



Dottorato in Scienze della Terra - XX ciclo

CGT – Centro di GeoTecnologie – Università degli Studi di Siena

San Giovanni Valdarno

17 dicembre 2008

Caratterizzazione elettrica di depositi argillosi di origine glaciale, marina ed idrotermale attraverso indagini in situ ed in laboratorio

Tutor:

Chiar.^{mo} Prof. Luigi Carmignani

Co-Tutor:

Prof. Fabio Mantovani

Tesi di dottorato di:
Tommaso Colonna

Laboratorio di Geofisica



Università degli studi di Siena
via Vetri Vecchi, 34, 52027 San Giovanni Valdarno (AR)
www.geotecnologie.unisi.it
colonna3@unisi.it

SOMMARIO

- **Impostazione dei rilievi geoelettrici in situ nelle 3 aree test:**
 - *referimenti geografici*
 - *caratteri geologici*
 - *pianificazione delle indagini*
- **Risultati delle indagini geoelettriche in situ per i 3 depositi argillosi**
- **Analisi mineralogica e geotecnica dei depositi argillosi**
- **L'approccio sperimentale in laboratorio mediante il modello fisico ridotto:**
 - *distribuzione dei valori di resistività vs contenuto idrico*
 - *identificazione della "risposta elettrica" per i 3 depositi*
 - *risposta elettrica a diverse profondità*
 - *determinazione del contenuto idrico su diverse scale di indagine*
- **Conclusioni e prospettive**

RIFERIMENTI GEOGRAFICI

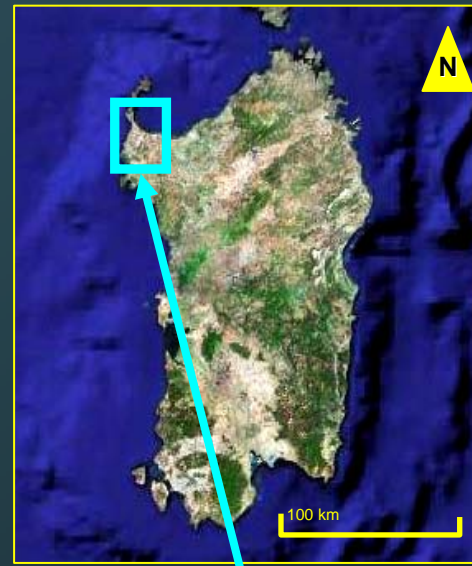
Depositi di origine glaciale



Brianza (MI)

✓ circa 40 Km
a Nord di
Milano

Depositi di origine marina



Nurra (SS)

✓ circa 4 Km a
Sud di Pozzo
S. Nicola (SS)

Depositi di origine idrotermale

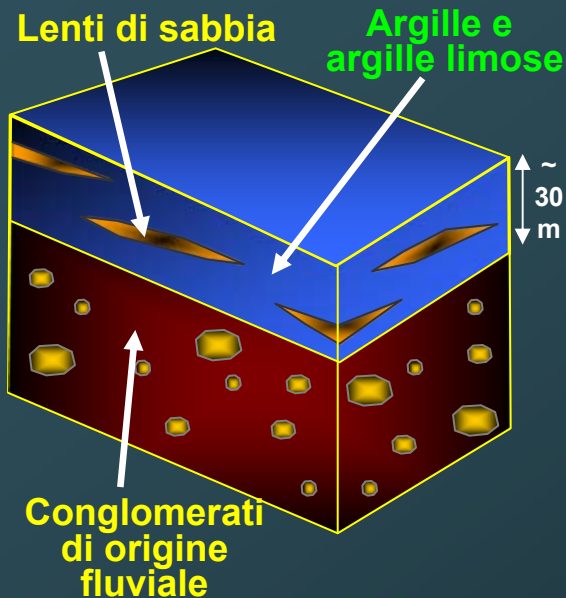


Gallura N-W (SS)

✓ circa 3 Km
a Nord-Est di
S. Maria la Palma

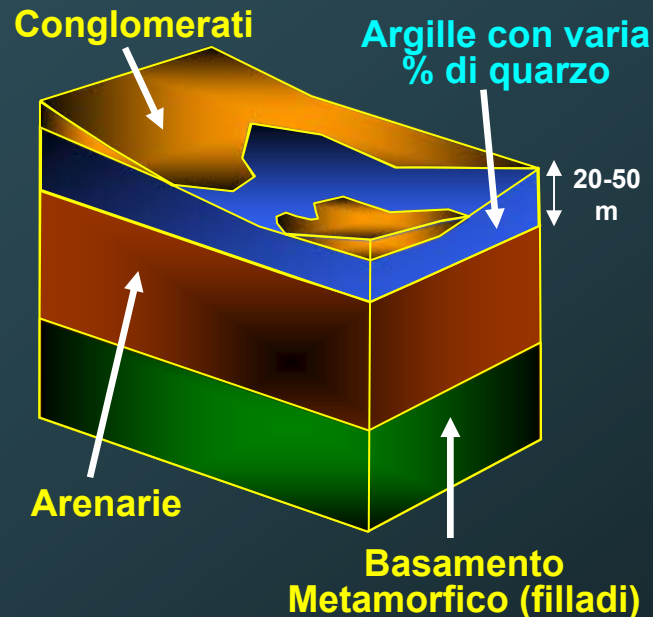
CARATTERI GEOLOGICI

Depositi di origine glaciale



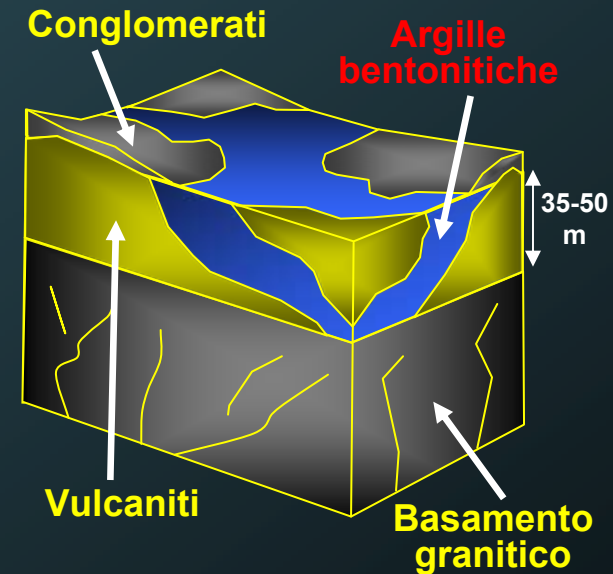
- ✓ tipiche colline "ferrettizzate"
- ✓ depositi glaciali molto eterogenei
- ✓ conglomerati di origine fluviale cementati in spessi banchi

Depositi di origine marina



- ✓ ritiro del mare (messiniano)
- ✓ morfologia erosiva riempita da sedimenti alluvionali
- ✓ paleosuoli di circa 10 m di spessore
- ✓ asportazione dei paleosuoli e formazione di argille per laterizi

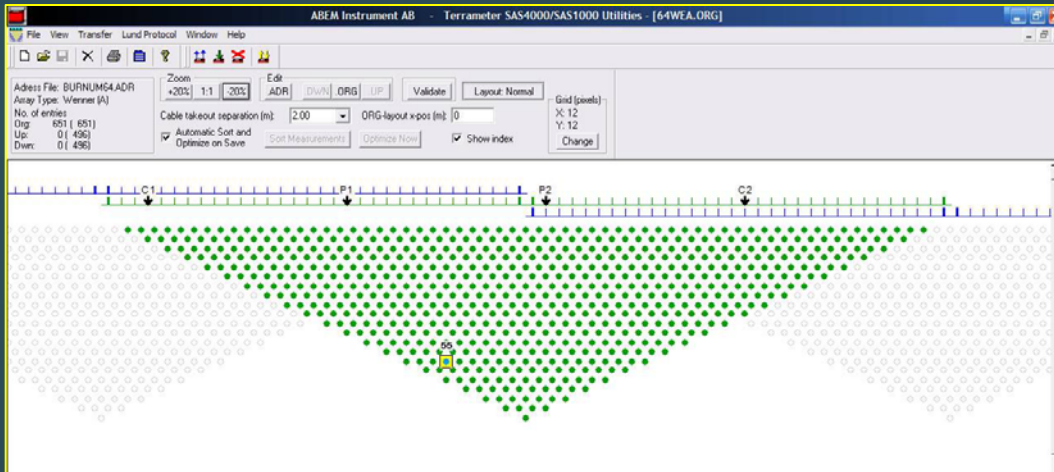
Depositi di origine idrotermale



- ✓ apertura di bacini (sistemi di faglie)
- ✓ deposizione di vulcaniti (miocene)
- ✓ chiusura da parte dei conglomerati
- ✓ processo di alterazione idrotermale (bentoniti)

TOMOGRAFIA ELETTRICA

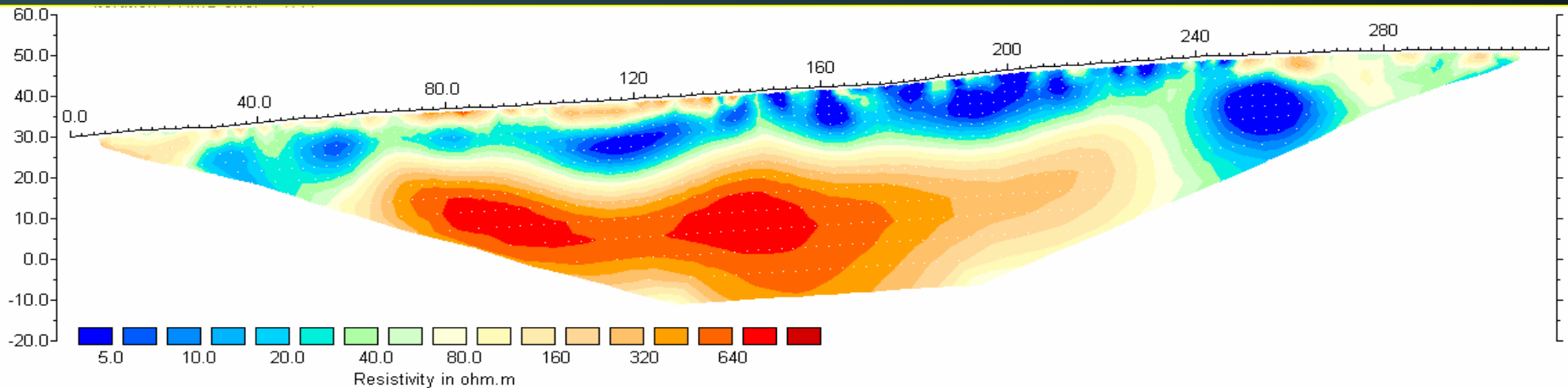
Il quadripolo



Il dispositivo di misura



Il modello di resistività elettrica



Unit Electrode Spacing = 2.50 m.

Horizontal scale is 8.50 pixels per unit spacing
 Vertical exaggeration in model section display = 1.00
 First electrode is located at 0.0 m.
 Last electrode is located at 315.0 m.

PIANIFICAZIONE DELL'INDAGINE

DEPOSITI
DI ORIGINE
GLACIALE

✓ presenza di numerosi
sondaggi esplorativi

Georesistivimetro ad elettrodi:

- ✓ **Rilievo 1** : 315 m – spaziatura 5 m
- ✓ **Rilievo 2** : 126 m – spaziatura 2 m
- ✓ **Rilievo 3** : 252 m – spaziatura 4 m
- ✓ **Rilievo 4** : 63 m – spaziatura 1 m

Georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo (OhmMapper):

Area 2

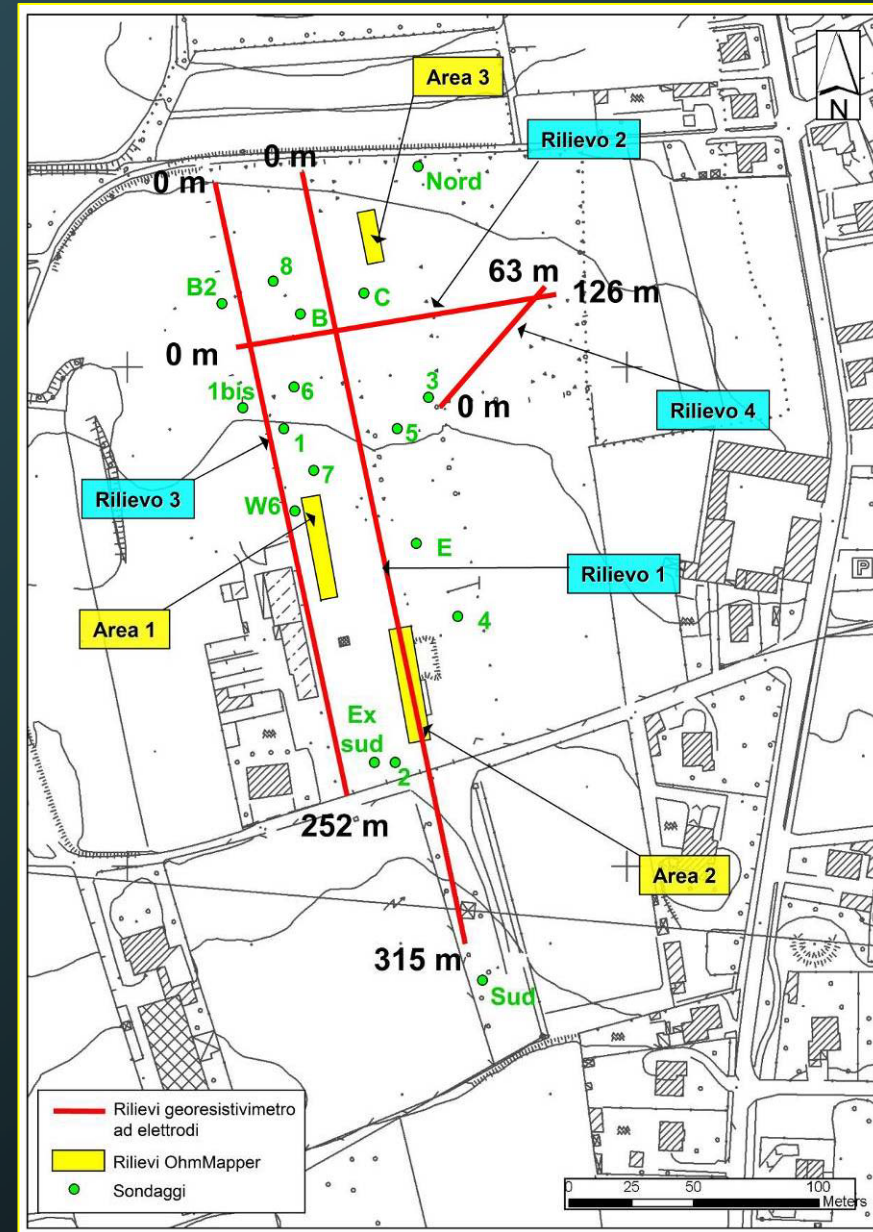
6 linee parallele: 45 m
spaziatura linee: 1,5 m
copertura totale: 337.5 m²

Area 1

5 linee parallele: 40 m
spaziatura linee: 1,5 m
copertura totale 240 m²

Area 3

4 linee parallele: 20 m
spaziatura linee: 2 m
copertura totale: 120 m²



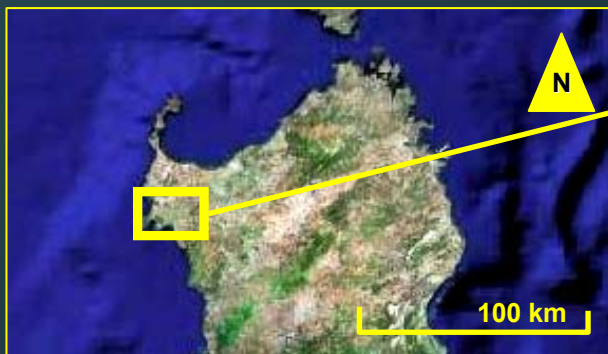
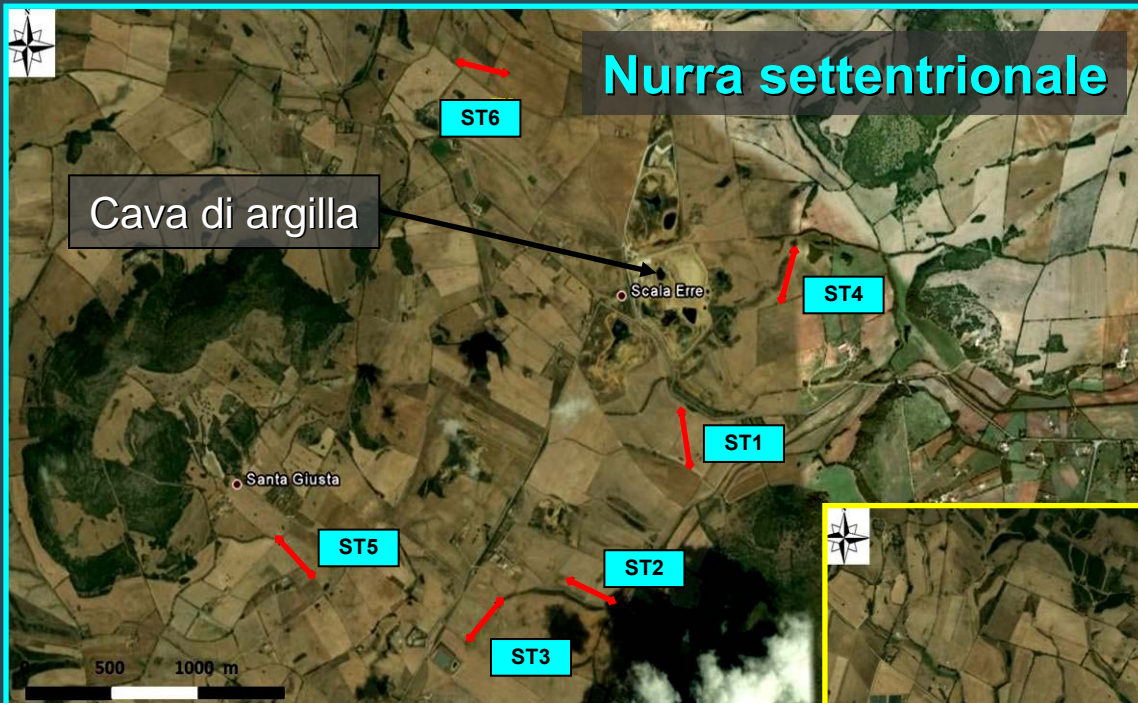
PIANIFICAZIONE DELL'INDAGINE

DEPOSITI
DI ORIGINE
MARINA

Georesistivimetro ad elettrodi
lunghezza variabile da 126 a 630 m

progettata in relazione a:

- ✓ *evidenze morfologiche*
- ✓ *evidenze minerarie*

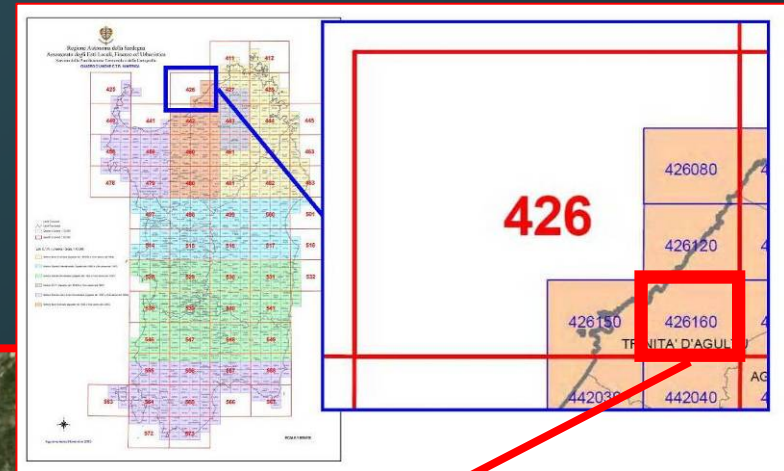


PIANIFICAZIONE DELL'INDAGINE

**DEPOSITI
DI ORIGINE
IDROTERMALE**

**Georesistivimetro ad elettrodi
progettata in relazione a:**

- ✓ **assetto tettonico**
- ✓ **evidenze minerarie**



Cava di bentonite
dismessa

Rilievo 1

Rilievo 3

Rilievo 2

Cava di bentonite

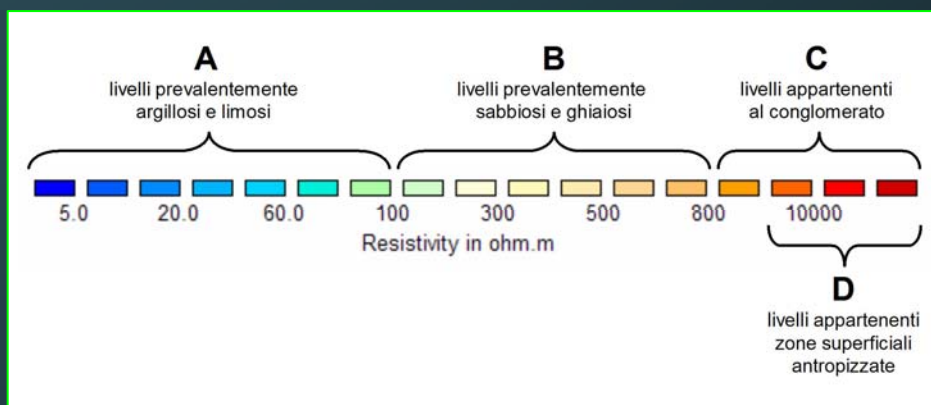
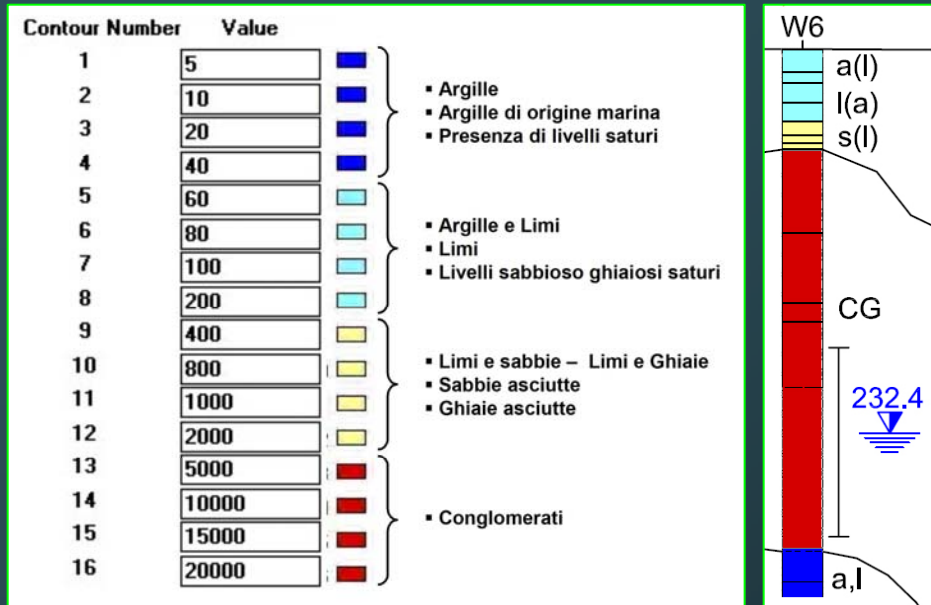
Cava di granito

0 500 1000 m

- ✓ **Rilievo 1** : 378 m
spaziatura el. 6 m
- ✓ **Rilievo 2** : 441 m
spaziatura el. 7 m
- ✓ **Rilievo 3** : 470 m
spaziatura el. 10 m

RESISTIVITÀ ELETTRICA: SCALA DI VALORI

DEPOSITI
DI ORIGINE
GLACIALE



Scala univoca di rappresentazione
Stratigrafie e Tomografie

Calibrazione dei risultati
con le stratigrafie

Interpretazione dei
modelli di resistività

Litologie	Range di resistività (Ωm)
Argille (acqua dolce)	10 – 120
Argille (acqua salata)	1-10
Sabbia (da bagnata a asciutta)	100 ÷ 1000
Limi	10-80

(Telford, W.M., 1990)

(Mussett A. E., Khan M. A., 2003)

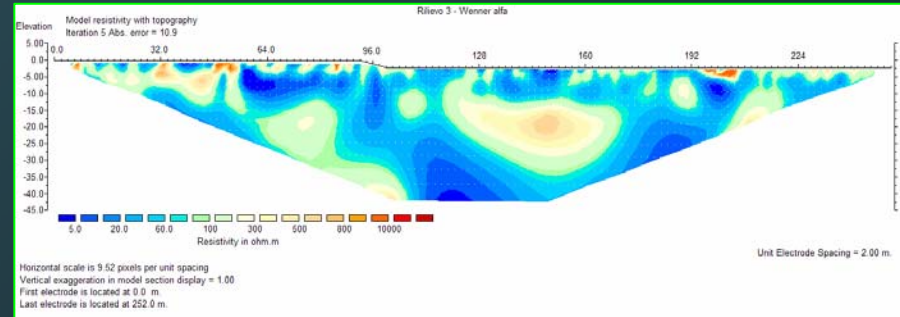
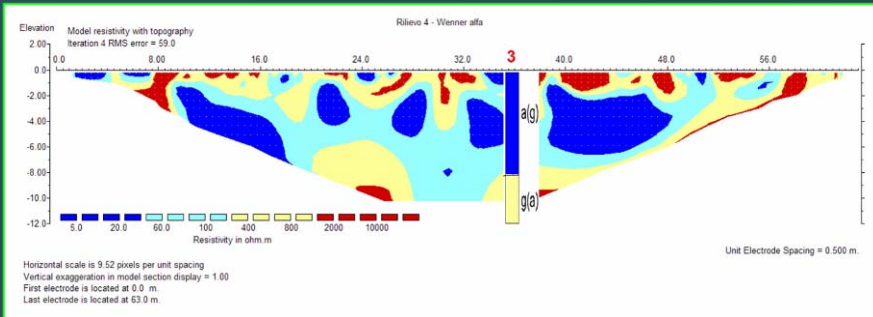
DEPOSITI
DI ORIGINE
GLACIALE

RISULTATI

Georesistivimetro ad elettrodi

Rilievo 4 – Confronto dati stratigrafici

Rilievo 3 – Interpretazione geologica

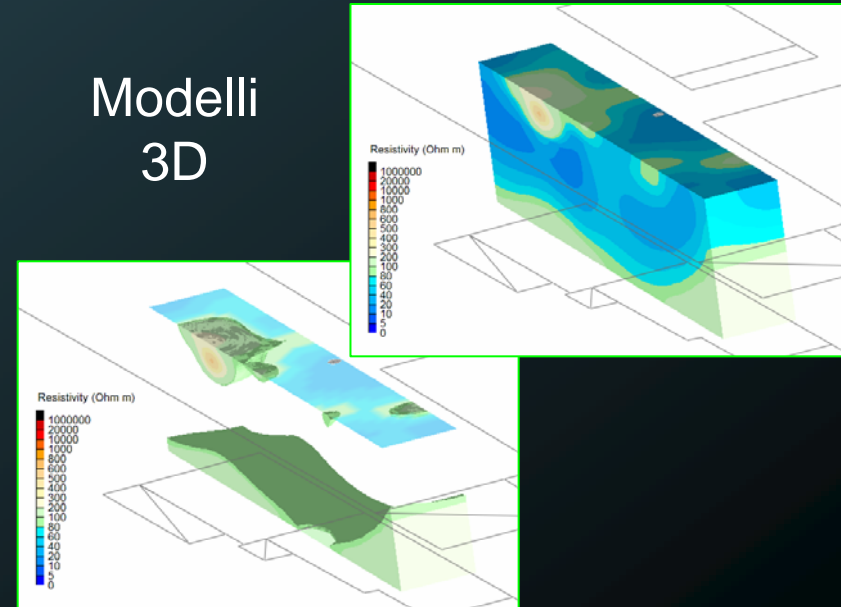
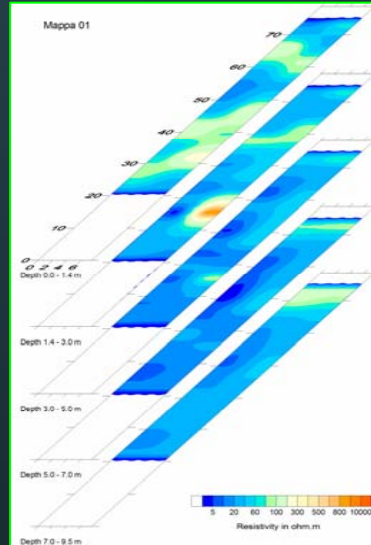
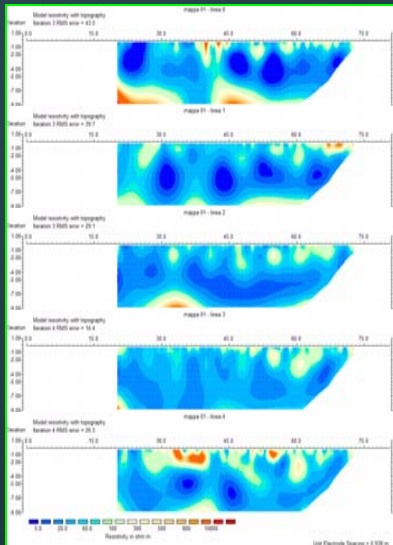


Georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo (OhmMapper)

Sezioni

Piante

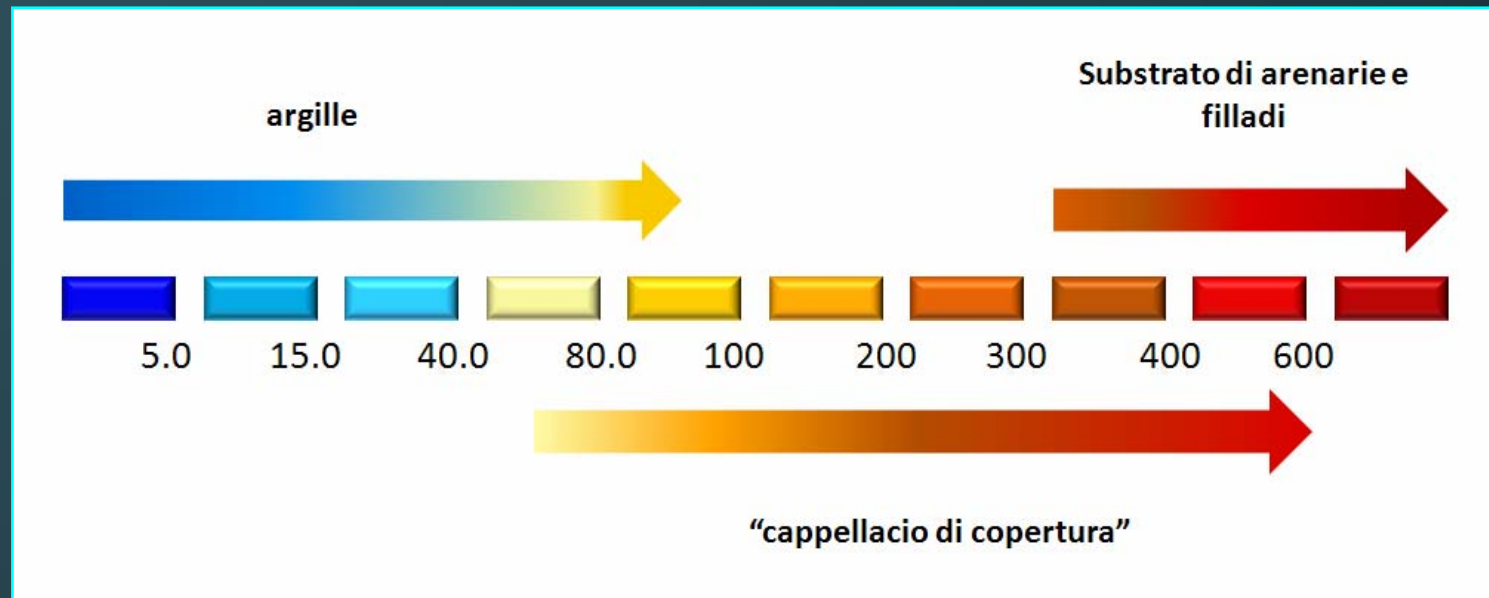
Modelli
3D



Area
1

DEPOSITI
DI ORIGINE
MARINA

RESISTIVITÀ ELETTRICA: SCALA DI VALORI



Litologie	Range di resistività (Ωm)
Arenarie	60 - 10^4
Argille (acqua dolce)	10 - 120
Argille (acqua salata)	1-10
Quarziti	$2 \cdot 10^4$ e oltre
Filladi	10 - 10^4

(Mussett A. E., Khan M. A., 2003)

DEPOSITI
DI ORIGINE
MARINA

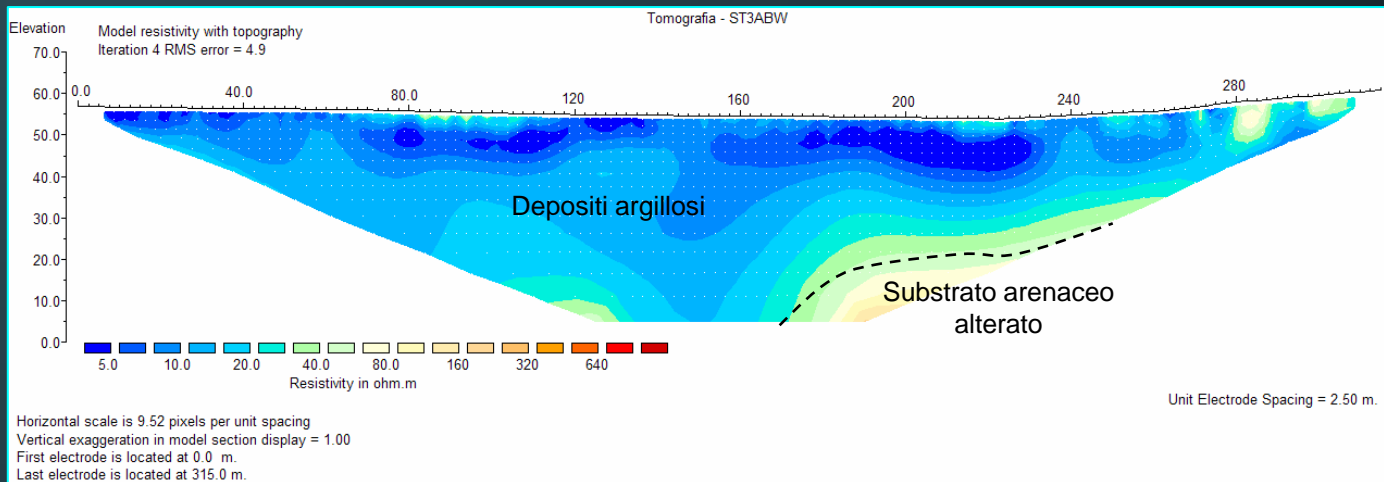
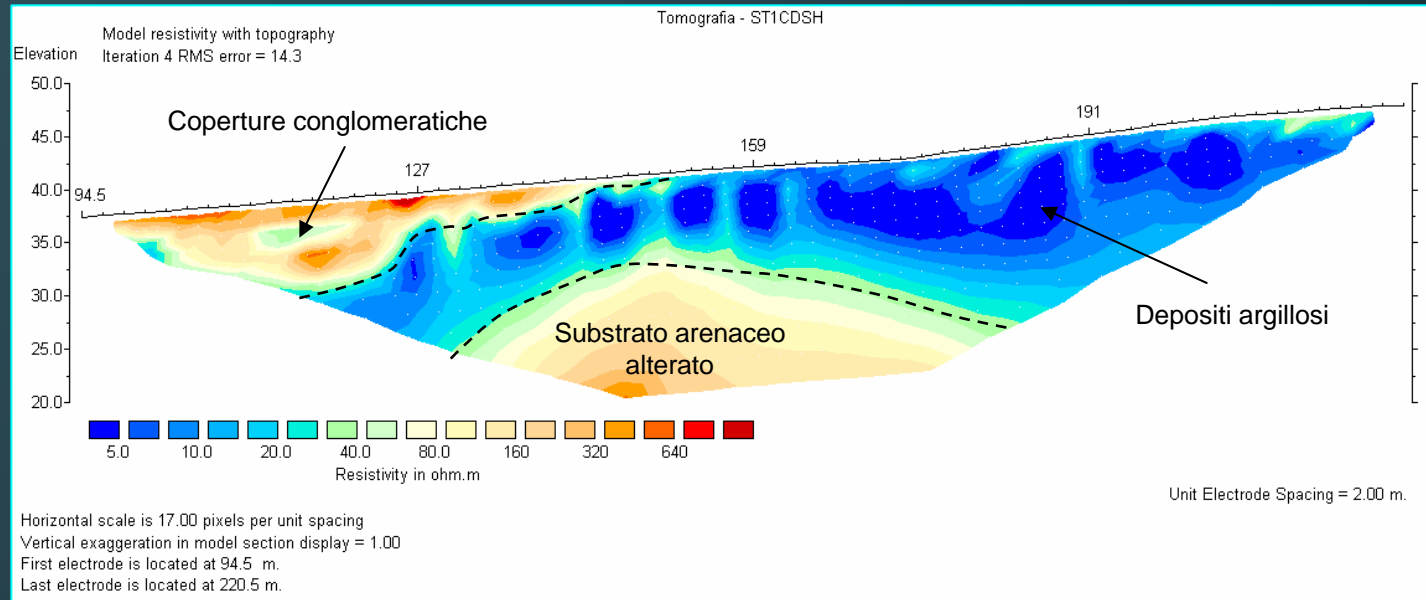
RISULTATI

Rilievo ST1CDW

Spaziatura: 2 m

Lunghezza: 126 m

Profondità: circa 25 m



Rilievo ST3ABW

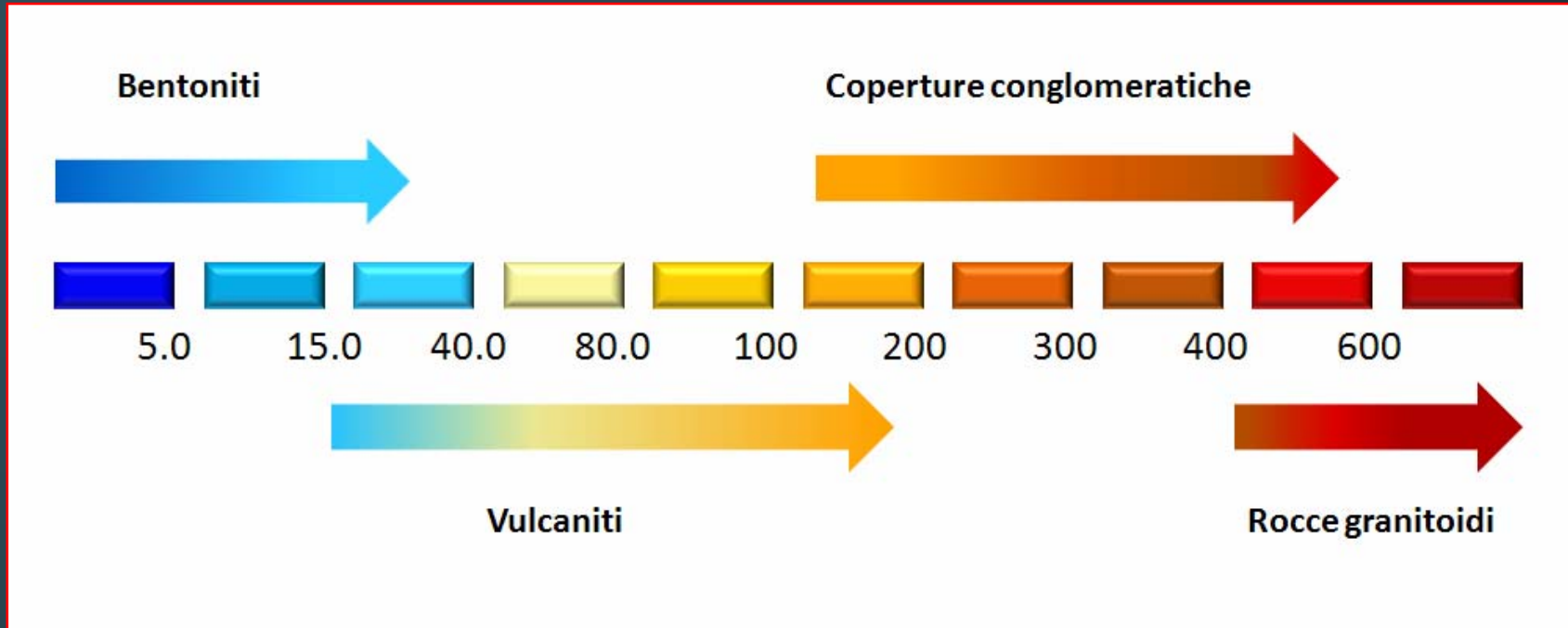
Spaziatura: 5 m

Lunghezza: 315 m

Profondità: circa 55 m

**DEPOSITI
DI ORIGINE
IDROTERMALE**

RESISTIVITÀ ELETTRICA: SCALA DI VALORI



Litologie	Range di resistività (Ωm)
Argille (acqua dolce)	10 – 120
Argille (acqua salata)	1-10
Graniti	300 – 10^4 e oltre
Quarziti	$2 \cdot 10^4$ e oltre

(Mussett A. E., Khan M. A., 2003)

**DEPOSITI
DI ORIGINE
IDROTERMALE**

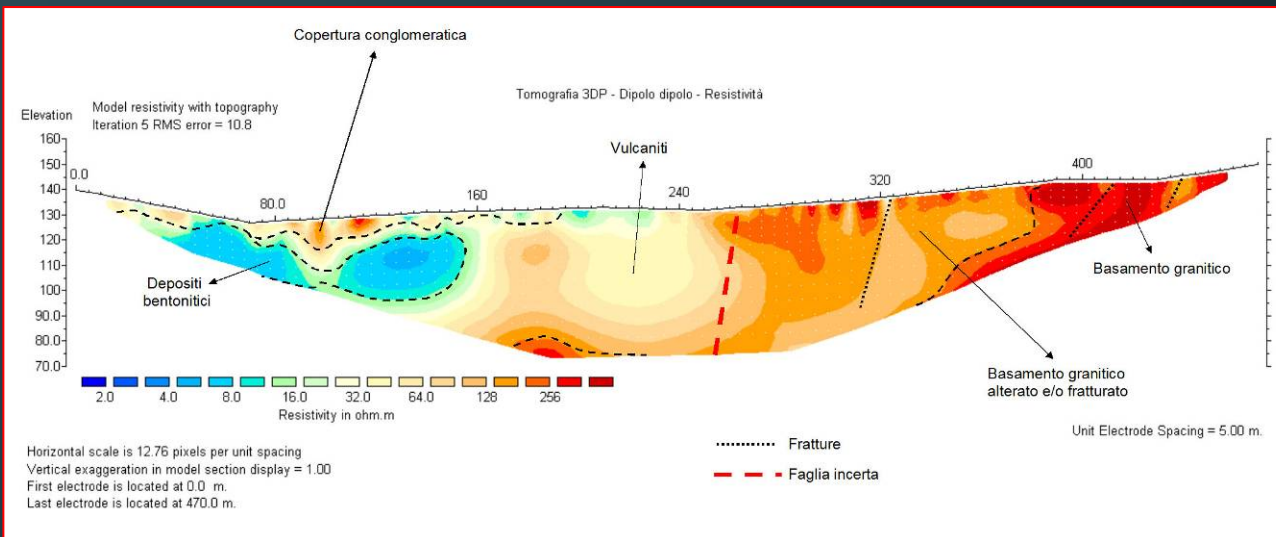
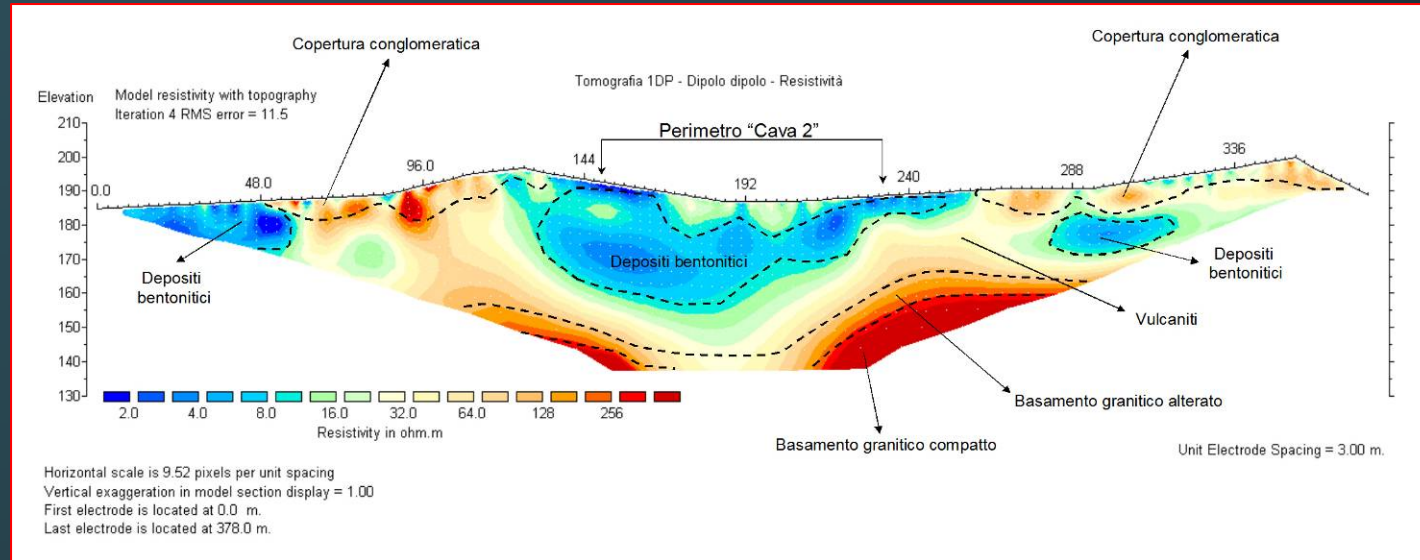
RISULTATI

Rilievo DP1

Spaziatura: 6 m

Lunghezza: 378 m

Profondità: circa 55m



Rilievo DP3

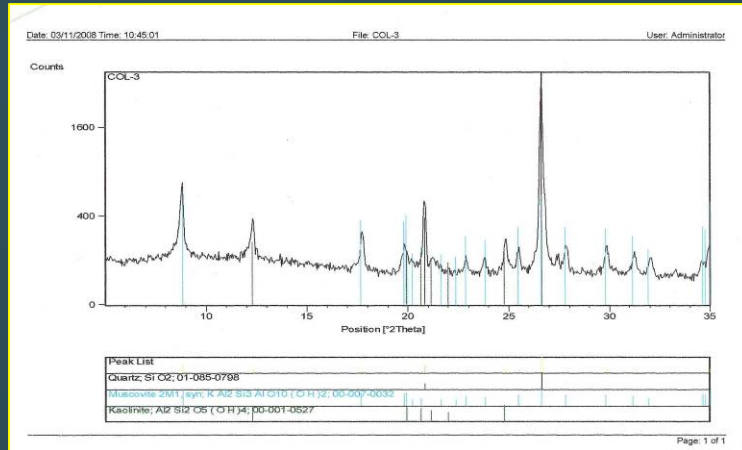
Spaziatura: 10m

Lunghezza: 470 m

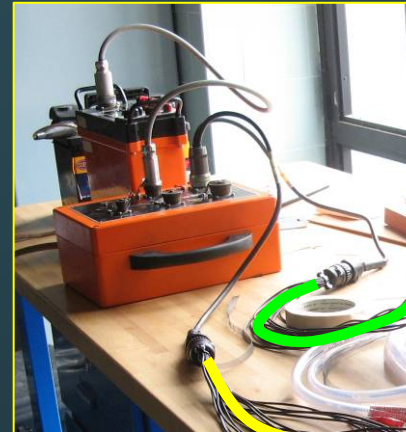
Profondità: circa 80 m

APPROCCIO IN LABORATORIO

Diffrazione a raggi X



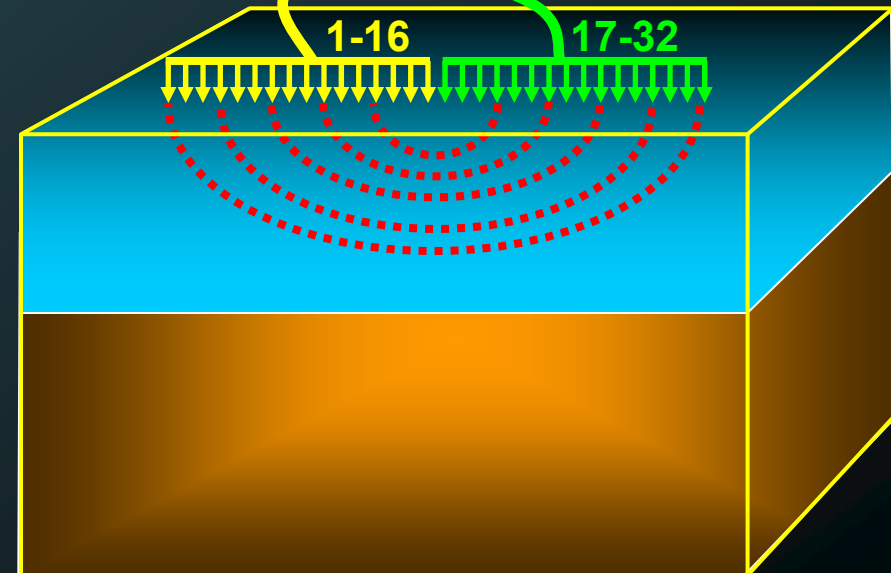
Prove di laboratorio su terre



Modello fisico ridotto



Sperimentazione di misure di resistività alla scala del campione



ANALISI MINERALOGICA

Depositi di origine glaciale

- ✓ **Quarzo** SiO_2
- ✓ **Clinoclorite**
 $\text{Mg}_3\text{Mn}_2\text{AlSi}_3\text{AlO}_{10}$
- ✓ **Muscovite**
 $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}$

Depositi di origine marina

- ✓ **Quarzo** SiO_2
- ✓ **Muscovite** $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}$
- ✓ **Caolinite** $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$

Depositi di origine idrotermale

Tosudite
(Montmorillonite)
 $\text{NaO}_3\text{Al}_6(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{10}$
 $4\text{H}_2\text{O}$

Valutazione ^[1]	CEC (meq/100g)
Bassa	< 10
Media	10-20
Alta	>20

Minerale	CEC (meq/100g)
Montmorillonite – Tosudite ^{[2] [3] [4]}	80-150
Clorite ^[4]	10-40
Caolinite ^{[3] [4]}	0-15

La diffrattometria a raggi X ha confermato i risultati attesi!

^[1] L.F. Goldberg; E. Arduino, La valutazione della fertilità in Chimica del suolo, Pàtron, p. 522

^[2] Elio Passaglia, Zeoliti zeolititi e loro applicazioni, pp. 9. Università di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Scienze della Terra.

^[3] S. Battaglia, L. Leoni; F. Sartori (2004). Determinazione della capacità di scambio cationico delle argille attraverso l'analisi in fluorescenza X di pastiglie di polvere Atti della Società Toscana Scienze Naturali, Memorie, Serie A 109; 103-113.

^[4] Belsito et al. Op. cit., p. 261.

PROVE DI LABORATORIO SU TERRE

Parametri alla condizione C_0	Depositi di origine glaciale	Depositi di origine marina	Depositi di origine idrotermale	Assunzioni
Densità	1.24 g/cm ³	1.21 g/cm ³	1.24 g/cm ³	✓ Assenza di evaporazione
Contenuto H ₂ O	3.9 %	4.7 %	18.2 %	✓ Assenza di perdite dalla base del modello
500 ml	8.4%	7.4%	25.6%	
750 ml	10.7%	8.7%	29.3%	✓ Deposito omogeneo
1000 ml	13.0%	10.1%	32.9%	
1250ml	15.2%	11.4%	36.7%	
1500ml	17.5%	12.8%	40.4%	
1750ml	19.8%	14.1%	44.0%	✓ Deposito isotropo
2000ml	22.1%	15.4%	47.7%	
2250ml	24.4%		51.4%	
2500ml	26.6%		55.1%	

PROVE DI LABORATORIO SU TERRE

Limiti
di
consistenza

Depositi
di origine
glaciale

Depositi
di origine
marina

Depositi di
origine
idrotermale

Limite liquido

36.8 %

31.1 %

74.7 %

Limite plastico

20.1 %

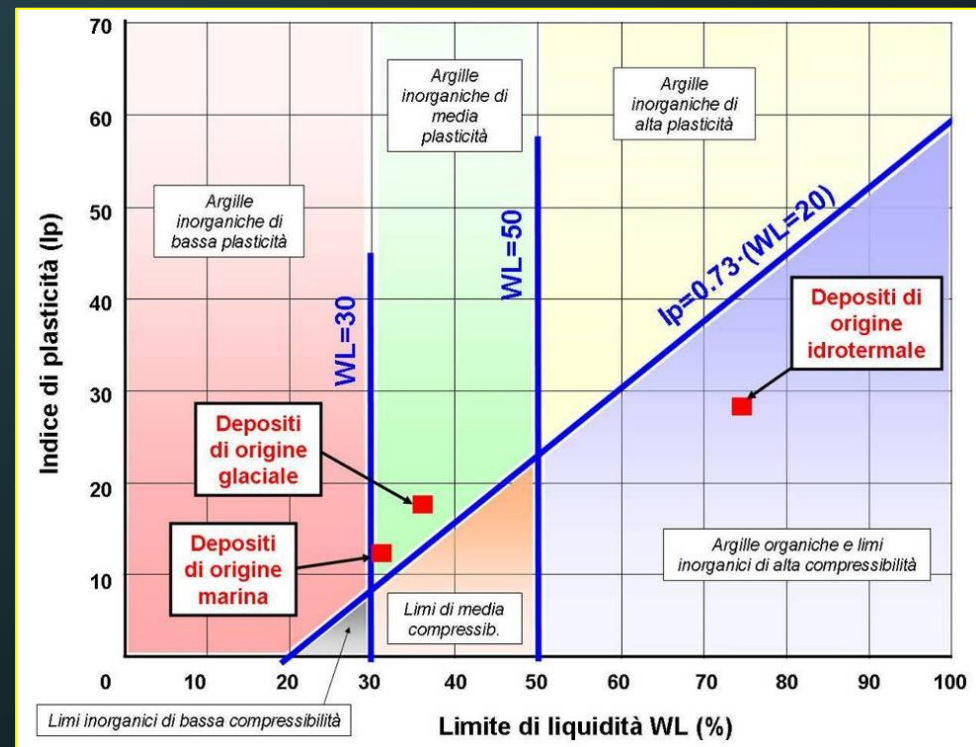
19.2 %

46.6 %

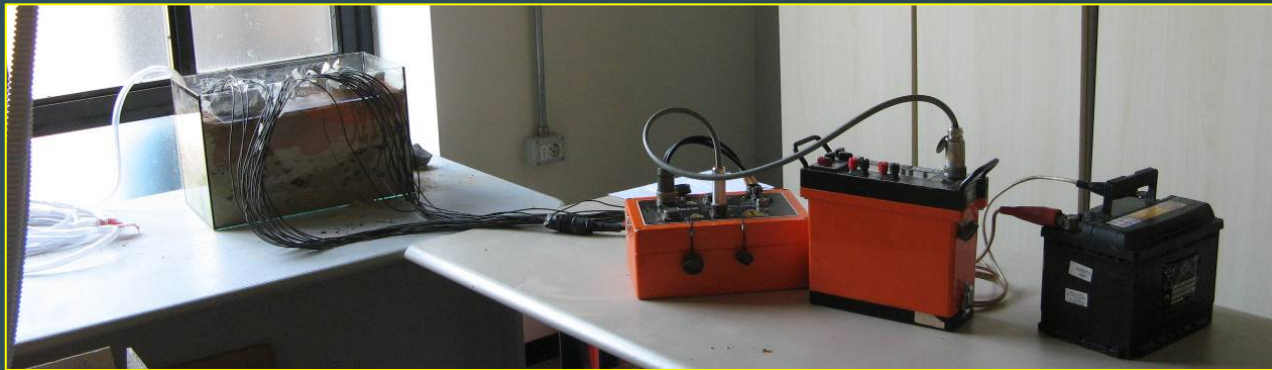
Origine del deposito	Ip Indice di plasticità	Ic Indice di consistenza
Glaciale	16.7	2.0
Marina	11.9	2.2
Idrotermale	28.1	2.0

Ip

- ✓ contenuto percentuale di minerali argillosi
- ✓ sensibilità alle variazioni di contenuto d'acqua



MODELLO FISICO RIDOTTO - PIANIFICAZIONE



Condizione C_0

Contenuto idrico

+
500 ml

+

750 ml

+

1000 ml

+

⋮

Dati tecnici rilevati MODELLO FISICO RIDOTTO	
lunghezza	31 cm
distanza interelettrodica	1 cm
numero elettrodi di misura	32
numero di letture	354
metodo di acquisizione	Dipolo-dipolo (n=2)
blocchi utilizzati per l'inversione	211
livelli del modello	11
punti utilizzati per l'inversione	354

✓ Distinguere la risposta elettrica dei 3 depositi

✓ Controllare ρ al variare del contenuto idrico per i 3 depositi

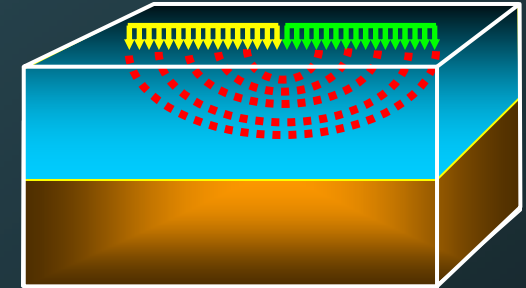
✓ Rapportare le evidenze geoelettriche dello studio ai risultati mineralogici e geotecnici

OBIETTIVO

Indagine in situ



Indagine in laboratorio



Depositi
di origine
glaciale

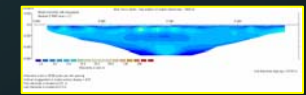
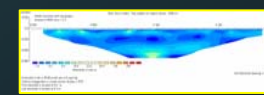
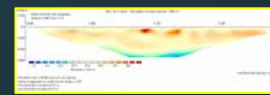
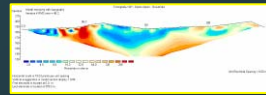
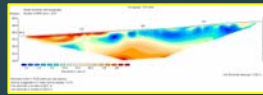
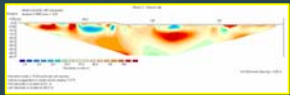
Depositi
di origine
marina

Depositi di
origine
idrotermale

Depositi
di origine
glaciale

Depositi
di origine
marina

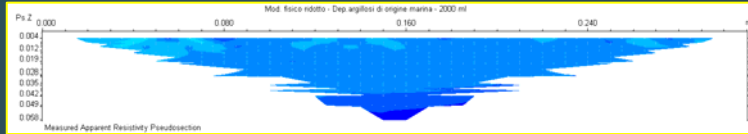
Depositi di
origine
idrotermale



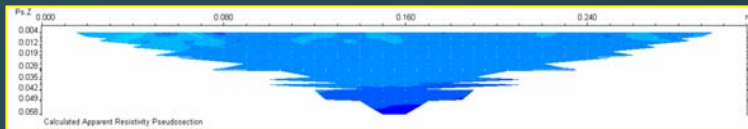
Le misure di resistività in laboratorio, confortate da misure diffrattometriche e fisico-meccaniche, permettono di caratterizzare meglio i depositi argillosi su scala di situ?

MISURE DI RESISTIVITÀ IN LABORATORIO: RISULTATI

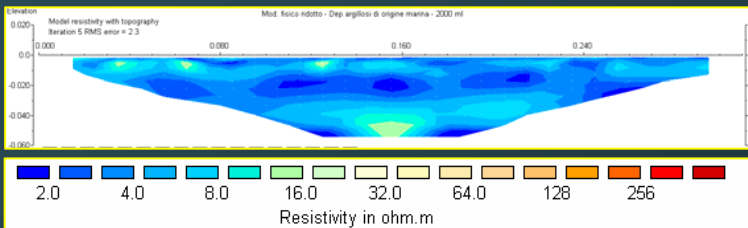
Pseudosezione
Resistività apparente misurata



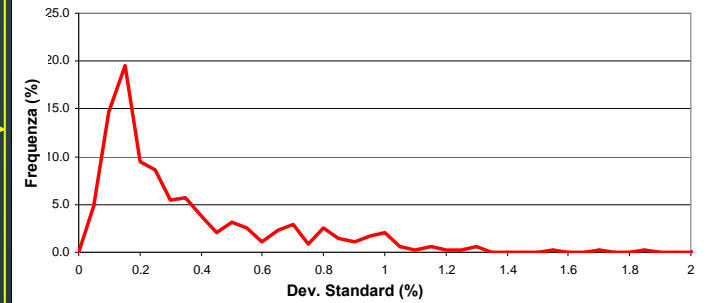
Pseudosezione
Resistività apparente calcolata



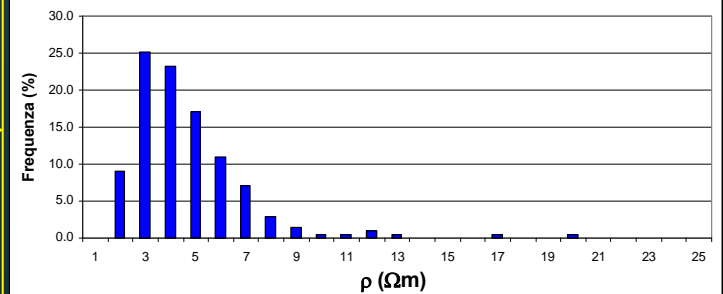
Modello di resistività



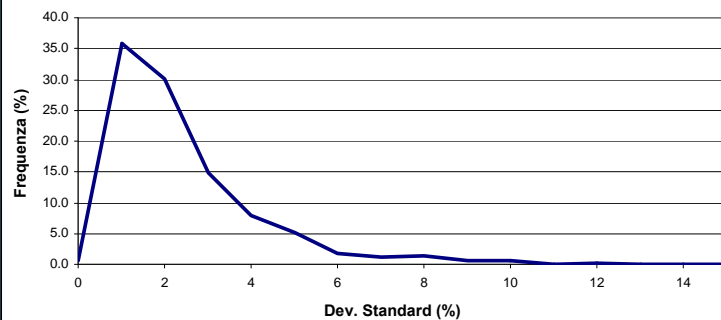
Frequenza incertezze strumentali



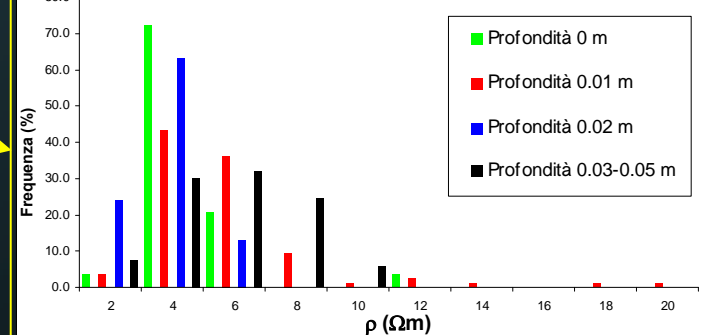
Distribuzione valori di resistività



Frequenza incertezze - inversione



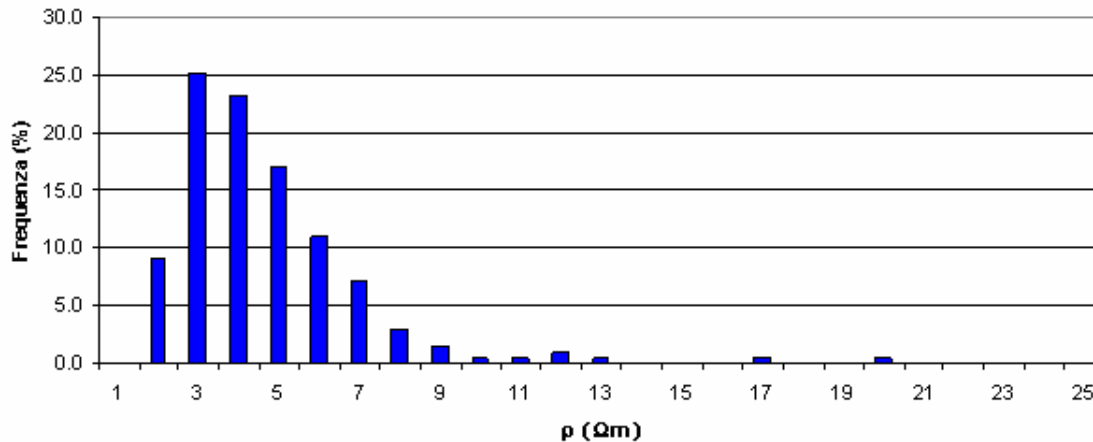
Distribuzione valori di resistività - profondità



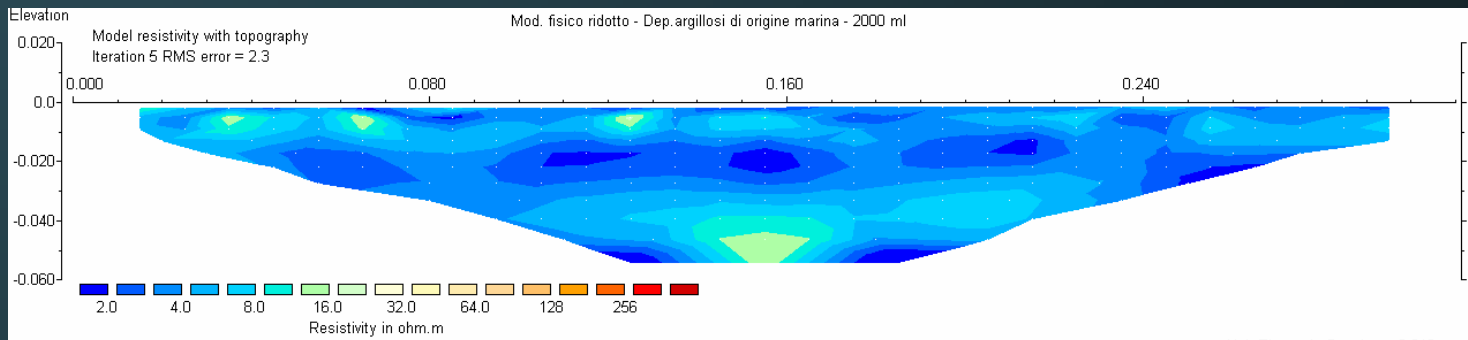
DEP. DI ORIGINE MARINA - MODELLO FISICO RIDOTTO

Condizione w: **15.43%**

Distribuzione dei valori di resistività



Incremento

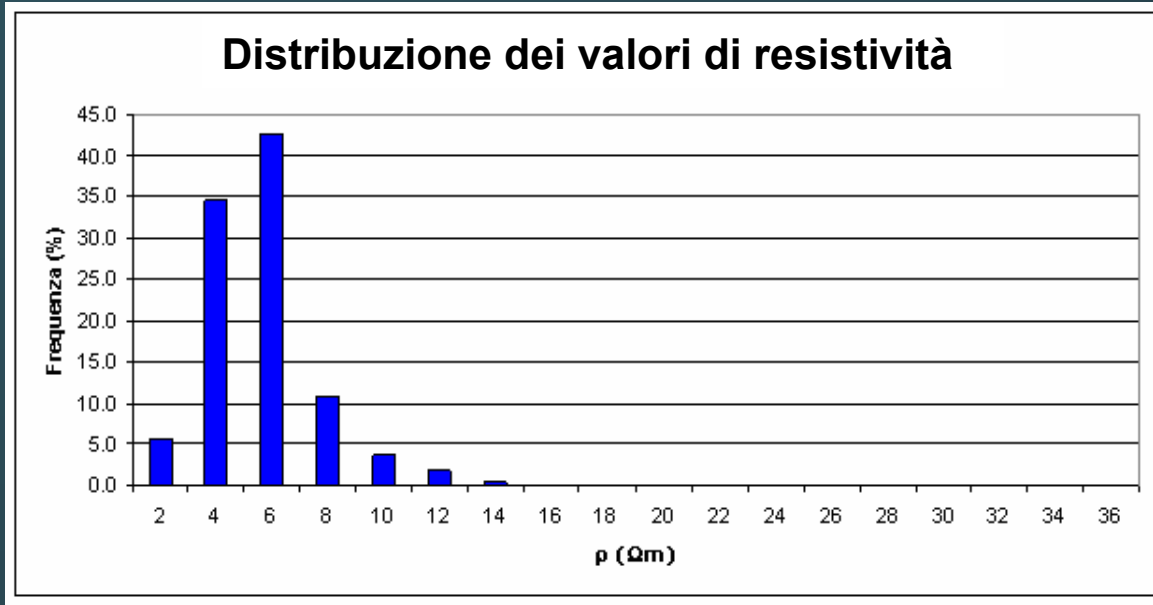


Modello di resistività

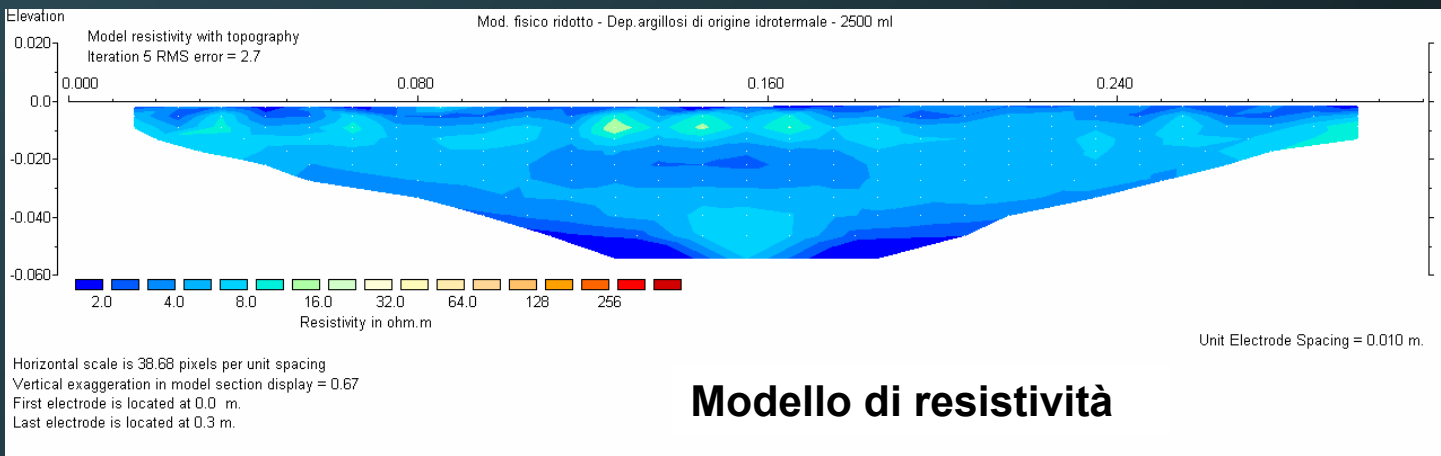
Horizontal scale is 38.68 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.67
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 0.3 m.

DEP. DI ORIGINE IDROTERMALE – MOD. FISICO RIDOTTO

Condizione w: **55.10%**



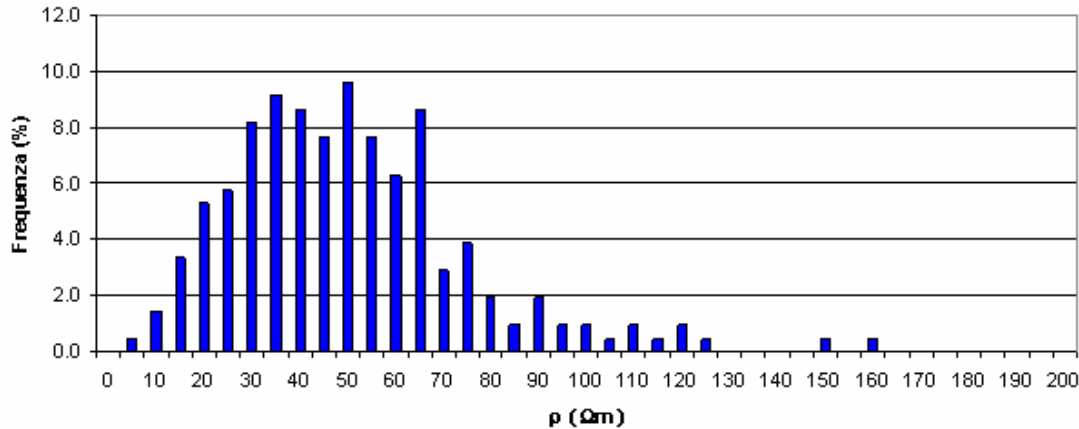
Incremento



DEP. DI ORIGINE GLACIALE - MODELLO FISICO RIDOTTO

Condizione w: **26.65%**

Distribuzione dei valori di resistività



Incremento

500ml

750ml

1000ml

1250ml

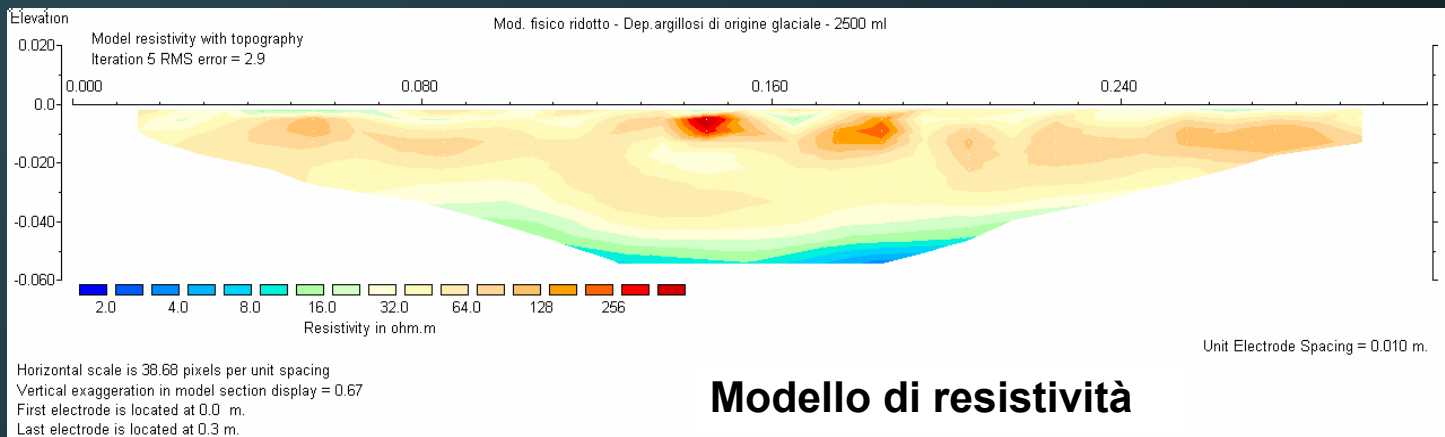
1500ml

1750ml

2000ml

2250ml

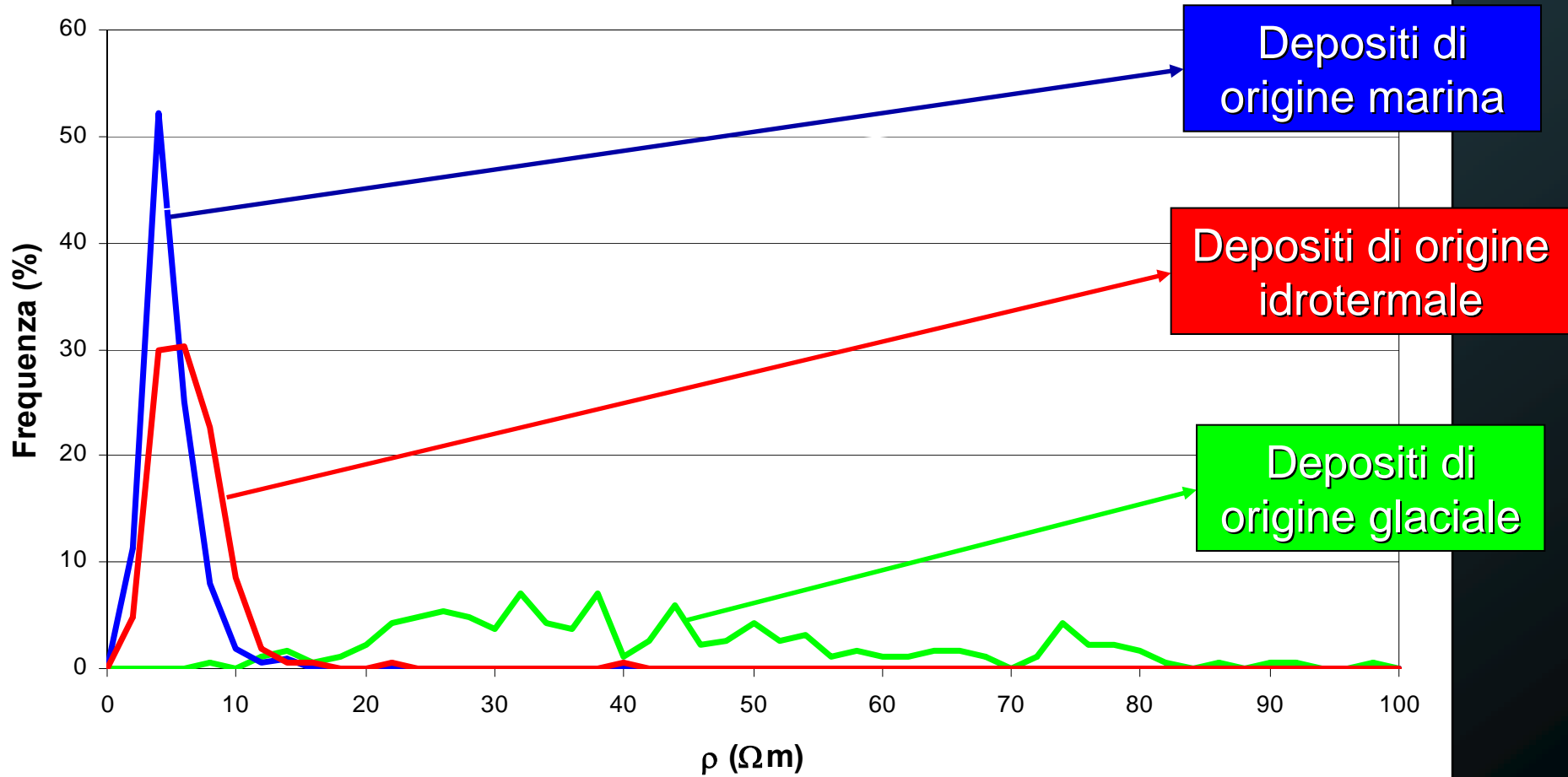
2500ml



RISPOSTA ELETTRICA DEI 3 DEPOSITI

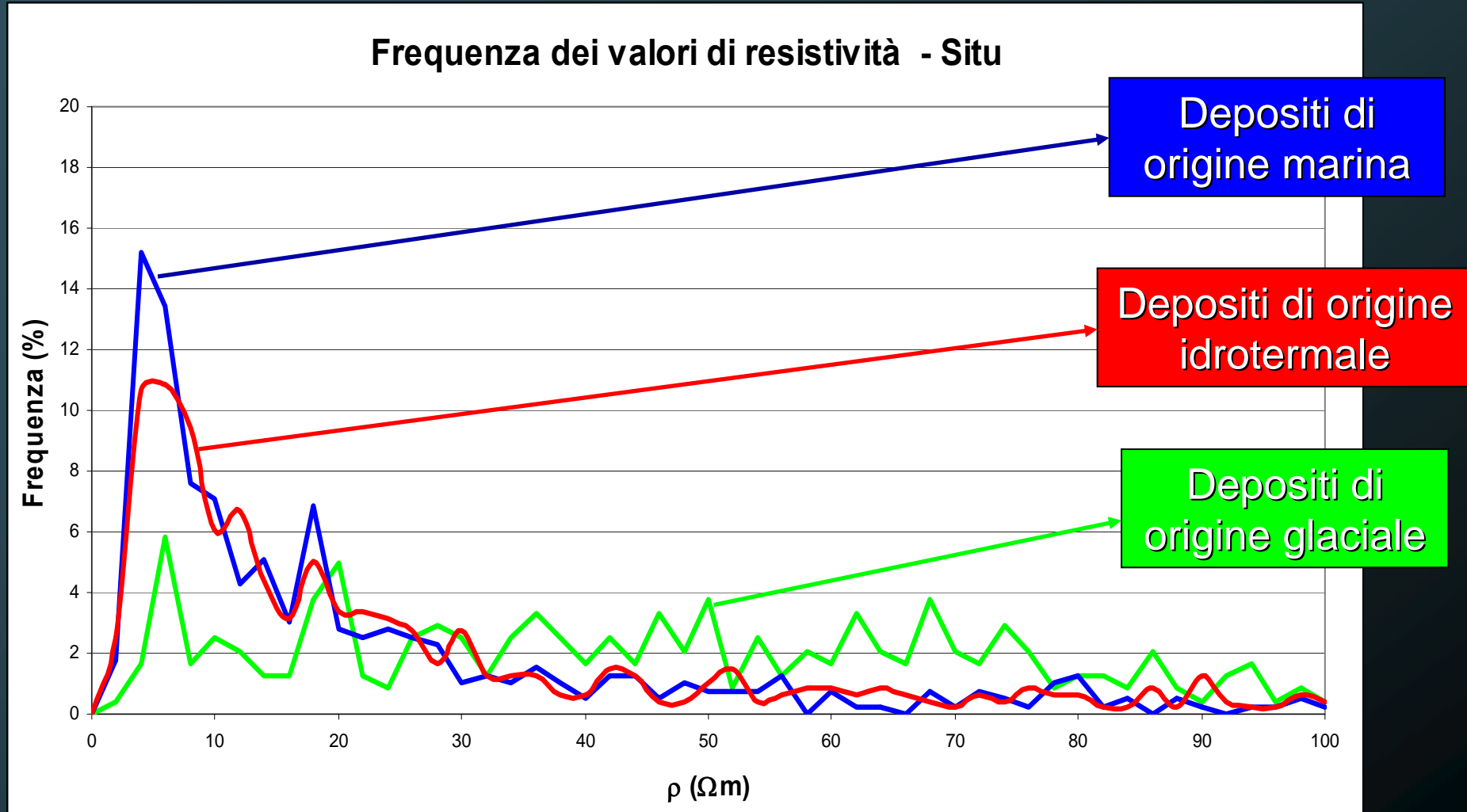
Misure di resistività in laboratorio - Modello fisico ridotto

Frequenza dei valori di resistività - 1500 ml



RISPOSTA ELETTRICA DEI 3 DEPOSITI

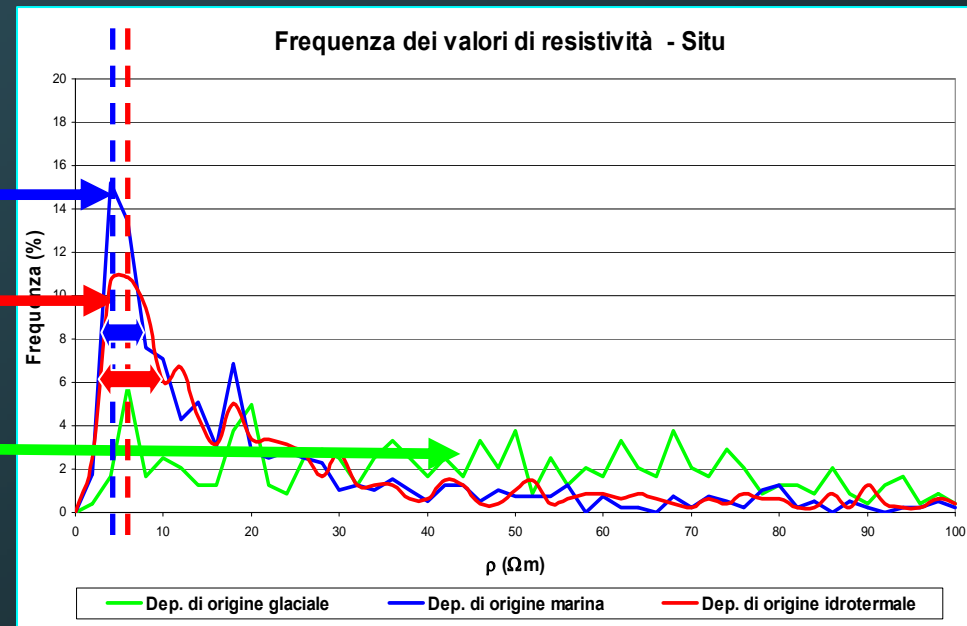
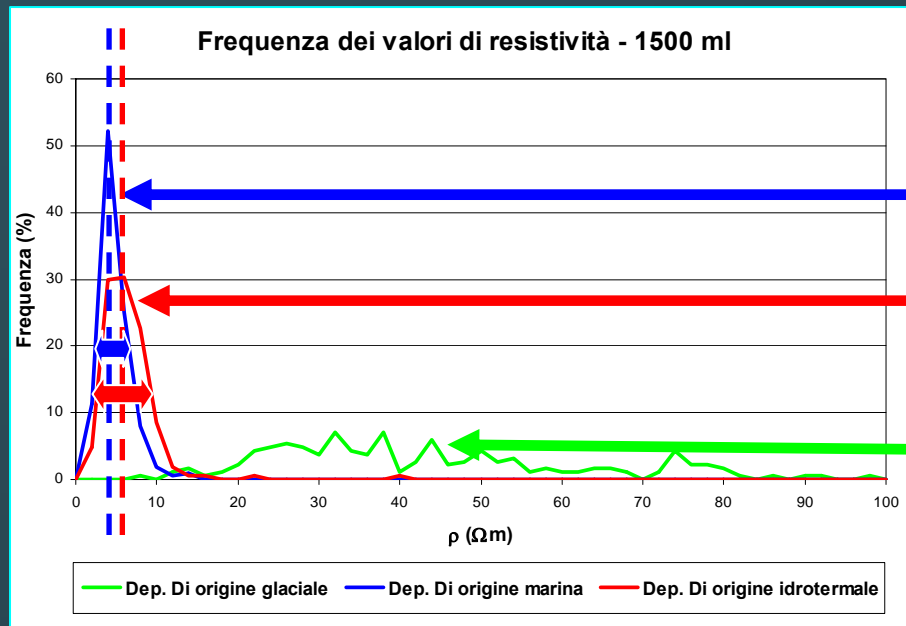
Misure di resistività in situ



COMPARAZIONE DELLA RISPOSTA ELETTRICA

Misure in laboratorio

Misure in situ



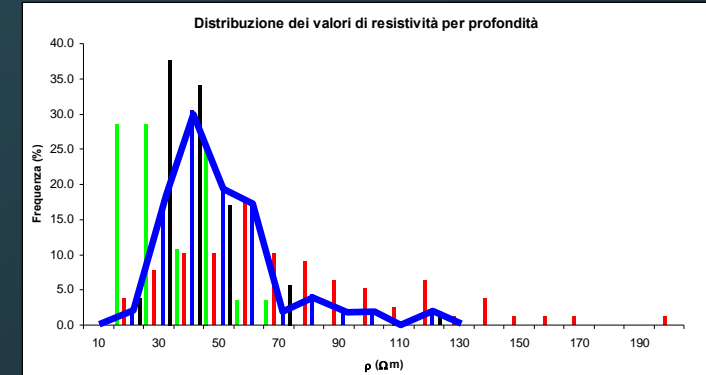
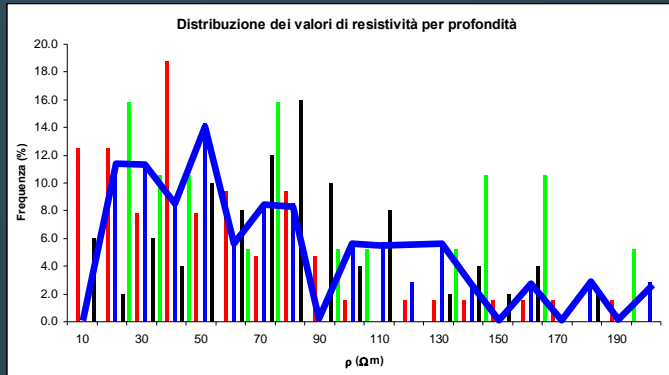
- ✓ Buona “correlazione” tra le distribuzioni dei valori di resistività in situ ed in laboratorio.
- ✓ Le distribuzioni in situ ed in laboratorio permettono di distinguere i 3 diversi depositi argillosi.

RISPOSTA ELETTRICA - PROFONDITÀ

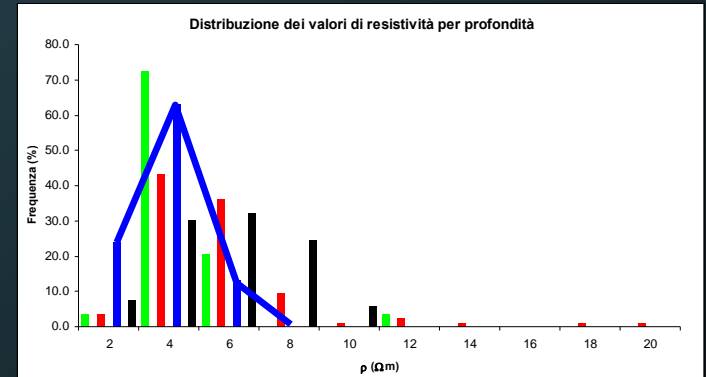
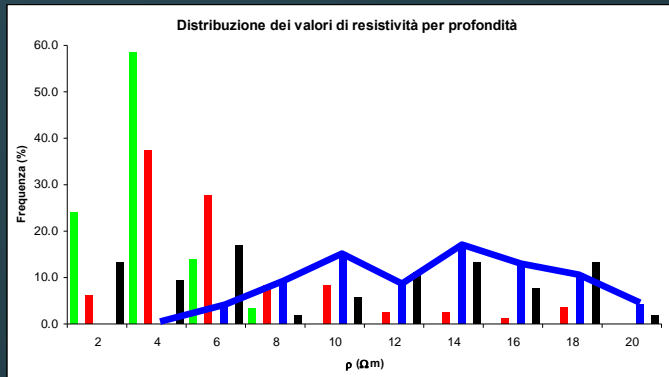
500ml

2000ml

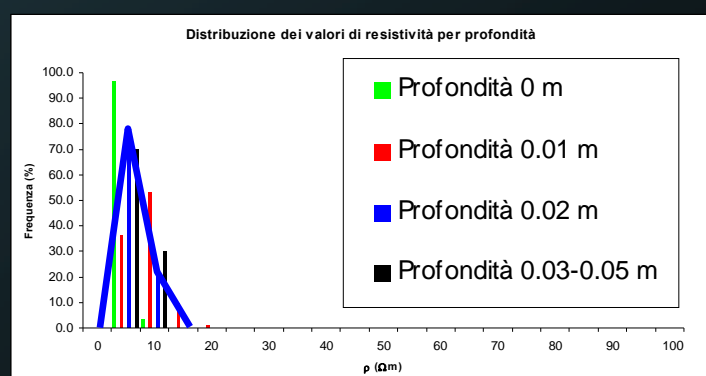
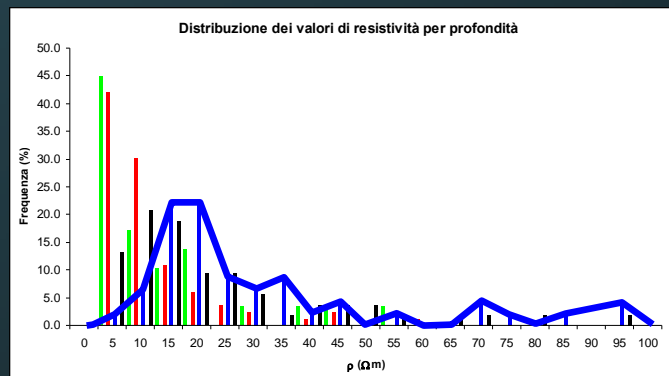
Depositi di origine glaciale



Depositi di origine marina

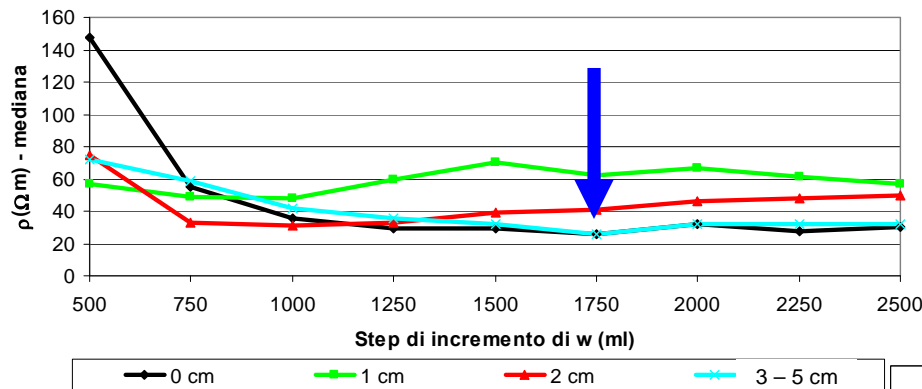


Depositi di origine idrotermale



RISPOSTA ELETTRICA - PROFONDITÀ

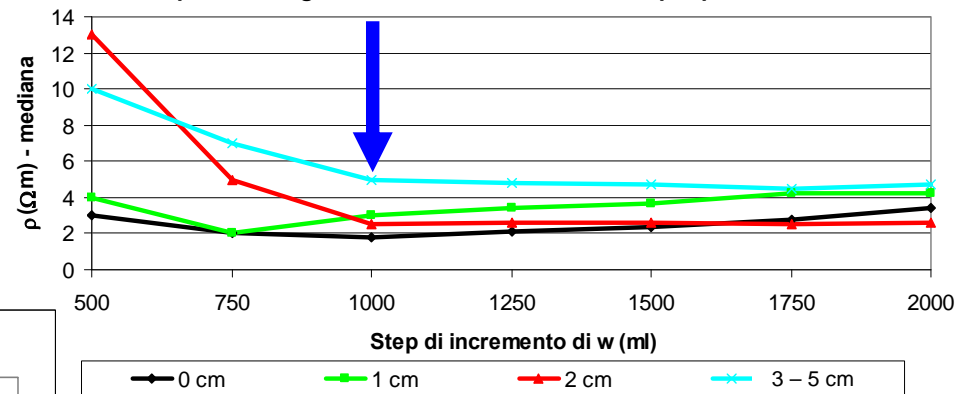
Depositi di origine glaciale - Valori di resistività per profondità



Considerando la massima profondità del volume indagato (3-5 cm)...

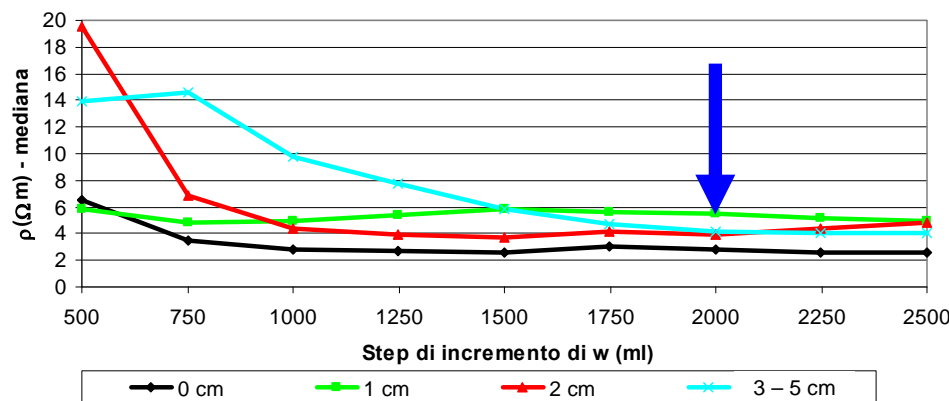
...si osserva in che punto si ha la stabilizzazione dei valori di resistività

Depositi di origine marina - Valori di resistività per profondità



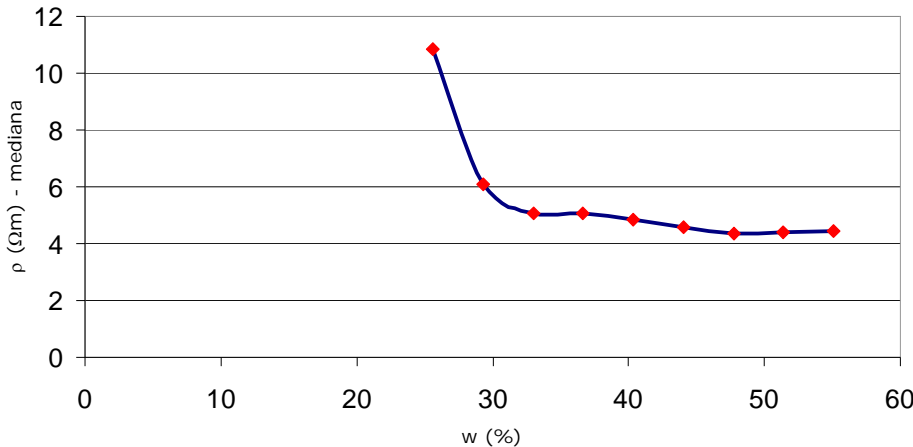
Indice della capacità del deposito di farsi attraversare dall'acqua

Depositi di origine idrotermale - Valori di resistività per profondità



STUDIO DI ρ IN RELAZIONE AL CONTENUTO D'ACQUA (w)

Depositi di origine idrotermale - Resistività vs Contenuto idrico



$$\rho = q + m \cdot \log w$$

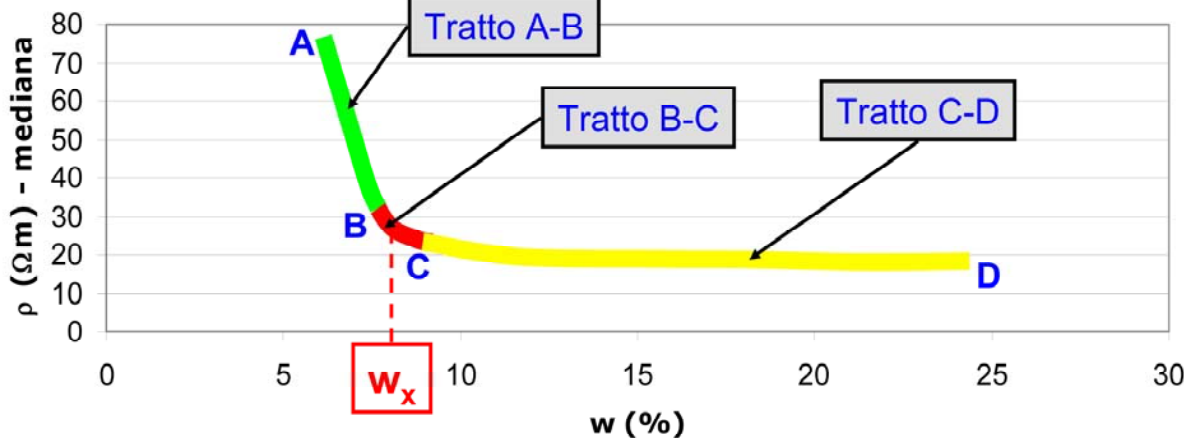
Nielsen (1972)

Seyfried (1993)

Archie (1942)

Gupta and Hanks (1972)

Resistività vs Contenuto idrico



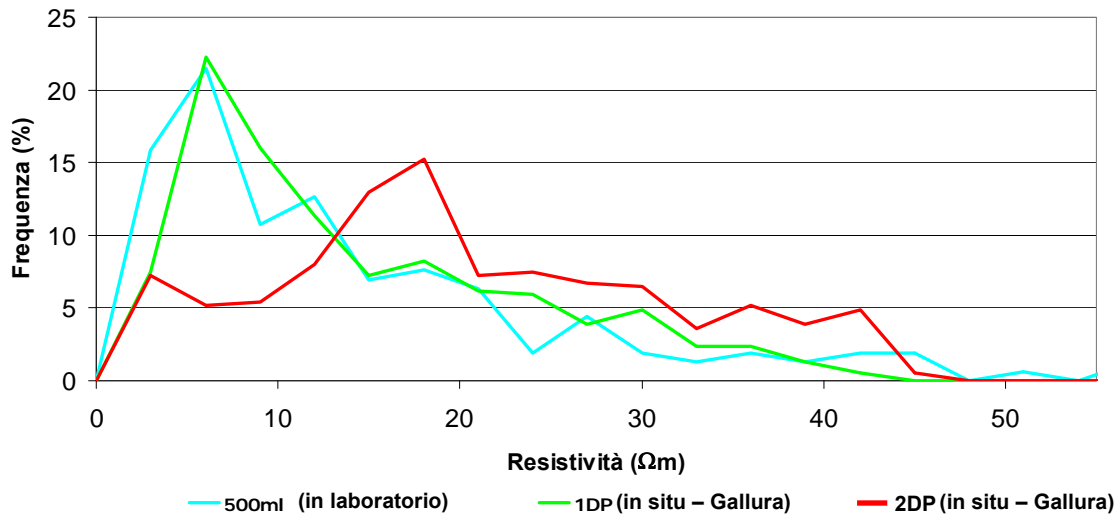
Tratto AB: per limitati contenuti idrici, valori di ρ elevati

Tratto BC: punto nodale, brusca variazione della risposta elettrica

Tratto CD: stabilizzazione dei valori di ρ

DETERMINAZIONE DI w SU DIVERSE SCALE D'INDAGINE

Dep. di origine idrotermale - Frequenza valori di resistività



Per un determinato w si ha un “*best fit*” tra:

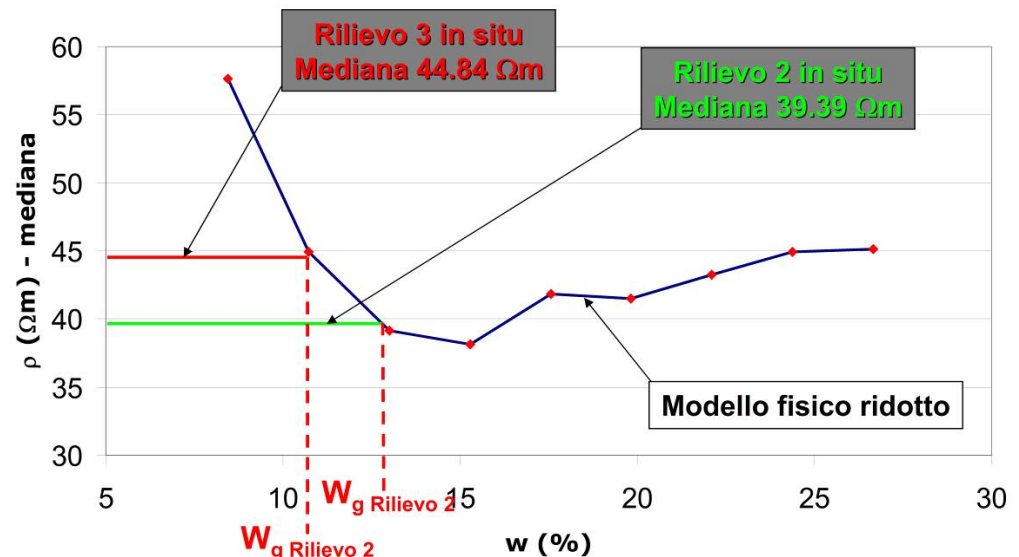
- ✓ curva relativa al rilievo in situ
- ✓ curva relativa al rilievo in laboratorio.

- ✓ Trend di resistività in relazione agli incrementi di w (Modello fisico ridotto)
- ✓ mediana dei valori di ρ (indagini in situ)



livello di w presente al momento della misura

Dep. di origine glaciale
Resistività (<200Ωm) vs Contenuto idrico

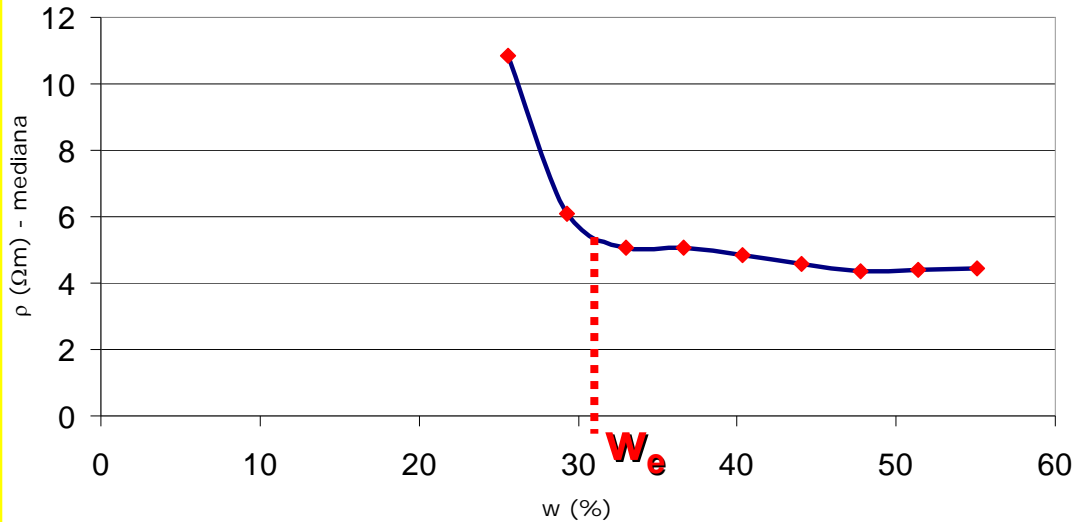


CONCLUSIONI

- ✓ La diffrattometria a raggi X e le prove di laboratorio su terre hanno permesso una precisa caratterizzazione dei 3 depositi argillosi.
- ✓ **In situ** l'indagine ha permesso un'individuazione chiara dei depositi argillosi.
- ✓ **In laboratorio** l'indagine elettrica dei 3 depositi è stata seguita e controllata al variare del contenuto idrico.
- ✓ **In laboratorio** l'indagine elettrica ha permesso di studiare la risposta elettrica in funzione della profondità.
- ✓ Le indagini **in situ** e **in laboratorio** hanno messo in luce una chiara e distinta caratterizzazione dei 3 depositi.
- ✓ A partire dall'indagine **in situ** si è proposto un sistema di determinazione del contenuto idrico attraverso un controllo della risposta elettrica **in laboratorio**.

PROSPETTIVE

Depositi di origine idrotermale - Resistività vs Contenuto idrico

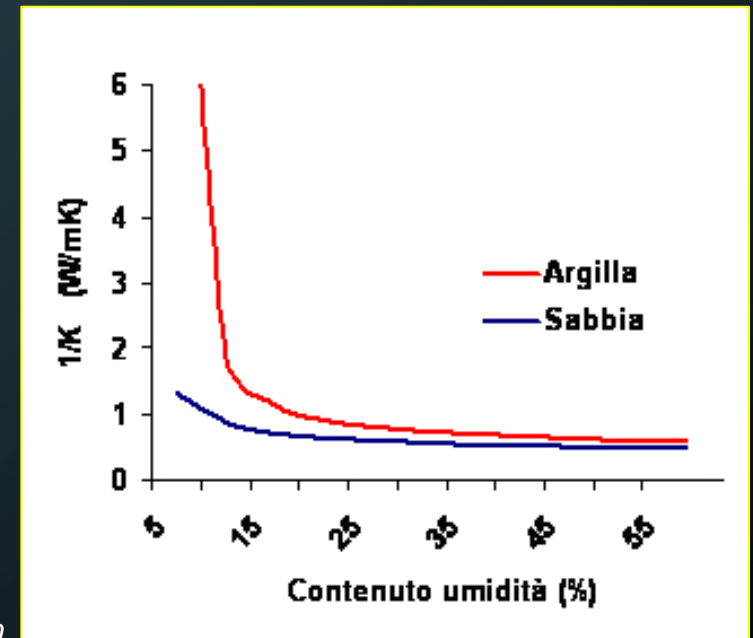


W_e

“limite” di contenuto idrico in corrispondenza del quale mutano le proprietà chimico-fisiche dei depositi

W_t

Limite di contenuto idrico al di sotto del quale il terreno non permette uno scambio significativo di calore



mod. di Kersten

SONDE PER ACQUA DI FALDA



Grazie per l'attenzione.

