

GEODES S.r.l.

GALLERIA IDROELETTRICA DI ALIMENTAZIONE DELL'INVASO DI
SAN GIACOMO AL VOMANO (TE)



Indagini geofisiche per la caratterizzazione stratigrafica

Relazione n:	22-181
Redatto da:	Dott. Geol. Emmanuele Duò
Controllato da:	Dott. Geol. Mario Naldi
Data:	Ottobre 2022
Revisione:	0

Sommario

1. INTRODUZIONE	1
2. UBICAZIONE INDAGINI	2
3. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA ED ELABORAZIONE DATI.....	5
4. ESITI DELLE INDAGINI GEOFISICHE	7
4.1. SEZIONE GEOELETTRICA E SISMICA A-B	8
4.2. SEZIONE GEOELETTRICA E SISMICA E-F.....	10
4.3. SEZIONE GEOELETTRICA E SISMICA C-D	13
5. SEZIONE GEOELETTRICA G-H	14
6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	16

In allegato:

Tavole 1÷8	Indagini geofisiche per la caratterizzazione stratigrafica
Appendice A	Cenni teorici sulla metodologia geoelettrica multielettrodo
Appendice B	Cenni teorici sulla metodologia sismica a rifrazione

1. INTRODUZIONE

La presente relazione illustra e descrive le indagini geofisiche realizzate nel mese di Ottobre 2022 per conto della società GEODES S.r.l. lungo il versante ubicato a sud-ovest della Frazione Casale San Nicola, nel territorio comunale di Isola del Gran Sasso e all'interno del Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga.

Le indagini si collocano in una zona interessata da fenomeni gravitativi, sviluppatasi in epoca recente. In particolare un evento parossistico avvenuto nel 2017 ha coinvolto il Canale Ruzzo-Mavone in un punto in cui lo stesso scorre in galleria; il canale fa parte di un articolato sistema di canalizzazioni che convogliano acqua all'interno del Lago di Piaganini formato dalla diga della Centrale idroelettrica di San Giacomo al Vomano.

Le indagini geofisiche hanno il compito di valutare gli spessori delle coperture detritiche e degli accumuli gravitativi in appoggio sul substrato roccioso e definire caratteristiche e distribuzione delle principali litologie che caratterizzano il contesto litostratigrafico del versante in oggetto. L'obiettivo finale consiste nella creazione di un modello geologico-geotecnico che consenta di supportare la progettazione del nuovo tratto di galleria idraulica e di rimettere in funzione la canalizzazione stessa.

Oltre alle indagini prima descritte, è stata realizzata una sezione geoelettrica/sismica sulla parte bassa del versante, lungo una pista forestale che permette di risalire la fitta zona boscata alle pendici del Gran Sasso; lo scopo è identico al precedente (caratterizzazione lito-stratigrafica e strutturale) ai fini della valutazione degli interventi di sistemazione di una pista forestale, in corrispondenza di una gabbionata

Le tecniche utilizzate per rispondere alle richieste del Committente, viste le caratteristiche del sito, sono state la geoelettrica multielettrodo e la sismica a rifrazione in onde di compressione e di taglio.

I risultati delle indagini sono illustrati nelle Tavole 1÷8 allegate al testo e commentati nelle pagine seguenti.

2. UBICAZIONE INDAGINI

La disposizione degli stendimenti geofisici è stata proposta dalla Committenza e verificata in sito in funzione degli spazi disponibili ed in relazione agli obiettivi dell'indagine.

L'ubicazione delle sezioni viene riportata nelle seguenti Figure 1÷2 e nelle allegate Tavola 1, su base geologica, e Tavola 2, su base orto-fotogrammetrica tratta dal database Google satellite.

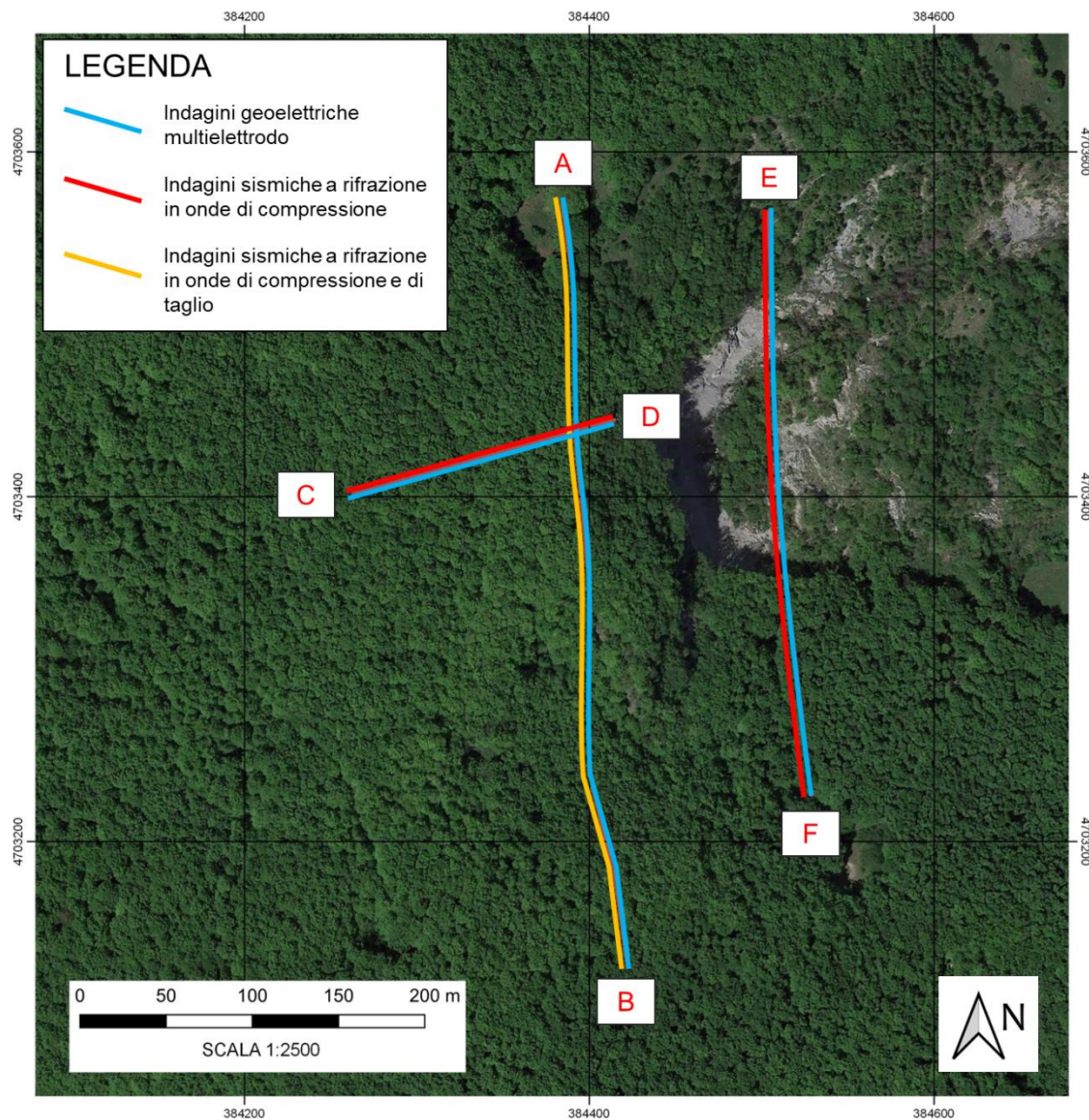


Figura 1: Ubicazione sezioni A-B, C-D ed E-F

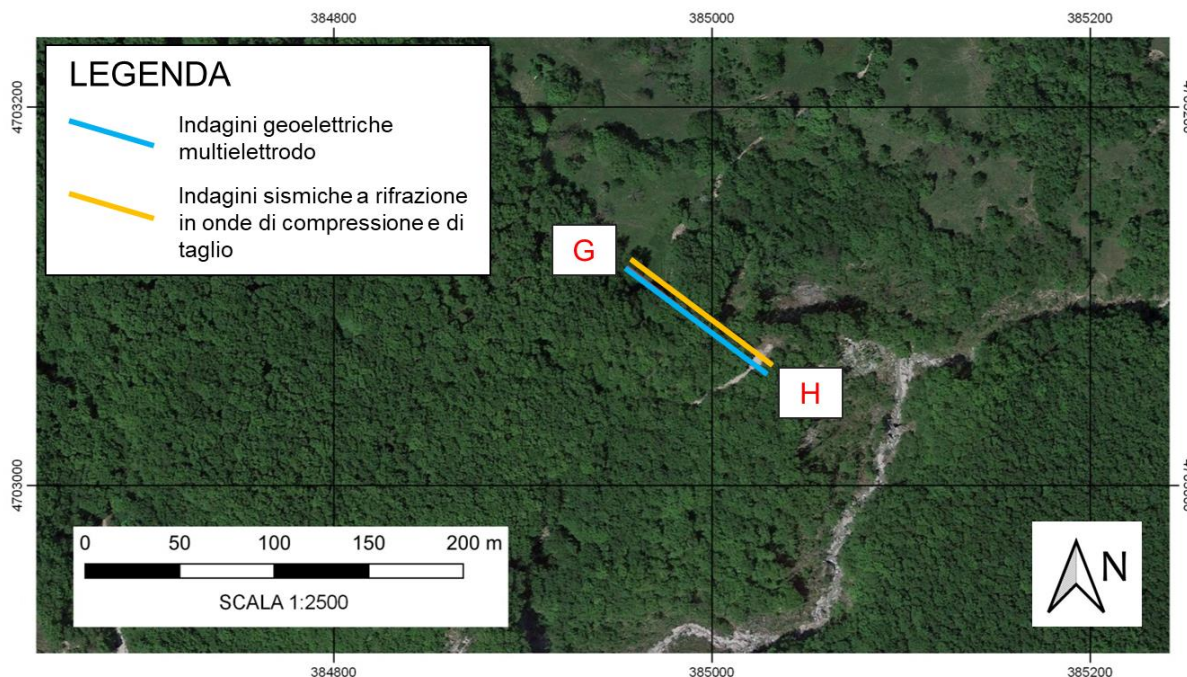


Figura 2: Ubicazione sezione G-H (parte bassa del versante)

Nella Tabella 1 riportata a pagina seguente si elencano le coordinate dei punti di inizio e fine delle sezioni tomografiche nel sistema di riferimento UTM WGS84, Fuso 32N (EPSG 32632).

Metodologia	ID punto	Est (m)	Nord (m)
Geoelettrica, Sismica a rifrazione in onde P ed S	A	384384.206	4703571.403
	B	384422.092	4703127.143
Geoelettrica, Sismica a rifrazione in onde P	C	384263.124	4703401.772
	D	384414.457	4703446.572
Geoelettrica, Sismica a rifrazione in onde P	E	384503.448	4703567.263
	F	384528.756	4703228.028
Geoelettrica, Sismica a rifrazione in onde P e S	G	384955.634	4703116.084
	H	385027.527	4703060.696

Tabella 1 - Coordinate dei punti di indagine riferiti alla planimetria di Figura 1

Le geometrie di acquisizione sono schematizzate nella seguente Tabella 2.

ID PROVA	Metodologia	N. geofoni/ elettrodi	Interasse geofoni	Lunghezza complessiva (m)
A-B	Geoelettrica/sismica	96	5	475
C-D	Geoelettrica/sismica	36	5	175
E-F	Geoelettrica/sismica	48	5	355
G-H	Geoelettrica/sismica	24	4	92

Tabella 2 - Geometria stendimenti geofisici

3. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA ED ELABORAZIONE DATI

L'acquisizione dei dati geoelettrici è stata realizzata con un georesistivimetro Syscal Pro (Iris Instruments, F) a 72 canali e l'utilizzo di elettrodi in acciaio inox collegati mediante cavi multipolari. Per l'acquisizione dei dati di resistività elettrica è stata adottata una sequenza Wenner-Schlumberger, predisposta mediante il software Electre Pro (Iris Instruments).



Figura 3 – Georesistivimetro Syscal Pro (IRIS Instruments)

Per l'elaborazione e rappresentazione dei dati geoelettrici sono stati utilizzati i programmi:

- *Prosys II* (Iris Instruments, Fr): consente l'elaborazione preliminare dei dati di resistività elettrica apparente (filtraggio e correzione topografica dei dati);
- *Res2Dinv* v. 3.71 (Geotomo Software, Mal): esegue l'inversione numerica 2D dei dati e la restituzione di sezioni dell'andamento della resistività elettrica reale;
- *Surfer* v.13.2.438 (Golden Software, USA): esegue il gridding dei dati (metodo kriging) e la rappresentazione grafica delle sezioni tomografiche e delle mappe.

Cenni teorici relativi alla metodologia di indagine geoelettrica e le specifiche della strumentazione utilizzata sono riportati in Allegato A.

L'acquisizione dei dati sismici è stata realizzata con sismografo Daq Link IV (Seismic Source, USA) a 24 canali. L'unità di acquisizione, dotata di un convertitore analogico/digitale a 24 bit (unità DaqLink IV), è fornita di una connessione di rete standard 10/100 (base RJ45) per la comunicazione con un laptop su cui è installato il software (VibraScope® v.2.4.40) che gestisce la visualizzazione, l'analisi e la memorizzazione delle forme d'onda registrate (Figura 4).



Figura 4 – Strumentazione utilizzata – Sismografo Daq Link IV

I sensori utilizzati nelle indagini sismiche a rifrazione in onde di compressione (geofoni, Weihai Sunfull) possiedono una frequenza di risonanza pari a 40 Hz, con distorsione inferiore allo 0.2%; per le acquisizioni a rifrazione in onde di taglio sono stati utilizzati geofoni orizzontali con frequenza caratteristica pari a 10 Hz.

La generazione del segnale sismico è stata realizzata attraverso un'energizzazione con fucile sismico "Isotta", che esplosa cartucce di tipo industriale calibro 8 in un foro opportunamente predisposto; l'espulsione assiale dell'onda di energia provocata dall'esplosione della cartuccia genera al contempo onde di tipo "p" (longitudinali) e di tipo "s" (trasversali) permettendo l'acquisizione di segnali rifratti di tipo verticale e di tipo orizzontale.

Per l'elaborazione dei dati sismici a rifrazione si è proceduto al riconoscimento e raccolta dei dati dei primi arrivi (software *Reflexw*, Sandmeier Software, D). Successivamente le onde di primo arrivo sono state elaborate con il metodo GRM (General Reciprocal Method) accoppiato ad una inversione tomografica su una griglia di nodi equispaziati per una modellazione della distribuzione delle velocità delle onde di compressione nel sottosuolo (software *Rayfract*, Intelligent Resources Inc., CDN). Il metodo dell'inversione tomografica consente (con un sufficiente numero di scoppi) di individuare anche eventuali inversioni di velocità (si vedano i "Cenni sulle indagini sismiche a rifrazione" in Appendice B).

4. ESITI DELLE INDAGINI GEOFISICHE

I risultati delle indagini geofisiche sono illustrati sotto forma di sezioni tomografiche di resistività elettrica reale e di velocità delle onde di compressione nelle Tavole 3÷8 riportate in allegato e, per comodità di lettura, nelle figure illustrate e commentate nel seguito. L'attribuzione dei litotipi riconosciuti è stata dedotta dalla Carta Geologica d'Italia, Foglio 140 (Tavola 1 e Figura 5). Come evidenziato nel dettaglio, le linee del settore di frana intersecano un importante lineamento tettonico orientato ENE-WSW, ed interessano principalmente i litotipi arenaceo-marnosi della Formazione della Laga.

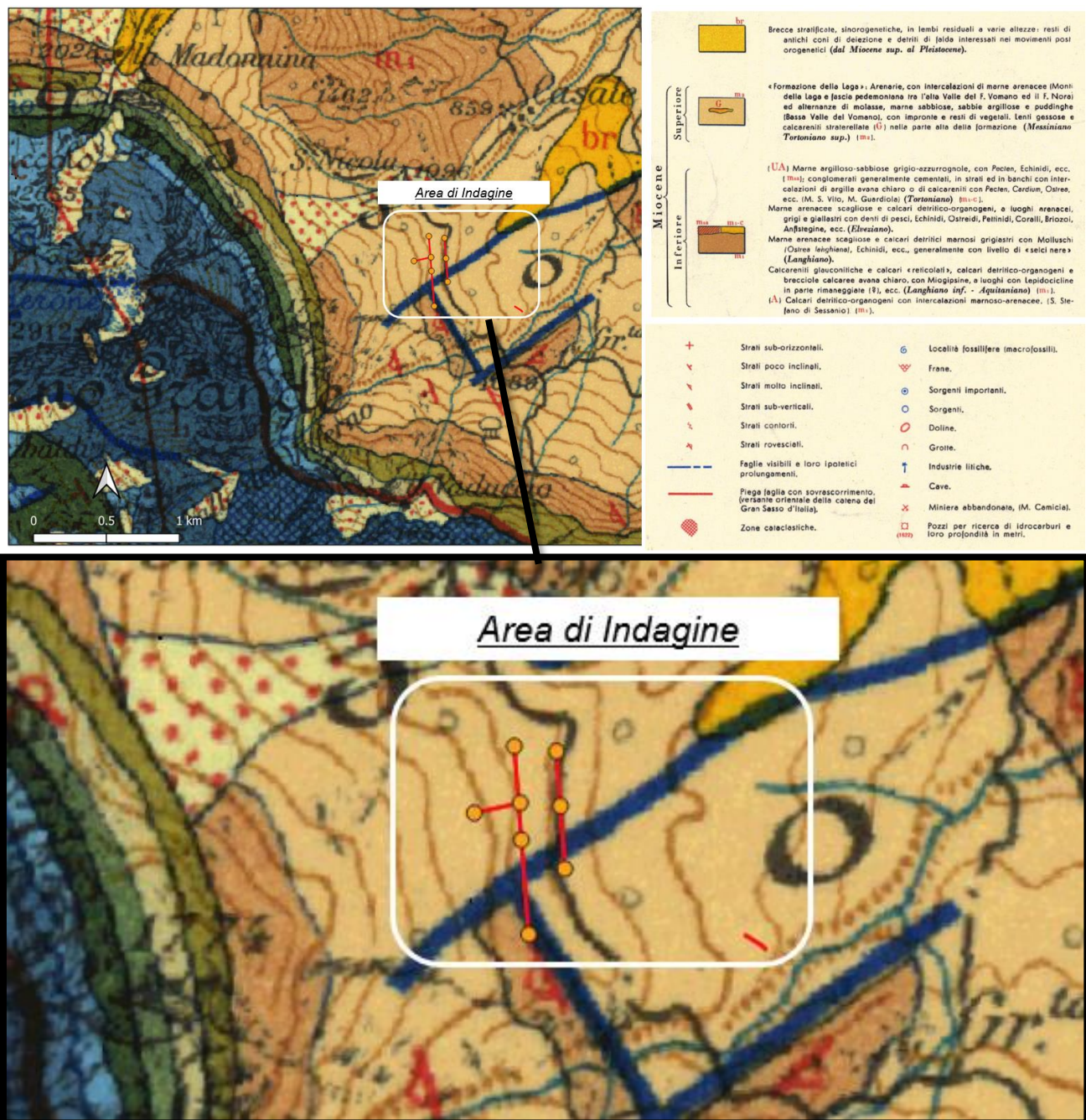


Figura 5 – ubicazione stendimenti geofisici (linee rosse) sulla CGI F.170

4.1. SEZIONE GEOELETRICA E SISMICA A-B

Nelle Tavole 3 e 4 sono presentati i modelli sismostratigrafici in onde di compressione e onde di taglio ed il modello elettrostratigrafico per la sezione A-B. I due modelli si sovrappongono in quanto realizzati con interdistanze e numero di sensori analoghi e coincidenti in termini di inizio e fine stendimento. Più in dettaglio:

- in Tavola 3 e in Figura 6 si riporta il confronto tra la sezione geoelettrica e la sezione sismica in onde di compressione;
- in Tavola 4 e in Figura 7 si riporta il confronto tra la sezione sismica in onde di compressione e la sezione sismica in onde di taglio.

Il confronto tra il modello geoelettrico e sismico evidenzia quanto segue

- **Depositi superficiali e accumuli detritici.** I depositi o accumuli detritici di versante sono rappresentati da un livello superficiale elettricamente conduttivo (resistività compresa tra 50 e 100 Ohm*m, colore verde – velocità V_P inferiori a 1500 m/s e V_S inferiori a 800 m/s) che assume spessore significativo solamente in alcuni punti della sezione ed in particolare tra le progressive 0 ÷ 50 metri e tra le progressive 300 – 340 metri. La potenza delle coperture non supera in ogni caso i 5 metri nei punti indicati. In corrispondenza del tratto terminale della sezione, ed in particolare oltre la progressiva 400 metri la resistività delle unità superficiali aumenta in modo significativo (resistività compresa tra 100 e 3000 Ohm*m, colore giallo-rosso). In considerazione delle ridotte velocità delle onde di compressione e di taglio si ritiene che tale settore di versante possa essere interessato da fenomeni gravitativi di versante e che la sezione abbia attraversato tra le progressive 340 – 390 metri una serie di accumuli gravitativi o porzioni di substrato molto fratturate ed in parte mobilizzate per effetto di fenomeni gravitativi attualmente quiescenti o stabilizzati.
- **Substrato lapideo.** il substrato lapideo presenta un assetto stratigrafico complesso, caratterizzato dall'alternanza di livelli più resistivi (resistività elettrica da 100 a 400 Ohm*m, tonalità di colore giallo-arancio) e livelli più conduttivi (resistività compresa tra 25 e 100 Ohm*m, tonalità di colore verde). L'assetto di tali strati è caratterizzato da contatti apparenti debolmente inclinati e in termini litologici rappresenta una successione di livelli calcareo marnosi o arenacei e livelli francamente marnosi. Le velocità delle onde di compressione e di taglio crescono con gradienti elevati testimoniando un miglioramento delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi rocciosi piuttosto netto. Si riscontrano le evidenze di zone di taglio e scorrimento in almeno quattro punti del modello illustrato; le discontinuità hanno andamento apparente subverticale o fortemente inclinato. Le zone di taglio vengono evidenziate sui modelli sismostratigrafici (Figura 7) ed in particolare sul modello di velocità delle onde di compressione per un andamento anomalo del gradiente di velocità (crescita più debole) mentre appaiono come zone a resistività minore sul modello tomografico di resistività.

- **Zone di faglia.** La faglia indicata dalla CGI (faglia ESE-WNW) è molto evidente sulla sezione A-B ed è verosimilmente causa di un dissesto gravitativo quiescente. Oltre alla faglia prima descritta si evidenzia la presenza di una zona di faglia posta nel secondo quarto della sezione, ben evidente nella sezione geoelettrica come fascia a bassa resistività elettrica. Tale zona coincide con la proiezione del coronamento di frana attiva (ben visibile nella sezione E-F).

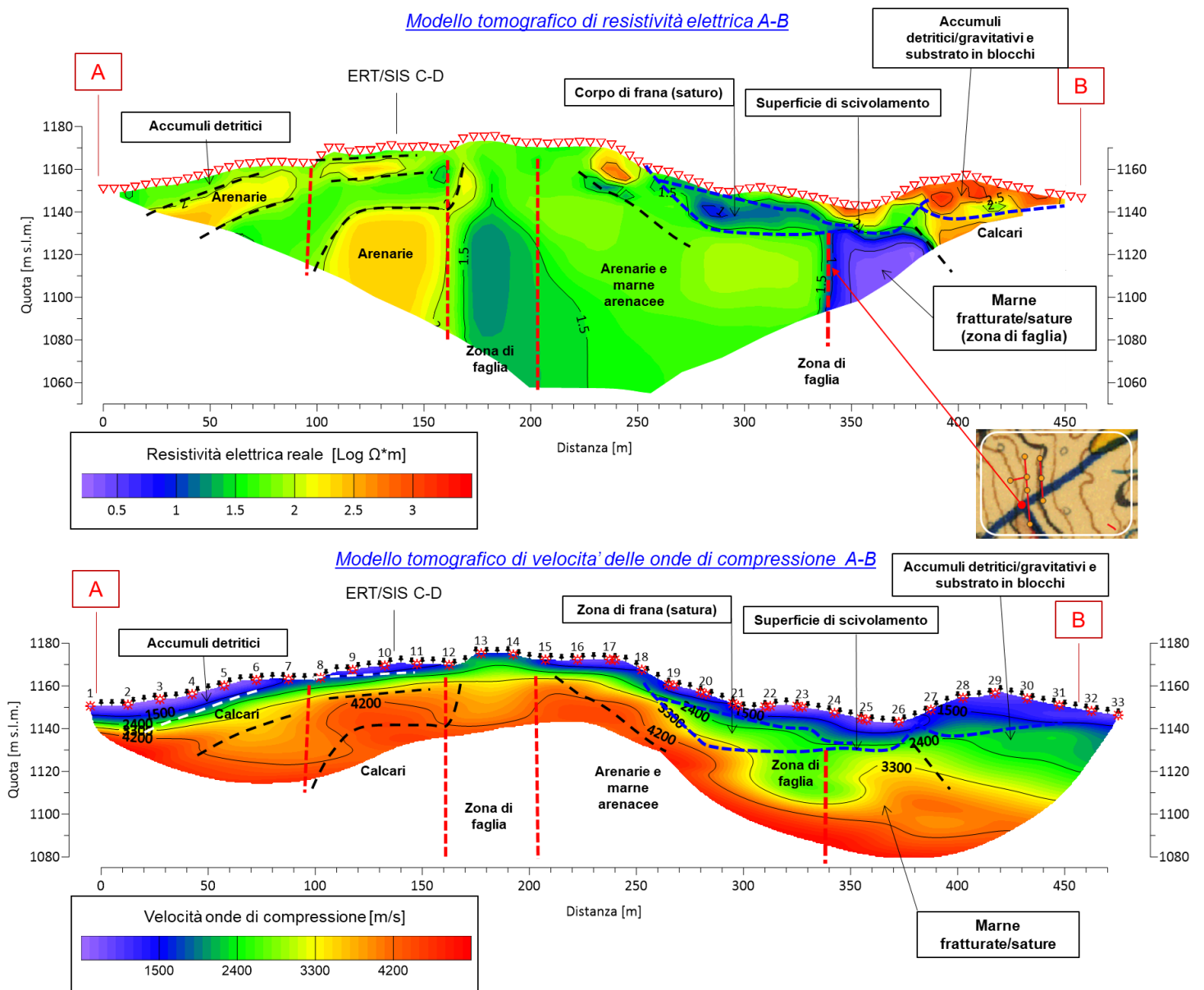


Figura 6 - Modello tomografico di resistività elettrica e di velocità delle onde di compressione per la sezione A-B

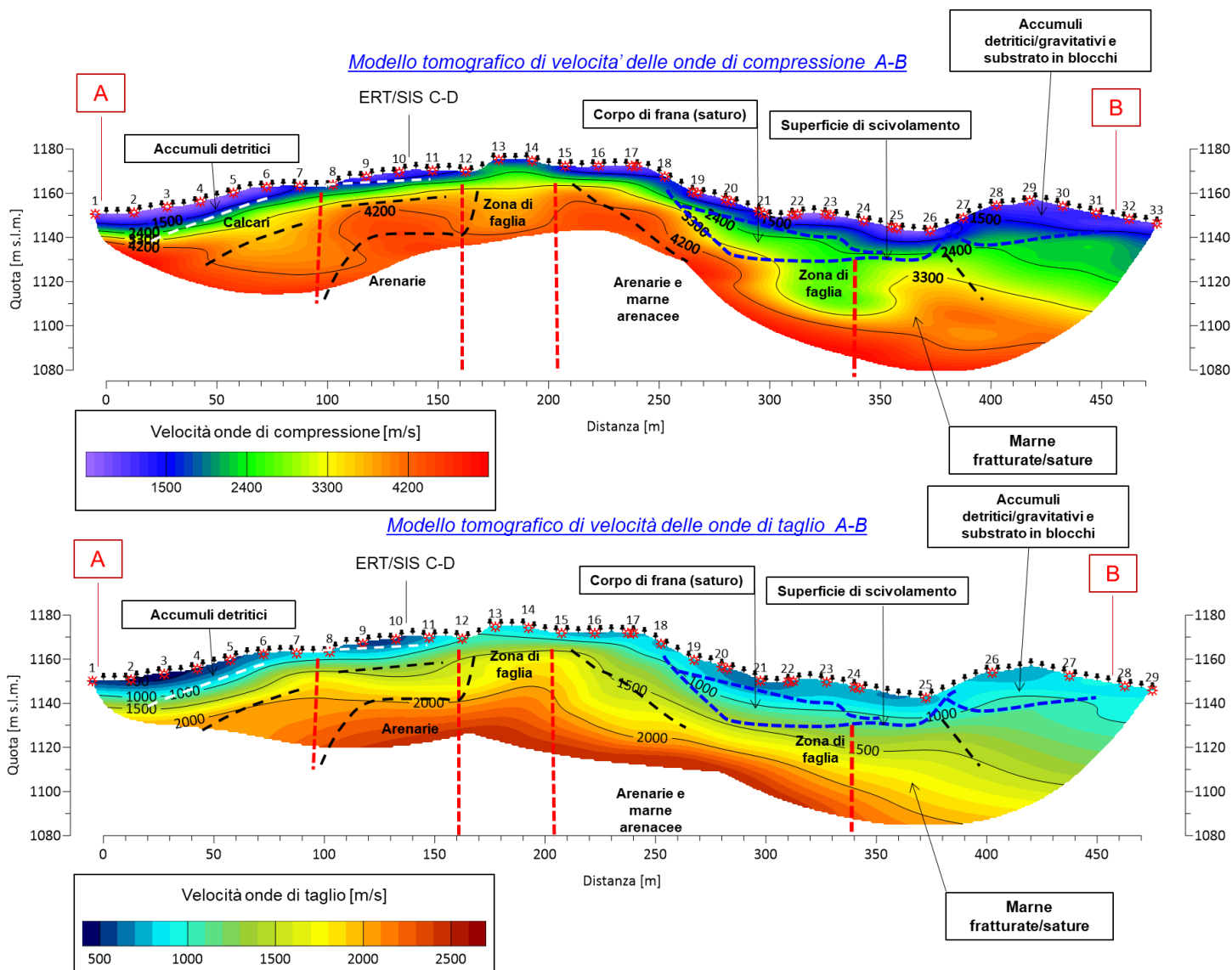


Figura 7 - Modelli tomografici di velocità delle onde di compressione e di taglio per la sezione A-B

4.2. SEZIONE GEOELETRICA E SISMICA E-F

Lo stendimento E-F, illustrato in Figura 8, è stato tracciato sull'accumulo di frana, parallelamente allo stendimento A-B. In questa sezione sono stati elaborati i soli dati di velocità in onde di compressione, in quanto i dati di velocità in onde di taglio non erano attendibili per la forte attenuazione e dispersione del segnale.

Come riportato in Figura 8 si osserva come l'accumulo di frana (sottolineato da depositi a bassa velocità sismica e a resistività elettrica medio-alta → depositi aerati) si approfondisca per almeno 30 m di spessore nella parte centrale. Tale frana si sviluppa tra due faglie di svincolo, di cui una coincide con la zona di faglia riconosciuta nella sezione A-B (si veda il confronto di Figura 9). Oltre alla frana attiva, si rileva la seconda frana quiescente posta sul lato sud della sezione, la cui superficie di

scivolamento (sottolineato da un orizzonte a resistività molto bassa) è suborizzontale e posto a circa 10 m di profondità.

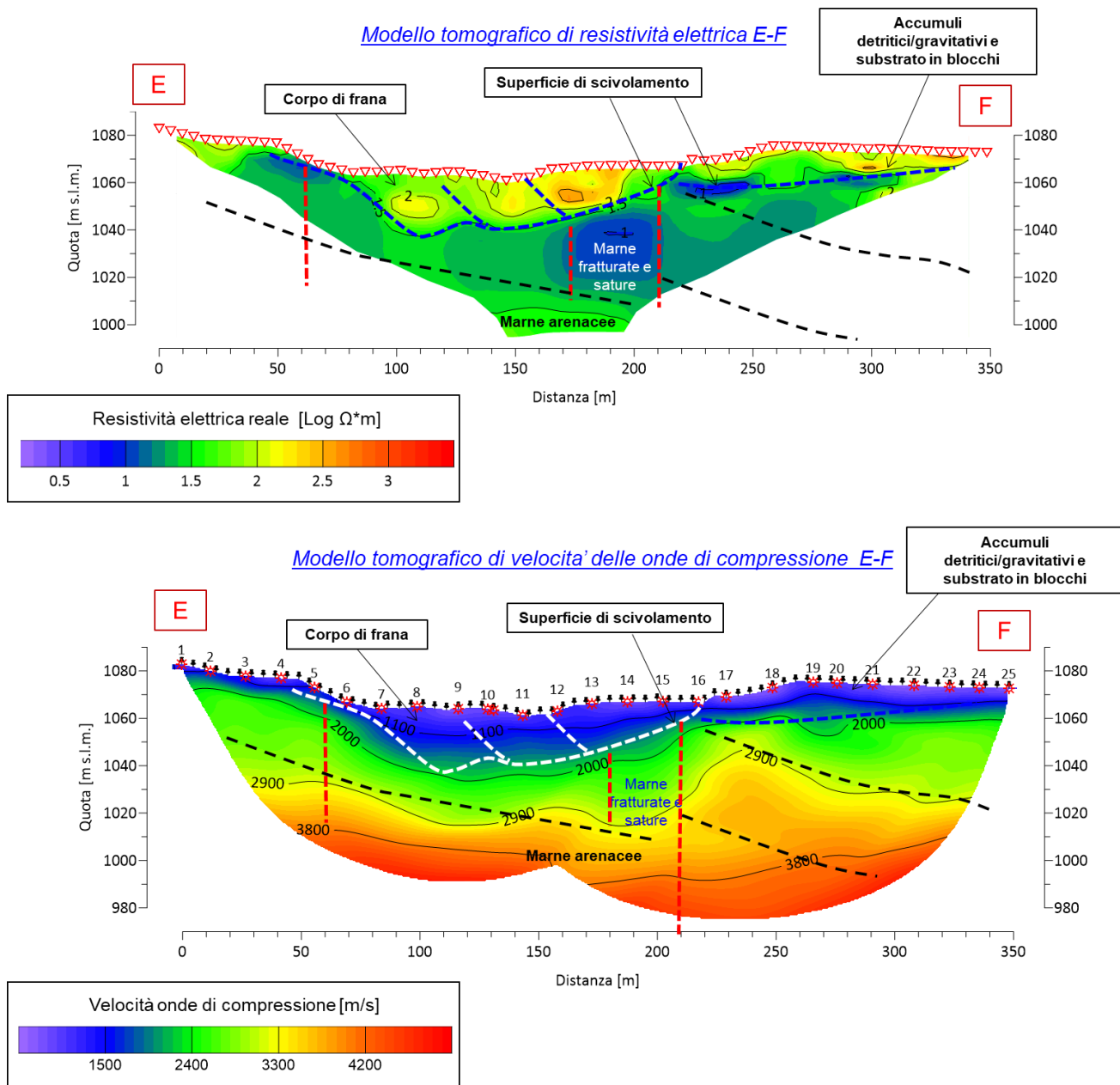


Figura 8 Modello tomografico di resistività elettrica e di velocità delle onde di compressione per la sezione E-F

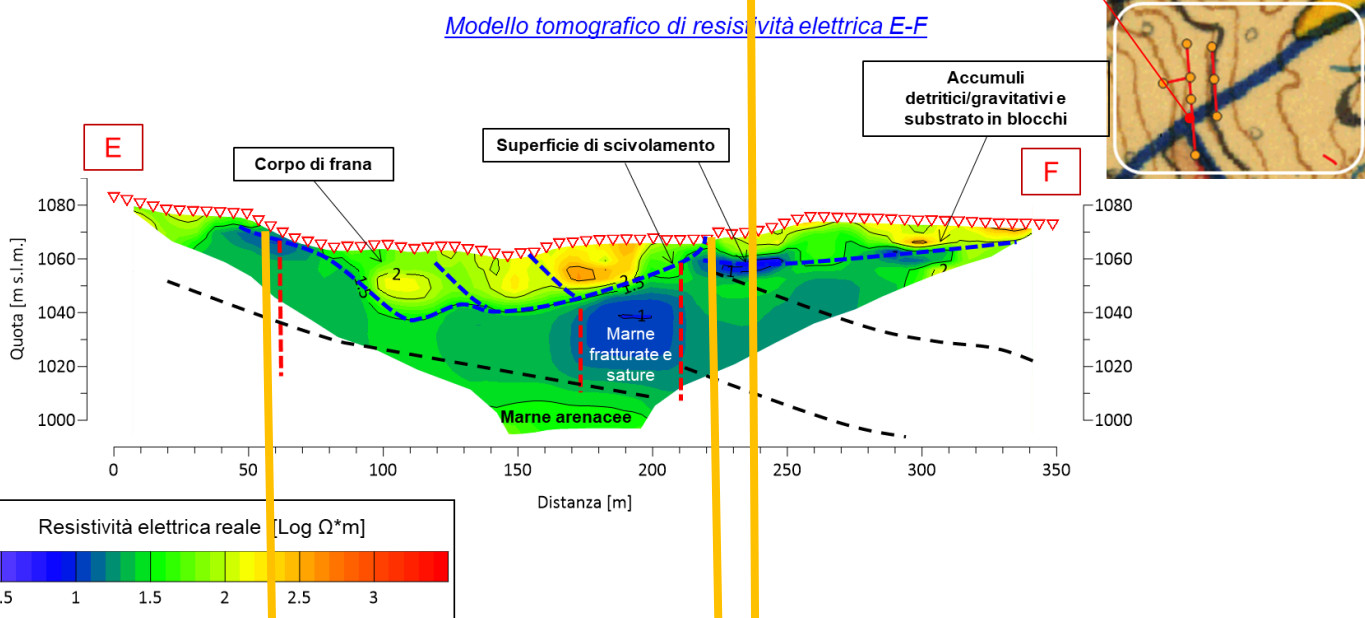
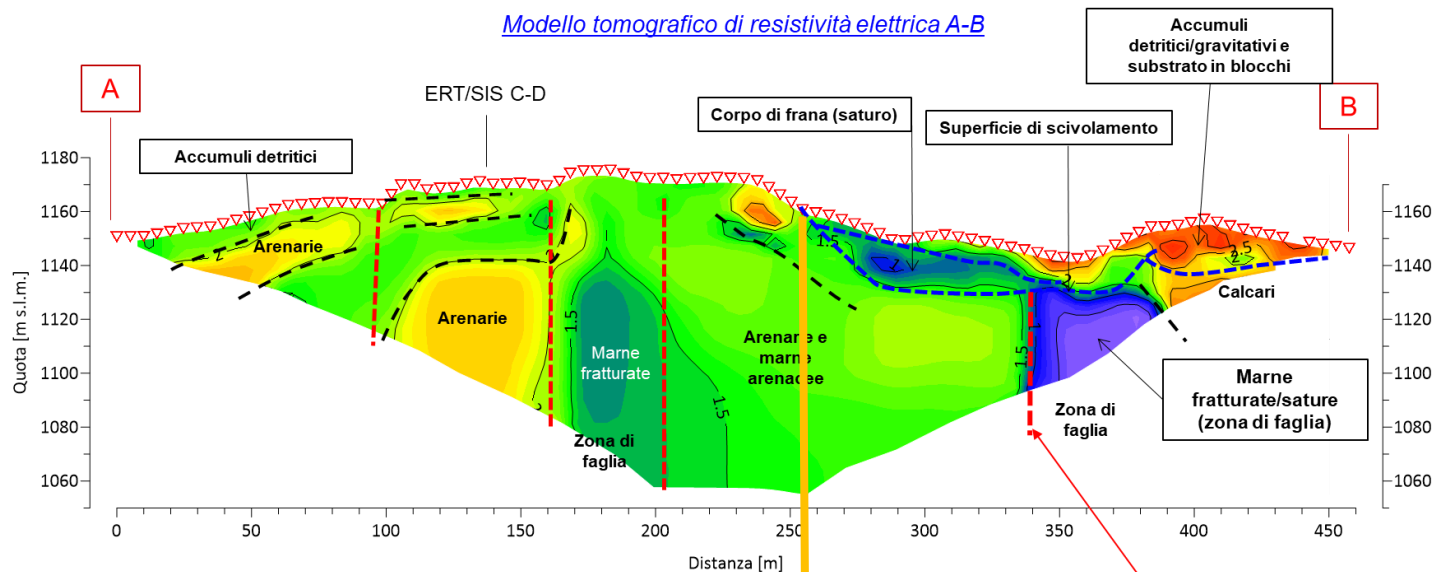


Figura 9 – confronto tra le sezioni geoelettriche A-B e E-F

4.3. SEZIONE GEOELETTRICA E SISMICA C-D

Lo stendimento C-D, illustrato in Figura 10, è stato tracciato trasversalmente e a monte della sezione A-B. In questa sezione sono stati elaborati i soli dati di velocità in onde di compressione, in quanto i dati di velocità in onde di taglio non erano attendibili per la forte attenuazione e dispersione del segnale. Il confronto tra la sezione geoelettrica e la sezione sismica mette in luce quanto segue:

- una copertura detritica superficiale di spessore pari a circa 10-12 m, con velocità delle onde V_P inferiori a 1400 m/s
- una faglia sottolineata da una zona a bassa velocità delle onde sismiche che ha agito da svincolo per la “frana” superficiale

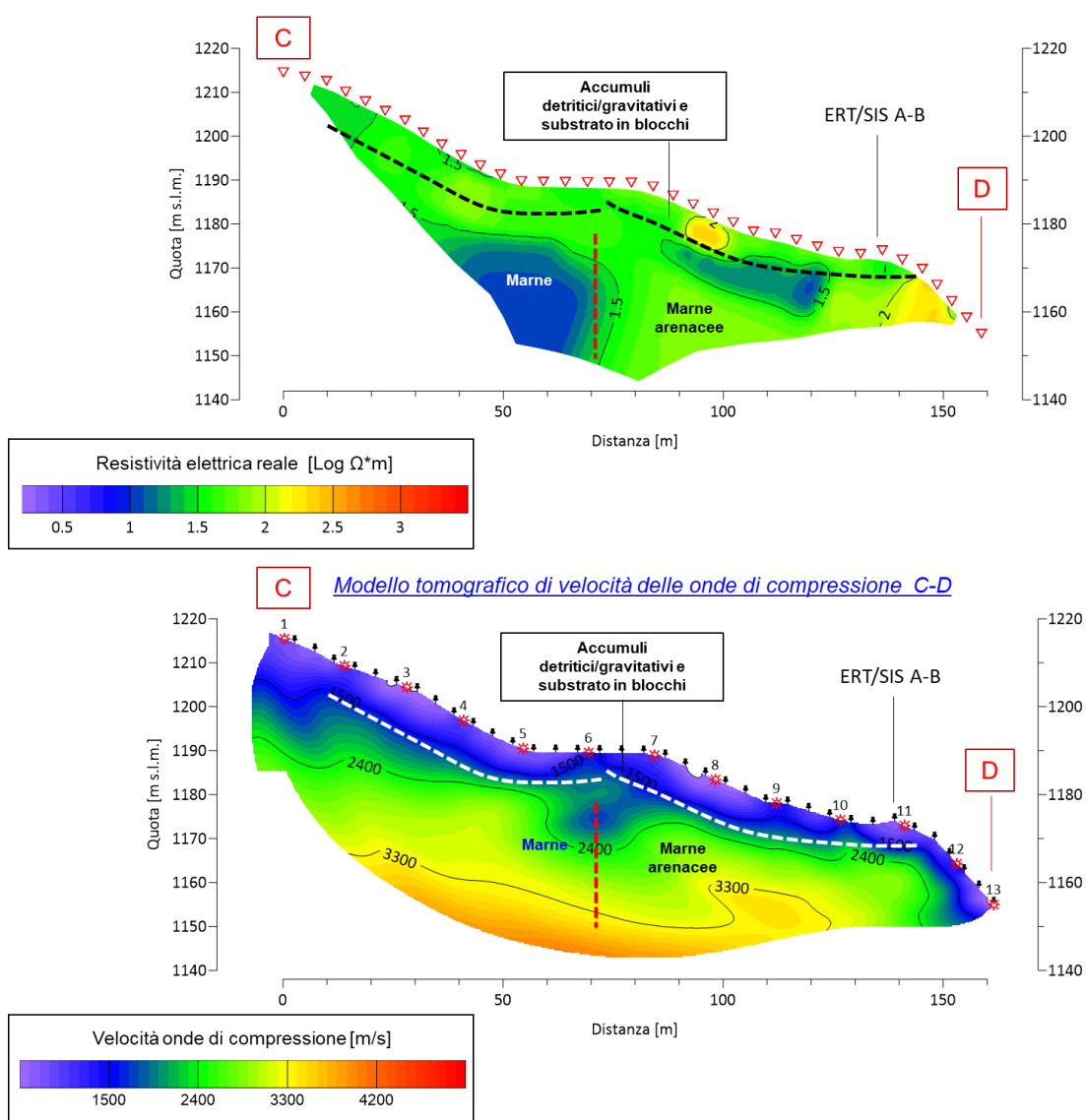
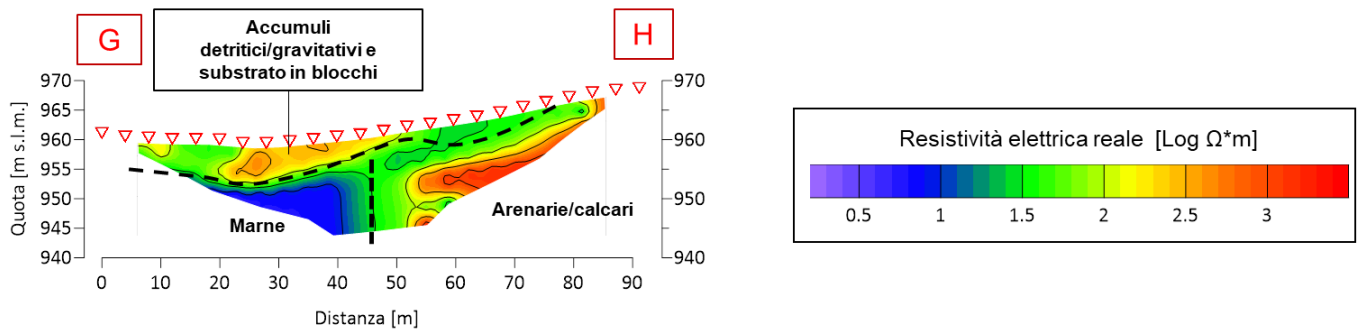


Figura 10 - sezione geoelettrica e sismica C-D

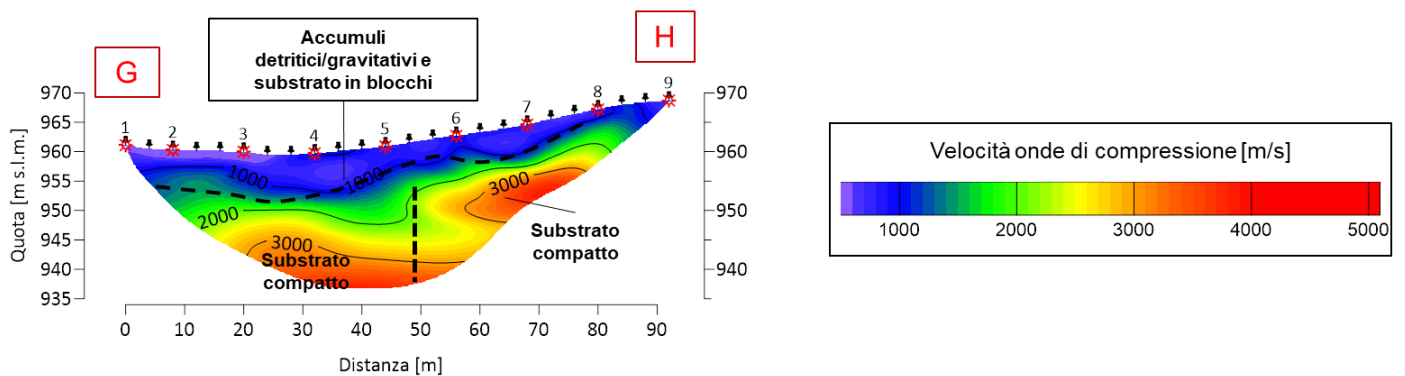
5. SEZIONE GEOELETRICA G-H

Lo stendimento G-H illustrato in Figura 9 è stato realizzato lungo la pista forestale che consente l'accesso al versante oggetto di studio. La sezione è ubicata alcuni metri a monte di una gabbionata realizzata per il sostegno della carreggiata stessa.

Modello tomografico di resistività elettrica G-H



Modello tomografico di velocità delle onde di compressione G-H



Modello tomografico di velocità delle onde di taglio G-H

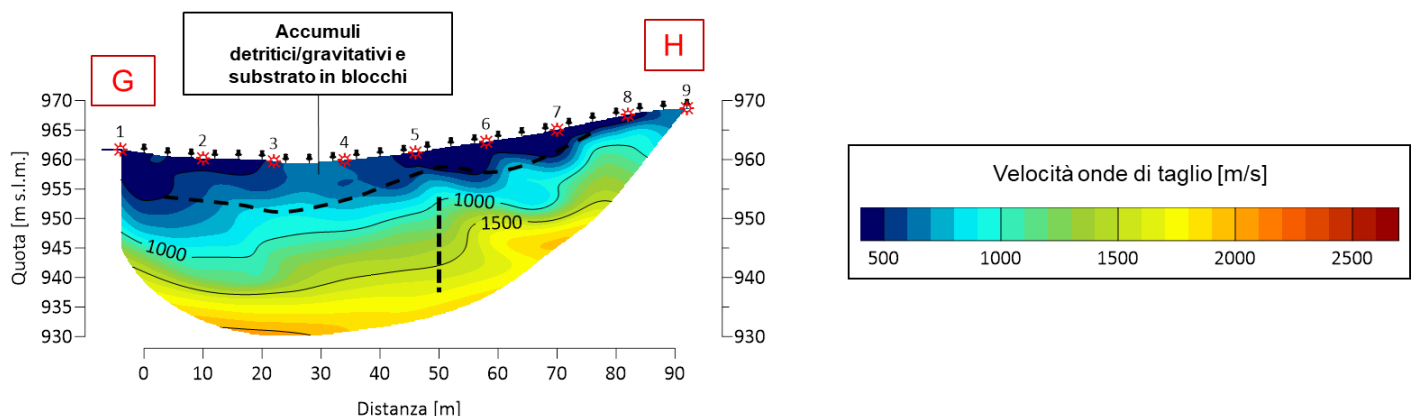


Figura 11 –Modello tomografico di resistività elettrica e modelli tomografici di velocità delle onde di compressione e di taglio per la sezione G-H

Dal confronto tra i modelli di resistività elettrica e velocità delle onde sismiche emergono i seguenti elementi salienti:

- Una unità litostratigrafica superficiale è costituita da coltri detritiche, accumuli e materiali rimaneggiati in spessori decrescenti verso sud-est (lato "H" del modello illustrato in Figura 9) e porzioni di substrato litoide molto fratturate. Gli spessori sono massimi tra le progressive 0 ÷ 40 metri con valori prossimi a 7-8 metri. I valori di resistività elettrica sono eterogenei e compresi tra 40 e 500 Ohm*m (colore verde-arancio); le velocità delle onde di compressione (V_P) sono inferiori a 1400 m/s e i valori delle onde di taglio (V_S) inferiori a 700 m/s.
- Il substrato lapideo al di sotto del livello superficiale presenta una zona di discontinuità evidenziata sia da un netto gradiente di resistività elettrica, localizzato tra le progressive 48 ÷ 50 metri, sia da un'anomalia nella distribuzione delle velocità delle onde di compressione ubicata alle stesse progressive metriche sopra indicate.

Il lato nord-ovest del modello G-H è caratterizzato da un'unità elettrostratigrafica molto conduttiva (resistività compresa tra 5 e 15 Ohm*m, colore blu), che sotto il profilo litologico è compatibile con formazioni pelitico-marnose. Oltre la progressiva 50 metri si osserva la presenza di un'unità elettrostratigrafica resistiva (resistività compresa tra 40 e 2500 Ohm*m, colore verde-rosso) compatibile con livelli calcarei o arenacei fratturati nelle porzioni più prossime alla superficie e compatti in profondità.

Dal punto di vista sismostratigrafico il substrato lapideo presenta caratteristiche simili al di sotto del livello superficiale, con velocità crescenti con gradiente da medio-alto (velocità delle onde di compressione (V_P) comprese tra 1500 e 3500 m/s e valori delle onde di taglio (V_S) compresi tra 800 e 2000 m/s). Fa' eccezione, come anticipato in precedenza, il settore compreso tra le progressive 40 ÷ 60 metri in quanto caratterizzato da gradiente di velocità anomalo; si ritiene che in corrispondenza di questa anomalia sia possibile identificare una zona di taglio che pone a contatto due unità litologiche differenti sebbene caratterizzate da comportamento geomeccanico non dissimile.

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le indagini geofisiche svolte sul versante ubicato a sud-ovest della Frazione Casale San Nicola, nel territorio comunale di Isola del Gran Sasso, a supporto dello studio delle caratteristiche e della distribuzione delle principali litologie che caratterizzano il contesto geologico in cui è inserito il Canale Ruzzo-Mavone, hanno permesso un primo inquadramento litostratigrafico e morfo-strutturale del versante. Lungo lo stesso versante si è verificato nell'anno 2017 un movimento gravitativo di rilevante importanza che ha coinvolto una parte del tracciato del suddetto canale che in questo punto scorre in galleria.

Il piano di indagini, definito dalle specifiche tecniche fornite dalla società Geodes S.r.l. ed in accordo alle modifiche definite a seguito di una verifica in sito preliminare al rilievo, ha previsto la realizzazione di:

- num. 4 sezioni geoelettriche multielettrodo
- num. 4 sezioni sismiche a rifrazione in onde di compressione
- num. 2 sezioni sismiche a rifrazione in onde di taglio

I risultati delle indagini, illustrati nelle tavole allegare alla presente relazione tecnica e commentati nel capitolo precedente, possono essere così sintetizzati.

L'assetto stratigrafico e morfo-strutturale a monte del settore coinvolto dalla frana è così definito:

- una coltre detritica discontinua con spessori compresi tra pochi metri (2-3 m) fino ad uno spessore massimo di circa 5-6 m, ma talvolta completamente assenti. Il settore meridionale presenta maggiori spessori delle coperture e dei livelli rocciosi molto fratturati, testimoniando un contesto morfostrutturale differente rispetto a quanto osservabile sul resto del modello, fino alla progressiva 300 metri.
- L'assetto stratigrafico di del substrato roccioso è definito da alternanze di litologie calcareo-marnose e marnose con una giacitura apparente dei contatti stratigrafici moderatamente inclinata. Gli ammassi rocciosi sono caratterizzati da qualità geomeccaniche buone e molto buone; si individuano tuttavia settori maggiormente fratturati in "blocchi" isolati da strutture o piani di discontinuità sub-verticali.
- Nel settore meridionale (oltre la progressiva 350 metri) il substrato lapideo profondo presenta un assetto stratigrafico caratterizzato dall'alternanza di litotipi marnoso-calcarei alternati a litotipi più francamente pelitici, caratterizzati da qualità geomeccaniche scadenti fino a profondità pari a circa 40 metri dal piano campagna.

La caratterizzazione della zona dell'accumulo di frana, area in cui il versante è attraversato dal vecchio tracciato del canale Ruzzo-Mavone, ha evidenziato caratteri elettrostratigrafici e sismostratigrafici che riprendono quanto osservato sul margine meridionale della sezione A-B.

Gli spessori dei materiali mobilizzati raggiungono i 25-30 metri con un'estensione complessiva che supera i 100 metri (misurati ortogonalmente alla direzione di scorrimento del movimento gravitativo).

Il substrato lapideo è definito da litotipi marnosi in transizione verso la base della sezione a litotipi marnoso-arenacei o calcareo-marnosi. Le caratteristiche degli ammassi migliorano con la profondità con gradienti medi e omogenei.

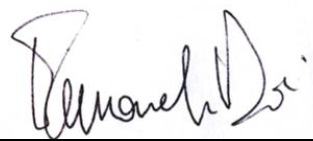
Il modello di velocità delle onde di compressione ha evidenziato due possibili zone di svincolo tettonico, associate ad altrettante anomalie nella distribuzione del gradiente.

Il modello geofisico definito alla base del versante, ai fini della valutazione degli interventi di sistemazione di una pista forestale, in corrispondenza di una gabbionata, ha evidenziato spessori delle coperture e dei materiali detritici o rimaneggiati decrescenti verso il margine "H" del modello.

Il substrato lapideo presente oltre i 6-7 metri da piano campagna (ma tendente ad affiorare oltre la progressiva 75 metri) è costituito da litotipi marnosi verso nord-ovest e litotipi calcarei o arenacei verso sud-est con una transizione tra le due unità, coincidente con una zona maggiormente fratturata rispetto alle caratteristiche medie del substrato litoide, collocata tra le progressive 40 ÷ 60 metri.

Techgea S.r.l.

Redatto da: Dott. Geol. Emmanuele Duò

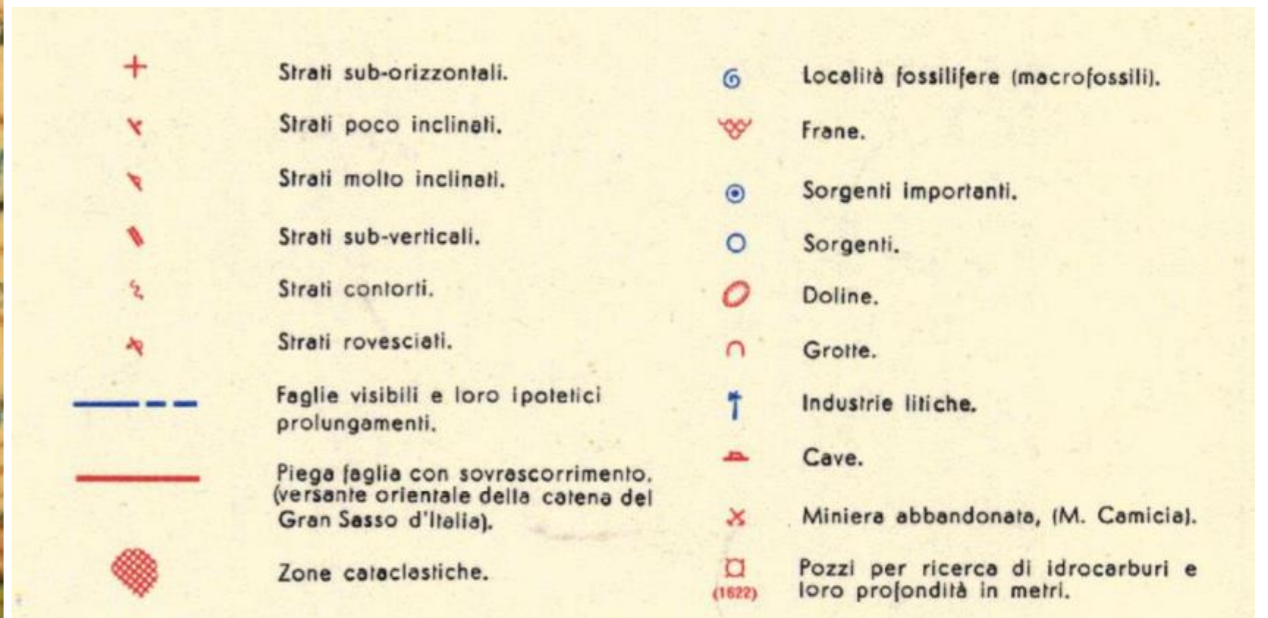
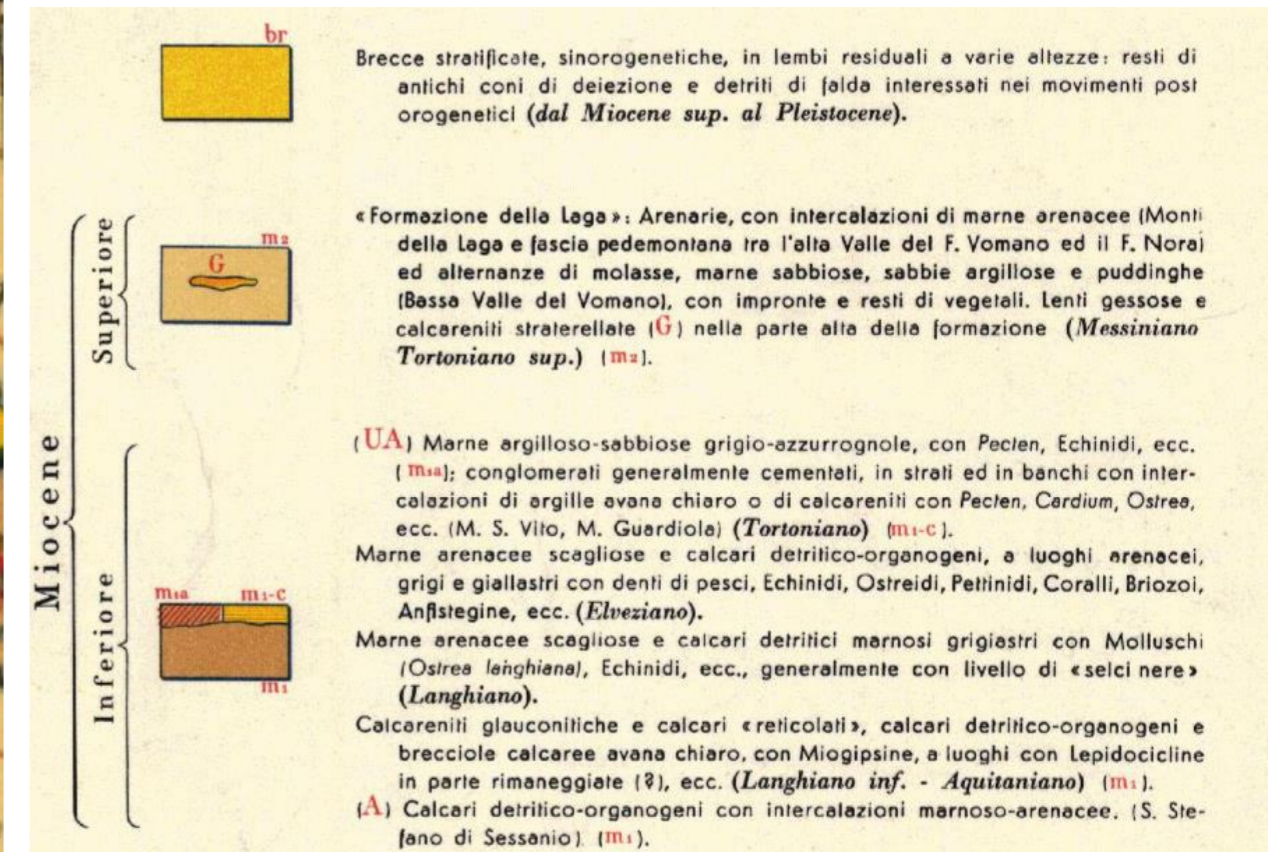
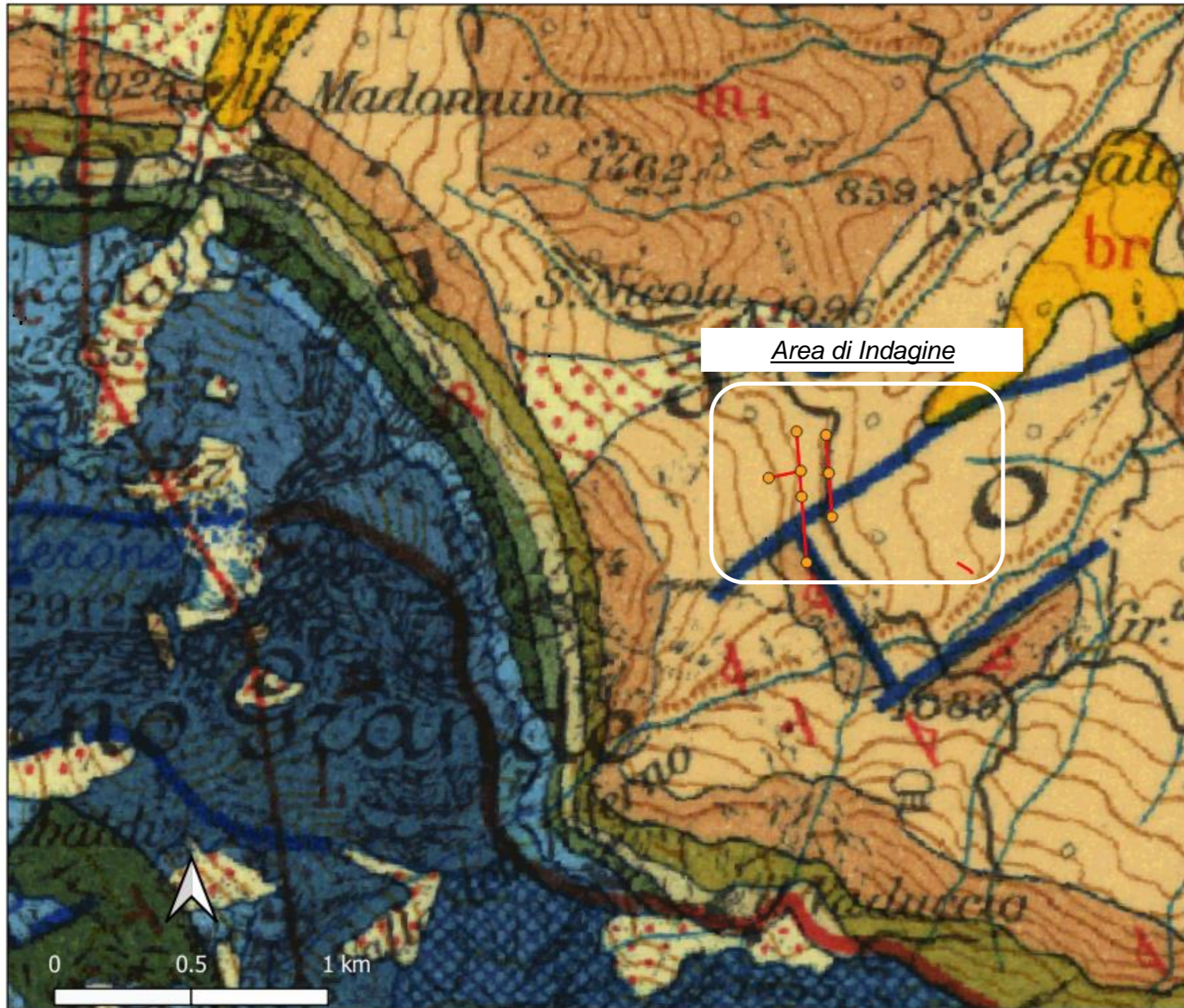


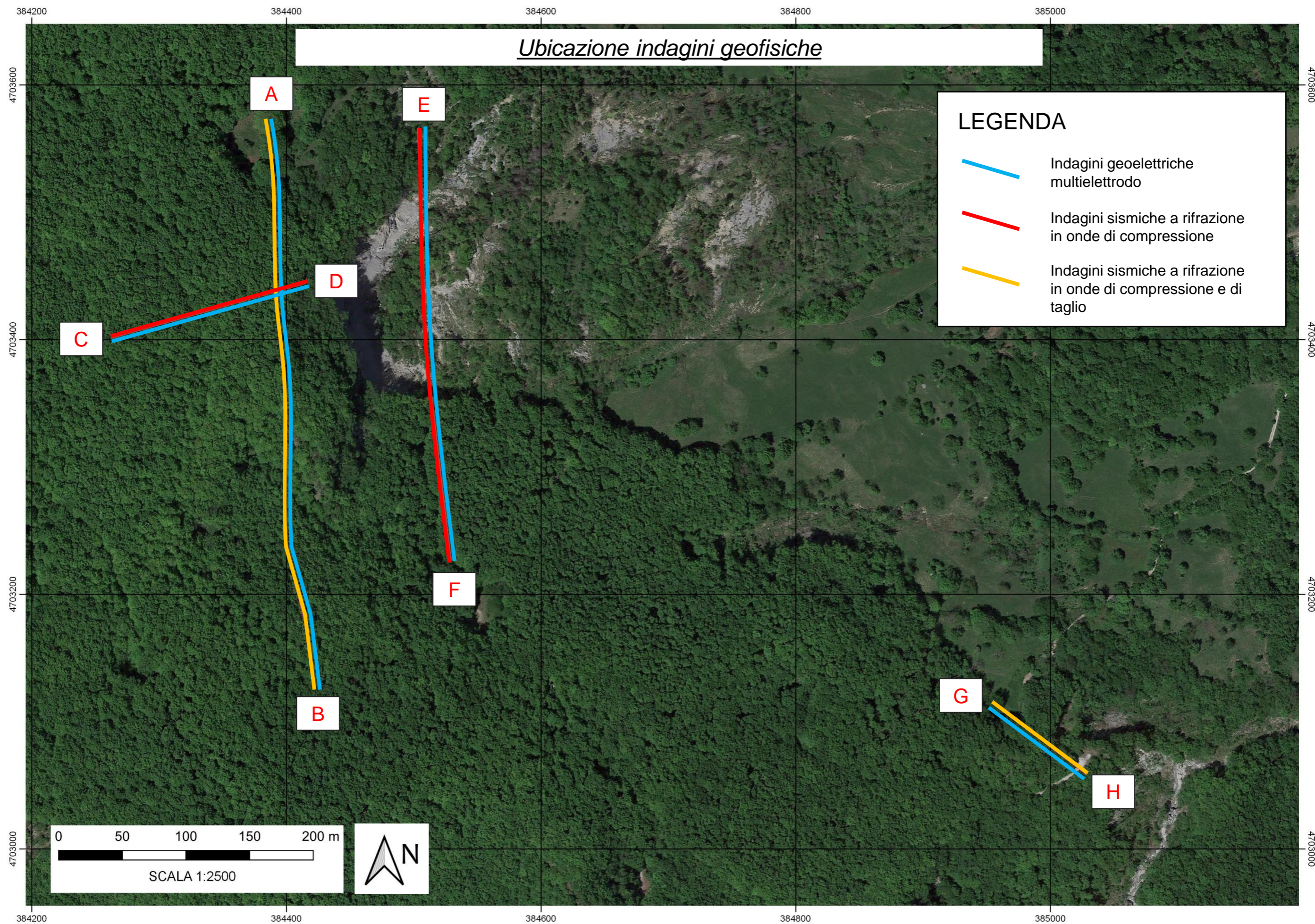
Controllato da: Dott. Geol. Mario Naldi



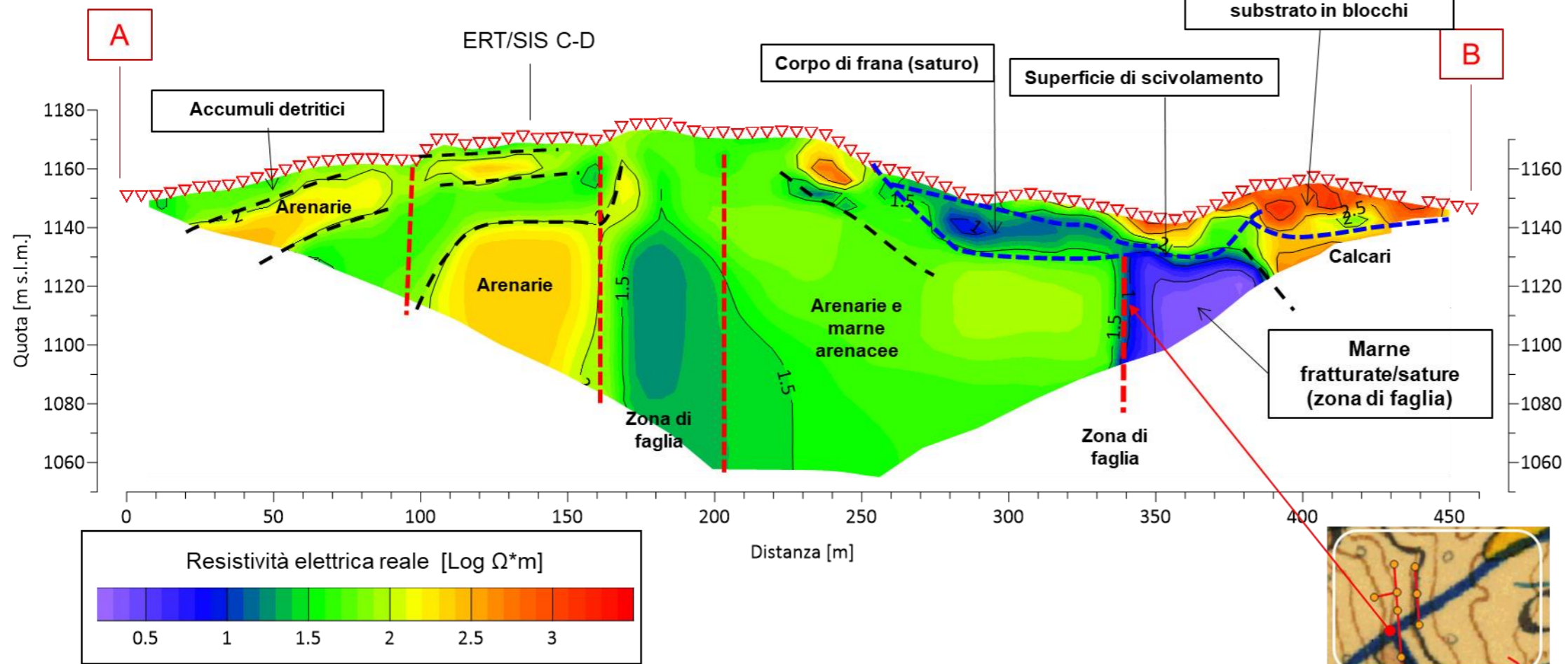
TAVOLE

Ubicazione area di indagine su sestratto di Carta Geologica d'Italia (F140 TERAMO)



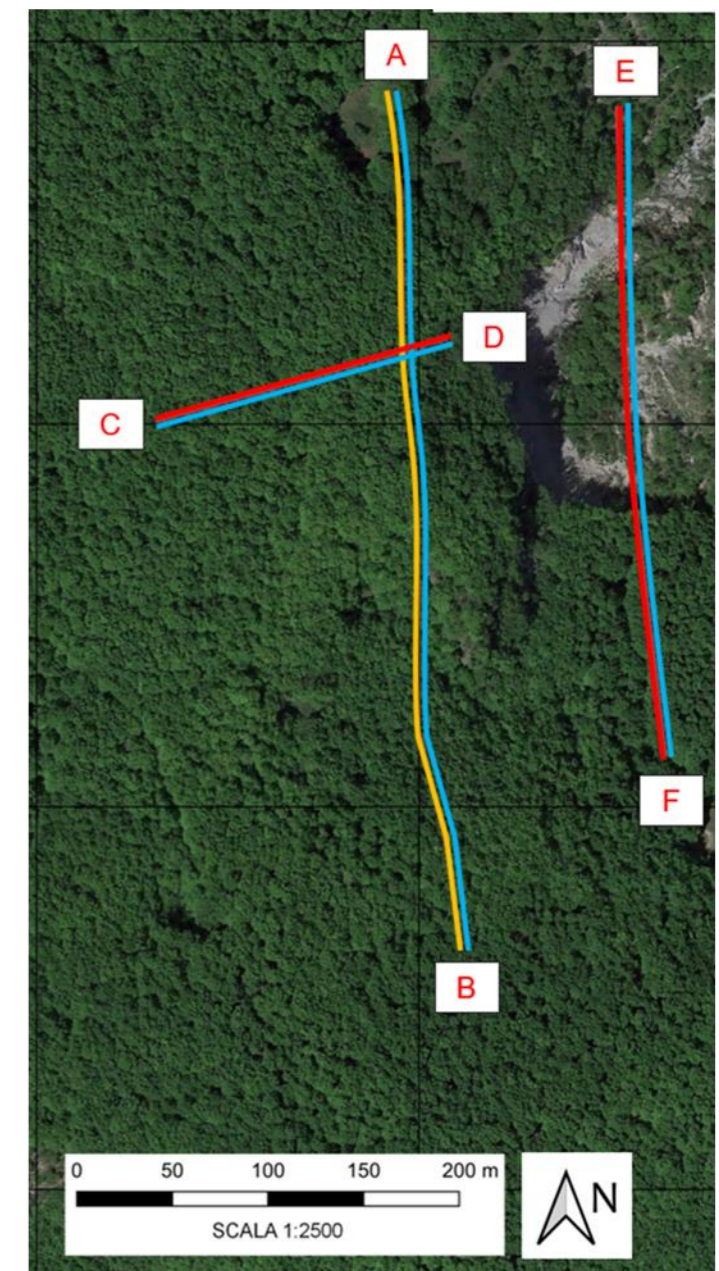
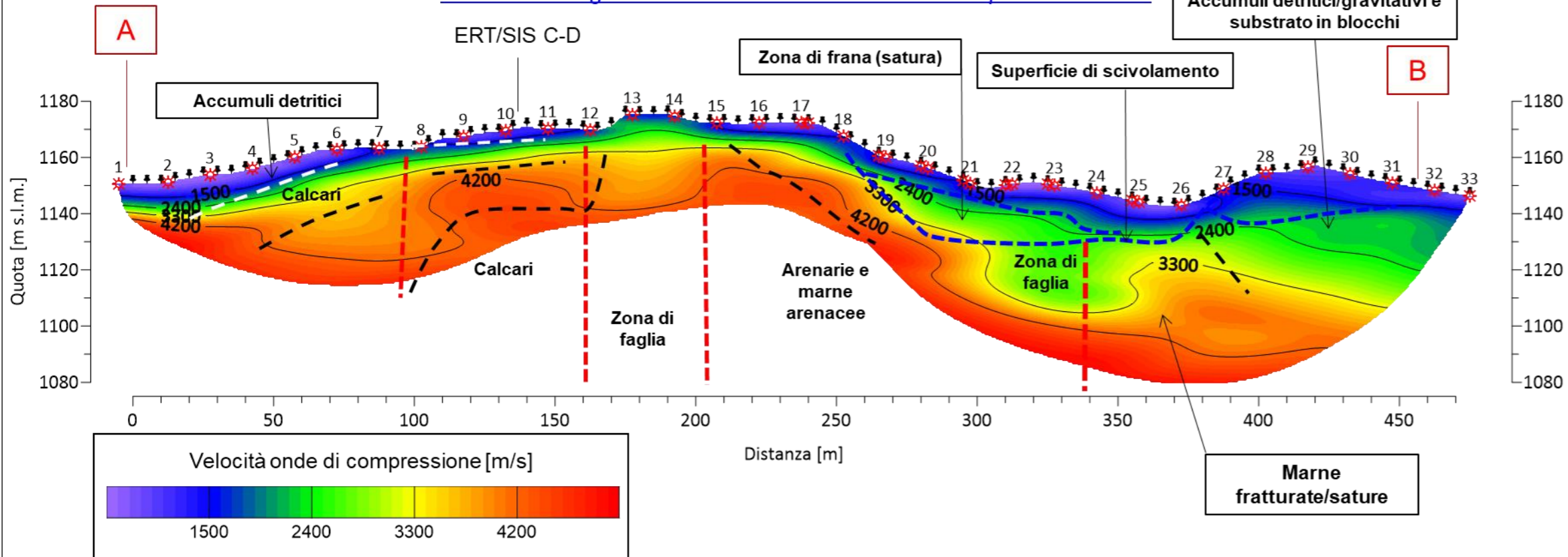


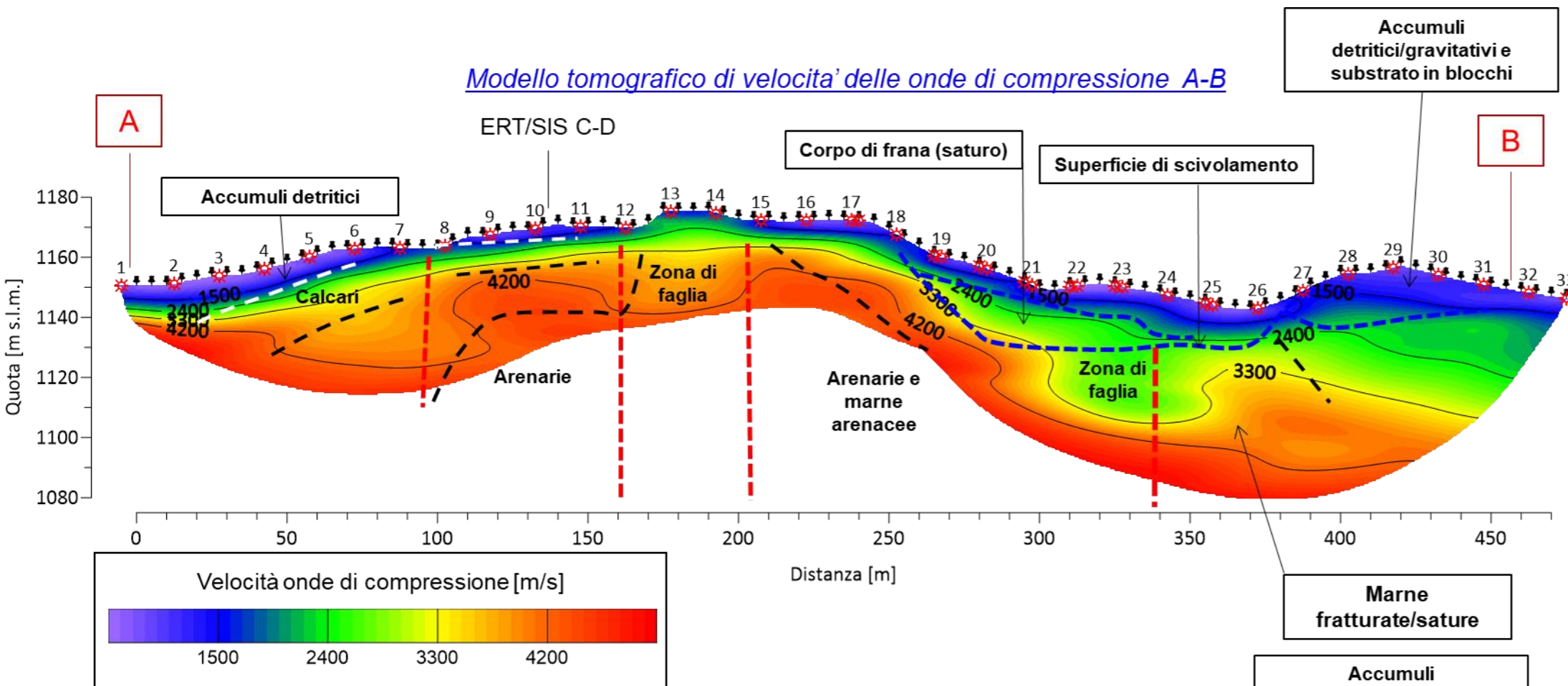
Modello tomografico di resistività elettrica A-B



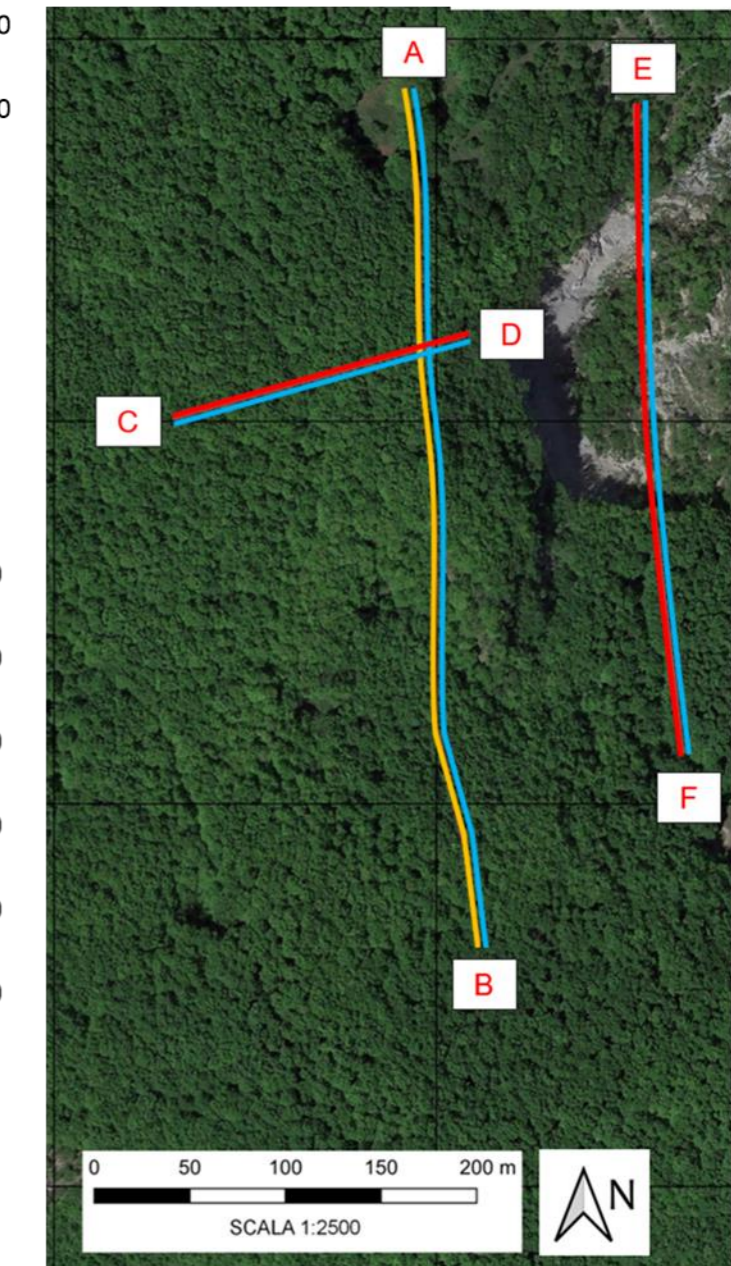
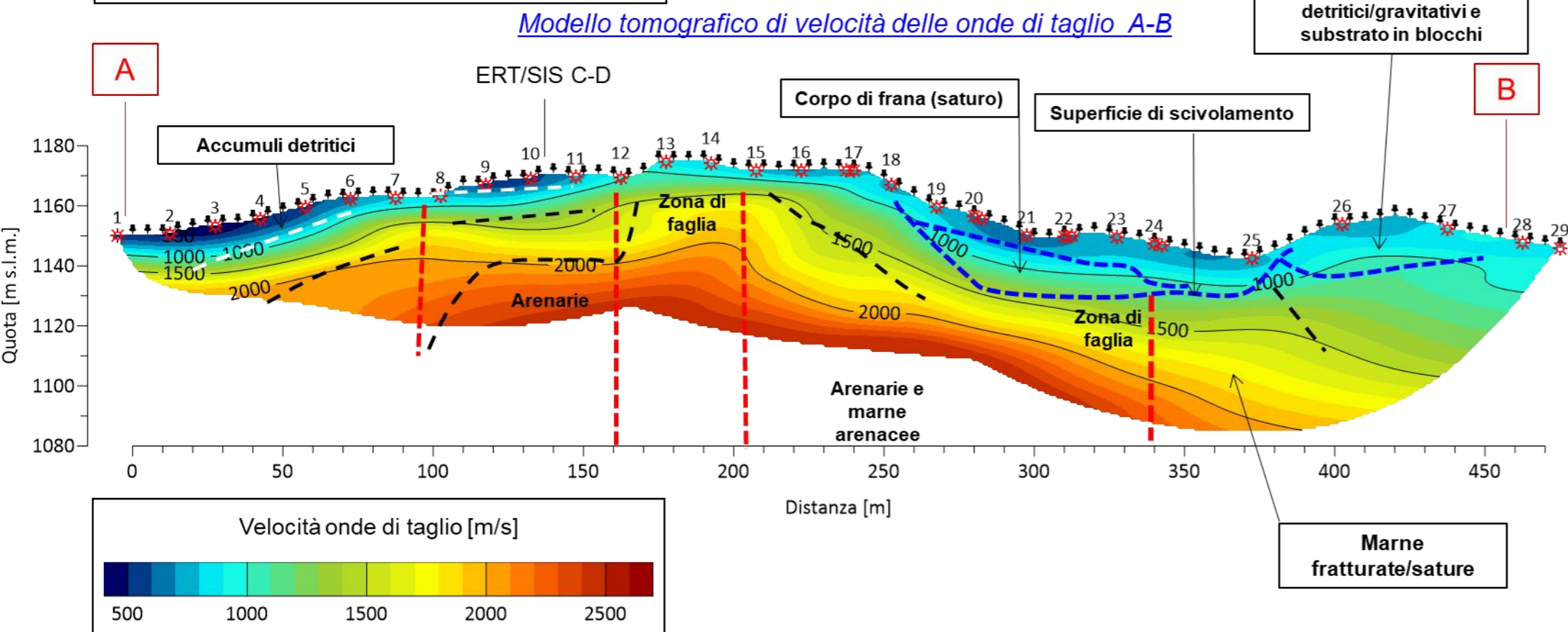
Id Punto	Coordinate WGS84UTM 32N		Quota
	Est	Nord	m s.l.m.
A	384384.206	4703571.403	1150.6
B	384422.092	4703127.143	1146.3

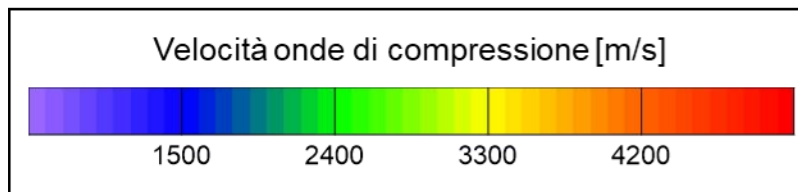
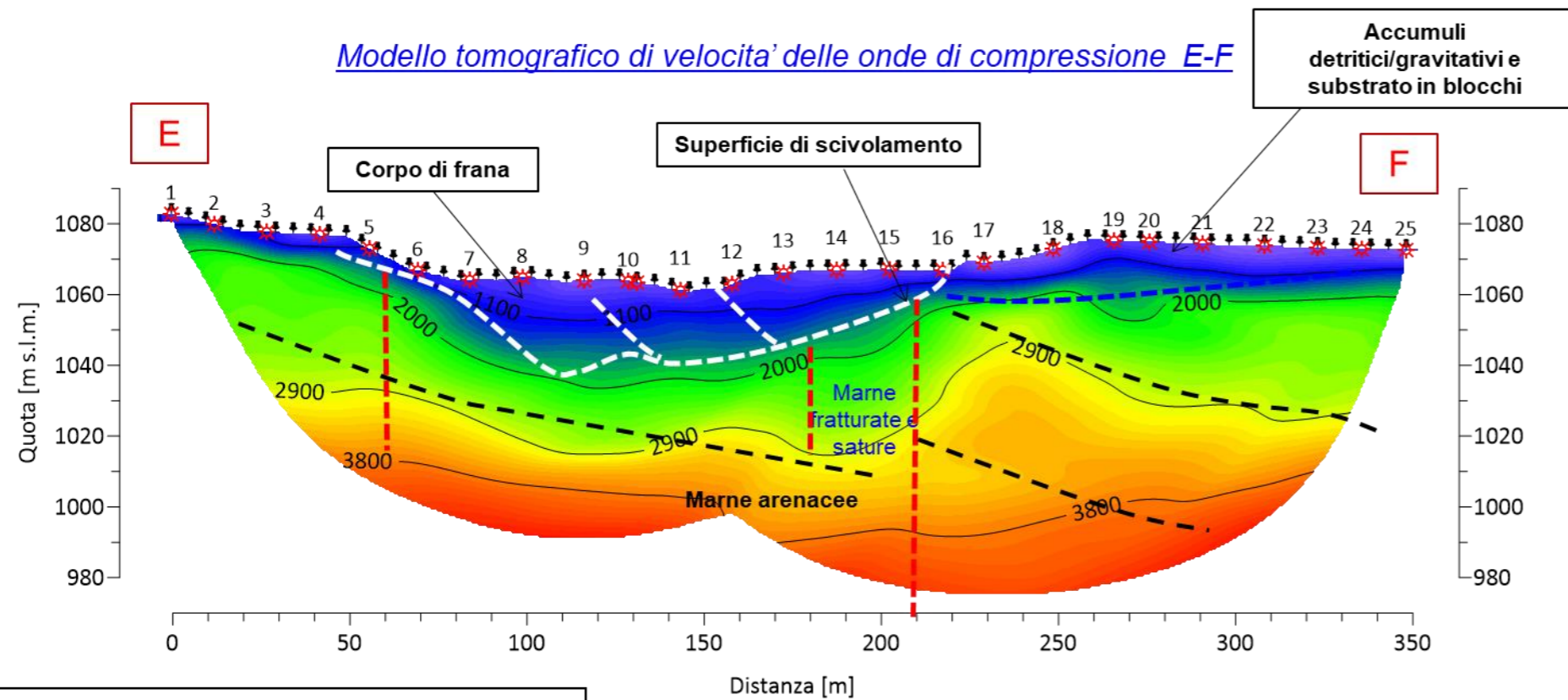
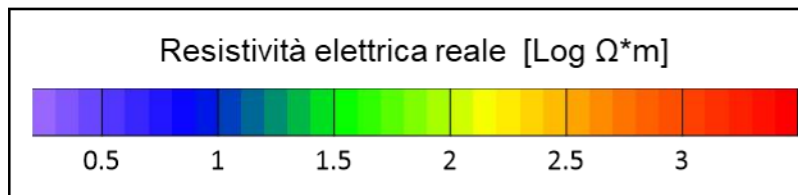
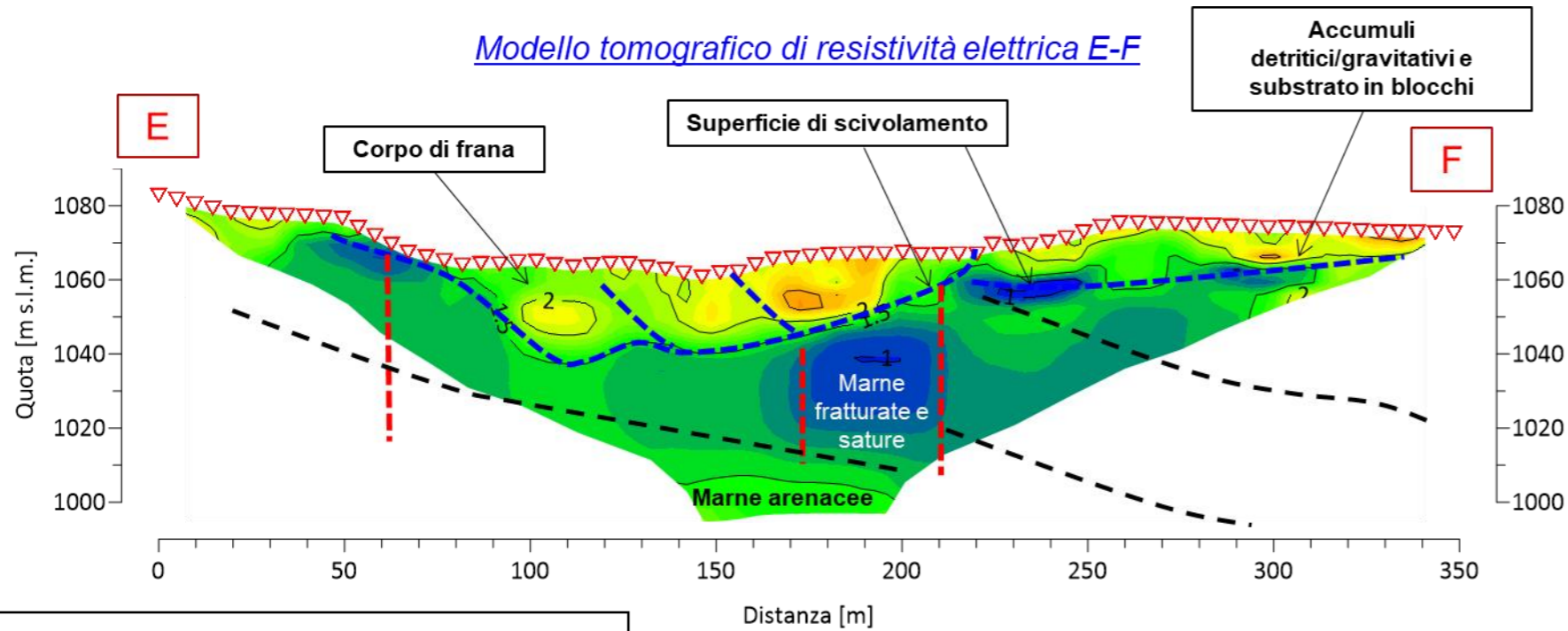
Modello tomografico di velocità delle onde di compressione A-B



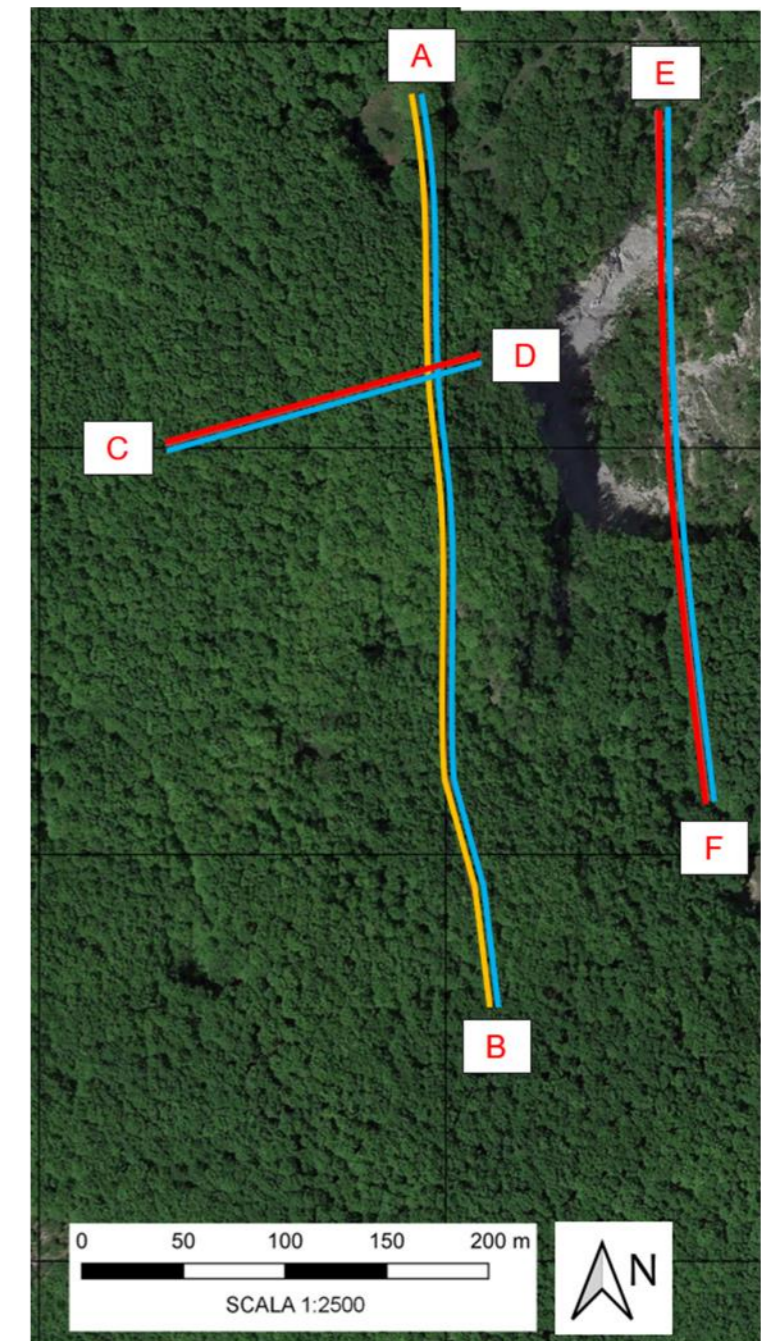


Id Punto	Coordinate WGS84UTM 32N		Quota m s.l.m.
	Est	Nord	
A	384384.206	4703571.403	1150.6
B	384422.092	4703127.143	1146.3

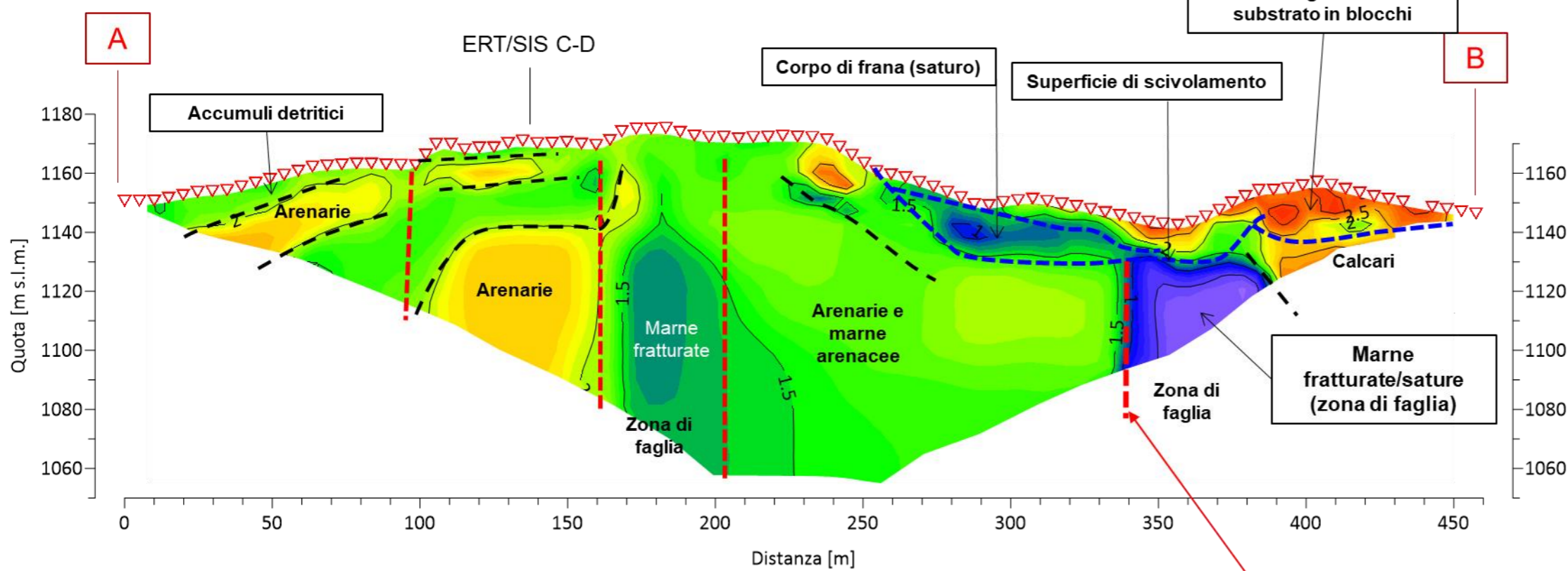




Id Punto	Coordinate WGS84UTM 32N		Quota m s.l.m.
	Est	Nord	
E	384503.448	4703567.263	1082.8
F	384528.756	4703228.028	1072.6

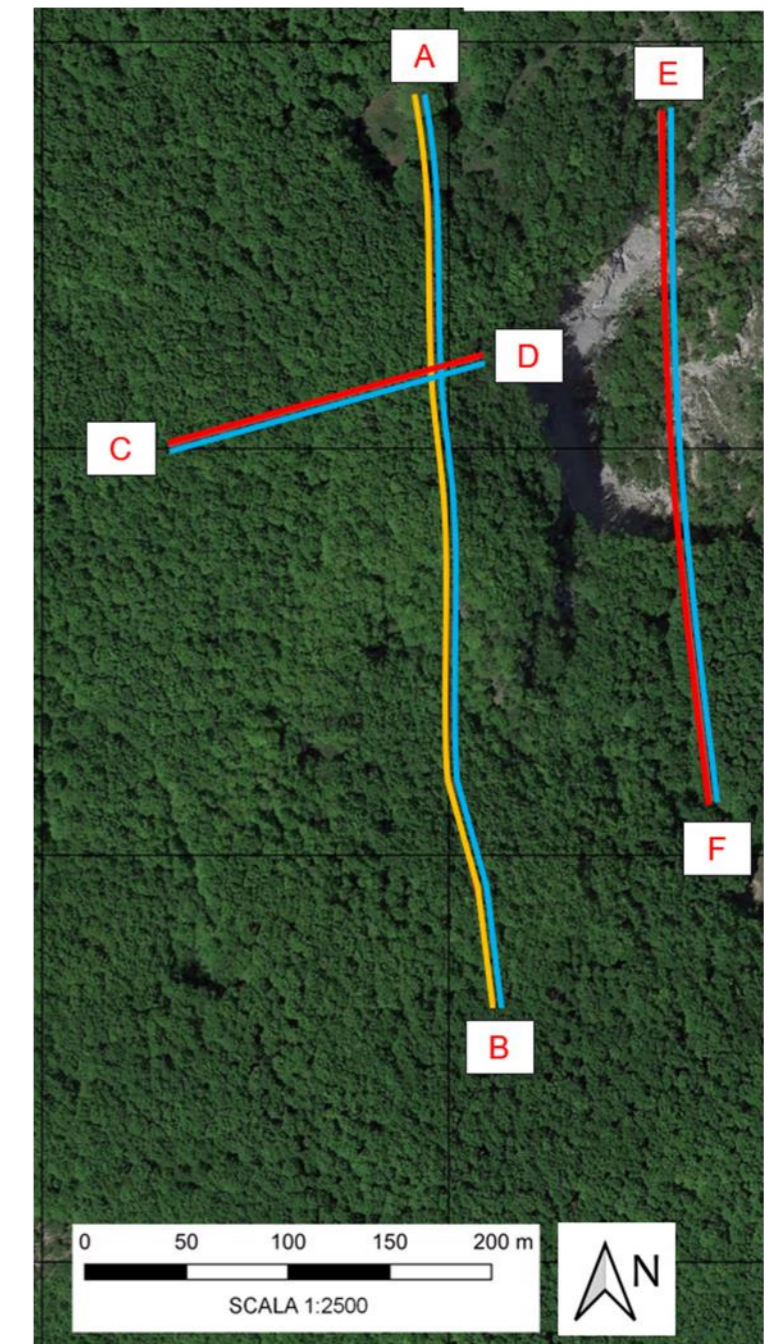
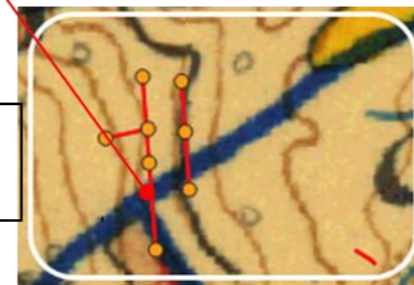
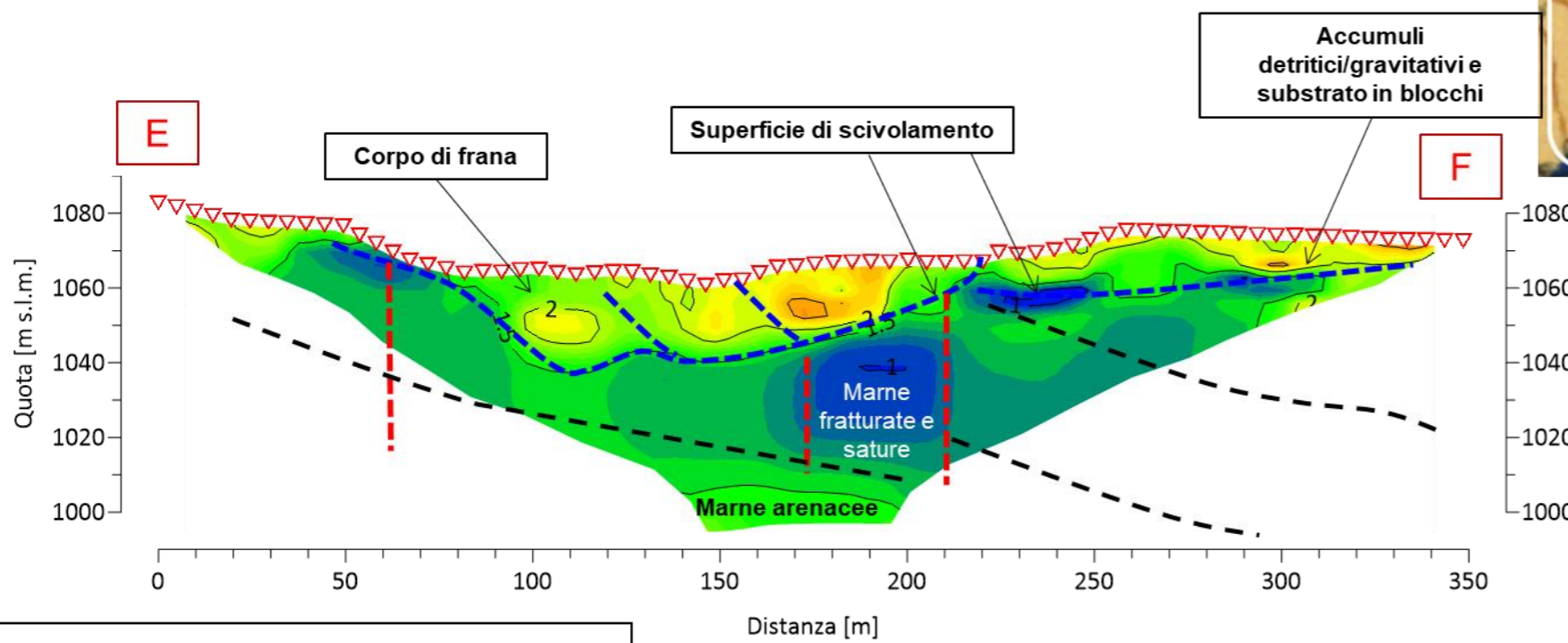


Modello tomografico di resistività elettrica A-B

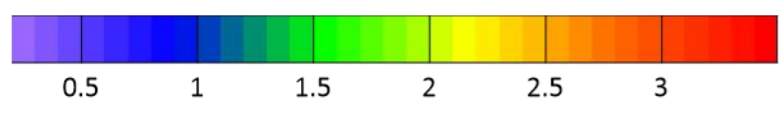


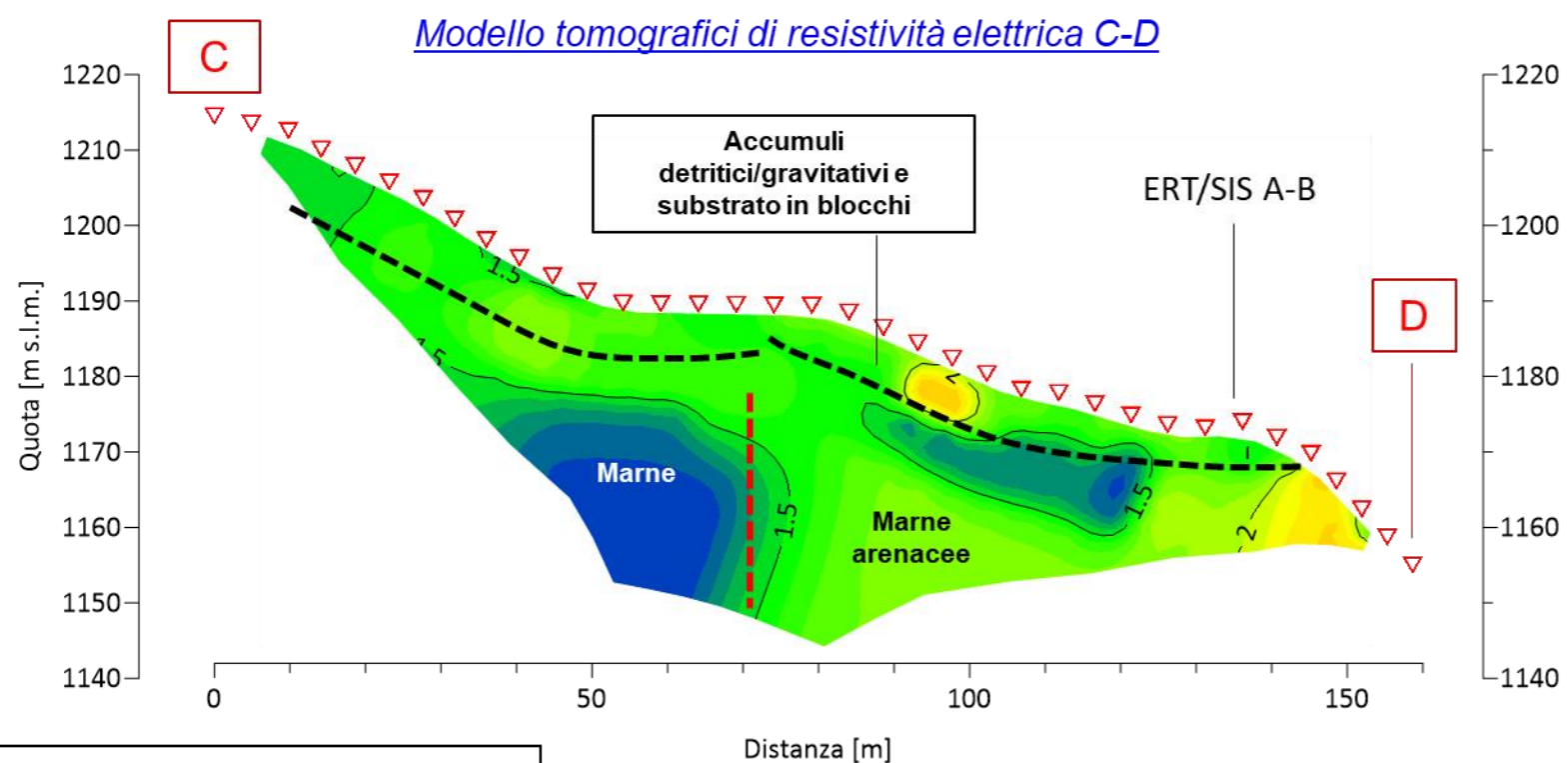
Id Punto	Coordinate WGS84UTM 32N		Quota m s.l.m.
	Est	Nord	
A	384384.206	4703571.403	1150.6
B	384422.092	4703127.143	1146.3
E	384503.448	4703567.263	1082.8
F	384528.756	4703228.028	1072.6

Modello tomografico di resistività elettrica E-F

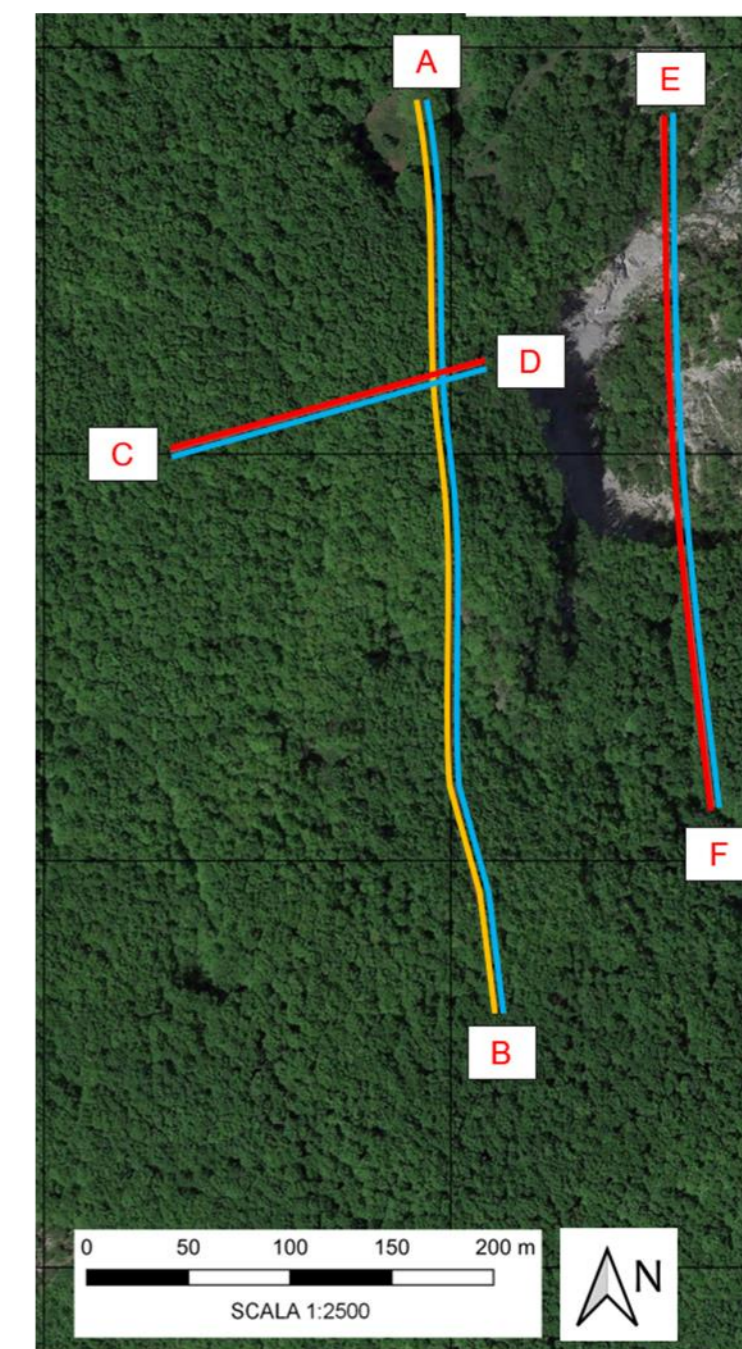
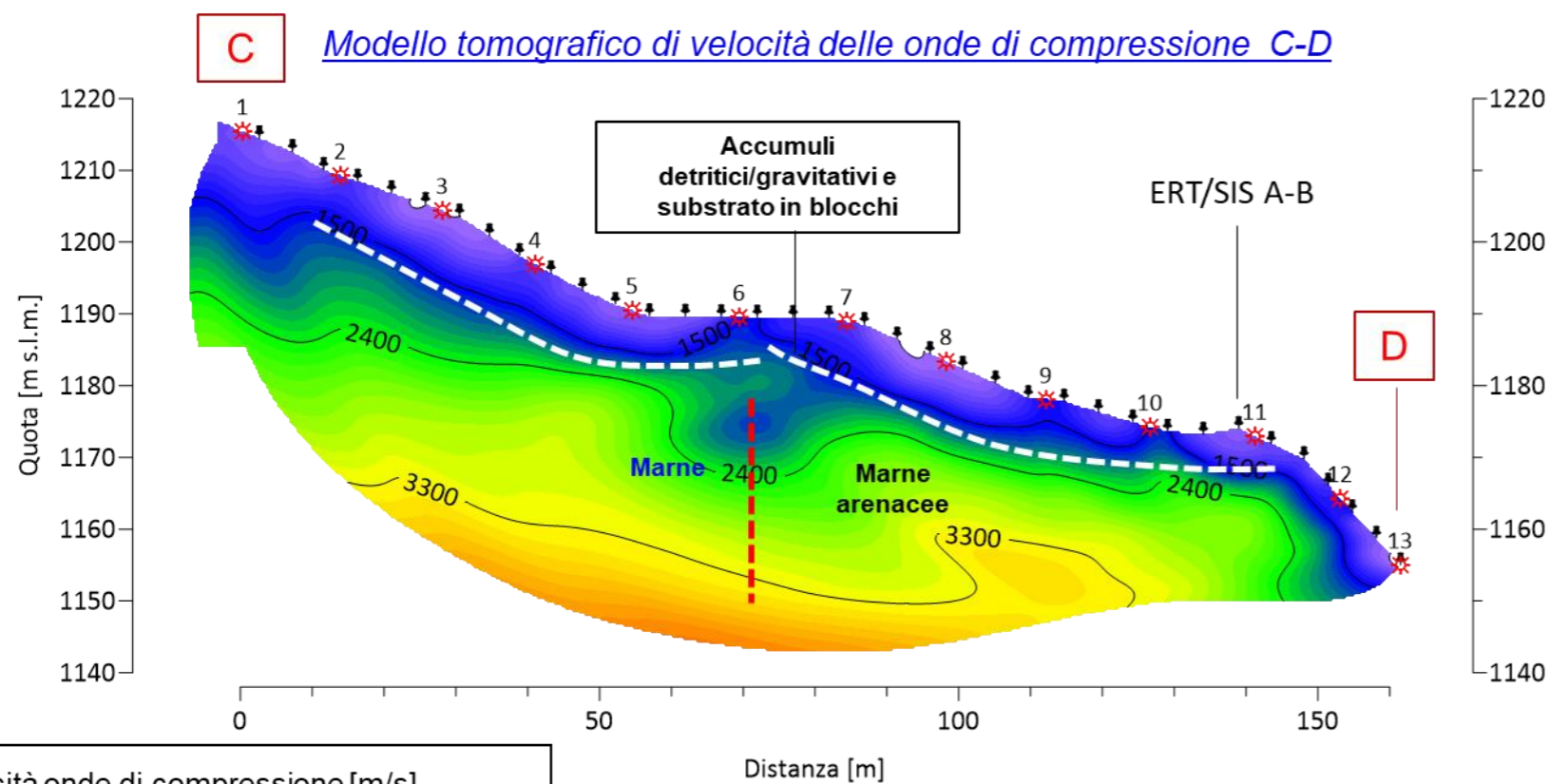


Resistività elettrica reale [Log $\Omega \cdot m$]

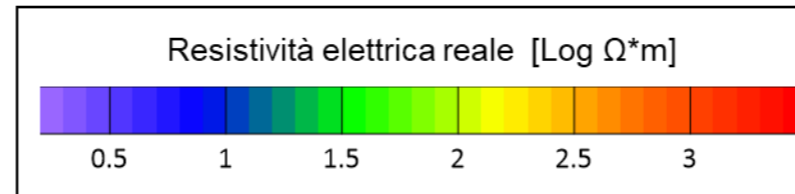
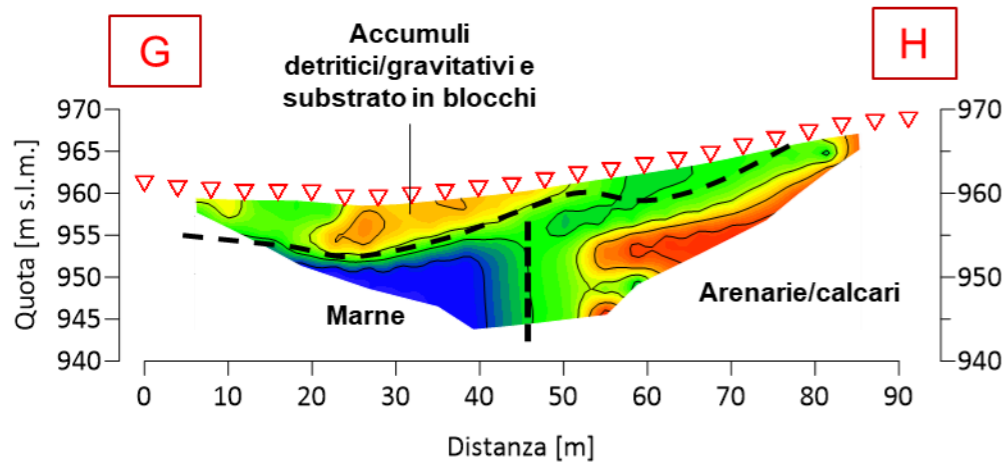




Id Punto	Coordinate WGS84UTM 32N		Quota m s.l.m.
	Est	Nord	
C	384263.124	4703401.772	1214.5
D	384414.457	4703446.572	1155.0

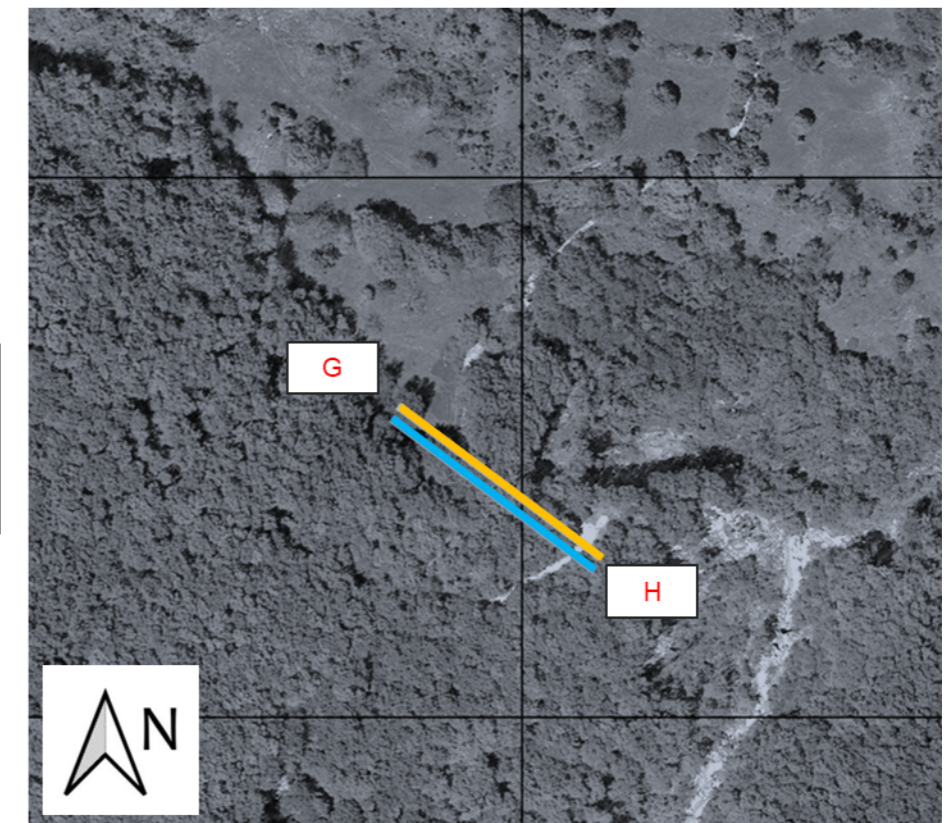
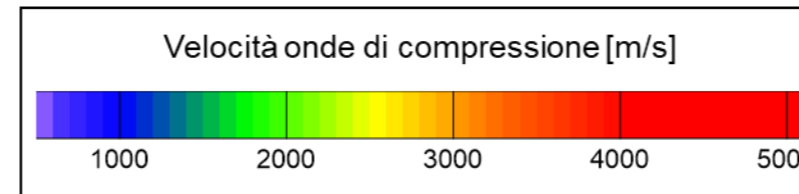
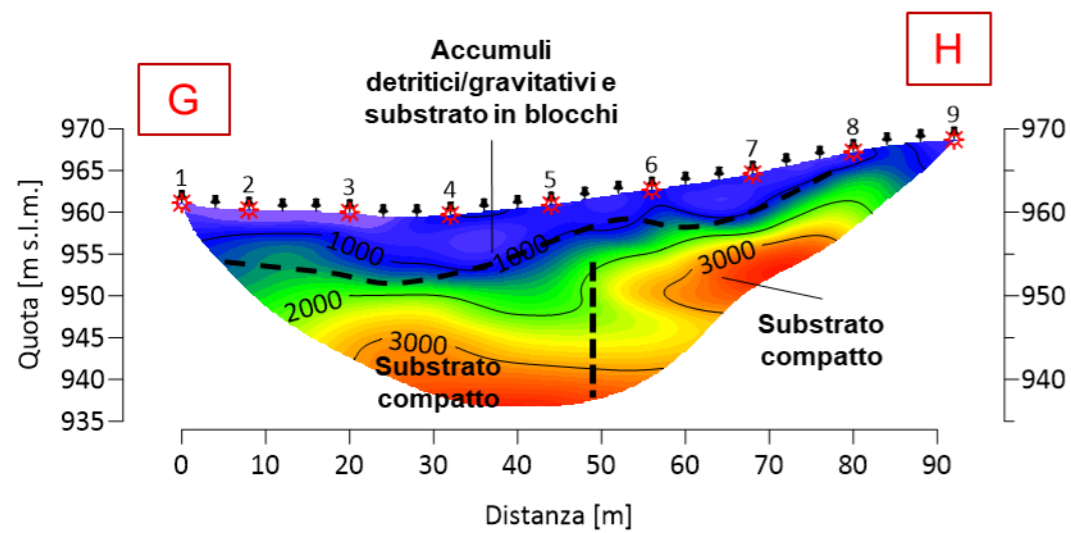


Modello tomografico di resistività elettrica G-H

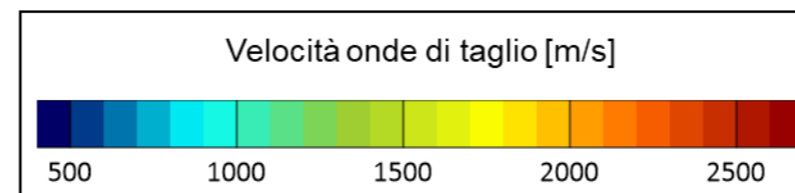
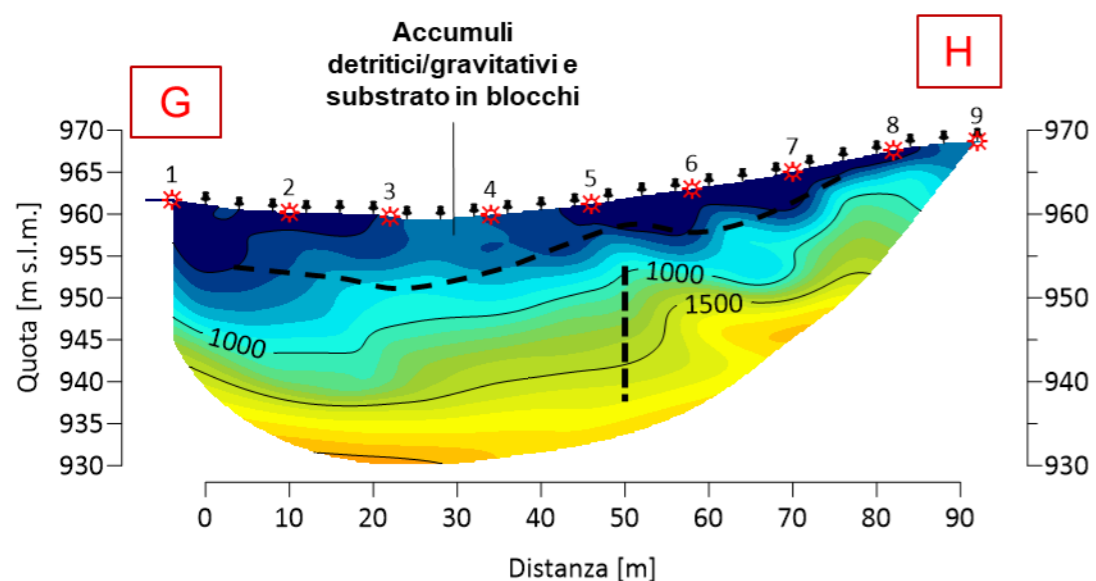


Id Punto	Coordinate WGS84UTM 32N		Quota
	Est	Nord	m s.l.m.
G	384955.634	4703116.084	961.1
H	385027.527	4703060.696	968.7

Modello tomografico di velocità delle onde di compressione G-H



Modello tomografico di velocità delle onde di taglio G-H



APPENDICE A

Cenni sulla metodologia geoelettrica multielettrodo

Cenni teorici sulle indagini geoelettriche multi-elettrodo

Il metodo di indagine geoelettrica multi-elettrodo consiste nel ricostruire la distribuzione della resistività elettrica reale del sottosuolo mediante immissione di corrente elettrica e misura della differenza di potenziale in una serie di elettrodi posizionati sul terreno o in foro. La resistività elettrica è strettamente correlata alle caratteristiche chimiche e fisiche del mezzo attraversato e, per tale motivo, il metodo geoelettrico fornisce una sezione del sottosuolo molto realistica e affidabile, consentendo la costruzione di un modello elettrico bidimensionale o tridimensionale del sottosuolo.

Il metodo può essere utilizzato per numerose applicazioni, tra cui:

- individuazione e caratterizzazione di discariche e perdite di percolato;
- valutazione e redazione di modelli geologici;
- localizzazione di cavità;
- caratterizzazioni e ricerche archeologiche;
- ricerca di acqua sotterranea.

Il principio fisico su cui si basano le misure di resistività elettrica è la legge di Ohm, che governa il flusso di corrente in un mezzo:

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

dove ΔV è la differenza di potenziale [V], I la corrente [A] e R la resistenza elettrica [Ohm].

Nella pratica ciò che viene misurato è la differenza di potenziale tra due punti della superficie (P1 e P2) in seguito all'immissione di corrente nei due punti C1 e C2 (schema in Figura 1).

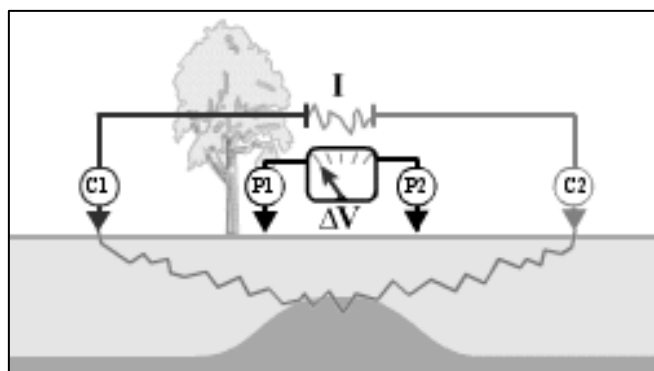


Figura 1: Schema esemplificativo delle indagini geoelettriche

Gli strumenti di misura utilizzati in ambito geofisico per la misura della resistenza elettrica sono detti georesistivimetri. Poiché le misure di campo sono condotte su mezzi non ideali (e quindi eterogenei) e la resistenza varia in uno spazio tridimensionale, dalla corrente immessa I e dalla differenza di potenziale ΔV si calcola il valore di **resistività apparente** [Ohm·m] moltiplicando la resistenza misurata per un fattore geometrico k [m] che dipende dalla disposizione elettrodica adottata:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$$

Tale resistività apparente è un valore che corrisponde alla resistività che un semispazio omogeneo fornirebbe nella stessa configurazione elettrodica.

L'esecuzione di misure di resistività elettrica ottenute traslando lateralmente il quadripolo consente di ottenere informazioni relative a variazioni laterali di resistività. Se, invece, si aumenta la spaziatura tra gli elettrodi di corrente e di tensione, aumenta la profondità di indagine e si ottengono informazioni maggiori sulle variazioni verticali. La strumentazione tipica delle tecniche di tomografia elettrica permette di effettuare le due operazioni in modo automatico, e di associare ad ogni linea di misura, una distribuzione bidimensionale di resistività apparente, detta *pseudosezione*.

La misura viene eseguita disponendo lungo una linea una serie di elettrodi ad interasse regolare collegati al georesistivometro mediante cavi multipolari: il numero e la spaziatura tra gli elettrodi vengono stabiliti in relazione al grado di dettaglio ed alla profondità d'indagine richieste.

Le configurazioni elettrodiche (array) più utilizzate (che differiscono per potere risolutivo, profondità di investigazione, copertura orizzontale e stabilità del segnale) sono:

- **Wenner:** presenta un'alta risoluzione verticale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture o stratificazioni orizzontali, una buona profondità di investigazione, scarsa copertura orizzontale e una buona stabilità del segnale, essendo questa inversamente proporzionale a k (schema esemplificativo in Figura 2).
- **Schlumberger:** presenta un'alta risoluzione orizzontale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture o stratificazioni verticali, una buona profondità di investigazione (pari al Wenner, scarsa copertura orizzontale e una buona stabilità del segnale);
- **Dipolo-Dipolo:** presenta un'alta risoluzione orizzontale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture verticali (variazioni laterali di resistività, cavità ecc.), profondità di investigazione e ampiezza del segnale misurato minori rispetto al Wenner, ma con una maggiore copertura orizzontale;
- **Polo-Dipolo:** presenta un'alta risoluzione orizzontale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture verticali, profondità di investigazione circa doppia rispetto alla configurazione Wenner ma ampiezza del segnale misurato minore, buona copertura orizzontale;
- **Wenner-Schlumberger:** rappresenta una soluzione ibrida ed è quello più utilizzato in geofisica ambientale poiché costituisce il giusto compromesso tra le differenti caratteristiche sopra descritte.

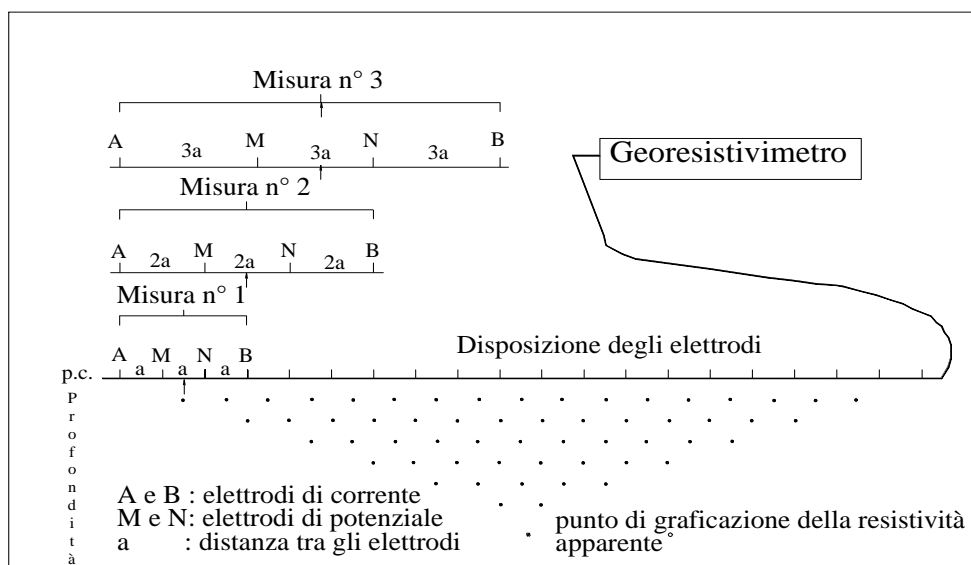


Figura 2 - Sistema di acquisizione dati secondo la configurazione Wenner

Per ottenere, a partire dai valori di resistività apparente, la distribuzione delle resistività reali nel sottosuolo, è necessario risolvere un “problema inverso”. In molte applicazioni geofisiche, la soluzione del problema inverso consente di determinare i valori di quantità non misurabili direttamente, parametri incogniti, a partire da quantità misurabili, i dati sperimentali, attraverso l’assunzione di un modello, cioè di una legge fisica che li correla. Tale modello è una rappresentazione matematica ed ideale di una porzione di sottosuolo; il modello è caratterizzato dai “parametri del modello” che sono le quantità fisiche che si vuole stimare dai dati misurati.

Nel caso della tomografia elettrica, si vuole stimare la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo a partire da misure effettuate in superficie.

I software utilizzati per l’inversione (RES2DINV, ERTLab, ecc) implementano un modello a celle (o blocchi), i cui parametri sono i valori di resistività delle singole celle in cui il sottosuolo è stato suddiviso; la soluzione agli elementi finiti o alle differenze finite fornisce i valori di resistività elettrica reale.

Dal modello geofisico, con opportune tarature e/o in base alle conoscenze geologiche del sottosuolo, si elabora un modello geo-litologico. Utilizzando l’array elettrodoico Wenner-Schlumberger la profondità di indagine raggiunta è mediamente pari a 1/6 della lunghezza dello stendimento: pertanto uno stendimento costituito da 48 elettrodi con interasse 3 m con si ottiene una sezione lunga 141 m ed una profondità di indagine pari a circa 23 m.

Nella tabella della pagina seguente si riportano i valori di resistività elettrica di alcuni terreni e materiali che vengono utilizzati come valori indicativi di taratura nell’interpretazione delle tomografie.

Materiale	Resistività [Ohm·m]
Acqua dolce	10-10 ²
Acqua salata	0.2
Arenarie	2·10 ² -5·10 ³
Argille	1-50
Benzina	107
Calcari	3·10 ² -10 ⁴
Cloruro di Potassio	0.708
Cloruro di sodio	0.843
Depositi alluvionali	50·10 ³
Dolomie	5·10 ² -10 ⁵
Ferro	9.074·10 ⁻⁸
Ghiaia e sabbia secca	10 ³ -10 ⁴
Ghiaia e sabbia sature d'acqua dolce	50-5·10 ²
Ghiaia e sabbia sature d'acqua salata	2-5
Gneiss e graniti sani	10 ³ -10 ⁴
Gneiss e graniti alterati	10 ² -10 ³
Marne	50-5·10 ²
Piroclastici	50-6·10 ²
Rocce ignee	10 ² -10 ⁴
Suolo di copertura	10-2·10 ²
Tufi	1.5·10 ² - 9·10 ²

Tabella 1: Valori caratteristici di resistività elettrica [Ulriksen (1982), Telford (1990), Reynolds (1997)]

Oltre alla resistività elettrica, i comuni georesistivimetri consentono anche la misura contemporanea del valore di polarizzazione indotta: si tratta di un fenomeno elettrico che si manifesta all'interno di mezzi materiali sia nel dominio del tempo, con tensioni di rilassamento all'interruzione di un flusso di corrente elettrica energizzante a gradino (in questo caso viene misurata come caricabilità), sia nel dominio della frequenza, con una precisa legge di dispersione della resistività elettrica al variare della frequenza di un flusso di corrente alternata energizzante.

Negli ultimi anni si è assistito ad un crescente utilizzo di tale parametro geofisico in campi differenti, quali la ricerca mineraria, l'idrogeologia, lo studio della distribuzione di sostanze contaminanti nel sottosuolo, l'esplorazione geotermica e la ricerca di idrocarburi. In questi casi, gli effetti di polarizzazione possono essere dovuti ad una varietà di motivi, fra i quali i più importanti sono: fenomeni di interfaccia, polarizzazione di membrana, variazioni di porosità, fenomeni di trasformazione indotti dall'interazione di fluidi chimicamente attivi con le rocce ospitanti e/o l'acqua di falda.

L'inversione tomografica dei dati ottenuti in campagna restituisce un modello tomografico di caricabilità del terreno grazie al quale è possibile individuare eventuali zone di accumulo di percolato o di cospicue concentrazioni di minerali, idrocarburi, ecc.

I limiti di applicabilità del metodo geoelettrico sono legati a:

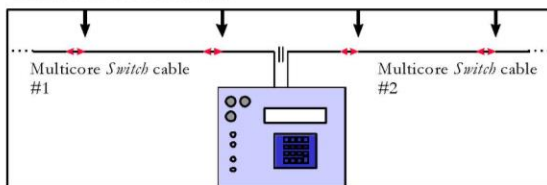
- condizioni di sito specifiche (ad esempio, presenza di pavimentazioni in cemento armato che non consentono una corretta distribuzione delle linee di corrente);
- presenza di sottoservizi interrati con andamento parallelo o sub-parallelo allo stendimento (in particolare cavi elettrici in tensione e tubazioni metalliche in genere);
- scarso contrasto di resistività elettrica tra il target dell'indagine ed il terreno naturale all'interno del quale esso si trova.

Specifiche tecniche della strumentazione geoelettrica

SYSCAL Pro

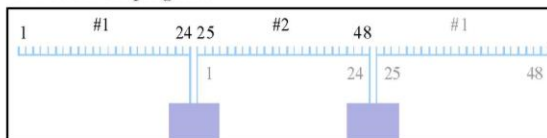
FIELD LAY-OUT OF A SYSCAL PRO SWITCH UNIT

The unit is located at the centre of the configuration. Standard take-out spacing of the multicore *Switch* cables are 5 and 10 meters. The cables are supplied on reels in several sections in regards to the number of take-outs and the spacing, so as to keep a suitable weight for each reel. Sequences of measurement using standard electrode arrays (Dipole-Dipole,...) can be directly programmed from the SYSCAL Pro for a full in-the-field autonomy. Non standard configuration can also be uploaded to the unit by the ELECTRE II PC software.



SYSCAL Pro *Switch*-48 with two electrode strings

The roll-along capability can also be easily implemented thanks to the cable design (double ended) and to the internal or ELECTRE II programs.



Roll along of the SYSCAL Pro *Switch*-48

For 3D surveys, *Switch* Pro boxes can be added to the basic SYSCAL Pro unit (standard or *Switch* version). A *Switch* Pro box contains switching boards to drive 48, 72 or 96 electrodes, a 12V rechargeable battery and a LCD screen. The user has the opportunity to perform the numbering of the electrodes connected to the box for a full flexibility.

DATA MANAGING

Thanks to the data managing PROSYS software, one has the opportunity to visualize graphically the apparent resistivity section and process the data (filter, insert topography, add data files...).

Then, one can export the data to ?txt? file or to interpretation software:

WINSEV for 1D sounding interpretation.

RES2DINV – SENSINV2D - GEOSOFT or INTERPEX software for pseudo-section inversion to true resistivity (and IP) 2D section.

RES3DINV software, for inversion to true resistivity (and IP) 3D data.

TECHNICAL FEATURES

OUTPUT SPECIFICATIONS

- Automatic injection ranging (microprocessor controlled)
- Current: up to 2.5 A
- Voltage: up to 1000 V (1500 V with an external DC/DC converter)
- Power: up to 250 W (500 W with an external DC/DC converter)
- Possibility to use an external AC/DC 1200 W converter
- Pulse duration: 0.2, 0.25, 0.5, 1, 2, 4 or 8 s
- Current measurement precision: 0.2 % typical
- *Switch* version output voltage: up to 800 V

INPUT SPECIFICATIONS

- Measuring process: automatic ranging and calibration
- Input impedance: 100 M Ω
- Input voltage:
 - Max. channel 1: 15 V
 - Max. channel 2 to channel 10: 15 V
 - Protection up to 1000V
- 50 to 60 Hz power line rejection
- Voltage measurement:
 - Precision: 0.2 % typical
 - Resolution: 1 μ V
- Noise reduction: automatic stacking number in relation with a given standard deviation value
- SP compensation through automatic linear drift correction
- Induced Polarization (chargeability) measured over up to 20 automatic or user defined slices

GENERAL SPECIFICATIONS.

- Up to 4000 electrodes can be used
- Data flash memory: more than 21 000 readings
- Serial link RS-232 data download
- Power supply: two internal rechargeable 12V, 7.2 Ah batteries ; optional external 12V standard car battery can be connected to the transmitter part
- Weather proof
- Shock resistant fiber-glass case
- Operating temperature: -20 to +70 °C
- Dimensions (SYSCAL Pro *Switch*-48): 31 x 23 x 36 cm
- Weight (SYSCAL Pro *Switch*-48): 13 kg
- Weight of a 24 take-outs (spaced 5 m) string on a reel: 23 kg



IRIS INSTRUMENTS - 1, avenue Buffon, B.P. 6007 - 45060 Orléans Cedex 2, France
 Phone: +33 (0)2 38 63 81 00 - Fax: +33 (0)2 38 63 81 82
 E-mail: sales@iris-instruments.com - Web site: www.iris-instruments.com

APPENDICE B

Cenni sulla metodologia sismica a rifrazione

Cenni teorici sulla metodologia sismica a rifrazione

Il rilievo sismico a rifrazione di onde P è un metodo di indagine basato sulla misura dei tempi di percorso che le onde elastiche, generate nel terreno in un punto-sorgente, impiegano per raggiungere dei ricevitori (geofoni) disposti sulla superficie del terreno ed allineati con il punto di energizzazione. La distanza tra i geofoni e quella del punto di energizzazione sono scelte in base allo spessore ed ai tipi di materiale che si vogliono indagare.

Le onde elastiche che si propagano in profondità e vengono in parte deviate (rifratte) lungo l'interfaccia che separa due mezzi a differente impedenza acustica (V_1 , V_2) ed in parte proseguono verso il basso finché l'energia viene completamente assorbita dal mezzo in cui si propaga.

L'effetto di queste onde è la formazione di vibrazioni che vengono captate da sensori posti sulla superficie, generalmente elettromagnetici, in grado di trasformare la sollecitazione meccanica, che subisce la massa mobile del magnete, in un segnale elettrico che, debitamente amplificato, viene riprodotto su monitor e memorizzato su supporto informatico.

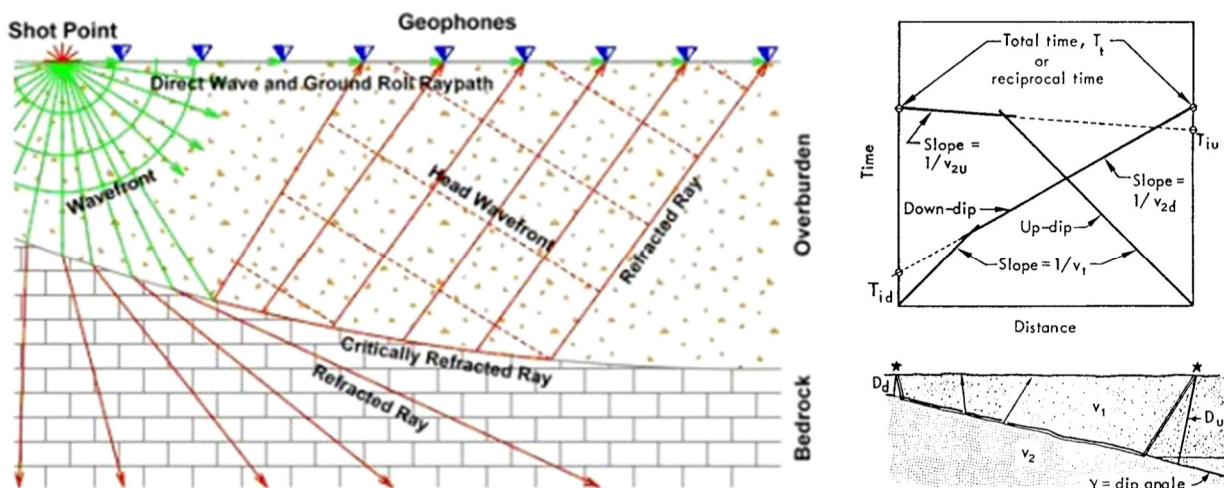


Figura 1 - Modello di propagazione dei fronti d'onda nei raggi rifratti

Con i tempi di percorso rilevati mediante i geofoni e le distanze degli stessi dai punti di energizzazione si tracciano dei diagrammi tempi-distanze (dromocrone) che permettono di calcolare sia la velocità di propagazione delle onde di compressione P, sia la profondità e lo spessore dei terreni che sono stati attraversati dalle onde sismiche.

L'interpretazione delle dromocrone consente di ricavare delle sezioni sismiche che schematizzano la distribuzione della velocità in funzione della profondità.

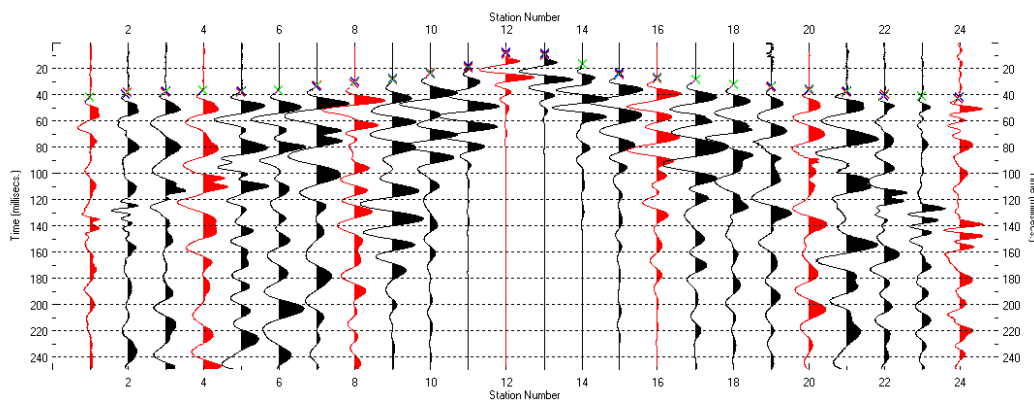


Figura 2 - Sismogramma

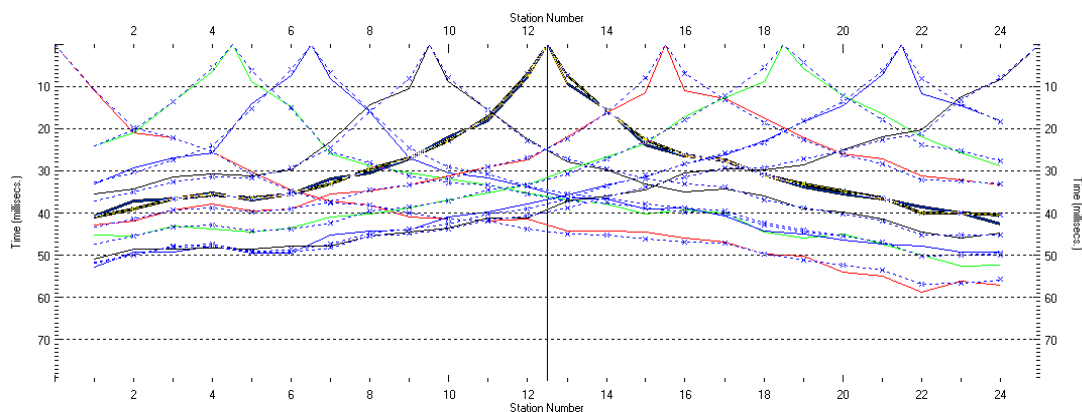


Figura 3 - Dromocrone

Dall'analisi delle dromocrone è possibile definire il numero dei sismostrati presenti nel sottosuolo (ovviamente per la finestra temporale adottata che è funzione della lunghezza dello stendimento e della quantità di energia utilizzata). E' importante sottolineare che la sismica a rifrazione funziona solo per velocità crescenti. L'interpretazione per la risoluzione geometrica dei sismostrati (profondità e velocità) si avvale di diverse metodologie di calcolo dalle più semplici procedure dirette (Hagedoorn, 1959; Barry, 1967), seguendo le leggi generali dell'ottica, a quelle più complesse sia 1D che 2D che elaborano i dati mediante la tecnica del GRM (Palmer, 1980), del Ray-tracing o della tomografia (Hampson & Russell, 1984; Olsen, 1989). La finalità della tomografia è la dettagliata esplorazione del modello di distribuzione della velocità in un mezzo. Essa si basa sui primi arrivi ottenuti per set plurimi di coppie sorgente-ricevitore: la sola limitazione è quella che i raggi sismici formino una rete completa e cioè, idealmente, ciascun punto del mezzo investigato dovrebbe essere attraversato dai raggi in tutte le direzioni.

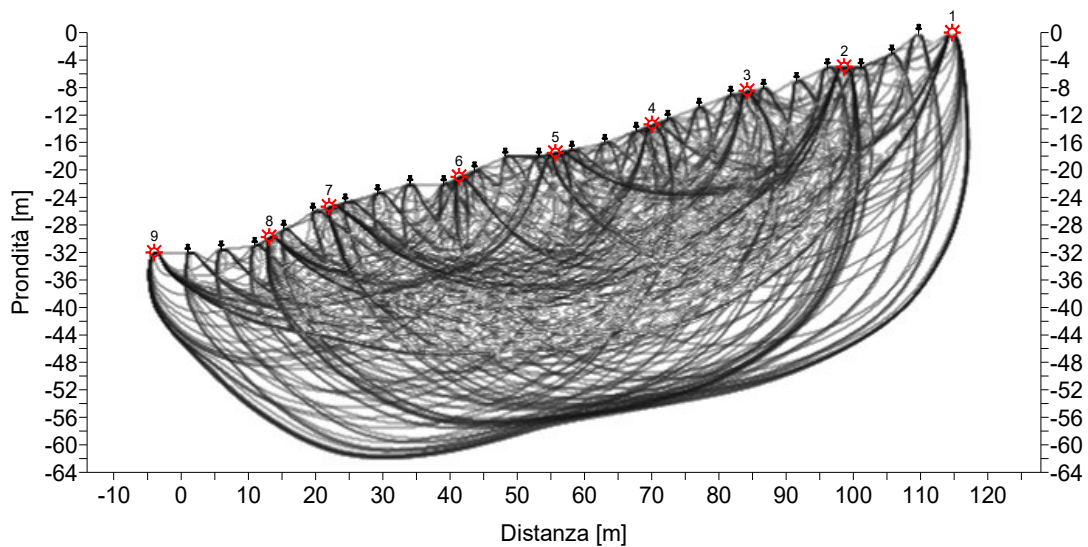


Figura 4 - Copertura raggi sismici

L'analisi dei raggi sismici con un programma di inversione tomografica discretizza il modello fisico e restituisce un modello di distribuzione delle velocità delle onde di compressione P (isotache espresse in m/s) coerente con il modello geologico del sottosuolo.

Per l'elaborazione dei dati sismici a rifrazione si utilizza il software RAYFRACT™ (32 – bit version), della Intelligent Resources Inc. (Canada). I dati dei primi arrivi (onde di compressione) sono elaborati con il metodo GRM (general reciprocal method) accoppiato ad una inversione tomografica su una griglia di nodi equispaziati per una modellazione della distribuzione delle velocità delle onde di compressione nel sottosuolo. Tale metodo (inversione tomografica) consente (con un sufficiente numero di scoppi) di individuare anche eventuali inversioni di velocità (che costituiscono il limite della prospezione sismica a rifrazione).

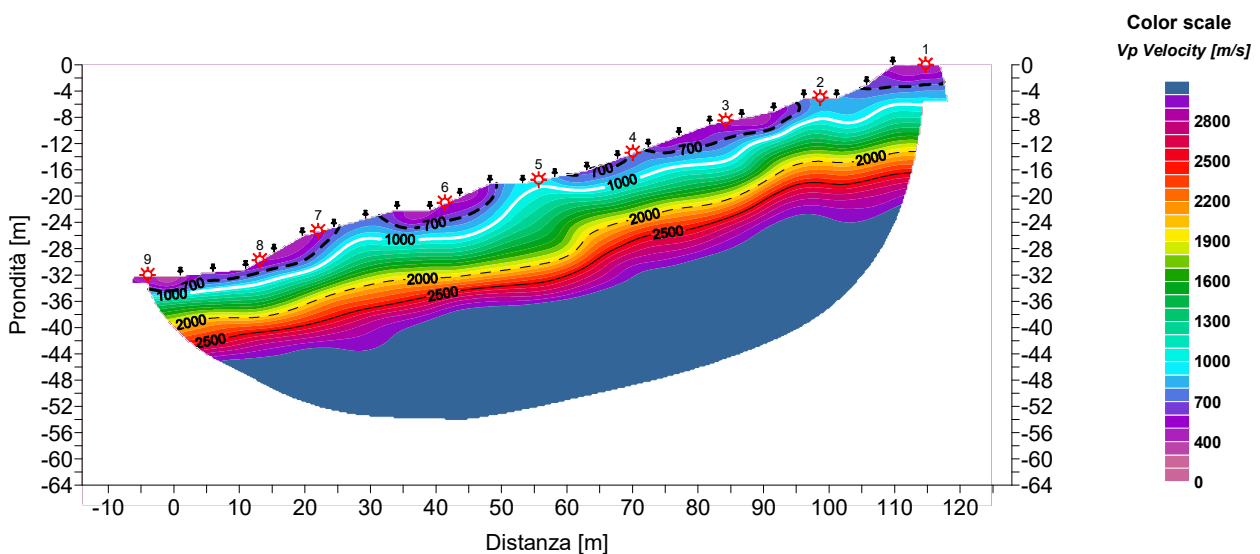


Figura 5 - Modello tomografico della distribuzione delle onde di compressione V_p in m/s

Il metodo può essere utilizzato per numerose applicazioni, tra cui:

- definire la profondità e la geometria del substrato lapideo;
- caratterizzare le zone di frana,
- definire la classificazione sismica dei suoli (Vs30, microzonazione sismica),
- valutare le caratteristiche di deformabilità dei terreni e di rilevati (grado di addensamento);
- valutare il grado di ammaloramento di strutture in calcestruzzo;
- valutare l'escavabilità di rocce e terreni.

Specifiche tecniche della strumentazione sismica

DAQLink 4 Specifications

1 to 24 channels per unit
 Weatherproof enclosure
 Multiple units can be used together
 for large channel count

A/D conversion:

24 bit high-speed sigma delta converters

Dynamic range:

144 dB (system)
 Greater than 125 dB (measured at 2msec)

Bandwidth:

DC to 20 KHz –
 Digital Filter Bandwidth = 85% of (sample rate)

Common Mode Rejection:

Greater than 100 dB

Crosstalk:

Better than 125 dB

Noise Floor:

0.15 microvolt RMS noise (2 msec sample rate)

Trigger Accuracy:

+/- 1 microsecond at all sample rates

Maximum Input Signal:

X 1 gain: 6.6 volts peak to peak
 X 4 gain: 1.65 volts peak to peak
 X 16 gain: 0.412 volts peak to peak

Input Impedance:

100 K ohms

Preamplifier Gains:

X1, X4 and X16 standard; software selectable

Anti-alias Filters:

85 % of Nyquist frequency

Digital Filters:

Low Cut – User Selectable frequency
 Notch – 50 or 60 Hz standard – User selectable
 High Cut – User Selectable

Sample Interval:

0.0156, 0.0208, 0.0625, 0.125, 0.250, 0.500, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00 millisecond

Sample Frequency:

64000, 48000, 16000, 8000, 4000, 2000, 1000, 500, 250, 125 samples/second

Record Length:

Up to 16 Gbytes/ number of channels

Pre-trigger delay:

10 second

Continuous Recording Option

GPS Interface Standard

Internal Clock synchronized to GPS time
 GPS Time and Position saved with data

Internal Storage:

Compact Flash style storage media
 Standard FAT16 or FAT32 file system
 (Maximum file size = 32GB)

100Mbit Ethernet

Download speed 8MByte/sec; real time transfer

Power consumption:

24 channels – less than 0.14 watts/channel

Built in Line Testing and Instrument Tests

Size: 380x250x40 mm

Weight: 2.0 Kg

