

## RELAZIONE SULLE INDAGINI GEOTECNICHE E GEOFISICHE ESEGUITE

**Realizzazione di un Parco Agrivoltaico  
di potenza nominale pari a 78 MWp  
denominato "IUDICA" sito nei  
Comuni di Aidone, Ramacca e Castel di Iudica  
Località "Cacocciola" e "Belmontino Sott.no"**

PROPONENTE:



**Energia Pulita Italiana 2 s.r.l.**

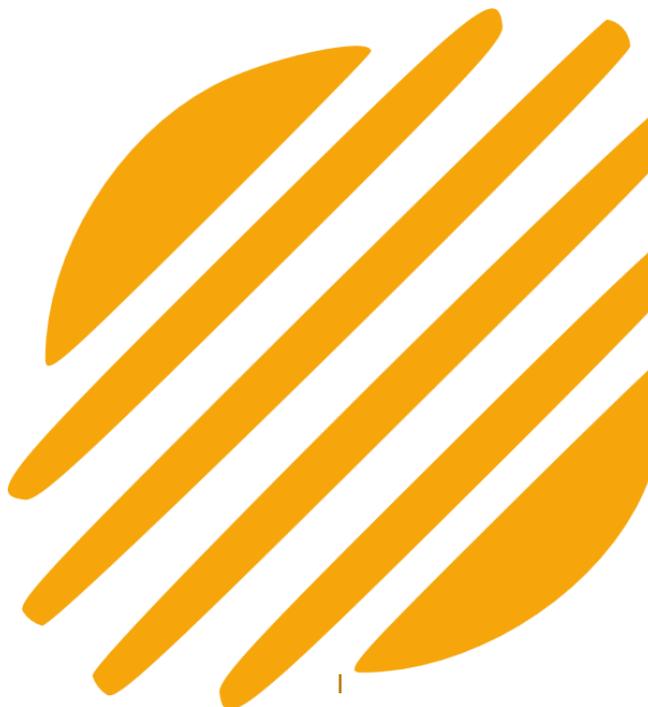
<b>Rev00</b>	<i>Integrazione documentale</i>	Data ultima elaborazione: 10/05/2023
Redatto		Approvato
<b>Dott. Geol. Salvatore ALLORO</b>		<b>ENERLAND ITALIA s.r.l.</b>
Codice Elaborato		Oggetto
<b>IUDICA-IAR10.1</b>		<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>

TEAM ENERLAND:

**Ing. Annamaria PALMISANO**  
**Dott.ssa Ilaria CASTAGNETTI**  
**Ing. Emanuele CANTERINO**  
**Dott. Claudio BERTOLLO**  
**Dott. Guglielmo QUADRIO**  
**Dott. Agr. Patrick VASTA**

Professionista incaricato (timbro e firma)

**Dott. Geol. Salvatore Alloro**





## INDICE

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2. PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE DPM30 .....</b>	<b>11</b>
2.1 Generalità .....	11
2.2 Metodologia e apparecchiatura utilizzata .....	11
2.3 Elaborazione dati .....	12
2.4 Metodologia di elaborazione .....	14
2.4.1 Valutazioni statistiche e correlazioni .....	15
<i>Elaborazione Statistica</i> .....	15
<i>Pressione ammissibile</i> .....	15
<i>Correlazioni geotecniche terreni incoerenti</i> .....	15
<i>Correlazioni geotecniche terreni coesivi</i> .....	18
2.5 Risultati DPM.....	21
<b>3. PROVE DI PERMEABILITÀ IN SITO .....</b>	<b>25</b>
3.1 Generalità .....	25
3.2 Modalità operative in sito.....	27
3.3 Risultati.....	28
<b>4. PROSPEZIONI GEOELETTRICHE TOMOGRAFICHE (ERT) .....</b>	<b>29</b>
4.1 Generalità .....	29
4.2 Resistività delle rocce.....	30
4.3 Strumentazione ed acquisizione dati.....	33
4.4 Risultati Tomografie Elettriche (ERT 2D) .....	40
<b>5. RILIEVO PLANO-ALTIMETRICO GPS DELLE INDAGINI.....</b>	<b>40</b>
5.1 Generalità e metodologia.....	40
5.2 Strumentazione utilizzata.....	41
5.3 Risultati del rilievo.....	42

### Indice delle figure

<b>Figura 1.</b> Aree di interesse su foto aerea.....	<b>3</b>
<b>Figura 2.</b> Area 1 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.....	<b>6</b>
<b>Figura 3.</b> Area 2 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.....	<b>7</b>
<b>Figura 4.</b> Area 3 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.....	<b>7</b>
<b>Figura 5.</b> Area 4 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.....	<b>8</b>

<b>Figura 6.</b> Area 5 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.....	8
<b>Figura 7.</b> Area 6 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.....	9
<b>Figura 8.</b> Area 7 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.....	9
<b>Figura 9.</b> Area 8 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.....	10
<b>Figura 10.</b> Un momento della prova DPM1 e apparecchiatura utilizzata.....	12
<b>Figura 11.</b> Schemi di funzionamento delle prove di permeabilità (a sx a carico costante). ....	25
<b>Figura 12.</b> Schema pozzetto di misura.....	27
<b>Figura 13.</b> Pozzetto PP4 - "Area 6" e relativa curva "tempi-abbassamenti in condizioni sature". .....	28
<b>Figura 14.</b> Georesistivimetro M.A.E. X612-EM+ (postazione <b>ERT8</b> - "Area 8"). ....	34
<b>Figura 15.</b> Dispositivi elettrodi lineari quadripolari di misura comunemente usati.....	35
<b>Figura 16.</b> Disposizione degli elettrodi sul terreno per indagini geoelettriche multielettrode 2D (a) e 3D (b).....	36
<b>Figura 17.</b> Pseudo-sezione della resistività misurata e calcolata nella ERT4 - "Area 4". ....	38
<b>Figura 18.</b> Sistema GPS/GNSS Stonex S8 Plus usato (durante il rilievo degli elettrodi ERT4 - Area 4).....	41

### Indice delle tabelle

<b>Tabella 1.</b> Tabella riassuntiva delle indagini eseguite. ....	6
<b>Tabella 2.</b> Caratteristiche strumentali Penetrometro GEO DEEP DRILL DM30. ....	12
<b>Tabella 3.</b> Correlazione tra $N_{DL030}$ , $N_{SPT}$ e consistenza dei terreni.....	14
<b>Tabella 4.</b> Riepilogo dei risultati delle prove DPM. ....	24
<b>Tabella 5.</b> Coefficienti di permeabilità ottenuti. ....	29
<b>Tabella 6.</b> Valori della resistività per alcune rocce, minerali e metalli.....	32
<b>Tabella 7.</b> Caratteristiche generali delle tomografie elettriche eseguite. ....	37
<b>Tabella 8.</b> Profondità di investigazione dei vari dispositivi elettrodi (Loke, 2001); (L: lunghezza dello stendimento elettrodo; a: distanza interelettrodo; z: profondità di indagine; n: numero di livelli nel sottosuolo).....	39
<b>Tabella 9.</b> Caratteristiche tecniche della strumentazione usata.....	41
<b>Tabella 10.</b> Coordinate metriche rilevate delle prove penetrometriche DPM eseguite. ....	42
<b>Tabella 11.</b> Coordinate metriche rilevate delle prove di permeabilità eseguite.....	43
<b>Tabella 12.</b> Coordinate metriche rilevate degli elettrodi iniziali e finali degli stendimenti geoelettrici eseguiti. ....	43

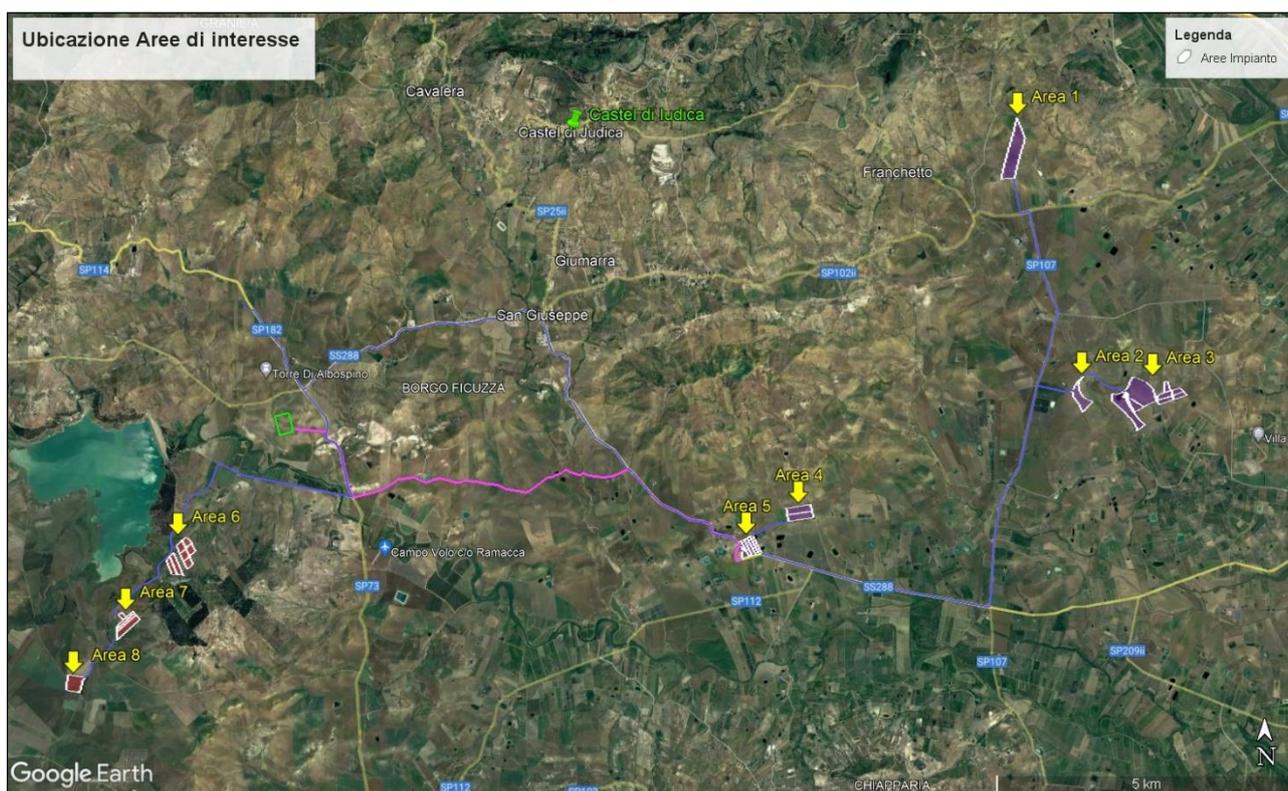
### Allegati

- ⇒ **ALLEGATO 01: PLANIMETRIE CON UBICAZIONE DELLE INDAGINI ESEGUITE IN VARIE SCALE;**
- ⇒ **ALLEGATO 02: STIMA DEI PARAMETRI GEOTECNICI OTTENUTI DALLE PROVE IN SITU E DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA;**
- ⇒ **ALLEGATO 03: RISULTATI TOMOGRAFIE ELETTRICHE (ERT 2D) E DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA.**

## 1. PREMESSA

Le indagini geotecniche e geofisiche eseguite, oggetto del presente rapporto tecnico di prova, sono state richieste dal Direttore dei Lavori Dott. Geol. Francesco Petralia in qualità di tecnico incaricato per l'esecuzione dello studio geologico-tecnico definitivo delle aree interessate dal **“Progetto di un impianto agrivoltaico denominato “IUDICA”, della potenza pari a 78 MW e delle relative opere di connessione alla RTN, da realizzarsi nei Comuni di Castel di Iudica (CT), Ramacca (CT) ed Aidone (EN), nelle località “Cacocciola” e “Belmontino Sott.no”**”, da parte della ditta Enerland Italia S.r.l. (P.IVA: 03821811209).

Le aree interessate dall'impianto in progetto e, quindi, investigate sono state in totale 8 (Fig. 1). Per maggiori dettagli sulle particelle catastali impiegate, le relative estensioni nonché sul layout del progetto rifarsi agli elaborati progettuali già presentati nel corso dell'iter autorizzativo.



**Figura 1.** Aree di interesse su foto aerea.

Nello specifico sono state espletate, in termini di quantità e tipologia di indagini, nel loro complesso su tutte le aree di interesse (convenzionalmente nominate Area 1-8 dallo scrivente procedendo da Nord a Sud):

- n. 27 **prove penetrometriche dinamiche DPM30;**
- n. 5 **prove di permeabilità in sito;**

- n. 8 indagini geofisiche di tipo geoelettrico tomografico **ERT 2D** (*Electrical Resistivity Tomography*).

Le attività di acquisizione dei dati in campo hanno avuto inizio e fine rispettivamente il 18 aprile ed il 7 maggio c.a. e sono state eseguite personalmente dallo scrivente con il controllo del direttore dei lavori Dott. Geol. Francesco Petralia, quale referente tecnico della committenza.

Di seguito si fornisce una tabella riepilogativa (Tab. 1) delle indagini eseguite distinte per area di indagine e per ogni tipologia. La denominazione (ID) di ogni tipologia di indagine è costituita dalla prima parte che identifica l'indagine eseguita (DPMx = prova penetrometrica dinamica DPM30, PPx = prova di permeabilità in sito ed ERTx = tomografia geoelettrica 2D) e dalla seconda parte che identifica la numerazione progressiva di esecuzione.

L'ubicazione delle prove e delle indagini da eseguirsi sul campo sono state fornite preliminarmente dalla DL su apposito file georeferenziato. Nonostante ciò, sia i punti di indagine geotecnica che le prove geofisiche (tutti gli elettrodi delle tomografie elettriche) sono state oggetto di rilievo plano-altimetrico mediante metodologia GPS, il quale ha consentito l'esatta ubicazione delle indagini svolte oltre che l'applicazione della giusta correzione topografica necessaria per l'elaborazione corretta dei dati dove prevista (ERT 2D).

Nelle figure che seguono (Figg. 2-9) si forniscono, su foto aerea, le ubicazioni delle indagini eseguite su ogni area di impianto.

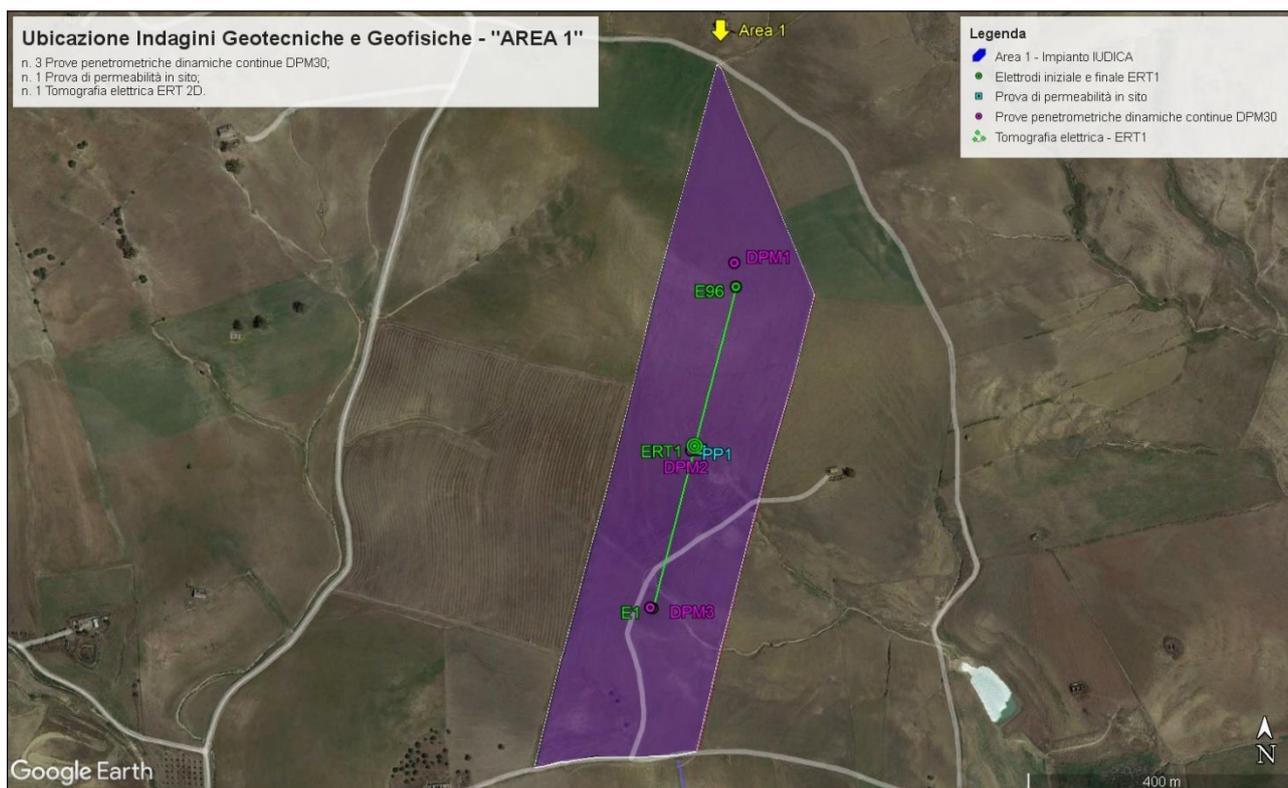
**TABELLA RIASSUNTIVA DELLE INDAGINI ESEGUITE**

<b>ID Indagine eseguita</b>	<b>Tipologia indagine eseguita</b>	<b>Data di esecuzione</b>	<b>Profondità Raggiunta (m dal p.c.)</b>	<b>Lunghezza stendimento elettrico (ml)</b>
<b><u>AREA 1</u></b>				
<b>INDAGINI GEOTECNICHE</b>				
<i>DPM1</i>	Prove penetrometriche dinamiche DPM30	26.04.2023	2.40	
<i>DPM2</i>			6.10	
<i>DPM3</i>			7.20	
<i>PP1</i>	Prova di permeabilità in sito (a carico variabile)	18.04.2023	0.30	
<b>INDAGINI GEOFISICHE</b>				
<i>ERT1</i>	Tomografia elettrica 2D	18.04.2023		475.00
<b><u>AREA 2</u></b>				
<b>INDAGINI GEOTECNICHE</b>				
<i>DPM4</i>	Prove penetrometriche dinamiche DPM30	05.05.2023	10.00	
<i>DPM5</i>			10.00	
<b>INDAGINI GEOFISICHE</b>				
<i>ERT2</i>	Tomografia elettrica 2D	29.04.2023		399.00

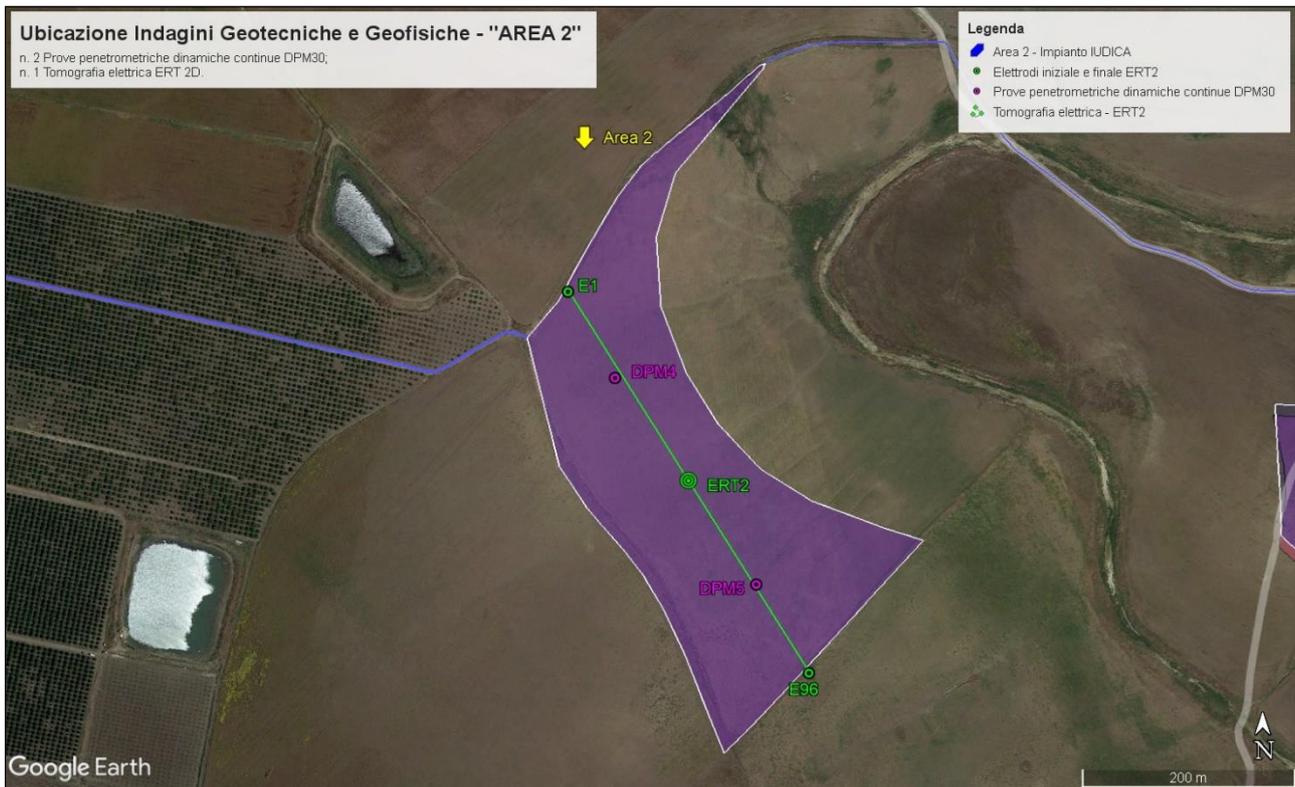
<b>AREA 3</b>				
<b>INDAGINI GEOTECNICHE</b>				
<i>DPM6</i>	Prove penetrometriche dinamiche DPM30	05.05.2023	0.30	
<i>DPM7</i>			4.40	
<i>DPM8</i>		06.05.2023	1.40	
<i>DPM9</i>		05.05.2023	7.90	
<i>DPM10</i>		06.05.2023	0.40	
<i>PP2</i>	Prova di permeabilità in sito (a carico variabile)	28.04.2023	0.30	
<b>INDAGINI GEOFISICHE</b>				
<i>ERT3</i>	Tomografia elettrica 2D	28.04.2023		475.00
<b>AREA 4</b>				
<b>INDAGINI GEOTECNICHE</b>				
<i>DPM11</i>	Prove penetrometriche dinamiche DPM30	26.04.2023	7.40	
<i>DPM12</i>		27.04.2023	4.00	
<i>DPM13</i>		01.05.2023	8.40	
<i>PP3</i>	Prova di permeabilità in sito (a carico variabile)	20.04.2023	0.30	
<b>INDAGINI GEOFISICHE</b>				
<i>ERT4</i>	Tomografia elettrica 2D	20.04.2023		475.00
<b>AREA 5</b>				
<b>INDAGINI GEOTECNICHE</b>				
<i>DPM14</i>	Prove penetrometriche dinamiche DPM30	01.05.2023	3.60	
<i>DPM15</i>			6.70	
<i>DPM16</i>			0.90	
<b>INDAGINI GEOFISICHE</b>				
<i>ERT5</i>	Tomografia elettrica 2D	21.04.2023		427.50
<b>AREA 6</b>				
<b>INDAGINI GEOTECNICHE</b>				
<i>DPM17</i>	Prove penetrometriche dinamiche DPM30	07.05.2023	10.00	
<i>DPM18</i>			4.60	
<i>DPM19</i>			7.40	
<i>DPM20</i>			10.00	
<i>DPM21</i>			3.00	
<i>PP4</i>	Prova di permeabilità in sito (a carico variabile)	22.04.2023	0.30	
<b>INDAGINI GEOFISICHE</b>				
<i>ERT6</i>	Tomografia elettrica 2D	22.04.2023		475.00
<b>AREA 7</b>				
<b>INDAGINI GEOTECNICHE</b>				
<i>DPM22</i>	Prove penetrometriche dinamiche DPM30	06.05.2023	4.90	
<i>DPM23</i>			10.00	
<i>DPM24</i>		04.05.2023	6.70	
<b>INDAGINI GEOFISICHE</b>				
<i>ERT7</i>	Tomografia elettrica 2D	24.04.2023		475.00
<b>AREA 8</b>				
<b>INDAGINI GEOTECNICHE</b>				
<i>DPM25</i>	Prove penetrometriche dinamiche DPM30	01.05.2023	6.00	
<i>DPM26</i>		04.05.2023	5.50	

<b>DPM27</b>			6.10	
<b>PP5</b>	Prova di permeabilità in sito (a carico variabile)	25.04.2023	0.30	
<b>INDAGINI GEOFISICHE</b>				
<b>ERT8</b>	Tomografia elettrica 2D	25.04.2023		399.00
<b>TOTALE PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE DPM30</b>				<b>27</b>
<b>TOTALE PROVE DI PERMEABILITÀ IN SITO</b>				<b>5</b>
<b>TOTALE ERT 2D</b>				<b>8</b>

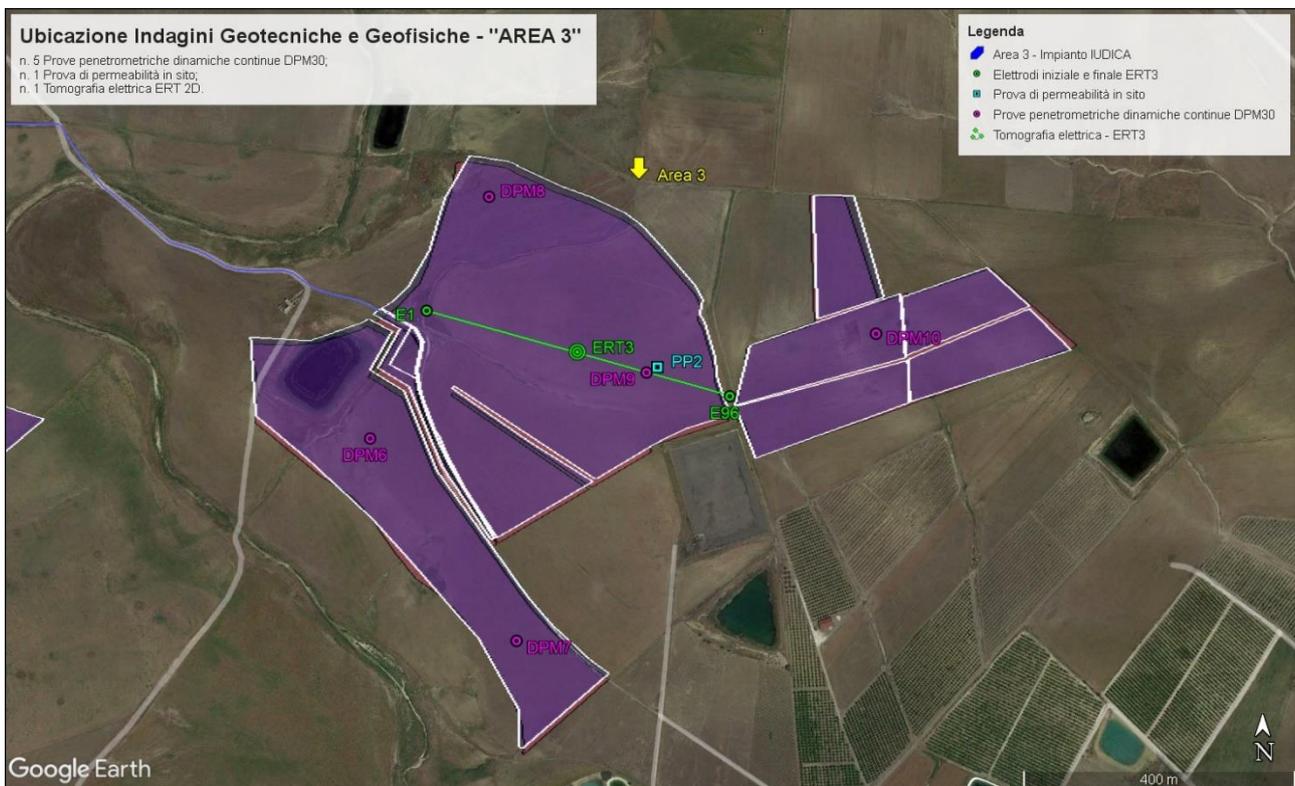
**Tabella 1.** Tabella riassuntiva delle indagini eseguite.



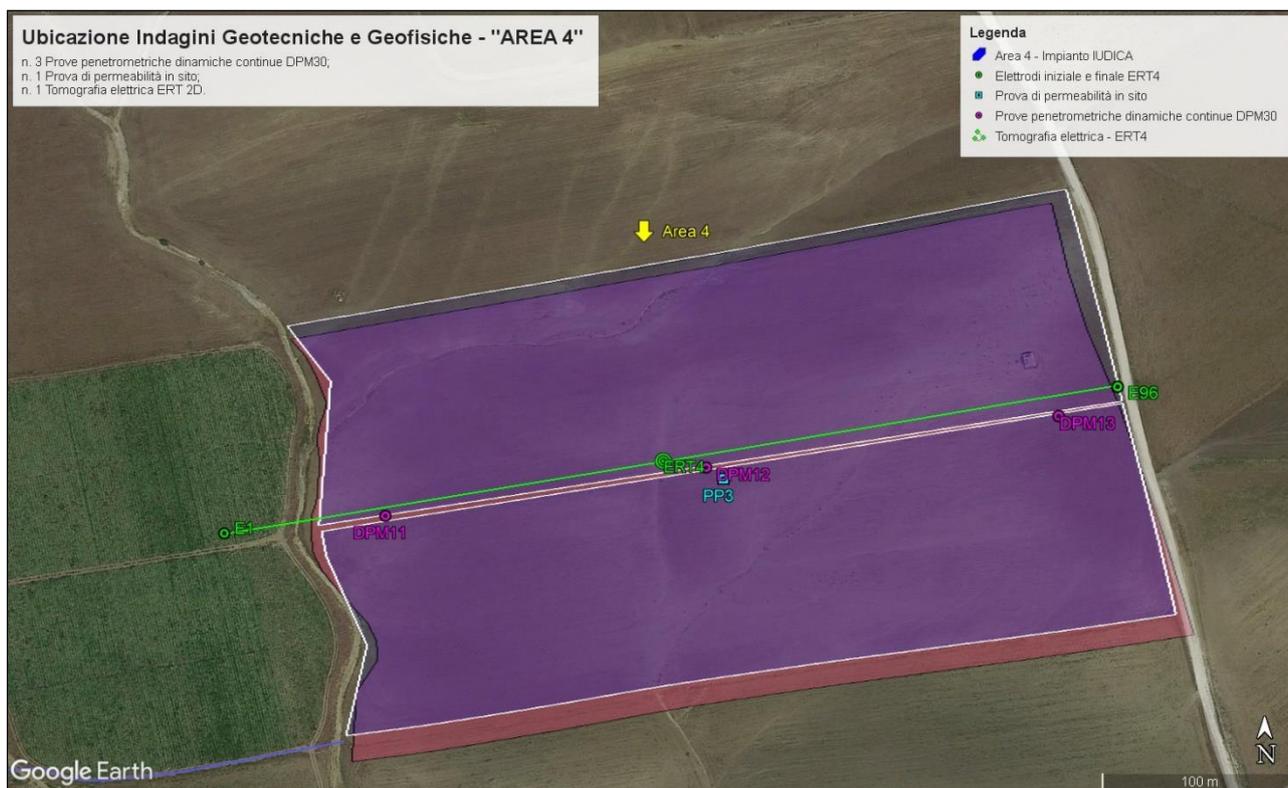
**Figura 2.** Area 1 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.



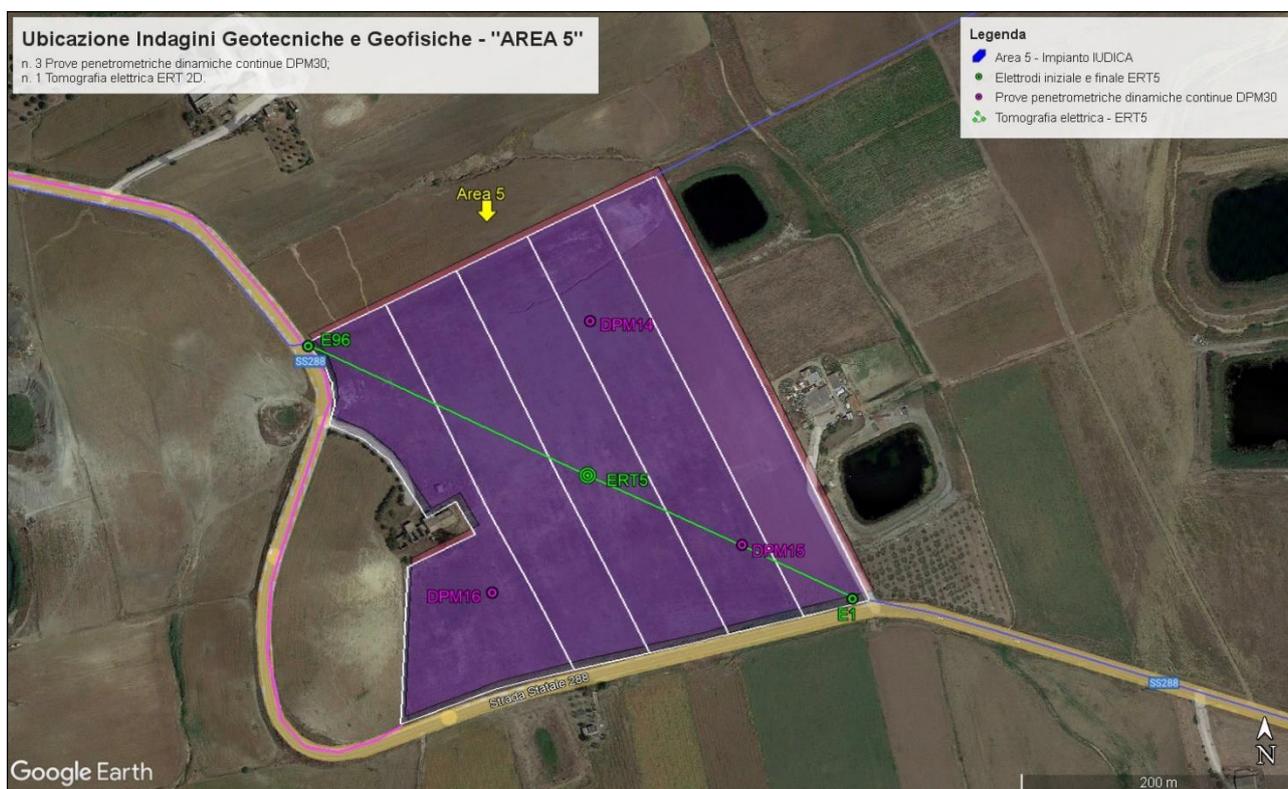
**Figura 3.** Area 2 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.



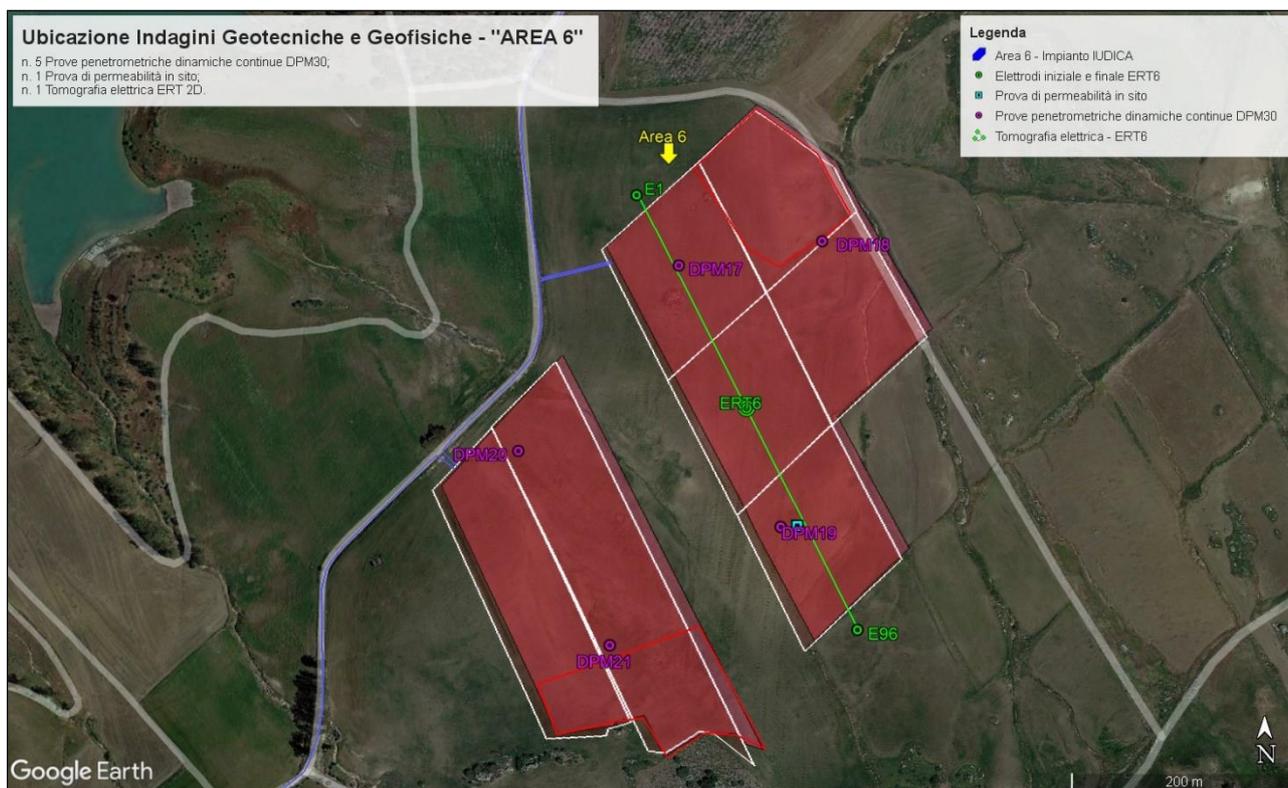
**Figura 4.** Area 3 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.



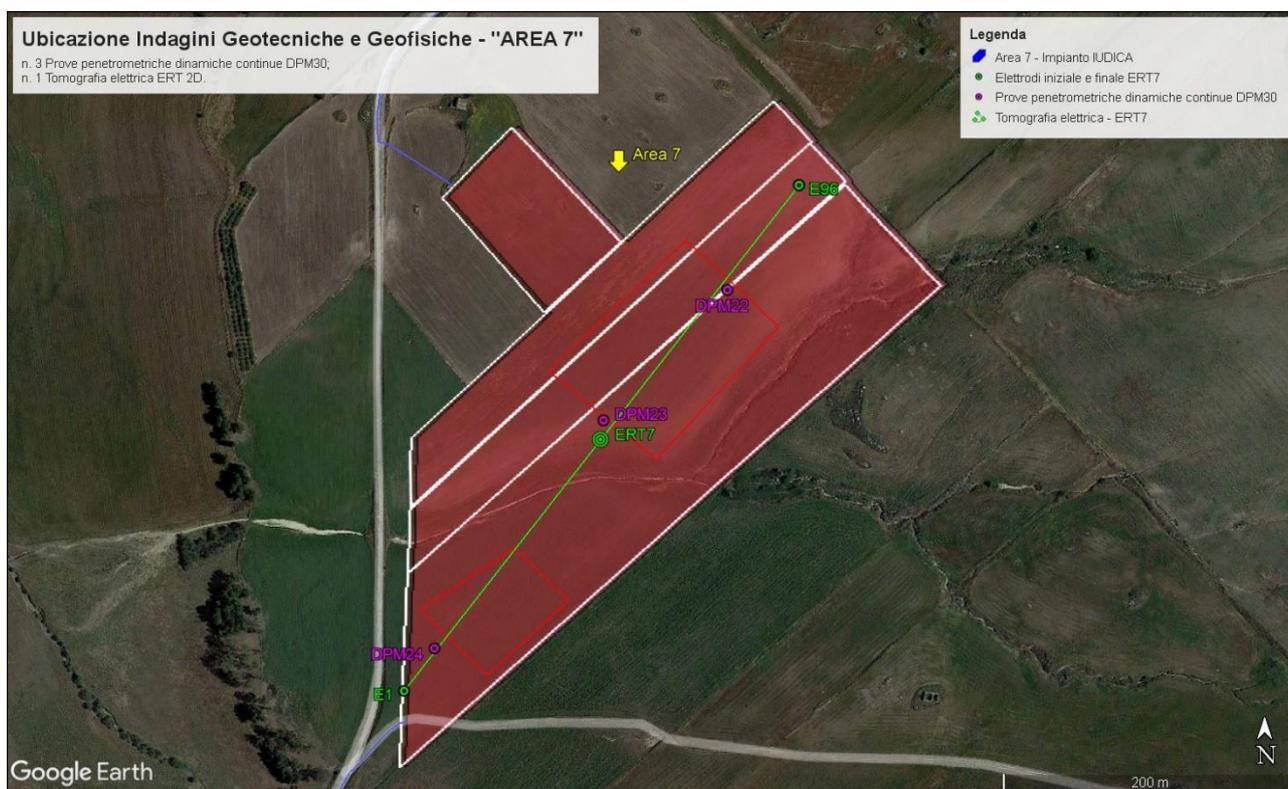
**Figura 5.** Area 4 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.



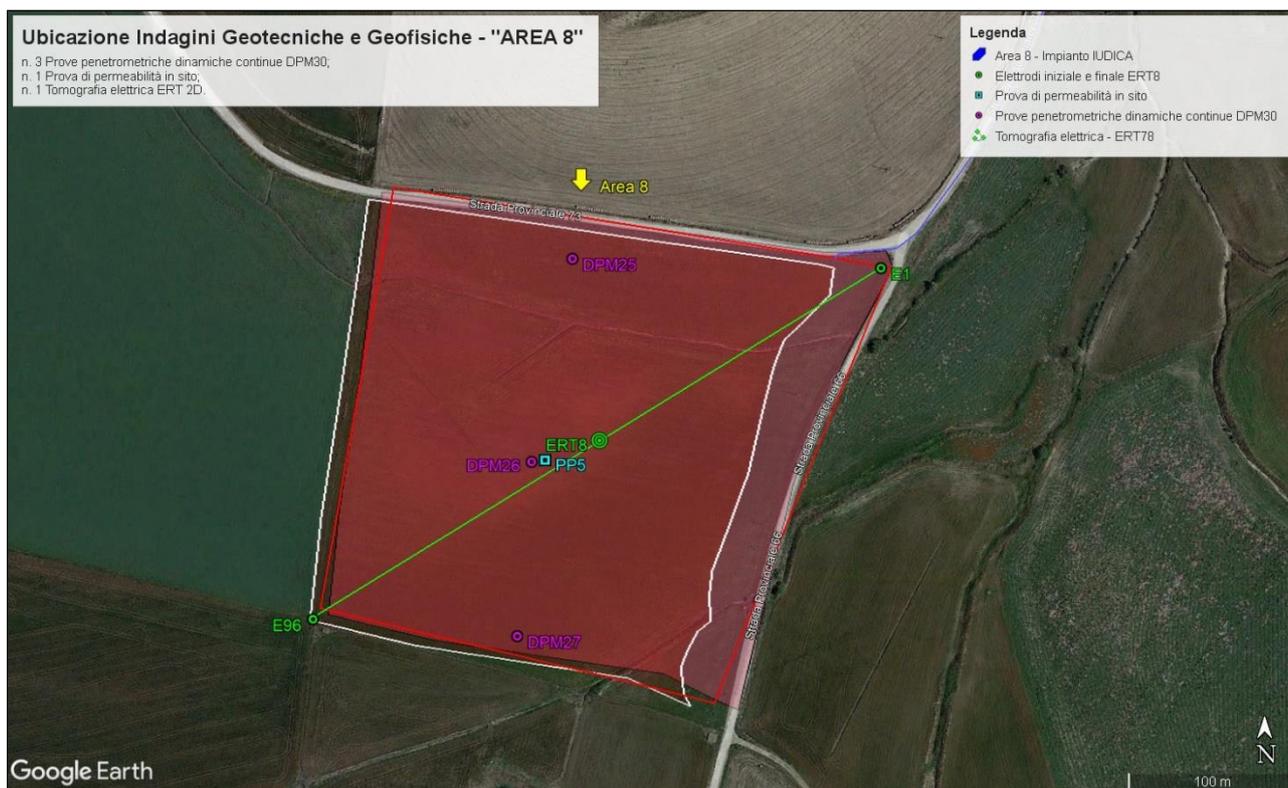
**Figura 6.** Area 5 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.



**Figura 7.** Area 6 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.



**Figura 8.** Area 7 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.



**Figura 9.** Area 8 su foto aerea ed ubicazione delle indagini eseguite.

In particolare le singole tipologie di indagine hanno consentito, in ultima analisi, di ottenere le seguenti informazioni geognostiche:

- valutazione dello spessore e determinazione delle caratteristiche geotecniche dei litotipi superficiali presenti (*Prove penetrometriche dinamiche e Prove di permeabilità in sito*);
- ricostruzione dettagliata dell'andamento della distribuzione della resistività del terreno "lungo una sezione", consentendo la localizzazione di eventuali anomalie elettriche in genere (vuoti, elementi metallici, disomogeneità, contatti stratigrafici fra litologie diverse, ecc...) se presenti lungo la sezione. I valori di resistività elettrica, inoltre, sono molto utili ai fini ingegneristici per il dimensionamento degli impianti di messa a terra (ERT 2D).

Il presente lavoro, commissionato direttamente dalla committenza, è stato eseguito seguendo i criteri e le disposizioni contenute:

- ✓ nel D.M. 11.03.88 e nelle precedenti normative riguardanti le "Indagini sui terreni e sulle rocce";
- ✓ nelle norme e raccomandazioni A.G.I. ed ASTM di settore.

I risultati delle attività prima citate e svolte in campo hanno consentito di elaborare e fornire i seguenti allegati (sia cartacei che digitali) costituenti parte integrante alla presente relazione:

- ⇒ **ALLEGATO 01: PLANIMETRIE CON UBICAZIONE DELLE INDAGINI ESEGUITE IN VARIE SCALE;**
- ⇒ **ALLEGATO 02: STIMA DEI PARAMETRI GEOTECNICI OTTENUTI DALLE PROVE IN SITU E DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA;**
- ⇒ **ALLEGATO 03: RISULTATI TOMOGRAFIE ELETTRICHE (ERT 2D) E DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA.**

## **2. PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE DPM30**

### **2.1 Generalità**

Al fine di valutare lo spessore e le caratteristiche geotecniche dei litotipi superficiali presenti sulle aree di interesse sono state eseguite delle prove penetrometriche dinamiche continue del tipo **DPM (Dynamic Probing Medium)**, spinte fino a “rifiuto” o comunque fino a raggiungere una profondità massima di - 10.00 metri dal p.c..

### **2.2 Metodologia e apparecchiatura utilizzata**

La prova penetrometrica dinamica consiste nell’infiggere nel terreno una punta conica (per tratti consecutivi  $\delta$ ) misurando il numero di colpi N necessari.

La loro elaborazione, interpretazione e visualizzazione grafica consente di “catalogare e parametrizzare” il suolo attraversato con un’immagine in continuo, che permette anche di avere un raffronto sulle consistenze dei vari livelli attraversati e una correlazione diretta con sondaggi geognostici, ove presenti, per la caratterizzazione stratigrafica.

La sonda penetrometrica permette, inoltre, di riconoscere abbastanza precisamente lo spessore delle coltri sul substrato, la quota di eventuali falde e la consistenza in generale del terreno.

L’apparecchiatura usata è costituita da un penetrometro GEO DEEP DRILL DM30 (Fig. 10), avente le seguenti caratteristiche tecniche:

- motore a benzina 3.5 Hp “Briggs & Stratton”;
- maglio da 30 kg;
- altezza di caduta 200 mm;
- aste in acciaio speciali  $\varnothing$  22 mm, L 1.000 mm, peso 2.9 kg;
- punta conica  $\varnothing$  36 mm con apertura di 60°.

Rif. Norme	DIN 4094
Peso Massa battente:	30 Kg
Altezza di caduta libera	0,20 m
Peso sistema di battuta	75 Kg
Diametro punta conica	36 mm
Area di base punta	10 cm <sup>2</sup>
Lunghezza delle aste	1 m
Peso aste a metro	2,9 Kg/m
Profondità giunzione prima asta	0,80 m
Avanzamento punta	0,10 m
Numero colpi per punta	N(10)
Coeff. Correlazione	0,761
Rivestimento/fanghi	No
Angolo di apertura punta	60°

**Tabella 2.** Caratteristiche strumentali Penetrometro GEO DEEP DRILL DM30.



**Figura 10.** Un momento della prova DPM1 e apparecchiatura utilizzata.

### 2.3 Elaborazione dati

Poiché la prova penetrometrica standard (SPT) rappresenta, ad oggi, uno dei mezzi più diffusi ed economici per ricavare informazioni dal sottosuolo, la maggior parte delle correlazioni esistenti riguardano i valori del numero di colpi  $N_{spt}$  ottenuto con la suddetta prova, pertanto si presenta la necessità di rapportare il numero di colpi di una prova dinamica con  $N_{spt}$ . Il passaggio viene dato da:

$$N_{spt} = \beta_t N$$

dove:

$$\beta_t = \frac{Q}{Q_{SPT}}$$

in cui  $Q$  è l'energia specifica per colpo e  $Q_{SPT}$  è quella riferita alla prova SPT. Nel nostro caso, questo coefficiente di correlazione  $\beta_t$  è strettamente legato alle caratteristiche dell'attrezzatura utilizzata e vale 0.761.

L'energia specifica per colpo viene calcolata come segue:

$$Q = \frac{M^2 \cdot H}{A \cdot \delta \cdot (M + M')}$$

in cui

$M$  = peso massa battente;

$M'$  = peso aste;

$H$  = altezza di caduta;

$A$  = area base punta conica;

$\delta$  = passo di avanzamento.

Sulla base del numero di colpi  $N_{DL030}$  correlato con i valori dell'S.P.T. secondo le sotto riportate tabelle (Tab. 3) il sottosuolo dell'area indagata può essere suddiviso in vari livelli.

L'elaborazione dei dati di avanzamento delle prove penetrometriche consente di ricavare la **“Resistenza dinamica alla punta”** ( $Rpd$ ), parametro caratteristico dello stato di addensamento di un terreno incoerente o della consistenza di un terreno coesivo.

La **“Resistenza Dinamica alla punta”** è ricavata dalla **“Formula degli Olandesi”**, modificata per l'introduzione di un coefficiente caratteristico del penetrometro DL030.

$$Rpd = \frac{M^2 \cdot H}{[A \cdot e \cdot (M + P)]} = \frac{M^2 \cdot H \cdot N}{[A \cdot \delta \cdot (M + P)]}$$

dove:

$M$  = peso del maglio = 30 Kg;

$H$  = altezza di caduta costante = 20 cm;

$A$  = sezione della punta conica = 10 cmq;

$e$  = infissione media per colpo ( $\delta/N$ ) con  $N$  corrispondente in numero dei colpi per ogni approfondimento di 10 cm =  $10/N$ ;

$P$  = peso delle aste = 2.9 Kg/m.

<b>Terreni incoerenti: sabbie, limi sabbiosi, sabbie e ghiaie:</b>					
Consistenza terreni:	Molto sciolte	Sciolte	Mediamente dense	Addensate	Molto addensate
$N_{DL030(10\text{ cm})}$	< 4	4 - 10	10 - 35	35 - 60	60
$N_{SPT(30\text{ cm})}$	< 4	4 - 10	10 - 30	30 - 50	> 50
Densità relativa:	< 15	15 - 35	35 - 65	65 - 85	85 - 100
Peso di volume allo stato secco (t/mc):	< 1.4	1.4 - 1.6	1.6 - 1.8	18 - 20	> 20
Angolo di attrito interno $\phi$ :	< 30	30 - 35	35 - 40	40 - 45	> 45

<b>Terreni coesivi: argille, limi argillosi:</b>						
Consistenza terreni	Molto soffice	Soffice	Plastica	Dura	Molto Dura	Durissima
$N_{DL030(10\text{ cm})}$	< 1	1 - 3	3 - 6	6 - 12	12 - 30	> 30
$N_{SPT(30\text{ cm})}$	< 2	2 - 4	4 - 8	8 - 15	15 - 30	> 30
$I_c$ Indice di consistenza	$\approx 0$	0 - 0.25	0.25 - 0.50	0.50 - 0.75	0.75 - 1.00	> 1.00
Coesione non drenata $C_u$ (Kg/cmq):	< 0.1	0.1 - 0.25	0.25 - 0.50	0.50 - 1.00	1.00 - 2.00	> 2.00

**Tabella 3.** Correlazione tra  $N_{DL030}$ ,  $N_{SPT}$  e consistenza dei terreni.

## 2.4 Metodologia di elaborazione

Le elaborazioni sono state effettuate mediante il programma di calcolo automatico denominato "Dynamic Probing" della *GeoStru Software*.

Il programma calcola il rapporto delle energie trasmesse (coefficiente di correlazione con SPT) tramite le elaborazioni proposte da Pasqualini 1983 - Meyerhof 1956 - Desai 1968 - Borowczyk-Frankowsky 1981.

Permette inoltre di utilizzare i dati ottenuti dall'effettuazione di prove penetrometriche per estrapolare utili informazioni geotecniche e geologiche.

Una vasta esperienza acquisita, unitamente ad una buona interpretazione e correlazione, permettono spesso di ottenere dati utili alla progettazione e frequentemente dati maggiormente attendibili di tanti dati bibliografici sulle litologie e di dati geotecnici determinati sulle verticali litologiche da poche prove di laboratorio eseguite come rappresentazione generale di una verticale eterogenea disuniforme e/o complessa.

In particolare consente di ottenere informazioni inerenti:

- ✓ l'andamento verticale e orizzontale degli intervalli stratigrafici;
- ✓ la caratterizzazione litologica delle unità stratigrafiche;

- ✓ i parametri geotecnici suggeriti da vari autori in funzione dei valori del numero dei colpi e della resistenza alla punta.

## 2.4.1 Valutazioni statistiche e correlazioni

### Elaborazione Statistica

Permette l'elaborazione statistica dei dati numerici di Dynamic Probing, utilizzando nel calcolo dei valori rappresentativi dello strato considerato un valore inferiore o maggiore della media aritmetica dello strato (dato comunque maggiormente utilizzato); i valori possibili in immissione sono:

#### **Media**

Media aritmetica dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Media minima**

Valore statistico inferiore alla media aritmetica dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Massimo**

Valore massimo dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Minimo**

Valore minimo dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Scarto quadratico medio**

Valore statistico di scarto dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Media deviata**

Valore statistico di media deviata dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Media + s**

Media + scarto (valore statistico) dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

#### **Media - s**

Media - scarto (valore statistico) dei valori del numero di colpi sullo strato considerato.

### Pressione ammissibile

Pressione ammissibile specifica sull'interstrato (con effetto di riduzione energia per svergolamento aste o no) calcolata secondo le note elaborazioni proposte da Herminier, applicando un coefficiente di sicurezza (generalmente = 20-22) che corrisponde ad un coefficiente di sicurezza standard delle fondazioni pari a 4, con una geometria fondale standard di larghezza pari a 1 mt ed ammorsamento  $d = 1$  mt.

### Correlazioni geotecniche terreni incoerenti

#### **Liquefazione**

Permette di calcolare utilizzando dati  $N_{spt}$  il potenziale di liquefazione dei suoli (prevalentemente sabbiosi). Attraverso la relazione di SHI-MING (1982), applicabile a terreni

sabbiosi, la liquefazione risulta possibile solamente se  $N_{spt}$  dello strato considerato risulta inferiore a  $N_{spt}$  critico calcolato con l'elaborazione di SHI-MING.

### ***Correzione $N_{spt}$ in presenza di falda***

$$N_{spt} \text{ corretto} = 15 + 0.5 \times (N_{spt} - 15)$$

$N_{spt}$  è il valore medio nello strato

La correzione viene applicata in presenza di falda solo se il numero di colpi è maggiore di 15 (la correzione viene eseguita se tutto lo strato è in falda).

### ***Angolo di Attrito***

- Peck-Hanson-Thornburn-Meyerhof 1956: Correlazione valida per terreni non molli a prof. < 5 mt.; correlazione valida per sabbie e ghiaie rappresenta valori medi; Correlazione storica molto usata, valevole per prof. < 5 mt. per terreni sopra falda e < 8 mt. per terreni in falda (tensioni < 8-10 t/mq).
- Meyerhof 1956: Correlazioni valide per terreni argillosi ed argillosi-marnosi fessurati, terreni di riporto sciolti e coltri detritiche (da modifica sperimentale di dati).
- Sowers (1961): Angolo di attrito in gradi valido per sabbie in genere (cond. ottimali per prof. < 4 mt. sopra falda e < 7 mt. per terreni in falda)  $s > 5$  t/mq.
- De Mello: Correlazione valida per terreni prevalentemente sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi (da modifica sperimentale di dati) con angolo di attrito < 38°.
- Malcev 1964: Angolo di attrito in gradi valido per sabbie in genere (cond. ottimali per prof. > 2 m. e per valori di angolo di attrito < 38°).
- Schmertmann 1977: Angolo di attrito (gradi) per vari tipi litologici (valori massimi). N.B. valori spesso troppo ottimistici poiché desunti da correlazioni indirette da  $D_r$  %.
- Shioi-Fukuni 1982 (ROAD BRIDGE SPECIFICATION): Angolo di attrito in gradi valido per sabbie - sabbie fini o limose e limi siltosi (cond. ottimali per prof. di prova > 8 mt. sopra falda e > 15 mt. per terreni in falda)  $s > 15$  t/mq.
- Shioi-Fukuni 1982 (JAPANESE NATIONALE RAILWAY): Angolo di attrito valido per sabbie medie e grossolane fino a ghiaiose.
- Angolo di attrito in gradi (Owasaki & Iwasaki): valido per sabbie - sabbie medie e grossolane-ghiaiose (cond. ottimali per prof. > 8 mt. sopra falda e > 15 mt. per terreni in falda)  $s > 15$  t/mq.
- Meyerhof 1965: Correlazione valida per terreni per sabbie con % di limo < 5% a profondità < 5 mt. e con % di limo > 5% a profondità < 3 mt.

- Mitchell e Katti (1965): Correlazione valida per sabbie e ghiaie.

#### ***Densità relativa (%)***

- Gibbs & Holtz (1957): correlazione valida per qualunque pressione efficace, per ghiaie Dr viene sovrastimato, per limi sottostimato.
- Skempton (1986): elaborazione valida per limi e sabbie e sabbie da fini a grossolane NC a qualunque pressione efficace, per ghiaie il valore di Dr % viene sovrastimato, per limi sottostimato.
- Meyerhof (1957).
- Schultze & Menzenbach (1961): per sabbie fini e ghiaiose NC, metodo valido per qualunque valore di pressione efficace in depositi NC, per ghiaie il valore di Dr % viene sovrastimato, per limi sottostimato.

#### ***Modulo Di Young (Ey)***

- Terzaghi: elaborazione valida per sabbia pulita e sabbia con ghiaia senza considerare la pressione efficace.
- Schmertmann (1978): correlazione valida per vari tipi litologici.
- Schultze-Menzenbach: correlazione valida per vari tipi litologici.
- D'Appollonia ed altri (1970): correlazione valida per sabbia, sabbia SC, sabbia NC e ghiaia.
- Bowles (1982): correlazione valida per sabbia argillosa, sabbia limosa, limo sabbioso, sabbia media, sabbia e ghiaia.

#### ***Modulo Edometrico***

- Begemann (1974): elaborazione desunta da esperienze in Grecia, correlazione valida per limo con sabbia, sabbia e ghiaia.
- Buisman-Sanglerat: correlazione valida per sabbia e sabbia argillosa.
- Farrent (1963): valida per sabbie, talora anche per sabbie con ghiaia (da modifica sperimentale di dati).
- Menzenbach e Malcev: valida per sabbia fine, sabbia ghiaiosa e sabbia e ghiaia.

#### ***Stato di consistenza***

- Classificazione A.G.I. 1977.

### ***Peso di Volume Gamma***

- Meyerhof ed altri, valida per sabbie, ghiaie, limo, limo sabbioso.

### ***Peso di volume saturo***

- Terzaghi-Peck 1948-1967.

### ***Modulo di poisson***

- Classificazione A.G.I.

### ***Potenziale di liquefazione (Stress Ratio)***

- Seed-Idriss 1978-1981: Tale correlazione è valida solamente per sabbie, ghiaie e limi sabbiosi, rappresenta il rapporto tra lo sforzo dinamico medio  $t$  e la tensione verticale di consolidazione per la valutazione del potenziale di liquefazione delle sabbie e terreni sabbio-ghiaiosi attraverso grafici degli autori.

### ***Velocità onde di taglio Vs (m/sec)***

- Tale correlazione è valida solamente per terreni incoerenti sabbiosi e ghiaiosi.

### ***Modulo di deformazione di taglio (G)***

- Ohsaki & Iwasaki: elaborazione valida per sabbie con fine plastico e sabbie pulite.
- Robertson e Campanella (1983) e Imai & Tonouchi (1982): elaborazione valida soprattutto per sabbie e per tensioni litostatiche comprese tra 0,5 - 4,0 kg/cmq.

### ***Modulo di reazione (Ko)***

- Navfac 1971-1982: elaborazione valida per sabbie, ghiaie, limo, limo sabbioso.

### ***Resistenza alla punta del Penetrometro Statico (Qc)***

- Robertson 1983 Qc.

## **Correlazioni geotecniche terreni coesivi**

### ***Coesione non drenata***

- Benassi & Vannelli: correlazioni scaturite da esperienze ditta costruttrice Penetrometri SUNDA 1983.
- Terzaghi-Peck (1948-1967): correlazione valida per argille sabbiose-siltose NC con  $N_{spt} < 8$ , argille limose-siltose mediamente plastiche, argille marnose alterate-fessurate.
- Terzaghi-Peck (1948):  $C_u$  min-max.

- Sanglerat: da dati Penetr. Statico per terreni coesivi saturi, tale correlazione non è valida per argille sensitive con sensitività  $> 5$ , per argille sovraconsolidate fessurate e per i limi a bassa plasticità.
- Sanglerat: (per argille limose-sabbiose poco coerenti), valori validi per resistenze penetrometriche  $< 10$  colpi, per resistenze penetrometriche  $> 10$  l'elaborazione valida è comunque quella delle "argille plastiche" di Sanglerat.
- (U.S.D.M.S.M.) U.S. Design Manual Soil Mechanics: Coesione non drenata per argille limose e argille di bassa media ed alta plasticità, (Cu-Nspt-grado di plasticità).
- Schmertmann 1975: Cu (Kg/cmq) (valori medi), valida per argille e limi argillosi con  $N_c=20$  e  $Q_c/N_{spt} = 2$ .
- Schmertmann 1975: Cu (Kg/cmq) (valori minimi), valida per argille NC.
- Fletcher 1965 (Argilla di Chicago): Coesione non drenata Cu (Kg/cmq), colonna valori validi per argille a medio-bassa plasticità.
- Houston (1960): argilla di media-alta plasticità.
- Shioi-Fukuni 1982: valida per suoli poco coerenti e plastici, argilla di media-alta plasticità.
- Begemann.
- De Beer.

#### ***Resistenza alla punta del Penetrometro Statico ( $Q_c$ )***

- Robertson 1983  $Q_c$ .

#### ***Modulo Edometrico-Confinato ( $M_o$ )***

- Stroud e Butler (1975): per litotipi a media plasticità, valida per litotipi argillosi a media-medio-alta plasticità - da esperienze su argille glaciali.
- Stroud e Butler (1975): per litotipi a medio-bassa plasticità ( $IP < 20$ ), valida per litotipi argillosi a medio-bassa plasticità ( $IP < 20$ ) - da esperienze su argille glaciali.
- Vesic (1970): correlazione valida per argille molli (valori minimi e massimi).
- Trofimenkov (1974), Mitchell e Gardner Modulo Confinato  $M_o$  (Eed) (Kg/cmq): valida per litotipi argillosi e limosi-argillosi (rapporto  $Q_c/N_{spt}=1.5-2.0$ ).
- Buisman - Sanglerat: valida per argille compatte ( $N_{spt} < 30$ ) medie e molli ( $N_{spt} < 4$ ) e argille sabbiose ( $N_{spt}=6-12$ ).

### ***Modulo Di Young (EY)***

- Schultze-Menzenbach - (Min. e Max.): correlazione valida per limi coerenti e limi argillosi con I.P. >15.
- D'Appollonia ed altri (1983): correlazione valida per argille sature-argille fessurate.

### ***Stato di consistenza***

- Classificazione A.G.I. 1977.

### ***Peso di Volume Gamma***

- Meyerhof ed altri: valida per argille, argille sabbiose e limose prevalentemente coerenti.

### ***Peso di volume saturo***

- Correlazione Bowles (1982), Terzaghi-Peck (1948-1967): valida per condizioni specifiche: peso specifico del materiale pari a circa  $G=2,70$  (t/mc) e per indici dei vuoti variabili da 1,833 ( $N_{spt}=0$ ) a 0,545 ( $N_{spt}=28$ ).

## 2.5 Risultati DPM

Le prove penetrometriche eseguite hanno raggiunto la profondità minima e massima, rispettivamente, di - 0.30 (in DPM6) e - 10.00 m dal p.c. ed hanno consentito di individuare e stimare, in funzione del numero di colpi e quindi della resistenza dinamica alla punta, gli strati litologici presenti e le relative proprietà geotecniche. Nell'allegato 02 fornito è possibile visionare la stima dei parametri geotecnici e la relativa documentazione fotografica. Si precisa, infine, che tutte le elaborazioni sono state eseguite considerando i litotipi come "coesivi" vista la bibliografia geologica scientifica dell'area litotipi prevalentemente limosi ed argillosi).

A seguire si fornisce una tabella riepilogativa dei risultati ottenuti dove, nello specifico, si evidenziano gli strati riscontrati in ogni prova "in termini di consistenza" con i relativi spessori.

ID DPM	Profondità indagata (m dal p.c.)	Profondità letto strato (m)	Spessore strato (m)	N <sub>SPT</sub>	Classificazione AGI	Peso unità di volume (t/m <sup>3</sup> )
<i>DPM1</i> "Area 1"	2.40	0.50	0.50	12.02	Consistente	2.02
		1.20	0.70	18.80	Molto consistente	2.10
		2.40	1.20	13.64	Consistente	2.05
<i>DPM2</i> "Area 1"	6.10	0.60	0.60	8.50	Consistente	1.92
		3.70	3.10	5.57	Moderatamente consistente	1.79
		5.50	1.80	12.18	Consistente	2.02
		6.10	0.60	24.48	Molto consistente	2.11
<i>DPM3</i> "Area 1"	7.20	0.60	0.60	7.36	Moderatamente consistente	1.87
		1.10	0.50	14.31	Consistente	2.06
		2.50	1.40	8.32	Consistente	1.91
		5.10	2.60	17.18	Molto consistente	2.09
		6.90	1.80	23.08	Molto consistente	2.11
		7.20	0.30	40.33	Estremamente consistente	2.55
<i>DPM4</i> "Area 2"	10.00	0.90	0.90	9.38	Consistente	1.95
		3.80	2.90	3.73	<b>Poco consistente</b>	1.68
		5.40	1.60	6.80	Moderatamente consistente	1.85
		7.00	1.60	9.98	Consistente	1.97
		7.50	0.50	14.31	Consistente	2.06
		10.00	2.50	17.05	Molto consistente	2.08

ID DPM	Profondità indagata (m dal p.c.)	Profondità letto strato (m)	Spessore strato (m)	N <sub>SPT</sub>	Classificazione AGI	Peso unità di volume (t/m <sup>3</sup> )
<i>DPM5</i> "Area 2"	10.00	0.30	0.30	7.36	Moderatamente consistente	1.87
		3.30	3.00	2.99	<b>Poco consistente</b>	1.63
		5.90	2.60	8.08	Consistente	1.90
		6.90	1.00	12.71	Consistente	2.03
		10.00	3.10	18.17	Molto consistente	2.09
<i>DPM6</i> "Area 3"	0.30	0.30	0.30	13.45	Consistente	2.04
<i>DPM7</i> "Area 3"	4.40	1.70	1.70	9.35	Consistente	1.95
		3.30	1.60	11.89	Consistente	2.02
		3.60	0.30	15.22	Molto consistente	2.07
		4.10	0.50	8.83	Consistente	1.93
		4.40	0.30	14.71	Consistente	2.06
<i>DPM8</i> "Area 3"	1.40	0.30	0.30	8.88	Consistente	1.93
		0.80	0.50	14.61	Consistente	2.06
		1.40	0.60	12.94	Consistente	2.04
<i>DPM9</i> "Area 3"	7.90	0.80	0.80	9.04	Consistente	1.94
		3.80	3.00	3.78	<b>Poco consistente</b>	1.69
		5.40	1.60	6.76	Moderatamente consistente	1.85
		7.40	2.00	10.88	Consistente	1.99
		7.90	0.50	27.85	Molto consistente	2.14
<i>DPM10</i> "Area 3"	0.40	0.20	0.20	6.47	Moderatamente consistente	1.83
		0.40	0.20	21.31	Molto consistente	2.10
<i>DPM11</i> "Area 4"	7.40	2.90	2.90	9.53	Consistente	1.95
		7.10	4.20	15.71	Molto consistente	2.07
		7.40	0.30	31.20	Estremamente consistente	2.18
<i>DPM12</i> "Area 4"	4.00	0.60	0.60	6.22	Moderatamente consistente	1.82
		1.80	1.20	9.19	Consistente	1.94
		4.00	2.20	14.25	Consistente	2.06
<i>DPM13</i> "Area 4"	8.40	1.10	1.10	14.88	Consistente	2.06
		3.90	2.80	10.98	Consistente	1.99
		6.40	2.50	18.69	Molto consistente	2.09
		7.80	1.40	20.39	Molto consistente	2.10
		8.40	0.60	33.35	Estremamente consistente	2.23
<i>DPM14</i> "Area 5"	3.60	1.00	1.00	8.29	Consistente	1.91
		2.10	1.10	9.69	Consistente	1.96
		3.60	1.50	6.85	Moderatamente consistente	1.85

ID DPM	Profondità indagata (m dal p.c.)	Profondità letto strato (m)	Spessore strato (m)	N <sub>SPT</sub>	Classificazione AGI	Peso unità di volume (t/m <sup>3</sup> )
DPM15 "Area 5"	6.70	1.40	1.40	11.14	Consistente	2.00
		3.60	2.20	5.40	Moderatamente consistente	1.78
		4.70	1.10	8.37	Consistente	1.91
		5.00	0.30	21.82	Molto consistente	2.11
		5.70	0.70	9.46	Consistente	1.95
		6.60	0.90	15.14	Molto consistente	2.07
		6.70	0.10	22.07	Molto consistente	2.11
DPM16 "Area 5"	0.90	0.90	0.90	10.82	Consistente	1.99
DPM17 "Area 6"	10.00	0.40	0.40	6.66	Moderatamente consistente	1.84
		3.00	2.60	4.33	Moderatamente consistente	1.72
		5.00	2.00	7.23	Moderatamente consistente	1.87
		7.00	2.00	9.66	Consistente	1.96
		7.50	0.50	13.09	Consistente	2.04
		7.80	0.30	10.65	Consistente	1.99
		8.60	0.80	13.79	Consistente	2.05
		10.00	1.40	17.12	Molto consistente	2.09
DPM18 "Area 6"	4.60	0.50	0.50	3.04	<b>Poco consistente</b>	1.64
		2.30	1.80	5.84	Moderatamente consistente	1.80
		3.60	1.30	7.61	Moderatamente consistente	1.88
		4.60	1.00	10.73	Consistente	1.99
DPM19 "Area 6"	7.40	1.70	1.70	3.94	<b>Poco consistente</b>	1.70
		2.80	1.10	3.53	<b>Poco consistente</b>	1.67
		4.20	1.40	6.85	Moderatamente consistente	1.85
		7.40	3.20	20.86	Molto consistente	2.10
DPM20 "Area 6"	10.00	0.80	0.80	8.08	Consistente	1.90
		5.10	4.30	3.40	<b>Poco consistente</b>	1.66
		10.00	4.90	9.95	Consistente	1.97
DPM21 "Area 6"	3.00	1.10	1.10	9.76	Consistente	1.96
		1.70	0.60	7.36	Moderatamente consistente	1.87
		2.10	0.40	15.41	Molto consistente	2.07
		2.40	0.30	20.30	Molto consistente	2.10
		3.00	0.60	32.59	Estremamente consistente	2.21
DPM22 "Area 7"	4.90	0.90	0.90	15.47	Molto consistente	2.07
		2.20	1.30	12.00	Consistente	2.02
		3.50	1.30	18.15	Molto consistente	2.09
		4.50	1.00	21.61	Molto consistente	2.11
		4.90	0.40	32.53	Estremamente consistente	2.21

ID DPM	Profondità indagata (m dal p.c.)	Profondità letto strato (m)	Spessore strato (m)	N <sub>SPT</sub>	Classificazione AGI	Peso unità di volume (t/m <sup>3</sup> )
<b>DPM23</b> "Area 7"	<b>10.00</b>	0.60	0.60	9.00	Consistente	1.94
		2.40	1.80	6.38	Moderatamente consistente	1.83
		4.90	2.50	8.16	Consistente	1.91
		5.60	0.70	6.09	Moderatamente consistente	1.82
		7.80	2.20	9.38	Consistente	1.95
		10.00	2.20	15.36	Molto consistente	2.07
<b>DPM24</b> "Area 7"	<b>6.70</b>	1.90	1.90	11.73	Consistente	2.01
		3.30	1.40	6.52	Moderatamente consistente	1.84
		3.60	0.30	11.92	Consistente	2.02
		5.30	1.70	6.63	Moderatamente consistente	1.84
		5.90	0.60	14.46	Consistente	2.06
		6.70	0.80	27.78	Molto consistente	2.14
<b>DPM25</b> "Area 8"	<b>6.00</b>	1.80	1.80	8.84	Consistente	1.93
		3.70	1.90	3.61	<b>Poco consistente</b>	1.68
		5.20	1.50	14.61	Consistente	2.06
		6.00	0.80	31.39	Estremamente consistente	2.19
<b>DPM26</b> "Area 8"	<b>5.50</b>	1.50	1.50	3.94	Moderatamente consistente	1.71
		3.20	1.70	3.53	Consistente	1.95
		4.90	1.70	6.85	Molto consistente	2.12
		5.50	0.60	20.86	Estremamente consistente	2.36
<b>DPM27</b> "Area 8"	<b>6.10</b>	1.60	1.60	4.61	Moderatamente consistente	1.74
		3.90	2.30	3.07	<b>Poco consistente</b>	1.64
		4.10	0.20	10.27	Consistente	1.98
		5.60	1.50	8.93	Consistente	1.93
		6.10	0.50	23.59	Molto consistente	2.11

**Tabella 4.** Riepilogo dei risultati delle prove DPM.

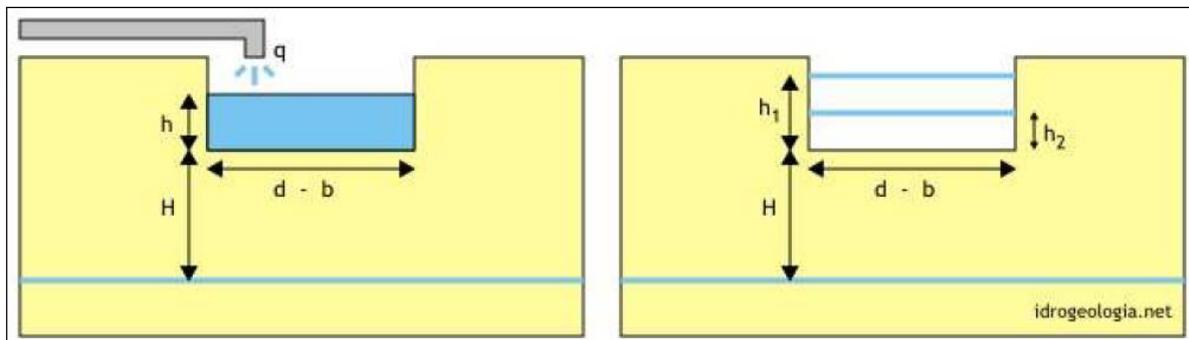
Dall'analisi dei risultati è emersa la presenza di alcuni strati "poco consistenti" nelle DPM 4, 5, 9, 18, 19, 20, 25 e 27. Lo spessore minimo si riscontra nella DPM18 (0.50 m) a partire dalla superficie topografica mentre, il massimo nella DPM20 (4.30 m) superato il primo strato avente spessore di 80 cm.

### 3. PROVE DI PERMEABILITÀ IN SITO

#### 3.1 Generalità

Le prove di permeabilità in sito (in pozzetti quadrati e/o circolari) consentono di determinare in modo molto semplice i tempi di infiltrazione delle acque nel terreno inizialmente insaturo ed in seguito il coefficiente di permeabilità del terreno saturo al di sopra del livello della falda idrica.

A seconda della modalità di esecuzione (di riempimento) si suddividono in prove a carico costante e a carico variabile (Fig. 11).



**Figura 11.** Schemi di funzionamento delle prove di permeabilità (a sx a carico costante).

Le prove a carico costante si eseguono riempiendo d'acqua il pozzetto e misurando la portata necessaria per mantenere costante il livello.

Le prove a carico variabile si eseguono misurando la velocità di abbassamento in funzione del tempo.

Le prove si ritengono eseguite in modo corretto quando si presentano le seguenti condizioni:

- il terreno deve essere saturato preventivamente in modo da stabilire un regime di flusso permanente;
- la profondità del pozzetto deve essere pari a circa 1/7 dell'altezza del fondo dal livello di falda;
- il diametro (o lato di base) del pozzetto deve essere almeno 10-15 volte il diametro massimo dei granuli del terreno.

#### Pozzetto circolare

Il coefficiente di permeabilità  $k$  viene calcolato con le seguenti equazioni:

a) Prove a carico costante

$$k = \frac{q}{\pi dh}$$

dove:

q = portata assorbita a livello costante;

h = altezza dell'acqua nel pozzetto ( $h > d/4$ );

d = diametro del pozzetto.

b) Prove a carico variabile

$$k = \frac{d(h_2 - h_1)}{32(t_2 - t_1)h_m}$$

dove:

$h_m$  = altezza media dell'acqua nel pozzetto ( $h_m > d/4$ );

$t_2 - t_1$  = intervallo di tempo;

$h_2 - h_1$  = variazione di livello dell'acqua nell'intervallo  $t_2 - t_1$ ;

d = diametro del pozzetto.

### **Pozzetto quadrato**

Il coefficiente di permeabilità k viene calcolato con le seguenti equazioni:

c) Prove a carico costante

$$k = \frac{q}{l^2 \left( 27 \frac{h}{b} + 3 \right)}$$

dove:

q = portata assorbita a livello costante;

h = altezza dell'acqua nel pozzetto ( $h > d/4$ );

b = lato della base del pozzetto.

d) Prove a carico variabile

$$k = \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} \frac{1 + \left( 2 \frac{h_m}{b} \right)}{\left( 27 \frac{h_m}{b} + 3 \right)}$$

dove:

$h_m$  = altezza media dell'acqua nel pozzetto ( $h_m > d/4$ );

$t_2 - t_1$  = intervallo di tempo;

$h_2 - h_1$  = variazione di livello dell'acqua nell'intervallo  $t_2 - t_1$ ;

$b$  = lato della base del pozzetto.

### 3.2 Modalità operative in sito

Le operazioni in campo eseguite, una volta individuate le aree di prova con superficie topografica ragionevolmente orizzontale, possono essere così riassunte:

1. realizzazione dei **pozzetti "quadrati"** aventi lati 30 x 30 cm circa e profondità 30 cm (Fig. 12);
2. riempimento degli stessi, fino all'orlo, con acqua portata sui luoghi con dei recipienti adatti;
3. annotazione, mediante l'utilizzo di un cronometro, dei tempi necessari per la saturazione del terreno fino al completo assorbimento del volume d'acqua immesso;
4. nuovo riempimento, in condizioni sature, al fine di stabilire un regime di flusso permanente (**prova a carico variabile**);
5. annotazione dei tempi di assorbimento e dei relativi abbassamenti del battente idraulico.

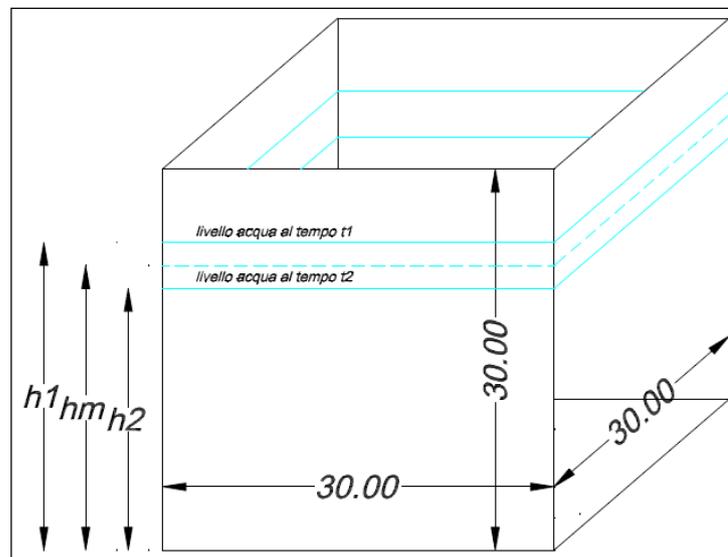


Figura 12. Schema pozzetto di misura.

Con i dati ottenuti dalle prove in sito si sono potuti, mediante elaborazione con un apposito foglio di calcolo in Excel, costruire i grafici illustranti le **"curve tempi-abbassamenti in condizioni sature"** (Fig. 13) ed effettuare i calcoli dei relativi coefficienti di permeabilità per ogni sito di indagine.

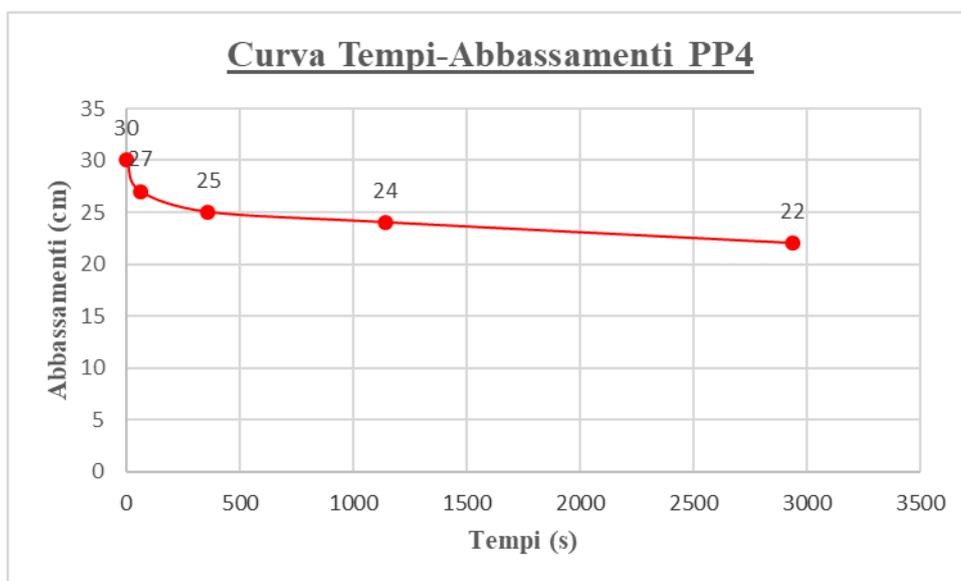
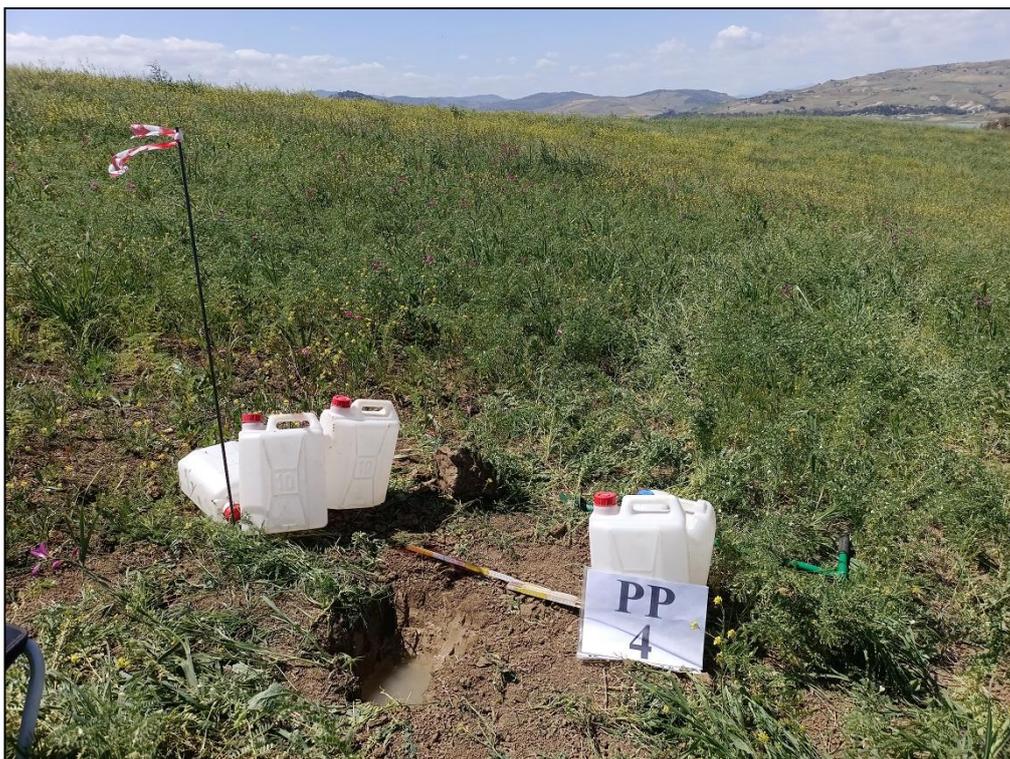


Figura 13. Pozzetto PP4 - "Area 6" e relativa curva "tempi-abbassamenti in condizioni sature".

### 3.3 Risultati

In totale sono state eseguite **n. 5 prove di permeabilità in sito a "carico variabile"** e di seguito si fornisce una tabella riepilogativa dei principali risultati ottenuti. I coefficienti di permeabilità calcolati mostrano, nel complesso, ordini di grandezza pari a  $10^{-6}$ , con dei tempi di saturazione vari (da 5 minuti in PP3 a 46 minuti in PP5).

In allegato alla presente (All. 02) si fornisce il dettaglio dei tempi e degli abbassamenti misurati in ogni pozzetto con i relativi grafici, i calcoli eseguiti per i coefficienti di permeabilità e la rispettiva documentazione fotografica a testimonianza dell'attività espletata.

<b>TABELLA RIASSUNTIVA DEI RISULTATI OTTENUTI</b>				
<b>ID Prova di permeabilità eseguita</b>	<b>Tempi di saturazione (sec)</b>	<b>Coefficiente di permeabilità k (cm/sec)</b>	<b>Profondità Raggiunta (m dal p.c.)</b>	<b>Litotipi interessati</b>
<i>PP1</i> "Area 1"	1.020	0,000445	0.30	Suolo agrario superficiale
<i>PP2</i> "Area 3"	480	0,000433		
<i>PP3</i> "Area 4"	300	0,000188		
<i>PP4</i> "Area 6"	420	0,000281		
<i>PP5</i> "Area 8"	2.760	0,000242		

**Tabella 5.** Coefficienti di permeabilità ottenuti.

## **4. PROSPEZIONI GEOELETTRICHE TOMOGRAFICHE (ERT)**

### **4.1 Generalità**

La tecnica "Tomografica" è un processo di calcolo che consente la ricostruzione per immagini di un mezzo da investigare. Si tratta di un processo di stima dei parametri del modello che meglio approssimano i dati osservati. Il calcolo dovrà condurre ad un modello finale, accettabile dal punto di vista fisico-matematico, quando lo scarto tra i dati osservati e quelli calcolati tende al minimo.

La "Tomografia Elettrica", il cui acronimo inglese è **ERT (Electrical Resistivity Tomography)**, consiste nella determinazione di profili o volumi di resistività e/o caricabilità attraverso la disposizione sul terreno di un numero elevato di elettrodi che progressivamente vengono spostati lungo una data direzione variandone la distanza inter-elettrodica al fine di aumentare la profondità d'investigazione. Il set di dati così ottenuto consente la costruzione di una matrice di valori di resistività la cui "inversione", mediante algoritmi matematici, restituisce la definizione del mezzo investigato in "immagini" di tipo elettro-resistivo.

Le indagini geoelettriche sono state eseguite dallo scrivente secondo i criteri della norma tecnica **ASTM D6431-99 (2005)**.

Lo scopo principale è stato quello di determinare un dettagliato andamento della distribuzione della resistività ( $\text{ohm}\cdot\text{m}$ ) nel sottosuolo delle aree di interesse. Le ubicazioni delle indagini sono fornite nell'allegato 1.

#### 4.2 Resistività delle rocce

Il metodo geoelettrico della resistività si basa sulla circolazione di corrente elettrica stazionaria (continua o a bassissima frequenza, affinché siano trascurabili i fenomeni di induzione) nel sottosuolo. I mezzi materiali, infatti, rispondono ad un flusso di corrente in maniera diversa, in base al valore che assume il parametro fisico della resistività. La resistività delle rocce, considerando che queste sono praticamente isolanti, dipende principalmente dalla presenza di **acqua** nei pori (acqua interstiziale), dalla temperatura, dal contenuto di gas disciolti nell'acqua, dalla presenza di ioni liberi e dalle discontinuità in genere. La quantità dei pori nella roccia è definita dalla *porosità* che è data dal rapporto tra il volume dei pori ed il volume totale dell'ammasso roccioso.

Macrofessure o cavità laddove l'unica presenza è l'aria hanno un comportamento elettrico nullo, cioè la resistività tende a valori altissimi (*infinito dal punto di vista teorico*).

La resistività di una roccia dipende ancora dalla *tessitura*, cioè dalla disposizione, forma e dimensioni dei granuli che la compongono, oltre che dai vuoti riempiti di acqua. Si precisa che le rocce ed i minerali non sono mezzi *isotropi* e cioè corpi materiali dove le grandezze fisiche si mantengono le stesse prescindendo dalla direzione, ma variano da leggermente a fortemente, quindi si possono considerare come mezzi *anisotropi*.

L'anisotropia delle rocce, relativamente alla resistività, è il risultato di una combinazione di differenti caratteristiche spaziali legate a *microfessurazioni*, *stratificazioni variabili*, *tessitura*, e *porosità*.

Quindi riepilogando la resistività elettrica, oltre che dalle proprietà elettriche intrinseche del materiale indagato, dipende principalmente dai seguenti fattori:

- ✓ porosità;
- ✓ la presenza di vuoti;
- ✓ l'eventuale grado di fratturazione;
- ✓ la presenza di acqua nei pori, e nelle discontinuità in genere, o di umidità e quindi il grado di saturazione;
- ✓ salinità del fluido presente nei pori;

- ✓ la densità, ovvero lo stato d'addensamento (specie in terreni alluvionali) della formazione;
- ✓ la granulometria;
- ✓ temperatura;
- ✓ presenza di sostanze organiche (idrocarburi, solventi, ecc.);
- ✓ presenza di argilla.

La relazione empirica proposta da Archie, invece, è valida per suoli avente scarsa componente argillosa (sabbie, ghiaie):

$$\rho_s = \rho_f a \phi^{-n} S^{-m}$$

dove:

- $\rho_s$ : resistività ( $\Omega \cdot m$ ) del suolo parzialmente saturo di fluido;
- $\rho_f$ : resistività ( $W \cdot m$ ) del fluido presente nei pori;
- $S$ : frazione del volume di pori occupata dal fluido;
- $m$ : coefficiente di saturazione (solitamente assunto essere pari a 2 in caso di saturazione in acqua);
- $a$ : costante empirica, detta di Winsaur (tipico per sabbia: 0.62);
- $n$ : coefficiente empirico, detto di "tortuosità" (tipico per sabbia: 2.15);
- $\phi$ : porosità del suolo.

La resistività del fluido  $\rho_f$  è calcolabile, qualora si conoscano le concentrazioni di ioni in soluzione (ad es.  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ , ecc.), utilizzando la formula:

$$\rho_f = 0.0123 + 10 (3.562 - 0.955 \log_{10} C)$$

dove  $C$  è la somma delle concentrazioni (pesate da opportuni coefficienti ricavati sperimentalmente per ciascun ione) di tutti gli ioni presenti.

In geoelettrica si osserva il "flusso" delle cariche attraverso le rocce, trascurando le tendenze allo squilibrio elettrico. Il flusso di cariche è la corrente elettrica che scorre per convezione da un polo positivo (+) ad un altro negativo (-). Questa si misura in Ampere (A) e cioè la quantità che passa in un punto del circuito nell'unità di tempo (1 secondo). Ciò che determina il flusso è la differenza di potenziale (**d.d.p.**) e cioè la depressione elettrica tra due punti distanti. La d.d.p. si

misura in Volt (V). Nelle rocce il flusso di corrente è direttamente proporzionale alla differenza di potenziale (V). Il rapporto tra d.d.p. e corrente (I), a meno di un coefficiente geometrico (K), definisce la resistenza offerta da un corpo a farsi attraversare da cariche. Questo semplice rapporto, definito come *legge di Ohm*, introduce una terza grandezza: la *resistività elettrica* ( $\rho$ ).

$$\rho = K \frac{V}{I}$$

Vengono di seguito elencati in tabella 6 i "range" di resistività di alcune rocce, minerali e metalli.

<b>ROCCE – MINERALI - METALLI</b>	
<b>Rocce sedimentarie</b>	<b>Resistività (ohm*m)</b>
Calcare	100 – 5000
Argilla	1 – 100
Ghiaia	100 – 5000
Sabbia	100 – 10 <sup>3</sup>
Arenaria	100 -10 <sup>4</sup>
Marna	1 - 100
Quarzite	5000 – 10 <sup>5</sup>
<b>Rocce ignee e metamorfiche</b>	
Basalto	10 – 10 <sup>5</sup>
Granito	100- 10 <sup>5</sup>
Marmo	100 – 10 <sup>6</sup>
Scisto	10 – 10 <sup>4</sup>
Gabbro	10 <sup>3</sup> – 10 <sup>6</sup>
Ardesia	100 – 10 <sup>6</sup>
<b>Minerali e metalli</b>	
Pirite	0,0001 - 10
Argento	10 <sup>-7</sup>
Grafite	0,001 - 1
Quarzo	10 <sup>5</sup>
Salgemma	10 – 10 <sup>9</sup>
Bauxite	200 - 6000
Galena	0,01 - 200
<b>Acque</b>	
Di mare	< 0,2
Pura	100 – 10 <sup>3</sup>
Naturale	1 - 100
Con 20% di sale (NaCl)	0,001

**Tabella 6.** Valori della resistività per alcune rocce, minerali e metalli.

In realtà quella che viene calcolata è una resistività apparente ( $\rho_a$ ) ossia è un valore di resistività dovuto ai diversi contributi di tutto il sottosuolo che si sentiranno, in maniera più o meno forte, a seconda della distanza dal dispositivo di misura.

#### 4.3 Strumentazione ed acquisizione dati

La strumentazione utilizzata è costituita da un georesistivimetro multielettrodo digitale di ultima generazione (24 bit) modello X612-EM+ della M.A.E. (Fig. 14) avente le seguenti caratteristiche tecniche:

##### Corrente in uscita:

- ✓ Regolazione automatica (5 step);
- ✓ Intensità massima: 5 A a 50 V;
- ✓ Tensioni di uscita:  $\pm 50V$ ,  $\pm 100V$ ,  $\pm 250V$ ,  $\pm 500V$ ,  $\pm 800V$  (950V con generatore esterno opzionale);
- ✓ Potenza massima: 250W (600W con generatore esterno opzionale);
- ✓ Tempo di immissione: impostabile a partire da 0.25 sec. (visualizzazione grafica dell'onda impostata);
- ✓ Precisione della misura:  $\pm 0.2 \mu A$ ;
- ✓ Elettrodi gestibili: fino a 96.

##### Misura di potenziale:

- ✓ Misura simultanea su tutti i canali impostati;
- ✓ Auto range;
- ✓ Fondo scala massimo:  $\pm 25V$ ;
- ✓ Impedenza di ingresso: 150 M $\Omega$ ;
- ✓ Filtro frequenza di rete: 50 Hz;
- ✓ Protezione: superiore;
- ✓ Precisione della misura:  $\pm 1,5 \mu V$  nel range  $\pm 25V$ ;
- ✓ Riduzione del rumore: con media da 2 a 10 misure;
- ✓ Azzeramento automatico del potenziale spontaneo;
- ✓ Accuratezza della resistività misurata:  $\pm 0.5 \%$ .

L'acquisizione dei dati consiste nel generare corrente continua tramite elettrodi di corrente (poli d'immissione) e misurare la differenza di potenziale che si genera nei picchetti di misura M – N, secondo geometrie prefissate. Le procedure eseguite, in generale, per le operazioni d'acquisizione dati possono essere così riassunte:

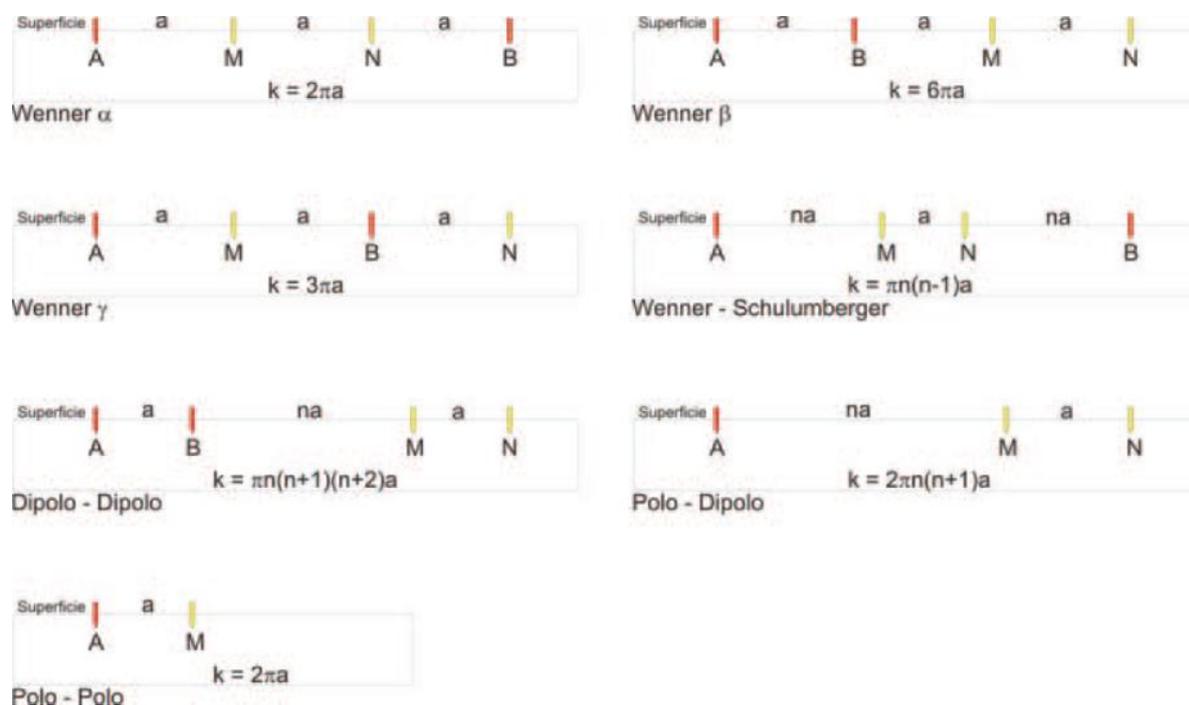
- ricerca preliminare dei sottoservizi prima dell'infissione degli elettrodi nel terreno;
- disposizione sul campo degli elettrodi lungo la geometria prefissata (configurazione geometrica utilizzata: **Wenner-Schlumberger**);
- controllo della resistenza di contatto elettrodo/terreno;
- controllo della continuità elettrica tra cavo ed elettrodi;
- riduzione della resistenza di contatto, fino ad un 1K ohm, mediante l'utilizzo di bentonite e di acqua con aggiunta di Sali;
- scelta delle tabelle di misura;
- misura dei potenziali spontanei;
- immissione della corrente secondo forma d'onda quadra ad intervalli di tempo regolari;
- misura ed archiviazione dati.



Figura 14. Georesistivimetro M.A.E. X612-EM+ (postazione ERT8 - "Area 8").

I dati archiviati sono in forma matriciale (per la configurazione geometrica di acquisizione prescelta sono state acquisite in totale 729 misure) e contengono informazioni sulle acquisizioni di campagna consentendone l'immediata elaborazione (Software ERTLlab e/o Res2DInv).

Il sistema di acquisizione consente una gestione automatica degli elettrodi, in grado cioè, di commutare gli elettrodi disposti lungo la sezione da investigare (geometria lineare) in elettrodi d'immissione (A e B) ed in elettrodi di ricezione (M ed N) con tutte le possibili combinazioni (configurazioni) quadripolari degli elettrodi (Fig. 15).

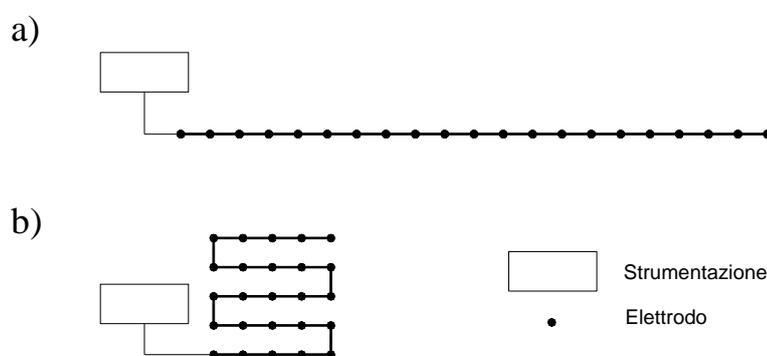


**Figura 15.** Dispositivi elettrodi lineari quadripolari di misura comunemente usati.

I vari metodi di prospezione elettrica differiscono, quindi, tra loro essenzialmente per la disposizione dei quattro elettrodi sul terreno e il diverso modo di spostarli da una misura alla successiva. La scelta del particolare metodo da impiegare in ciascun caso, sarà legata alla possibilità di mettere in massimo risalto le variazioni di resistività dovute ai corpi che si vogliono evidenziare.

I dispositivi più usati sono il Wenner, lo Schlumberger ed il Dipolo-dipolo (Fig. 15). I primi due dispositivi sono detti lineari, perché i quattro elettrodi si trovano tutti sulla stessa linea, mentre il terzo è, in generale, non lineare. Nel caso in esame è stato utilizzato il dispositivo geometrico "Wenner-Schlumberger", in quanto rappresenta il giusto compromesso per individuare sia cambiamenti verticali che orizzontali della resistività del sottosuolo investigato (combinazione tra i due dispositivi).

Negli ultimi decenni è stata sviluppata una nuova tecnica di indagine, in cui le misure di resistività sono fatte usando un sistema costituito da un gran numero di elettrodi. Questa tecnica, indicata con il nome di **tomografia geoelettrica**, risulta particolarmente adatta per investigazioni in aree di interesse geologico, minerario, idrogeologico, ingegneristico ed archeologico. La tomografia elettrica, può essere bidimensionale o tridimensionale, a seconda che la zona di interesse sia una sezione piana verticale del sottosuolo o un intero volume di terreno. Nel primo caso, gli elettrodi saranno disposti sul terreno tutti allineati ed equispaziati, mentre nel secondo caso, saranno disposti sempre sulla superficie del terreno, ma sui nodi di una griglia quadrata o con geometrie non convenzionali. In fig. 16 sono rappresentati i due modi in cui si possono disporre gli elettrodi.



**Figura 16.** Disposizione degli elettrodi sul terreno per indagini geoelettriche multielettrodiche 2D (a) e 3D (b).

Nel caso della multielettrodica, si lavora con una serie di elettrodi equispaziati collegati, per mezzo di un cavo multicanale, ad uno strumento in grado di gestire l'immissione di corrente e la misura della differenza di potenziale dai quattro elettrodi volta per volta interessati dalla misura (M.A.E. X612-EM+); da qui se ne deduce la grande innovazione nell'indagine geoelettrica apportata dalla multielettrodica: essa infatti non solo permette di raccogliere un gran numero di dati in poco tempo e a costi contenuti, ma anche di risolvere alcuni problemi, ad esempio quello della rappresentazione dei dati.

I vari dispositivi elettrodici, sono caratterizzati da una serie di parametri, dai quali dipenderà l'indagine. Sarà l'operatore a decidere, in base agli scopi dell'indagine, alle caratteristiche della regione interessata dalla misura, al tempo a disposizione e alla quantità di memoria disponibile sul computer, qual è quello più adatto alle misure, caso per caso.

Nello specifico **sono state eseguite n. 8 tomografie elettriche bidimensionali**, per uno sviluppo totale di 3.600,50 ml (n. 5 stendimenti da 475 ml, n. 2 da 399 ml e n. 1 da 427.5 ml), con lo scopo di ricostruire l'immagine bidimensionale geo-resistiva del sottosuolo delle aree di interesse.

I dati sono stati acquisiti utilizzando le configurazioni geometriche illustrate nella tabella 7.

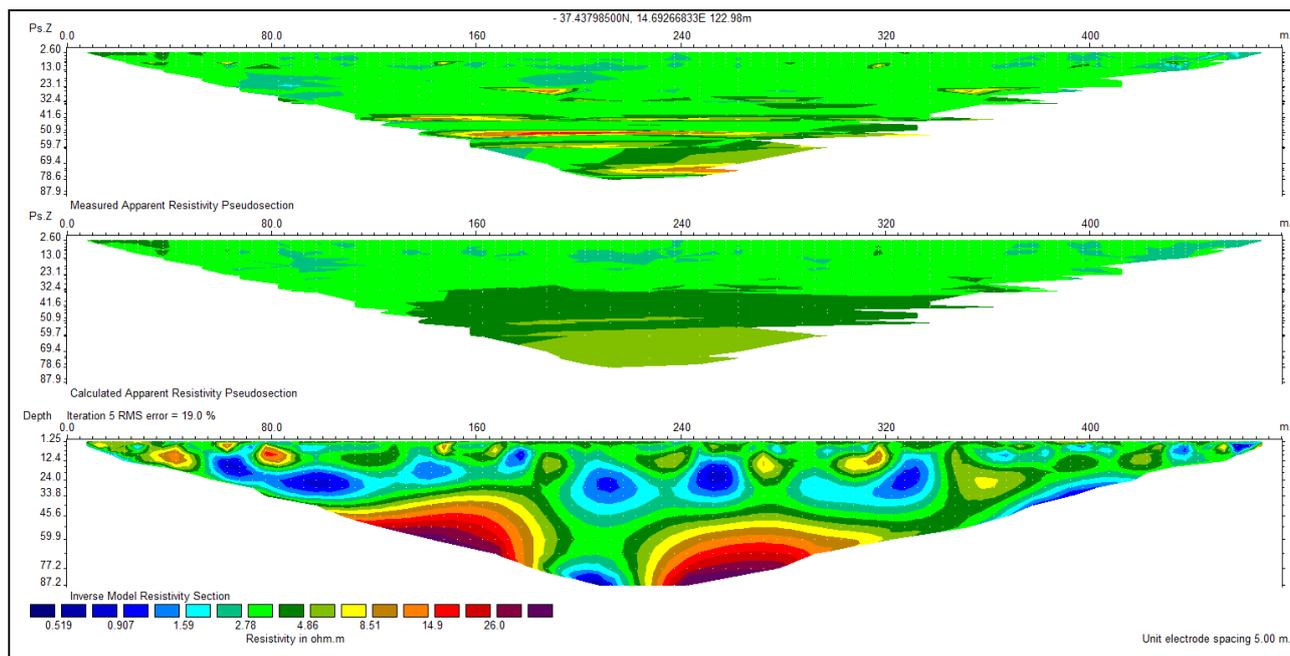
La strumentazione utilizzata per le misure (georesistivimetro M.A.E. X612-EM+) contiene assemblati sia il sistema energizzante che quello ricevente. Il sistema di ricezione è costituito da un millivoltmetro digitale, atto a misurare la tensione correlata al segnale di corrente inviato, mentre il trasmettitore, alimentato da batteria esterna, invia nel terreno un segnale di corrente regolare.

L'apparecchiatura procede ad una rimozione immediata del fattore di disturbo stazionario (generato da fenomeni di polarizzazione spontanea) tramite l'inversione della polarità del flusso di corrente continua nel sottosuolo, cioè grazie all'uso dell'onda quadra di corrente. Con la stessa strumentazione e geometria sono stati rilevati anche i potenziali spontanei.

ID	n° elettrodi	Interspazio elettrodico (m)	Dispositivo di misura	Lungh. compl. (m)	Grandezza fisica "misurata"
ERT1 "Area 1"	96	5.00	Wenner-Schlumberger	475.00	Resistività elettrica $\rho$
ERT2 "Area 2"	96	4.20	Wenner-Schlumberger	399.00	Resistività elettrica $\rho$
ERT3 "Area 3"	96	5.00	Wenner-Schlumberger	475.00	Resistività elettrica $\rho$
ERT4 "Area 4"	96	5.00	Wenner-Schlumberger	475.00	Resistività elettrica $\rho$
ERT5 "Area 5"	96	4.50	Wenner-Schlumberger	427.50	Resistività elettrica $\rho$
ERT6 "Area 6"	96	5.00	Wenner-Schlumberger	475.00	Resistività elettrica $\rho$
ERT7 "Area 7"	96	5.00	Wenner-Schlumberger	475.00	Resistività elettrica $\rho$
ERT8 "Area 8"	96	4.20	Wenner-Schlumberger	399.00	Resistività elettrica $\rho$

**Tabella 7.** Caratteristiche generali delle tomografie elettriche eseguite.

La pseudo-sezione di resistività fornisce un'immagine approssimativa ed immediata della distribuzione di resistività lungo la sezione verticale di sottosuolo sottesa al profilo di misura; può essere quindi considerata come un'immagine sfocata della configurazione elettrica del sottosuolo (Fig. 17).



**Figura 17.** Pseudo-sezione della resistività misurata e calcolata nella ERT4 - “Area 4”.

La tomografia geoelettrica vera e propria si ottiene mettendo a fuoco l’immagine di resistività apparente (Fig. 17) in modo da definire meglio le geometrie dei corpi sepolti. È possibile risolvere questo problema (cioè passare da una pseudo-sezione a una tomografia) applicando la tecnica d’inversione di Loke & Barker (1996).

La tecnica è essenzialmente un’ottimizzazione del “*metodo dei minimi quadrati*” in cui un modello di partenza viene iterativamente modificato finché la differenza tra questo e la pseudo-sezione sperimentale risulta ridotta al minimo. L’assunto di base della tecnica per la costruzione del modello è che nel sottosuolo ci sono tanti strati quanti sono i valori di resistività sulla curva sperimentale di  $\rho_a$ . La profondità media di ogni strato è uguale alla spaziatura elettrodica utilizzata per la misura di resistività moltiplicata per una costante il cui valore deve essere tale da ridurre al minimo la differenza tra la curva teorica (ricavata dal modello) e la curva sperimentale. Questa costante viene determinata utilizzando l’algoritmo del “*trial and error*”, ovvero calcolando la percentuale di scarto “*root mean squared*” (*r.m.s.*, *radice quadrata media*) tra i valori di  $\rho_a$  osservati ed i valori  $\rho_a$  calcolati nei punti considerati. Dopo ogni iterazione la curva modello di resistività apparente viene ricalcolata e confrontata con la curva di resistività apparente osservata.

Questa procedura viene ripetuta fino a quando la differenza *r.m.s.* tra le due curve è ridotta al minimo. Questa tecnica è stata estesa al caso bidimensionale da Barker (1992) e successivamente ampliata da Loke & Barker (1996). In questo caso il modello utilizzato è ottenuto suddividendo il sottosuolo in volumetti rettangolari ad ognuno dei quali corrisponde un valore di resistività

apparente misurato in campagna. La profondità media di ciascuno di questi elementi sarà funzione delle differenti spaziature elettrodeiche utilizzate (Tab. 8).

Da questo modello iniziale di sottosuolo si calcola una pseudo-sezione teorica di resistività apparente. Le differenze tra i valori di resistività apparente della pseudo-sezione teorica e della pseudo-sezione sperimentale vengono utilizzate per ricavare delle resistività quanto più vicine alla realtà per ognuno degli elementi del modello. L'intero processo è ripetuto iterativamente fino a quando la differenza *r.m.s.* raggiunge un valore minimo fissato dall'operatore. Non sempre, però, al più basso valore *r.m.s.* possibile, corrisponde il modello geologico di sottosuolo più vicino alla realtà. A volte, infatti, si possono ottenere variazioni poco realistiche nei valori di resistività del modello. Pertanto, l'approccio più corretto è quello di scegliere il modello di sottosuolo corrispondente all'iterazione dopo la quale l'errore *r.m.s.* non cambia significativamente.

DISPOSITIVI ELETTRODICI		$z_{med/a}$	$z_{med/L}$
Wenner Alfa		0,519	0,173
Wenner Beta		0,416	0,139
Wenner Gamma		0,594	0,198
Dipolo-dipolo	n = 1	0,416	0,139
	n = 2	0,697	0,174
	n = 3	0,962	0,192
	n = 4	1,22	0,203
	n = 5	1,476	0,211
	n = 6	1,73	0,216
Wenner-Schlumberger	n = 1	0,52	0,173
	n = 2	0,93	0,186
	n = 3	1,32	0,189
	n = 4	1,71	0,19
	n = 5	2,09	0,19
	n = 6	2,48	0,19
Polo-dipolo	n = 1	0,52	
	n = 2	0,93	
	n = 3	1,32	
	n = 4	1,71	
	n = 5	2,09	
	n = 6	2,48	
Polo-polo		0,867	

**Tabella 8.** Profondità di investigazione dei vari dispositivi elettrodeici (Loke, 2001); (L: lunghezza dello stendimento elettrodeico; a: distanza interelettrodeica; z: profondità di indagine; n: numero di livelli nel sottosuolo).

#### **4.4 Risultati Tomografie Elettriche (ERT 2D)**

I risultati grafici delle tomografie elettriche eseguite, in termini di immagini elettriche del sottosuolo investigato sono riportati nel dettaglio nell'allegato 03.

Per ogni tomografia, sono state riportate tutte le caratteristiche dello stendimento (n° elettrodi, spaziatura, profondità di investigazione, risoluzione, ecc.) ed i relativi commenti sui risultati ottenuti oltre che la documentazione fotografica attestante l'avvenuta esecuzione.

Nello specifico, si illustrano le sezioni geoelettriche invertite con delle scale cromatiche sia in termini di resistività (ohm\*m) che logaritmiche (Log Resistivity ohm.m) per rappresentare ed evidenziare al meglio i contrasti misurati tra le formazioni litologiche presenti sulle aree di interesse.

Le sezioni geo-elettriche ottenute mostrano, nel loro complesso, come il sottosuolo sia caratterizzato da una discreta variazione latero-verticale degli elettrostrati che lo costituiscono sia in profondità che in superficie.

In particolare, i valori di resistività molto bassi misurati sono concordanti con i litotipi presenti nelle aree di indagine rappresentati prevalentemente da depositi limosi ed argillosi.

Nelle linee generali, le strutture elettriche dei sottosuoli investigati possono essere ricondotti a dei modelli di terreno costituiti da "*terreni conduttivi*", aventi valori di resistività minori di 10 ohm\*m riconducibili, probabilmente, ai depositi argillosi caratterizzanti il substrato delle aree di indagine, interrotti da sparsi "*nuclei e/o orizzonti relativamente più resistivi*" attribuibili ai depositi più limoso-sabbiosi e/o rocciosi.

## **5. RILIEVO PLANO-ALTIMETRICO GPS DELLE INDAGINI**

### **5.1 Generalità e metodologia**

Tralasciando la teoria che sta alla base di un rilievo topografico satellitare (GPS/GNSS), lo scopo prefissato è stato quello di materializzare dal punto di vista plano-altimetrico tutti i punti in cui sono state eseguite le indagini geotecniche e geofisiche: prove penetrometriche DPM30, prove di permeabilità e tutti gli elettrodi delle tomografie elettriche. È stata utilizzata la tecnica GPS cinematica in modalità RTK (Real Time Kinematic), con correzione differenziale in tempo reale tramite comunicazione via radio-modem dei ricevitori, permettendo così un rilievo senza la necessità di una mutua intervisibilità dei punti come invece richiesta nelle tecniche di rilievo tradizionale.

## 5.2 Strumentazione utilizzata

La strumentazione utilizzata per il rilievo è costituita da un ricevitore geodetico GPS/GNSS Stonex S8 Plus (Fig. 18), con relativa componentistica, allestito in configurazione Rover (su palina).

Le caratteristiche tecniche principali del sistema Rover utilizzato sono elencate nella tabella 9.

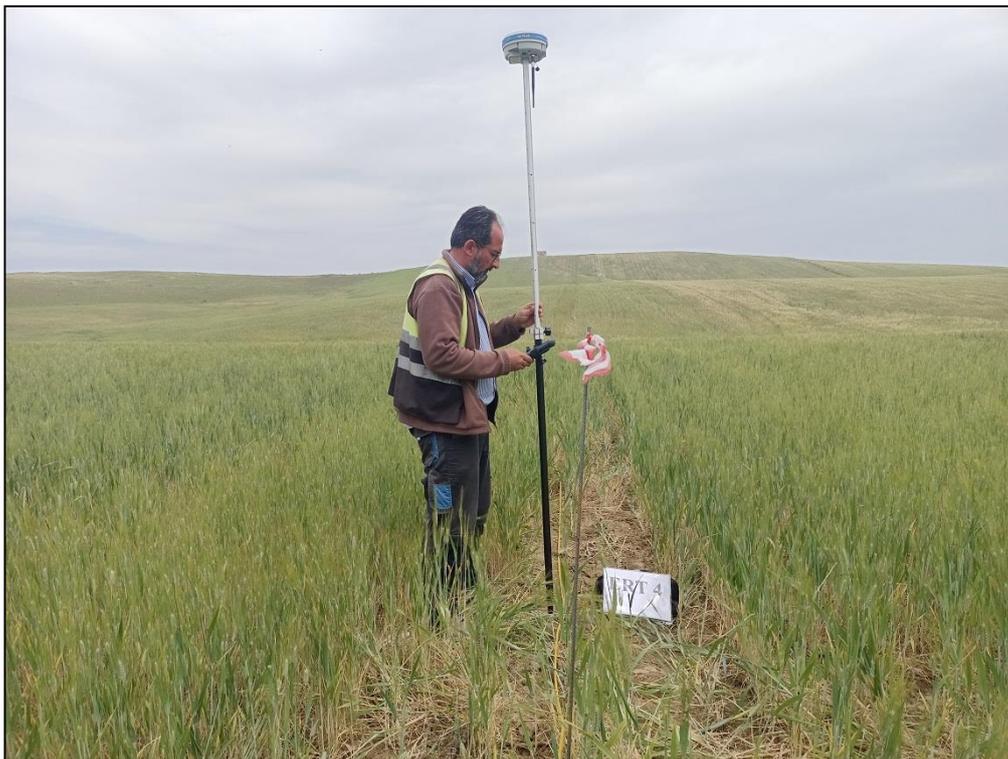


Figura 18. Sistema GPS/GNSS Stonex S8 Plus usato (durante il rilievo degli elettrodi ERT4 - Area 4).

RICEVITORE		POSIZIONAMENTO <sup>1</sup>		
Canali	120	RILIEVO STATICO (Osservazioni in tempo lunghi)		
Satelliti tracciati	GPS: Simultanei L1, L2, L2C, L5	Orizzontale	5 mm + 0,5 ppm RMS	
	GLONASS: Simultanei L1, L2	Verticale	10 mm + 0,5 ppm RMS	
	GALILEO: E5a, E5b, Alt-BOC	POSIZIONAMENTO CON CODICE DIFFERENZIALE		
	BeiDou: B1, B2	3D	0,25 m RMS	
	SBAS: Simultanei L1 C/A, L5	SBAS positioning	0,6 m 3D RMS <sup>2</sup>	
	QZSS(Quasi-Zenith Satellite System)	REAL TIME KINEMATIC (< 25 Km) – COLLEGAMENTO IN RETE <sup>3</sup>		
L-Band	Fixed RTK orizzontale	10 mm + 1 ppm RMS	Fixed RTK verticale	20 mm + 1 ppm RMS
Frequenza di aggiornamento	Fino a 5 Hz (frequenza maggiore opzionale)	COMMUNICAZIONE		
Riacquisizione segnale	< 1 secondi	Connessione I/O	Porte Lemo 7-pins e Lemo 5-pins. Uscita USB per collegamento a PC o palmare.	
Inizializzazione RTK	< 10 secondi	Bluetooth	2,4 GHz class II: fino a 50 m	
Acquisizione iniziale	< 35 secondi	Output di uscita	CMR, CMR+, RTCM 2.1, 2.3, 3.0, 3.1	
Affidabilità inizializzazione	> 99,9 %	Output di navigazione	Supporto NMEA-0183 con ASCII NovAtel e registrazione binaria.	
Memoria interna	256 MB	ANTENNA GNSS INTEGRATA		
Micro SD Card	Memoria Interna 4 GB (fino a 60 giorni di acquisizione in modalità statica continua con registrazione dati ogni secondo)	Antenna di alta precisione "microstrip", con tecnologia di abbattimento multipath in grado di tracciare le 4 Costellazioni		

Tabella 9. Caratteristiche tecniche della strumentazione usata.

### 5.3 Risultati del rilievo

Di seguito si riportano i risultati del rilievo eseguito in forma tabellare, mentre graficamente nell'allegato 01 "Ubicazione delle indagini eseguite", precisando che nella fase di misura si è posta particolare attenzione all'altezza e alla verticalità dell'antenna mediante l'ausilio della livella sferica solidale alla palina di supporto, al numero complessivo di satelliti disponibili ed ai valori dei parametri indicativi della qualità della geometria e dei segnali della costellazione satellitare e quindi della misura.

ID Prove Penetrometriche DPM	Coordinate Piane Assolute UTM WGS84 33 S		Quote Z (m.s.l.m.)
	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Piano Camp.
<i>DPM1</i>	4149686.153	476427.659	222.722
<i>DPM2</i>	4149421.439	476366.974	188.235
<i>DPM3</i>	4149197.533	476307.887	179.437
<i>DPM4</i>	4145470.504	477400.786	113.569
<i>DPM5</i>	4145287.284	477524.304	112.452
<i>DPM6</i>	4145291.922	478174.715	99.776
<i>DPM7</i>	4144989.327	478394.227	99.655
<i>DPM8</i>	4145655.689	478352.638	108.884
<i>DPM9</i>	4145388.881	478588.106	118.229
<i>DPM10</i>	4145444.406	478927.255	128.942
<i>DPM11</i>	4143474.837	472662.365	115.337
<i>DPM12</i>	4143499.841	472832.479	118.993
<i>DPM13</i>	4143524.070	473010.716	144.327
<i>DPM14</i>	4143036.102	472016.007	119.803
<i>DPM15</i>	4142875.874	472124.070	110.889
<i>DPM16</i>	4142844.549	471947.240	126.683
<i>DPM17</i>	4142996.340	462711.553	240.734
<i>DPM18</i>	4143022.489	462854.956	219.812
<i>DPM19</i>	4142742.943	462807.236	260.405
<i>DPM20</i>	4142815.923	462553.349	235.470
<i>DPM21</i>	4142630.908	462643.162	265.121
<i>DPM22</i>	4141811.588	461895.397	233.825
<i>DPM23</i>	4141716.115	461804.196	221.814
<i>DPM24</i>	4141546.604	461677.946	215.221
<i>DPM25</i>	4140864.535	460972.026	217.763
<i>DPM26</i>	4140743.448	460947.249	216.428
<i>DPM27</i>	4140639.921	460938.927	216.864

**Tabella 10.** Coordinate metriche rilevate delle prove penetrometriche DPM eseguite.

ID Prove di permeabilità	Coordinate Piane Assolute UTM WGS84 33 S		Quote Z (m.s.l.m.m.)
	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Piano Camp.
<b>PP1</b>	4149422.079	476380.857	188.242
<b>PP2</b>	4145396.872	478604.010	119.728
<b>PP3</b>	4143493.360	472841.410	119.640
<b>PP4</b>	4142743.695	462823.346	259.683
<b>PP5</b>	4140744.607	460955.577	216.299

**Tabella 11.** Coordinate metriche rilevate delle prove di permeabilità eseguite.

ID Indagini Elettriche (ERT 2D)		Coordinate Piane Assolute UTM WGS84 33 S		Quote Z (m.s.l.m.m.)
		Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Piano Camp.
<b>ERT1</b> "Area 1"	<b>E1</b>	4149196.870	476310.795	179.197
	<b>E96</b>	4149652.410	476429.537	222.768
<b>ERT2</b> "Area 2"	<b>E1</b>	4145546.345	477359.130	116.752
	<b>E96</b>	4145209.482	477570.128	113.854
<b>ERT3</b> "Area 3"	<b>E1</b>	4145484.517	478257.731	98.137
	<b>E96</b>	4145352.057	478711.301	123.838
<b>ERT4</b> "Area 4"	<b>E1</b>	4143465.422	472576.581	112.763
	<b>E96</b>	4143539.403	473041.894	142.677
<b>ERT5</b> "Area 5"	<b>E1</b>	4142835.166	472204.010	104.110
	<b>E96</b>	4143018.530	471821.069	135.522
<b>ERT6</b> "Area 6"	<b>E1</b>	4143067.000	462670.977	229.872
	<b>E96</b>	4142644.136	462879.437	265.786
<b>ERT7</b> "Area 7"	<b>E1</b>	4141514.852	461654.164	214.205
	<b>E96</b>	4141885.617	461946.253	245.662
<b>ERT8</b> "Area 8"	<b>E1</b>	4140858.891	461156.710	214.127
	<b>E96</b>	4140650.843	460817.065	218.863

**Tabella 12.** Coordinate metriche rilevate degli elettrodi iniziali e finali degli stendimenti geoelettrici eseguiti.

*Il sottoscritto rimane disponibile a qualsiasi chiarimento tecnico che abbia come oggetto la presente e/o per assistenza in cantiere durante eventuali fasi di accertamento.*

Tanto si doveva per l'espletamento dell'incarico affidatomi.

**Il Tecnico Geologo**

*Dott. Geol. Salvatore Alloro*  
(ORGS n. 3128 sez. A)

Lentini (SR), Maggio 2023



## ALLEGATI:

- ⇒ ALLEGATO 01: **PLANIMETRIE CON UBICAZIONE DELLE INDAGINI  
ESEGUITE IN VARIE SCALE;**
- ⇒ ALLEGATO 02: **STIMA DEI PARAMETRI GEOTECNICI OTTENUTI DALLE  
PROVE IN SITU E DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA;**
- ⇒ ALLEGATO 03: **RISULTATI TOMOGRAFIE ELETTRICHE (ERT 2D)  
E DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA.**