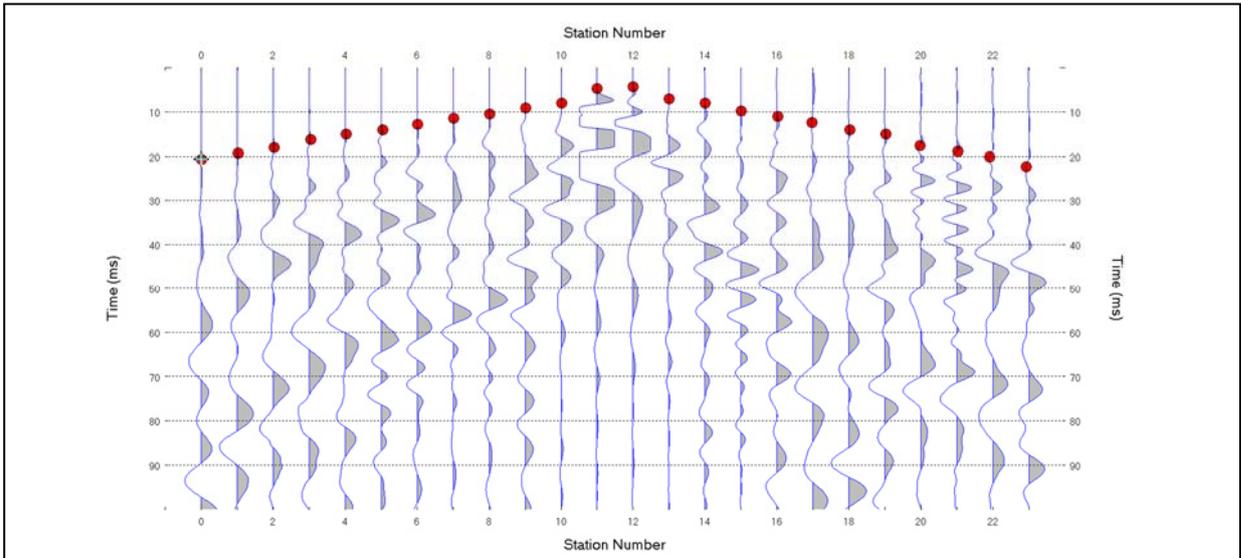
**Figura 3:** Sismogramma shot a 25,5 m di R2 (SM02)



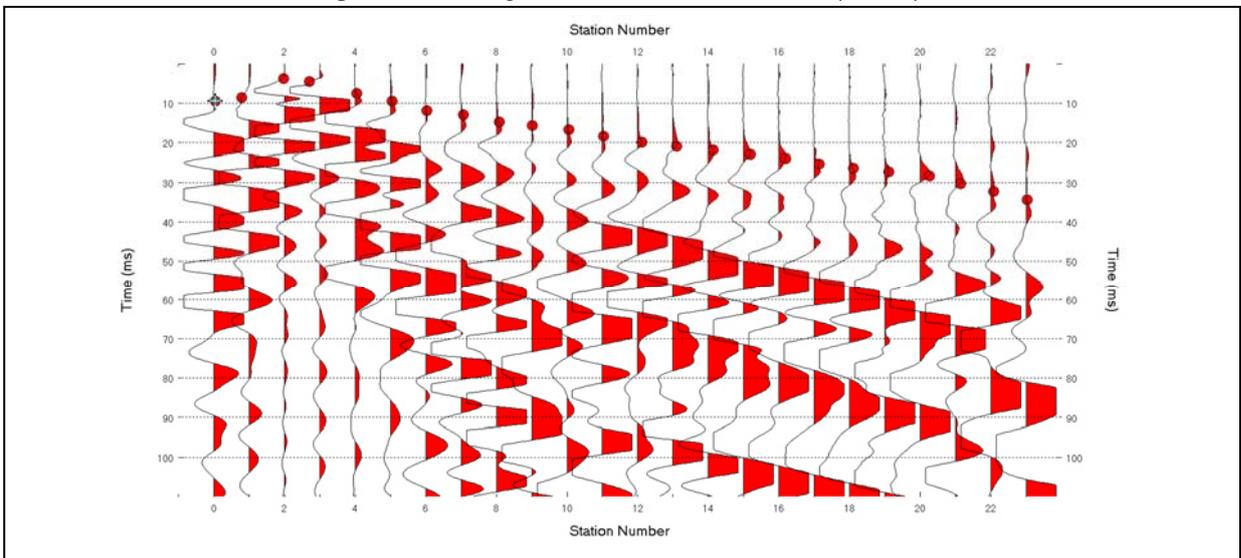
**Figura 4:** Sismogramma shot a 52,5 m di R2 (SM02)



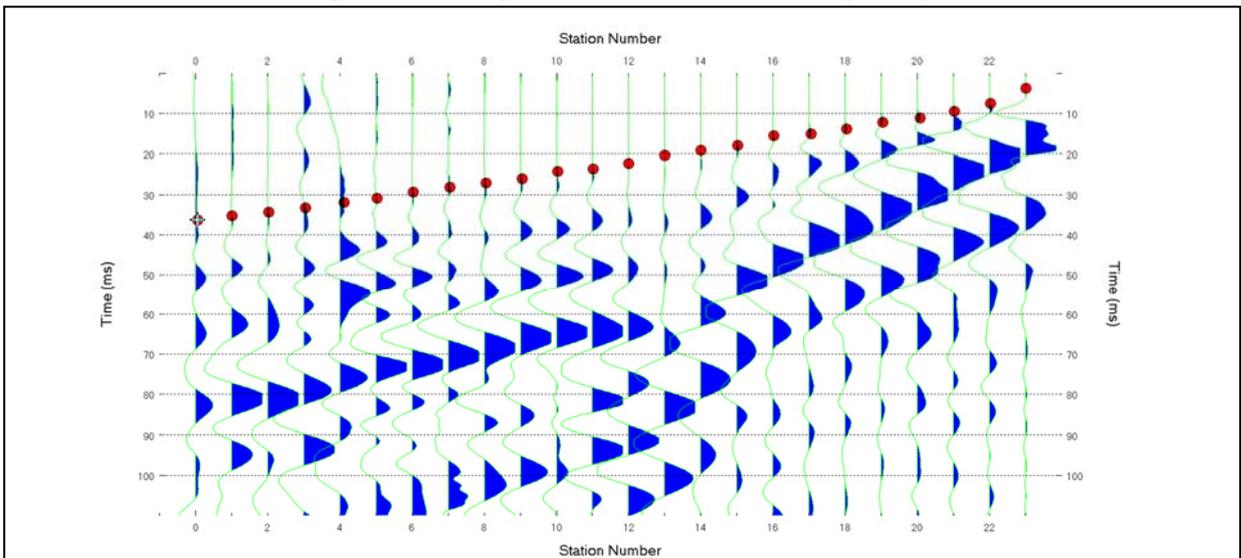
**Figura 5:** Sismogramma shot a 34,5 m di R3 (SM03)



**Figura 6:** Sismogramma shot a 7,5 m di R4 (SM04)



**Figura 6:** Sismogramma shot a 70,5 m di R4 (SM04)



### 5.3 Valutazione della escavabilità delle rocce

Per escavabilità o *rippabilità* si intende la facilità con cui un terreno o una roccia possono essere scavati meccanicamente e dipende, secondo la letteratura tecnica, da diversi fattori della roccia quali la resistenza a compressione monoassiale, il grado di fratturazione, la spaziatura delle discontinuità, la velocità di propagazione delle onde sismiche, le caratteristiche delle discontinuità (apertura, continuità, grado di alterazione... etc) nonché dalle caratteristiche proprie dei mezzi di scavo.

Il *ripping* è di solito eseguito da un mezzo meccanico (dozer) opportunamente attrezzato e le cui dimensioni sono determinate dalla durezza e compattezza dei materiali da abbattere. La roccia che risultasse troppo difficile per essere strappata a causa della mancanza di superfici interne di debolezza, viene generalmente frammentata con altri metodi (tra cui l'uso del martello demolitore e l'uso dell'esplosivo) e per questo definita "roccia da mina".

In genere, la rippabilità può essere desunta direttamente dal valore della velocità delle onde sismiche superficiali misurate in sito attraverso la prospezione sismica a rifrazione (onde P, longitudinali). Tale metodo risulta forse il più speditivo ed esaustivo poiché indirettamente tiene conto anche dei altri fattori e caratteristiche della roccia sopracitati.

In letteratura sono disponibili numerosi studi volti a correlare la velocità delle onde sismiche con le caratteristiche di scavabilità e rippabilità degli ammassi rocciosi. Il più conosciuto è quello sintetizzato nella tabella riportata nel "*Handbook of Ripping*"<sup>1</sup> della Caterpillar che però generalmente risulta eccessivamente "ottimista", nel senso che, ad esempio, ammassi rocciosi con velocità sino a 2200 m/s sono definiti *rippabili*, quando in realtà richiedono l'uso di martello demolitore.

Una ricerca approfondita nella letteratura internazionale, ha permesso di rintracciare correlazioni alternative che, nella pratica risultano più realistiche, soprattutto considerate le attrezzature normalmente utilizzate nelle nostre zone. Esse sono riportate nelle tabelle seguenti e sono quelle utilizzate per le valutazioni successive, permettendo la divisione degli ammassi rocciosi presenti nelle aree indagate nelle seguenti classi:

- A.  $V_p < 600$  m/s: ammasso roccioso scavabile;
- B.  $600 < V_p < 1000$  m/s: ammasso facilmente rippabile;
- C.  $1000 < V_p < 1400$  m/s: ammasso rippabile con difficoltà;
- D.  $V_p > 1400$  m/s: ammasso non rippabile (indispensabile l'uso di martello demolitore).

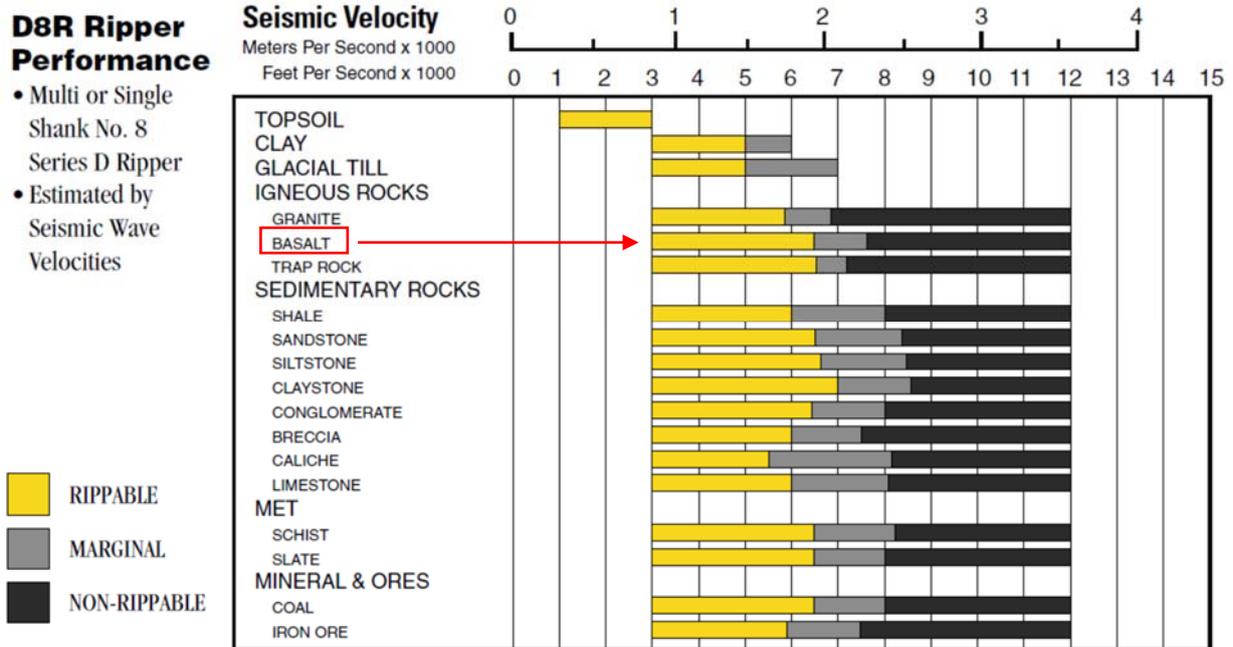
A titolo esaustivo si riportano anche la correlazione utilizzata dal **California Department of Transportation**, che risulta *leggermente più ottimista in termini di scavabilità*:

Velocity (m/s)	Rippability
< 1050	Easily Ripped
1050 – 1500	Moderately Difficult
1500 – 2000	Difficult Ripping / Light Blasting
> 2000	Blasting Required

<sup>1</sup>twelfth edition - February 2000 - Caterpillar inc- Peoria, Illinois

nonché la correlazione edita dalla *Caterpillar* valida per la macchina operatrice D8 Ripper e relativa a varie tipologie di roccia.

Sulla base dei dati bibliografici emerge che le aree in esame sono caratterizzate dalla presenza di rocce di origine basaltica sottostanti dei modesti spessori di coltri eluvio-colluviali, e/o da rocce di natura calcarea; dall'esame della tabella sotto riportata e relativamente ai **basalti** per velocità di **1800 m/s** corrispondono materiali già difficilmente rippabili, mentre per velocità oltre **2250 m/s** il mezzo meccanico D8 non è più sufficiente, per cui sarà necessario l'utilizzo di un mezzo meccanico più grande (D9 o D10) o l'utilizzo di altri metodi di abbattimento quali la demolizione meccanica, l'uso di micro-cariche o in estrema ipotesi, se le strutture esistenti lo permettono, l'uso dell'esplosivo



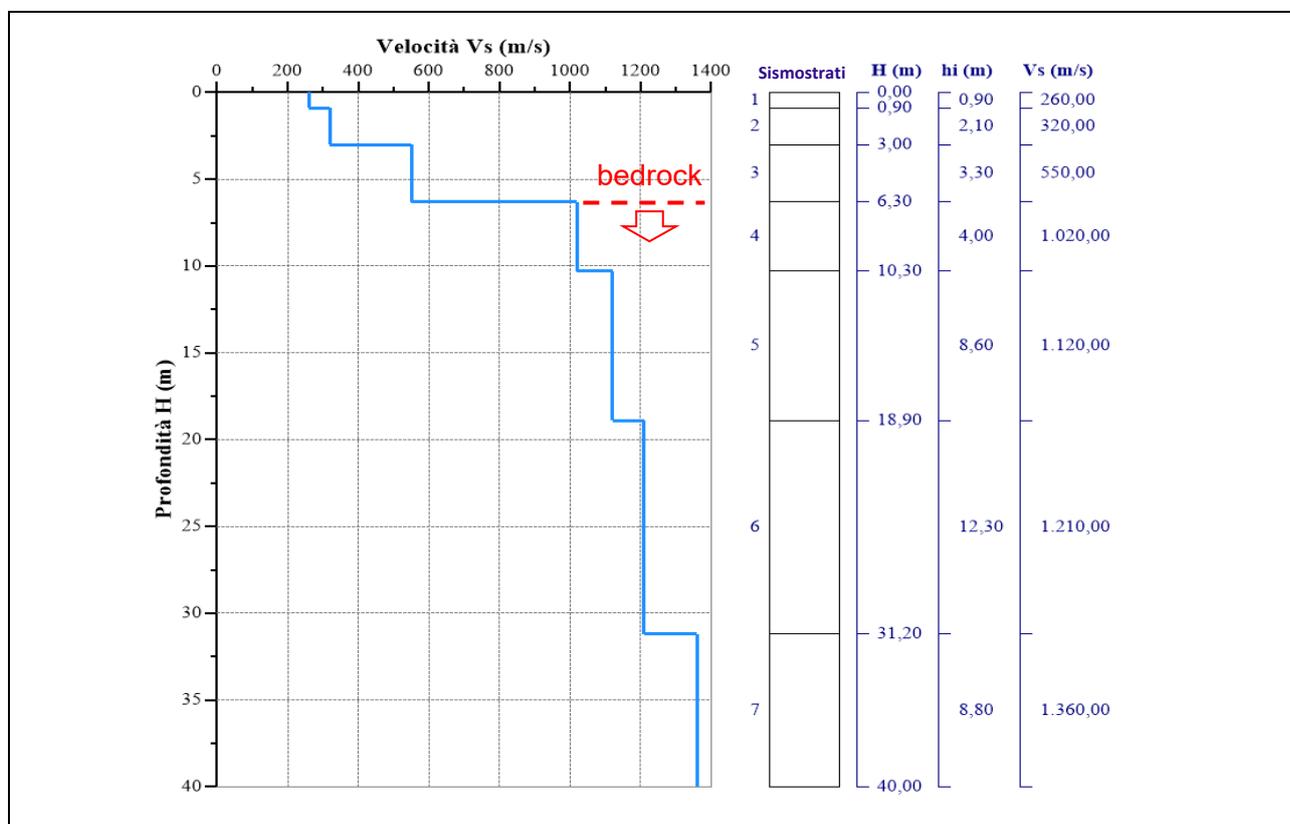
## 5.4 RISULTATI INDAGINI DEL SITO SM01

### 5.4.1 MASW M1 (SM01)

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs della sezione M1, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0 - 0,9	1° sismostrato con Vs di <b>260 m/s</b> Terre poco addensate
0,9 - 3,0	2° sismostrato con Vs di <b>320 m/s</b> Terre mediamente addensate
3,0 - 6,3	3° sismostrato con Vs di <b>550 m/s</b> Terre da mediamente addensate a molto addensate
6,3 - 10,3	4° sismostrato con Vs di <b>1020 m/s</b> Substrato roccioso intensamente fratturato
10,3 - 18,9	5° sismostrato con Vs di <b>1120 m/s</b> Substrato roccioso da intensamente a moderatamente fratturato
18,9 - 31,2	6° sismostrato con Vs di <b>1210 m/s</b> Substrato roccioso da leggermente fratturato a sano
31,2 - 40,0	7° sismostrato con Vs di <b>1360 m/s</b> Substrato roccioso sano

#### MASW M1-PROFILO Vs



#### Sismostratigrafia e calcolo Vs eq

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	Vs (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	Hi/Vs (s)
1	0,90	0,90	260,00	0,90	0,90	0,00346
2	3,00	2,10	320,00	3,00	2,10	0,00656
3	6,30	3,30	550,00	6,30	3,30	0,00600
4	10,30	4,00	1020,00	10,30	4,00	
5	18,90	8,60	1120,00	18,90	8,60	
6	31,20	12,30	1210,00	30,00	11,10	
7	40,00	8,80	1360,00	0,00	0,00	

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

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

con:

$h_i$  spessore dell'i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle  $V_s$  si pone come profondità del substrato **6,30 m** ( $V_s > 800$  m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **6,30 m** di profondità dal p.c. è pari a:  $V_{s,eq} = 6,30/0,0160 = 393,16$  m/s che dà luogo ad una categoria B, ossia:

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

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

Nella **tabella 6** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input  $V_s$ , e  $V_p$  e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

**Tabella 6.** Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità $\gamma$	$V_p$	$V_s$	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico $E_d$	Modulo di Young statico $E_d$	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0 - 0,9	terre	1.800	520	260	0,33	324	39	118	324
2	0,9 - 3,0	terre	2.000	640	320	0,33	549	66	206	549
3	3,0 - 6,3	terre	2.100	1.100	550	0,33	1.697	204	637	1.697
4	6,3 - 10,3	12%	2.200	2.040	1020	0,33	6.100	732	2.285	6.100
5	10,3 - 18,9	15%	2.350	2.240	1120	0,33	7.865	1.180	2.952	7.865
6	18,9 - 31,2	22%	2.400	2.420	1210	0,33	9.375	2.063	3.511	9.375
7	31,2 - 40,0	25%	2.450	2.720	1360	0,33	12.082	3.020	4.531	12.082

\*CT: coefficiente di trasformazione (per la roccia)

#### Indicazioni per la determinazione di $N_{spt}$ e parametri geotecnici

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

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

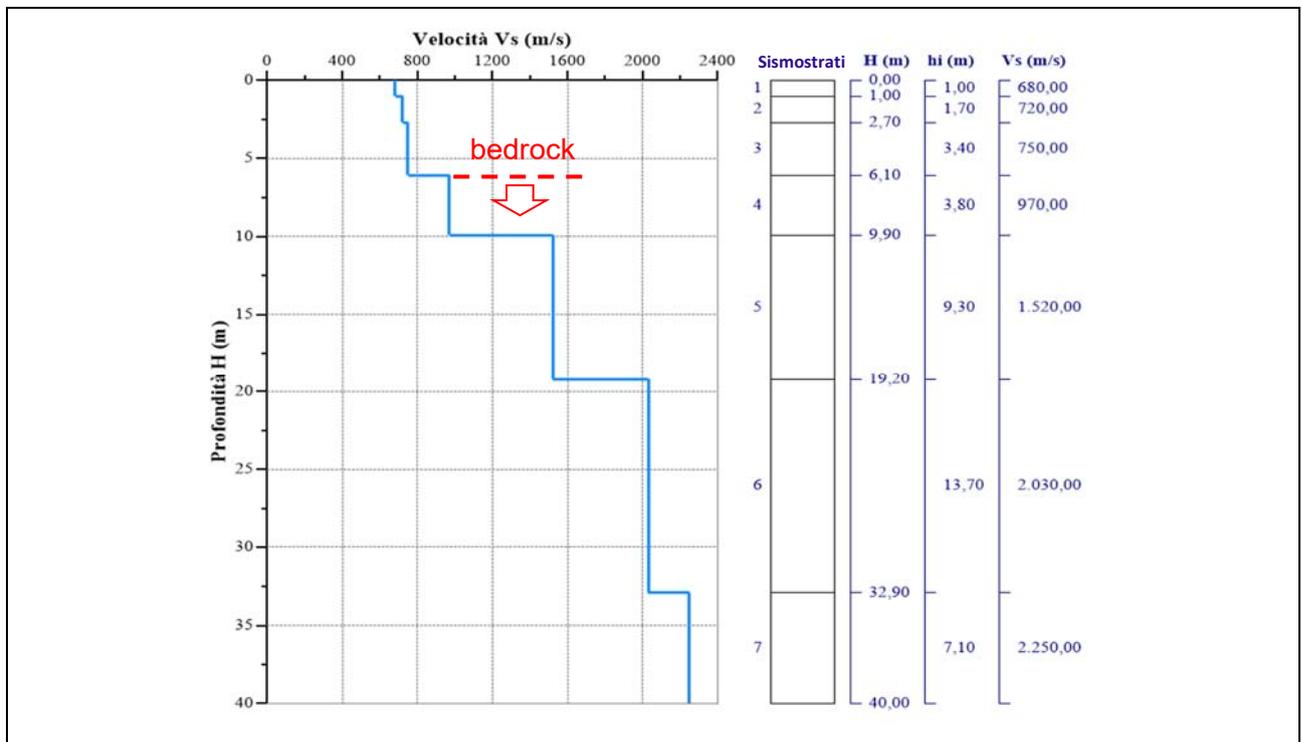
## 5.5 RISULTATI INDAGINI DEL SITO SM02

### 5.5.1 MASW M2 (SM02)

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs della sezione M2, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0 - 1,0	1° sismostrato con Vs di <b>680 m/s</b> Terre poco addensate
1,0 - 2,7	2° sismostrato con Vs di <b>720 m/s</b> Terre mediamente addensate
2,7 - 6,1	3° sismostrato con Vs di <b>750 m/s</b> Terre da addensate a molto
6,1 - 9,9	4° sismostrato con Vs di <b>970 m/s</b> Substrato roccioso intensamente fratturato
9,9 - 19,2	5° sismostrato con Vs di <b>1520 m/s</b> Substrato roccioso da mediamente a leggermente fratturato
19,2 - 32,9	6° sismostrato con Vs di <b>2030 m/s</b> Substrato roccioso sano
32,9 - 40,0	7° sismostrato con Vs di <b>2250 m/s</b> Substrato roccioso sano

#### MASW M2-PROFILO Vs



#### Sismostratigrafia e calcolo Vs eq

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	Vs (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	Hi/Vs (s)
1	1,00	1,00	680,00	1,00	1,00	0,00147
2	2,70	1,70	720,00	2,70	1,70	0,00236
3	6,10	3,40	750,00	6,10	3,40	0,00453
4	9,90	3,80	970,00	9,90	3,80	
5	19,20	9,30	1520,00	19,20	9,30	
6	32,90	13,70	2030,00	30,00	10,80	
7	40,00	7,10	2250,00	0,00	0,00	

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

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

con:

$h_i$  spessore dell'i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle  $V_s$  si pone come profondità del substrato **6,10 m** ( $V_s > 800$  m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **6,10 m** di profondità dal p.c. è pari a:  **$V_{s,eq} = 6,10/0,0083 = 729,23$  m/s** che dà luogo ad una categoria B, ossia:

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

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

Nella **tabella 7** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input  $V_s$ , e  $V_p$  e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

**Tabella 7.** Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità $\gamma$	$V_p$	$V_s$	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico $E_d$	Modulo di Young statico $E_d$	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0 - 1,0	terre	1.800	1.360	680,00	0,33	2.216	267	834	2.216
2	1,0 - 2,7	terre	2.000	1.440	720,00	0,33	2.766	333	1.040	2.766
3	2,7 - 6,1	terre	2.100	1.500	750,00	0,33	3.148	380	1.177	3.148
4	6,1 - 9,9	12%	2.200	1.940	970,00	0,33	5.521	663	2.069	5.521
5	9,9 - 19,2	15%	2.350	3.040	1520,00	0,33	14.475	2.171	5.433	14.475
6	19,2 - 32,9	22%	2.400	4.060	2030,00	0,33	26.371	5.802	9.895	26.371
7	32,9 - 40,0	25%	2.450	4.500	2250,00	0,33	33.078	8.270	12.406	33.078

\*CT: coefficiente di trasformazione (per la roccia)

### Indicazioni per la determinazione di $N_{spt}$ e parametri geotecnici

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

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

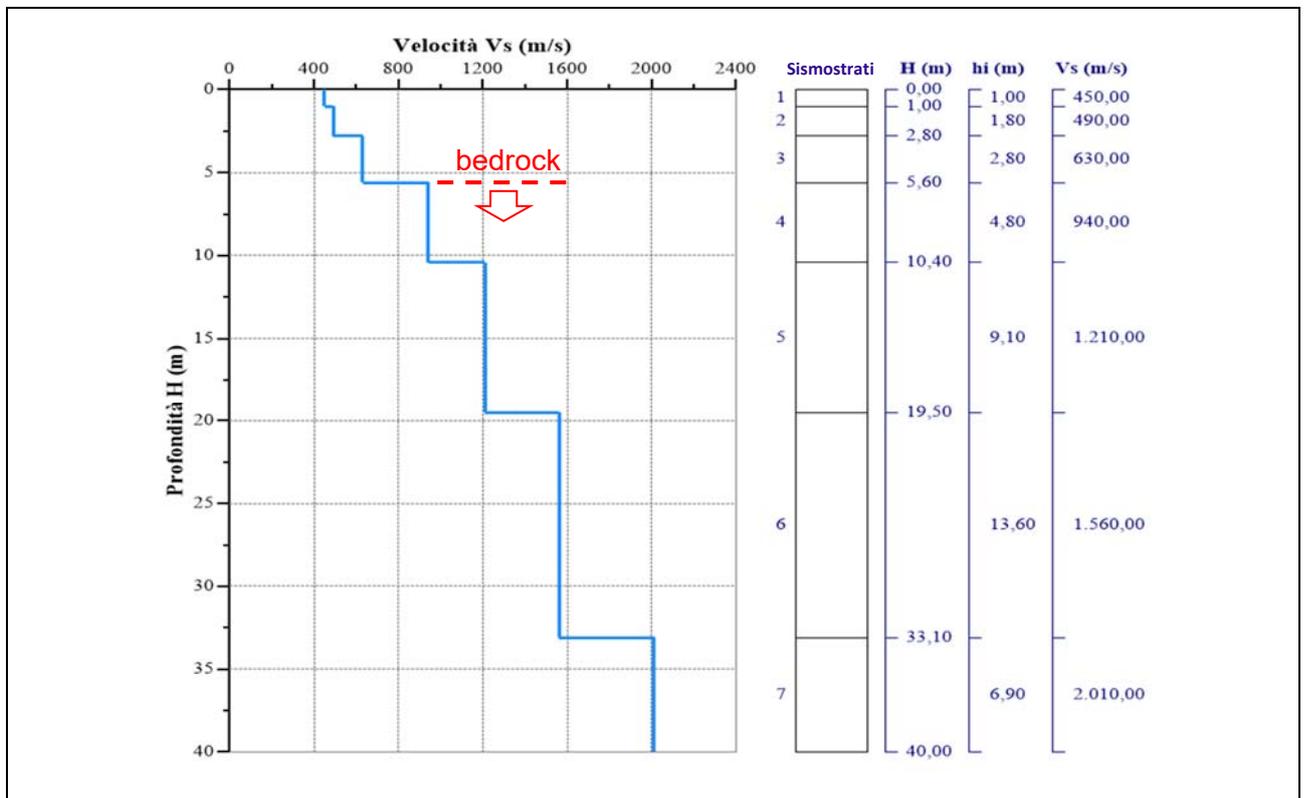
## 5.6 RISULTATI INDAGINI DEL SITO SM03

### 5.6.1 MASW M3 (SM03)

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs della sezione M3, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0 - 1,0	1° sismostrato con Vs di <b>450 m/s</b> Terre poco addensate
1,0 - 2,8	2° sismostrato con Vs di <b>490 m/s</b> Terre mediamente addensate
2,8 - 5,6	3° sismostrato con Vs di <b>630 m/s</b> Terre molto addensate
5,6 - 10,4	4° sismostrato con Vs di <b>940 m/s</b> Substrato roccioso intensamente fratturato
10,4 - 19,5	5° sismostrato con Vs di <b>1210 m/s</b> Substrato roccioso mediamente fratturato
19,5 - 33,1	6° sismostrato con Vs di <b>1560 m/s</b> Substrato roccioso da poco fratturato a sano
33,1 - 40,0	7° sismostrato con Vs di <b>2010 m/s</b> Substrato roccioso sano

MASW M3-PROFILO Vs



Sismostratigrafia e calcolo Vs eq

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	Vs (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	Hi/Vs (s)
1	1,00	1,00	450,00	1,00	1,00	0,00222
2	2,80	1,80	490,00	2,80	1,80	0,00367
3	5,60	2,80	630,00	5,60	2,80	0,00444
4	10,40	4,80	940,00	10,40	4,80	
5	19,50	9,10	1210,00	19,50	9,10	
6	33,10	13,60	1560,00	30,00	10,50	
7	40,00	6,90	2010,00	0,00	0,00	

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

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

con:

$h_i$  spessore dell'i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle  $V_s$  si pone come profondità del substrato **5,60 m** ( $V_s > 800$  m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **5,60 m** di profondità dal p.c. è pari a:  **$V_{s,eq} = 5,6/0,0103 = 541,58$  m/s** che dà luogo ad una categoria B, ossia:

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

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

Nella **tabella 8** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input  $V_s$ , e  $V_p$  e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

**Tabella 8.** Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità $\gamma$	$V_p$	$V_s$	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico $E_d$	Modulo di Young statico $E_d$	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0 - 1,0	terre	1.800	900	450	0,33	971	117	363	971
2	1,0 - 2,8	terre	2.000	980	490	0,33	1.285	155	481	1.285
3	2,8 - 5,6	terre	2.100	1.260	630	0,33	2.226	268	834	2.226
4	5,6 - 10,4	12%	2.200	1.880	940	0,33	5.188	623	1.942	5.188
5	10,4 - 19,5	15%	2.350	2.420	1210	0,33	9.179	1.377	3.442	9.179
6	19,5 - 33,1	22%	2.400	3.120	1560	0,33	15.573	3.426	5.845	15.573
7	33,1 - 40,0	25%	2.450	4.020	2010	0,33	26.400	6.600	9.895	26.400

\*CT: coefficiente di trasformazione (per la roccia)

### Indicazioni per la determinazione di $N_{spt}$ e parametri geotecnici

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

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

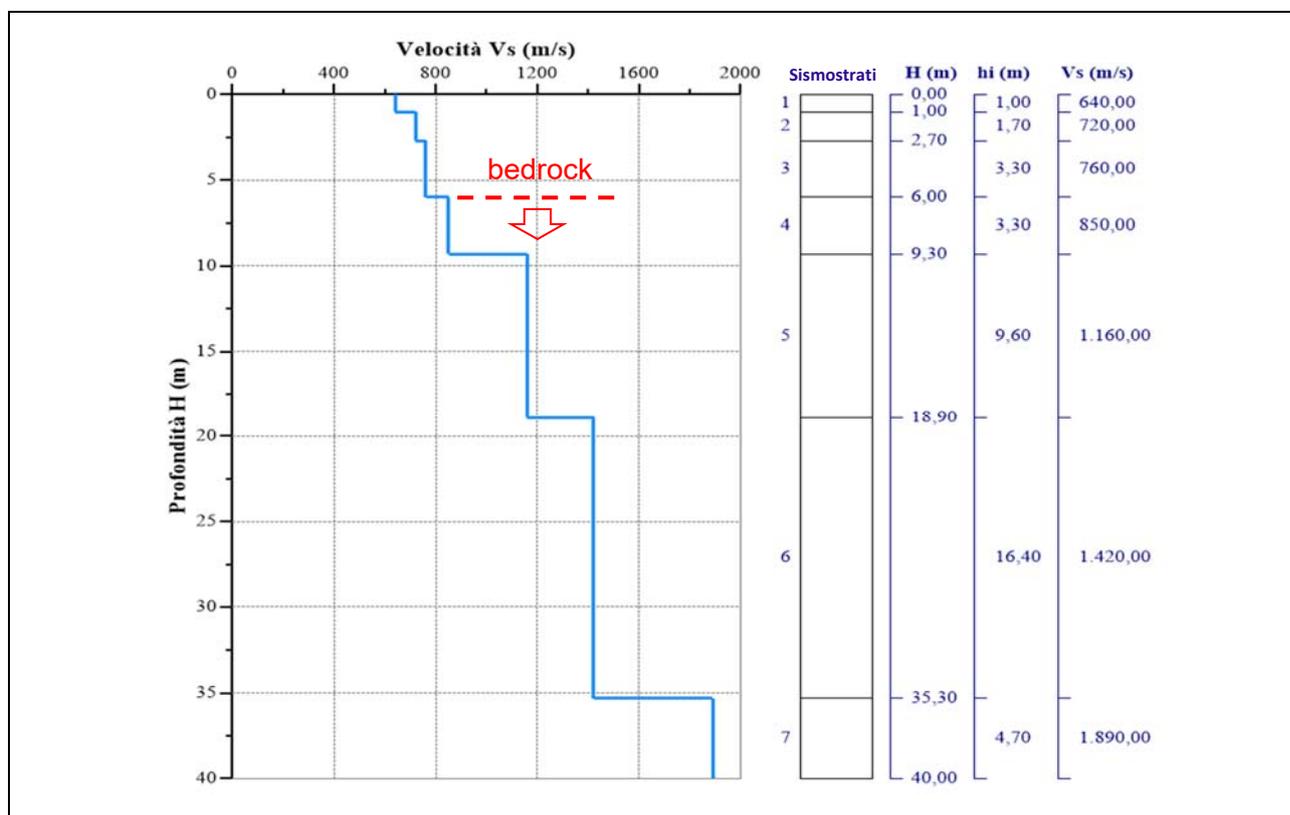
## 5.7 RISULTATI INDAGINI DEL SITO SM04

### 5.7.1 MASW M4 (SM04)

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs della sezione M4, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0 - 1,0	1° sismostrato con Vs di <b>640 m/s</b> Terre addensate
1,0 - 2,7	2° sismostrato con Vs di <b>720 m/s</b> Terre molto addensate
2,7 - 6,0	3° sismostrato con Vs di <b>760 m/s</b> Substrato roccioso intensamente fratturato
6,0 - 9,3	4° sismostrato con Vs di <b>850 m/s</b> Substrato roccioso intensamente fratturato
9,3 - 18,9	5° sismostrato con Vs di <b>1160 m/s</b> Substrato roccioso da fratturato a sano
18,9 - 35,3	6° sismostrato con Vs di <b>1420 m/s</b> Substrato roccioso sano
35,3 - 40,0	7° sismostrato con Vs di <b>1890 m/s</b> Substrato roccioso sano

#### MASW M4-PROFILO Vs



#### Sismostratigrafia e calcolo Vs eq

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	Vs (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	Hi/Vs (s)
1	1,00	1,00	640,00	1,00	1,00	0,00156
2	2,70	1,70	720,00	2,70	1,70	0,00236
3	6,00	3,30	760,00	6,00	3,30	0,00434
4	9,30	3,30	850,00	9,30	3,30	
5	18,90	9,60	1160,00	18,90	9,60	
6	35,30	16,40	1420,00	30,00	11,10	
7	40,00	4,70	1890,00	0,00	0,00	

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

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

con:

$h_i$  spessore dell'i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle  $V_s$  si pone come profondità del substrato **6,00 m** ( $V_s > 800$  m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **6,00 m** di profondità dal p.c. è pari a:  **$V_{s,eq} = 6,0/0,0082 = 725,89$  m/s** che dà luogo ad una categoria A, ossia:

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

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

Nella **tabella 9** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input  $V_s$ , e  $V_p$  e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

**Tabella 9.** Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità $\gamma$	$V_p$	$V_s$	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico $E_d$	Modulo di Young statico $E_d$	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0 - 1,0	terre	1.800	1.280	640	0,33	1.961	236	736	1.961
2	1,0 - 2,7	terre	2.000	1.440	720	0,33	2.766	333	1.040	2.766
3	2,7 - 6,0	terre	2.100	1.520	760	0,33	3.236	390	1.216	3.236
4	6,0 - 9,3	12%	2.200	1.700	850	0,33	4.237	508	1.589	4.237
5	9,3 - 18,9	15%	2.350	2.320	1160	0,33	8.434	1.265	3.158	8.434
6	18,9 - 35,3	22%	2.400	2.840	1420	0,33	12.906	2.839	4.835	12.906
7	35,3 - 40,0	25%	2.450	3.780	1890	0,33	23.340	5.835	8.748	23.340

\*CT: coefficiente di trasformazione (per la roccia)

#### Indicazioni per la determinazione di $N_{spt}$ e parametri geotecnici

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

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

## 6 RISULTATI DELLE INDAGINI R1

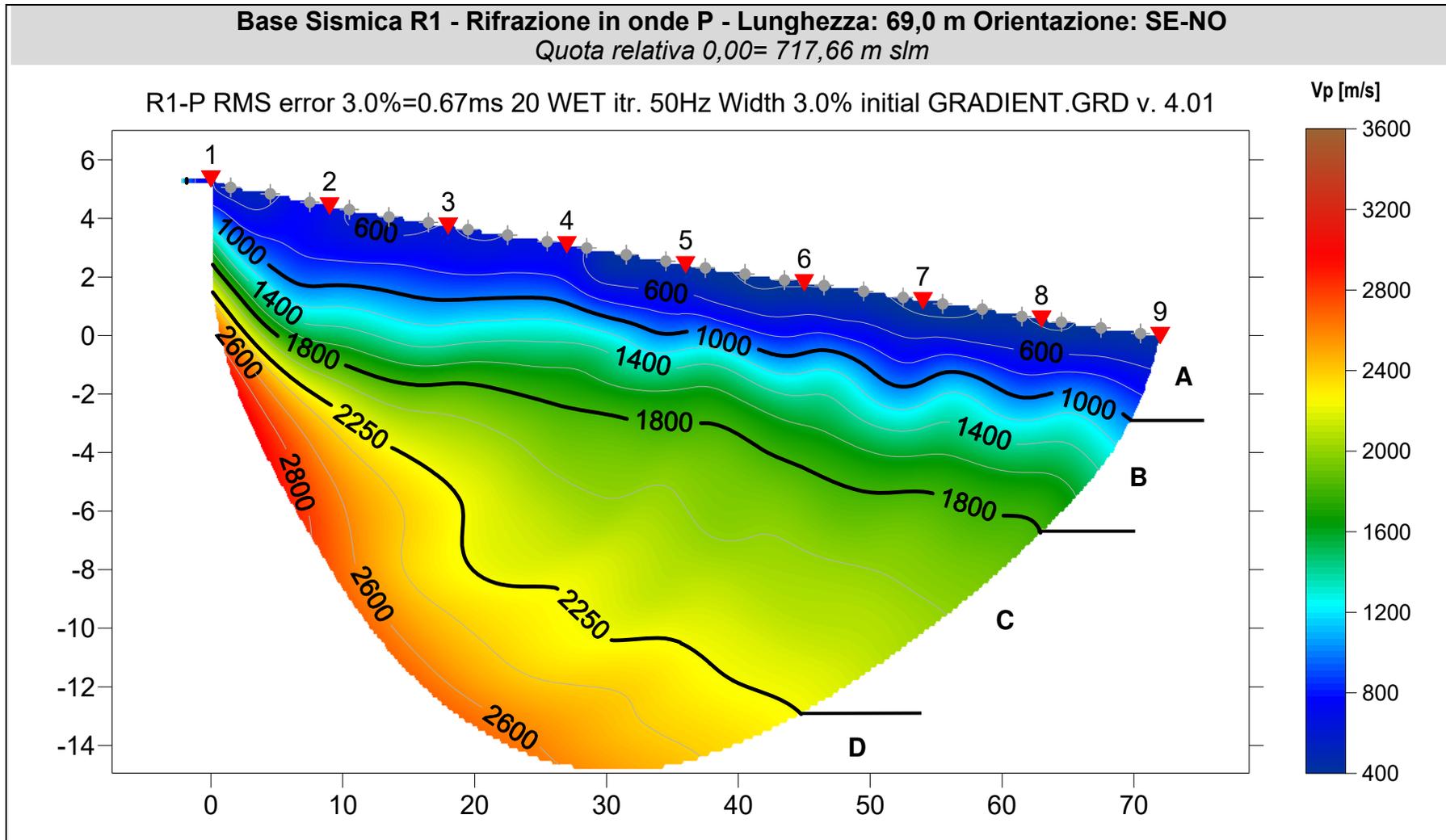
### 6.1.1 Sismica a Rifrazione R1

Nella sezione di sismica a rifrazione **R1** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R1	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 2,1/3,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 2,1/3,0 a 3,0/7,0	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 3,0/7,0 a 3,6/14,1	1800-2250
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 3,6/14,1 a 15,0-20,0	2400-2800

Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 2800 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 2,1 e 3,0 metri da p.c e un andamento analogo al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta leggere variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 3,0 e 7,0 m dal p.c. Il sismostrato C costituito da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 3,6 e 14,1 m di profondità dal p.c. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità Vp medie e si riscontra fino alle massime profondità di indagine comprese tra 15,0/20,0 m dal p.c. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 3,0 e 7,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 3,6 e 14,1 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.



## 7 RISULTATI DELLE INDAGINI R2

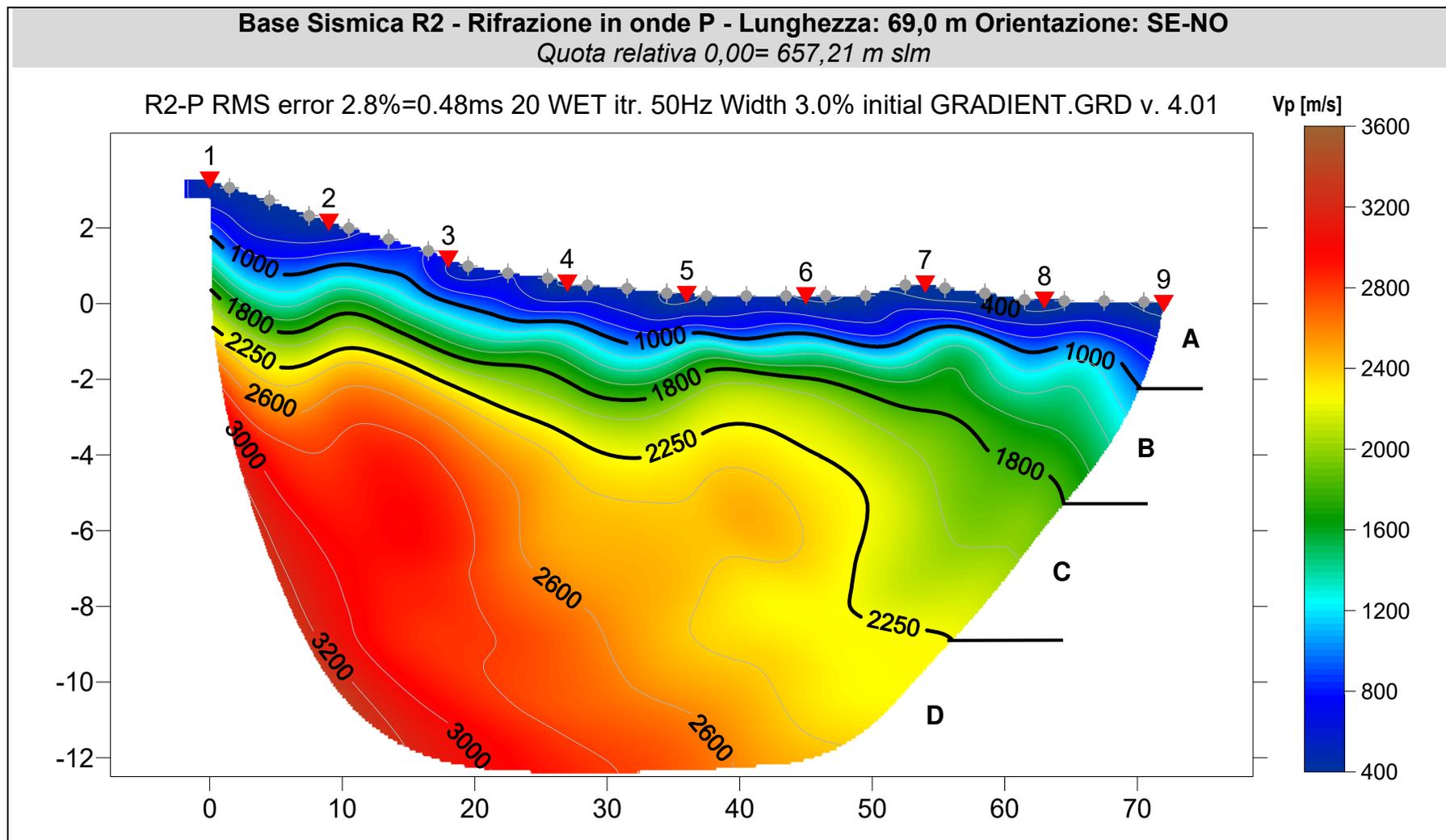
### 7.1.1 Sismica a Rifrazione R2

Nella sezione di sismica a rifrazione **R2** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R2	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
Sismostrati		
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,0/2,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,0/2,0 a 2,0/5,2	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 2,0/5,2 a 3,0/9,0	1800-2250
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 3,0/9,0 a 12,2-16,0	2250-3200

Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 3200 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 1,0 e 2,0 metri da p.c e un andamento leggermente irregolare rispetto al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta leggere variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 2,0 e 5,2 m dal p.c. Il sismostrato C costituito da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 3,0 e 9,0 m di profondità dal p.c. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità medio-alte e si riscontra fino alle massime profondità di indagine comprese tra 12,2/16,0 m dal p.c. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento graduale delle Vp con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso: si può notare come dalla progressiva 45 m della sezione le velocità Vp siano minori, presentando una diminuzione laterale delle velocità rilevate; il materiale presente presenta delle qualità elastomeccaniche inferiori.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 2,0 e 5,2 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 3,0 e 9,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.



## 8 RISULTATI DELLE INDAGINI R3

### 8.1.1 Sismica a Rifrazione R3

Nella sezione di sismica a rifrazione **R3** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R3	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
Sismostrati		
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,3/2,8	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,3/2,8 a 3,2/6,5	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 3,2/6,5 a 5,0/9,3	1800-2250
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 5,0/9,3 a 10,0-14,0	2250-3000

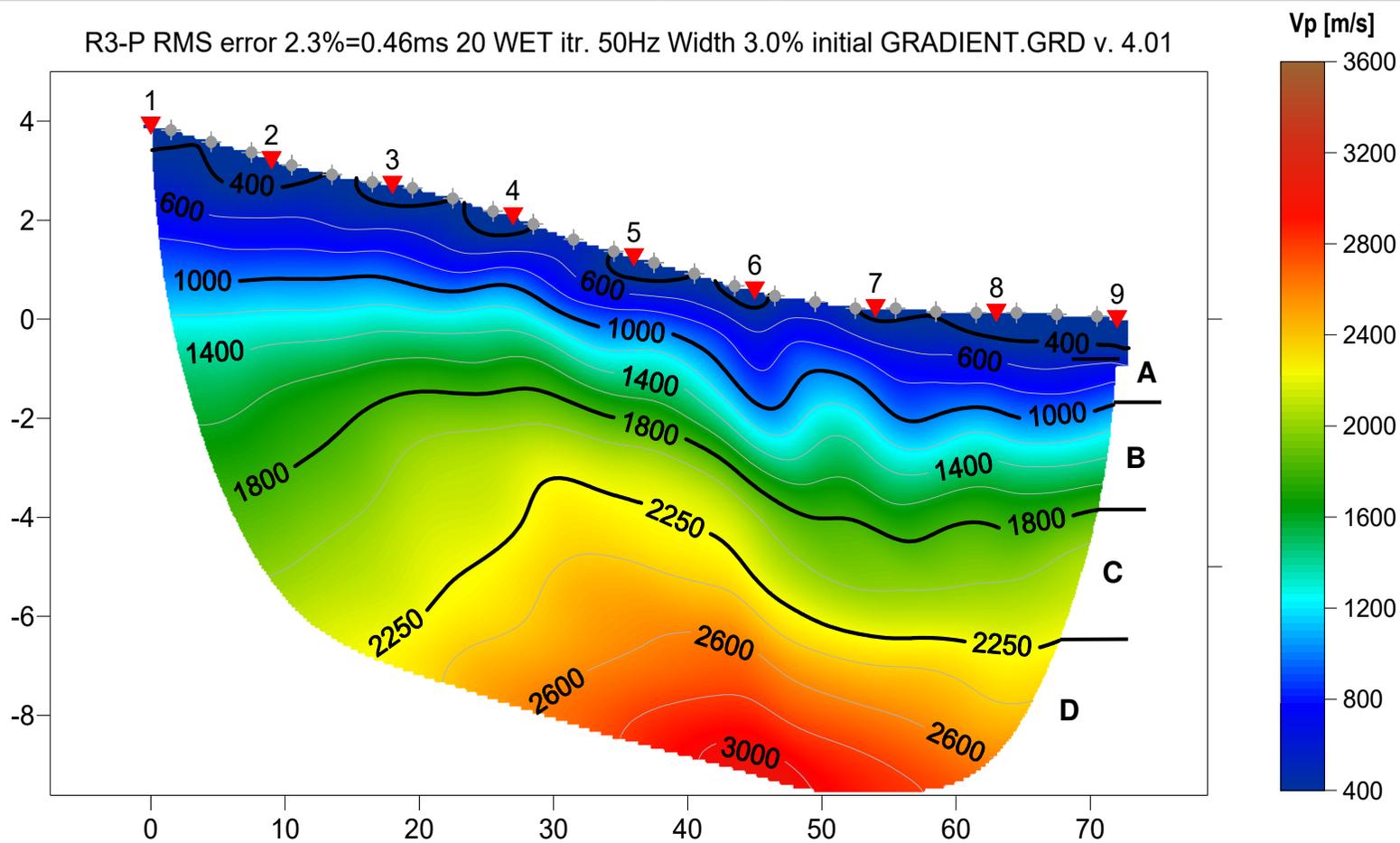
Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 3000 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 1,3 e 2,8 metri da p.c e un andamento leggermente irregolare rispetto al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta leggere variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 3,2 e 6,5 m dal p.c. Il sismostrato C composto da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 5,0 e 9,3 m di profondità dal p.c. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità medio-alte e si riscontra fino alle massime profondità di indagine comprese tra 10,0/14,0 m dal p.c. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 3,2 e 6,5 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 5,0 e 9,3 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

**Base Sismica R3 - Rifrazione in onde P - Lunghezza: 69,0 m Orientazione: SSO-NNE**

Quota relativa 0,00= 688,04 m slm

R3-P RMS error 2.3%=0.46ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



## 9 RISULTATI DELLE INDAGINI R4

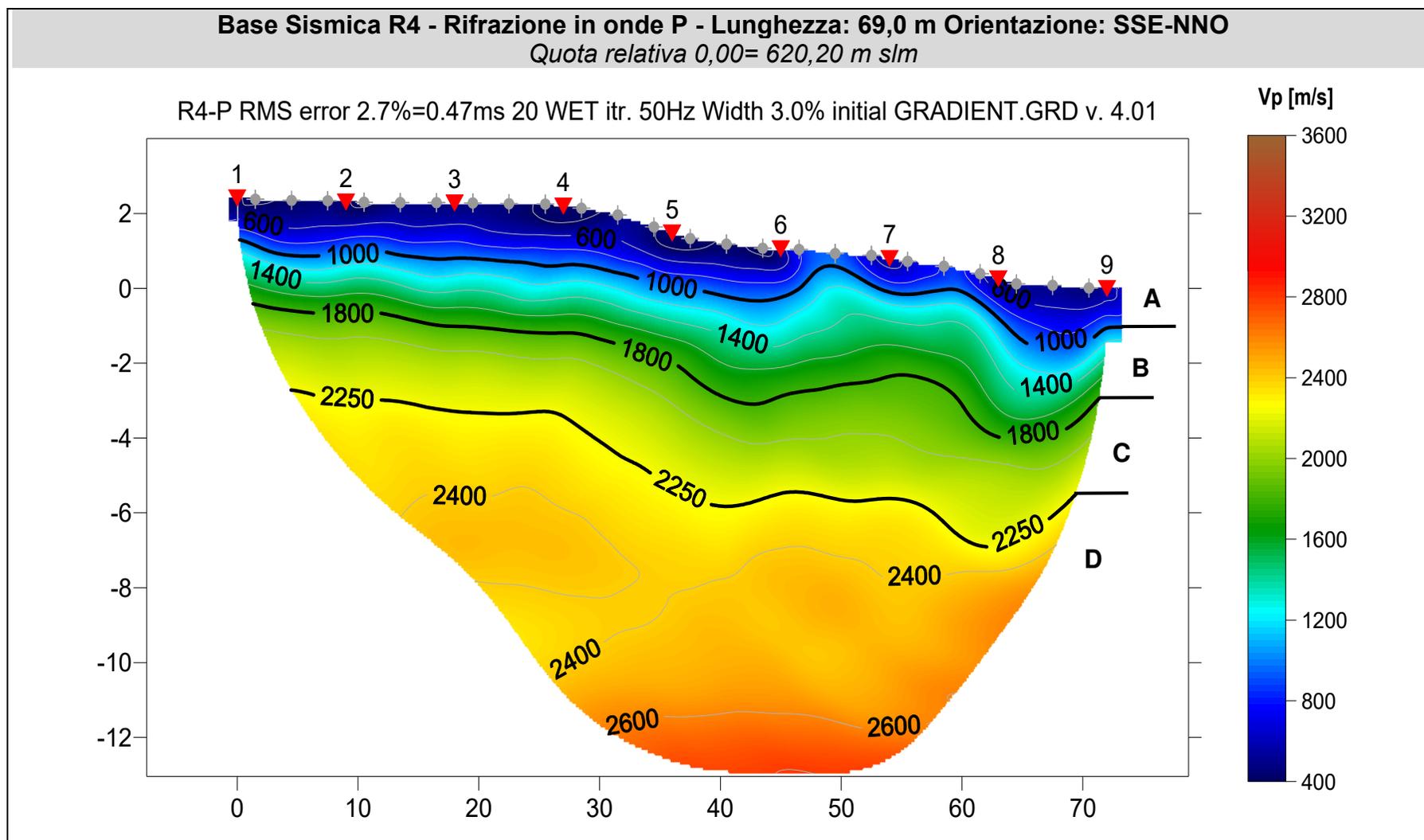
### 9.1.1 Sismica a Rifrazione R4

Nella sezione di sismica a rifrazione **R4** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R4	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
Sismostrati		
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 0,4/1,3	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 0,4/1,3 a 3,0/4,0	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 3,0/4,0 a 5,0/7,0	1800-2250
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 5,0/7,0 a 13,0-15,2	2250-2800

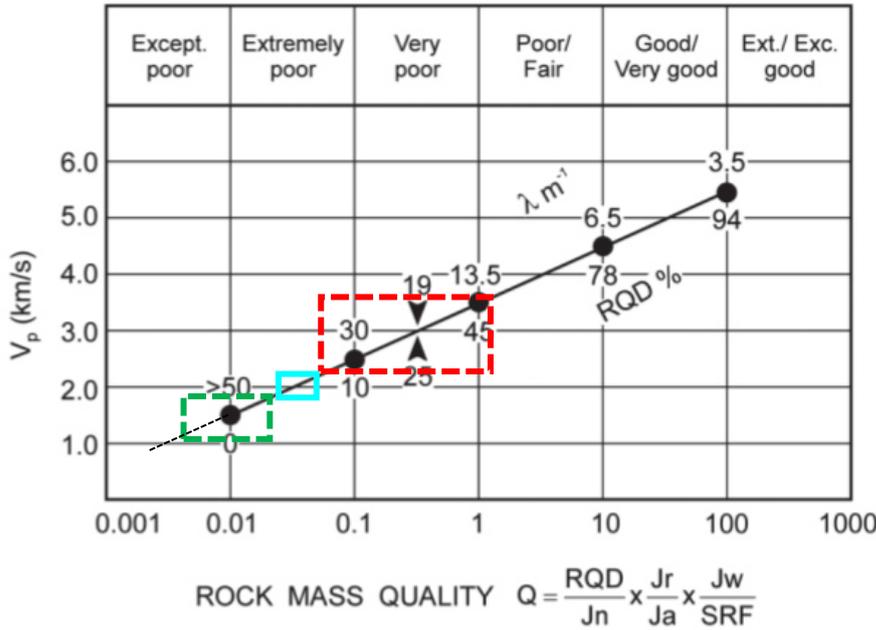
Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 2800 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 0,4 e 1,3 metri da p.c e un andamento leggermente irregolare rispetto al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta un andamento simile al precedente e si rileva fino a profondità comprese tra 3,0 e 4,0 m dal p.c. Il sismostrato C costituito da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 5,0 e 7,0 m di profondità dal p.c. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità medio-alte e si riscontra fino alle massime profondità di indagine comprese tra 13,0/15,2 m dal p.c. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 3,0 e 4,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 5,0 e 7,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.



### 10 INDICAZIONI PER LA DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI

Le prospezioni geofisiche possono essere utilizzate in situazioni molto complesse quali gli ammassi metamorfici molto fratturati o in assenza di indagini dirette (v. sondaggi geognostici) per la definizione spaziale di alcuni elementi degli ammassi rocciosi (fratture, RQD, etc). Tra questi quello che potrebbe essere impiegato nel contesto in esame, è quello di N. Barton (2002) – che ha cercato di correlare, attraverso relazioni empiriche, le velocità delle onde P con la qualità della roccia Q e quest’ultima con una serie di parametri meccanici. Il grafico mostra la correlazione tra Vp con RQD e λ (fratture per metro) e il relativo indici di qualità dell’ammasso roccioso di Barton (Q).



Sulla base dei litotipi individuati dalla sismica in via preliminare e previa successiva conferma tramite esecuzione di sondaggi geognostici si può applicare la correlazione ai sismostrati B, C e D. Il rettangolo verde indica il settore del sismostrato B, con un RQD compreso tra 0 e 3, un numero di fratture per metro che varia tra 50 e 45 e un indice di qualità Q medio di 0,02 (ammasso roccioso eccezionalmente scadente); il rettangolo celeste rappresenta il sismostrato C che ha valori di RQD compresi tra 3 e 8, un numero di fratture per metro compreso tra 45 e 35 e un valore dell'indice Q medio di 0,06 (ammasso roccioso estremamente scadente); infine il rettangolo rosso rappresenta il sismostrato D che ha valori di RQD compresi tra 8 e 55, un numero di fratture per metro compreso tra 35 e 14 e un valore dell'indice Q tra min 0,08 e max 2. Da quanto sopra le 3 unità sismostratigrafiche possono essere classificate come segue:

Sismostrati	Vp (m/s)	RQD (%)	λ (1/m)	Q*
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	1000-1800	0-3	50-45	0.008-0.04
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	1800-2250	3-8	45-35	0.04-0.08
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	2250-3600	8-55	35-14	0.08-2

\*L'indice Q può essere correlato all'indice RMR della classificazione di Bieniawski con la relazione:  $RMR = 9 \ln Q + 44$ ;

## 11 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La prospezione geofisica attraverso l'impiego delle tecniche MASW e sismica a rifrazione in onde P, ha permesso di ricostruire con un buon grado di precisione l'assetto lito-stratigrafico dell'area in esame e dedurne le caratteristiche sismiche. Lungo la verticale indagata si evince la presenza di sismostrati con velocità  $V_p$  e  $V_s$  in genere crescente con la profondità con andamento e spessori indicati nei precedenti paragrafi.

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

Sigla Stendimento	Profondità substrato [m]	$V_{Seq}$ [m/s]	Categoria sottosuolo (NTC2018)
M1 (SM01)	6,30	393,16	B
M2 (SM02)	6,10	729,23	B
M3 (SM03)	5,60	541,58	B
M4 (SM04)	6,00	725,89	B

I dati derivati dalla MASW messi in correlazione con le bibliografiche indicate nei precedenti paragrafi hanno permesso di determinare i parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni e per correlazione ottenere una preliminare definizione dei parametri di resistenza al taglio.

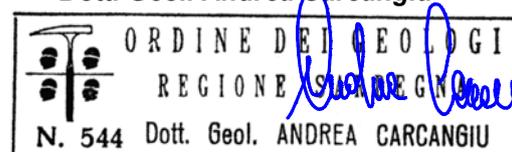
L'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione ha permesso di ricostruire l'assetto sismostratigrafico dei terreni. Nei precedenti paragrafi si illustrano i differenti sismostrati individuati dai quali è possibile distinguere i terreni delle coperture dal substrato roccioso. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che in tutte le sezioni i terreni risultano rippabili sino a pochi metri di profondità rispetto al piano campagna. Mentre il grado di rippabilità si riduce a partire dai 2 m ai 5,2 m di profondità da p.c. come per la R2 e dai 2,5 m a 7 m nella R4.

Le prospezioni geofisiche in rifrazione sono state utilizzate anche per la definizione spaziale di alcuni elementi degli ammassi rocciosi (fratture, RQD, etc) e per la definizione per l'indice di qualità di Barton Q: si tratta chiaramente di correlazioni da impiegare con le dovute approssimazioni ma comunque utili in determinate situazioni nelle quali dai sondaggi è difficile ottenere dei parametri di caratterizzazione dell'ammasso roccioso.

Cagliari, li 26/07/2023

**Collaboratori**  
**Dott. Marco Usai**

**Geoservice S.r.l.**  
**Il Direttore Tecnico**  
**Dott. Geol. Andrea Carcangiu**



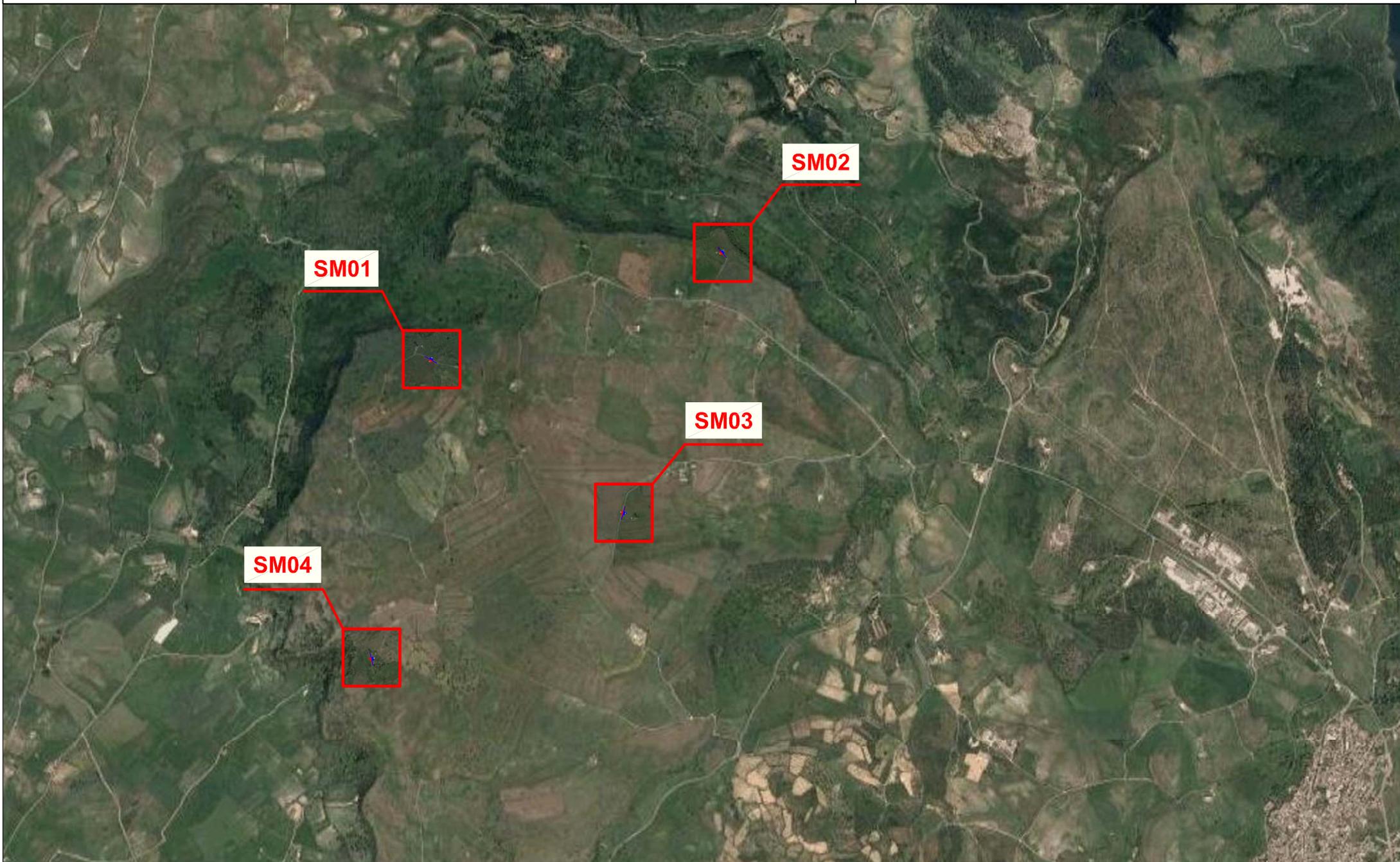
# Tavola 1: INQUADRAMENTO GENERALE DELLE AREE DI INDAGINE

Progetto: Realizzazione di un parco eolico in agro Nurri (SU)

Scala 1:25.000

## Legenda

 AREE DI INDAGINE



**Tavola 2 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SM01)**

Progetto: Realizzazione di un parco eolico in agro Nurri (SU)

Scala 1:1000

**Legenda**

Stendimento sismica a Rifrazione (R1) - Lunghezza = 69,0 m

➡ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

Stendimento sismico MASW (M1) - Lunghezza = 69,0 m

➡ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono



### Tavola 3 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SM02)

Progetto: Realizzazione di un parco eolico in agro Nurri (SU)

Scala 1:1000

#### Legenda

Stendimento sismica a Rifrazione (R2) - Lunghezza = 69,0 m

 Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

Stendimento sismico MASW (M2) - Lunghezza = 69,0 m

 Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono



**Tavola 4 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SM03)**

Progetto: Realizzazione di un parco eolico in agro Nurri (SU)

Scala 1:1000

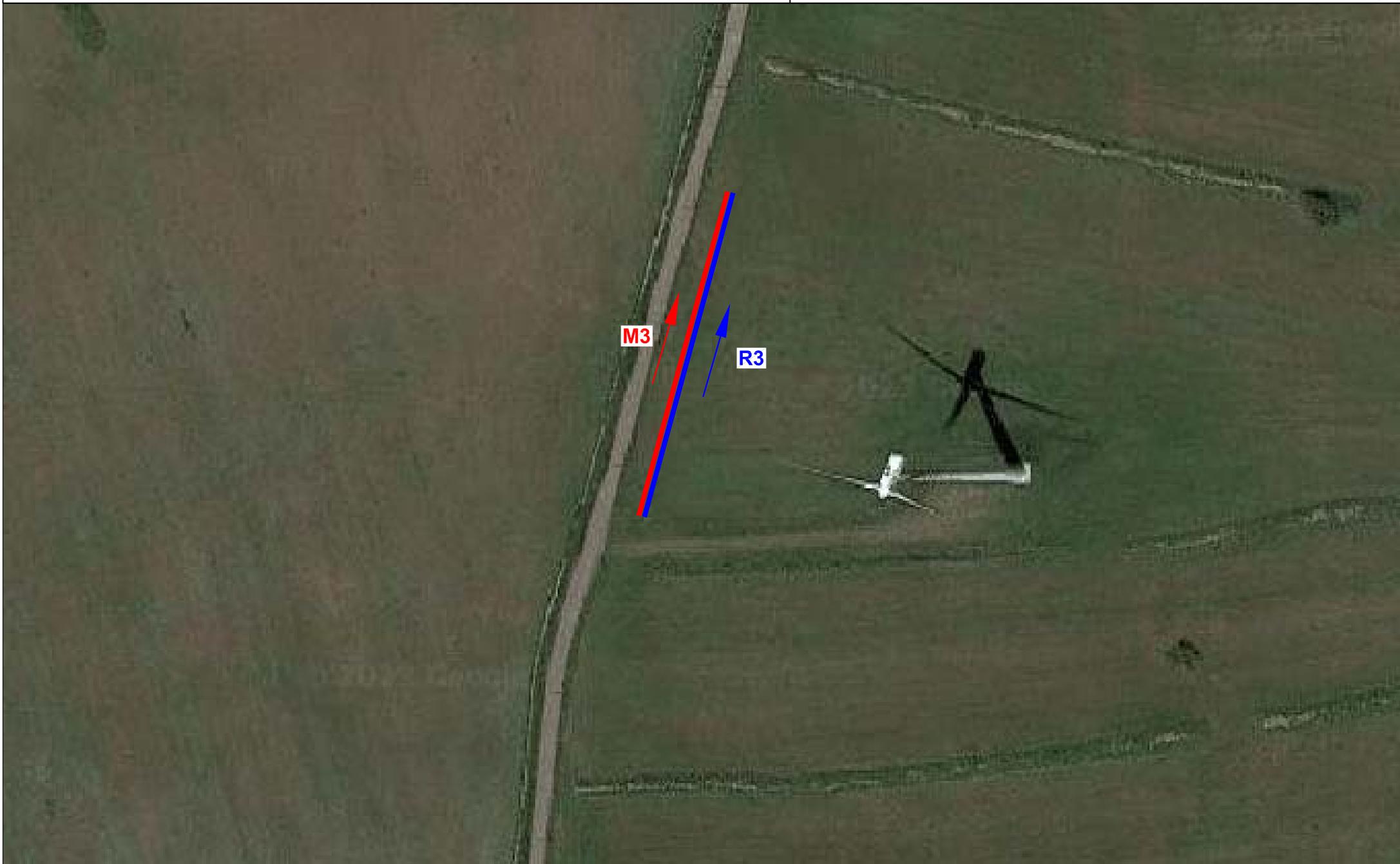
**Legenda**

Stendimento sismica a Rifrazione (R3) - Lunghezza = 69,0 m

➡ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

Stendimento sismico MASW (M3) - Lunghezza = 69,0 m

➡ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono



**Tavola 5 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SM04)**

Progetto: Realizzazione di un parco eolico in agro Nurri (SU)

Scala 1:1000

**Legenda**

Stendimento sismica a Rifrazione (R4) - Lunghezza = 69,0 m

→ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

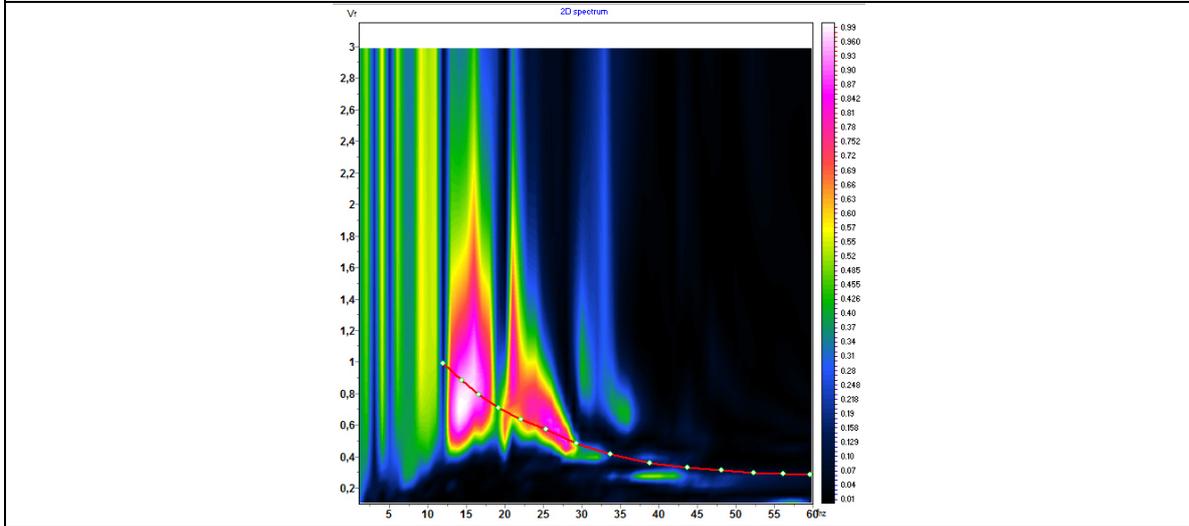
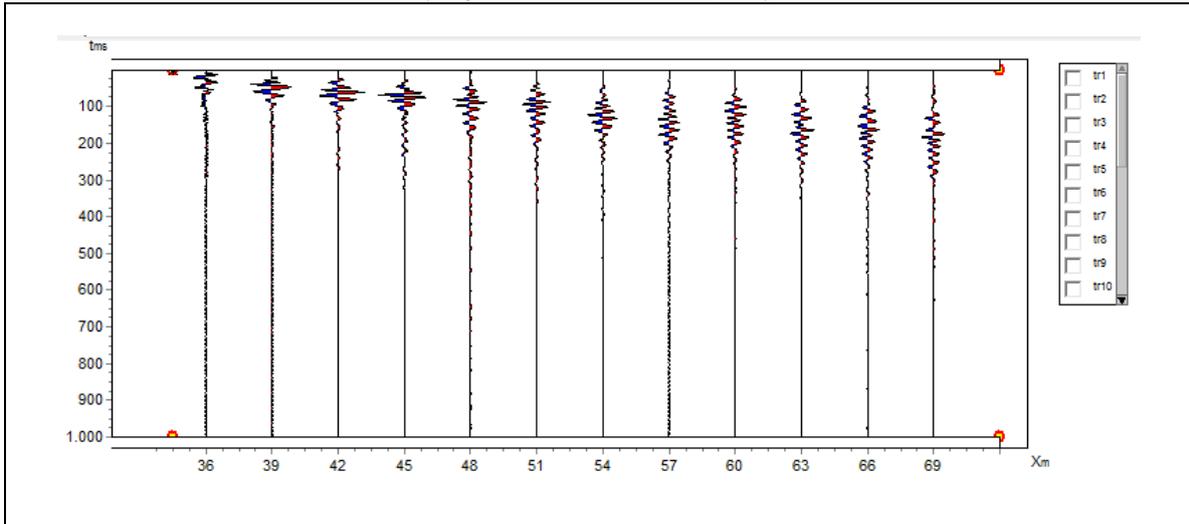
Stendimento sismico MASW (M4) - Lunghezza = 69,0 m

→ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

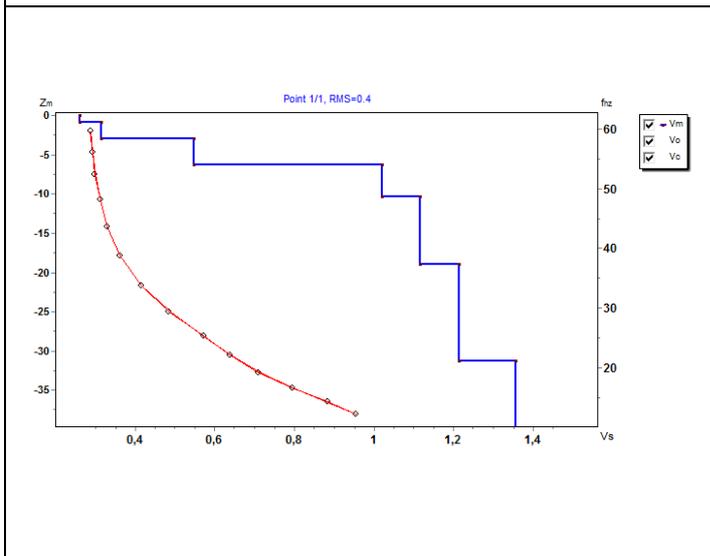


# ALLEGATO 1 SM01-MASW 1

Sismogramma acquisito- Spettro velocità di fase/frequenza  
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs  
(Acquisizione con shot a 34,5 m)



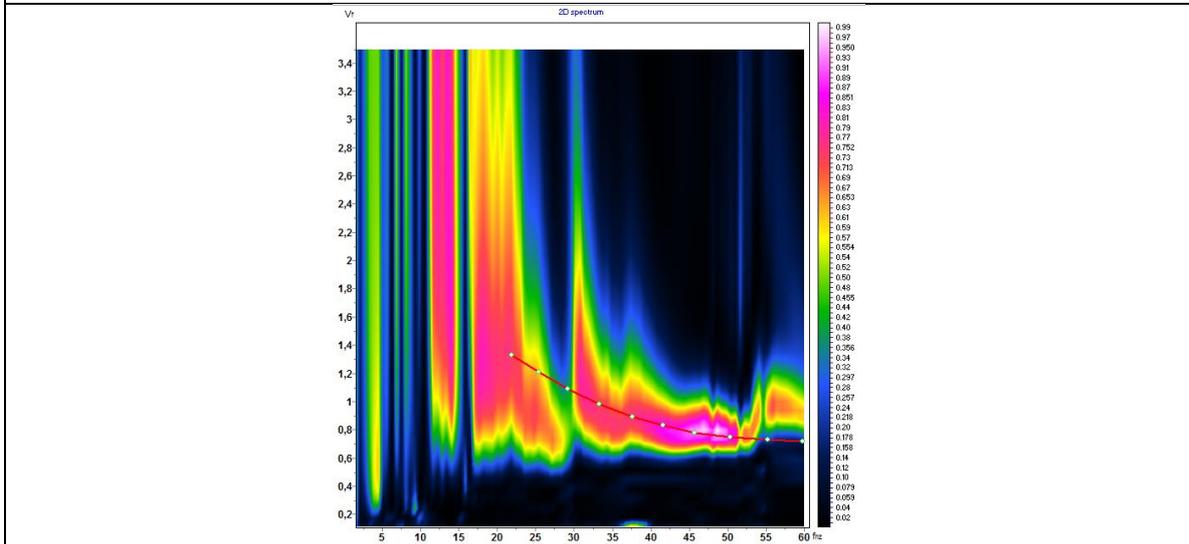
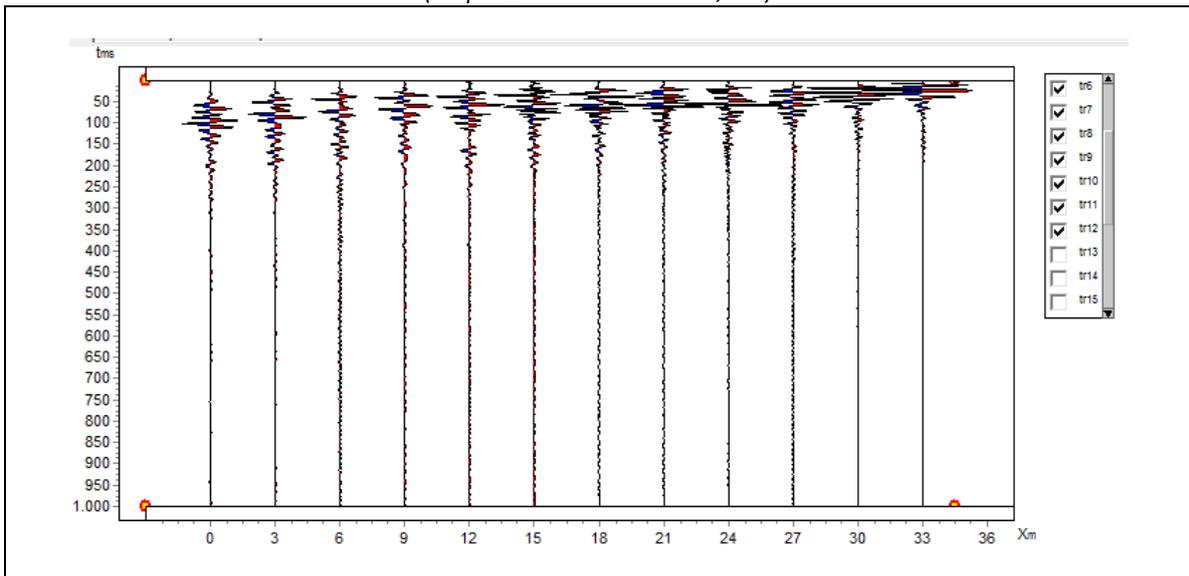
**Profilo Vs – Bedrock a 6,30 metri da p.c. (Vseq=393,16 m/s) - Categoria B**



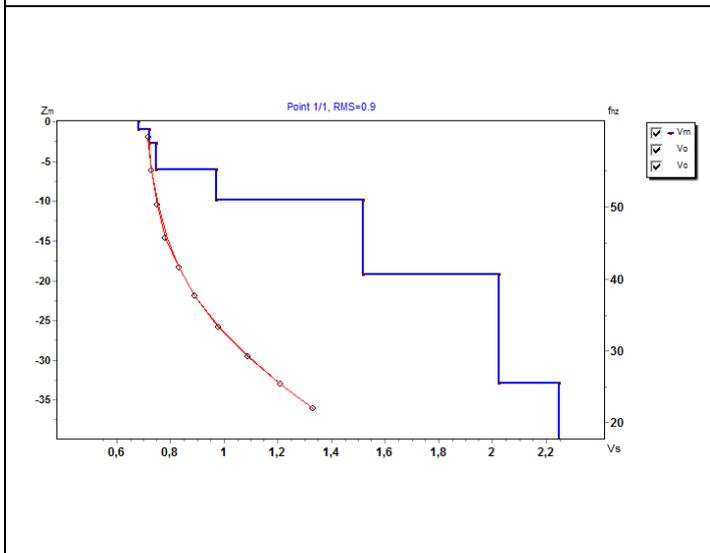
N	Vs	PR	p	Z	H
1	0.26	0.22	2	0	0.9
2	0.32	0.22	2	0.9	2.1
3	0.55	0.22	2	3.0	3.3
4	1.02	0.22	2	6.3	4.0
5	1.12	0.22	2	10.3	8.6
6	1.21	0.22	2	18.9	12.3
7	1.36	0.22	2	31.2	*

# ALLEGATO 1 SM02-MASW 2

Sismogramma acquisito- Spettro velocità di fase/frequenza  
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs  
(Acquisizione con shot a 34,5 m)



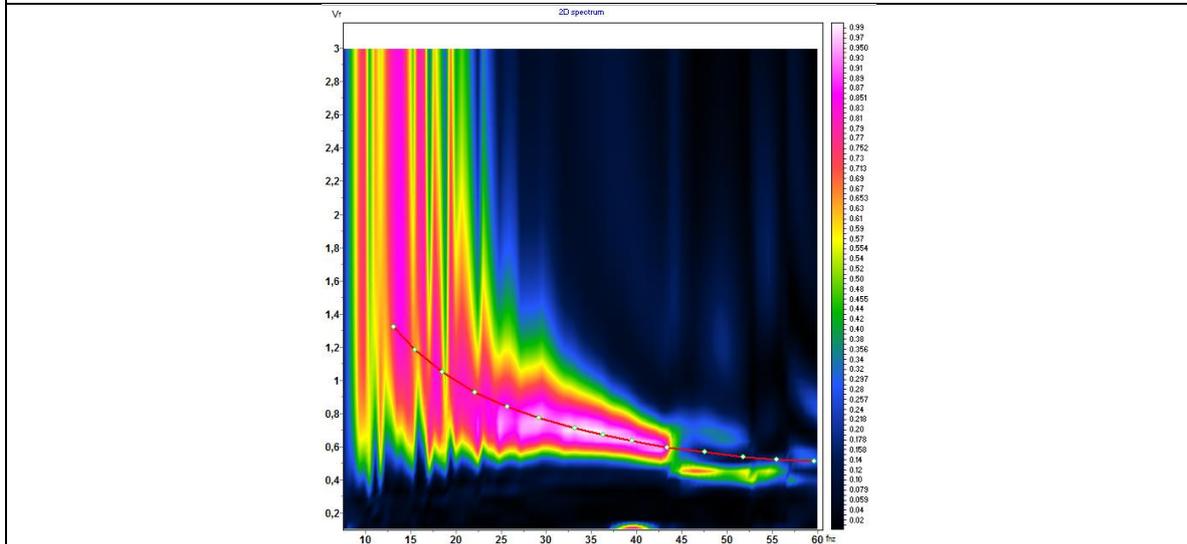
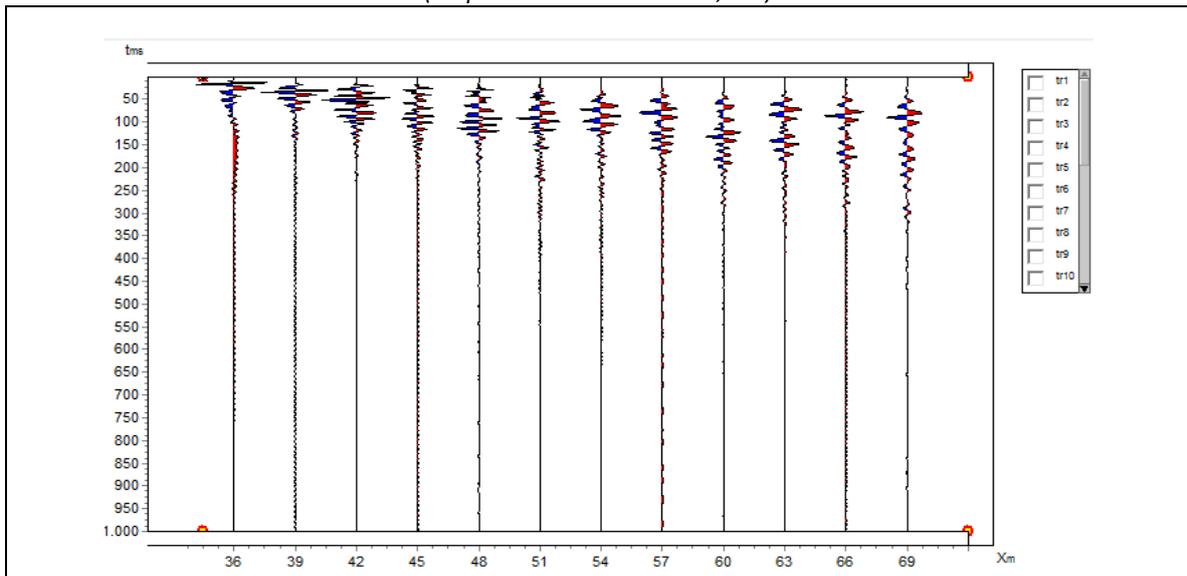
**Profilo Vs – Bedrock a 6,10 metri da p.c. (Vseq=729,23 m/s) - Categoria B**



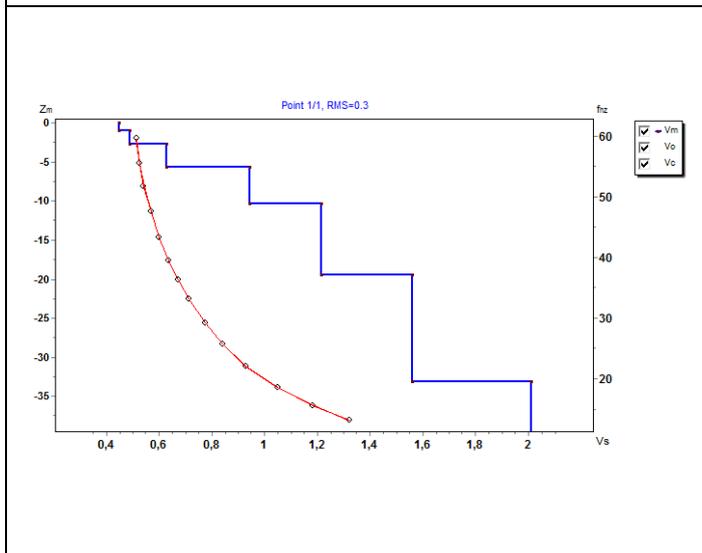
N	Vs	PR	p	Z	H
1	0.68	0.22	2	0	1.0
2	0.72	0.22	2	1.0	1.7
3	0.75	0.22	2	2.7	3.4
4	0.97	0.22	2	6.1	3.8
5	1.52	0.22	2	9.9	9.4
6	2.03	0.22	2	19.2	13.7
7	2.25	0.22	2	32.9	*

# ALLEGATO 1 SM03-MASW 3

Sismogramma acquisito- Spettro velocità di fase/frequenza  
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs  
(Acquisizione con shot a 34,5 m)



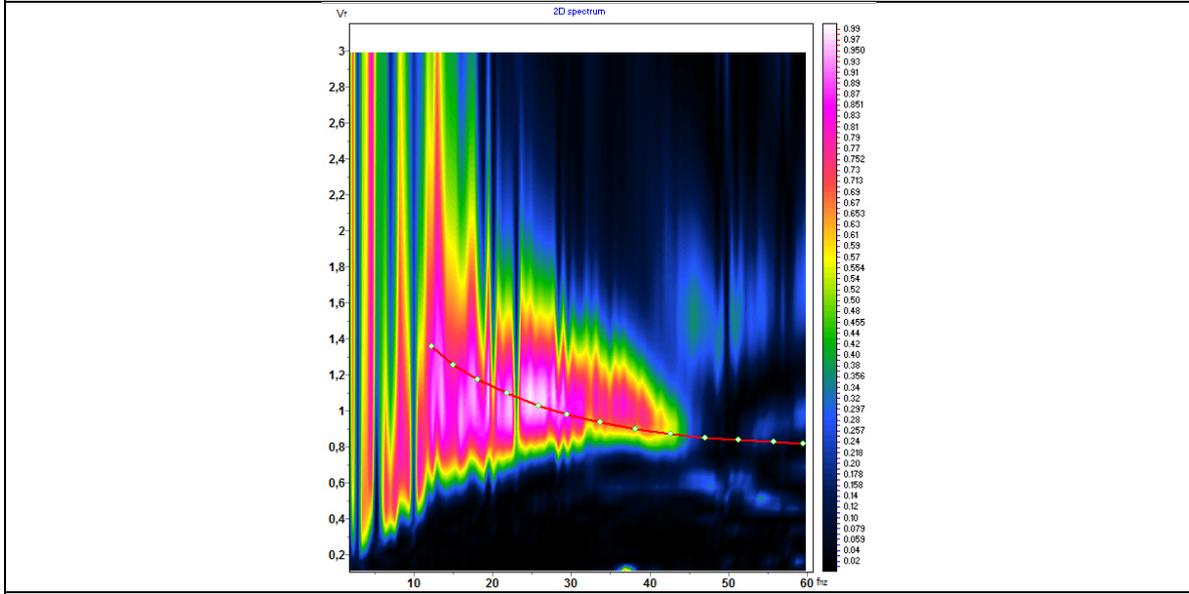
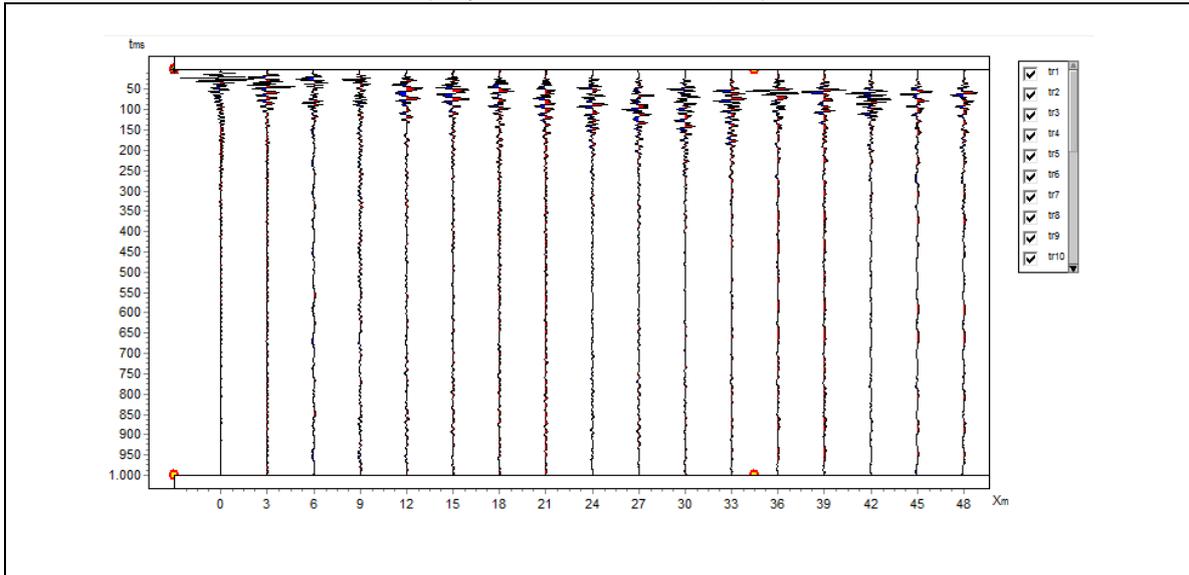
**Profilo Vs – Bedrock a 5,60 metri da p.c. (Vseq=541,58 m/s) - Categoria B**



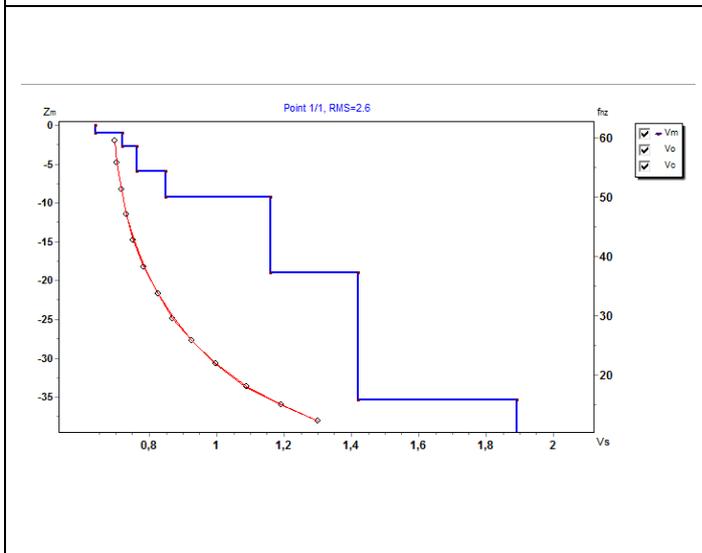
N	Vs	PR	$\rho$	Z	H
1	0.45	0.22	2	0	1.0
2	0.49	0.22	2	1.0	1.8
3	0.63	0.22	2	2.8	2.9
4	0.94	0.22	2	5.6	4.8
5	1.21	0.22	2	10.4	9.1
6	1.56	0.22	2	19.5	13.6
7	2.01	0.22	2	33.1	*

# ALLEGATO 1 SM04-MASW 4

Sismogramma acquisito- Spettro velocità di fase/frequenza  
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs  
(Acquisizione con shot a -3,0 m)



**Profilo Vs – Bedrock a 6,0 metri da p.c. (Vseq=725,89 m/s) - Categoria B**

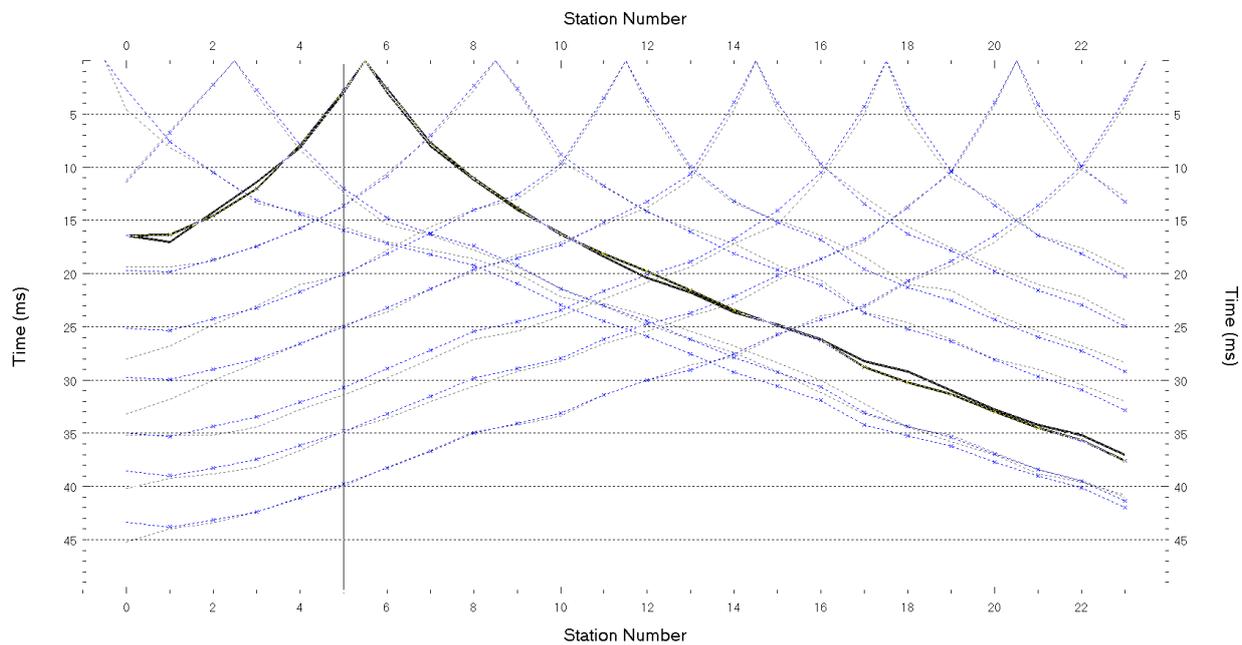


N	Vs	PR	p	Z	H
1	0,64	0,22	2	0	1,0
2	0,72	0,22	2	1,0	1,7
3	0,76	0,22	2	2,7	3,3
4	0,85	0,22	2	6,0	3,3
5	1,16	0,22	2	9,3	9,6
6	1,42	0,22	2	18,9	16,4
7	1,89	0,22	2	35,3	*

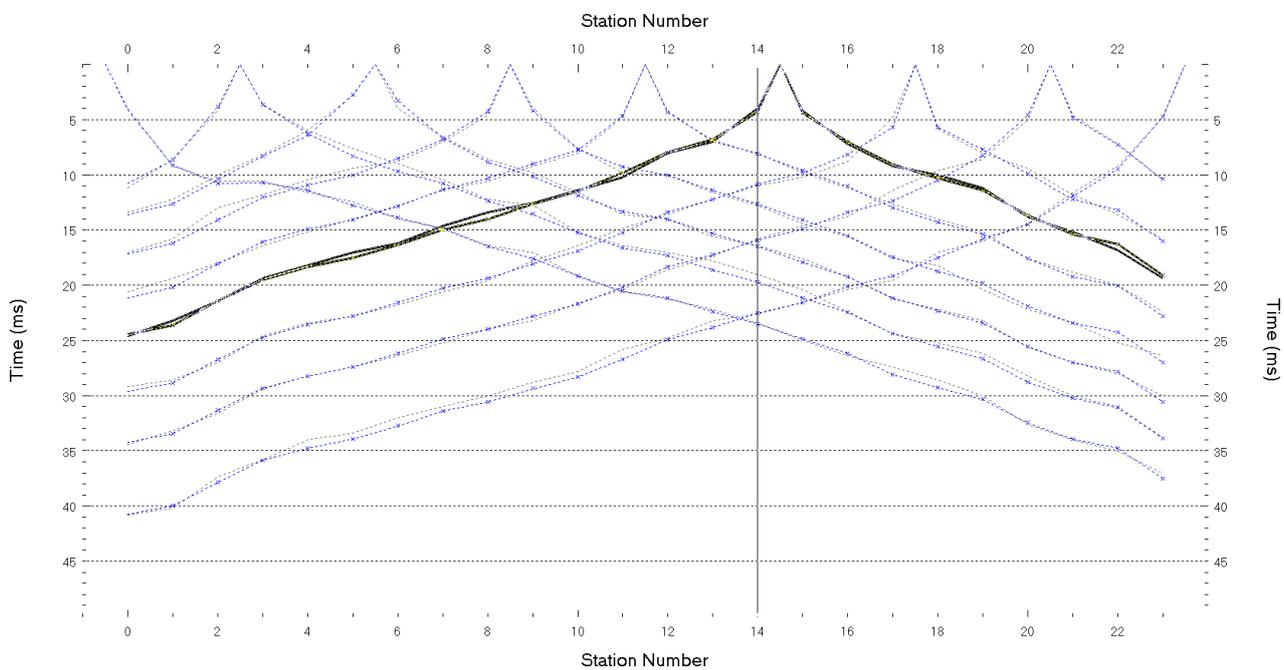
## ALLEGATO 2

### Sismica a rifrazione - dromocrone osservate e calcolate - grafico raggi sismici

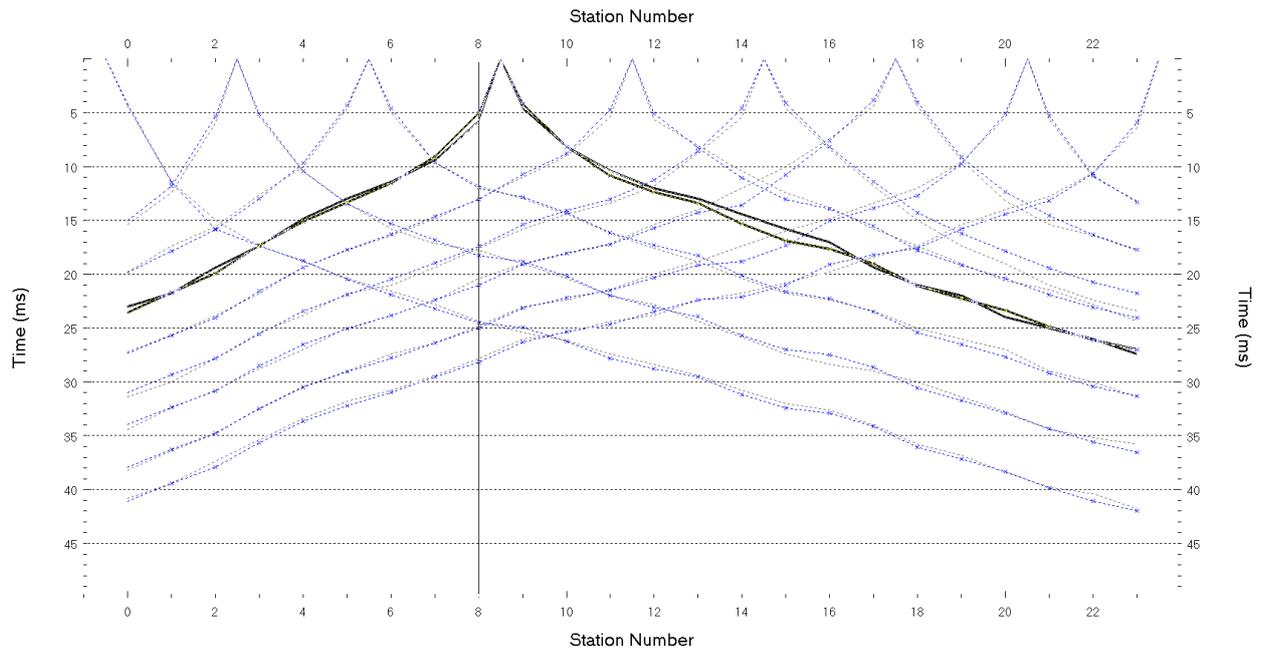
#### SM01 - Sismica a rifrazione R1 in onde P - dromocrone osservate e calcolate



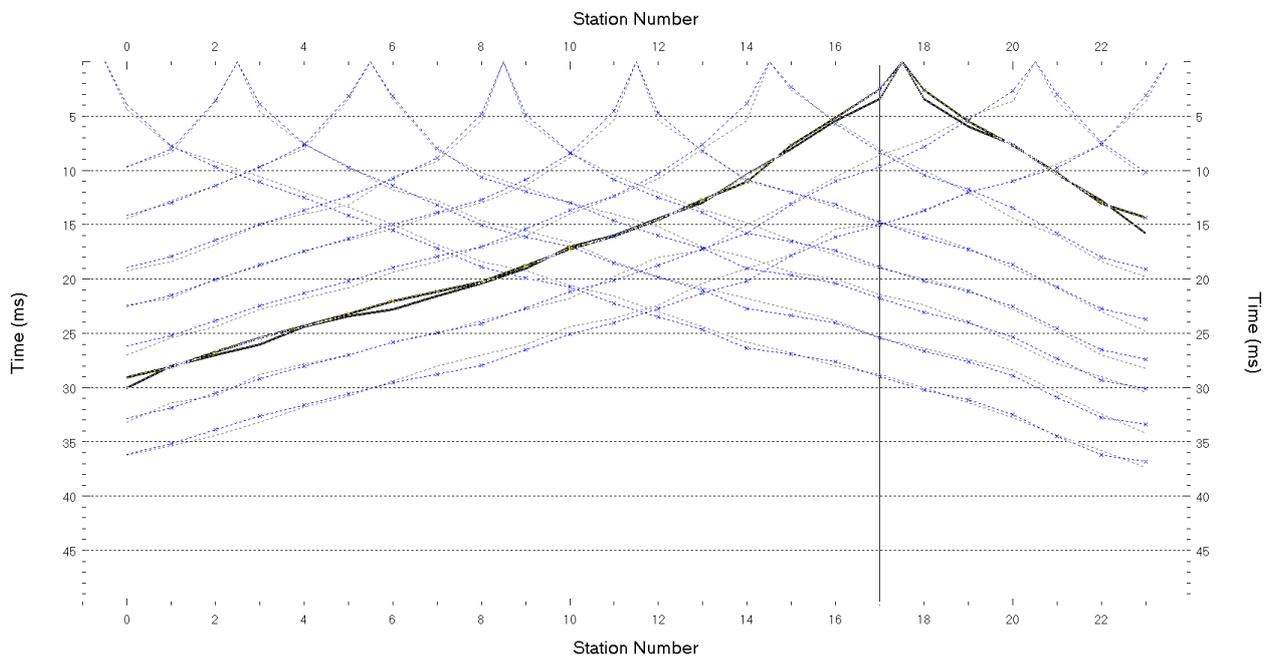
#### SM02 - Sismica a rifrazione R2 in onde P - dromocrone osservate e calcolate



### SM03 - Sismica a rifrazione R3 in onde P - dromocrone osservate e calcolate



### SM04 - Sismica a rifrazione R4 in onde P - dromocrone osservate e calcolate



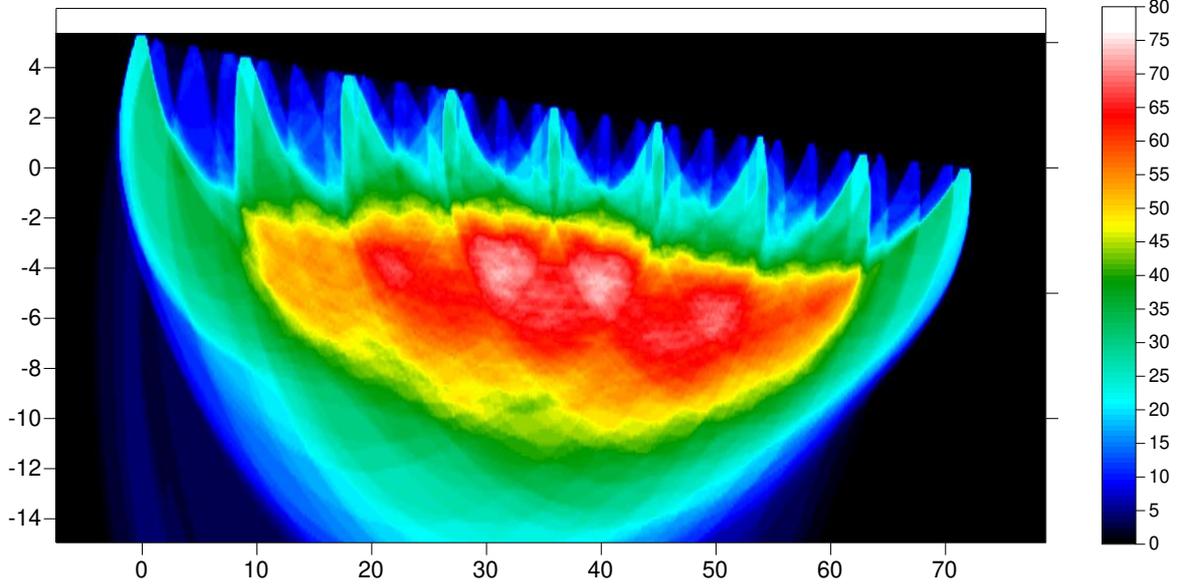
## ALLEGATO 2

### Sismica a rifrazione - dromocrone osservate e calcolate - grafico raggi sismici

#### SM01 - Sismica a rifrazione R1 in onde P

##### Copertura raggi sismici

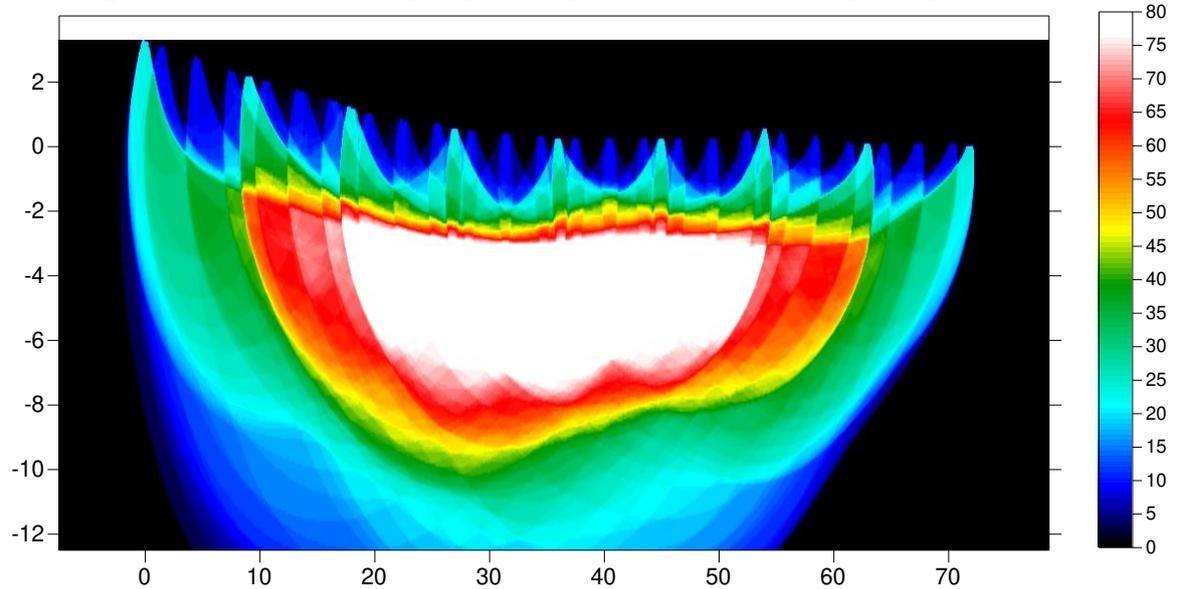
R1-P RMS error 3.0%=0.67ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



#### SM02 - Sismica a rifrazione R2 in onde P

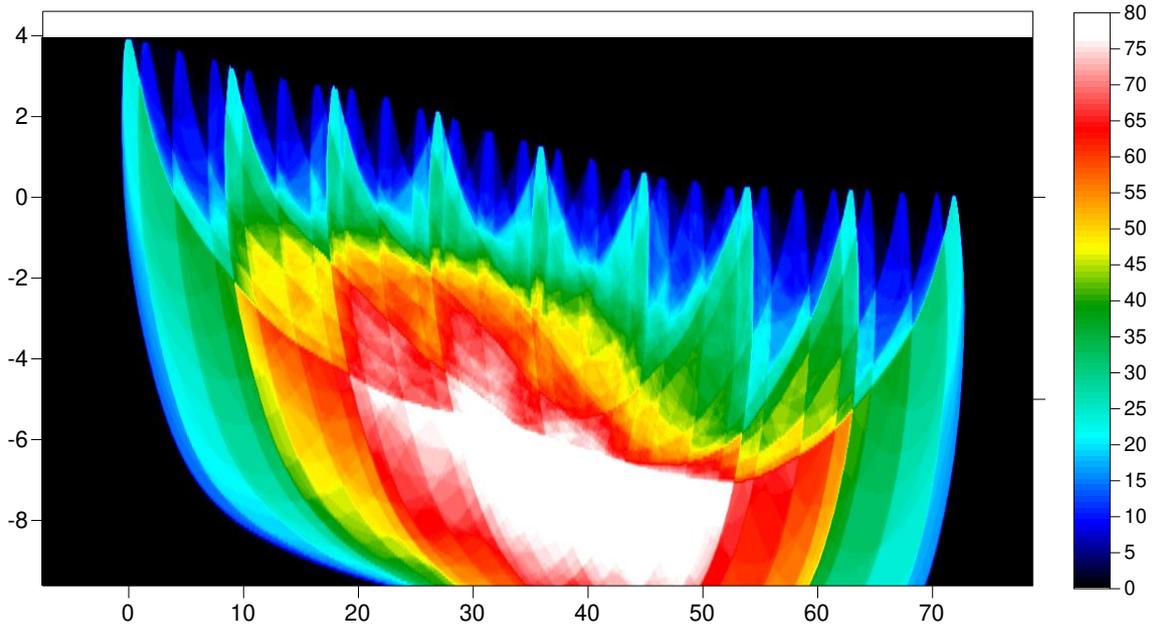
##### Copertura raggi sismici

R2-P RMS error 2.8%=0.48ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



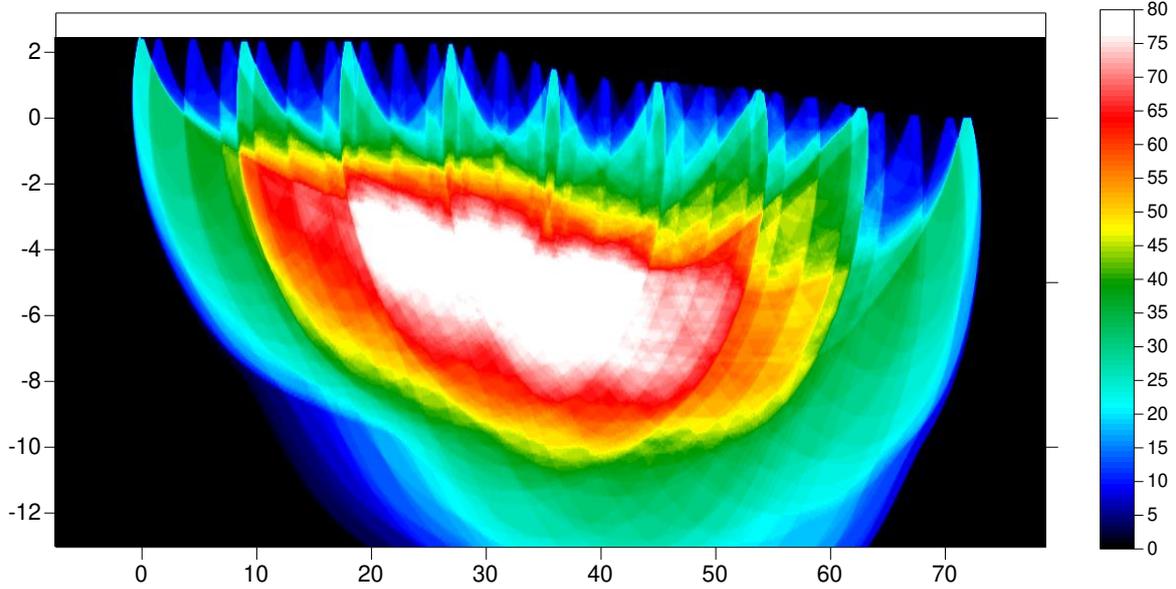
**SM03 - Sismica a rifrazione R3 in onde P**  
**Copertura raggi sismici**

R3-P RMS error 2.3%=0.46ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



**SM04 - Sismica a rifrazione R4 in onde P**  
**Copertura raggi sismici**

R4-P RMS error 2.7%=0.47ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



# Allegato 3: Documentazione fotografica indagini geofisiche

## STENDIMENTO SM01

Sismica a Rifrazione/MASW R1-M1  
dal geofono 1 al centro



Sismica a Rifrazione/MASW R1-M1  
dal centro al geofono 1



Sismica a Rifrazione/MASW R1-M1  
dal geofono 24 al centro



Sismica a Rifrazione/MASW R1-M1  
dal centro al geofono 24



**STENDIMENTO SM02**

**Sismica a Rifrazione/MASW R2-M2  
dal geofono 1 al centro**



**Sismica a Rifrazione/MASW R2-M2  
dal centro al geofono 1**



**Sismica a Rifrazione/MASW R2-M2  
dal geofono 24 al centro**



**Sismica a Rifrazione/MASW R2-M2  
dal centro al geofono 24**



### STENDIMENTO SM03

Sismica a Rifrazione/MASW R3-M3  
dal geofono 1 al centro



Sismica a Rifrazione/MASW R3-M3  
dal centro al geofono 1



Sismica a Rifrazione/MASW R3-M3  
dal geofono 24 al centro



Sismica a Rifrazione/MASW R3-M3  
dal centro al geofono 24



**STENDIMENTO SM04**

**Sismica a Rifrazione/MASW R4-M4  
dal geofono 1 al centro**



**Sismica a Rifrazione/MASW R4-M4  
dal centro al geofono 1**



**Sismica a Rifrazione/MASW R4-M4  
dal geofono 24 al centro**



**Sismica a Rifrazione/MASW R4-M4  
dal centro al geofono 24**

