

"CONTRIBUTI ALLA DEFINIZIONE DI PROCEDURE PER L'ESPLORAZIONE GEOELETRICA PROFONDA"

M. Marchisio^(°), G. Bracciali^x, G. Censini^x, M. Mazzeschi^x, G. Tripodi^x

1. - PREMESSE

Tra i metodi di esplorazione geofisica profonda (ci si riferisce qui a profondità da qualche centinaio di metri a qualche chilometro - tralasciando le esplorazioni crostali), la prospezione elettrica di resistività, in base alle modalità operative, qualità dei risultati, profondità di penetrazione e costi, ha uno spazio operativo aperto e consolidato per ricerche fino a profondità tra uno e due chilometri, con una notevole spinta a superare questi limiti.

I settori di applicazione sono molteplici: geotermia; zonazione sismica; geologia strutturale; ricerca mineraria indiretta; ecc.

Tra le diverse tecniche utilizzabili, quelle dipolari, sviluppate inizialmente dalla scuola russa, riprese e migliorate, particolarmente nell'ultimo decennio, dalla scuola italiana (che in questo settore è all'avanguardia) sono le più convenienti. Diversi aspetti e fasi della procedura sono stati infatti oggetto di ricerche cui ha contribuito attivamente anche il gruppo degli scriventi: ricerche queste che hanno comportato un netto miglioramento della tecnologia strumentale adottata per le misure di campagna - miglioramento non fine a se stesso ma teso a raccogliere e registrare la maggior quantità di informazione possibile, onde permettere di affinare le metodologie di trattamento dei dati e di interpretazione dei risultati.

In altri termini, visto che la parte di gran lunga più onerosa del procedimento è costituita dalle misure di campagna, si è cercato di arrivare a raccogliere il segnale utile con tutto il dettaglio possibile.

Diverse routines di software sono state implementate per applicare ai particolari problemi della geoelettrica algoritmi più efficaci sia nella fase di valutazione dei risultati che in quella interpretativa.

Si ritiene pertanto opportuno sintetizzare i risultati ottenuti, tenendo anche presenti alcuni accorgimenti dovuti all'esperienza operativa, allo scopo di tracciare un quadro complessivo della metodologia allo stato attuale.

(°) - Istituto di Costruzioni Stradali e Trasporti

x - Georisorse Italia S.d.f. - Siena - Italy

Con le tecniche che verranno in seguito descritte si sono potuti effettuare agevolmente sondaggi geoelettrici fino ad una profondità di penetrazione di 2.5 + 3 chilometri, anche operando in condizioni non estremamente favorevoli, con costi complessivi notevolmente contenuti.

2. - CENNI SUI SONDAGGI GEOELETTRICI DI RESISTIVITA'

2.1 Le tecniche di sondaggio elettrico di resistività hanno lo scopo di ricostruire la stratificazione delle rocce sottostanti un sito caratterizzandole tramite la loro resistività elettrica, ritenuta in genere costante in ogni strato.

Si opera disponendo sul terreno opportuni dispositivi elettrodi quadrupolari (talora a 5 elettrodi) : due elettrodi, convenzionalmente indicati come A e B , vengono utilizzati per inviare nel terreno una corrente I , continua od a bassissima frequenza, e vengono perciò indicati come elettrodi di corrente o di energizzazione. Ai capi degli altri due elettrodi (M ed N nella nomenclatura corrente) si misura la differenza di potenziale ΔV provocata dal passaggio della corrente I nel terreno. Talora, per stendimenti simmetrici, si può aggiungere un terzo elettrodo di potenziale al centro dello stendimento. Alcuni stendimenti tra i più usati per sondaggi di resistività sono schematizzati in Fig. 1.

I primi due (Schlumberger e Wenner) son detti talora di tipo "integrale", in quanto il bipolo di corrente A-B è finito e gli elettrodi di tensione sono posti al suo interno. Gli altri sono di tipo dipolare: le due coppie di elettrodi A-B ed M-N hanno ampiezza molto minore (idealmente infinitesima) della distanza tra i loro centri (indicata nel seguito con r), e si trattano come dipoli infinitesimi: questi dispositivi elettrodi sono perciò detti di tipo "differenziale" rispetto a quelli convenzionali.

Il parametro oggetto della prospezione è la cosiddetta "resistività apparente", che si ottiene misurando i valori di I nel circuito A-B e V ai capi degli M-N usando la relazione:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

in cui K è la cosiddetta costante geometrica del quadrupolo e dipende solamente dalle distanze reciproche degli elettrodi.

La procedura di sondaggio geoelettrico consiste nel valutare la ρ_a per una serie di stendimenti simili, ottenuti tenendo fisso il centro ed espandendo il quadrupolo aumentando progressivamente la sua "apertura" (la distanza AB per

gli stendimenti convenzionali, r per quelli dipolari) da un valore minimo, che dipende dal dettaglio superficiale richiesto, ad un massimo in funzione della profondità di penetrazione richiesta.

Il processo di interpretazione consiste nel ricostruire una stratigrafia elettrica (una successione di strati a resistività elettrica costante) - quando non sia necessario ricorrere a modelli più complessi - la cui risposta teorica concordi con la curva di campagna $\rho_a(r)$. Successivamente si passerà ad attribuire un significato geologico alle formazioni così identificate.

Il rapporto tra l'apertura massima dello stendimento e la profondità di penetrazione raggiungibile non è definibile univocamente, ma dipende dalle resistività degli strati incontrati: si può però assumere, in condizioni medie, che sia dell'ordine di $3 + 5$.

2.2 Da quanto sopra detto si deduce che per individuare e seguire un obiettivo fino a profondità dell'ordine dei 2.5 km è necessario programmare stendimenti di almeno 10 km.

Nel caso di sondaggi convenzionali (cioè Schlumberger, in quanto il dispositivo Wenner è molto meno pratico in queste operazioni) questo corrisponde a dover stendere effettivamente più di 10 km di cavo, seguendo un percorso più possibile rettilineo: questa operazione, semplice per le piccole distanze, diventa onerosa e difficile oltre i 3-4 km, in condizioni medie, se non chiaramente impossibile per la presenza di ostacoli di varia natura. Per contro, utilizzando generatori con potenze tra 2 e 3 kW (in c.c.), il segnale di tensione (ΔV) ai capi degli elettrodi M-N è in genere leggibile direttamente: eventualmente si può ricorrere, in caso di difficoltà, a preamplificazione e registrazione analogica su carta.

2.3 Qualora si adottino tecniche di sondaggio dipolare, sono necessari stendimenti di cavo molto minori. Si opera infatti tenendo fisso uno dei due dipoli e muovendo l'altro a distanze via via crescenti. La lunghezza dei dipoli fisici viene limitata ad un decimo - un quinto di r : pertanto per arrivare a valori di r di 10 km la stesa massima di cavo non supera i 2 km. Sono però necessarie continue operazioni di stesa-riavvolgimento dei cavi, che rendono questo metodo meno conveniente per i sondaggi superficiali.

Il principale problema tecnico per i sondaggi dipolari è costituito dal rapido decremento del segnale di potenziale ΔV all'aumentare della distanza inter-

dipolare r : in teoria infatti detto segnale dovrebbe diminuire con il cubo di r ; in pratica, quando r supera un paio di km, la lettura diretta del segnale per via analogica diventa impossibile, in quanto interamente nascosto dal rumore di fondo.

Per poter eseguire sondaggi dipolari profondi sono pertanto possibili due strade: o aumentare fortemente la potenza utilizzata per energizzare il terreno, o utilizzare tecniche di rilevazione del segnale più sofisticate continuando ad utilizzare generatori di 2-3 kW, ancora portatili.

La prima via è stata seguita dai ricercatori della scuola russa (cui va peraltro il merito di aver per primi studiato e sperimentato su larga scala le metodologie di sondaggio dipolare). Sono stati impiegati generatori di potenze dell'ordine di 50-100 kW montati su appositi autocarri o vagoni ferroviari, costruendo anche strade o binari ad hoc: si trattava però di ricerche petrolifere su vaste distese poco popolate.

Nelle nostre situazioni, questo sistema non sarebbe nemmeno pensabile, sia per i costi troppo elevati, sia per le difficoltà di accesso e per i problemi di sicurezza (non si potrebbero certo fare stendimenti provvisori di cavi sul terreno con tensioni di qualche kilovolt in aree fittamente popolate !).

I ricercatori della scuola italiana hanno invece concentrato gli sforzi su tecniche di "signal-enhancing", prima per via analogica e poi per via digitale, in modo di riuscire a valutare il ^o segnale di ⁿ tensione senza aumentare la potenza oltre i 3 kW.

Per poter applicare dette tecniche è necessario energizzare il terreno con segnale di corrente ad onda quadra a bassissima frequenza (tra 10^{-2} e 10^{-3} Hz) invece che in corrente continua. La necessità di operare a frequenze così basse è dovuta a varie ragioni: evitare il pericolo di attenuazione in profondità dovuto a fenomeni di skin-effect; evitare fenomeni di accoppiamento induttivo nei cavi; evitare le bande di frequenza in cui sono particolarmente forti i disturbi industriali. Operando in questo modo, il segnale "iniettato" nel terreno è molto più strutturato di un semplice gradino in c.c.: è possibile eliminare parte del rumore mediante filtraggi; adottare tecniche di accumulo del segnale o di stima spettrale. Fino ad un certo limite si può operare per via analogica mediante amplificazione e filtraggio. Per spingere ulteriormente la fattibilità del sondaggio, si è passati alla registrazione digitale del segnale per eseguire le successive elaborazioni con calcolatore.

Anche sulle modalità di interpretazione dei dati di resistività apparente, notevoli contributi ottenuti da ricercatori italiani hanno permesso di migliorare fortemente la affidabilità dei risultati.

3. - SONDAGGI ELETTRICI MULTIDIPOLARI

3.1 Tra le diverse modalità di sondaggio dipolare (corrispondenti ai diversi orientamenti relativi dei due dipoli) Alfano (1974; 1980) ha dimostrato l'opportunità di scegliere la disposizione polare (Fig. 1 a - caso 6) ed in particolare la procedura di sondaggio dipolare polare continuo (Fig. 2 a), che consiste nel tenere fisso il dipolo M-N e di allontanare il dipolo A-B con continuità, utilizzando cioè l'elettrodo "lontano" B_i come elettrodo "vicino" A_{i+1} nella misura successiva.

Questa procedura permette infatti la conversione per via analitica dei dati di resistività apparente dipolare ρ_a^D in equivalenti dati di resistività apparente Schlumberger ρ_a^S . Conversioni di questo tipo (v. anche Patella, 1980 e 1983) sono necessarie, in fase interpretativa, per contrastare la eccessiva sensibilità delle misure dipolari a disomogeneità laterali e superficiali.

3.2 Ricerche condotte da questo gruppo (Marchisio, 1979; Marchisio e Censini, 1980) hanno portato ad estendere la metodologia misurando, alla stazione fissa M-N, non solo la componente assiale del campo elettrico, ma anche altre componenti (Fig. 2 b): per es., quella trasversale, con un secondo dipolo ortogonale al primo. Si può così valutare in direzione e verso la componente orizzontale del campo elettrico \underline{E} in P. In particolare, la deviazione ϕ di \underline{E} dalla direzione assiale dà immediate indicazioni sulla presenza di asimmetrie nelle elettrostrutture presenti nel sottosuolo, informazione di notevole importanza nella definizione delle geostrutture sepolte.

Questa idea, che poi ha il significato di cercare di estrarre tutta l'informazione contenuta nel segnale elettrico inviato nel terreno, ha richiesto la progettazione e costruzione di una catena strumentale apposita - non essendo i sistemi disponibili sul mercato adatti alle nostre particolari esigenze. Questa apparecchiatura verrà descritta nel prossimo paragrafo.

La disponibilità di più canali può poi essere sfruttata anche altrimenti: per esempio, nel caso schematizzato in Fig. 2 c , si indica la possibilità di disporre due (o più) dipoli $M_i N_i$ sullo stesso allineamento, ottenendo così, con una sola "passata" di energizzazioni, due sondaggi leggermente sfalsati.

4. - APPARATO STRUMENTALE

4.1 Le particolari esigenze di questo tipo di prospezioni geofisiche, tenendo presente anche l'opportunità di utilizzare la stessa strumentazione per altre misure geofisiche a bassa frequenza, come, per esempio, la Polarizzazione Indotta (v. Marchisio, 1979; Marchisio-Ranieri, 1980, 1981, 1982), hanno portato a formulare le specifiche minime sottoelencate:

- . disponibilità di più canali;
- . numero di canali programmabile;
- . contemporaneità del campionamento sui diversi canali (per permettere correlazioni di fase tra i diversi segnali);
- . tempi di campionamento programmabili in un intervallo di frequenza $10^{-3} - 10^3$ Hz;
- . registrazioni su un supporto economico ed adatto alle operazioni di campagna;
- . facilità di trasferimento dei dati ad unità di calcolo.

Le funzioni richieste hanno reso necessaria un'apparecchiatura controllata da micro-processore (μ -P), il cui schema a blocchi è riportato in Fig. 3.

Nella progettazione, alcuni parametri (p. es., il numero dei canali, fissato in 8) sono stati scelti tenendo presenti le disponibilità sul mercato di chips monolitici, più affidabili ed economici.

Si è giunti ad uno schema con acquisizione contemporanea dei dati su 8 memorie S-H, scansione, conversione analogico-digitale in sequenza, accumulo dei dati in memoria di parcheggio, successivo trasferimento sul supporto di registrazione dei diversi blocchi.

La velocità di campionamento può essere programmata tra 0.001 e 9999 sec.

Più difficile è stata la scelta del supporto di registrazione. Mentre i centri di calcolo utilizzano a preferenza nastri magnetici ^{da 1/2"} a 9 piste, questo tipo di supporto è stato scartato per il peso, ingombro, delicatezza e costo dell'unità mobile di registrazione. Il "floppy-disk" ^e ~~è~~ molto diffuso per piccoli calcolatori, ma i disk-drivers sono molto delicati e poco adatti al lavoro in campagna. Le cassette, semplici ed economiche da usare, non "comunicano" facilmente con i centri di calcolo.

Tenendo presenti in particolare le disponibilità del CNUCE, il centro di calcolo utilizzato per l'elaborazione dei dati, si è arrivati ad una soluzione sdoppiata: l'apparecchiatura di campagna registra i dati su cassette magnetiche. Una seconda unità intelligente, che può anche fungere da stazione base mobile, permette alcune elaborazioni preliminari dei dati, nonché il loro trasferimento al sistema VM del CNUCE via floppy-disks IBM-compatibili.

A monte del sistema digitale, per ogni canale sono previste unità di preamplificazione e filtraggio analogico: anche queste, visto il campo delle frequenze di lavoro, sono state progettate e costruite appositamente. Tra le caratteristiche particolari: ogni canale dispone di un doppio ingresso differenziale, per evitare possibili collegamenti parassiti tra la "terra" della strumentazione e le "terre" corrispondenti ai diversi elettrodi ai cui capi si prelevano i segnali utili.

Si coglie l'occasione per ringraziare gli ingg. Puzzu, Quartini e Tonello, della EPI Elettronica per la proficua collaborazione.

4.2 Un cenno particolare merita il problema se sia da preferire il filtraggio preliminare analogico o il filtraggio digitale dei dati registrati.

A sfavore del filtraggio analogico stanno la delicatezza (e costo) delle unità di filtro (con frequenze di taglio dell'ordine dei 10^{-2} Hz), nonché la deriva delle caratteristiche delle risposte.

Per contro, la registrazione numerica del segnale non prefiltrato, tenendo conto dei frequenti picchi e sbalzi di livello del rumore di fondo, può facilmente arrivare alla saturazione del sistema digitale (a 12 bit): pertanto un certo grado di filtraggio può essere necessario - a parte il problema dell'aliasing - per non dover espandere la dinamica (ed i costi) del sistema.

Una soluzione frequentemente adottata in campagna prevede il filtraggio analogico a banda stretta, sintonizzato sulla frequenza fondamentale dell'onda quadra di energizzazione. Questa procedura è più semplice costruttivamente, e la dinamica del segnale è più stabile, cosa che facilita la registrazione digitale.

D'altro canto, la presenza di segnali tipo "time-domain" nel rumore, che provocano oscillazioni dell'ampiezza del segnale all'uscita del filtro, può falsare i risultati.

Utilizzando la disponibilità di più canali sono stati condotti esperimenti di registrazione simultanea dello stesso segnale con diverse modalità di filtraggio. Si è giunti alla conclusione di preferire un filtraggio analogico preliminare a banda piuttosto larga, in modo da eliminare sia la componente continua sia i picchi e gradini più rapidi: si ottiene così di conservare discretamente la forma del segnale d'ingresso senza saturare il sistema digitale. In tal modo le modalità di trattamento dei dati potranno essere scelte opportunamente (compresa la possibilità di scartare quelle stringhe di dati in cui il rumore risulta chiaramente eccessivo). In Fig. 4 è riportato un esempio di segnale così registrato, insieme allo stesso filtrato per via analogica e digitale.

5. TRATTAMENTO DEI DATI DI CAMPAGNA

5.1 Come sopra accennato, il principale problema tecnico per l'esecuzione dei sondaggi dipolari profondi è la valutazione del segnale ΔV ai capi dei dipoli di potenziale $M_i N_i$. Facendo infatti riferimento alla (1), mentre non è difficile valutare la costante geometrica K e la corrente di energizzazione I con precisione sufficiente, il segnale ΔV , all'aumentare di r , decresce molto rapidamente e viene nascosto dal "rumore" di fondo dovuto sia a cause naturali che industriali.

Energizzando con un segnale ad onda quadra il problema viene impostato come stima dell'intensità di un segnale a frequenza nota in una serie temporale registrata numericamente:

$$y(t) = s(t) + n(t) \quad (2)$$

in cui: y : segnale registrato
 s : " utile
 n : rumore

La situazione è complicata non solo dal basso rapporto s/n , ma dal fatto che nel rumore si assommano aspetti "frequenziali" (segnali più o meno variabili, ma sostanzialmente oscillanti) ed aspetti "temporali" (gradini, picchi, bursts, ecc.: segnali il cui spettro è infinito) che rendono difficile il trattamento: infatti non si possono, in generale, ritenere rispettate alcune delle ipotesi che stanno alla base degli algoritmi utilizzabili per lo studio delle serie temporali.

5.2 Si citano qui di seguito alcuni degli algoritmi che vengono utilizzati per lo studio delle serie $V(t)$:

- filtraggio digitale - a banda larga o a banda stretta;
- stacking dei dati su di un periodo di energizzazione. Si può operare sui dati originali (previa eliminazione del trend a lungo periodo) oppure sui dati precedentemente filtrati. In Fig. 5 si mostra un esempio.

Nel caso che non si riesca a valutare il segnale con queste procedure, si possono utilizzare metodi di stima spettrale. A parte gli algoritmi ^{d;}F.F.T. (Fast Fourier Transform), che non risulta particolarmente affidabile come "stimatore", sono risultati particolarmente efficaci i seguenti algoritmi:

- stima di Maximum Likelihood (MLM): detta ω la frequenza del segnale $s(t)$ supposto sinusoidale (nel nostro caso, le considerazioni che seguono si applicano alla fondamentale del segnale ad onda quadra utilizzato), si costruisce un filtro di convoluzione che soddisfi le condizioni:

- (a) il segnale utile - a frequenza ω - non deve venire distorto dal filtro;
- (b) la varianza del segnale in uscita sia minima.

Il filtro di MLM viene costruito partendo dalla matrice di Toeplitz dei coefficienti di autocorrelazione dei dati stessi.

Questo metodo è stato esposto per primo da Capon (Capon et al., 1967; Capon, 1969) che lo ha utilizzato per l'analisi dei numeri d'onda delle matrici sismiche; Lacoss (1971) lo ha modificato ed adattato allo studio di singole serie temporali; Loddo e Patella (1978) hanno applicato con successo il metodo ai dati geoelettrici dipolari: si coglie l'occasione per ringraziarli per le relative routines di calcolo.

Questo algoritmo è particolarmente adatto al problema in esame per due ragioni:

- (a) l'ammontare dei dati può essere limitato;
- (b) la window-function di M.L. è calcolata per ogni frequenza in modo da auto-adattarsi al particolare set di dati in esame in modo ottimale.

Per contro, le esigenze di calcolo sono pesanti: per i sets di dati dipolari, è necessario usare elaboratori con capacità dell'ordine di un megabyte; i tempi di calcolo sono lunghi; anche con gli elaboratori IBM 370/178 del CNUCE si hanno talora problemi di instabilità numerica.

- in alternativa al M.L.M., gli scriventi hanno sperimentato la valutazione diretta dell'intensità spettrale (v. Kendall & Stuart, vol. III°), costruendo

lo spettrogramma di Shuster. Questo algoritmo presenta un'ottima stabilità, riduce i tempi di calcolo anche di due ordini di grandezza, ed è utilizzabile anche su piccoli calcolatori. D'altro canto, in teoria, potrebbe essere più sensibile a bias dovuti alla presenza, nel segnale, di altre frequenze, e non è "self-adaptive". Prove comparative tra questi due algoritmi sono tutt'ora in corso: al momento, non si sono notate significative differenze tra le loro "prestazioni" - e ciò sarebbe particolarmente interessante per l'algoritmo più economico.

6. IL PROCESSO DI INTERPRETAZIONE

6.1 Il prodotto finale della prospezione di campagna, dopo l'elaborazione dei dati con i procedimenti descritti, è la curva ρ_a^D relativa a ciascuno dei dipoli M-N, più, eventualmente, la curva della deviazione del campo \underline{E} rispetto alla direzione assiale, $\varphi(r)$.

Il procedimento di interpretazione consiste nell'individuare modelli elettrostrutturali la cui risposta teorica dia ragione delle curve di campagna, e di attribuire alle strutture individuate un significato geologico.

Il modello tipico, nel caso di sondaggi elettrici, è formato da una sequenza di strati orizzontali, omogenei ed isotropi, caratterizzati ciascuno da un valore di resistività ρ_i e dallo spessore t_i . Qualora modelli unidimensionali non risultino adeguati, si dovrà ricorrere ad opportuni modelli bi- o tridimensionali.

Un primo passo, sempre consigliabile nel caso di sondaggi dipolari (v., in particolare, Alfano, 1974 e 1980) è la trasformazione, per via analitica, della resistività apparente dipolare in resistività apparente Schlumberger: v. anche Patella, 1974. Questo procedimento permette infatti di eliminare l'eccessiva influenza che effetti laterali o superficiali hanno sulle misure di tipo dipolare. Recentemente Patella (comunicazione personale - lavoro in corso di stampa) ha proposto anche una trasformazione in resistività apparente polo-polo, che risulterebbe ancora più efficace.

Un preliminare esame comparato delle curve ρ_a^D e ρ_a^S nonché $\varphi(r)$ permette una prima individuazione di eventuali effetti laterali (faglie, contatti, ecc.) che possono già di per sé costituire risultato utile dell'indagine.

Per passare ad'un'interpretazione quantitativa, utilizzando i classici modelli stratificati, esistono procedure "dirette", in cui l'algoritmo costruisce

in maniera automatica, senza alcun intervento da parte dell'operatore, l'elettrostratigrafia: v., tra gli altri, Kunetz & Rocroi, 1970; Marsden, 1973; Zohdy, 1974; Koefoed, 1970, 1976.

In altre procedure, "indirette", un modello iniziale viene introdotto dall'operatore e l'algoritmo utilizzato provvede iterativamente all'ottimizzazione dei parametri di modello; l'operatore può seguire il processo e, se lo ritiene necessario, può intervenire, variando, per esempio, il numero degli strati.

Le procedure indirette sono, in generale, molto sensibili agli errori sperimentali o a irregolarità della curva di campagna dovute a cause esterne: in questi casi gli algoritmi diretti tendono infatti ad introdurre nel modello un numero eccessivo di strati. Dato che nei sondaggi geoelettrici a grande profondità le curve di risposta perfettamente lisce sono, a dir poco, rare, gli scriventi preferiscono utilizzare metodi indiretti: v. Marquardt, 1963; Johansen, 1975; Cecchi, Marchisio e Montani, 1980; ~~Marchisio~~. In quest'ultimo lavoro è descritta una procedura iterativa di ottimizzazione interattiva, basata sulla soluzione di equazioni matriciali; vengono utilizzati due diversi algoritmi, uno che prevede l'inversione di matrici quadrate, l'altro basato sull'inversione generalizzata di matrici rettangolari. Una strategia particolare ottimizza la scelta dei parametri interni degli algoritmi per ottimizzare la velocità di convergenza. La procedura è stata inoltre resa completamente interattiva mediante l'implementazione di un vero e proprio linguaggio conversazionale in VM/CMS, che permette all'operatore di seguire il processo, di intervenire sul modello, di usare alternativamente i due algoritmi matriciali, di fissare alcuni dei parametri, di stampare tabelle e grafici. La semplicità del linguaggio rende completamente trasparenti all'operatore le complessità degli algoritmi impiegati e ne permette l'utilizzo ad operatori geofisici anche digiuni di tecniche di calcolo automatico.

6.2 Una volta ottenuta un'interpretazione quantitativa di un sondaggio, in termini puramente geoelettrici (resistività e spessori), si procede, in base alla conoscenza geologiche dell'area esplorata, ad attribuire un significato geologico alle geo-strutture individuate.

In questa fase, in base alle informazioni disponibili, può anche essere opportuno reinterpretare uno o più sondaggi, o con modelli diversi, o introducendo vincoli derivanti da tarature, correlazioni, ecc.

In Fig. 6 è mostrato un esempio di sondaggio profondo eseguito nel Campidano (Ca); In Tav. 1 sono riportate sia l'interpretazione elettrostratigrafica che quella geologica: la profondità di investigazione si è potuta stimare in circa 2.6 km.

7. CONCLUSIONI

Le metodologie di prospezione geoelettrica dipolare profonda hanno subito nell'ultimo decennio, specialmente grazie a ricerche svolte in Italia, un vero e proprio salto di qualità.

Si è voluto qui dare una descrizione globale del metodo, tenendo presenti gli apporti più recenti dovuti a ricerche sulle diverse fasi procedurali, partendo dalle modalità operative in campagna, tecniche strumentali, trattamento dei dati e procedure interpretative.

In particolare, si è descritta una metodologia multidipolare proposta da questo gruppo di ricerca, avente lo scopo di raccogliere le informazioni geoelettriche nel punto di stazione anche in senso vettoriale, e con il massimo dettaglio possibile.

Il know-how così accumulato ha permesso di eseguire sondaggi dipolari fino ad espansioni di 10 km in condizioni non tra le più facili (per esempio, nel Logudoro, Sardegna settentrionale) - spingendo così la profondità di penetrazione dell'indagine oltre i 2.5 km. - il tutto con costi notevolmente contenuti, di un'ordine di grandezza inferiori a quelli delle prospezioni sismiche a riflessione.

Si può quindi concludere che la prospezione geoelettrica dipolare attualmente è uno strumento di indagine concretamente operativo, ingegneristicamente affidabile, con campi di applicazione in espansione.

B I B L I O G R A F I A

- Alfano L. 1974: A modified geoelectrical procedure using polar dipole arrays: an example of application to deep exploration. *geophysical. Prospecting*, 22, 510-525.
- Alfano L., 1980: Dipole-dipole deep geoelectric soundings over geological structures. *Geophysical*, 28 283-296.
- Alpin L.M.; 1950: The theory of dipole sounding, in: "Dipole methods for measuring earth conductivity" Consultant Bureau, New York, 1966, 1-10.
- Alpin L.M., 1958: Transformation of sounding curves in: "Dipole methods for measuring earth conductivity" Consultant Bureau, New York, 1966, 61-77.
- Berdichewskii M.M. - Zagarmistr A.A., 1958: Methods of interpreting dipole resistivity soundings in: "Dipole methods for measuring earth conductivity" Consultant Bureau, New York 1966 78-112.
- Capon J., 1969: High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proc. IEEE* 57, 1408-1418.
- Capon J., Greenfield R.J., 1967: Multidimensional maximum-likelihood processing of large aperture seismic array. *Proc. IEEE* 55, 192-211.
- Cecchi M.M., Marchisio M., Montani C.: A collocation method to fit geophysical survey data. *Appl. Math. Modelling*, 4, February, 45-50, 1980.
- Johansen H.K., 1975: An interactive computer/graphic-display-terminal system for interpretation of resistivity soundings. *Geophys. Prospect*, 23: 449-458.
- Johansen H.K., 1977: A man/computer interpretation system for resistivity soundings over a horizontally stratified earth. *Geophys. Prospect.*, 25, 667-691.
- Kendall M. - Stuart A. 1976: The advanced theory of statistics, Vol. III, C. Griffin and C.o, London.
- Koefoed O., 1976 . Progress in the direct interpretation of resistivity soundings: an algorithm. *Geophys. Prospect.*, 24: 233-240.
- Koefoed O., 1976 . An approximate method of resistivity sounding interpretation. *Geophys. Prospect.*, 24: 617-632.
- Kunetz G. - Rocroi J.P., 1970: Traitement automatique des sondages électriques. *Geophys. Prospect.* 24: 617-632.
- Lacoss R.T., 1971: Data adaptive spectral analysis methods. *Geophysics* 36, 661-675.
- Laddo M., Patella D. 1978: Spectral analysis of voltage measurements for the interpretation of dipole geoelectrical soundings in low resistivity geothermal areas. *Geothermics*, 6, 227-235.
- Marchisio M., 1979: A trend for the simultaneous interpretation of different survey data over a horizontally stratified earth. *Riv.It.Geof. e Sci.Aff.*, 181-186, 1978/79.

- Marchisio M. , 1979: Un moderno apparato strumentale multicanale per sondaggi geoelettrici dipolari. Atti del Congresso Associazione Geofisica Italiana, Roma, 6-7 Dicembre 1979, pp. 127-140.
- Marchisio M., 1980: Automatic interpretation of geophysical data (in particular of resistivity soundings) by the Steepest Descent method: some hints to improve the convergence. Presentato al 42° Congresso E.A.E.G, Istanbul, 1980.
- Marchisio M. - Censini G.F., 1980: Applicazione geoelettrica profonda mediante apparecchiatura multicanale, nella risoluzione di problemi di geologia strutturale di interesse minerario. Res. Ass. Min. Sarda, Num. Spec., Semin. Met. Geof. all'Attività Mineraria, Cagliari, 12-13 Dic. 1980.
- Marchisio M., Ranieri G., Losito G., Censini G.F., 1982: prospezioni geoelettriche nel Campidano; risultati preliminari. Volume: Ricerche geotermiche in Sardegna a cura del PFE/CNR, 1982, 144-163.
- Marchisio M., Ranieri - Ranieri G.: On the synergic use of different geophysical methods. Atti della Fac. di Ingegneria, 20,1982, Cagliari.
- Marchisio M. - Ranieri G., 1982: Deep geoelectrical exploration over complex structures: a multi-dipole methodological approach. presentato al 44° Congresso E.A.E.G., Cannes, 1982.
- Marquart D.W., 1963: An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, J. Soc. Ind. Appl. Math. 11: 431-441.
- Marsden D., 1973: The automatic fitting of a resistivity sounding by a geometrical progression of depth. Geophys. Prospects., 21 266-280.
- Patella D., 1974: On the transformation of dipole to Schlumberger sounding curves. Geophys. Prospect.,22: 315-329.
- Patella D., 1975: A numerical computation procedure for the direct interpretation of geoelectrical soundings. Geophys. Prospect.,23: 335-362.
- Patella D. - Rossi A. - Tramacere A.: First results of the application of the dipole electrical sounding method in the geothermal area of travale-Radicondoli (Tuscany). Geothermics, Vol. 8, 111-134.
- Zohdy, A.A.R.,1974: Automatic interpretation of Schlumberger soundind curves. Geol. SurV Bull. 1313. E.U.S. Government Printing Office, Washington, 71 pp.

Didascalie delle figure

Fig. 1 - Alcuni stendimenti elettrodi usati per sondaggi geoelettrici:

- (a) - Stendimento Schlumberger
- (b) - " Wenner
- (c) - " dipolari: equatoriale (1)
azimutale (2)
radiale (3)
perpendicolare (4)
parallelo (5)
assiale o polare (6)

Fig.2 - Particolari dispositivi dipolari assiali:

- (a) sondaggio dipolare polare continuo
- (b) " " multidipolare
- (c) doppio " " polare continuo

Fig. 3 - Schema dell'apparecchiatura di registrazione digitale per sondaggi multidipolari.

Fig. 4 - Un esempio di filtraggio analogico e digitale di un segnale dipolare (scale arbitrarie):

- (a) segnale non filtrato
- (b) " filtrato analogicamente
- (c) " filtrato per via digitale

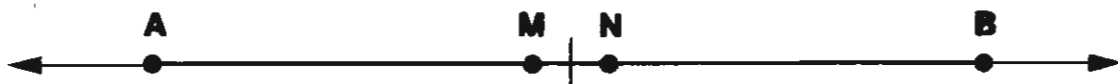
Fig. 5 - Un esempio di stacking di segnale dipolare: in alto è riportato il segnale (t), in basso (in scala diversa) lo stesso segnale dopo stacking.

Fig. 6 - Un esempio di sondaggio dipolare profondo:

- (a) curva di resistività apparente dipolare insieme alla corrispondente curva di resistività apparente Schlumberger.
- (b) curva della deviazione della componente orizzontale del campo elettrico rispetto alla direzione assiale.
- (c) curva di resistività apparente dipolare ottenuta tramite un secondo dipolo sfalsato, come indicato in fig. 2-c.

Tab. I - Modello interpretativo del sondaggio riportato in Fig. 6: nella colonna a sinistra è riportata l'elettro-stratigrafia, a destra l'interpretazione geologica.

(a)



(b)



(c)

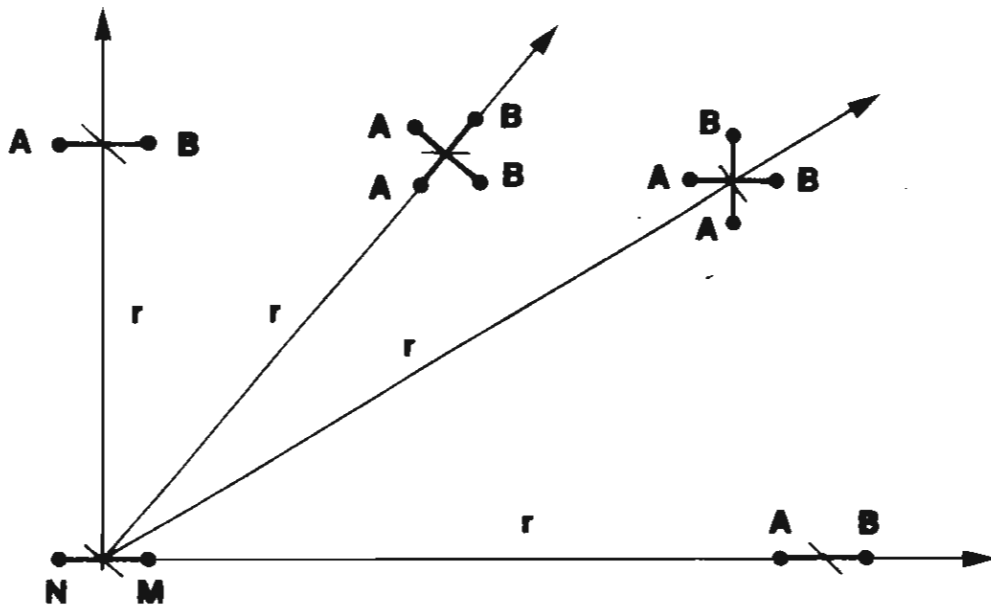
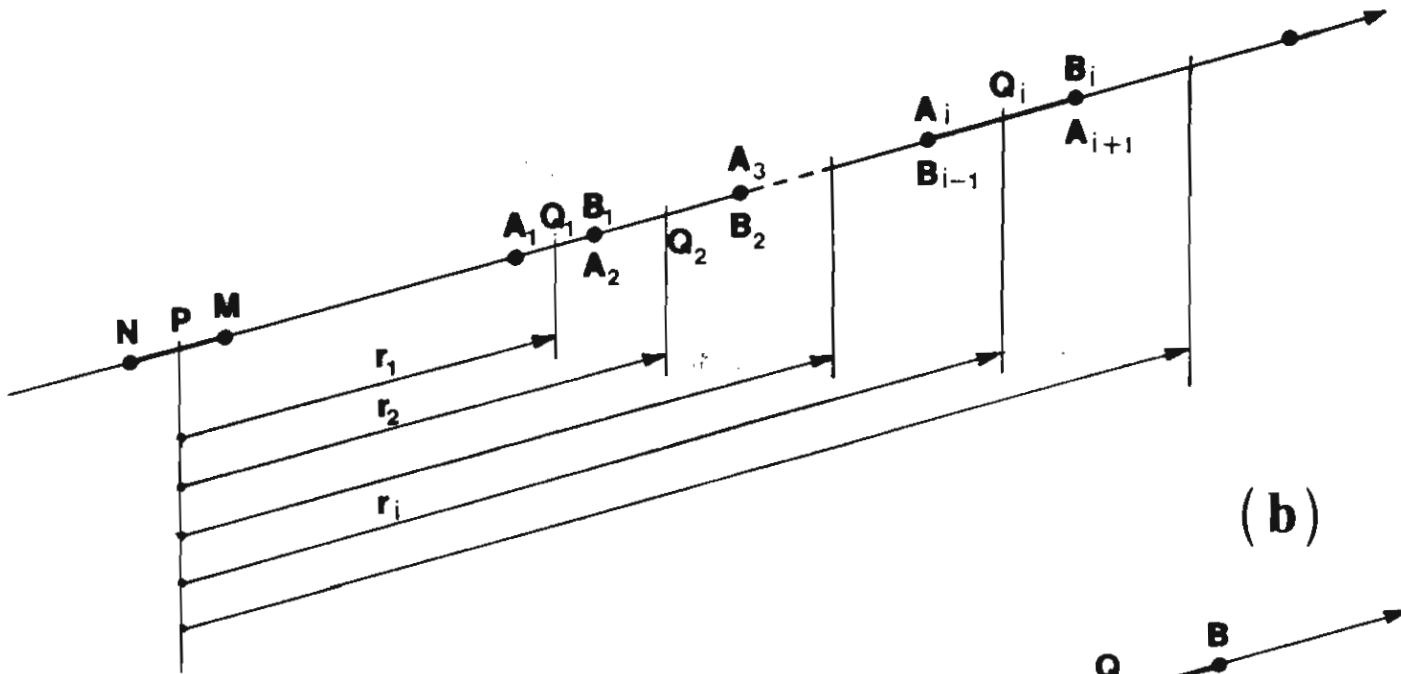
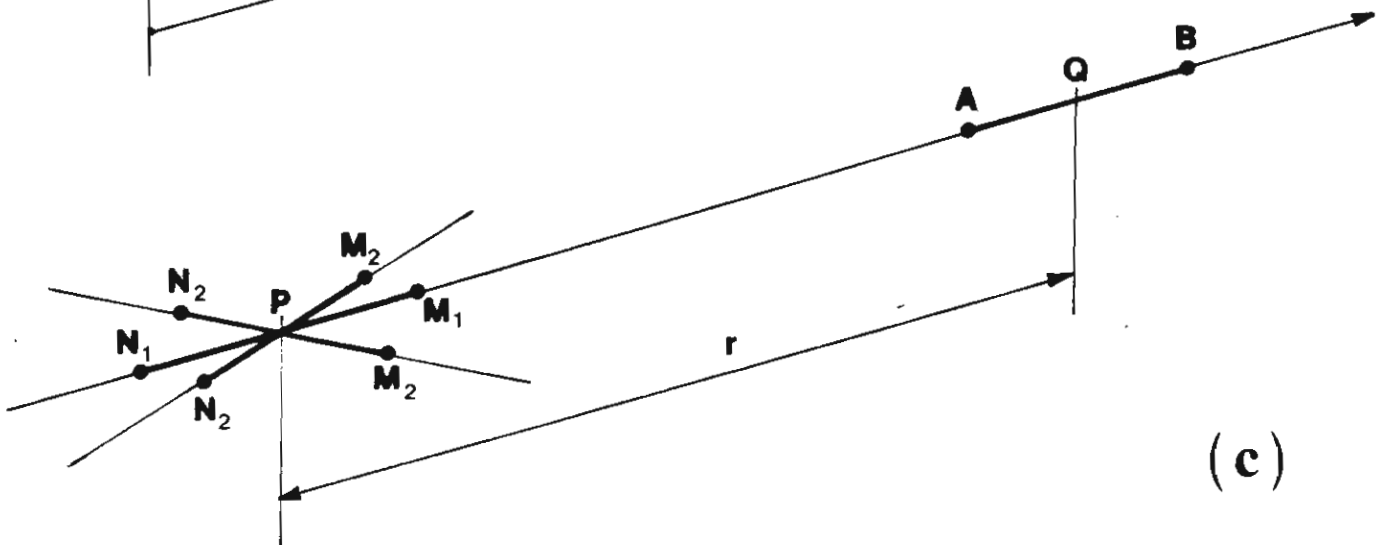


Fig. 1

(a)



(b)



(c)

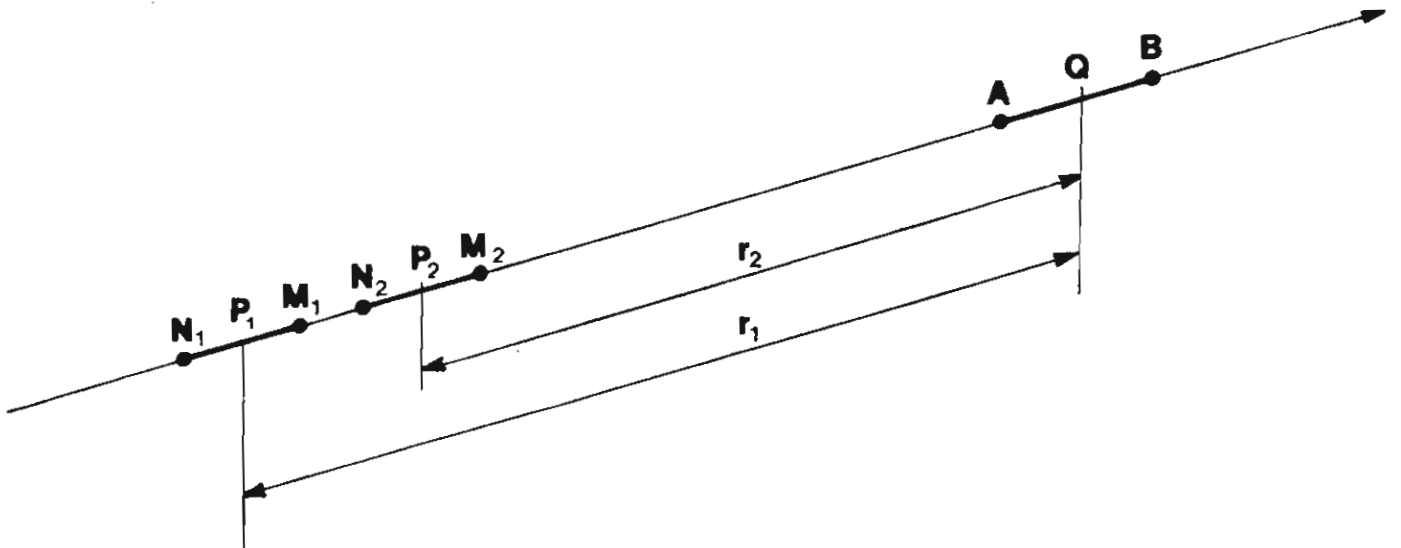


Fig 2

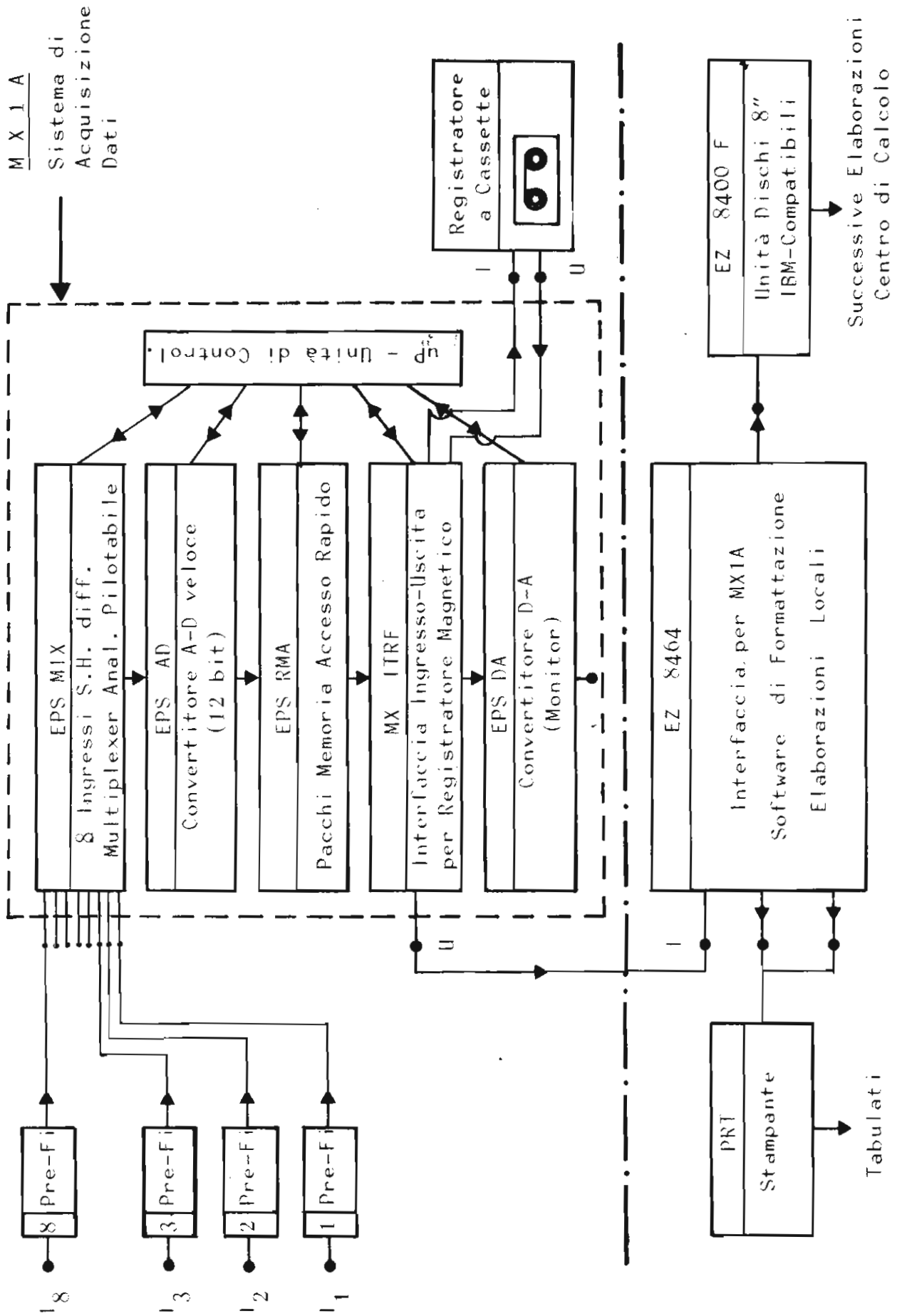


Fig. 3

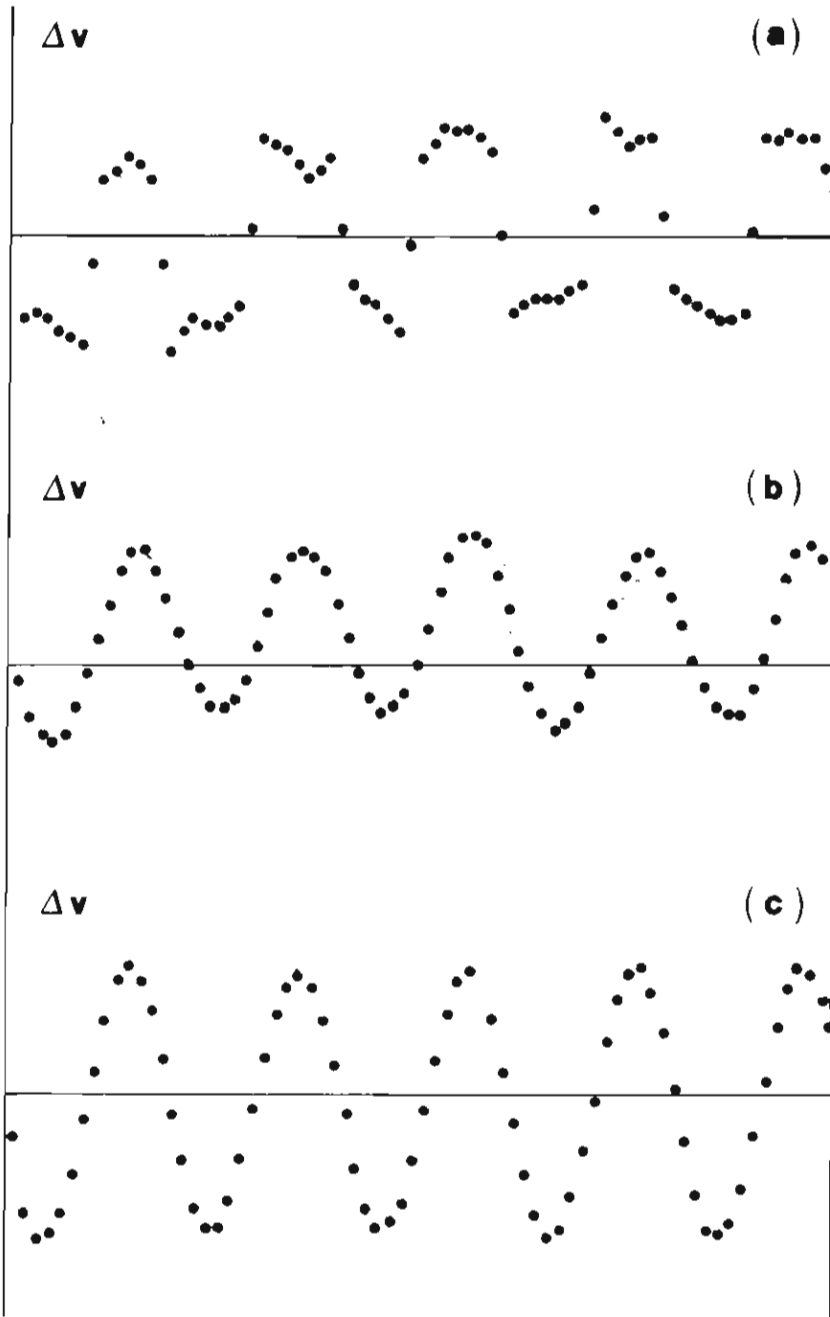


Fig. 4

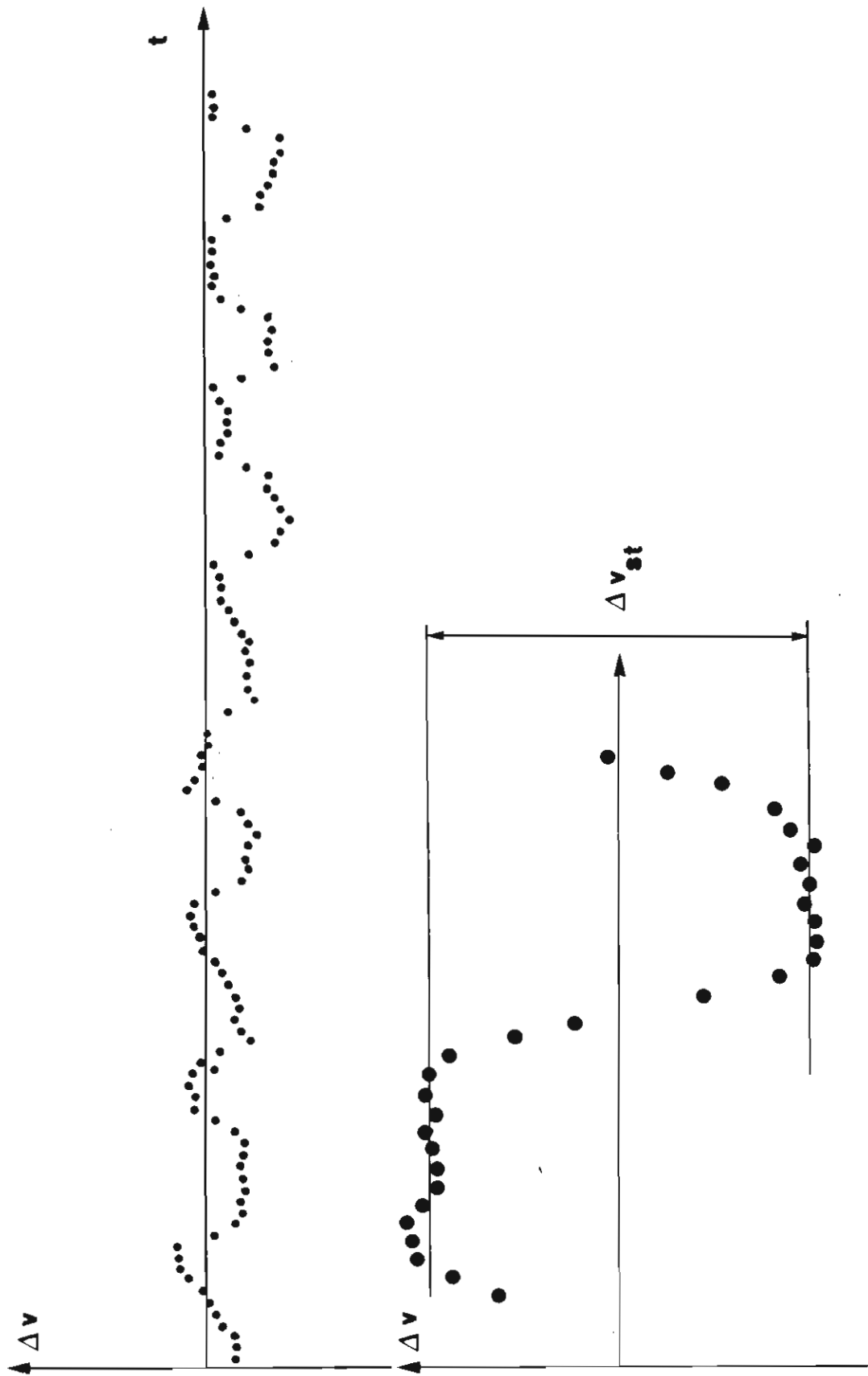
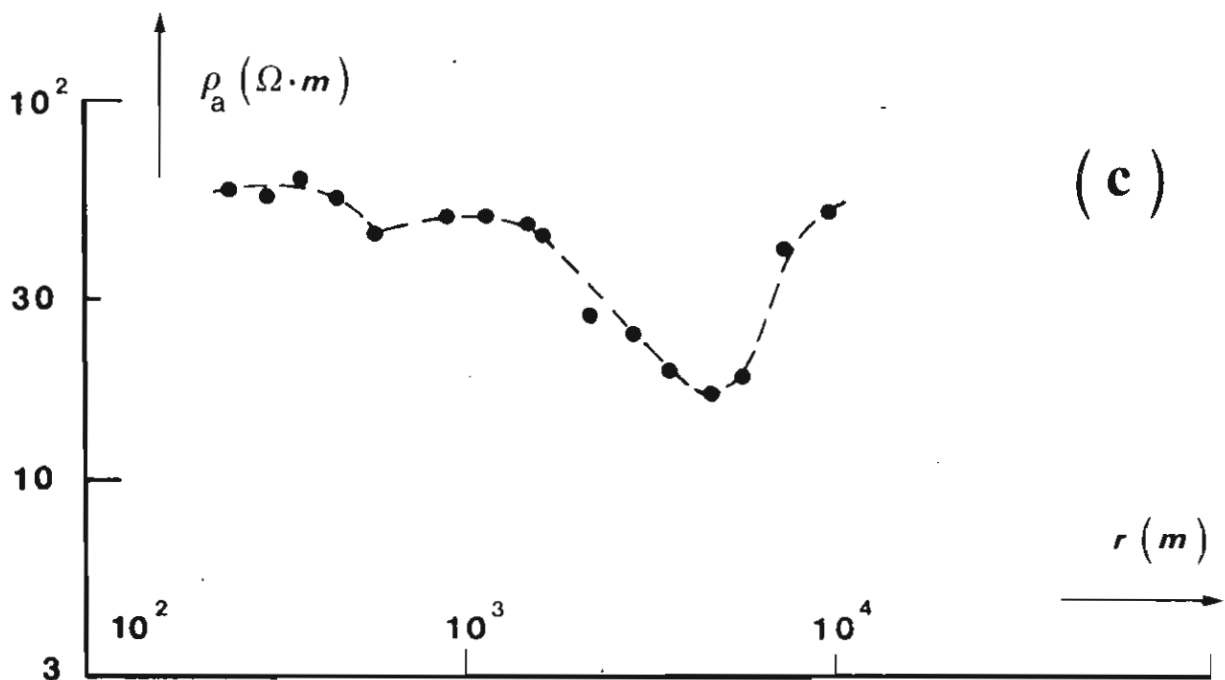
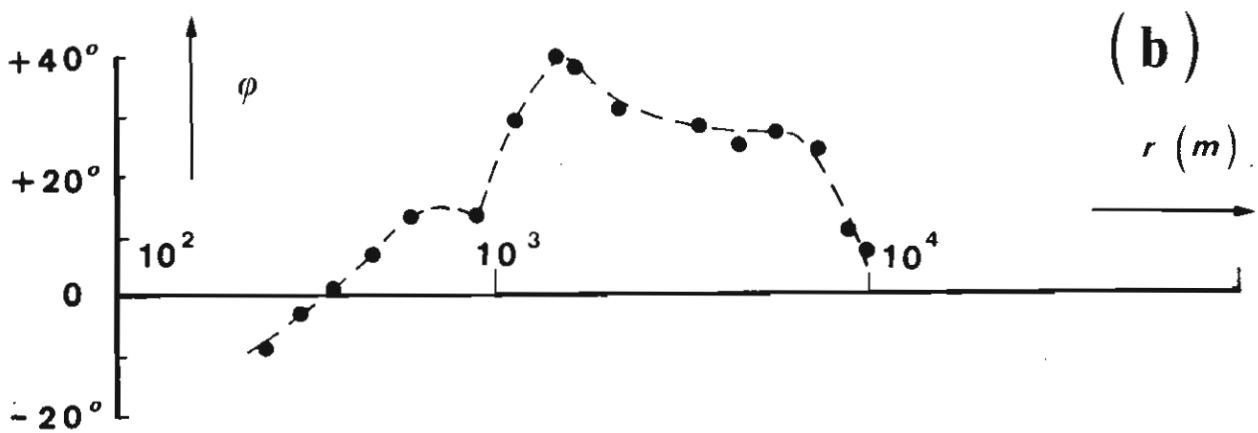
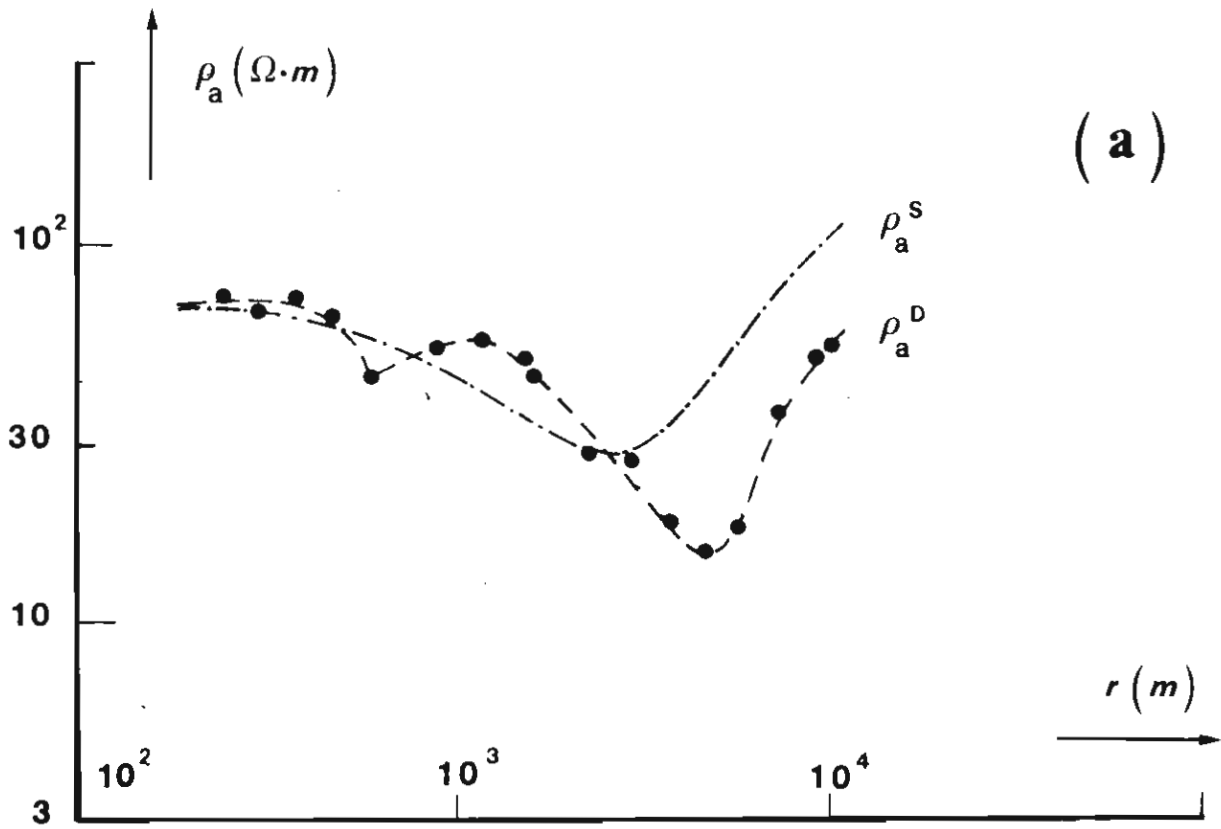


Fig. 5



TAB. I

ELETTROSTRATIGRAFIA

INTERPRETAZIONE GEOLOGICA

$\rho = 70 \text{ ohm m}; t = 230 \text{ m}$ $\downarrow z = 230 \text{ m}$	Depositi alluvionali
$\rho = 50 \text{ ohm m}; t = 570 \text{ m}$ $\downarrow z = 800 \text{ m}$	Siltiti marnose od arenacee
$\rho = 7.5 \text{ ohm m}; t = 500 \text{ m}$ $\downarrow z = 1300 \text{ m}$	Marne siltitiche ed arenarie
$\rho = 550 \text{ ohm m}; t = 300 \text{ m}$ $\downarrow z = 1600 \text{ m}$	Vulcaniti andesitiche preval. tufaceo-agglomeratiche
$\rho = 2500 \text{ ohm m}; t > 1000 \text{ m}$ $\downarrow z > 2600 \text{ m}$	Andesite dura e compatta
?	?

Tab I



R I A S S U N T O

Tra i metodi di esplorazione geofisica profonda, le tecniche dipolari di sondaggio geoelettrico di resistività hanno avuto negli ultimi anni un notevole impulso, in particolare ad opera di ricercatori italiani. Sono state oggetto di proficue ricerche e sperimentazioni sia le modalità operative e strumentali, sia le metodologie di trattamento dei dati di campagna (stima del segnale) e di interpretazione dei risultati.

Si è ritenuto opportuno sintetizzare i risultati ottenuti, tenendo presenti anche alcuni accorgimenti derivanti all'esperienza operativa, allo scopo di tracciare un quadro complessivo della metodologia allo stato attuale.

Ne risulta una procedura non più sperimentale, ma ingegneristicamente operativa, con uno spazio applicativo aperto in diversi settori (geotermia; zonazione sismica; geologia strutturale; ricerca mineraria indiretta; grandi costruzioni (p.es., dighe) particolarmente in aree sismiche; ecc.).

Con le tecniche descritte si sono effettuati sondaggi geoelettrici fino a profondità di penetrazione di 2.5 - 3 chilometri - anche in condizioni non estremamente favorevoli - con costi complessivi decisamente contenuti.



A B S T R A C T

Among the methods of deep geophysical exploration, the dipolar techniques of geoelectric resistivity sounding have got remarkable impulse during the last years, in particular due to researches performed in Italy.

Both field (operational and instrumental) techniques, and the methodologies for data treatment (signal enhancing) and interpretation have been made object of profitable researches: it seems to be convenient to synthesize the obtained results, considering also some tricks due to practical experience, with the aim of tracing out a global frame of the present status of the methodology.

The resulting procedure comes out to be no more an experimental one, but operative at engineering level, with an application space open in various fields (geothermics; seismic zoning; structural geology; mining; large projects (like dams, f.i.) particularly in seismic areas; ecc).

Deep geoelectric soundings have been carried out with the outlined techniques up to a penetration depth of 2.5 - 3 kilometers -in average conditions- with global costs quite restricted.