

## Metodi geofisici e stima dei parametri termofisici del terreno-primi risultati sperimentali

Relatore: Dott. Geol. Giuseppe Gugliuzza

Correlatore: Dott. Geol. Matteo Costantino

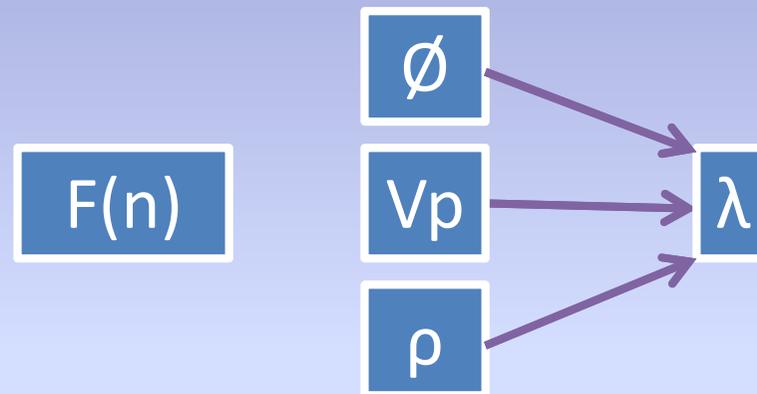
Pordenone 25/10/2011  
Centro Culturale A.Zanussi

## Metodi geofisici e stima dei parametri termofisici del terreno-primi risultati sperimentali

Relatore: Dott. Geol. Giuseppe Gugliuzza  
Correlatori: Dott. Geol. Matteo Costantino

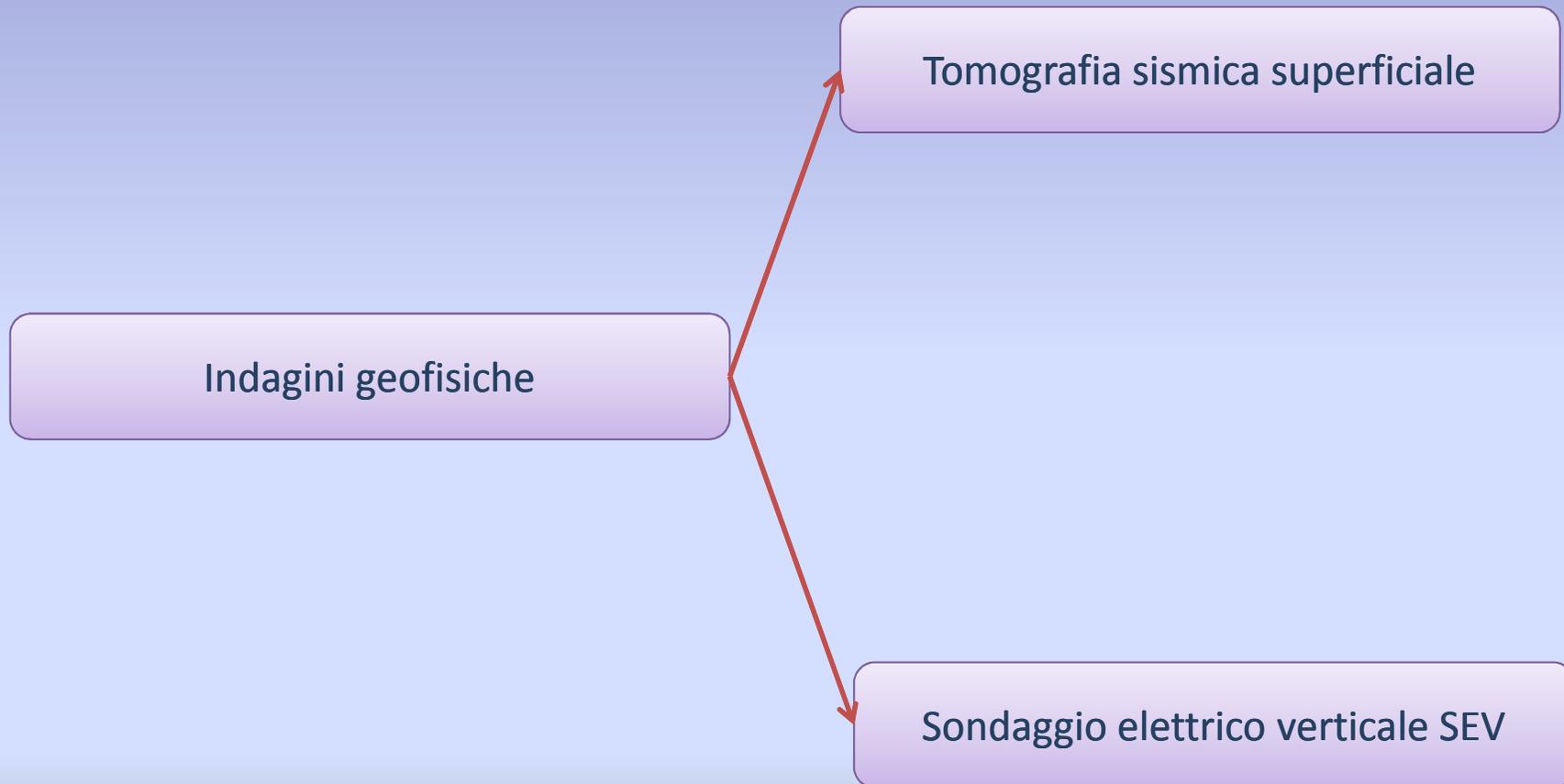
Pordenone 25/10/2011  
Centro Culturale A. Zanussi

Test sperimentale per la stima della conducibilità termica del sottosuolo ( $\lambda$ ) con l'ausilio di indagini geofisiche ed equazioni lineari di correlazione.



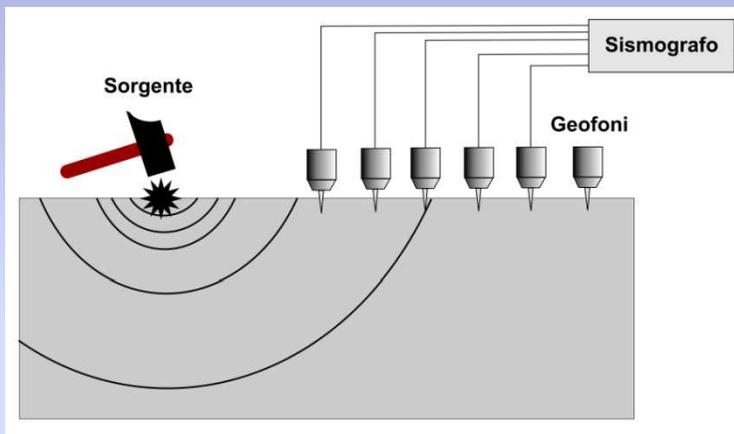
Si sono eseguiti dei test di misure su due cantieri (RM) confrontando i risultati con quelli ottenuti dalle prove di resa termica (GRT).

# Cenni sulla metodologia delle indagini eseguite



# Cenni sulla metodologia delle indagini eseguite

## Tomografia sismica superficiale



Vengono generate delle sollecitazioni dinamiche verticali lungo la direzione dello stendimento e registrate le vibrazioni prodotte mediante geofoni a componente verticale .

Consiste nel caratterizzare dinamicamente tramite la misura della velocità di propagazione delle Onde Sismiche le unità litologiche del sottosuolo definendo gli spessori e la geometria di contatto

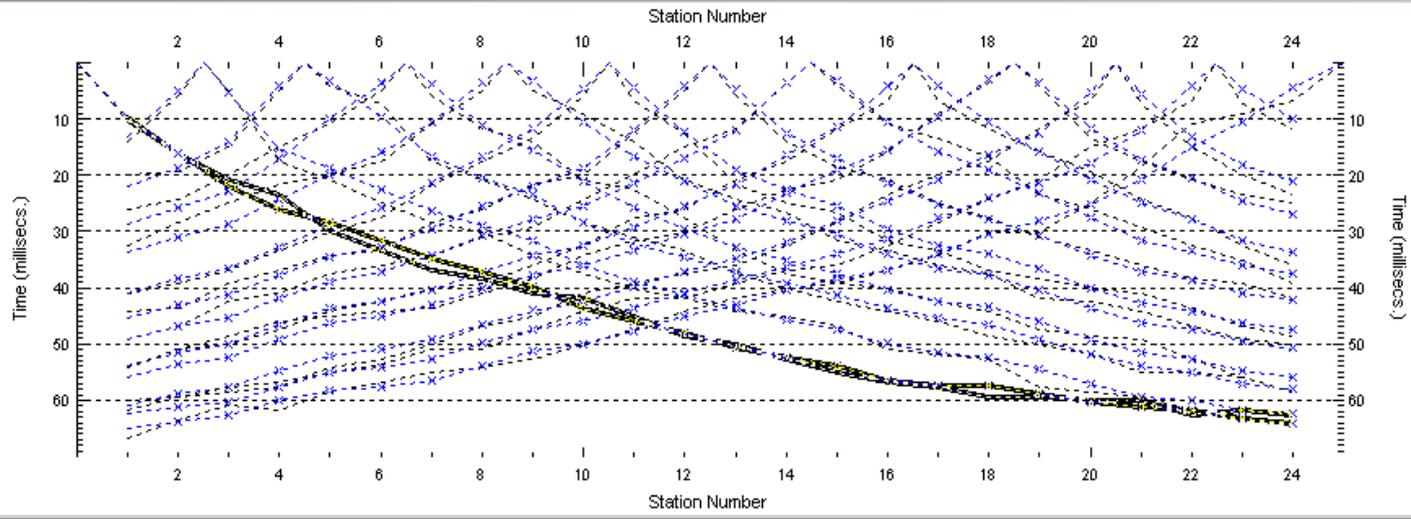
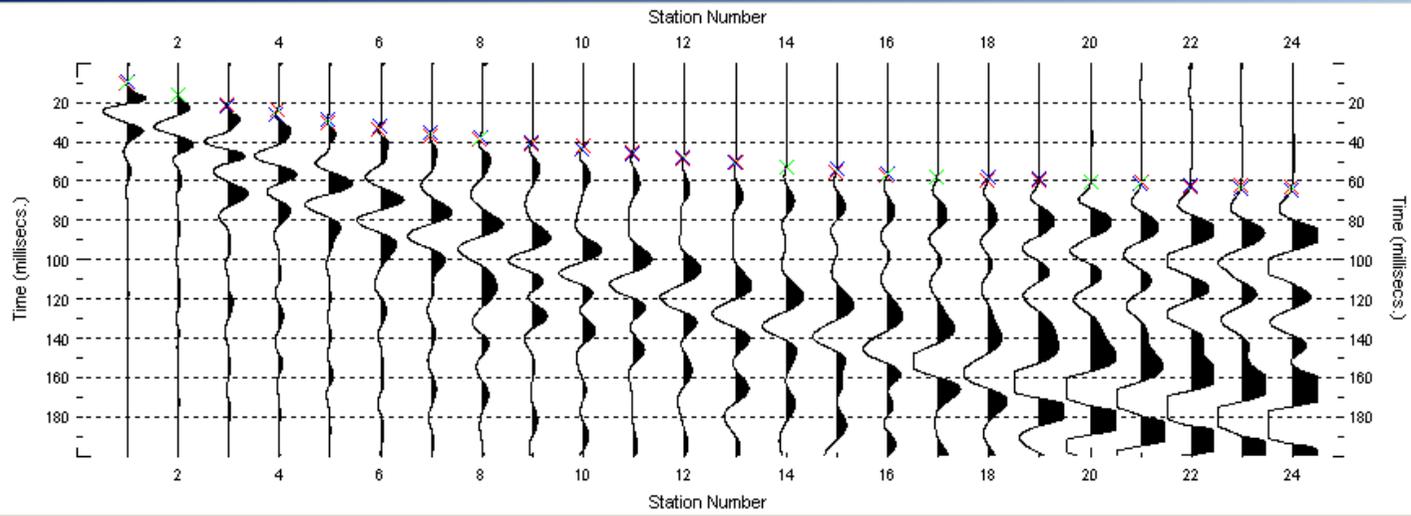
In ogni traccia viene eseguita una procedura definita Piking, vengono intercettati gli arrivi delle onde P e generate delle dromocrone (curve tempo distanza). Tramite processi iterattivi di inversione tomografica si calcola un modello 2D profondità-velocità .

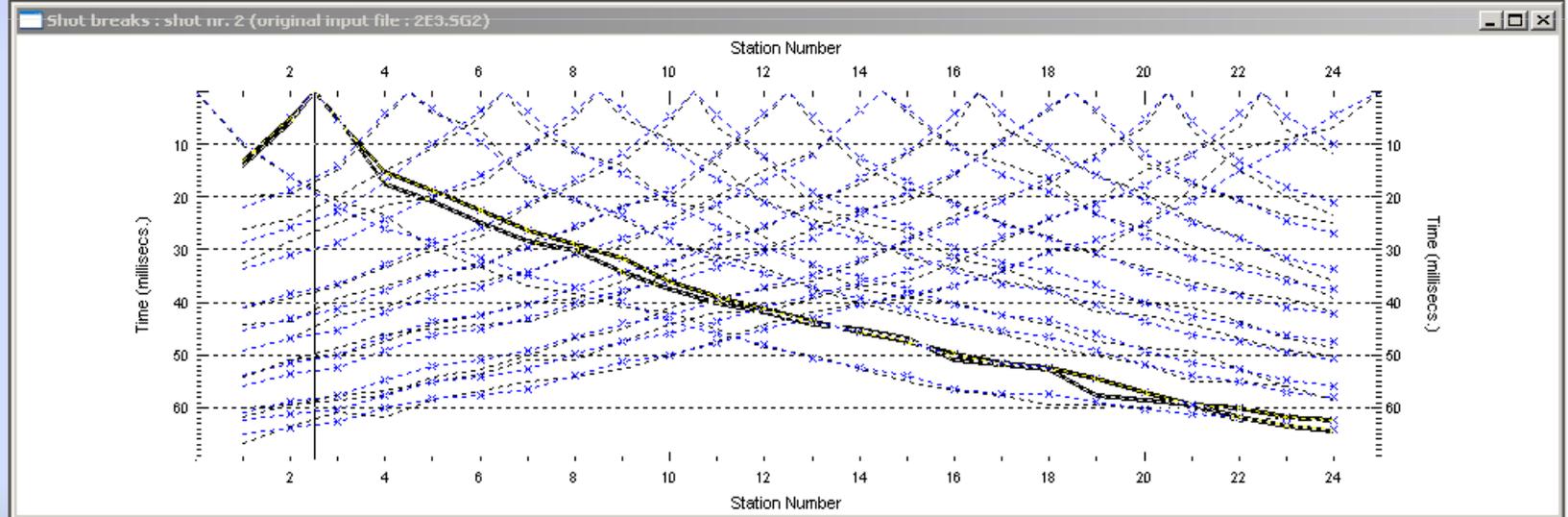
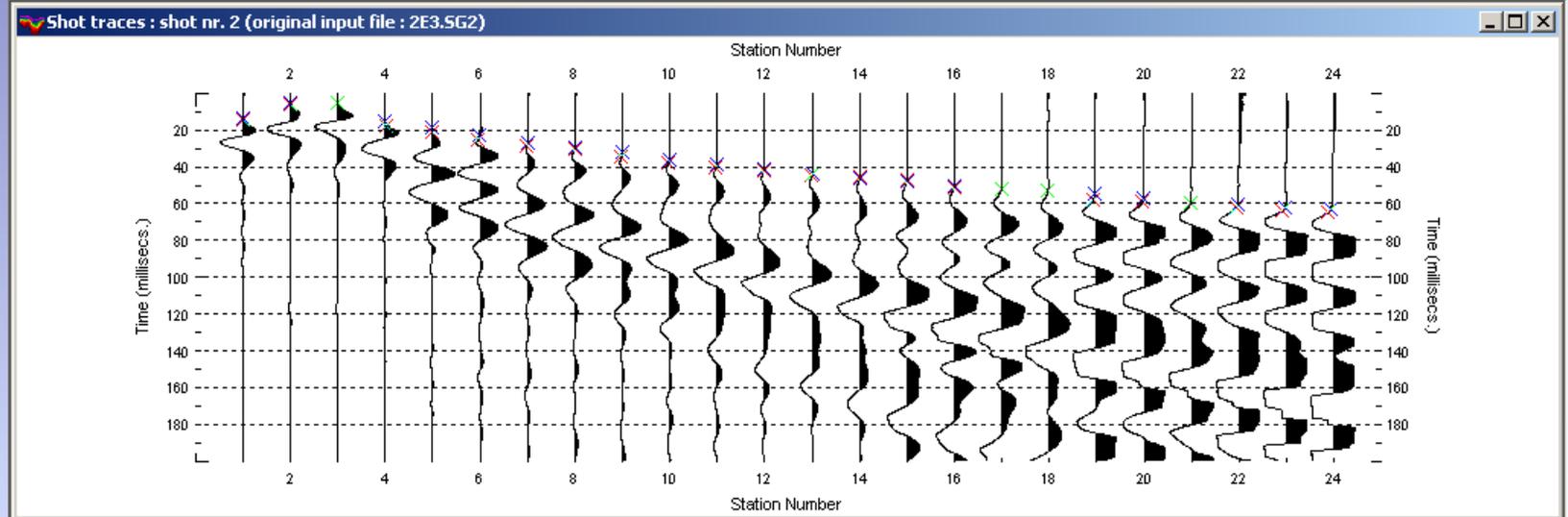


Esempio stesa sismica con processo di energizzazione con mazza battente

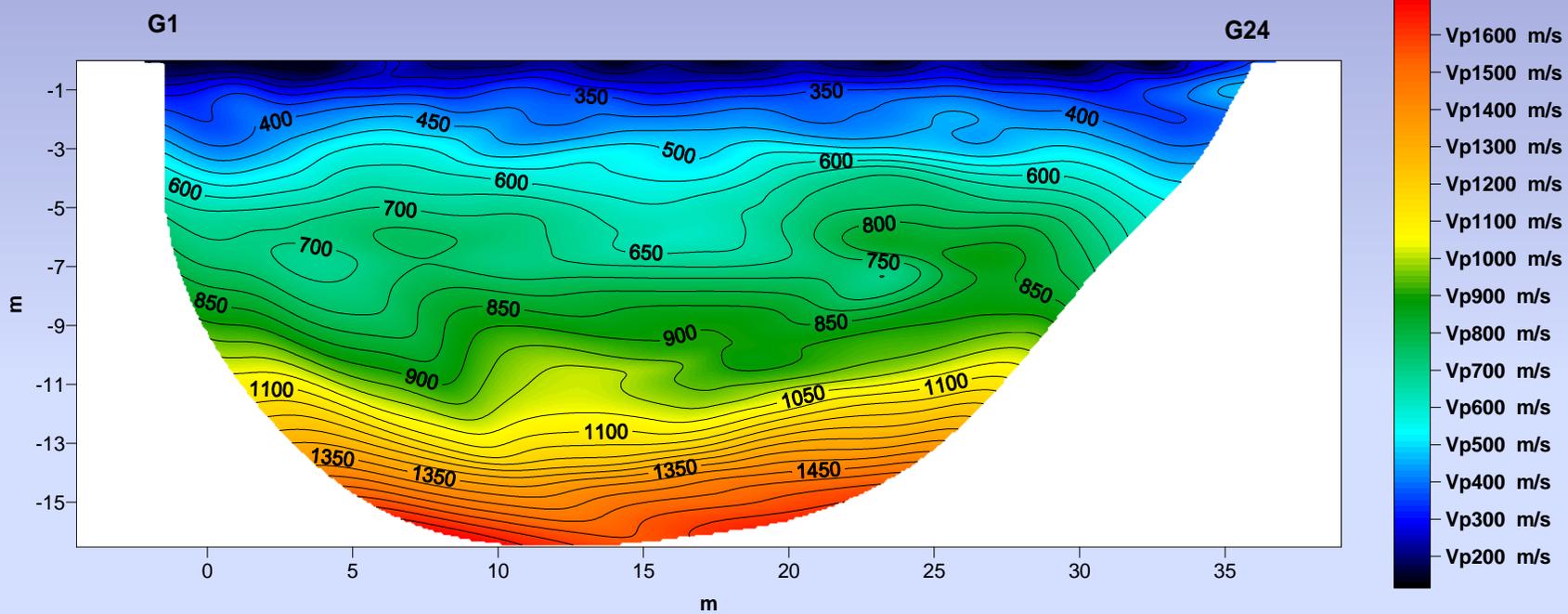


Sismografo a 24 canali in acquisizione

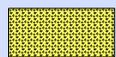
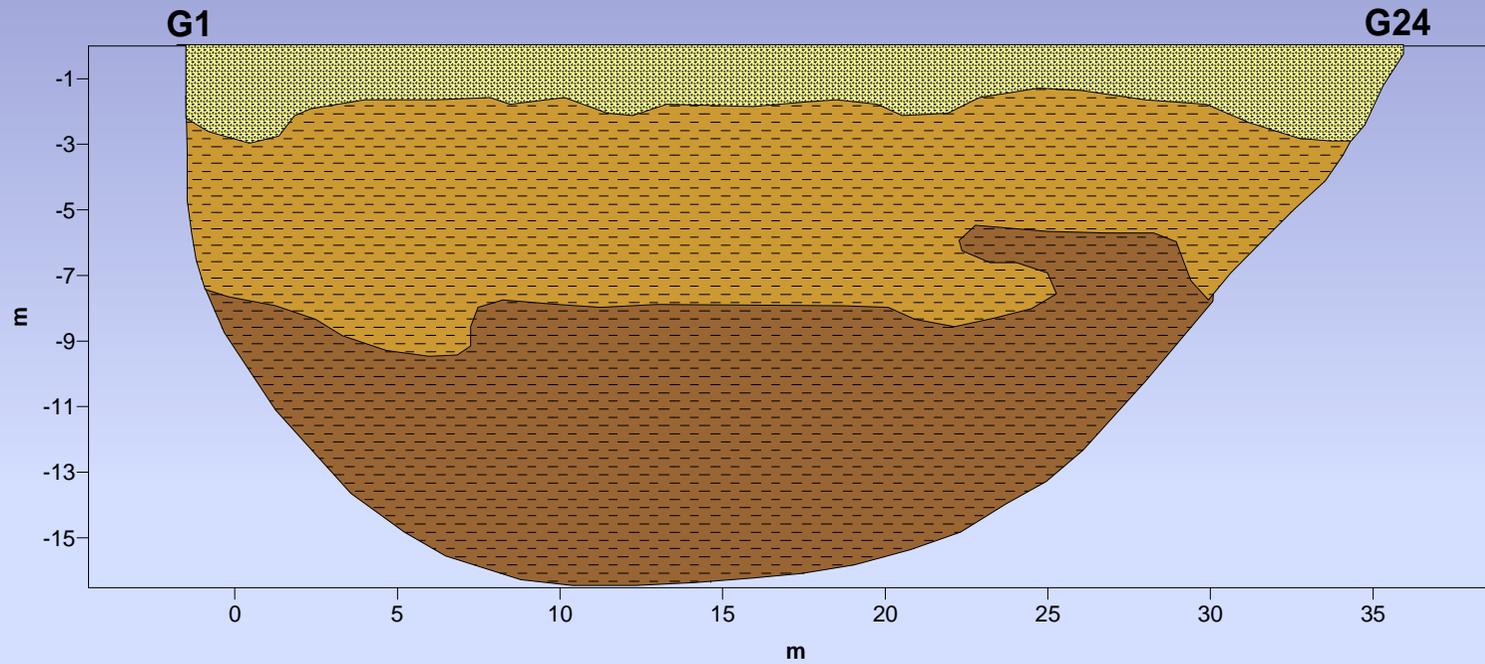




# PROFILO TOMOGRAFICO ONDE P-TOM 1



## SEZIONE GEOLOGICA TECNICA SISMOSTRATIGRAFICA INTERPRETATIVA-TOM 1



Coltre pedogena e areato superficiale  $V_p < 400$  m/s



Terreni a grana fine da poco a mediamente addensati verso il basso  $400 < V_p < 800$  m/s



Terreni a grana fine da mediamente addensati ad addensati verso il basso  $V_p > 800$  m/s

# Cenni sulla metodologia delle indagini eseguite

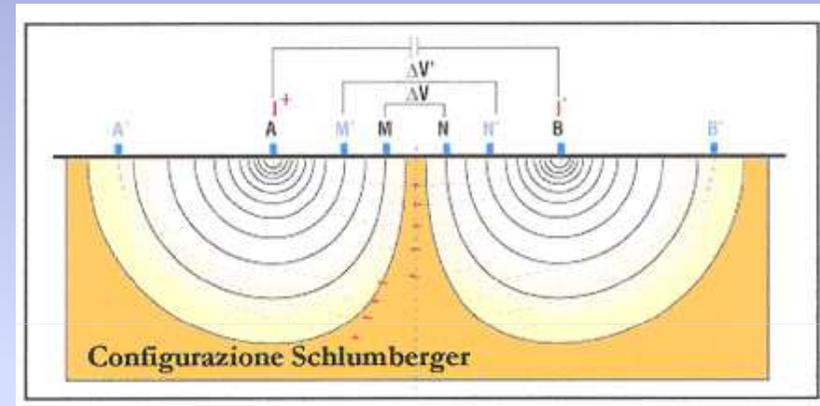
## Sondaggio Elettrico Verticale (SEV)

E' noto che se agli estremi di un conduttore se si applica una differenza di potenziale  $\Delta V$  passerà una corrente di intensità  $I$  che dipenderà dalla resistenza elettrica del materiale  $R$

### SEV

È un metodo di resistività consiste in una serie di determinazioni di resistività apparente  $\rho_a$  distanziando progressivamente gli elettrodi di corrente (AB) e di potenziale (MN) rispetto al centro che rimane fisso. La finalità è quella di accertare la distribuzione verticale della resistività in corrispondenza del centro del quadripolo. La condizione di massima efficacia è una applicabilità è una situazione di strati piano paralleli.

$$\rho_a = 2 \pi a \Delta V / I$$



Configurazione Schlumberger gli elettrodi di corrente si distanziano più rapidamente, cioè a parità di MN vengono effettuate più misure di  $\rho_a$  per posizioni crescenti di AB.

La resistività misurata in superficie è in genere una resistività apparente  $\rho_a$  e va considerata come un'anomalia rispetto a quella misurabile in un sottosuolo omogeneo e isotropo

# Cenni sulla metodologia delle indagini eseguite

## Sondaggio Elettrico Verticale (SEV)

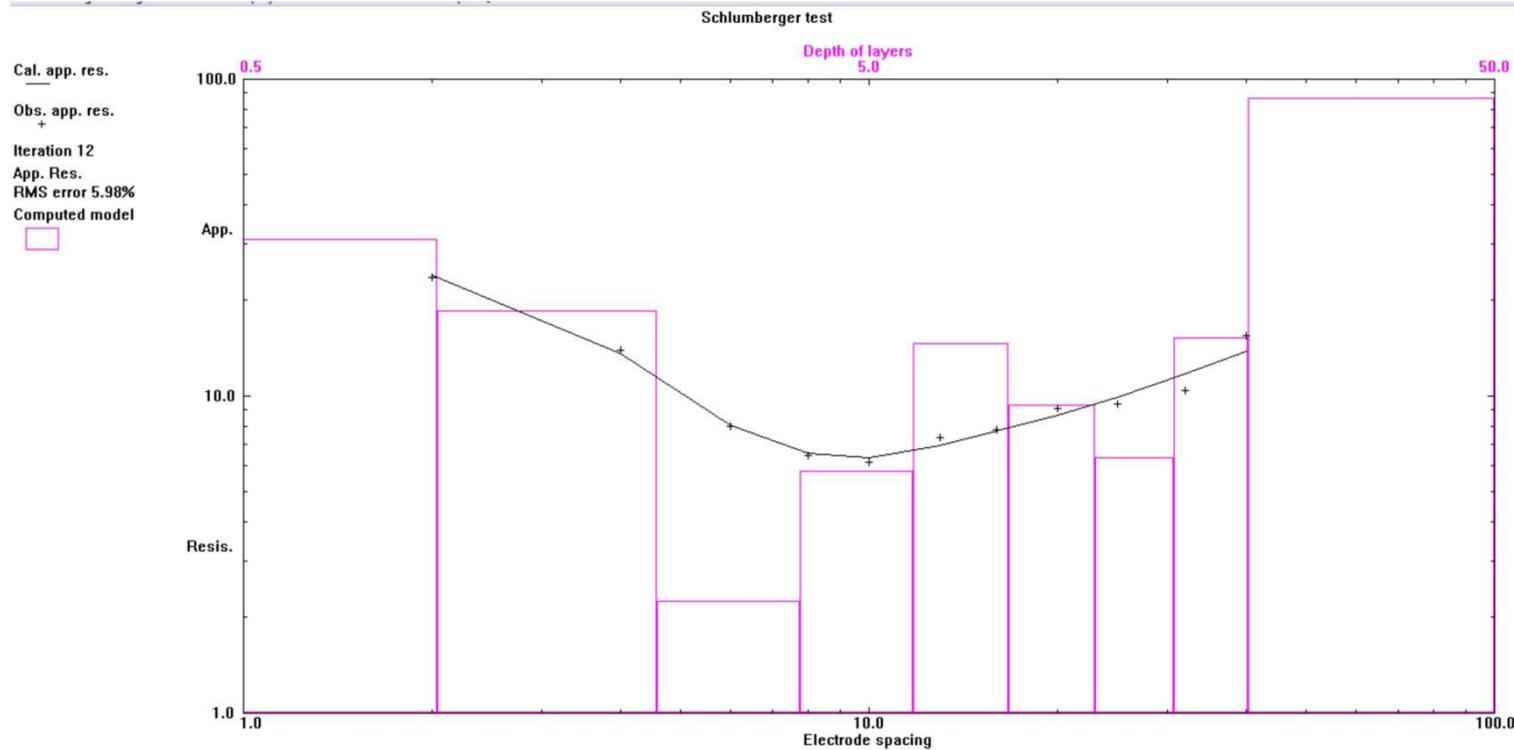


Esempio stesa SEV

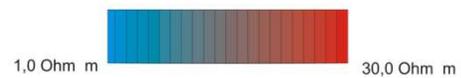
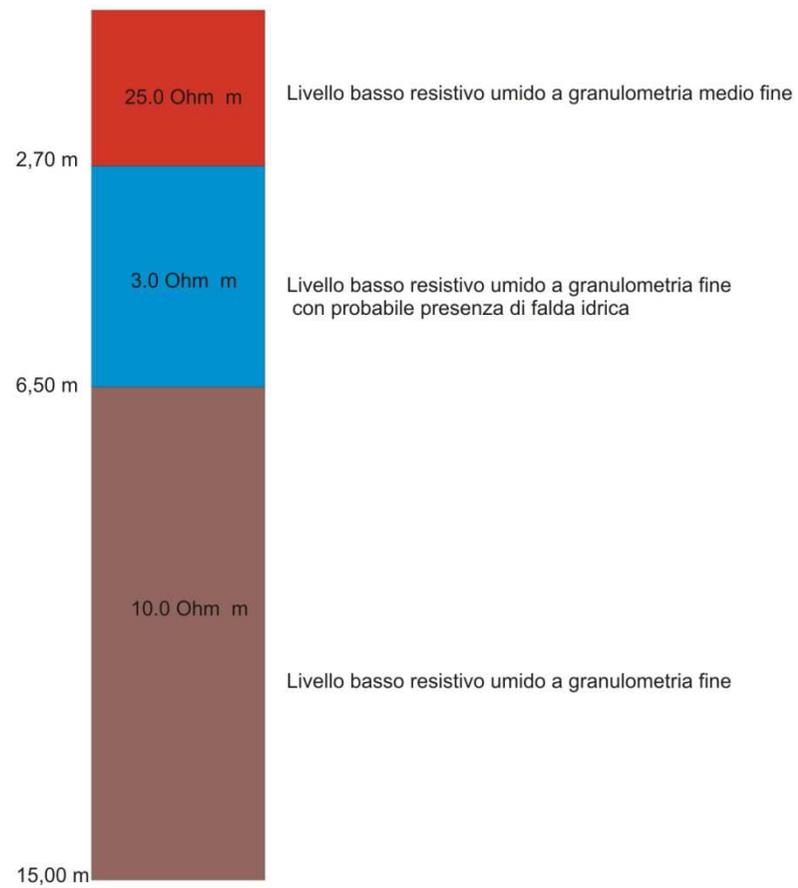


Elettrotomografo in acquisizione

# Curva di resistività apparente e modello di calcolo



Dalle misure eseguite si ottengono una serie di valori che diagrammati su scala bilogarithmica individuano una curva la cui interpretazione consente di valutare lo spessore degli elettrostrati presenti nel sottosuolo nonché la presenza di un eventuale acquifero. Attraverso dei processi iterattivi si calcola un modello tale che la curva calcolata si avvicini il più possibile a quella misurata, cercando di ottenere uno R.M.S, root mean squared (radice quadrata media) il più basso possibile.



# MISURE SPERIMENTALI DEL VALORE DI CONDUCEBILITÀ TERMICA ( $\lambda$ ) DEL SOTTOSUOLO CON L' AUSILIO DI INDAGINI GEOFISICHE ED EQUAZIONI LINEARI DI CORRELAZIONE

Valutazione di massima della conducibilità termica del sottosuolo

Strumenti

- Utilizzo di indagini geofisiche ( sismica, elettrica)
- Acquisizione dati di letteratura, di prove di laboratorio etc.
- Applicazione equazioni lineari

Obiettivo

Dimensionamento e studio di prefattibilità dell'impianto geotermico

Vantaggi

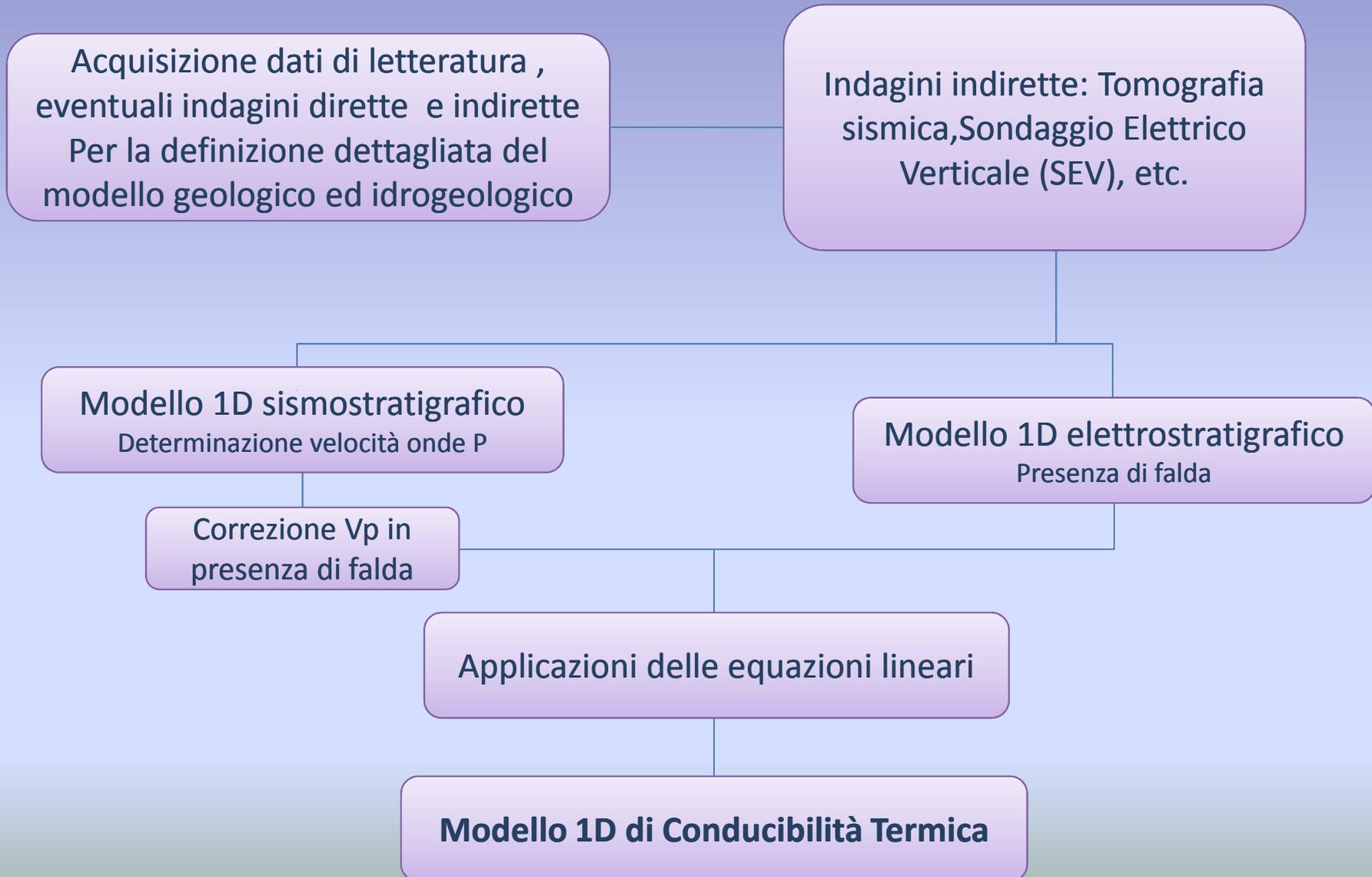
- Ecomomici
- Tempistica delle indagini e dei risultati
- Valutazione costi impianto geotermico ( profondità foro etc..)

Esistono in letteratura diversi studi sperimentali che tramite delle equazioni lineari legano la conducibilità termica ( $\lambda$ ) delle rocce o dei terreni, con le loro proprietà fisiche, quali la velocità delle onde P, la porosità, la densità etc.

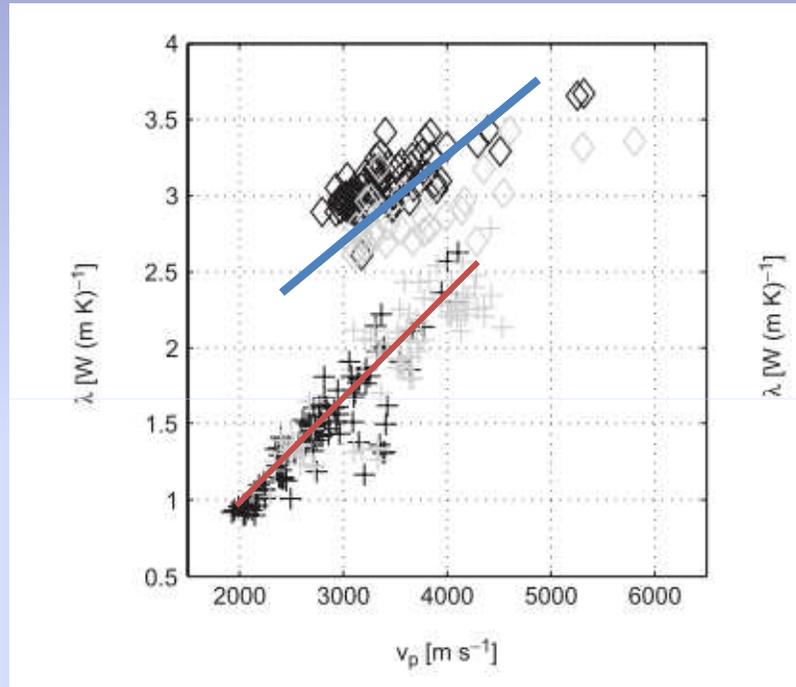
Conducibilità Termica

- Composizione mineralogica
- Struttura, tessitura e dimensione dei grani
- Densità, porosità
- Presenza di acqua nei pori

# DEFINIZIONE DI UN MODELLO STRATIGRAFICO



# Equazioni lineari di correlazione tra conducibilità termica e onde P



(+) Dry    (◇) Saturated

Depositi carbonatici-Grigio

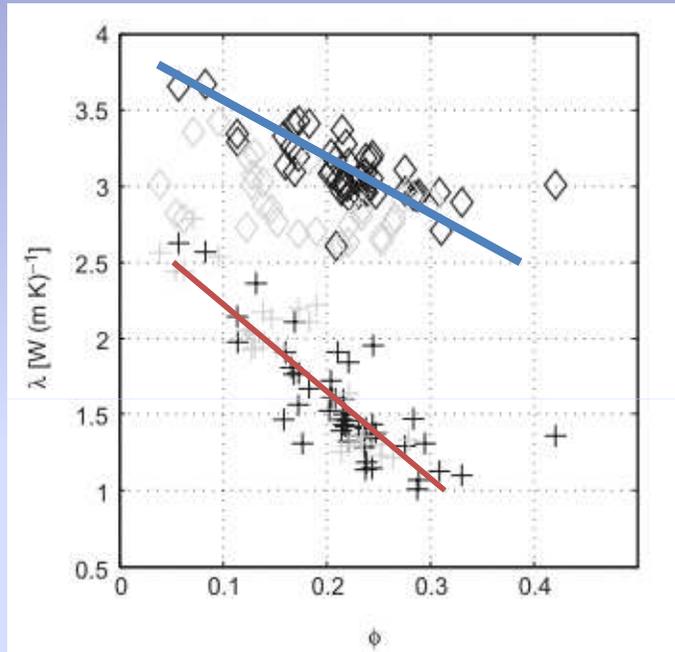
Depositi sabbiosi-Nero

Nota: La presenza di acqua nel sottosuolo  
Influenza notevolmente la conducibilità termica

Relazione tra conducibilità termica ( $\lambda$ ) e Velocità onde P

Da dati di letteratura esistono delle funzioni matematiche che mettono in relazione la velocità di propagazione delle onde sismiche, la densità, la porosità con la conducibilità termica del sottosuolo. Tenendo conto sia della presenza di falda che di fattori di calibrazione che riportano le condizioni ambientali naturali dei campioni prelevati in termini di proprietà elastiche

# Equazioni lineari di correlazione tra conducibilità termica e Porosità



Relazione tra conducibilità termica ( $\lambda$ ) e Porosità  $\phi$

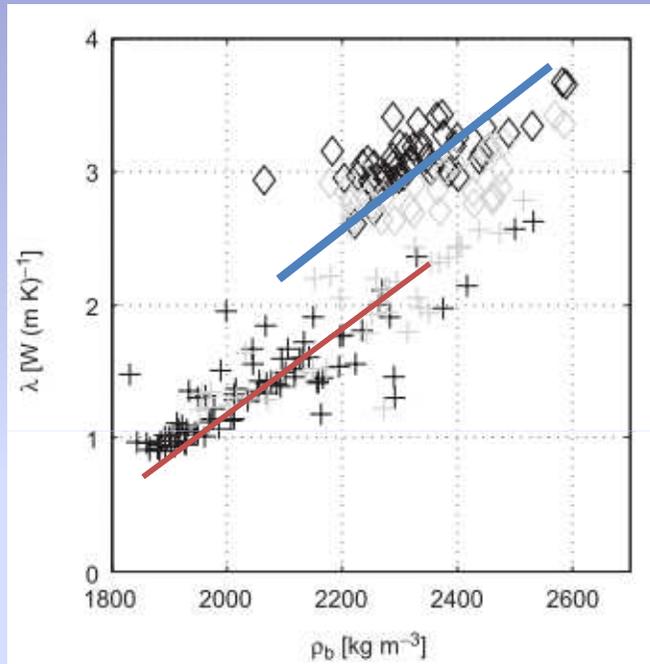
(+) Dry (◇) Saturated

Depositi carbonatici-Grigio

Depositi sabbiosi-Nero

Nota: La presenza di acqua nel sottosuolo  
Influenza notevolmente la conducibilità termica

# Equazioni lineari di correlazione tra conducibilità termica e Bulk density



Relazione tra conducibilità termica ( $\lambda$ ) e Bulk density  $\rho$

(+) Dry    (◇) Saturated

Depositi carbonatici-Grigio

Depositi sabbiosi-Nero

Nota: La presenza di acqua nel sottosuolo  
Influenza notevolmente la conducibilità termica

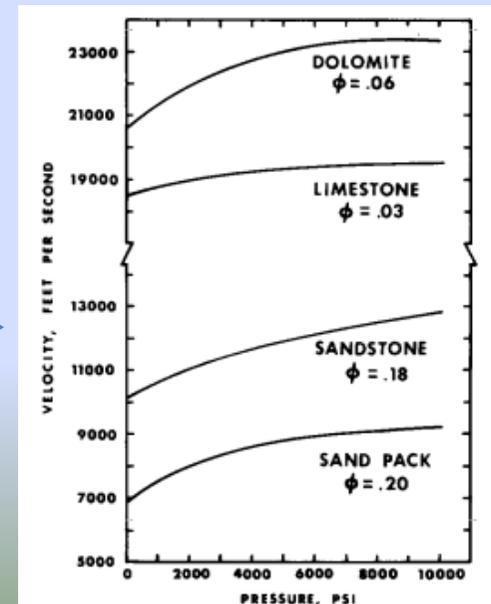
# Problematiche ed accuratezza nella misura della velocità di propagazione delle onde P ed influenza della falda

La Velocità di propagazione onde P

- Grado di costipazione dei materiali
- Presenza di microfrazture
- Pressione litostatica
- Densità, porosità
- Composizione mineralogica
- Presenza di acqua interstiziale

Profondità

La presenza di microfrazture nella porzione superficiale del sottosuolo agisce notevolmente sulla velocità delle onde P, ma l'influenza della pressione litostatica sulla propagazione delle onde P, diviene meno rilevante con l'aumentare delle profondità, ovvero quando le microfrazture vengono otturate dalla pressione litostatica. Quindi con l'aumentare della pressione litostatica la composizione mineralogica e la **porosità** determinano la velocità di trasmissione delle onde P



# Problematiche ed accuratezza nella misura della velocità di propagazione delle onde P ed influenza della falda

Per valori misurati con grado di saturazione > del 99% le Vp sono influenzate da una combinazione dello scheletro solido e dal fluido di porosità, mentre per valori = 100% la Vp dipende dalla compressibilità del fluido di porosità. (Mancuso C. 1996).

In letteratura esiste una relazione sperimentale tra porosità  $\phi$ , Velocità dello scheletro solido  $V_m$ , velocità del fluido  $V_f$  e velocità del sistema bifase  $V$  (Willie et Al. 1956)

Fattori di correzione delle Vp in presenza di falda

$$\frac{1}{V} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{1-\phi}{V_m}$$

Considerando che:  
 $V_f = 1500,0$  m/s in acqua  
 $\phi$  da dati di letteratura  
 $V$  da misure sismiche  
È possibile ricavare un valore più attendibile della velocità  $V_m$

$\phi \longrightarrow 0$  ne consegue che  $V \longrightarrow V_m$

L'influenza del fluido interstiziale è trascurabile

# Porosità totale $\emptyset$

Rocce incoerenti	Porosità %
Sabbie fini e medie	34
Sabbie medie e grosse	32
Sabbie grossolane	30-31
Sabbie > grossolane	26-27
Ghiaie sabbiosa	25
Ghiaie	25-40
Argille	45-50
Limi	35-45
Depositi alluvionali	5-20

Rocce coerenti	Porosità %
Marne	40-45
Arenarie	5-25
Calcari	3-20
Dolomie	2-10
Basalti	0,1-3
Graniti	0,002-1,5

La porosità totale  $\emptyset$  viene espressa come il rapporto percentuale tra il volume dei vuoti e quello totale

# Profondità di indagine e stima della velocità di Vp nel semispazio

## Riepilogo

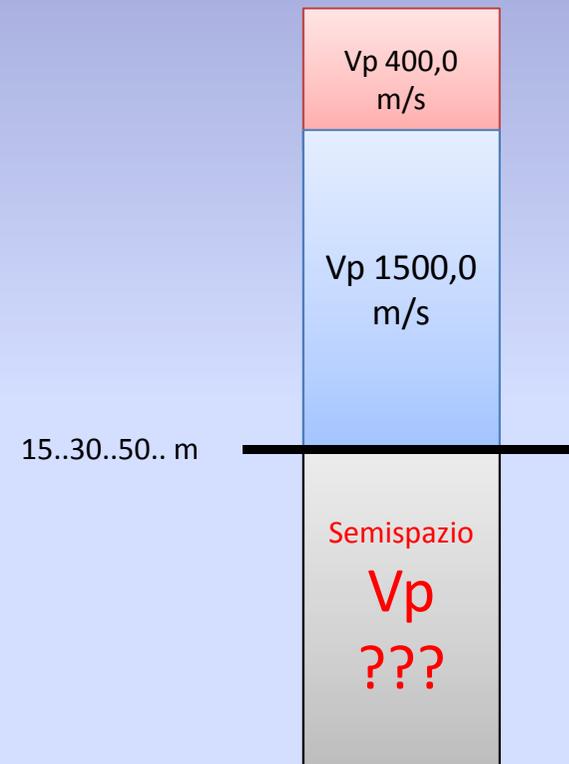
- Determinazione Vp con metodi sismici
- Valutazione (SEV) presenza di falda nel sottosuolo e correzione valori Vp

I metodi sismici per la misura delle Vp hanno una limitazione per la profondità di indagine.

**Tomografia sismica** 1/3 – 1/4 della lunghezza dello stendimento

Impedimenti logistici del sito limitano la lunghezza max dello stendimento e quindi la profondità di indagine raggiungibile

La stima delle proprietà di conducibilità termica al fine di dimensionare e valutare la prefattibilità del sistema geotermico necessita di un modello stratigrafico che può interessare anche profondità  $\geq 100,0$  m



# Profondità di indagine e stima della velocità di Vp nel semispazio

Per velocità superiori a 1500,0 m/s da studi sperimentali esiste una relazione tra Vp e densità  $\rho$  ( Gardner et al., 1974)

$V_p > 1500,0 \text{ m/s}$

$$\rho = 1,74 V_p^{0,25}$$

Litofacies	densità $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )
Rocce carbonatiche	2,4-2,6
Rocce carbonatiche fratturate	2,2-2,4
Argille marnose e argille consolidate	2,0-2,2
Sabbie e ghiaie limose dense	1,7-2,0
Sabbie argillose e argille soffici	1,2-1,7

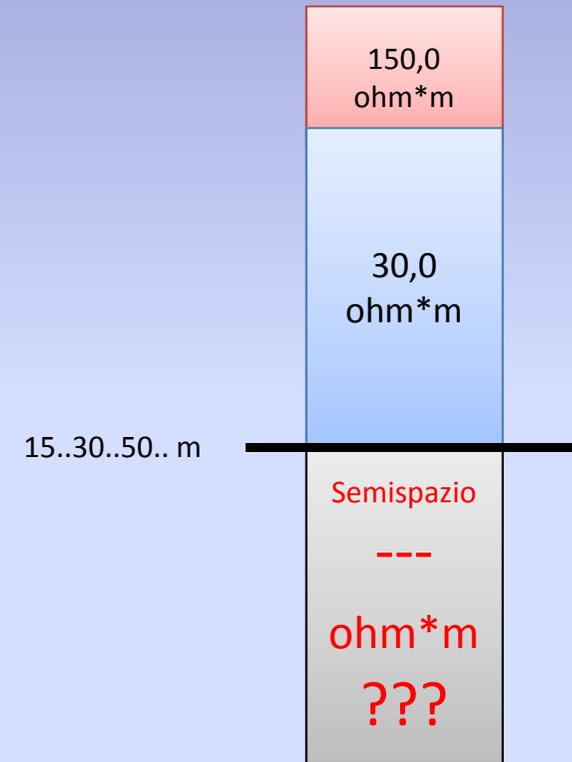
# Valutazione di presenza di falda nel sottosuolo ed indagine geoelettrica SEV

La valutazione della presenza di una falda è di fondamentale importanza per la stima della conducibilità termica del sottosuolo. Pertanto deve essere eseguito uno studio idrogeologico approfondito e supportato da indagini geoelettriche SEV ( sondaggi elettrici verticali).

Come le indagini sismiche anche i sondaggi elettrici hanno una limitazione legata alla profondità di indagine. Inoltre tale indagine necessita di una taratura mediante una conoscenza litostratigrafica accurata del sottosuolo.

**S.E.V. ( sondaggio elettrico verticale)** 1/3 della lunghezza dello stendimento

Impedimenti logistici del sito limitano la lunghezza dello stendimento e quindi la profondità di indagine max raggiungibile



# Valutazione di presenza di falda nel sottosuolo ed indagine geoelettrica SEV

Una scorretta valutazione della presenza di falda potrebbe comportare errori di stima della conducibilità termica anche > del 100%

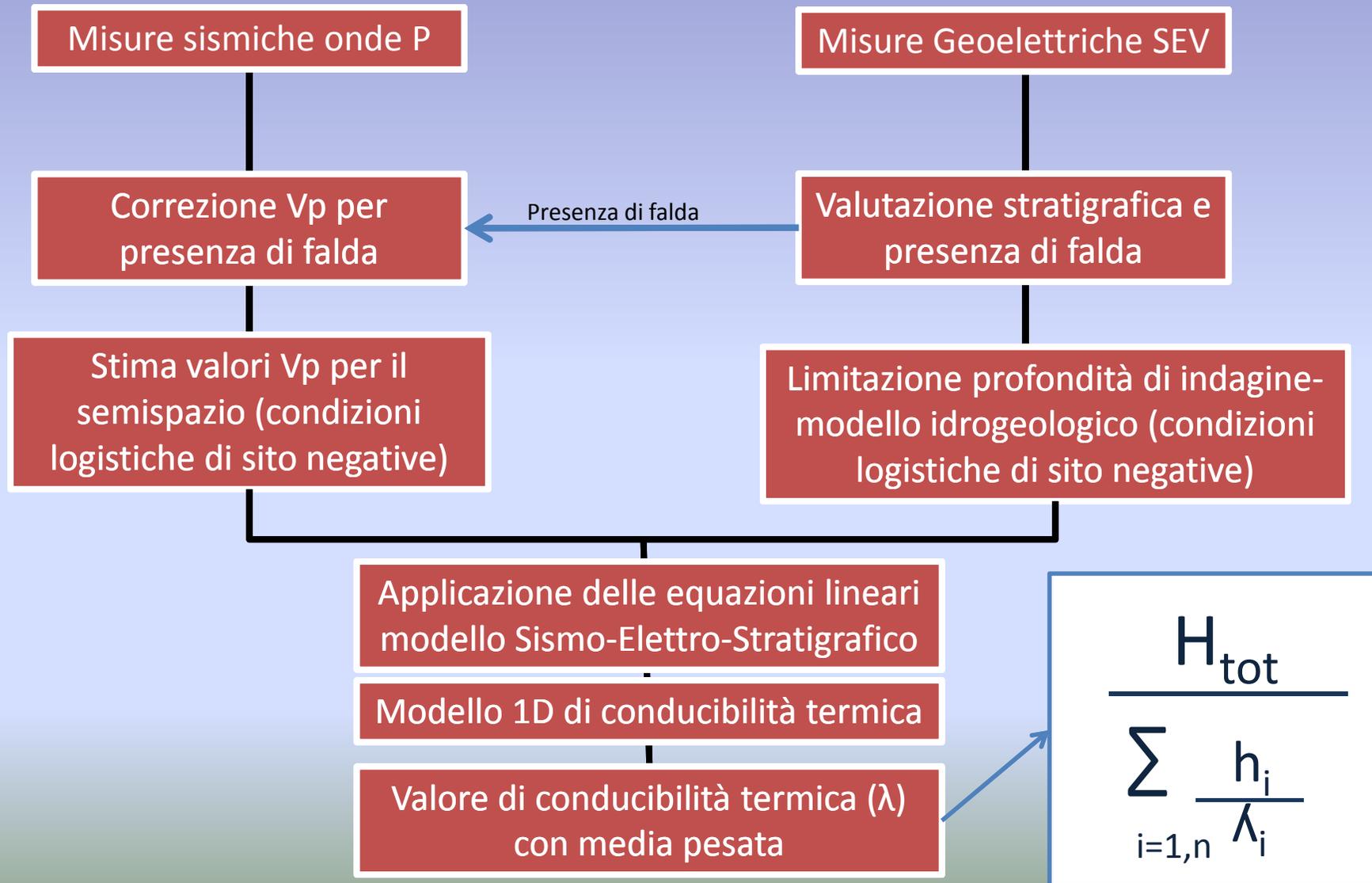
Il **Geologo** deve generare un modello stratigrafico che sia il più reale possibile in quanto determinante per una corretta interpretazione del SEV.

**La max profondità di indagine del sistema geotermico è condizionato da quella raggiunta dal SEV, in quanto l'unico metodo indiretto che può dare indicazione sulla presenza di falda nel sottosuolo.**

Vp (m/s)	$\lambda$ (saturo)	$\lambda$ (non saturo)
1350	2.325638	0.61475
2100	2.504888	0.79395

Da ciò si nota come la presenza di falda possa a differenza della misura delle Vp, influire notevolmente sulla stima del valore di  $\lambda$

# Riepilogo



# Test “Cantiere Talenti (RM)”

## Indagini Indirette

- Tomografia sismica superficiale
- Indagine elettrica SEV

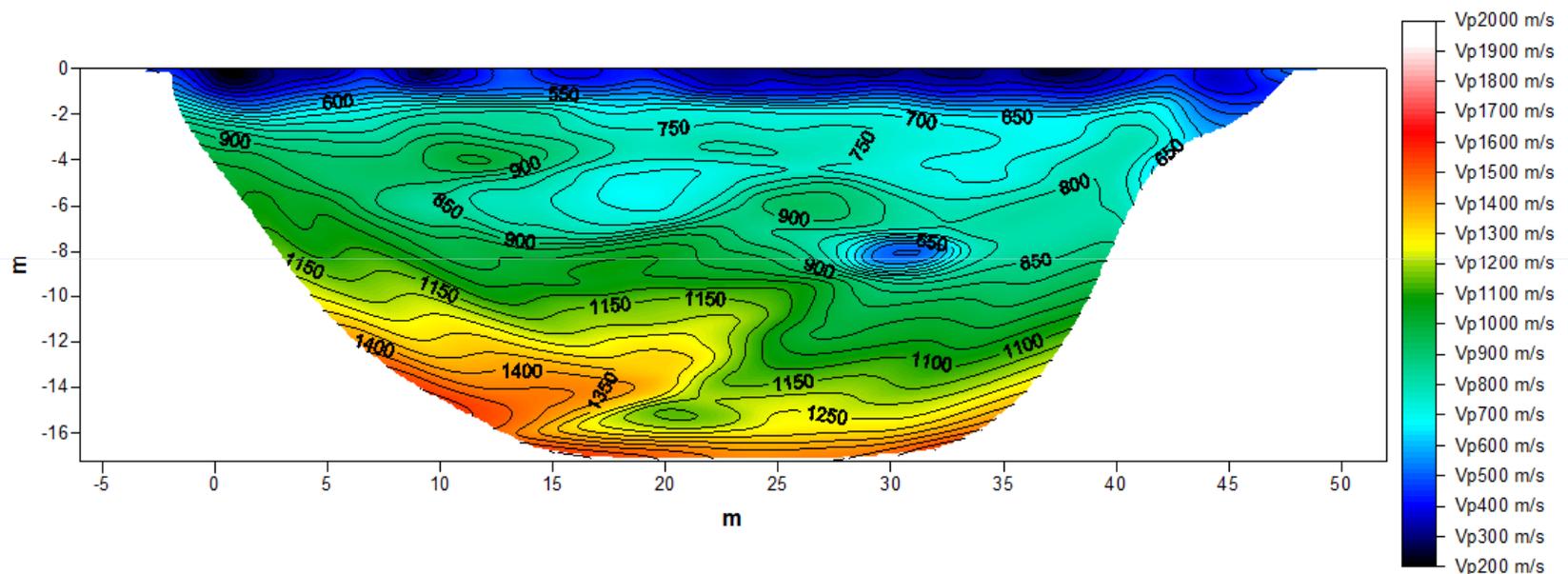
## Indagini Dirette

- N° 3 sondaggi geognostici a cc spinti fino a circa 100,0 m di profondità attrezzati con piezometro

Definizione di un modello 1D e Stima del valore medio di conducibilità termica ( $\lambda$ )

# Test "Cantiere Talenti (RM)"

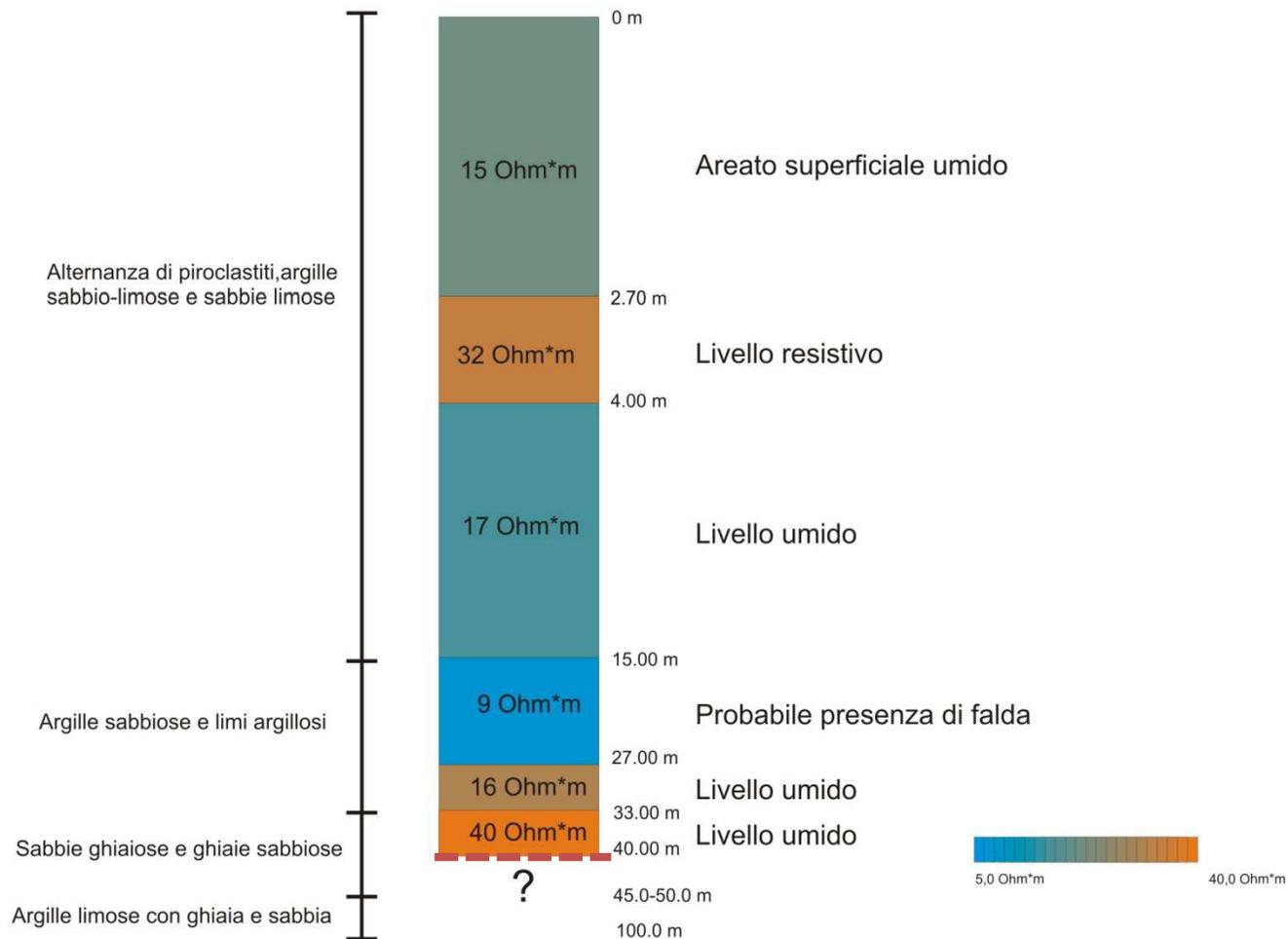
Tomografia sismica superficiale onde P- Cantiere "Talentì (RM)"



Indagine	Lunghezza dello stendimento	Step geofoni	N° energizzazioni
Tomografia sismica superficiale	46,0 m	2,0 m	13

# Test “Cantiere Talenti (RM)”

Colonna elettrostratigrafica indagine SEV- Talenti (RM)



# Test “Cantiere Talenti (RM)””



Fase di acquisizione del sondaggio elettrico verticale SEV



Fase di acquisizione dati per la tomografia sismica superficiale

# Test “Cantiere Talenti (RM)”

## Risultati indagini

Litotecnica	Spessore strati h (m)	Profondità (m)	Densità $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Porosità $\phi$ (%)	Modello 1D $\lambda$ Valori di $\lambda$ [W (m K <sup>-1</sup> )]	Valori di $\lambda$ [W (m K <sup>-1</sup> )] a profondità crescente con media pesata	Modello 1D Vp Velocità delle onde P (m/s)	Modello 1D $\rho$ Resistività Ohm*m	Falda	Valori di $\lambda$ [W (m K <sup>-1</sup> )] Da Ground Response Test
Piroclastiti Argille sabbio limose e sabbie limose	3,0	3,0	1,80	0,25	0,27	0,27	566,0	15,0	no	<b>1,4-1,6</b>
	1,0	4,0	1,80	0,25	0,39	0,29	815,0	32,0	no	
	11,0	15,0	1,85	0,25	0,48	0,41	1010,0	17,0	no	
Argille sabbiose e limi argillosi	16,0	33,0	1,95	0,3	2,27	0,76	1565,0	9,0	si	
Sabbie ghiaiose e ghiaie sabbiose	7,0	40,0	2,0	0,3	2,36	0,86	1732,0	40,0	si	
	60,0	100,0	2,1	0,3	<u>2,54</u>	<b>1,42</b>	2100,0	-	si?	

..... Profondità max di indagine sismica

..... Profondità max di indagine SEV

# Test “Cantiere Ostia (RM)””

Indagini Indirette

- Tomografia sismica superficiale

Indagini Dirette

- N° 2 sondaggi geognostici a cc con piezometro spinti fino a circa 100,0 m di profondità

Definizione di un modello 1D e Stima del valore medio di conducibilità termica ( $\lambda$ )

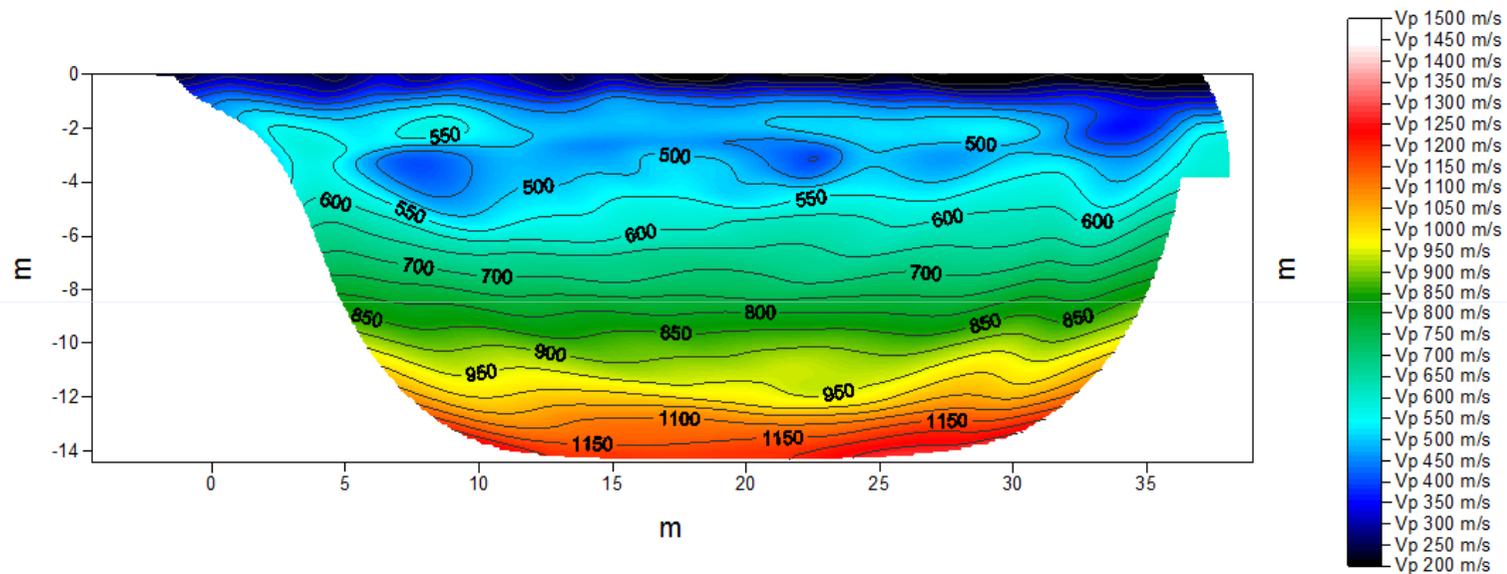
# “Cantiere Ostia (RM)”



Fase di acquisizione dati per la tomografia sismica superficiale

# Test "Cantiere Talenti (RM)"

Tomografia sismica superficiale onde P- Cantiere "Ostia (RM)"



Indagine	Lunghezza dello stendimento	Step geofoni	N° energizzazioni
Tomografia sismica superficiale	34,5 m	1,5 m	13

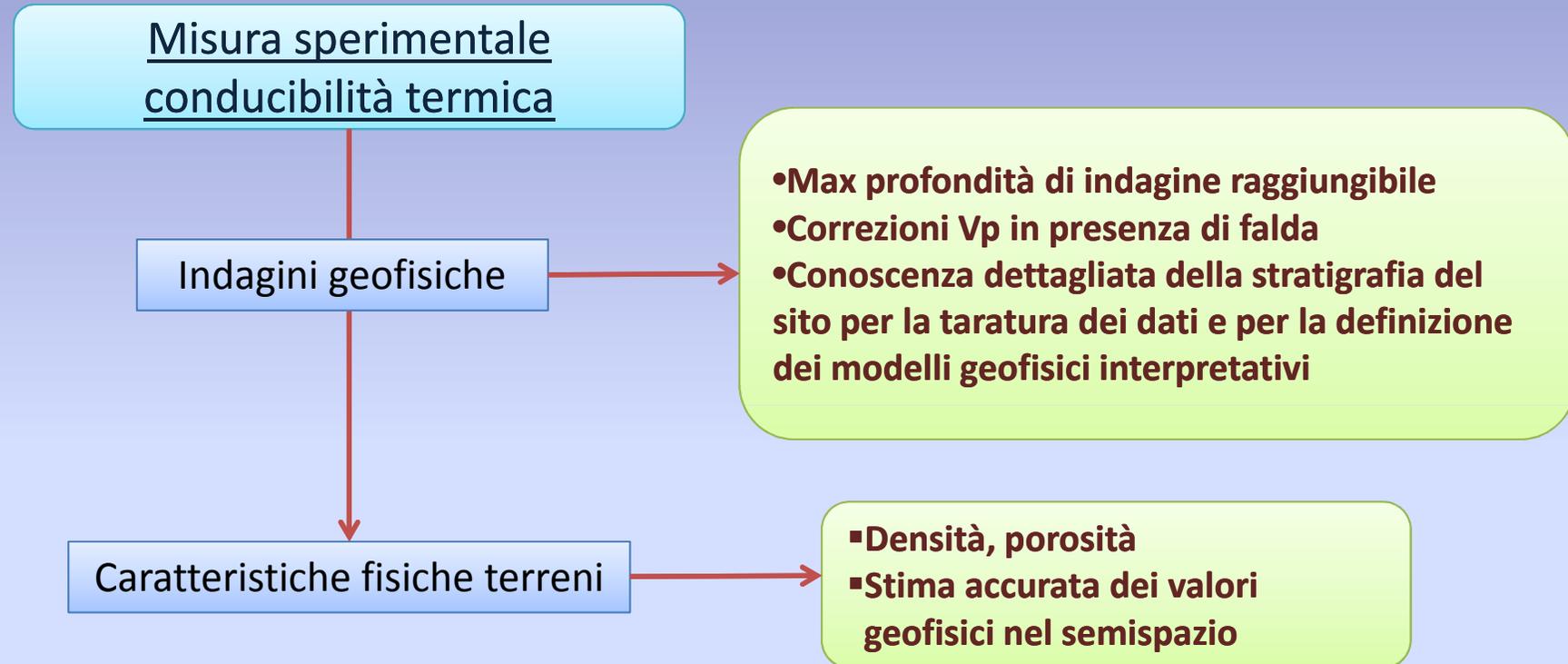
# Test “Cantiere Ostia (RM)”

## Risultati indagini

Litotecnica	Spessore strati h (m)	Profondità (m)	Densità $\rho$ ((T/m <sup>3</sup> ))	Porosità $\phi$ (%)	Modello 1D $\lambda$ Valori di $\lambda$ [W (m K <sup>-1</sup> )]	Valori di $\lambda$ [W (m K <sup>-1</sup> )] a profondità crescente con media pesata	Modello 1D Vp Velocità delle onde P (m/s)	Falda	Valore medio di $\lambda$ [W (m K <sup>-1</sup> )] Da Ground Response Test
Sabbia fine	5,0	5,0	1,90	0,34	0,13	0,13	550,0	no	<b>1,54</b>
Sabbia fine satura	11,0	14,0	1,95	0,32	2,31	0,33	950,0	si	
Sabbia fine satura con livello argilloso ( da -40 a -47m dal p.c.)	94,0	110,0	2,1	0,32	2,63	<u>1,41</u>	2100,0	si	

..... Profondità max di indagine sismica

# Considerazioni conclusive



Il riscontro mostrato tra i valori stimati e quelli misurati dal G.R.T. (Ground Response Test) nei siti esaminati confermano la necessità di una approfondita conoscenza dell'assetto geologico ed idrogeologico del territorio.