

Dott. Angelo Strazzera

GEOLOGO

TECNICO DELLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO SISMICO
GEOLOGIA E GEOFISICA APPLICATA ALL'INGEGNERIA CIVILE

COMUNE DI MONREALE

(Libero Consorzio Comunale già Provincia Regionale di Palermo)

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO
AGRO FOTOVOLTAICO PER LA PRODUZIONE DI
ENERGIA ELETTRICA DELLA POTENZA NOMINALE DI
57.40 MWP POTENZA IMMISSIONE 54 MW, E DELLE
OPERE CONNESSE DELLE INFRASTRUTTURE
INDISPENSABILI CAVIDOTTO E SOTTOSTAZIONE

COMMITTENTE

IPC MACCHIAREDDU S.r.l.

Sede legale Via Aterno n. 108
66020 San Giovanni Teatino (CH)
CF/P. Iva 02714110695

STUDIO GEOLOGICO

codice RS06REL0017A0

Ai sensi della nota n° 112363 in data 09/07/2021 del DG del DRT riguardo ai punti 12,
12.1 e 12.2 del cap. 6 delle NTC 2018

ai sensi del D.M. 17.01.2018

ai sensi della Circolare n° 7 C.S.LL.PP. del 21.01.2019

Allegati:

- Carta geologica in scala 1:2000
- Carta geomorfologica in scala 1:2000
- Carta idrogeologica in scala 1:2000
- Carta litotecnica in scala 1:2000
- Carta della pericolosità sismica e MOPS
- Stralcio cartografia P.A.I.
- Planimetria con ubicazione delle indagini
- Documentazione fotografica

IL GEOLOGO

(Dr. Prof. Angelo Strazzera)



1.- PREMESSA

La presente relazione geologica è stata redatta a seguito dello studio geologico eseguito **per ottemperare alle prescrizioni di cui alla nota n° 112363 in data 09/07/2021 del DG del DRT riguardo le disposizioni di cui ai punti 12, 12.1 e 12.2 cap. 6 delle NTC 2018**, relativo al **"Progetto per la realizzazione di un parco agrofotovoltaico da 58,94 MWp con potenza di immissione da 54 MW"**, da installare in località **"Gallitello"**, nel comune di **Monreale (PA)**, con generatore fotovoltaico all'interno di due aree come da tabella più avanti illustrata.

La ditta committente, **IPC MACCHIAREDDU S.r.l.**, ha richiesto al sottoscritto la consulenza geologica per il **Parere di FATTIBILITÀ DI OPERE SU GRANDI AREE, ai sensi delle N.T.C. 2018, Cap. 6 punto 12, 12.1 e 12.2, giusto nota del DG/DRT n. 112363 del 09/07/2021 e Direttiva n. 124076 del 03/08/2021.**

Lo studio che viene di seguito illustrato, è stato eseguito in ottemperanza alle disposizioni tecniche emanate con:

- il D.M. 16.01.1996;
- l'O.P.C.M. n. 3274 del 20.03.03;
- le **N.T.C. (Norme Tecniche per le Costruzioni)** di cui al **D.M. 17.01.2018 e successiva Circolare n.7 C.S.LL.PP. del 21.01.2019;**
- il D.A. n° 120 del 14.07.2021 (**Assessorato Territorio Ambiente della Regione Siciliana**).

Pertanto, sono stati eseguiti, sia i **rilievi geologico-tecnici**, sia le **indagini geofisiche** necessarie per:

- ☑ **definire** l'assetto geomorfologico ed idrogeologico dell'area;
- ☑ **determinare** sia la tipologia, sia la natura petrografica dei litotipi presenti nel lotto su cui è prevista la realizzazione degli edifici in progetto;
- ☑ **caratterizzare**, dal punto di vista sismostratigrafico e litotecnico, la porzione di sottosuolo interessata dal progetto dell'Impianto Fotovoltaico.

All'interno del lotto in oggetto, in corrispondenza dei punti ritenuti significativi in rapporto anche all'ubicazione degli interventi progettuali, è stato effettuato uno **studio delle Vibrazioni Ambientali (analisi spettrale - rumore sismico) attraverso un'indagine Tromografica eseguita con tecnica HVSR su tre rilevamenti sismici a singola stazione**. L'indagine geofisica eseguita, in armonia con i dettami e le prescrizioni sancite dal **D.A. n° 120 del 14.07.2021 emanato dall'Assessorato Territorio ed Ambiente della Regione Sicilia** in merito a studi di carattere urbanistico, ha focalizzato l'attenzione sugli aspetti sismici per far emergere eventuali anomalie e tratteggiare nel complesso le caratteristiche legate alla risposta sismica locale.

Lo studio che viene illustrato nel corso della presente relazione geologica, **redatta ai sensi dei punti 12 e 12.1 cap. 6 delle NTC 2018**, verrà integrato con ulteriori specifiche informazioni sulla natura dei luoghi, come ad esempio la caratterizzazione fisico-meccanica dei litotipi di fondazione, che verranno acquisite in fase di **progetto esecutivo** delle opere in oggetto.

L'impianto agrofotovoltaico in progetto è di tipo fisso a terra, di potenza complessiva pari a **58,94 MWp**, costituito da due sottocampi distinti come in tabella:

			SUP DI PROGETTO					
F 178	67 77 02	84 55 33	FOGLIO	PARTICELLA	PORZ	QUALITA'	SUP CATASTALI	84 55 33
F 156	16 78 31					CLASSE	ha are ca	ha are ca
	Area 1	178	10			SEMINATIVO 2	04 97 00	04 97 00
			13			SEMINATIVO 3	11 32 20	11 32 20
			51			SEMINATIVO 2	02 31 84	02 31 84
			56			SEMINATIVO 3	05 49 10	05 49 10
			60			SEMINATIVO 3	02 59 70	01 96 00
			61			SEMINATIVO 3	02 42 87	02 42 87
			63			SEMINATIVO 3	03 42 00	03 42 00
			80			SEMINATIVO 3	02 10 50	02 10 50
			149			SEMINATIVO 3	05 00 00	02 46 00
			150			SEMINATIVO 3	08 89 70	03 63 00
			46			SEMINATIVO 2	01 57 60	01 57 60
			51			SEMINATIVO 3	00 28 60	00 28 60
			52	AA		SEMINATIVO 2	01 85 54	01 48 00
			52	AB		VIGNETO 2	00 57 16	
		78			SEMINATIVO 3	00 37 15	00 37 15	
		79			SEMINATIVO 5	00 37 70	00 37 70	
		80			SEMINATIVO 5	01 57 70	01 57 70	
		89			SEMINATIVO 2	01 35 40	01 35 40	
		90			SEMINATIVO 3	00 46 10	00 46 10	
		91			SEMINATIVO 3	01 38 70	01 38 70	
		92			SEMINATIVO 3	01 38 20	00 40 00	
		112	AA		SEMINATIVO 2	01 87 93	01 42 66	
		112	AB		VIGNETO 2	00 42 67		
		113	AA		SEMINATIVO 1	00 81 00	00 86 70	
		113	AB		VIGNETO 2	00 05 70		
		312			SEMINATIVO 2	01 36 20	01 36 20	
		313			SEMINATIVO 2	00 56 40	00 56 40	
		314			SEMINATIVO 3	00 62 90	00 62 90	
		315			SEMINATIVO 3	00 58 05	00 58 05	
		316			SEMINATIVO 3	00 27 82	00 27 82	
		408			SEMINATIVO 3	00 02 83	00 02 83	
		409			SEMINATIVO 3	00 13 13	00 13 13	
		410			SEMINATIVO 3	00 04 30	00 04 30	
		411			SEMINATIVO 3	00 03 40	00 03 40	
412			SEMINATIVO 3	00 02 96	00 02 96			
413			SEMINATIVO 3	00 04 51	00 04 51			
424			SEMINATIVO 3	00 67 15	00 67 15			
425			CATASTO FABBRICATI	00 00 55	00 00 55			
429			CATASTO FABBRICATI	00 00 10	00 00 10			
481			SEMINATIVO 2	00 81 70	00 81 70			
							68 14 06	56 88 82
	Area 2	178	70			SEMINATIVO 3	03 94 80	03 94 80
			97			SEMINATIVO 3	03 09 80	03 09 80
			98			PASCOLO 3	00 07 20	00 07 20
			99			SEMINATIVO 3	05 88 40	05 88 40
			100	AA		SEMINATIVO 3	03 66 97	03 90 50
				AB		ULIVETO 2	00 17 40	
				AC		PASCOLO 3	00 06 13	
			101	AA		SEMINATIVO 3	00 00 40	00 01 30
				AB		ULIVETO 2	00 00 21	
				AC		PASCOLO 3	00 00 69	
			144			SEMINATIVO 3	10 22 30	10 22 30
			145			PASCOLO 3	00 52 21	00 52 21
							27 66 51	27 66 51

La superficie impegnata dall'impianto fotovoltaico è pari a: **AREA 1 = 56.8817 ha - AREA 2 = 27.6651 ha.**

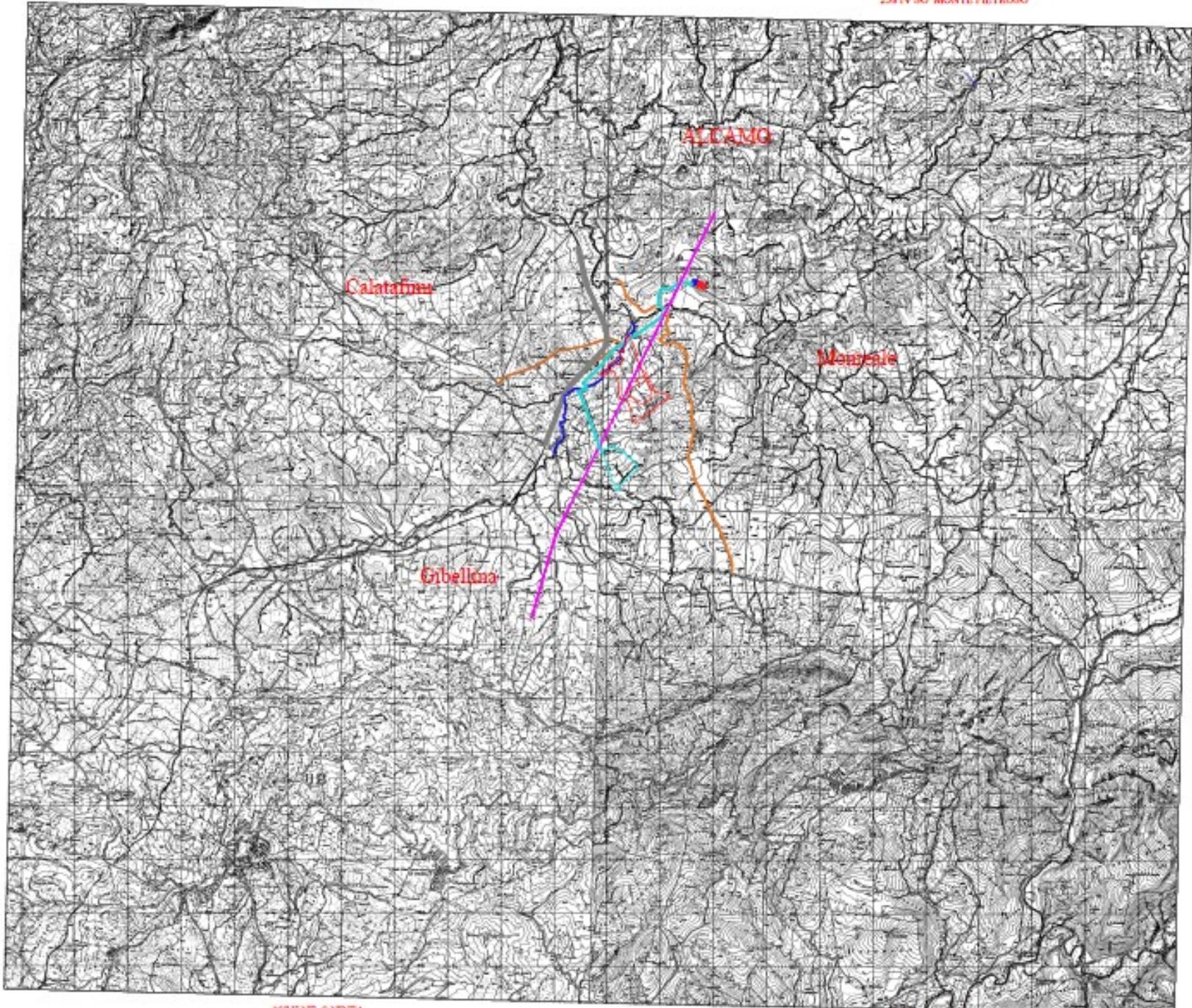
Al presente studio geologico vengono allegati, su cartografia georeferenziata:

- ⊗ **Stralcio Tavole I.G.M. F° 257 I SE "Calatafimi" - F° 258 IV SO "Monte Pietroso" - F° 257 II NE "Santa Ninfa" - F° 258 III NO "Gibellina" - in scala 1:25.000;**
- ⊗ **Stralcio Aerofotogrammetria del territorio comunale in scala 1:10.000 e 1:5.000;**
- ⊗ **Piano Particellare Catastale da file Excel;**
- ⊗ **Stralcio Planimetria dei lotti in scala 1 : 2000, con ubicazione delle indagini geofisiche;**
- ⊗ **Sezione litostratigrafica schematica del sito studiato e caratterizzazione geotecnica dei litotipi presenti nel lotto;**
- ⊗ **Grafico riportante l'andamento delle Vs in funzione della profondità ed il calcolo del $V_{s_{eq}}$ eseguito con software dedicato;**
- ⊗ **Cartografia estratta dal "Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I. 045 - Bacino idrografico del Fiume San Bartolomeo - CTR 606120 e 606160 - Anno 2006 ed aggiornamento Anno 2020)", relativa al Comune di Monreale, già approvata con il DPRS n° 229 del 04.06.2007 e con il D.S.G. n° 30 del 18.02.2021 Allegato n° 2b;**
- ⊗ **Documentazione fotografica.**



257 I SE CALATAFINI

258 IV SO MONTE PIETROSO

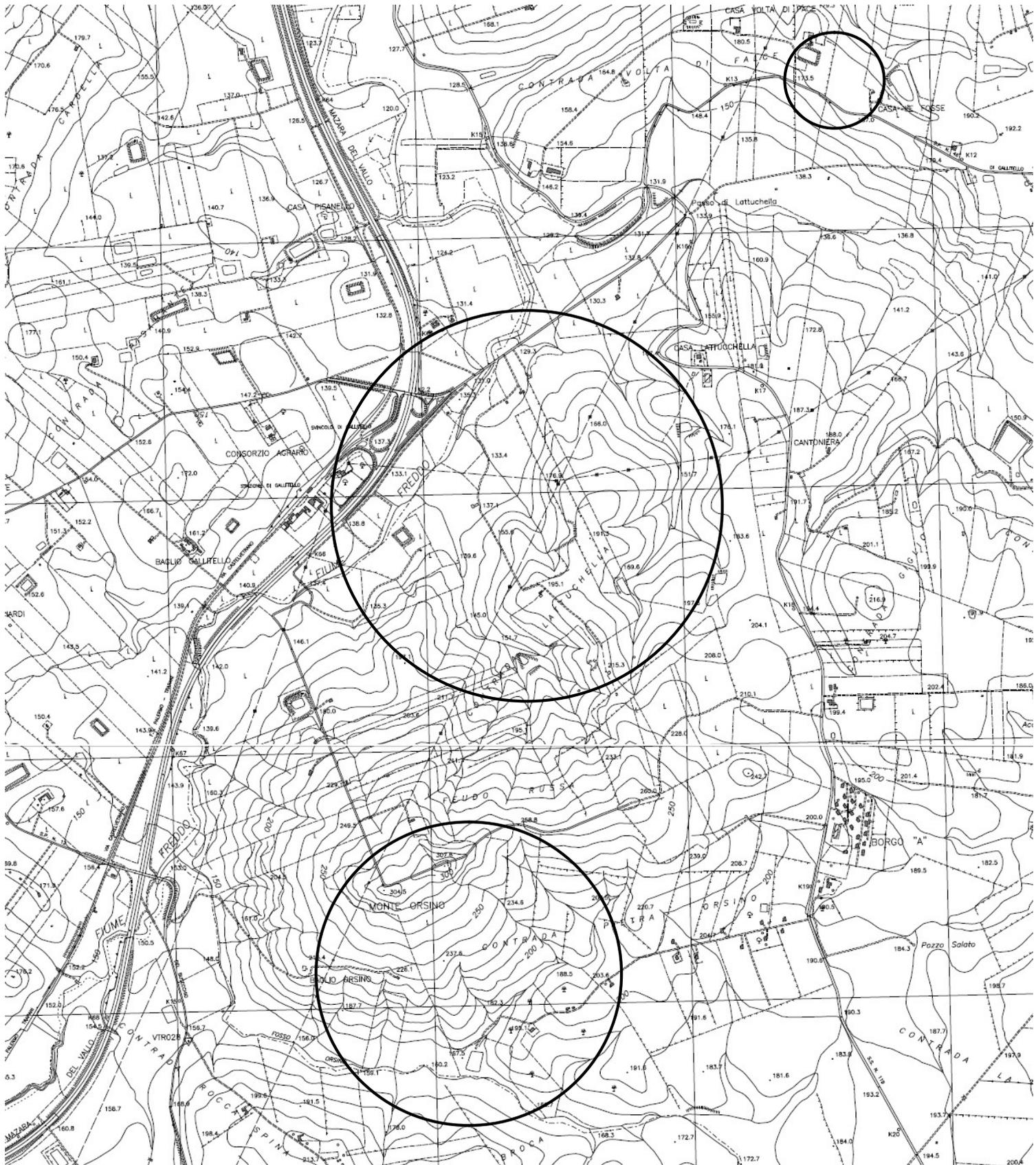


- LEGENDA**
- Linea comunale
 - Area 1 Impianto Agro Polivalente Comune di Mompalao (PA)
 - Area 2 Impianto Agro Polivalente Comune di Mompalao (PA)
 - SP 13.46
 - SS 119
 - Ferrovie
 - Piani Paduli
 - Canalicole di cooperazione 50 kV
 - Nuova Stazione elettrica RTN 220 kV Mompalao
 - Substazione di trasformazione 220/110 kV Spina IPC Mompalao
 - Reti di linea 117 220 kV

257 II NE S. NINFA

258 III NO GIBELLINA

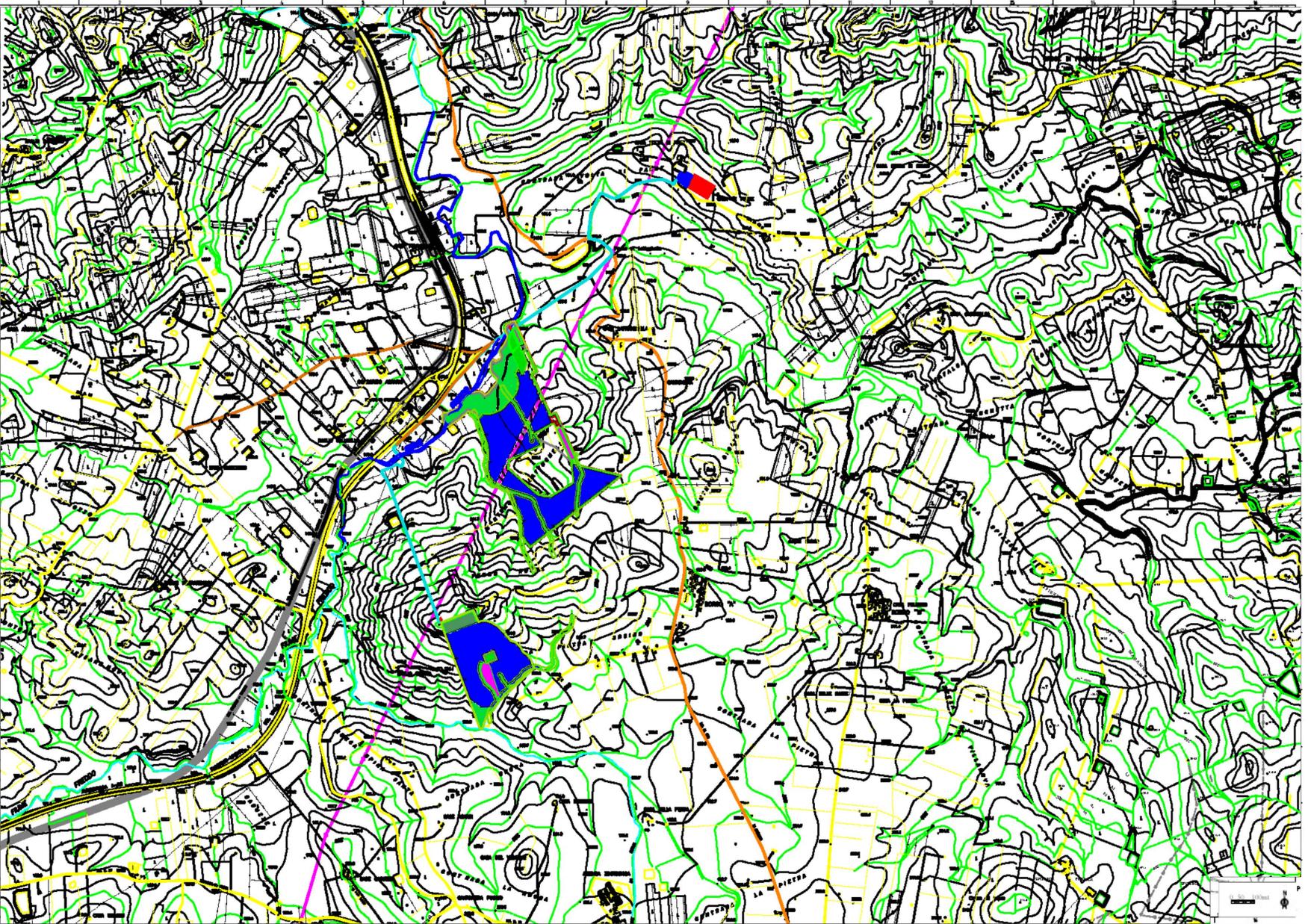




***Stralcio Aerofotogrammetria del territorio comunale
da CTR 606120 e CTR 606160***

Dr. Angelo Strazzerà – Geologo –
 Studio tecnico via A. Manzoni, 23
 91027 PACECO (TP)
 tel./fax 0923/881443 - cell. 349/2951490
 e-mail: angelostrazzer@libero.it

pagina 7 di 56



Ubicazione dell'impianto agrofotovoltaico e della sottostazione di connessione: in verde le aree agricole. In blu le aree utilizzate per l'installazione del FV.

Dr. Angelo Strazzerà – **Geologo** –
Studio tecnico via A. Manzoni, 23
91027 PACECO (TP)
tel./fax 0923/881443 - cell. 349/2951490
e-mail: angelostrazzer@libero.it

2.- GEOMORFOLOGIA DELL'AREA E SUE CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE

2.1 – Analisi geomorfologica dell'area

Il rilievo geomorfologico, così come lo stato di attività dei fenomeni morfogenetici che caratterizzano l'insediamento di **c.da Gallitello** nel **Comune di Monreale (PA)**, e le zone limitrofe, è stato dedotto da osservazioni basate sull'evoluzione delle forme e sulle caratteristiche tipologiche delle opere antropiche realizzate.

L'aspetto morfologico generale è quello tipico di ambiente collinare, i cui profili abbastanza maturi si raccordano in continuità nei fondi valle, modellatisi "a spese" di terreni incoerenti e/o pseudocoerenti.

L'azione degli agenti morfogenetici che interagiscono sull'area studiata, produce essenzialmente il modellamento dei versanti con l'alterazione della roccia in posto e successiva erosione con trasporto dei prodotti di alterazione verso il basso.

L'*habitus* geomorfologico che contraddistingue la topografia locale è il risultato dell'azione erosiva esercitata dalle acque incanalate e dalle acque di ruscellamento superficiale.

Mentre le acque di ruscellamento superficiale aggrediscono la superficie topografica con erosione laminare ed erosione per rigagnoli, le acque incanalate influenzano il sottosuolo creando, a luoghi, distacchi e scivolamenti delle litologie incoerenti e pseudocoerenti.

La natura petrografica degli affioramenti, le condizioni morfologiche generali unitamente a quelle climatiche, sono le

concause responsabili di frequenti fenomeni di *creep* e *colamenti* del suolo argilloso; questi ultimi sono strettamente collegati all'ammollimento operato dalle acque vadose.

Riepilogando, i litotipi argillosi nel loro insieme, "rispondendo" agli stress tettonici con un comportamento reologico di tipo plastico, hanno determinato un assetto morfologico con versanti piuttosto ondulati raccordati da displuvi e solchi drenanti spesso *afflitti* da fenomeni franosi.

L'area studiata, che comprende i lotti di terreno su cui si articoleranno i campi fotovoltaici in progetto, è posta ad una quota media di circa 250 m sul livello del mare; essa, a grande scala, mostra la presenza di una rete idrografica superficiale marcata, la cui esistenza è da correlare alle caratteristiche di permeabilità dei terreni superficiali.

Si sottolinea, inoltre, che i lotti di progetto **non ricadono** nelle aree interessate da **pericolosità idraulica e di frana** (P1 - P2 - P3 - P4) e/o **rischio idraulico e di frana** (R1 - R2 - R3 - R4), perimetrare nel "Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I. Area territoriale 045 - Bacino idrografico del Fiume S. Bartolomeo - Anno 2006 ed Aggiornamento Anno 2020)" relative al Comune di Monreale, già approvate con il DPRS n° 229 del 04.06.2007 ed aggiornate con il **D.S.G. n° 30 del 18.02.2021 Allegato n° 2b.**

2.2 – Analisi idrogeologica dell'area

Un'aliquota dell'apporto idrico di precipitazione meteorica viene in parte sottratta al deflusso superficiale a favore dell'infiltrazione nel sottosuolo e dell'evapotraspirazione.

Il circuito idrogeologico trova via preferenziale nello strato superficiale più o meno alterato, a giacitura caotica, che ricopre la sottostante formazione argillosa, scarsamente permeabile, che a sua volta realizza il letto del modesto acquifero superficiale costituito dall'acqua d'imbibizione detta anche *epidermica*.

Durante i sopralluoghi effettuati, allo stato attuale, non si è rilevata presenza di dissesti superficiali tali da far presupporre l'azione di agenti morfogenetici in atto od in fase quiescente che possano, in futuro, turbare l'equilibrio attuale.

Sia a causa del livello di antropizzazione dei luoghi, sia a causa delle condizioni geomorfologiche, geologiche ed idrogeologiche, è possibile notare, a larga scala, la mancanza di un marcato reticolo idrografico superficiale, che caratterizza questa parte del territorio comunale di Monreale (PA).

Tale situazione è indicativa del fatto che un'aliquota dell'apporto idrico di precipitazione media annua e precisamente la percentuale delle acque meteoriche, al netto dell'evapotraspirazione e del ruscellamento superficiale, infiltrandosi, va ad alimentare la circolazione idrica superficiale, in quanto, il substrato è costituito da rocce prevalentemente pseudocoese che possiedono una scarsa permeabilità di origine primaria e/o secondaria.

Tale permeabilità è caratterizzata da un coefficiente "k" variabile a seconda delle condizioni diagenetiche locali, che presenta un valore medio nell'ordine di 10^{-6} cm/sec.



Regione Siciliana

Presidenza della Regione Siciliana

Autorità di Bacino del Distretto Idrografico della Sicilia

Servizio 2 "ASSETTO DEL TERRITORIO"

Unità Operativa 2.1

Aggiornamento del Piano Stralcio di Bacino
per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.)

(Art. 67 del D.Lgs. 3 Aprile 2006, n. 152 e ss. mm. ii.)

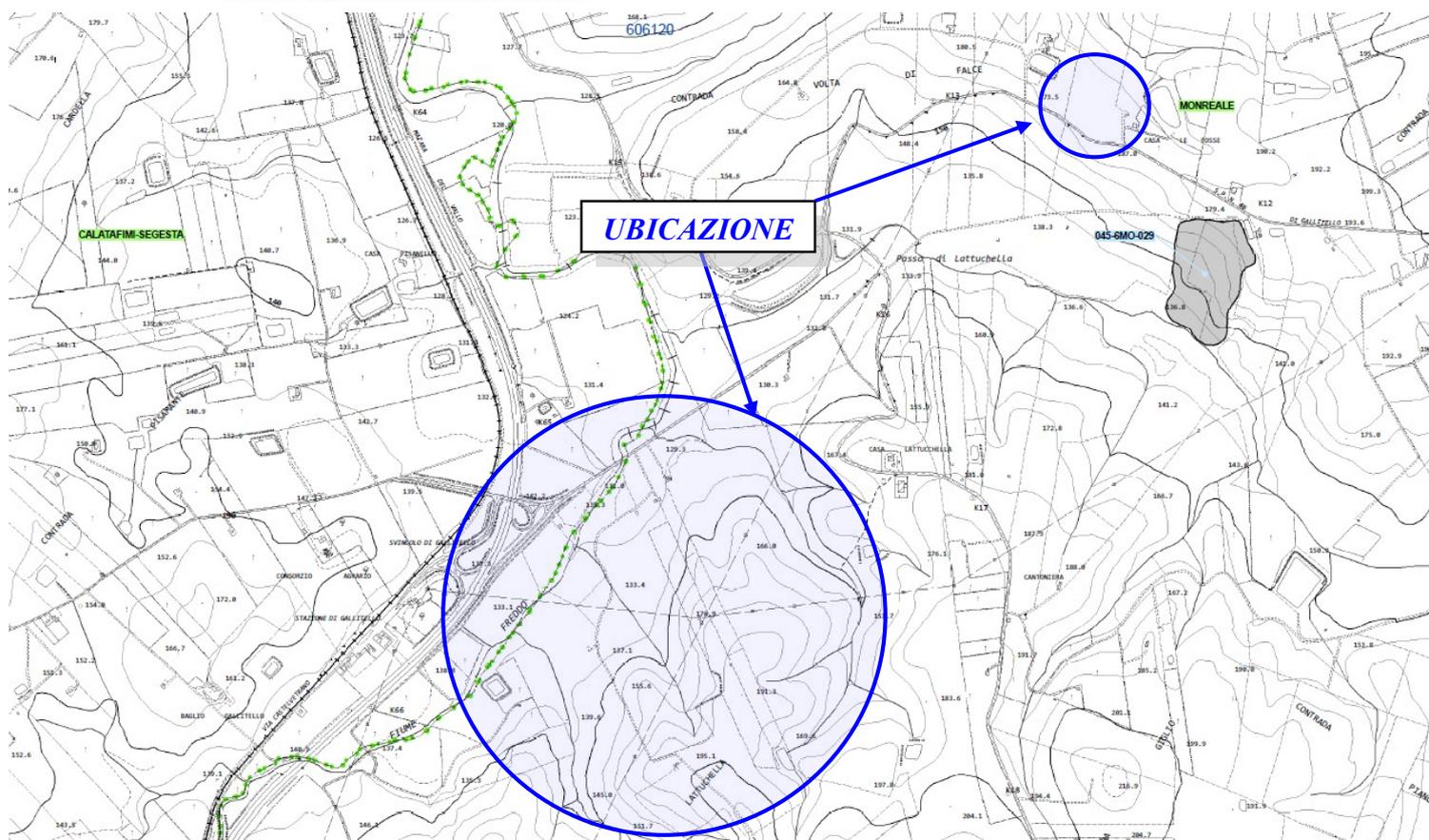
Conferenza programmatica del 19/10/2020

(Art. 130 della L.R. n. 6 del 03/05/2001)

GEOMORFOLOGIA
COMUNE DI: MONREALE

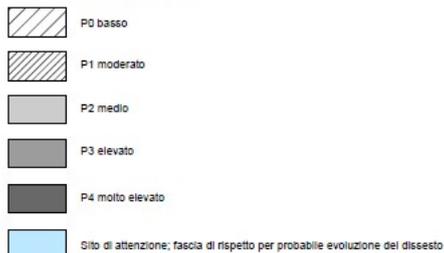


CTR N. 606120 - SCALA 1:10.000
CARTA DELLA PERICOLOSITA' E DEL RISCHIO

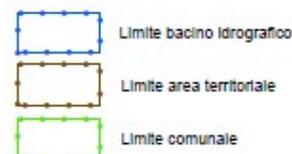


LEGENDA

LIVELLI DI PERICOLOSITA'



LIVELLI DI RISCHIO



Limite di pericolosità e/o fascia di rispetto coperta da area a pericolosità maggiore/rischio

REPUBBLICA ITALIANA



Regione Siciliana
Assessorato Territorio e Ambiente

DIPARTIMENTO TERRITORIO E AMBIENTE
Servizio 4 "ASSETTO DEL TERRITORIO E DIFESA DEL SUOLO"

Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.)

(ART.1 D.L. 180/98 CONVERTITO CON MODIFICHE CON LA L.267/98 e ss. mm. II.)

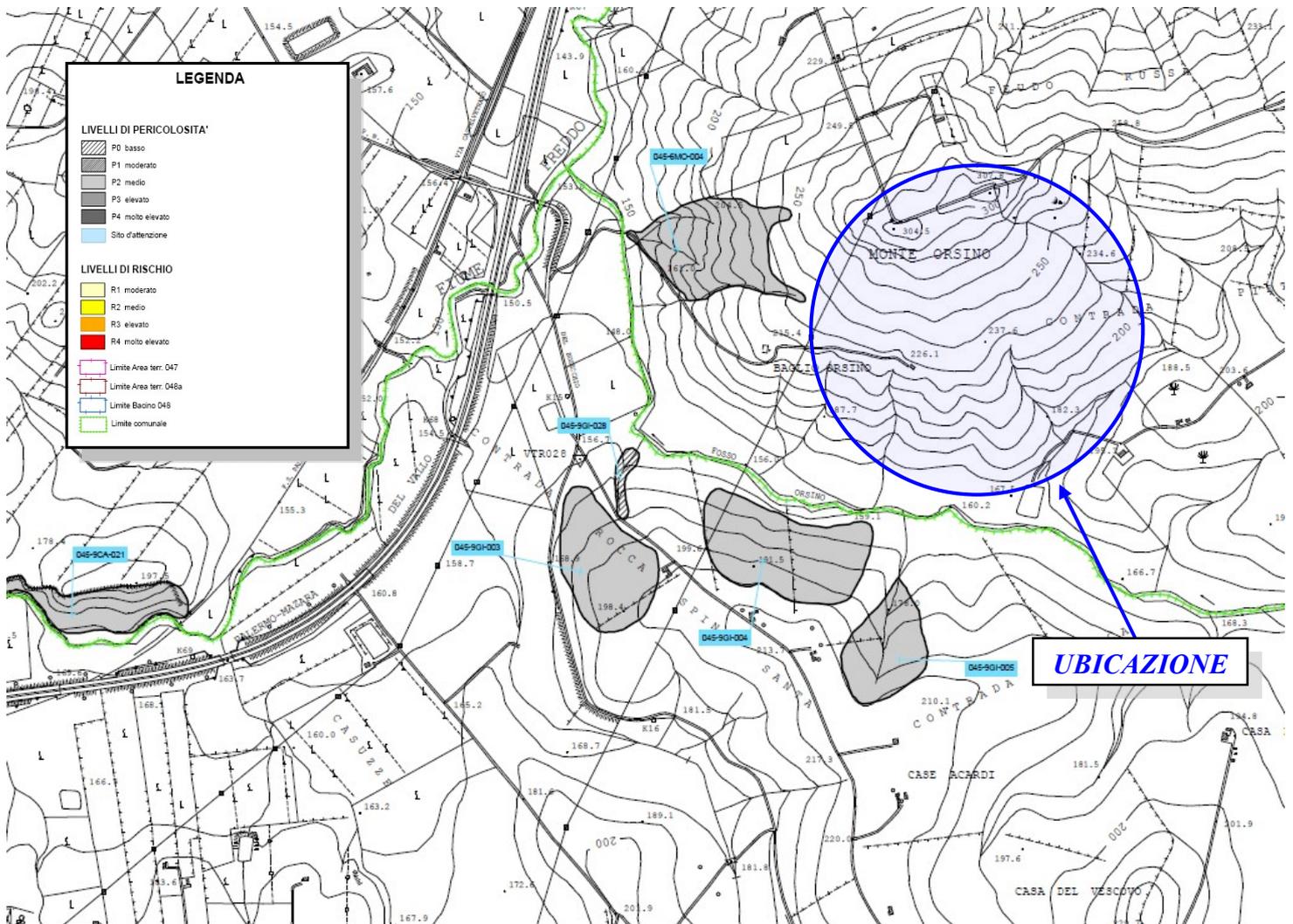
Bacino Idrografico del F. San Bartolomeo (045)

CARTA DELLA PERICOLOSITA' E DEL RISCHIO GEOMORFOLOGICO N° 24

COMUNI DI
Alcamo, Calatafimi-Segesta, Monreale

Scala 1:10.000

Anno 2006



3.- INQUADRAMENTO GEOLOGICO ED ASSETTO STRATIGRAFICO-STRUTTURALE DEL TERRITORIO

Il rilievo geologico di campagna, i dati fruibili dalla letteratura tecnica specifica e le indagini eseguite *in situ*, hanno consentito di definire con sufficiente grado di attendibilità le condizioni litologiche e strutturali dei litotipi presenti nell'area esaminata.

La geologia dell'area è descritta nella "**Carta Geologica Foglio 606 ALCAMO**" degli autori S. Bommarito, R.M. Bonni e R. Di Pietro, pubblicata **dall'Università di Palermo - Dipartimento di Geologia e Geodesia** nel 1995.

La porzione del territorio comunale di Monreale (PA) che comprende la parte orientale dello svincolo autostradale di **Gallitello (A29 Palermo - Mazara del Vallo)**, oggetto di questo studio, dal punto di vista geologico-strutturale, è caratterizzata dal sub-affioramento della formazione di **Cozzo Terravecchia**, vale a dire **depositi terrigeni sabbiosi ed arenacei**, in continuità stratigrafica con **marne, argille marnose ed argille di colore grigio verdastro**. L'intervallo cronostratigrafico può essere ricondotto da letteratura dal Burdigaliano al Messiniano inferiore.

Verso il basso affiorano presso **Monte Orsino (307 m s.l.m.)** **Depositi carbonatici a granulometria fine, a stratificazione tabulare** caratterizzati da prevalenti **Calcilutiti (tipo Scaglia)**, **con noduli e liste di selce, di colore cangiante dal bianco al rosso** risalenti al Cretaceo superiore - Oligocene inferiore.

Al tetto della successione stratigrafica si rilevano **prodotti eluviali e depositi colluviali, depositi alluvionali di fondovalle terrazzati quali ghiaie, sabbie e limi.**

Cronostratigraficamente riconducibili all'intervallo temporale che va dal Pleistocene superiore - Olocene.

Il rilievo geologico di campagna ha consentito, compatibilmente con le finalità del lavoro, di definire con sufficiente grado di attendibilità la successione stratigrafica dei litotipi presenti nell'area esaminata:

- **depositi di versante, detriti e accumuli di materiali eterometrici di spessore variabile, prodotti eluviali e depositi colluviali, depositi alluvionali di fondovalle terrazzati quali ghiaie, sabbie e limi** (Pleistocene superiore - Olocene);
- **depositi terrigeni sabbiosi ed arenacei (Fm. di Cozzo Terravecchia,** in continuità stratigrafica con **marne, argille marnose ed argille di colore grigio verdastro** (Burdigaliano - Messiniano inferiore);
- **depositi carbonatici a granulometria fine, a stratificazione tabulare** caratterizzati da prevalenti **Calcilutiti (tipo Scaglia), con noduli e liste di selce, di colore cangiante dal bianco al rosso** (Cretaceo superiore - Oligocene inferiore)



4.- INDAGINE GEOGNOSTICA E MODELLO GEOLOGICO DEL SOTTOSUOLO

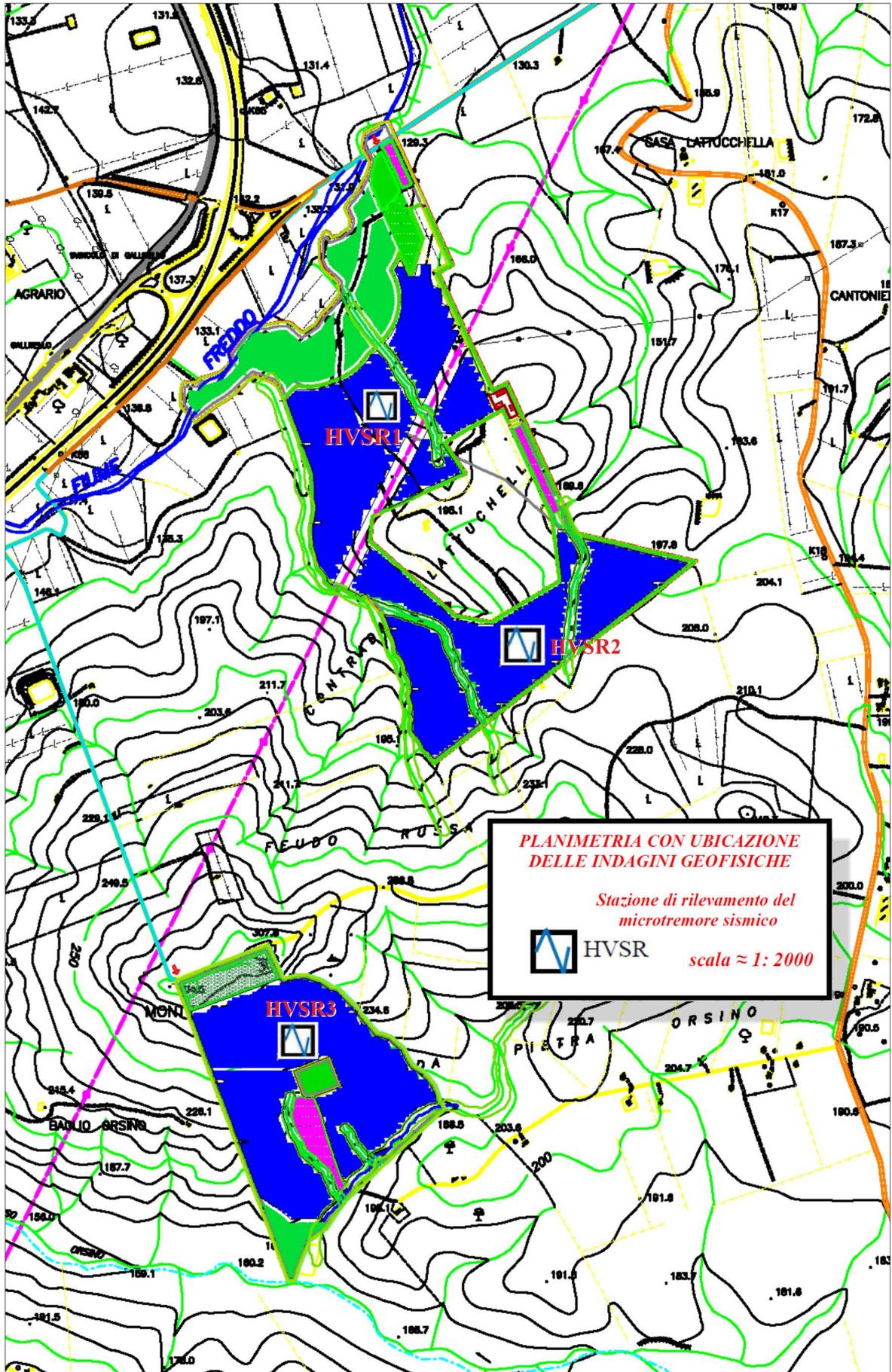
Nel presente paragrafo vengono illustrati i risultati conseguiti con le **indagini geofisiche eseguite in situ**, allo scopo di caratterizzare dal punto di vista sismostratigrafico i litotipi che costituiscono il sottosuolo del lotto indagato, acquisendo, nello stesso tempo alcune informazioni utili per una definizione qualitativa delle proprietà litotecniche degli stessi.

Per la realizzazione di quanto sopraindicato, tenuto conto delle esigenze progettuali e delle "conoscenze" dal punto di vista geognostico, è stata realizzata la campagna di indagine geofisica compiuta attraverso l'esecuzione di **n° 3 indagini tromografiche con registrazione delle vibrazioni ambientali "microtremore sismico" a singola stazione, elaborate con tecnica HVSR.**

4.1.- L'INDAGINE TROMOGRAFICA -

La ricostruzione dell'assetto strutturale e della successione litostratigrafica e sismostratigrafica del sottosuolo su cui è prevista la realizzazione delle "opere" in progetto, è stata realizzata attraverso l'esecuzione di **tre indagini di sismica passiva a singola stazione i cui dati sono stati elaborati con tecnica HVSR.**

L'**indagine tromografica**, denominata **HVSR 1 ... HVSR 3**, è stata ubicata come indicato nella "aerofotogrammetria", di seguito illustrata.



Le basi teoriche della metodologia utilizzata hanno origine nei primi studi eseguiti da Kanai (1957) nei quali si dimostrava sperimentalmente una correlazione tra alcuni parametri estratti dallo **studio delle Vibrazioni Ambientali (analisi spettrale - rumore sismico)** di un sito e le caratteristiche sismo-stratigrafiche dello stesso.

Le vibrazioni ambientali dette "**rumore sismico**", generate da fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica, sono presenti ovunque sulla superficie terrestre.

Si definisce anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti nel campo prossimo all'epicentro.

I microtremori sono solo in parte costituiti da onde di volume, P o S; in essi **giocano un ruolo fondamentale le onde di superficie che hanno velocità prossime a quelle delle onde di taglio VS**. In analogia alle tradizionali tecniche di prospezione sismica, la sismica passiva è una tecnica che permette di definire la serie stratigrafica locale basandosi sul concetto di contrasto di impedenza acustica fra strati definiti come unità distinte in relazione al rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e la densità del mezzo stesso.

Tra le varie tecniche messe a punto successivamente alle intuizioni di **Kanai**, **si è maggiormente consolidata negli anni quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V)**, proposta da Nogoshi e Igarashi (1970) e successivamente applicata da **Nakamura (1989) per la determinazione dell'amplificazione sismica locale**.

Le basi teoriche dell'HVSR sono relativamente semplici in un sistema stratificato in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D). Lo schema illustrato nella **figura 1** rappresenta due strati (1 e 2) che si differenziano per le densità (ρ_1 e ρ_2) e le velocità delle onde sismiche (V_1 e V_2).

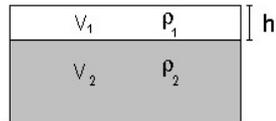


Figura 1. Modello di suolo caratterizzato da strati a densità ρ e velocità delle onde sismiche V

In questo caso, un'onda che viaggia nel **mezzo 1** viene parzialmente riflessa dall'interfaccia tra i due strati. L'onda riflessa, interferendo con quelle incidenti, si somma e raggiunge le ampiezze massime (**condizione di risonanza**) quando **la lunghezza dell'onda incidente (λ)** è quattro volte (o suoi multipli dispari) **lo spessore h del primo strato**.

Ne consegue che la **frequenza di risonanza (f_r)** dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = \frac{V_p}{4h}$$

mentre quella relativa alle onde S è:

$$f_r = \frac{V_s}{4h}$$

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché **la curva HVSR** mostra, come massimi relativi, le frequenze di risonanza dei vari strati.

Questo dato, insieme alla stima delle velocità, è in grado di fornire utili previsioni sullo spessore degli strati.

Questa informazione è contenuta principalmente nella componente verticale del moto ma la prassi di usare il rapporto tra gli spettri orizzontali e quello verticale, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per il contenuto in frequenza, per la risposta strumentale e per l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo.

Il suddetto esempio si riferisce ad una modellistica semplificata monodimensionale, nella realtà si è spesso di fronte a casi più complessi caratterizzati da eterogeneità laterali, da topografia non piana e da inversioni di velocità sismiche.

L'inversione delle misure di microtremore sfrutta la tecnica del confronto degli spettri singoli e dei rapporti H/V misurati con quelli "sintetici", cioè calcolati relativamente al campo d'onde completo di un **modello 3D**.

4.1.1.- La strumentazione utilizzata e la metodologia di analisi dei dati -

Per l'acquisizione dei dati sperimentali è stato utilizzato un **tromografo digitale** modello **Geobox** della **S.A.R.A. Electronics s.r.l. di Perugia (PG)**, il quale racchiude al suo interno tre sensori elettrodinamici ad alta definizione (velocimetri) ortogonali tra loro, con intervallo di frequenze

compreso tra 0,1 e 256 Hz. I dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 300 Hz.

Dalle registrazioni del rumore sismico sono state ricavate e analizzate due serie di dati:

- ◆ le **curve HVSR** ottenute mediante il **software "Geopsy"** eseguendo un *processing* con i seguenti parametri:
 - larghezza delle finestre d'analisi pari a 20s per tempi di acquisizione di 10 minuti;
 - lisciamento secondo finestra triangolare con ampiezza pari al 10% della frequenza centrale;
 - rimozione delle finestre con rapporto STA/LTA (media a breve termine/media a lungo termine) superiore ad 2;
 - rimozione manuale di eventuali transienti ancora presenti.
- ◆ le curve dello spettro di velocità delle tre componenti del moto sono state ottenute dopo l'analisi con gli stessi parametri sopra riportati.

Le profondità H delle discontinuità sismiche sono state ricavate tramite la seguente relazione:

$$H = \left[\frac{V_0(1-\alpha)}{4 \hat{v}_1} + 1 \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} - 1$$

in cui:

- V_0 è la velocità al tetto dello strato;
- α un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione, ecc.);
- \hat{v}_1 la frequenza fondamentale di risonanza.

Per considerare attendibili le misure ottenute, è necessario che:

1. i rapporti H/V ottenuti sperimentalmente siano "stabili" ovvero frutto di un campionamento statistico adeguato;
2. gli effetti di sorgente siano stati effettivamente mediati ovvero non ci siano state sorgenti "dominanti";
3. la misura non contenga errori sistematici (per es. dovuti ad un cattivo accoppiamento dello strumento con il terreno).

Per la determinazione delle velocità delle onde di taglio si utilizza un codice di calcolo appositamente creato per interpretare i rapporti spettrali (HVSR) basati sulla simulazione del campo di onde di superficie in sistemi multistrato a strati piani e paralleli (AKI, 1964).

Il software dedicato qui utilizzato prende il nome di **GeoExplorer HVSR**; questo può elaborare modelli con qualsiasi numero di strati (massimo 50 nella finestra di input), in qualsiasi intervallo di frequenze ed in un qualsiasi numero di modi (fondamentali o superiori). Operativamente si costruisce un modello teorico avente tante discontinuità sismiche quante sono quelle evidenziate dalla registrazione eseguita.

Un algoritmo cercherà di adattare la curva teorica a quella sperimentale, in questo modo sarà possibile ottenere gli spessori dei sismostrati caratterizzati da una determinata velocità delle onde S.

4.1.2 .- Interpretazione delle misure di rumore sismico e stima della velocità delle onde S

L'interpretazione consente di correlare il valore di picco dello spettro di risposta HVSR con la profondità del substrato roccioso compatto (bedrock geofisico) e di individuare una

corrispondenza tra i valori di frequenza relativi alle discontinuità sismiche e i cambiamenti litologici presenti nel sottosuolo.

Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, è possibile ricavare il valore della frequenza caratteristica del sito. Sapendo che ad ogni picco in frequenza corrisponde un contrasto di impedenza acustica ad una determinata profondità, si può estrapolare una stratigrafia geofisica del sottosuolo.

In generale, la frequenza di risonanza delle onde S che viaggiano all'interno di uno strato è legata al tempo di tragitto delle onde S nello strato stesso dalla relazione:

$$f_r = \frac{1}{4T_H}$$

Dove T_H è il tempo di tragitto dall'interfaccia risonante e f_r è la frequenza di risonanza.

A partire dalla formula precedente e conoscendo la profondità h dell'interfaccia risonante è definibile **la velocità media delle onde S "V"** nella struttura risonante:

e

$$V = \frac{h}{T_H} \quad f_r = \frac{1}{4T_H}$$

da cui si ricava

$$V = 4 f_r h$$

Negli ultimi anni un progetto europeo denominato **SESAME (Site Effects Assessment using Ambient Excitations)** si è occupato di stabilire delle linee guida per la corretta esecuzione delle misure di microtremore ambientale in stazione singola e array. Per una corretta ricostruzione sismica del

sottosuolo e una buona stima delle **onde Vs** è necessario adottare una modellizzazione numerica che può essere rappresentata dalla seguente equazione:

$$V_s = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}}$$

dove:

V_s = velocità delle onde di taglio (m/s)

H = profondità in m del bedrock cioè fino a dove si desidera stimare V_{seq} (30 m nel caso di $V_{seq} = V_{s30}$)

h_i = spessore dello strato i-esimo

v_i = velocità dello strato i-esimo

Strumento: SISMOGRAFO 3 D - Geobox S.A.R.A.

Inizio registrazione: 16/07/2022 09:22:30 **Fine registrazione:** 16/07/2022 09:52:30

Nomi canali: NORTH - SOUTH; EAST - WEST ; UP - DOWN

Durata registrazione: 0^h30'00". Analizzato 100% tracciato (selezione AUTOMATICA)

Freq. campionamento: 300 Hz

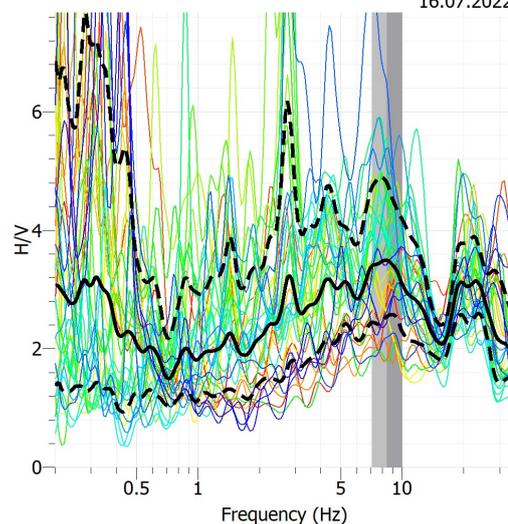
Lunghezza finestre: 50 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

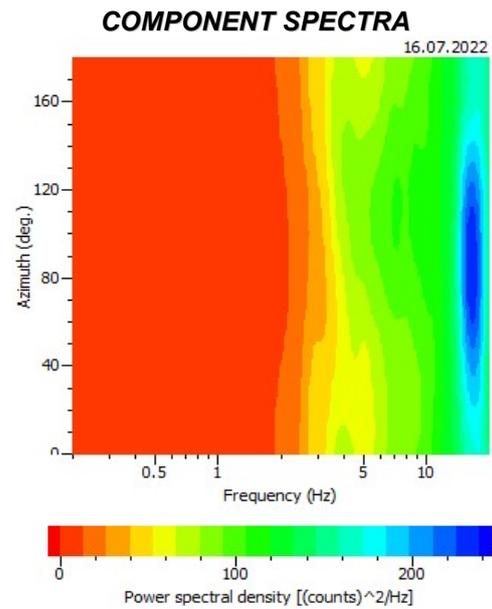
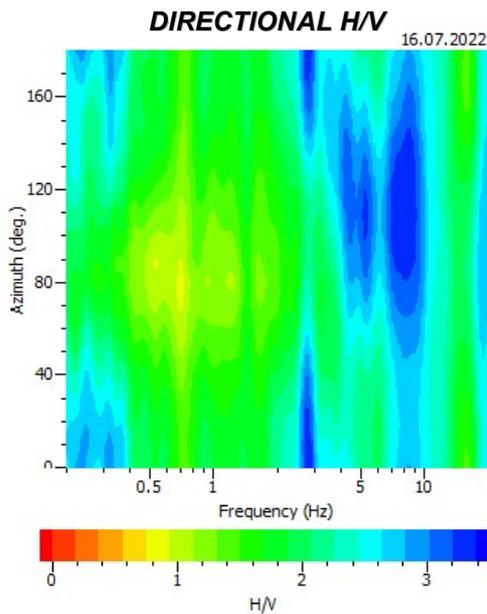
Lisciamento: 10%

16.07.2022

**HORIZONTAL TO VERTICAL
SPECTRAL RATIO
Stazione Singola
HVSRI**



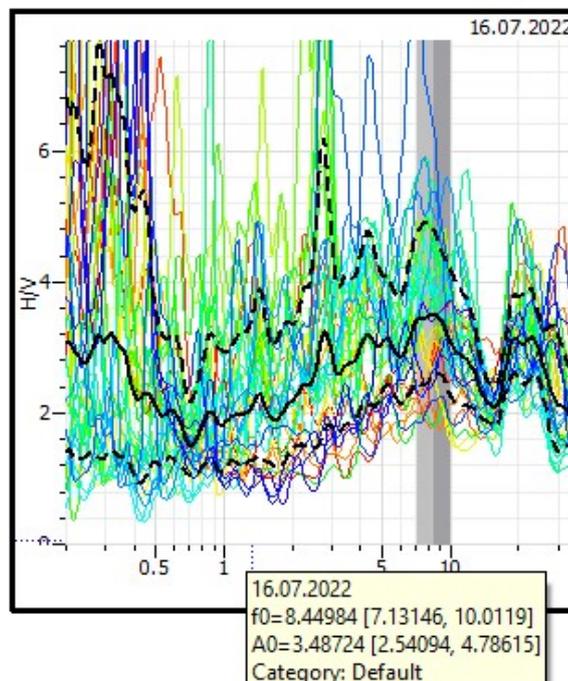
Component	Start time	End time	Sampling frequency	Sampling period	N samples	Duration
Vertical	2022-07-16 09:22:30,000000	2022-07-16 09:52:29,963333	300	0,00333333333333	539989	29m59,963333s
North	2022-07-16 09:22:30,000000	2022-07-16 09:52:29,963333	300	0,00333333333333	539989	29m59,963333s
East	2022-07-16 09:22:30,000000	2022-07-16 09:52:29,963333	300	0,00333333333333	539989	29m59,963333s



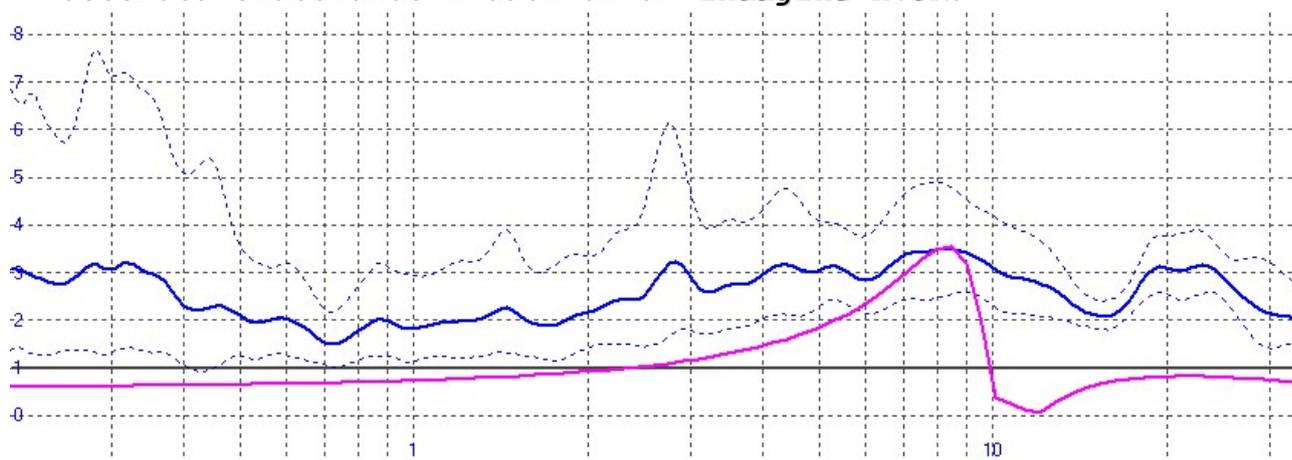
L'immagine successiva rappresenta un **modello di inversione** delle **curve sperimentali H/V** relative alle tre componenti (in nero, a tratto continuo, la curva media).

Tale inversione ha permesso di stimare la "**frequenza di risonanza di sito**" pari a **8.44 Hz ± 1.31 Hz**.

La stima delle velocità delle onde S e di conseguenza il calcolo del **parametro VS_{eq}**, è stata eseguita con l'ausilio del software **GeoExplorer HVSR**.



Questo software utilizza una **routine** per la **modellizzazione della curva di ellitticità** corrispondente ad un certo profilo stratigrafico e per la **comparazione della curva sintetica** così generata **con la curva sperimentale**, ottenuta elaborando i dati di un'indagine **HVSR**.

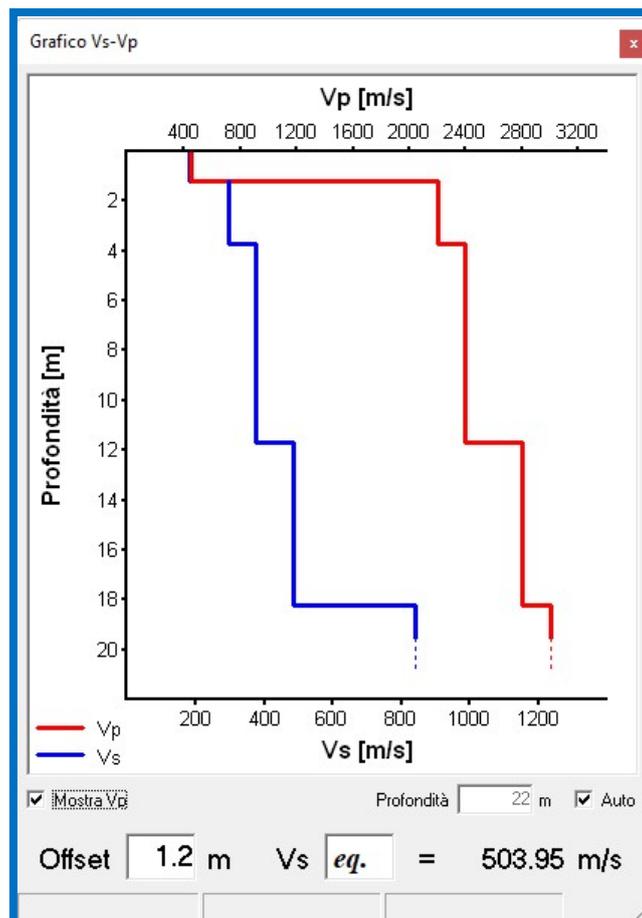


La **curva spettrale blu** rappresenta l'andamento sismico registrato sul campo, mentre **quella fucsia** è la curva sintetica generata dal codice di calcolo.

Viene di seguito individuata una colonna sismostratigrafica ottenuta da una **modellazione di tipo diretto (forward modeling)** vincolando i picchi **H/ V a stime di valori di profondità e velocità delle onde di taglio** (vedi tabella).

Spessore sismostrati (m)	Profondità dal p.c. (m)	Vs (m/s)	Categoria di sottosuolo di fondazione N.T.C. 2018
1.2	0.0 - 1.2	180	B V_{seq} = 503 m/s
2.5	1.2 - 3.7	295	
8.0	3.7 - 11.7	376	
6.5	11.7 - 18.2	484	
semispazio	da 18.2	840	

H [m]	D [m]	VP [m/s]	VS [m/s]	RHO [Kg/m ³]	QP	QS
1.2	1.2	450	180	1600	50	50
2.5	3.7	2200	295	1750	60	60
8	11.7	2400	376	1850	50	50
6.5	18.2	2800	484	2450	70	70
-	> 18.2	3000	840	2600	90	90



Strumento: SISMOGRAFO 3 D - Geobox S.A.R.A.

Inizio registrazione: 16/07/2022 10:14:10 **Fine registrazione:** 16/07/2022 10:44:10

Nomi canali: NORTH - SOUTH; EAST - WEST ; UP - DOWN

Durata registrazione: 0^h30'00". Analizzato 100% tracciato (selezione AUTOMATICA)

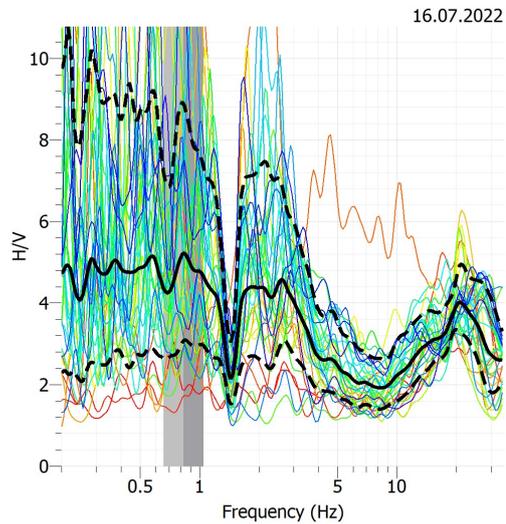
Freq. campionamento: 300 Hz

Lunghezza finestre: 50 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

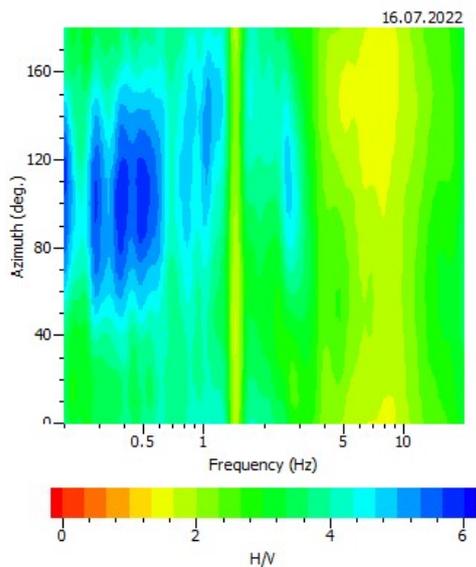
Lisciamento: 10%

**HORIZONTAL TO VERTICAL
SPECTRAL RATIO
Stazione Singola
HVSr 2**

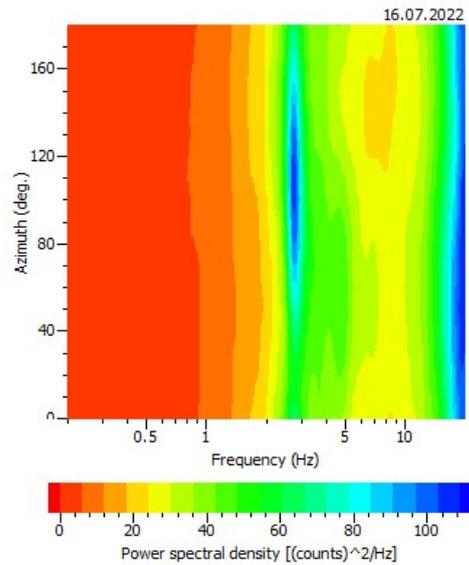


Component	Start time	End time	Sampling frequency	Sampling period	N samples	Duration
Vertical	2022-07-16 10:14:10,000000	2022-07-16 10:44:10,000000	300	0,003333333333	540000	30m0,000000s
North	2022-07-16 10:14:10,000000	2022-07-16 10:44:10,000000	300	0,003333333333	540000	30m0,000000s
East	2022-07-16 10:14:10,000000	2022-07-16 10:44:10,000000	300	0,003333333333	540000	30m0,000000s

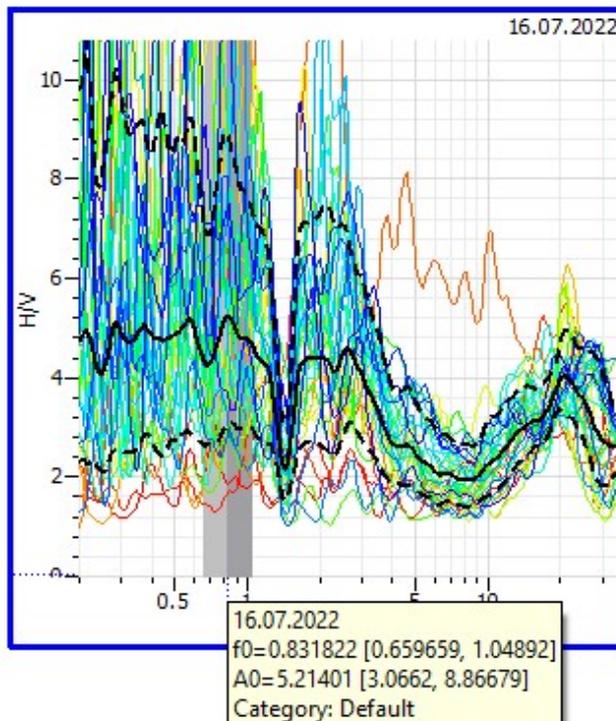
DIRECTIONAL H/V



COMPONENT SPECTRA

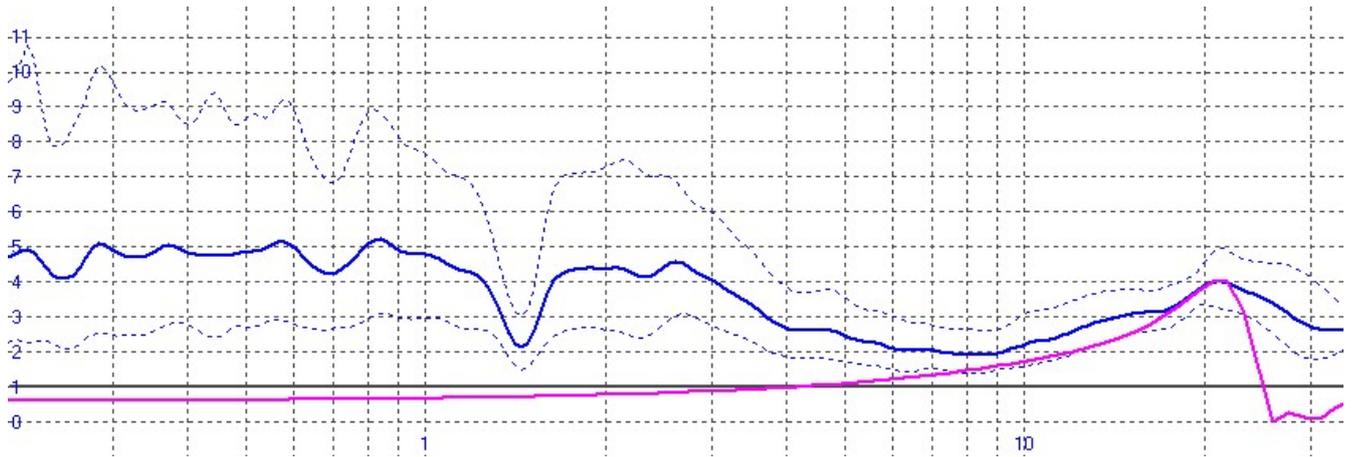


L'inversione ha permesso di stimare la **"frequenza di risonanza di sito"** pari a **0.83 Hz ± 0.18 Hz**.



La stima delle velocità delle onde S e di conseguenza il calcolo del **parametro VS_{eq}** , è stata eseguita con l'ausilio del software **GeoExplorer HVSR**. Questo programma utilizza una **routine** per la **modellizzazione della curva di ellitticità** corrispondente ad un certo profilo stratigrafico e per la **comparazione della curva sintetica** così generata **con la curva sperimentale** ottenuta elaborando i dati di un'indagine **HVSR**.

Quindi, per il calcolo del **VS_{eq}** , nel generare la curva sintetica atta a riprodurre lo spettro di risposta in frequenza, è stato considerato **"il picco"** a **21.10 Hz ± 0.66 Hz** che risulta essere di interesse per la determinazione della risposta sismica locale ed utile per la stima ponderata delle velocità delle onde S fino alla profondità del bedrock sismico.

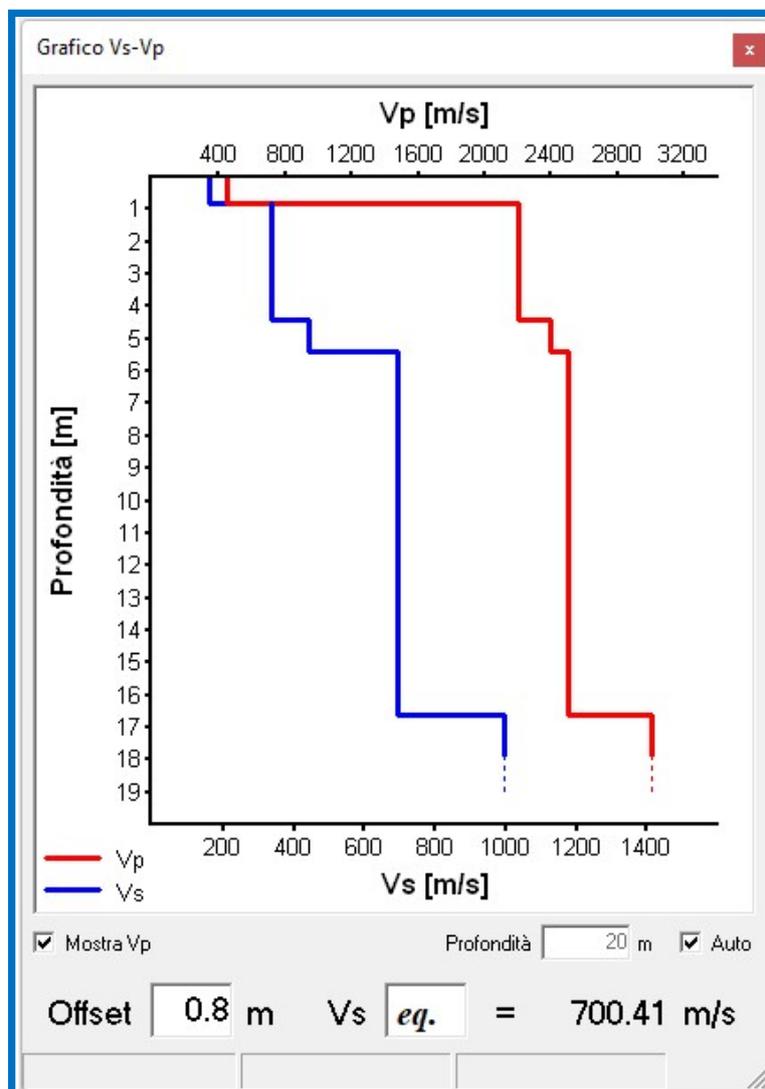


La **curva spettrale blu** rappresenta l'andamento sismico registrato sul campo, mentre **quella fucsia** è la curva sintetica generata dal codice di calcolo.

Viene di seguito individuata una colonna sismostratigrafica ottenuta da una **modellazione di tipo diretto (forward modeling)** vincolando i picchi H/V a stime di valori di profondità e velocità delle onde di taglio (vedi tabella).

Spessore sismostrati (m)	Profondità dal p.c. (m)	Vs (m/s)	Categoria di sottosuolo di fondazione <i>N.T.C. 2018</i>
0.8	0.0 – 0.8	160	B V_{seq} = 700 m/s
3.6	0.8 – 4.4	338	
1.0	4.4 – 5.4	444	
11.2	5.4 - 16.6	696	
semispazio	da 16.6	998	

H [m]	D [m]	VP [m/s]	VS [m/s]	RHO [Kg/m ³]	QP	QS
0.8	0.8	450	160	1650	50	50
3.6	4.4	2200	338	1805	60	60
1	5.4	2400	444	1850	50	50
11.2	16.6	2500	696	2450	70	70
-	> 16.6	3000	998	2600	90	90



Strumento: SISMOGRAFO 3 D - Geobox S.A.R.A.

Inizio registrazione: 16/07/2022 11:23:15 **Fine registrazione:** 16/07/2022 11:53:15

Nomi canali: NORTH - SOUTH; EAST - WEST ; UP - DOWN

Durata registrazione: 0^h30'00". Analizzato 100% tracciato (selezione AUTOMATICA)

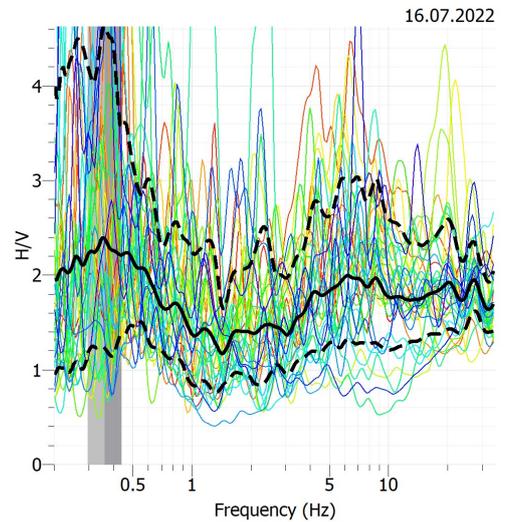
Freq. campionamento: 300 Hz

Lunghezza finestre: 50 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

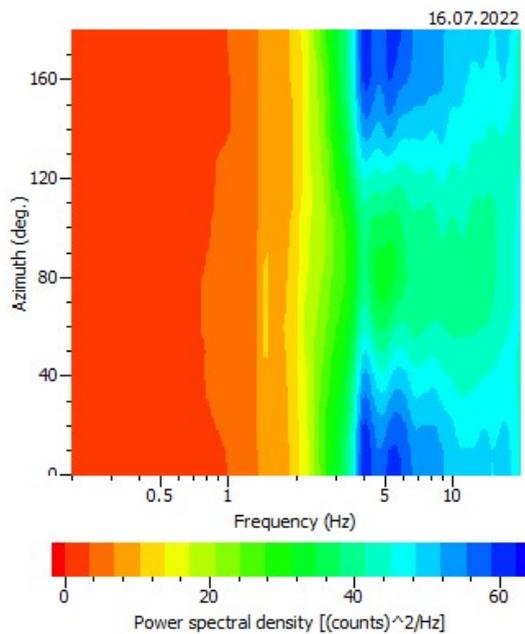
Lisciamento: 10%

**HORIZONTAL TO VERTICAL
SPECTRAL RATIO
Stazione Singola
HVSr 3**

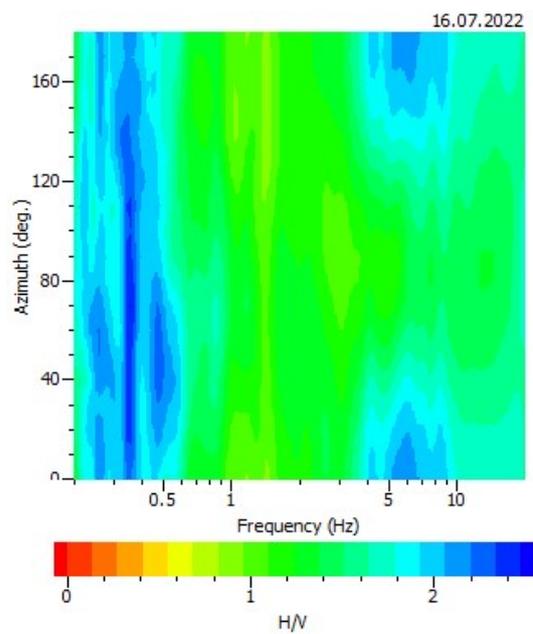


Component	Start time	End time	Sampling frequency	Sampling period	N samples	Duration
Vertical	2022-07-16 11:23:15,000000	2022-07-16 11:53:14,970000	300	0,0033333333333	539991	29m59,970000s
North	2022-07-16 11:23:15,000000	2022-07-16 11:53:14,970000	300	0,0033333333333	539991	29m59,970000s
East	2022-07-16 11:23:15,000000	2022-07-16 11:53:14,970000	300	0,0033333333333	539991	29m59,970000s

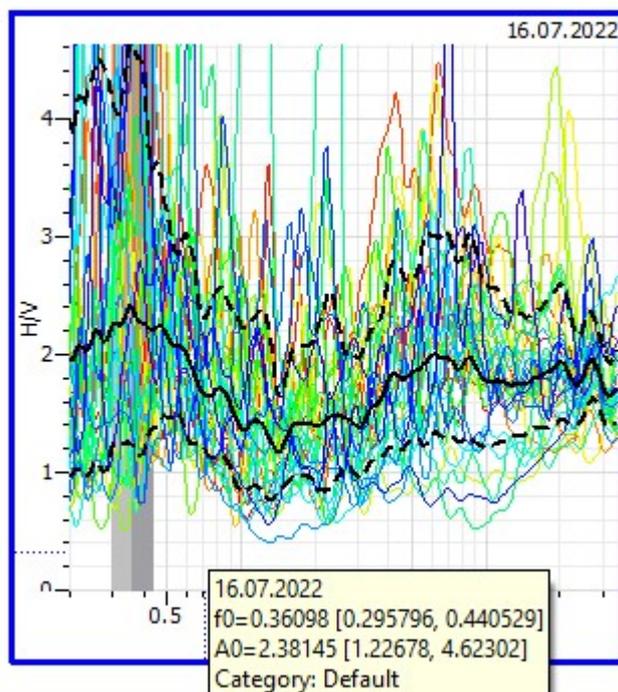
DIRECTIONAL H/V



COMPONENT SPECTRA

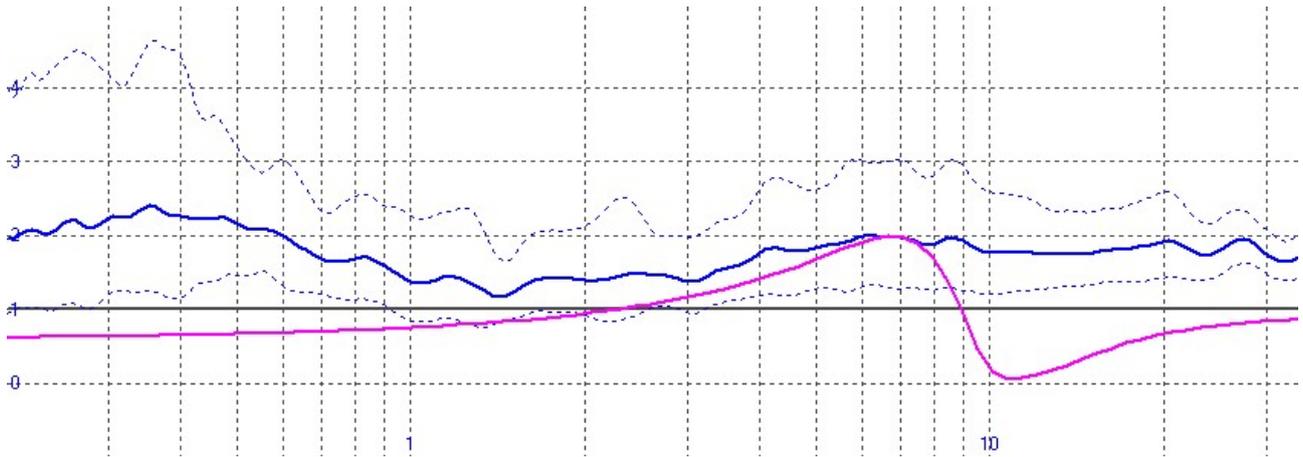


L'inversione ha permesso di stimare la "**frequenza di risonanza di sito**" pari a **0.36 Hz \pm 0.07 Hz**.



La stima delle velocità delle onde S e di conseguenza il calcolo del **parametro VS_{eq}** , è stata eseguita con l'ausilio del software **GeoExplorer HVSR**. Questo programma utilizza una **routine** per la **modellizzazione della curva di ellitticità** corrispondente ad un certo profilo stratigrafico e per la **comparazione della curva sintetica** così generata **con la curva sperimentale** ottenuta elaborando i dati di un'indagine **HVSR**.

Quindi, per il calcolo del **VS_{eq}** , nel generare la curva sintetica atta a riprodurre lo spettro di risposta in frequenza, è stato considerato "**il picco**" a **6.39 Hz \pm 0.41 Hz** che risulta essere di interesse per la determinazione della risposta sismica locale ed utile per la stima ponderata delle velocità delle onde S fino alla profondità del bedrock sismico.

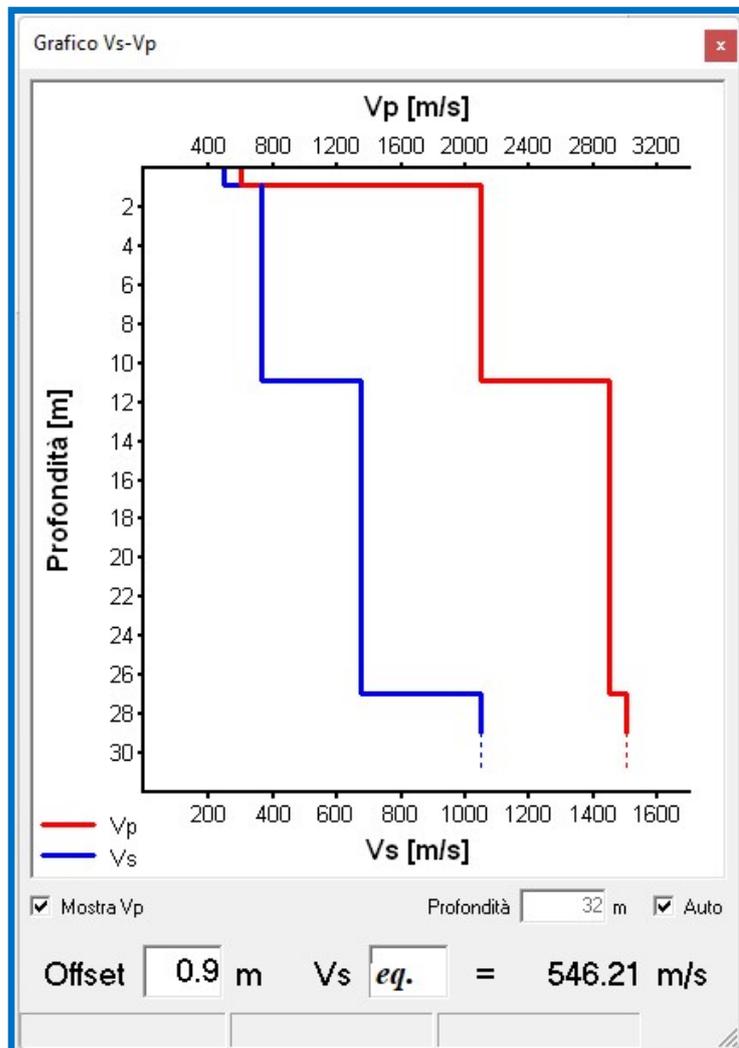


La **curva spettrale blu** rappresenta l'andamento sismico registrato sul campo, mentre **quella fucsia** è la curva sintetica generata dal codice di calcolo.

Viene di seguito individuata una colonna sismostratigrafica ottenuta da una **modellazione di tipo diretto (forward modeling) vincolando i picchi H/V a stime di valori di profondità e velocità delle onde di taglio** (vedi tabella).

Spessore sismostrati (m)	Profondità dal p.c. (m)	Vs (m/s)	Categoria di sottosuolo di fondazione <i>N.T.C. 2018</i>
0.9	0.0 – 0.9	245	B V_{seq} = 546 m/s
10	0.9 – 10.9	363	
16	10.9 – 26.9	674	
semispazio	da 26.9	1048	

H [m]	D [m]	VP [m/s]	VS [m/s]	RHO [Kg/m ³]	QP	QS
0.9	0.9	600	245	1450	50	50
10	10.9	2100	363	2300	50	50
16	26.9	2900	674	2400	50	50
-	> 26.9	3000	1048	2400	60	60



4.2 .- MODULI ELASTICI ATTRIBUIBILI AI LITOTIPI INDAGATI -

Attraverso l'elaborazione del modello diretto (*forward modeling*) ottenuta vincolando i picchi H/V a stime di valori di profondità e velocità delle onde di taglio (vedi tabella), è stato possibile valutare, in modo sufficientemente approssimato, la velocità media di propagazione delle "fasi S" ed analiticamente ricavare le "fasi P", all'interno dei litotipi investigati.

Il "parametro" velocità di propagazione, così come diversi altri, dipende essenzialmente dalle proprietà meccaniche delle rocce, ed in particolare dal loro comportamento elastico che può essere descritto dai cosiddetti "moduli elastici", il cui valore dipende dalle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi.

Inoltre, la velocità di propagazione delle onde longitudinali e delle onde trasversali, la densità del mezzo " γ_{din} " ed i moduli elastici sono tra di loro legati dalle relazioni matematiche espresse con la "**Teoria dell'Elasticità**".

Attraverso l'indagine tomografica, eseguita utilizzando la tecnica dei "microtremori", è possibile ottenere i moduli elastici con "metodi dinamici". In generale, tali moduli risultano essere sovrastimati rispetto ai moduli elastici rilevati, con "metodi statici", in laboratori attrezzati.

Per ottenere una valutazione qualitativa delle caratteristiche meccaniche delle rocce interessate dalla prospezione, sono stati indicati nella tabella seguente, i moduli elastici "dinamici" calcolati analiticamente:

- ✧ "e" modulo di Young;
- ✧ " μ " modulo di rigidità;

✧ "k" modulo di Bulk.

Questi "parametri" sono stati discretizzati grazie ad un programma di calcolo automatico gestibile attraverso software dedicato che attribuisce al modulo di Poisson " σ " valori compresi nell'intervallo 0.30(*) ÷ 0.47(**), sia per i litotipi più profondi, sia per i litotipi dei livelli più superficiali della copertura, ipotizzati, come consistenza "a comportamento granulare-pseudocoerente".

Tali coefficienti, adimensionali, rappresentano un **range di valori** medi misurati del modulo stesso, indicato in letteratura scientifica, per la **stima speditiva delle "fasi S"** nella "procedura" di **microzonazione sismica** con il metodo dell'**Impedenza Sismica**. [(*)Cosentino e Rizzo (1982), Parente et alii (1999), Cetraro F. (2008) - (**) Corrao M. e Coco G. (2006)].

Il *processing* dei dati è stato effettuato per mezzo di un algoritmo di calcolo che si avvale delle relazioni di **LAMÈ** formulate nel contesto della *Teoria dell'Elasticità*.

Infine, viene di seguito riportata la tabella riepilogativa, nella quale vengono sintetizzati i risultati della prospezione geofisica eseguita, specificando, per il singolo profilo sismico, il numero dei sismostrati individuati, le velocità delle onde sismiche rilevate (*fasi P*) e quella delle onde sismiche calcolate (*fasi S*), la densità del mezzo investigato ed i moduli elastici ricavati, come già detto, *in condizioni dinamiche*.

<i>Rumore Sismico</i>	N° Strati	<i>VP</i> (m/s)		<i>VS</i> (m/s)		γ_{din} (kg/m ³)		MODULI ELASTICI			
		σ (adim)	<i>e</i> (kg/cm ²)	μ (kg/cm ²)	<i>k</i> (kg/cm ²)						
HVSR 1	5	1°	450	1°	180	1°	1600	0,405	1485	529	2599
		2°	2200	2°	295	2°	1750	0,491	4630	1553	84300
		3°	2400	3°	376	3°	1850	0,487	7934	2667	105105
		4°	2800	4°	484	4°	2450	0,485	17377	5852	188065
		5°	3000	5°	840	5°	2600	0,457	54531	18707	213672
HVSR 2	5	1°	450	1°	160	1°	1650	0,428	1230	431	2833
		2°	2200	2°	338	2°	1805	0,488	6257	2103	86281
		3°	2400	3°	444	3°	1850	0,482	11025	3719	103703
		4°	2500	4°	696	4°	2450	0,458	35290	12102	140009
		5°	3000	5°	998	5°	2600	0,438	75934	26407	203406
HVSR 3	4	1°	600	1°	245	1°	1450	0,400	2485	888	4140
		2°	2100	2°	363	2°	2300	0,485	9176	3090	99310
		3°	2900	3°	674	3°	2400	0,471	32718	11118	190997
		4°	3000	4°	1048	4°	2400	0,431	76901	26879	184421

4.3.- MODELLO GEOLOGICO DEL SOTTOSUOLO

Sulla base dell'indagine eseguita, correlata per analogia con le osservazioni scaturite dal rilievo geologico di superficie e le informazioni acquisite nel corso di realizzazione di precedenti opere **in località Gallitello**, si è redatta la classificazione dei litotipi riportata nel presente paragrafo.

La seguente classificazione litostratigrafica è basata sull'età, natura petrografica, composizione mineralogica, sulla frazione granulometrica e sulla consistenza dei litotipi stessi:

AREA 1

- **Terreno vegetale** -

Costituisce una coltre che ricopre in maniera discontinua l'intorno studiato, per uno spessore medio variabile prossimo a 80 ÷ 120 centimetri circa.

- **Prodotti eluviali e depositi colluviali, depositi alluvionali di fondovalle terrazzati quali ghiaie, sabbie e limi** -

Rappresentano un livello a struttura caotica con elevato grado di rimaneggiamento, il colore è generalmente marrone scuro. Tale sedimento è costituito sia dai depositi sedimentari che hanno caratterizzato il "colluvium" dei fianchi dei rilievi, sia dall'eluvium della sottostante formazione argillosa e da depositi alluvionali di fondovalle. Lo spessore della coltre si ritiene generalmente variabile da 3 a 5 m circa.

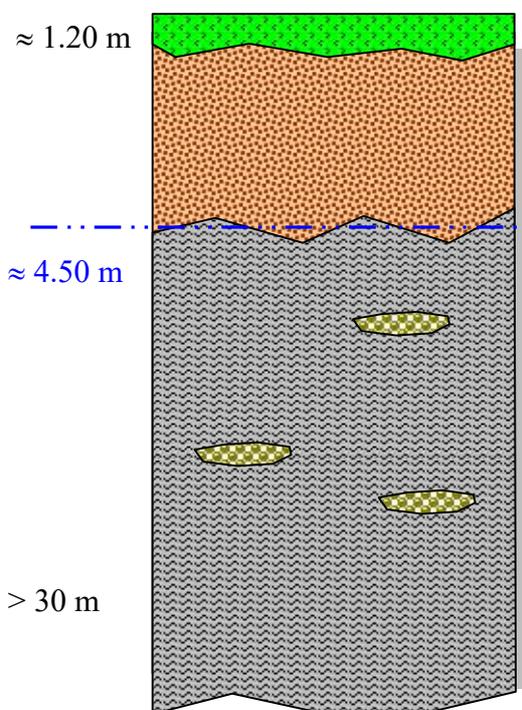
- **depositi terrigeni sabbiosi ed arenacei (Fm. di Cozzo Terravecchia, in continuità stratigrafica con marne, argille marnose ed argille di colore grigio verdastro.**

Costituiscono la formazione di base, sono alterate e decomprese nell'orizzonte più superficiale per uno spessore

di 2 ÷ 3 m, e passano in profondità da consistenti a molto consistenti.

sezione litostratigrafica schematica

del sito su cui verrà realizzato l'impianto Fotovoltaico AREA 1



Terreno vegetale

Prodotti eluviali e depositi colluviali, depositi alluvionali di fondovalle terrazzati costituiti da argille sabbiose, ghiaie, sabbie e limi.

modesti livelli idrici a carattere stagionale

Depositi Terrigeni sabbiosi ed arenacei (Fm. di Cozzo Terravecchia), in continuità stratigrafica con **marne, argille marnose ed argille di colore grigio-verdastro.**



- **Terreno vegetale** -

Costituisce una coltre che ricopre in maniera discontinua l'intorno studiato, per uno spessore medio variabile prossimo a 80 ÷ 120 centimetri circa.

- **Prodotti eluviali e depositi colluviali** -

Rappresentano un livello pseudocoeseivo, il colore è generalmente marrone scuro. Tale sedimento è costituito sia dai depositi sedimentari che hanno caratterizzato il "colluvium" dei fianchi dei rilievi, sia dall'eluvium della sottostante formazione argillosa. Lo spessore della coltre si ritiene generalmente variabile da 2 a 3 m circa.

- **depositi terrigeni sabbiosi ed arenacei (Fm. di Cozzo Terravecchia, in continuità stratigrafica con marne, argille marnose ed argille di colore grigio verdastro.**

Costituiscono la formazione che ricopre i fianchi dei rilievi collinari, sono alterate e decomprese nell'orizzonte più superficiale per uno spessore di 2 ÷ 3 m, e passano in profondità da consistenti a molto consistenti.

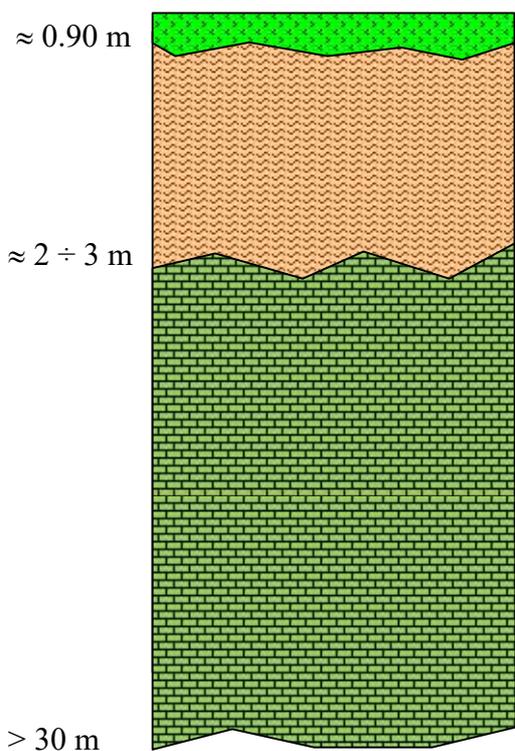
- **depositi carbonatici a granulometria fine, a stratificazione tabulare.**

Questi sono caratterizzati da prevalenti rocce carbonatiche in litofacies di **Calcilutiti (tipo Scaglia), con noduli e liste di selce, di colore cangiante dal bianco al rosso.**

Il litotipo è rilevabile in sub-affioramento presso **Monte Orsino (307 m s.l.m.)**.

sezione litostratigrafica schematica

del sito su cui verrà realizzato l'impianto Fotovoltaico AREA 2



Terreno vegetale

Depositi Terrigeni sabbiosi ed arenacei (Fm. di Cozzo Terravecchia), in continuità stratigrafica con marne, argille marnose ed argille di colore grigio-verdastro.

Depositi carbonatici a granulometria fine, a stratificazione tabulare costituiti da litofacies di Calcilutiti (tipo Scaglia), con noduli e liste di selce, di colore cangiante dal bianco al rosso.



5.- CARATTERISTICHE LITOTECNICHE DEI "TERRENI"

Sulla base dei risultati dell'indagine geofisica eseguita *in situ*, correlati per analogia con le osservazioni scaturite dal rilievo geologico di superficie, si è redatta la classificazione dei litotipi riportata nel presente paragrafo.

La caratterizzazione litotecnica dei "terreni" che costituiscono la successione stratigrafica dell'area, oggetto del presente studio, è stata eseguita utilizzando le indicazioni contenute nella **"Guida per la definizione delle unità litotecniche"**, allegato "D" al D.A. n° 120 del 14.07.2021 dell'Assessorato Territorio ed Ambiente della Regione Siciliana. Le unità litotecniche, pertanto, sono state distinte in due insiemi: l'uno relativo al substrato, l'altro alla copertura (Allegato D.1 - D.2).

UNITÀ LITOTECNICA DEL SUBSTRATO

È rappresentata, nell'**AREA 1**, dai **depositi terrigeni sabbiosi ed arenacei (Fm. di Cozzo Terravecchia**, in continuità stratigrafica con **marne, argille marnose ed argille di colore grigio verdastro**.

Il sedimento, in litofacies *pseudocoesiva*, a grande scala si presenta abbastanza omogeneo dal punto di vista strutturale sia in senso orizzontale che verticale. Il suo apprezzabile grado di consolidamento (OCR) conferisce all'orizzonte le caratteristiche di livello di base della successione (bedrock) a partire da quote superiori ai 10 - 12 m dal p.c... Ancora, il sedimento risulta asciutto e consistente in profondità, raggiungendo spesso spiccate condizioni di fissilità.

Da quanto sopra si deducono buone doti di resistenza alla rottura ed alla deformabilità.

Il comportamento è quello tipico di un suolo pseudocoesivo sovraconsolidato.

Secondo le indicazioni contenute nella "Guida per la definizione di unità litotecniche", allegato "D" al D.A. n° 120 del 14.07.2021 dell'Assessorato Territorio ed Ambiente della Regione Siciliana a cui si fa riferimento nel presente studio geologico, Il litotipo è classificabile come *B4, B4s*.

Nell'AREA 2, invece, il substrato (bedrock) è rappresentato dai *depositi carbonatici a granulometria fine, a stratificazione tabulare*. Questi sono caratterizzati da prevalenti rocce carbonatiche in litofacies di *Calcilutiti (tipo Scaglia), con noduli e liste di selce, di colore cangiante dal bianco al rosso*. Il litotipo è rilevabile in sub-affioramento presso *Monte Orsino (307 m s.l.m.)*.

Secondo le indicazioni contenute nella "Guida per la definizione di unità litotecniche", allegato "D" al D.A. n° 120 del 14.07.2021 dell'Assessorato Territorio ed Ambiente della Regione Siciliana a cui si fa riferimento nel presente studio geologico, Il litotipo è classificabile come *A3, B2*.

UNITÀ LITOTECNICA DELLA COPERTURA

A questa unità litotecnica appartengono sedimenti costituiti da *litofacies* chiaramente *postorogene*, stratigraficamente collocabili al tetto della successione.

I *depositi eluvio-colluviali*, in entrambe le aree di intervento, nella porzione più superficiale, si presentano come un orizzonte particolarmente scadente (terreno vegetale) sia per le caratteristiche intrinseche (litologia influenzata dall'elevata componente organica, granulometria, struttura e

tessitura) sia per quelle dipendenti dalle condizioni al contorno.

Nell'AREA 1 il litotipo alluvionale mostra **litofacies limo-sabbiose** alterate e rimaneggiate classificabili come *E2, E2c, F1, F1c* rappresentanti sedimenti recenti, verosimilmente mai gravati da carichi esterni, pertanto, è dotato di un grado di consolidazione contenuto (sedimenti NC).

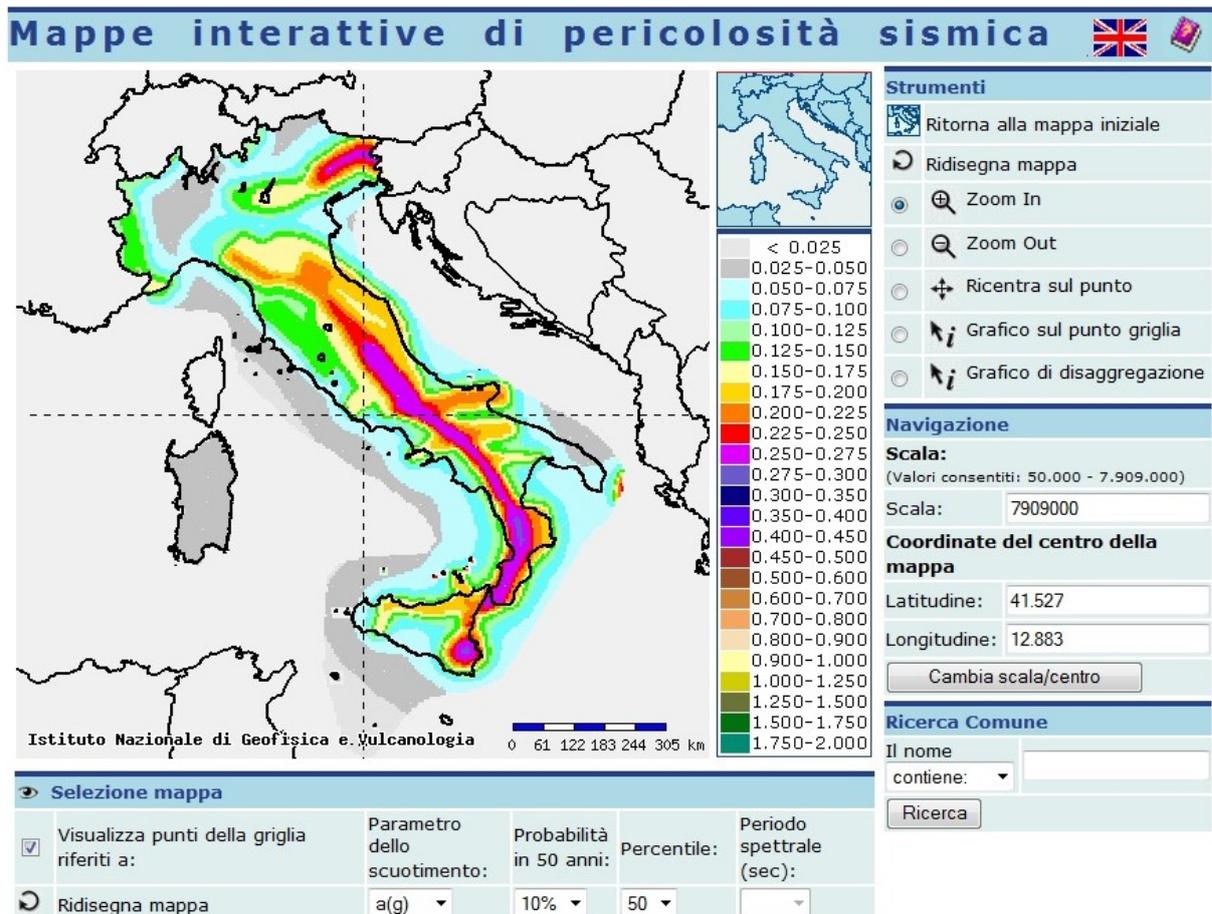
Trattasi di un complesso eterogeneo dal punto di vista meccanico sia in senso verticale che orizzontale per l'eteropia propria del sedimento (andamento lenticolare).

È, infatti, rappresentato da terreni rimaneggiati ed alterati contraddistinti nel complesso da matrice limoso-argillosa con locali arricchimenti in frazione sabbiosa, in cui aumenta la concentrazione di sedimenti a granulometria più grossolana. Il litotipo, classificabile come *E2, E2c, E1c, F1, F1c* e rappresentante anch'esso sedimenti recenti verosimilmente mai gravati da carichi esterni, è dotato di un grado di consolidazione contenuto (sedimenti NC).



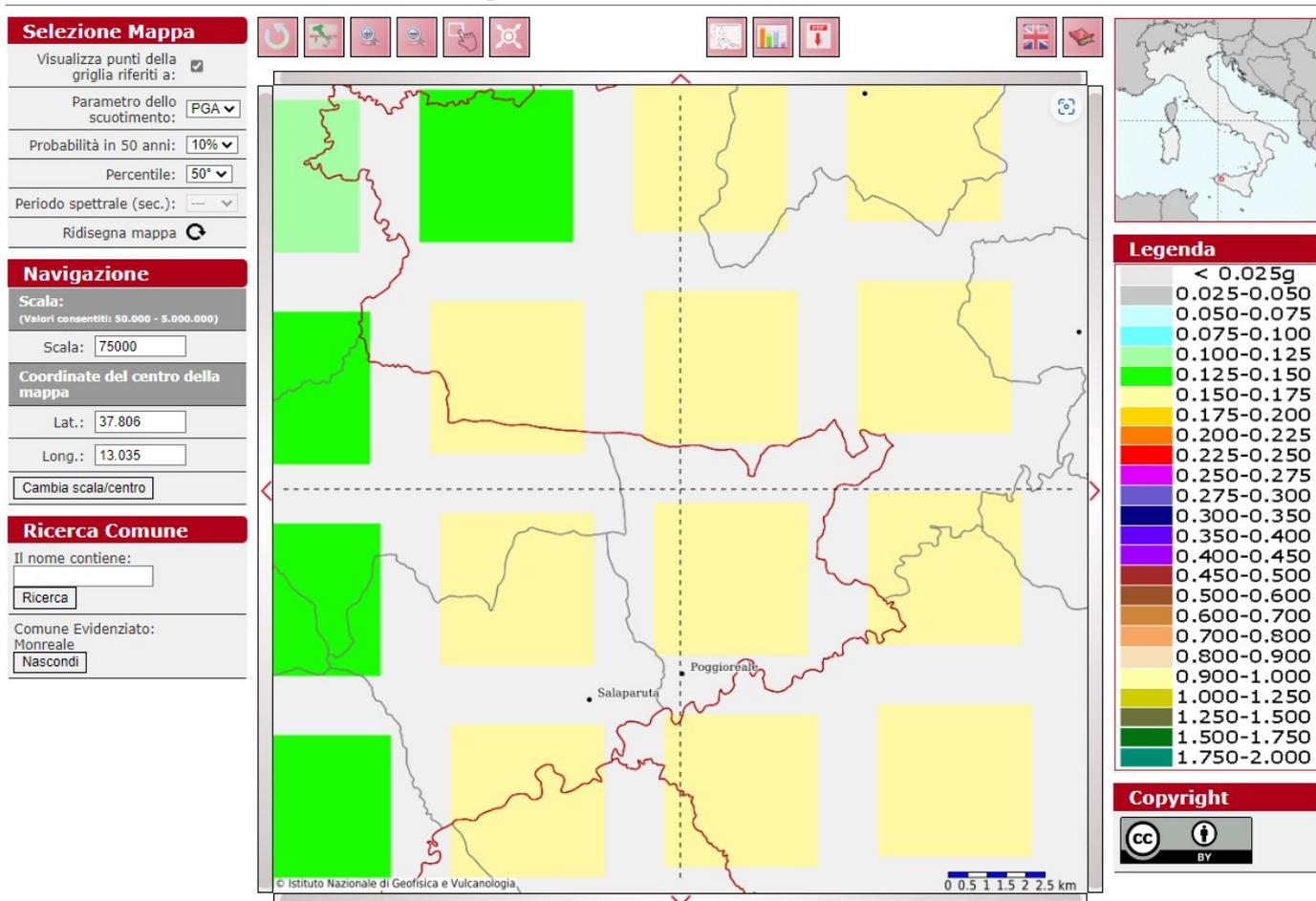
6. – PERICOLOSITÀ SISMICA DELL'AREA

Così come indicato nel D.A. n° 120 del 14.07.2021, informazioni sulla pericolosità sismica nazionale possono essere ricavate consultando il sito web <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>, da cui sono state estratte le mappe qui illustrate:



Per **il territorio comunale di Monreale (PA)** le informazioni sulla pericolosità sismica nazionale riguardano vari parametri dello scuotimento, come l'**accelerazione max \vec{a}_{max}** attesa, al "**bedrock sismico**" in caso di **evento tellurico**, compresa tra **0.150 ÷ 0.175 g**, e la probabilità che ciò avvenga in 50 anni, pari al 10%.

Modello di pericolosità sismica MPS04-S1



Mapa interattiva di pericolosità sismica relativa al territorio comunale
consultabile al sito WEB - <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>

6.1.- Risposta sismica locale

Sulla scorta degli elementi acquisiti sperimentalmente e di tutti quelli scaturenti dalla presente relazione, esposti nei vari capitoli, è possibile inquadrare il sottosuolo dell'area da lottizzare secondo i dettami della circolare assessoriale sopracitata in merito alle condizioni geologiche-

geomorfologiche, litotecniche e geofisiche dei terreni superficiali che concorrono a modificare la risposta sismica locale.

Da quanto sopra descritto si evidenzia come la **tecnica dei rapporti spettrali H/V, realizzata attraverso la registrazione delle vibrazioni ambientali**, quale indagine geofisica peculiare per questo studio geologico, rappresenti un valido supporto nell'individuare la presenza di strati (*bedrock* o assimilabili al *bedrock*) che possono indurre amplificazioni particolari, anche quando questi risultino molto profondi e non raggiungibili dalle indagini convenzionali.

Inoltre, la stessa tecnica, fornisce poi risultati immediati nel dominio delle frequenze, che rappresenta il dominio di interesse dell'ingegneria sismica, in cui le strutture vengono viste come oscillatori armonici sottoposti ad una ampiezza massima in funzione della frequenza.

Nel lotto di progetto, l'analisi delle **indagini geosismiche** eseguite, ha permesso di ricavare "**parametri**" utili alla definizione della "**risposta sismica locale**" quali la **frequenza di risonanza di sito** e la **categoria di sottosuolo** (ai sensi del **D.M. 17.01.2018** e della successiva **Circolare n° 7 C.S.LL.PP. del 21.01.2019**).

Con la campagna di indagine eseguita è stato possibile risalire alle categorie di sottosuolo appena menzionate attraverso la ricostruzione dell'andamento, in profondità del parametro "**V_{Seq}**".

Complessivamente il contributo positivo, in termini di consistenza, fornito dal *bedrock*, già presente a partire da

pochi m dal piano di campagna, è stato determinante per la stima della velocità media di propagazione delle **onde Vs**.

Infatti, la risposta sismica negli strati più superficiali, delle onde di taglio "**V_{Seq}**" è stata calcolata con la seguente espressione:

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

Dove **H** è la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da rocce o terreno molto rigido, caratterizzata da "**V_s**" non inferiore ad **800 m/s**.

h_i e **V_{s,i}** indicano lo spessore in metri e la velocità delle onde di taglio dello strato *i*-esimo.

N è il numero degli strati.

I risultati vengono mostrati nella seguente tabella riepilogativa.

Indagine Tromografica	Frequenza di risonanza in sito "f₀"	Frequenza di picco "f_p" per il calcolo del V_{S_{eq}}	V_{S_{eq}}	Categoria del Sottosuolo di fondazione NCT "D.M. 17.01.2018"
HVSR 1	8,44 Hz ± 1,31 Hz	8,44 Hz ± 1,31 Hz	503 m/s	Tipo B
HVSR 2	0,83 Hz ± 0,18 Hz	21,10 Hz ± 0,66 Hz	700 m/s	Tipo B
HVSR 3	0,36 Hz ± 0,07 Hz	6,39 Hz ± 0,41 Hz	546 m/s	Tipo B

Il profilo stratigrafico del **sottosuolo di fondazione** di cui al presente progetto, può essere ricondotto, alla **categoria B**: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di "**V_{Seq}**" compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero **N_{SPT30} > 50** nei terreni a grana grossa e **C_{U30} > 250 kPa** nei terreni a grana fina).

L'azione sismica di progetto, a cui si risale con la definizione della categoria di sottosuolo estrapolata con le **indagini HVSR**, può essere messa in relazione con la **frequenza di risonanza di sito** (§ 4.1.2), e con il periodo fondamentale di vibrazione di una struttura, e di conseguenza con la frequenza di risonanza " f_r " della stessa, che sono funzioni della composizione e delle dimensioni. Allo scopo di risalire al periodo fondamentale di vibrazione " T_0 " per le strutture intelaiate può essere impiegata la seguente relazione empirica:

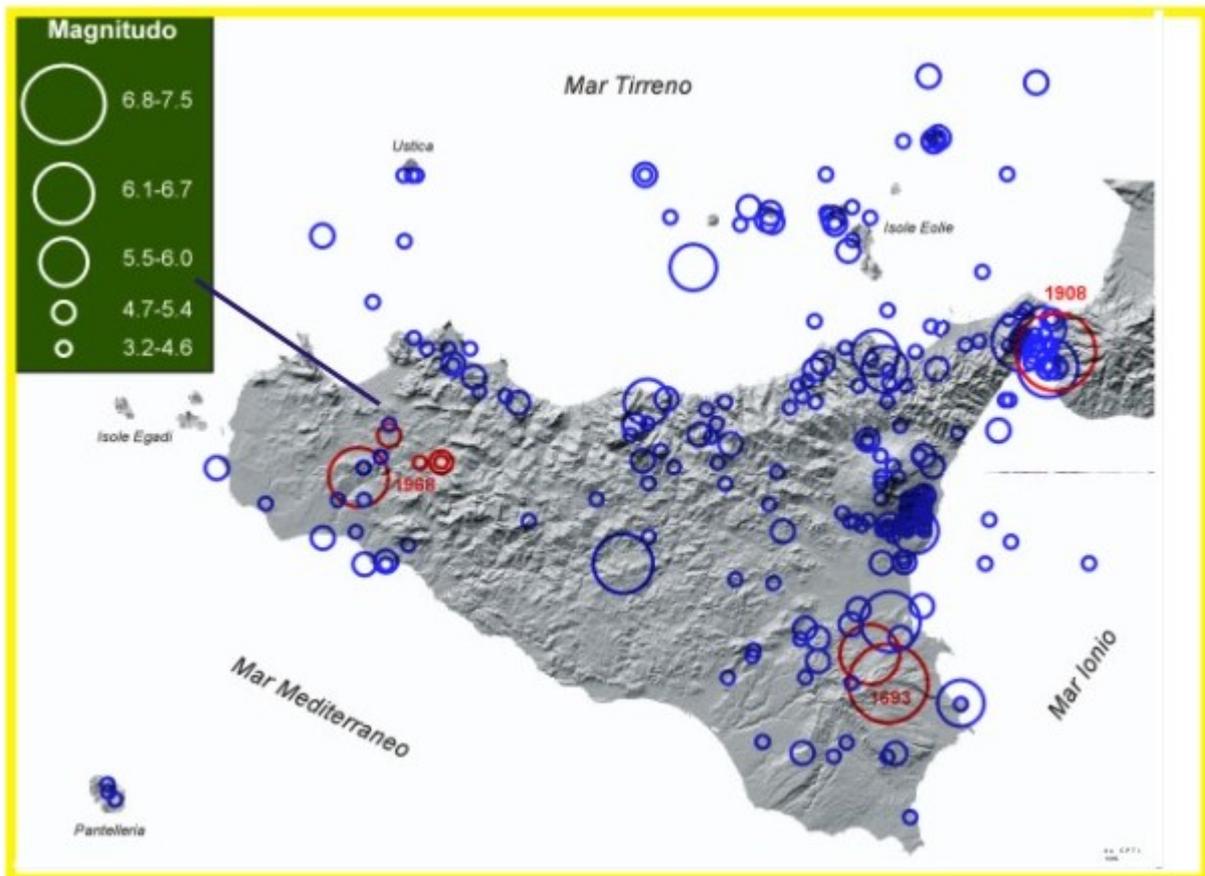
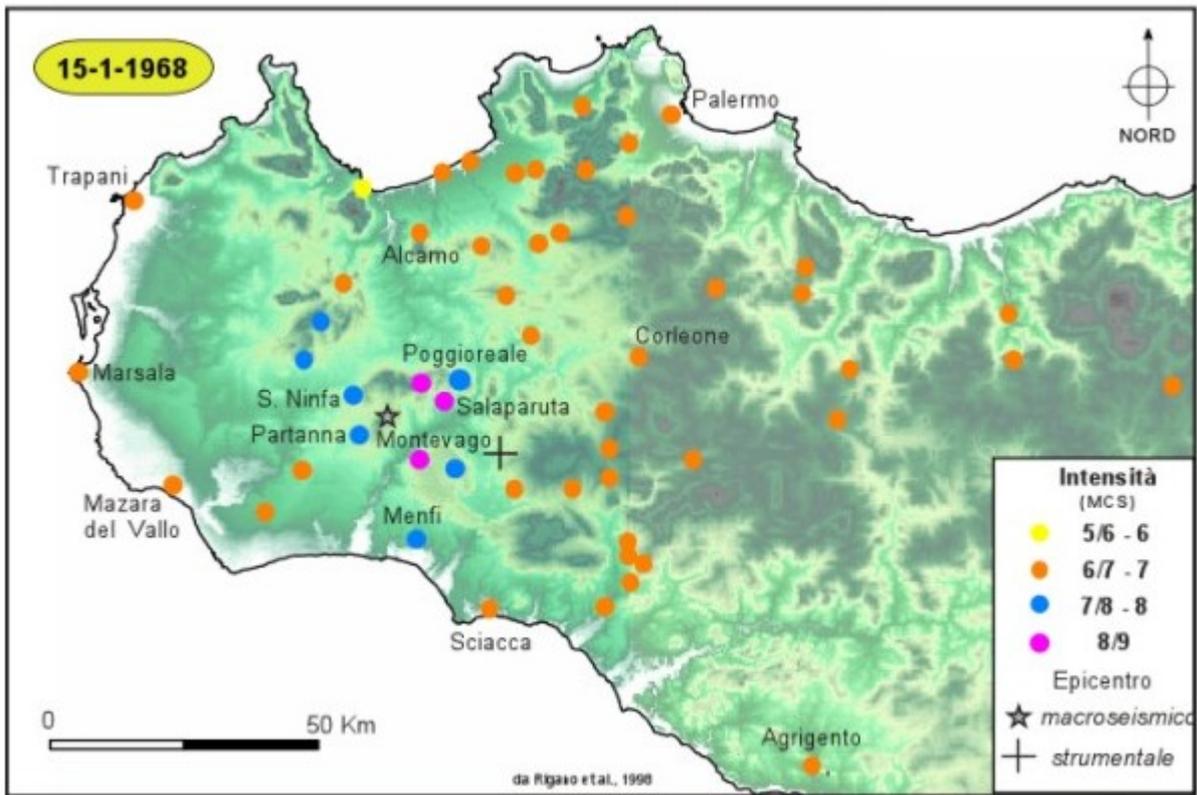
$$T_0 = 0.09 \frac{h}{\sqrt{l}} \quad ; \quad f_r = \frac{1}{T_0}$$

con " h " altezza e " l " larghezza dell'edificio misurate in metri, mentre " T_0 " è espresso in secondi.

Infine, si allegano di seguito due stralci della cartografia edita dall'INGV, riportanti i principali eventi sismici succedutisi nella Sicilia Occidentale dall'anno 1000 al 1996.

Tale ricerca bibliografica viene completata presentando la carta delle **intensità macrosismiche** relativa allo sciame sismico verificatosi nella prima metà del 1968, che ha avuto la sua acme nell'evento sismico "catastrofico" della Valle del Belice.





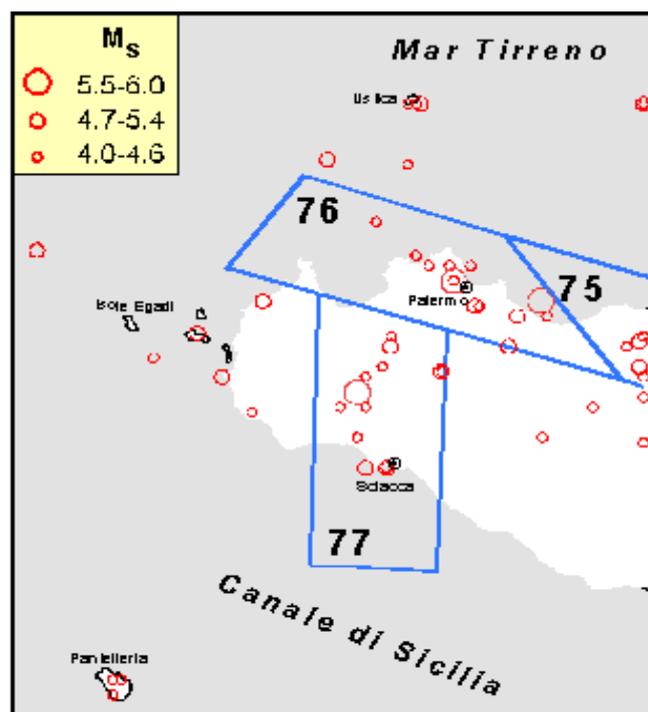


Fig. 2 - Sismicità della Sicilia occidentale dal 1000 al 1995 e zonazione sismogenetica (modificato da Camassi e Stucchi, 1996).

7.- OSSERVAZIONI E CONCLUSIONI

L'appezzamento di terreno su cui è prevista la realizzazione del **parco fotovoltaico in progetto** (con gli apparati di conversione e trasformazione dell'energia e l'impianto di connessione alla locale rete di distribuzione in media tensione), proposto dalla **IPC MACCHIAREDDU s.r.l.**, a cui fa riferimento il presente studio geologico, è da considerarsi potenzialmente stabile dal punto di vista geomorfologico.

Nel corso dei sopralluoghi, dei rilievi geologici e delle indagini geofisiche, eseguite per la redazione del presente studio, non si sono riscontrati fenomeni di degrado

superficiale tali da far supporre l'azione di dissesti idrogeologici in atto od in fase quiescente.

Si sottolinea, inoltre, che l'area 1 e l'area 2 in progetto non ricadono nelle aree individuate come "sito d'attenzione" né interessate da pericolosità idraulica e di frana P1 - P2 - P3 (elevata) - P4 (molto elevata) e/o rischio idraulico e di frana R1 - R2 - R3 (elevato) - R4 (molto elevato), perimetrata nelle Carta delle Pericolosità e del Rischio Geomorfologico illustrata al § 2.2 pag. 12 e 13 (CTR. 606120 - 606160) di cui al "Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I. 045 - Area territoriale del bacino idrografico del Fiume S. Bartolomeo - Anno 2006 e 1° Aggiornamento anno 2020)", relativo al Comune di Monreale (PA), già approvato con il DPRS n° 229 del 04.06.2007 e s.m.i. ed aggiornato con il **D.S.G. n° 30 del 18.02.2021 Allegato n° 2b.**

Dall'analisi delle indagini geofisiche elaborate in fase di studio, è emerso che la successione litostratigrafica è costituita, nell'**AREA 1**, da un orizzonte di **Prodotti eluviali e depositi colluviali, depositi alluvionali di fondovalle terrazzati quali ghiaie, sabbie e limi**, soprastante ai **depositi terrigeni sabbiosi ed arenacei (Fm. di Cozzo Terravecchia**, in continuità stratigrafica con **marne, argille marnose ed argille di colore grigio verdastro, del "bedrock"** dell'area.

Mentre, nell'**AREA 2**", la successione stratigrafica vede al tetto **Prodotti eluviali e depositi colluviali** che caratterizzano il "colluvium" dei fianchi dei rilievi, sia l'eluvium della sottostante formazione argillosa.

Questi, passano in profondità ai **depositi terrigeni sabbiosi ed arenacei (Fm. di Cozzo Terravecchia**, in continuità stratigrafica con **marne, argille marnose ed argille di colore grigio verdastro**. Il bedrock sismico è rappresentato dai **depositi carbonatici a granulometria fine, a stratificazione tabulare** in litofacies di **Calcilutiti (tipo Scaglia)**, con **noduli e liste di selce, di colore cangiante dal bianco al rosso**, rilevabili in sub-affioramento presso **Monte Orsino (307 m s.l.m.)**.

Infine, con il modello idrogeologico proposto (§ 2), è possibile la presenza, a luoghi, di modesti **livelli idrici superficiali, a quote prossime a $\approx 4,50$ m dal p.c.** all'interno dei **sedimenti alluvionali dell'AREA 1**.

In generale, le condizioni di permeabilità dei litotipi sono tali da rendere i livelli sabbiosi presenti in lenti e precedentemente descritti, comunicanti sia in senso orizzontale sia in senso verticale, pertanto, in presenza della fase fluida, potrebbero innescarsi moti di filtrazione della stessa e di conseguenza fenomeni di consolidazione.

Inoltre, premesso che il lotto ricade nel **territorio comunale di Monreale (PA)** in "ex zona sismica di II categoria", a livello locale, le aree perimetrate nella **Carta delle Microzone omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)** allegata, sono state classificate come "**Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali**", anche alla luce delle specifiche indagini geofisiche eseguite.

Infatti, ***i test sperimentali eseguiti*** in armonia con quanto prescritto dal ***D.A. n° 120 del 14.07.2021*** dell'Assessorato Territorio ed Ambiente, sulla scorta del modello geologico elaborato per il sottosuolo in questione, evidenziano:

- Apprezzabile omogeneità di risposta sismica in senso orizzontale all'interno del substrato e della copertura;
- Profilo stratigrafico del sottosuolo di fondazione, ricondotto alla **categoria B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di " V_{seq} " compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $C_{U30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).**
- Assenza di marcate differenziazioni e di significativi contrasti di velocità, in senso laterale, tra la copertura, contraddistinta nel complesso da modesto spessore (pochi metri) ed il substrato.

Inoltre, ***la natura, nel complesso pseudocoesiva, dei litotipi***, inibisce fenomeni di liquefazione del suolo e/o possibili assestamenti indotti da una variazione del grado di addensamento.

Per la stima dell'amplificazione sismica dovuta alle condizioni topografiche del lotto è consigliabile individuare l'area in ***categoria T2 Area 1 e T3 Area 2***; categorie

topografiche dei lotti in progetto, secondo il § 3.2.2 ed il 3.2.3.2.1 delle **NTC di cui al D.M. 17.01.2018**.

Tab. 3.2.III – *Categorie topografiche*

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

Infine, per la realizzazione dell'**impianto fotovoltaico da 58,94 MWp**, in tutte le sue parti, quali, generatore fotovoltaico, locali tecnici, cabina di consegna, impianto di rete, opere di mitigazione, linea elettrica e strada vicinale, sono da escludersi localmente, sia situazioni di pericolosità geologiche (frane, cavità, impaludamenti, etc...), sia potenziali focolai di inquinamento idrogeologico.

Per un'acquisizione più dettagliata dei punti sommariamente riassunti nel presente capitolo si rimanda ai risultati esposti nelle varie parti della presente relazione e negli allegati elaborati grafici che illustrano, nel complesso, il *modello geologico* del lotto studiato.

Paceco (TP), il 19.08.2022



Il Geologo

(Dr. G. Prof. Angelo Strazzerà)