



*Ricostruzione e valorizzazione del paesaggio archeologico in ambiente  
costiero mediterraneo tramite tecnologie innovative non invasive*



# NUOVI METODI PER LA RICERCA IN ACQUE POCO PROFONDE. METODI ELETTRICI. PRIMI RISULTATI DELL'APPLICAZIONE NEL SITO DI NORA.

Francesco Loddo

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Facoltà di Ingegneria  
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI



## **LA RICERCA ARCHEOLOGICA IN AMBIENTE MARINO**

La ricerca archeologica in ambiente marino vede l'utilizzo di tecniche di indagine di tipo visivo, attraverso campagne di immersioni subacquee e registrazioni fotografiche o video, metodi di tipo geofisico che prevedono prevalentemente l'utilizzo di onde acustiche (Sonar, Ecosounder, ecc.), metodi magnetici per la ricerca di corpi metallici, o indagini invasive quali i saggi del fondale.

Alcuni limiti di tali metodologie sono:

- **INDAGINI VISIVE** - Difficoltà di rappresentazione del quadro d'insieme del sito studiato e quindi d'interpretazione;
- **METODI GEOFISICI "MARINI"** - Necessità di profondità nell'ordine del metro o della decina di metri per il corretto funzionamento della strumentazione o ristretto campo di applicazione nel caso dei metodi magnetici;
- Limiti derivanti dall'utilizzo di indagini invasive (Informazioni puntuali, difficoltà logistiche).



## **INNOVAZIONE RISPETTO ALLO STATO DELL'ARTE: I METODI ELETTRICI**

### **CRITICITA'**

- **METODOLOGICHE**

Difficile propagazione dei campi elettrici in mezzi molto conduttivi;

- **STRUMENTALI**

Potenza della strumentazione e velocità di acquisizione;

- **LOGISTICHE**

Sviluppo di sistemi adatti per le prospezioni a mare;

- **ELABORAZIONE DATI**

Problemi di inversione dei dati in mezzi molto conduttivi;

- **INTERPRETAZIONE**

Variazioni di resistività in un campo molto ristretto di valori.



## **INNOVAZIONE RISPETTO ALLO STATO DELL'ARTE: I METODI ELETTRICI**

### **OBIETTIVI**

- Sperimentazione di tecniche geofisiche utilizzate in ambiente terrestre in contesti poco comuni quali le acque poco profonde;
- Estensione delle applicazioni dei metodi geofisici in nuovi contesti, come ad esempio la ricerca archeologica in ambiente marino;
- Lo sviluppo di sistemi di velocizzazione delle acquisizioni, che consentano la memorizzazione di notevoli quantità di dati in breve tempo, con la possibilità di indagare aree sempre più vaste in tempi brevi;
- Verifica della profondità di indagine e della capacità risolutiva in mezzi molto conduttivi;

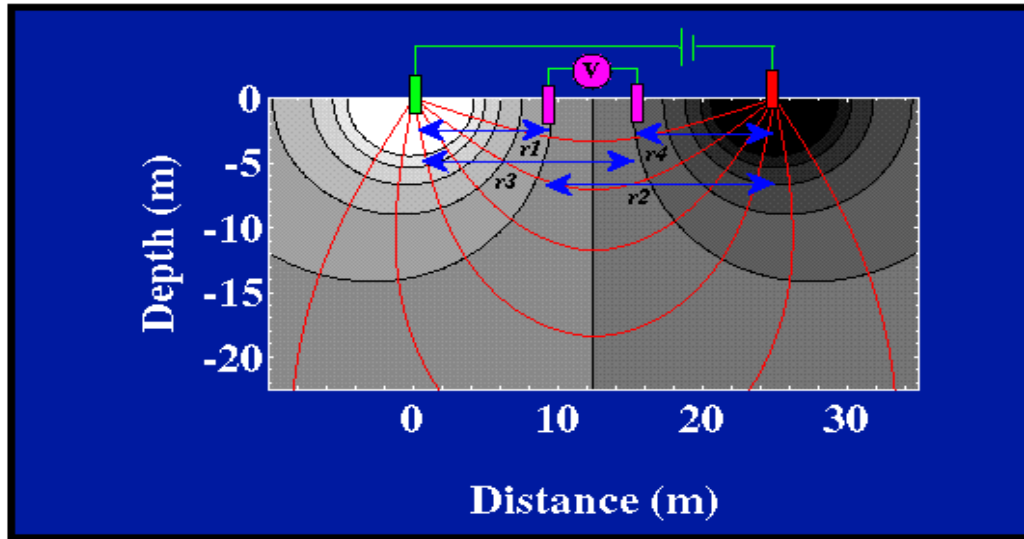


## **INNOVAZIONE RISPETTO ALLO STATO DELL'ARTE: I METODI ELETTRICI**

### **VANTAGGI**

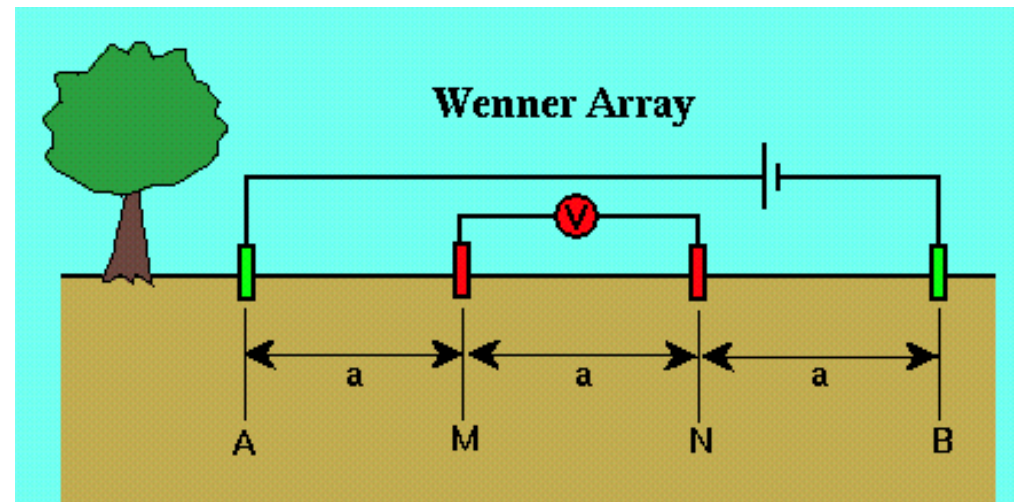
- Estensione delle indagini archeologiche o geomorfologiche in acque poco profonde;
- Possibilità di indagare vaste aree in tempi brevi acquisendo notevoli quantità di dati;
- Assoluta non invasività;
- Rendering 3D per la visualizzazione ed interpretazione dei risultati.

## I METODI ELETTRICI



- Dipolo di corrente;
- Dipolo di potenziale;
- Misura della resistività apparente del sottosuolo;

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{i} \left[ \frac{1}{\left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)} \right]$$

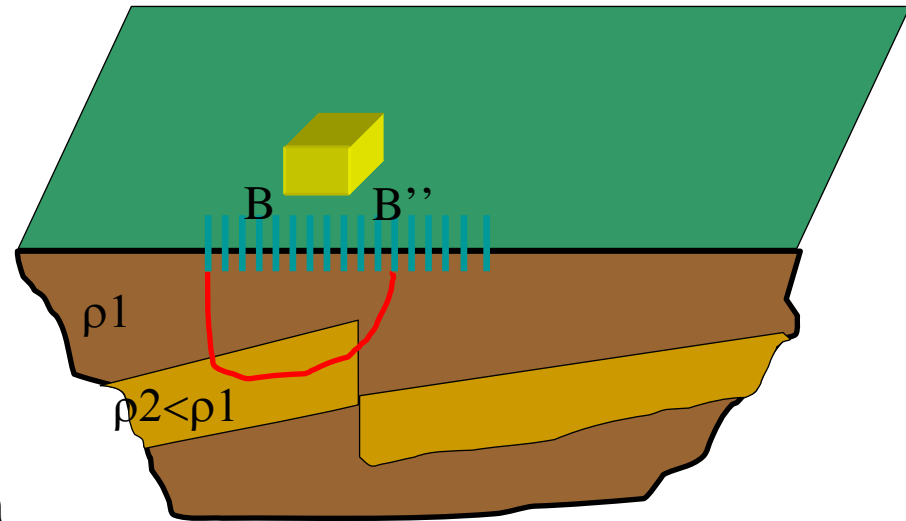




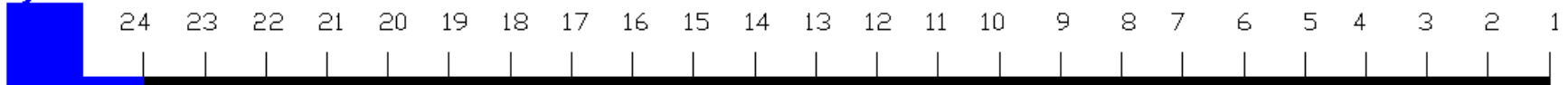
## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

La tomografia elettrica è un metodo geofisico che consente di misurare le caratteristiche elettriche del sottosuolo e restituire le informazioni ottenute in rappresentazioni bidimensionali e tridimensionali.

Le misure vengono eseguite tramite uno stendimento con un numero elevato di elettrodi infissi nel terreno e posti ad una certa distanza l'uno dall'altro.



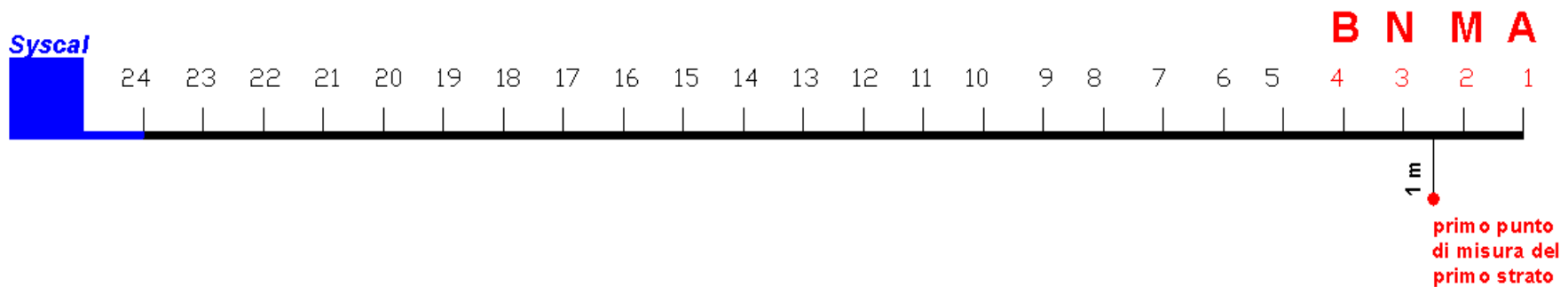
Syscal





## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

La misura eseguita tramite ciascun quadripolo viene riferita al centro dello stesso, ad una profondità che dipende dalla spaziatura tra gli elettrodi e dal tipo di quadripolo utilizzato.

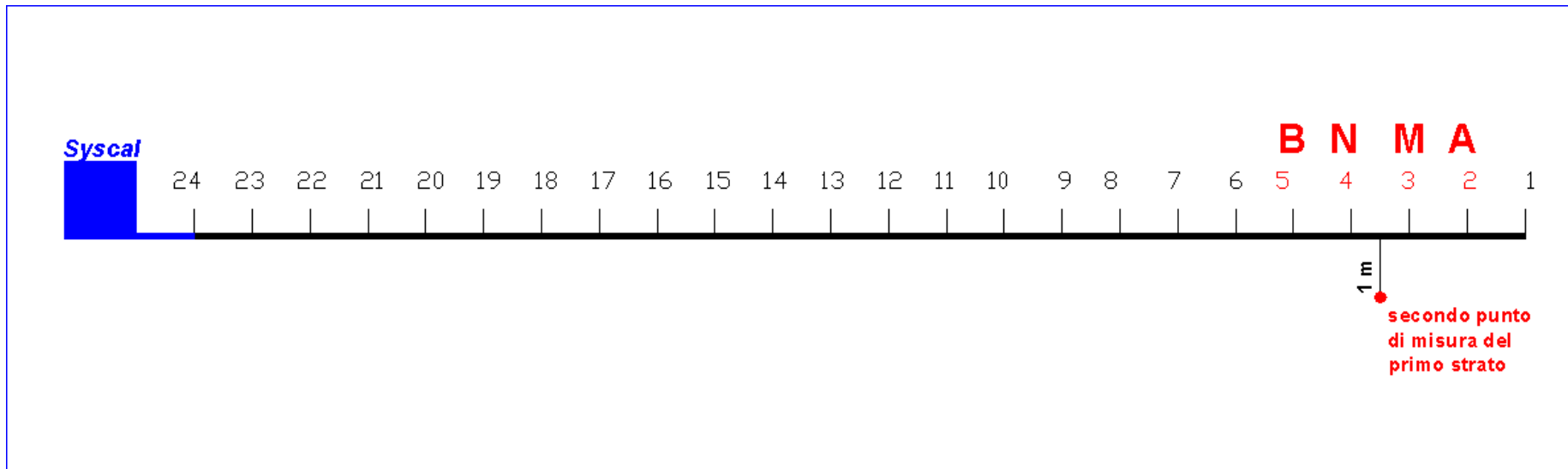






## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

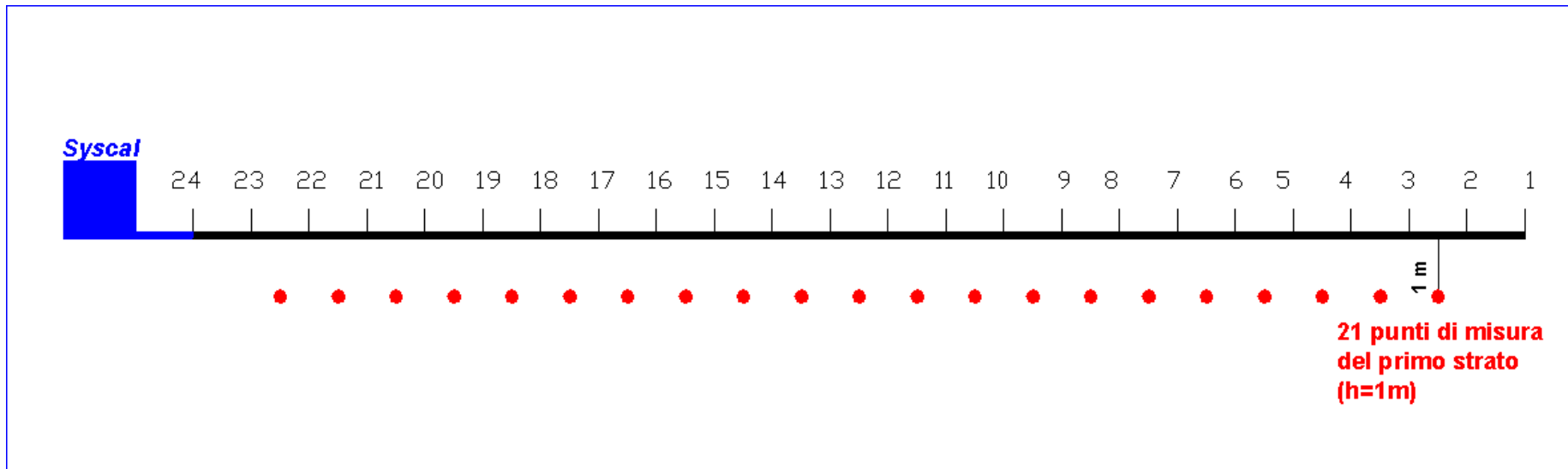
Traslando il quadripolo lungo lo stendimento e mantenendo costante la spaziatura tra gli elettrodi è possibile ottenere una distribuzione orizzontale delle resistività del sottosuolo.





## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

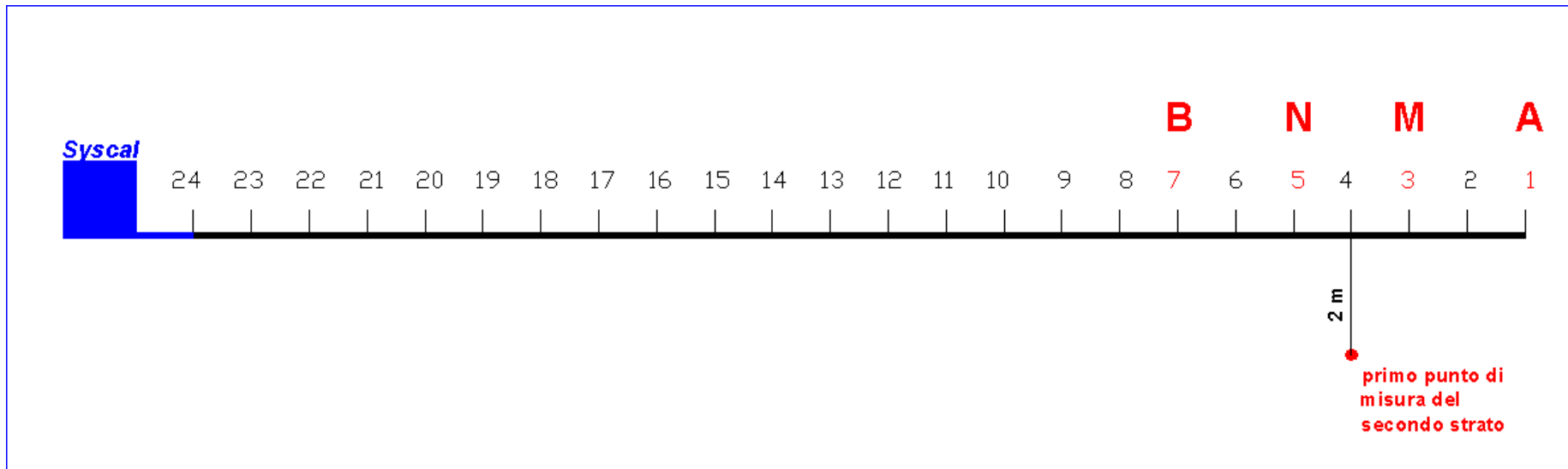
Traslando il quadripolo lungo lo stendimento e mantenendo costante la spaziatura tra gli elettrodi è possibile ottenere una distribuzione orizzontale delle resistività del sottosuolo.





## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

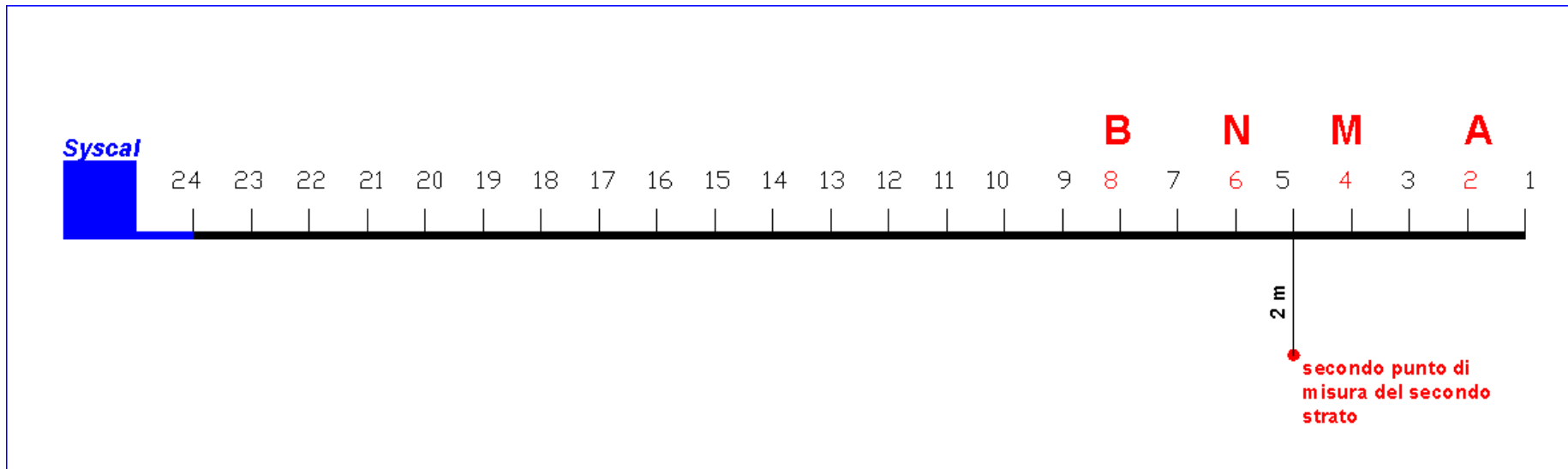
Aumentando la spaziatura degli elettrodi il punto misurato sarà traslato di una certa grandezza e riferito ad una profondità maggiore.





## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

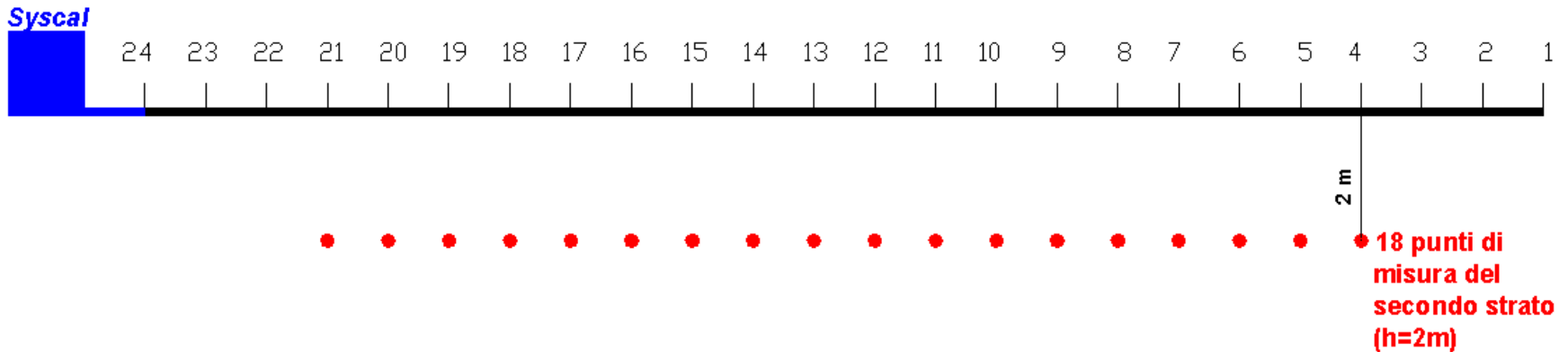
Traslando il quadripolo lungo lo stendimento e mantenendo costante la spaziatura tra gli elettrodi si otterrà una linea di resistività posta a maggior profondità.





## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

Traslando il quadripolo lungo lo stendimento e mantenendo costante la spaziatura tra gli elettrodi si otterrà una linea di resistività posta a maggior profondità.



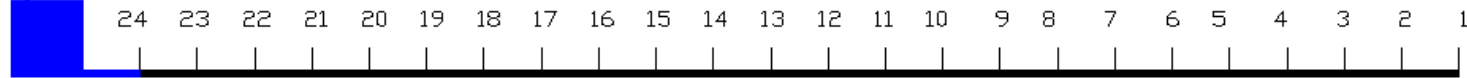


## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

La strumentazione gestisce in maniera automatica tali operazioni che vengono precedentemente programmate dall'operatore.

In questo modo è possibile ottenere valori di resistività del sottosuolo a diverse profondità, lungo stendimenti più o meno estesi, in maniera veloce.

Syscal



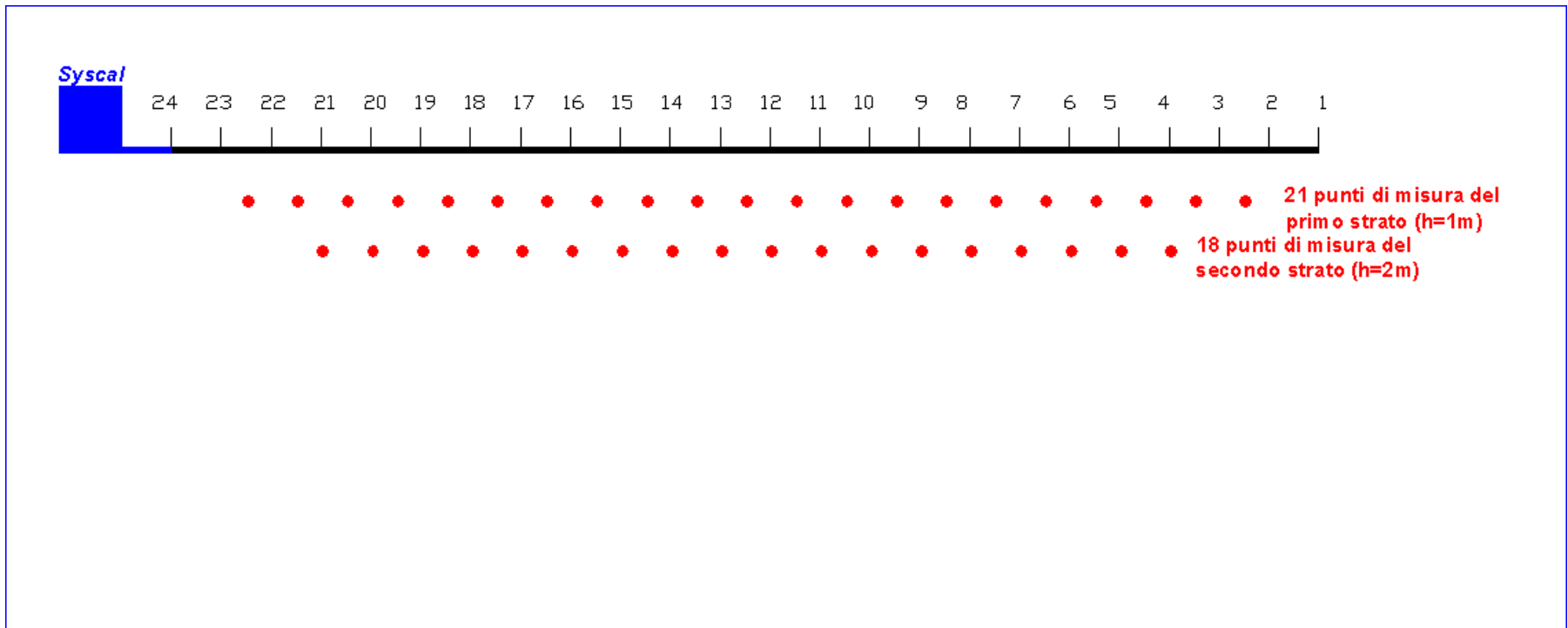
21 punti di misura del  
primo strato (h=1m)



## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

La strumentazione gestisce in maniera automatica tali operazioni che vengono precedentemente programmate dall'operatore.

In questo modo è possibile ottenere valori di resistività del sottosuolo a diverse profondità, lungo stendimenti più o meno estesi, in maniera veloce.

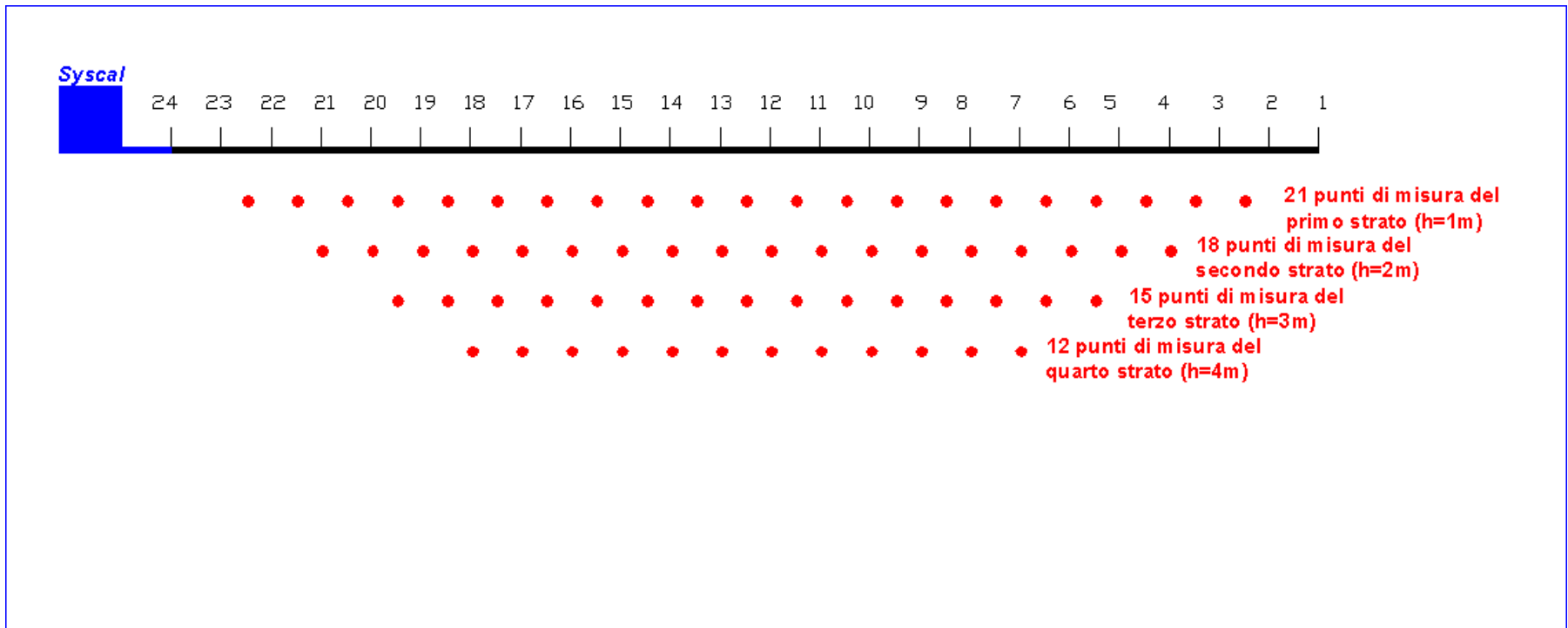




## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

La strumentazione gestisce in maniera automatica tali operazioni che vengono precedentemente programmate dall'operatore.

In questo modo è possibile ottenere valori di resistività del sottosuolo a diverse profondità, lungo stendimenti più o meno estesi, in maniera veloce.



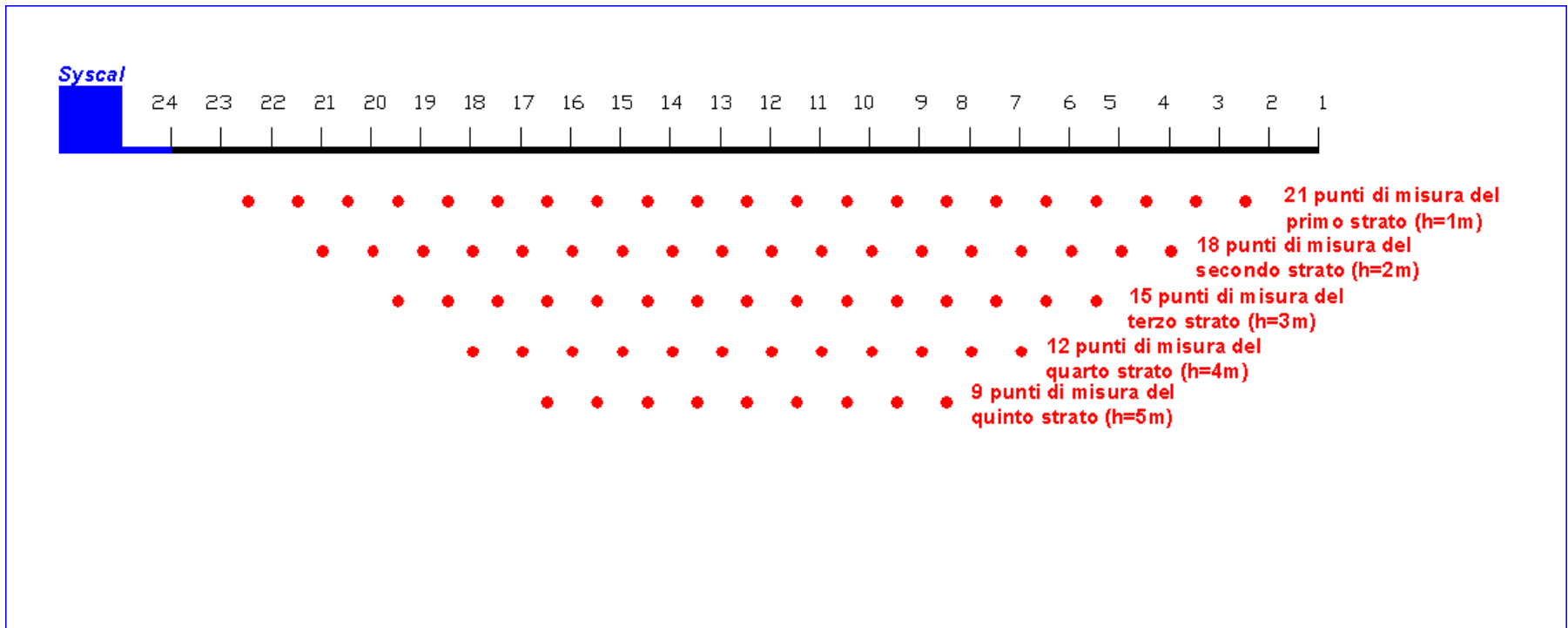




## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

La strumentazione gestisce in maniera automatica tali operazioni che vengono precedentemente programmate dall'operatore.

In questo modo è possibile ottenere valori di resistività del sottosuolo a diverse profondità, lungo stendimenti più o meno estesi, in maniera veloce.

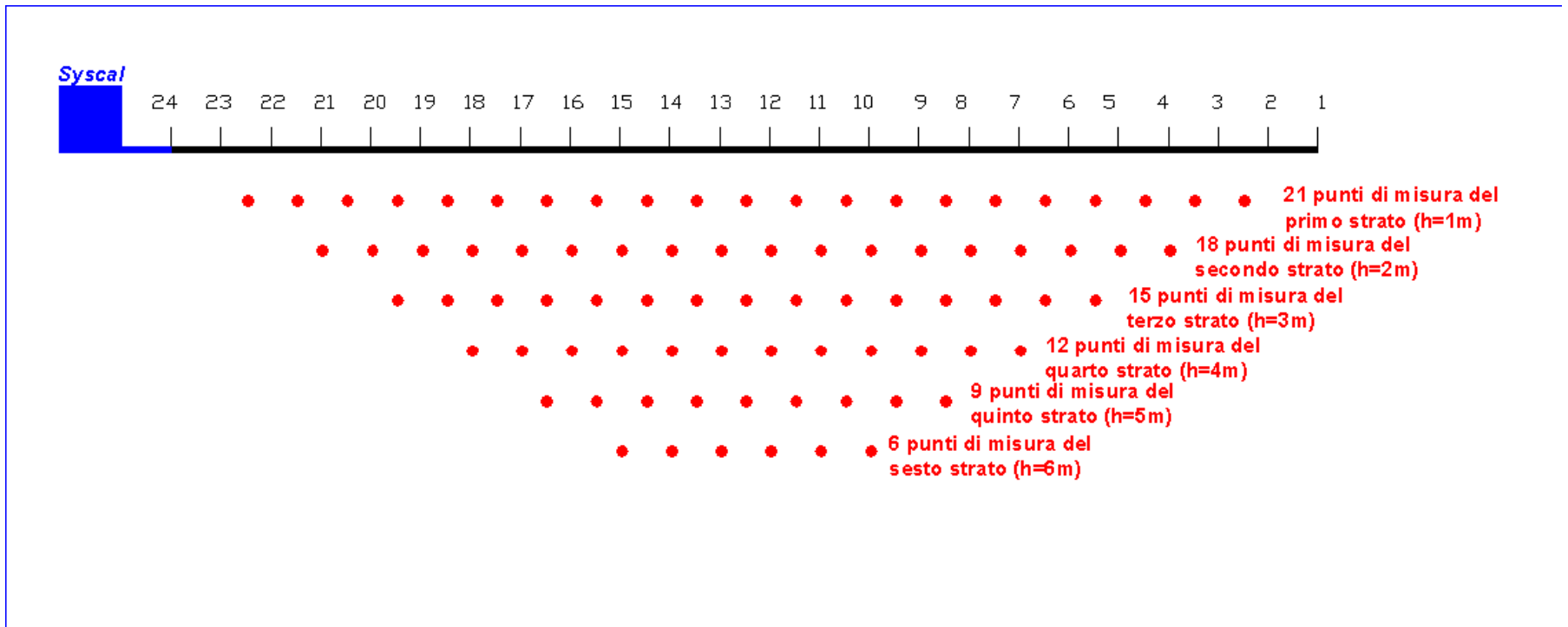




## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

La strumentazione gestisce in maniera automatica tali operazioni che vengono precedentemente programmate dall'operatore.

In questo modo è possibile ottenere valori di resistività del sottosuolo a diverse profondità, lungo stendimenti più o meno estesi, in maniera veloce.

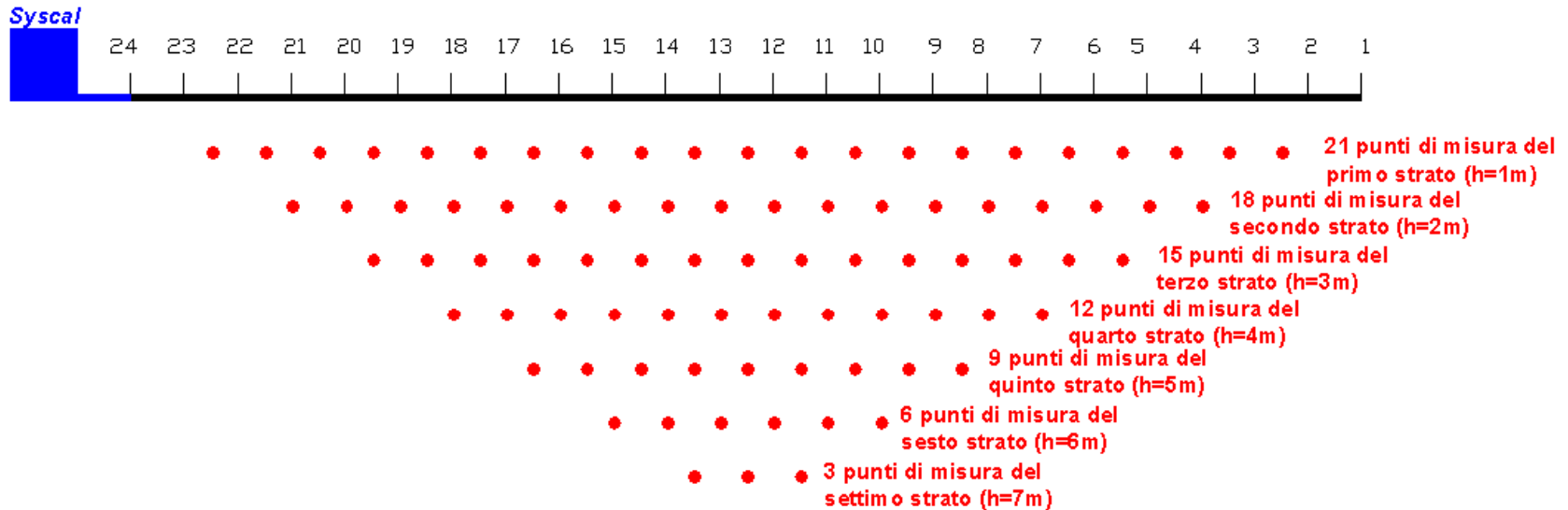




## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

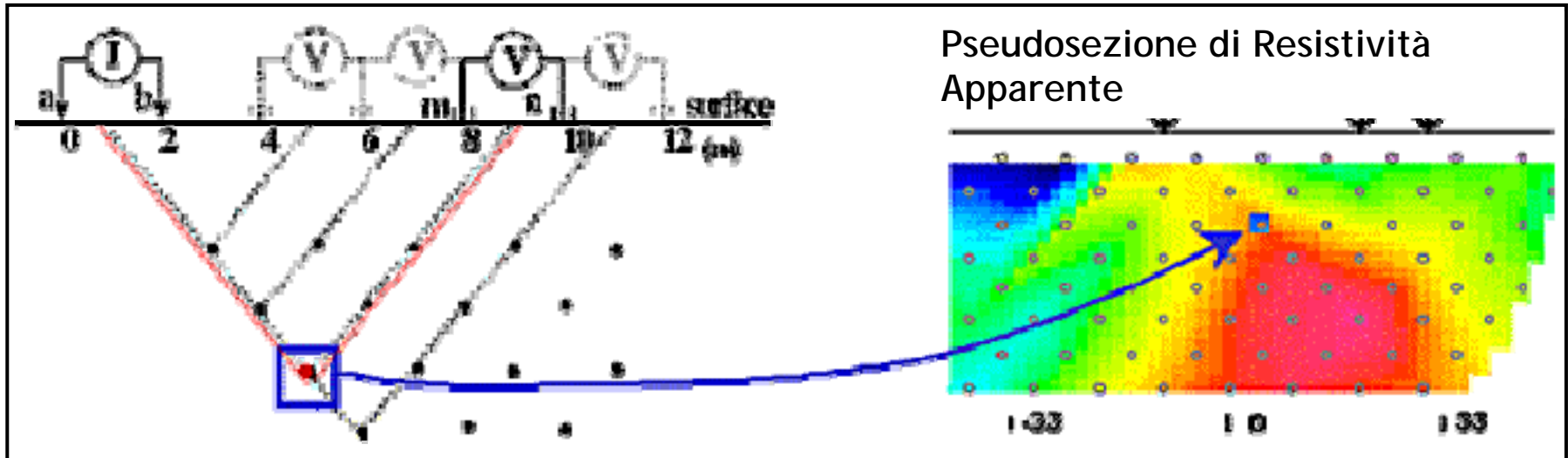
La strumentazione gestisce in maniera automatica tali operazioni che vengono precedentemente programmate dall'operatore.

In questo modo è possibile ottenere valori di resistività del sottosuolo a diverse profondità, lungo stendimenti più o meno estesi, in maniera veloce.



## I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

Si arriva quindi alla definizione di Pseudosezioni di Resistività Apparente, ossia distribuzioni spaziali secondo geometrie convenzionali dei valori di resistività misurati.



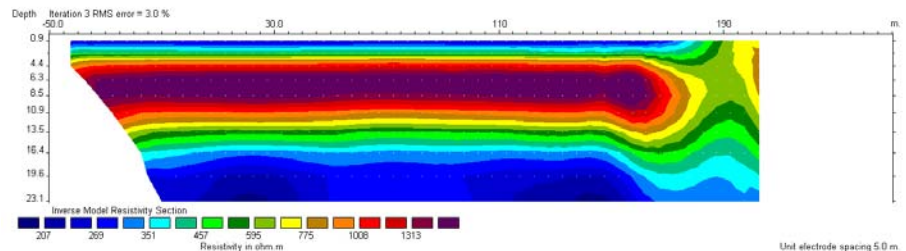
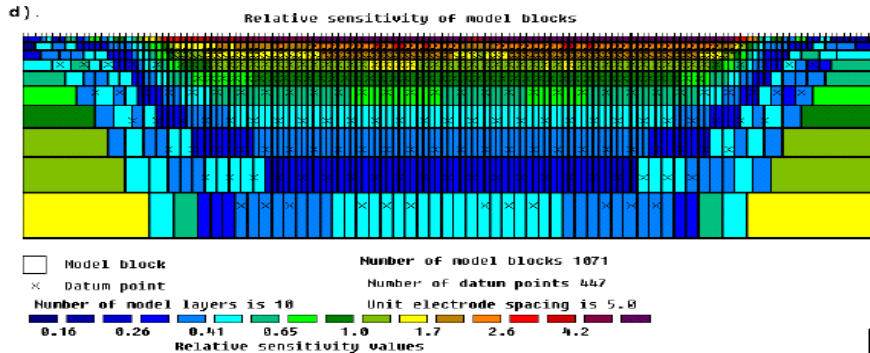
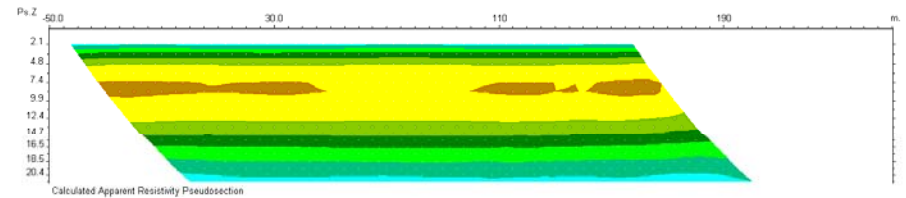
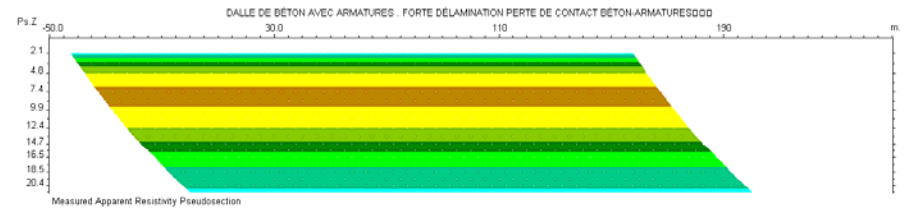
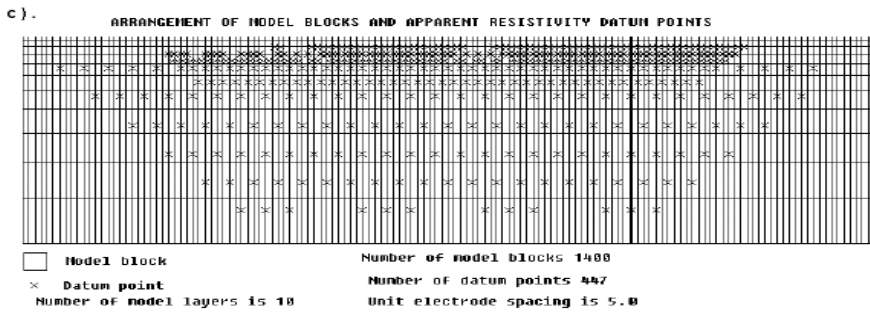


# I METODI ELETTRICI: LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

## DISCRETIZZAZIONE DEL SOTTOSUOLO



## SOLUZIONE DI PROBLEMI INVERSI



## RESISTIVITA' REALE



# TOMOGRAFIA ELETTRICA IN AMBIENTE MARINO: Misure Statiche ed Elettrodi sul Fondo

## SITO STUDIATO – Mothia, Isola di San Pantaleo, Sicilia





## **TOMOGRAFIA ELETTRICA IN AMBIENTE MARINO: Misure Statiche ed Elettrodi sul Fondo**

- Elettrodi impermeabili per l'esecuzione di tomografie elettriche in acque poco profonde e in modalità statica;
- Il sistema è costituito da elettrodi di acciaio inossidabile inseriti in un tubo in pvc e isolati in modo che l'acqua non possa penetrare all'interno;
- Cavo elettrico collega l'elettrodo all'interno del tubo e il takeout del cavo multipolare, che viene mantenuto sulla superficie dell'acqua tramite una camera d'aria lineare gonfiata ad aria compressa.





## **TOMOGRAFIA ELETTRICA IN AMBIENTE MARINO: Misure Statiche ed Elettrodi sul Fondo**

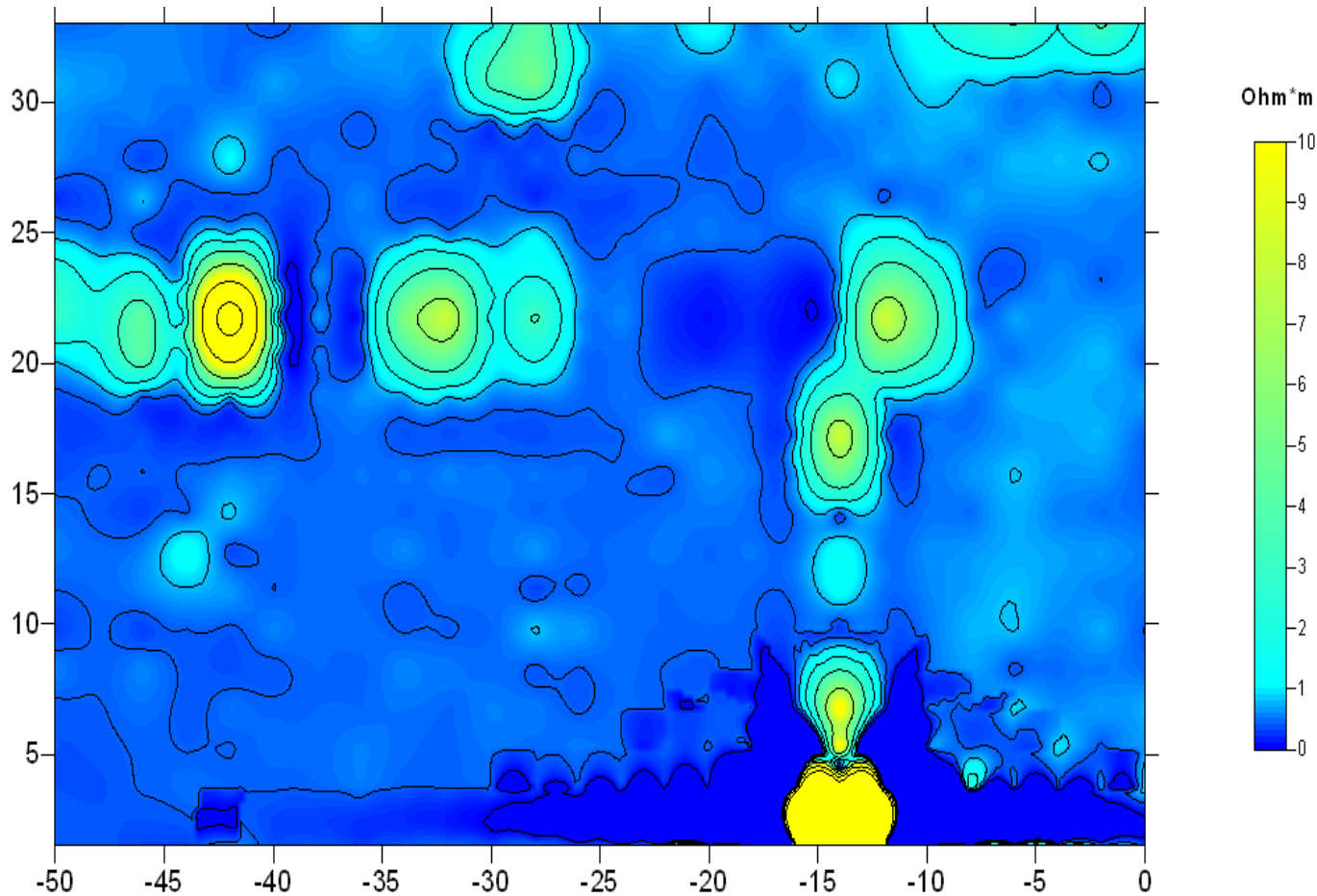
- Il sistema di acquisizione è il georesistivimetro della Iris Instruments, tipo Syscal Switch Pro, a 10 canali e 48 uscite, di potenza pari a 300 W;
- Sono stati eseguiti dei test con misure di tipo statico con un set di 26 tomografie elettriche con 24 elettrodi in un livello di acqua di mare compresa da 30 cm a 1,6 m;
- Sequenza di acquisizione di tipo Dipolo Dipolo;
- Spaziatura elettrodica di 1,5 m e una spaziatura tra i profili pari a 2 m;





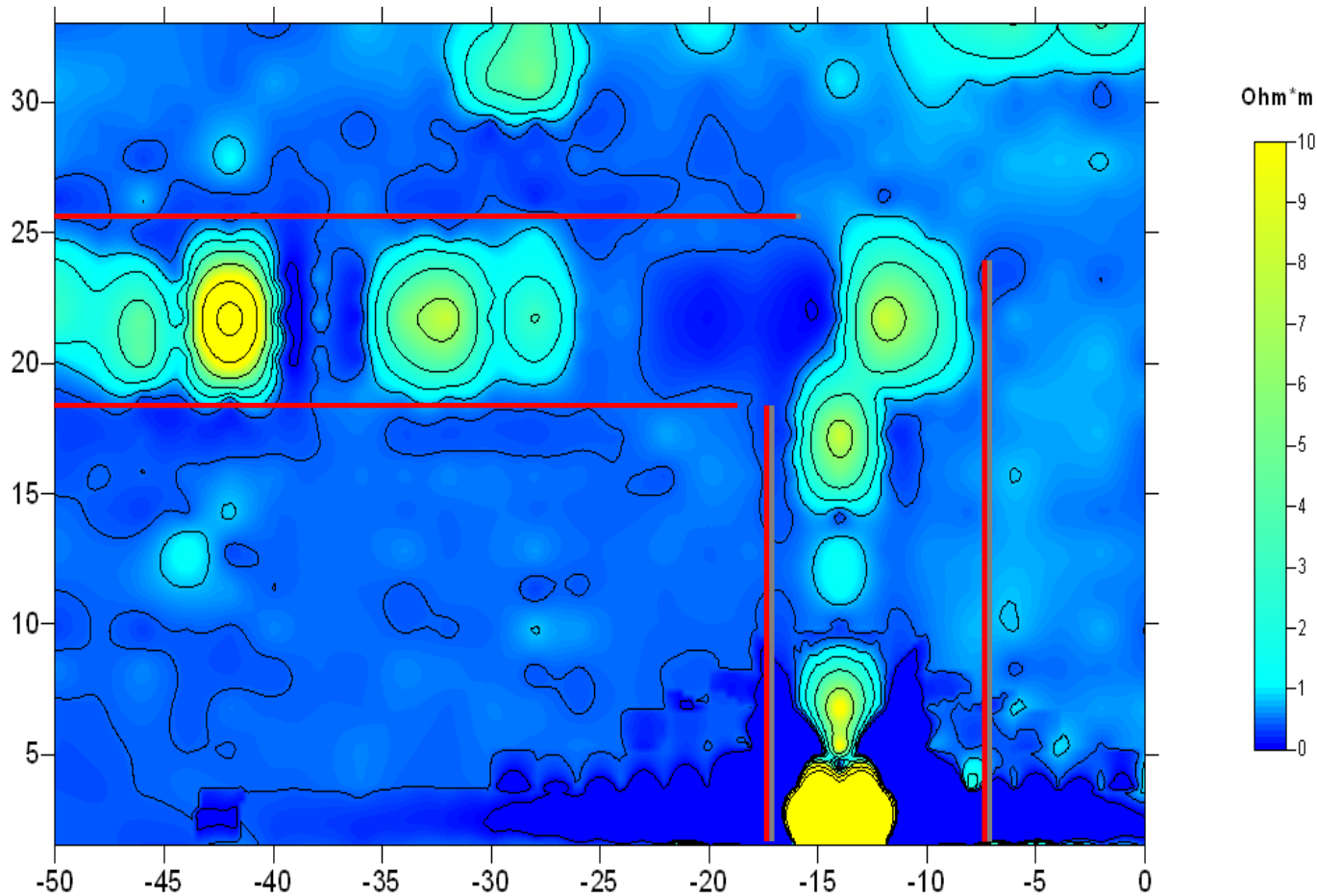


## RISULTATI: Mappa di Resistività a Profondità Pari a 1.6 m





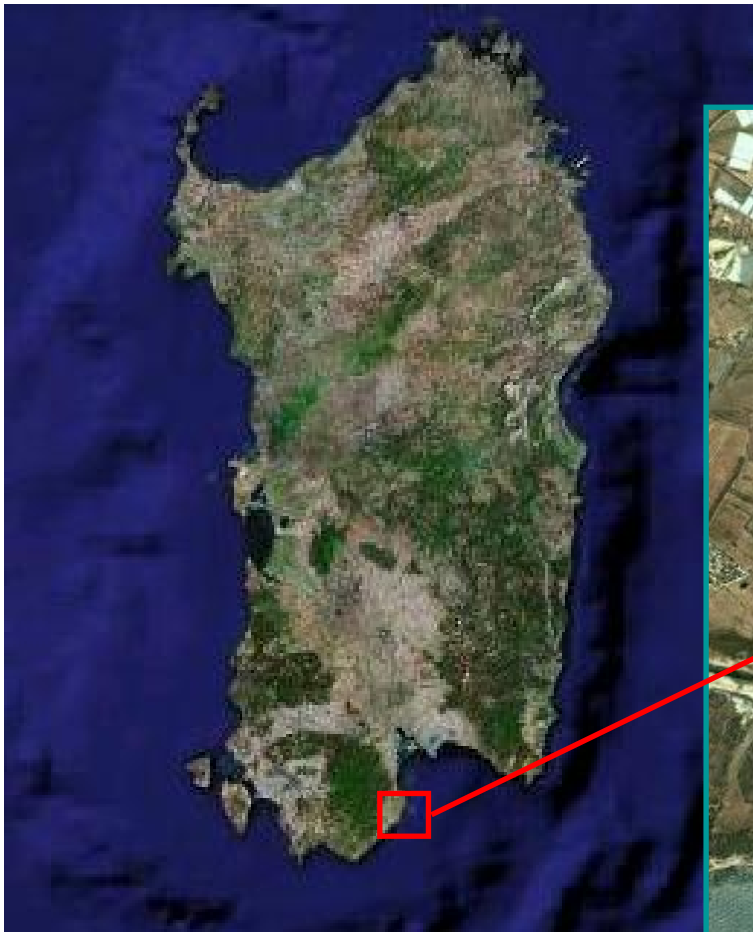
## RISULTATI: Mappa di Resistività a Profondità Pari a 1.6 m





## **TOMOGRAFIA ELETTRICA IN AMBIENTE MARINO: Misure in Continuo ed Elettrodi in Superficie**

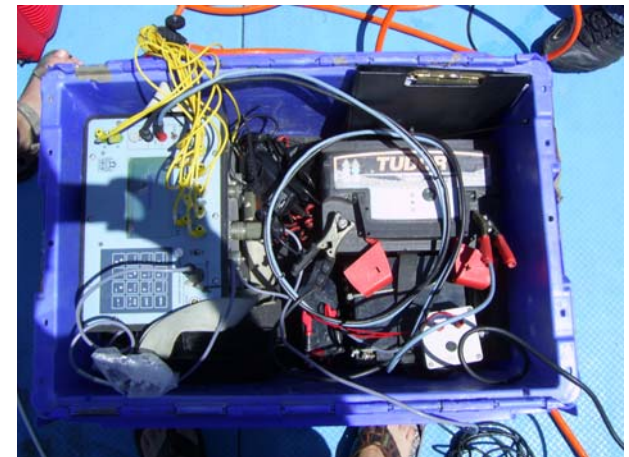
**SITO STUDIATO – Nora, Pula, Sardegna**





## **TOMOGRAFIA ELETTRICA IN AMBIENTE MARINO: Misure in Continuo ed Elettrodi in Superficie**

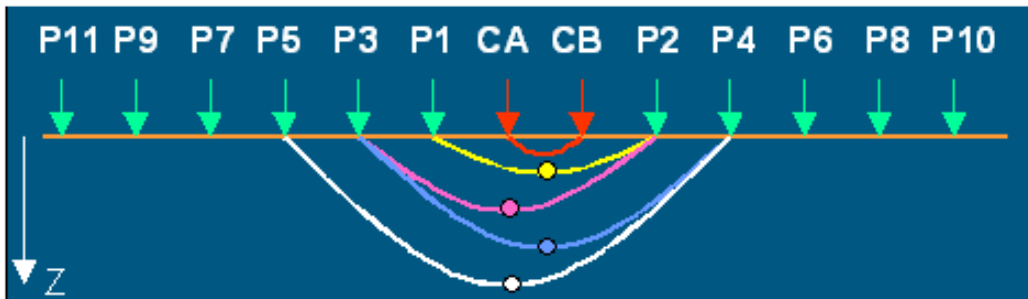
- Cavo speciale con 13 takeout in graffite, direttamente a contatto con la superficie dell'acqua senza ulteriori elettrodi e tenuto sospeso tramite una serie di galleggianti;
- Georesistivimetro della Iris Instruments, tipo Syscal Switth Pro, a 10 canali e 48 uscite, di potenza pari a 300 W;
- GPS tipo Garmin 420S;
- Ecosounder sullo scafo dell'imbarcazione;  
In tal modo si sono acquisite misure georeferenziate e corredate dei valori batimetrici.





## TOMOGRAFIA ELETTRICA IN AMBIENTE MARINO: Misure in Continuo ed Elettrodi in Superficie

- Computer portatile per la gestione della strumentazione;
- Software di acquisizione Sysmar della Iris Instruments con una sequenza programmata di quadripoli denominata “Reciprocal Wenner Array”.



- Per l'esecuzione dei test è stata utilizzata un'imbarcazione realizzata dal Consorzio Interuniversitario per le Scienze del Mare (CONISMA).



*Ricostruzione e valorizzazione del paesaggio archeologico in ambiente costiero mediterraneo tramite tecnologie innovative non invasive*



## **TOMOGRAFIA ELETTRICA IN AMBIENTE MARINO: Misure in Continuo ed Elettrodi in Superficie**





# SITO DI NORA – Misure Eseguite





# SITO DI NORA – Misure Eseguite





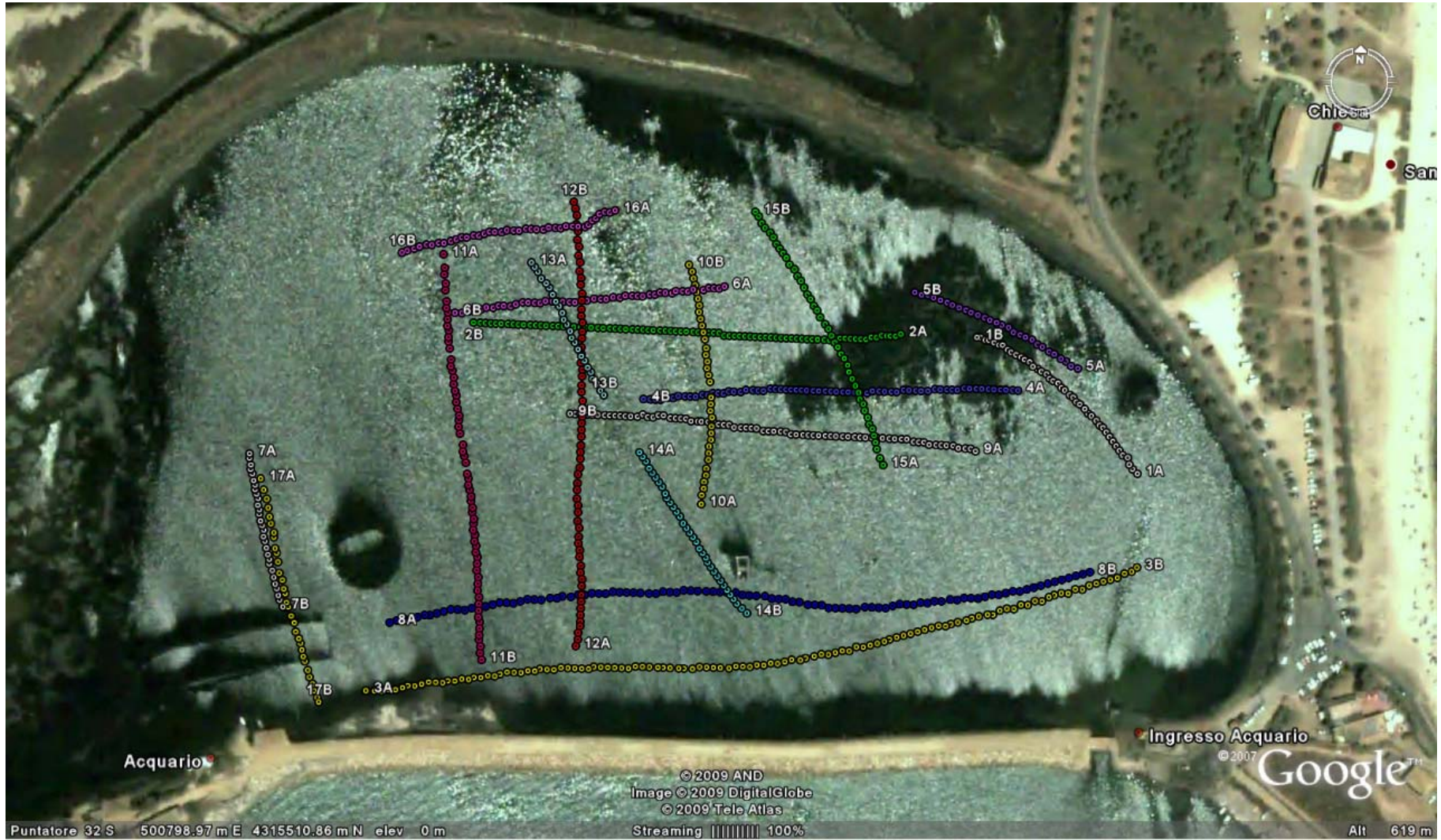


## SITO DI NORA – Misure Eseguite





# SITO DI NORA – Misure Eseguite



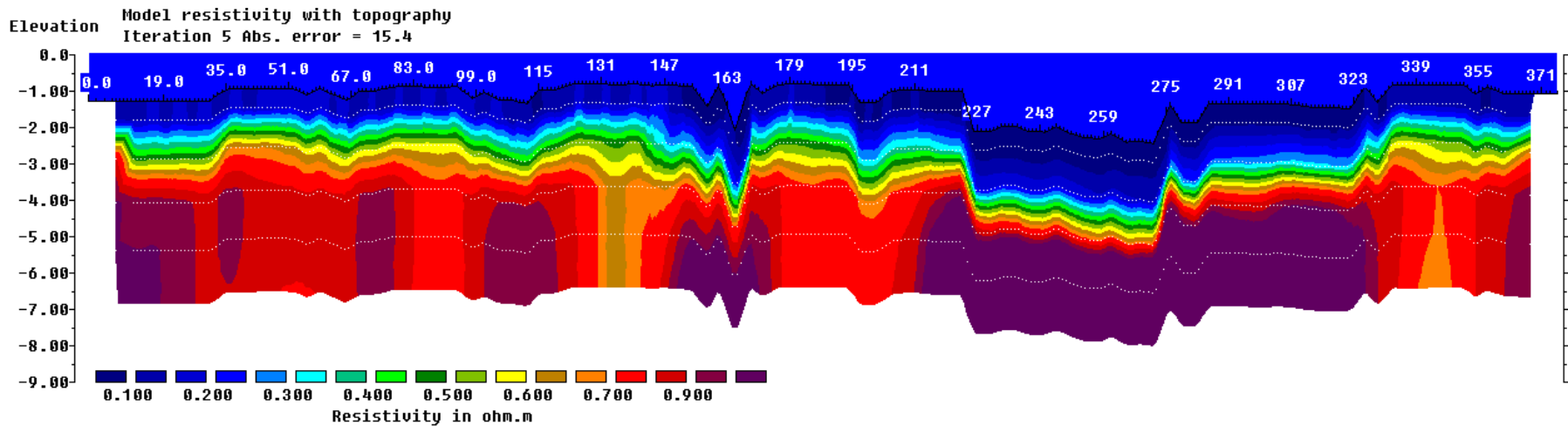
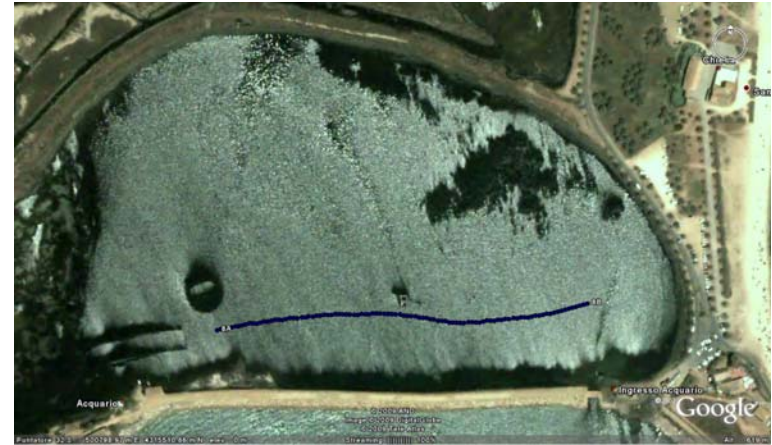


# SITO DI NORA – Misure Eseguite





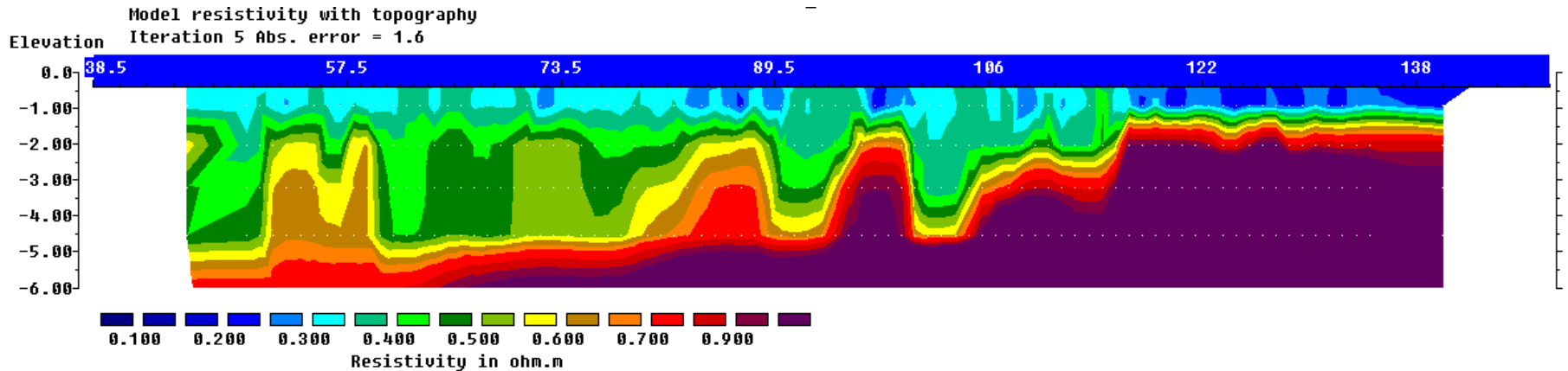
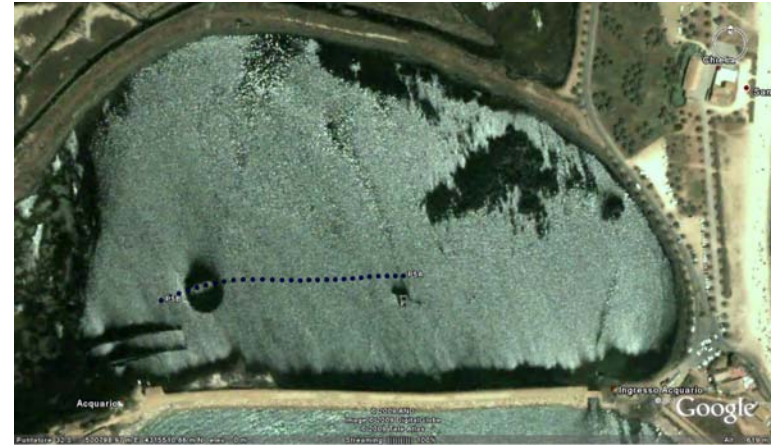
# RISULTATI: Sezioni di Resistività del fondo



Horizontal scale is 3.13 pixels per unit spacing  
Vertical exaggeration in model section display = 9.24  
First electrode is located at 0.0 m.  
Last electrode is located at 375.0 m.  
Water surface elevation is 0.00 meters.  
Water resistivity is 0.70 ohm.m



# RISULTATI: Sezioni di Resistività del fondo

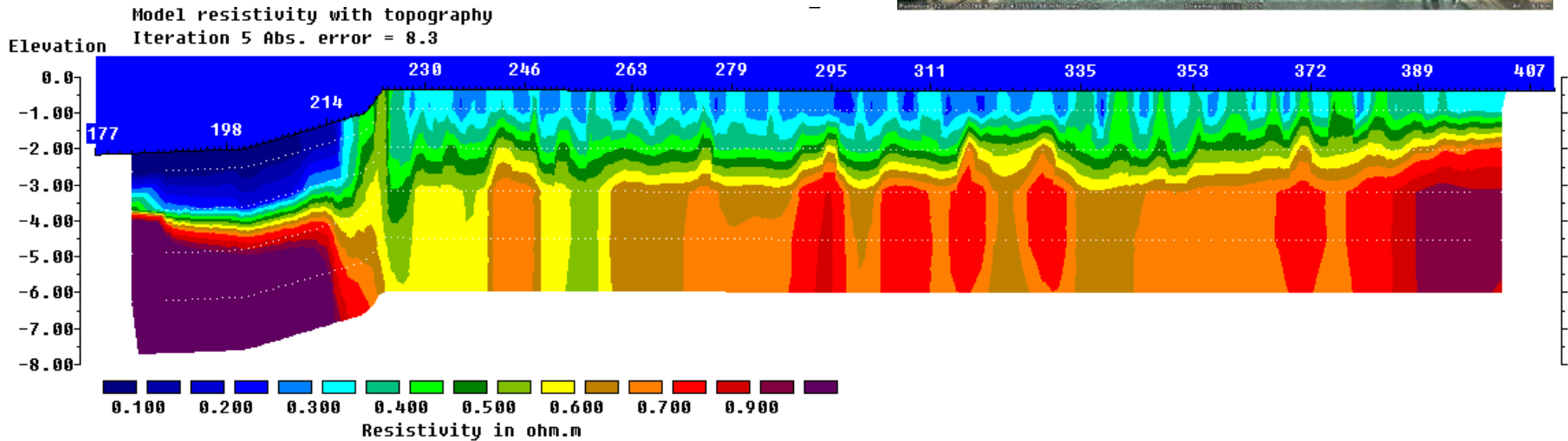
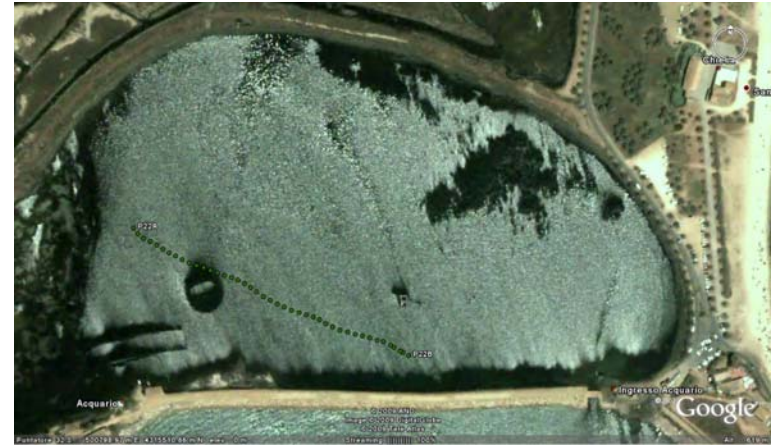


Unit Electrode Spacing = 1.00 m.

Horizontal scale is 10.10 pixels per unit spacing  
Vertical exaggeration in model section display = 2.69  
First electrode is located at 38.5 m.  
Last electrode is located at 109.0 m.  
Water surface elevation is 0.00 meters.  
Water resistivity is 0.70 ohm.m



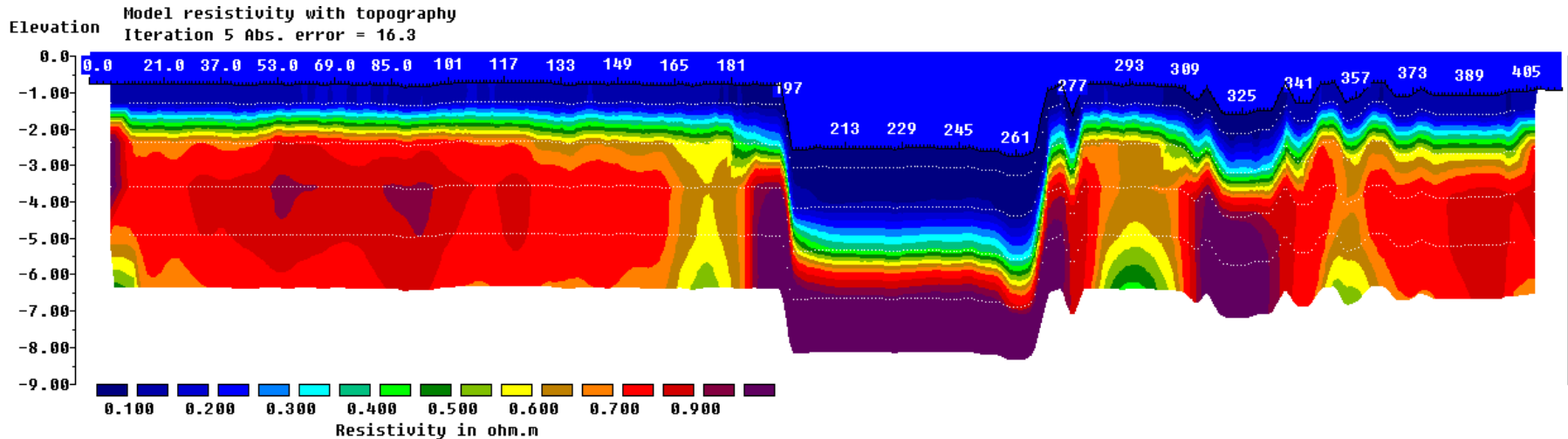
# RISULTATI: Sezioni di Resistività del fondo



Horizontal scale is 4.56 pixels per unit spacing  
Vertical exaggeration in model section display = 5.77  
First electrode is located at 176.5 m.  
Last electrode is located at 234.0 m.  
Water surface elevation is 0.00 meters.  
Water resistivity is 0.70 ohm.m



# RISULTATI: Sezioni di Resistività del fondo

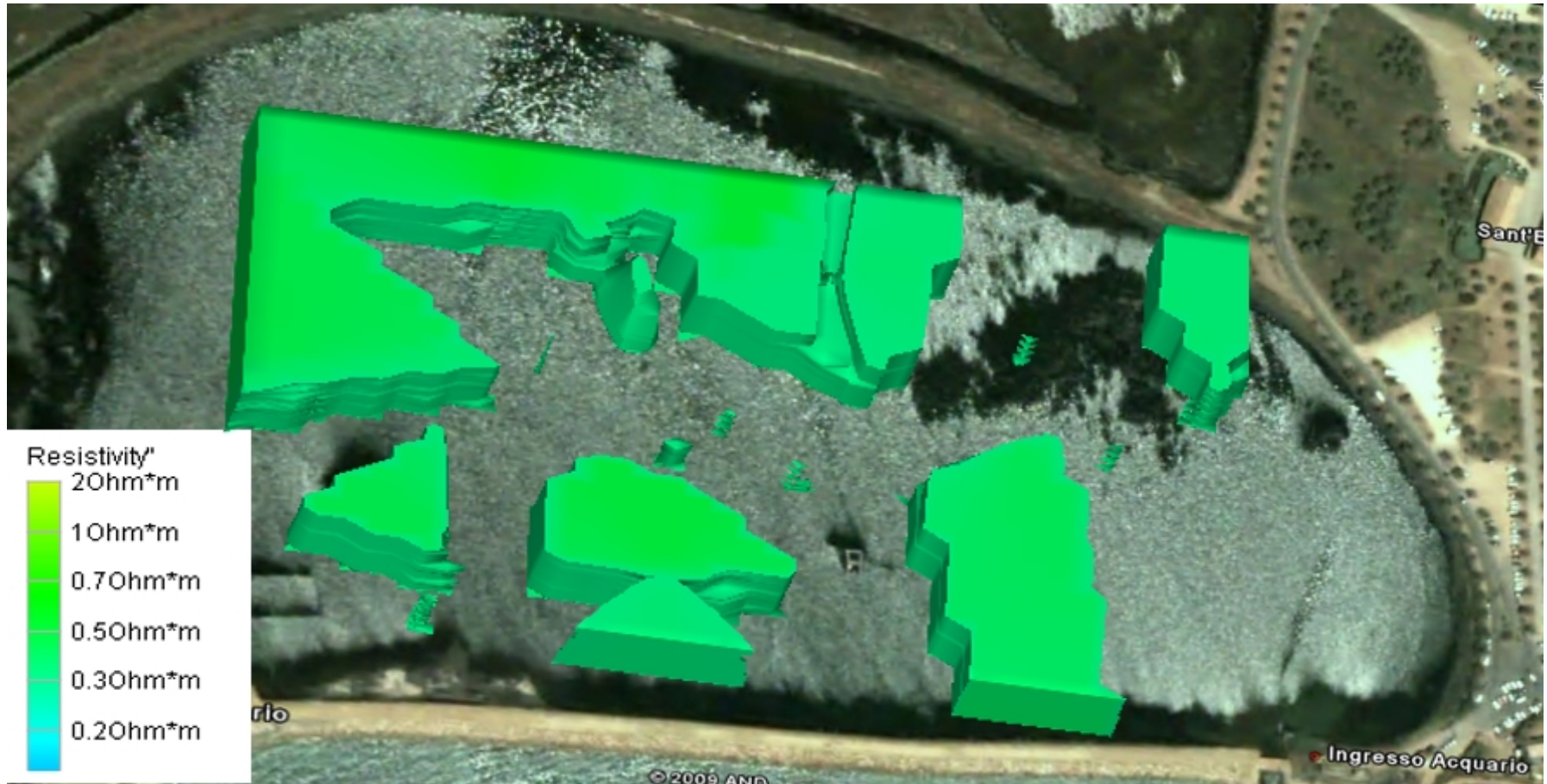


Unit Electrode Spacing = 1.00 m.

Horizontal scale is 2.81 pixels per unit spacing  
Vertical exaggeration in model section display = 10.23  
First electrode is located at 0.0 m.  
Last electrode is located at 415.0 m.  
Water surface elevation is 0.00 meters.  
Water resistivity is 0.70 ohm.m



## RISULTATI – Prima Ipotesi di Modello 3D







## RISULTATI – Possibile Interpretazione (0 spunti di discussione...)





## **RISULTATI – Possibile Interpretazione (O spunti di discussione...)**





## CONCLUSIONI...

- Sono stati realizzati con successo sistemi di acquisizione di dati elettrici per indagini in acque poco profonde;
- La tecnica utilizzata ha mostrato buone capacità risolutive e ottime profondità d'indagine raggiunte;
- I risultati ottenuti nei siti indagati sono di sicuro interesse;

## ...E SVILUPPI FUTURI

- Definizione di modelli di dettaglio tramite l'integrazione di dati elettrici e di altre tecniche di indagine, ad esempio sub bottom profiler;
- Integrazione dei dati geofisici con contenuti multimediali quali immagini, filmati, ecc., per la definizione di modelli sempre più verosimili e utilizzabili a fini museali.



*Ricostruzione e valorizzazione del paesaggio archeologico in ambiente  
costiero mediterraneo tramite tecnologie innovative non invasive*



# Grazie per l'attenzione!