



Fabio Giannino

METODI ELETTROMAGNETICI IN GEOFISICA APPLICATA

Acquisizione, analisi e interpretazione dei dati
FDEM, TDEM e AEM in ambito geologico,
ambientale e ingegneristico

[Scheda sul sito >](#)



- La strumentazione per eseguire misure FDEM ✓
- Le misure di campagna FDEM ✓
- Metodo TDEM (Time Domain Electromagnetic) ✓
- Metodo AEM (Airborne Electromagnetic o aviotrasportato) ✓

Fabio Giannino

METODI ELETTROMAGNETICI IN GEOFISICA APPLICATA

**Acquisizione, analisi e interpretazione dei dati
FDEM, TDEM e AEM
in ambito geologico, ambientale e ingegneristico**



Dario Flaccovio Editore

Fabio Giannino

METODI ELETTROMAGNETICI IN GEOFISICA APPLICATA

Acquisizione, analisi e interpretazione dei dati FDEM, TDEM e AEM in ambito geologico, ambientale e ingegneristico

ISBN 978-88-579-0319-4

© 2014 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: settembre 2014

Giannino, Fabio <1974->

Metodi elettromagnetici in geofisica applicata : acquisizione, analisi e interpretazione dei dati FDEM, TDEM e AEM in ambito geologico, ambientale e ingegneristico / Fabio

Giannino. - Palermo : D. Flaccovio, 2014.

ISBN 978-88-579-0319-4

1. Geofisica.

550 CDD-22

SBN Pal0272868

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, settembre 2014

RINGRAZIAMENTI

Sono molte le persone che hanno contribuito, in maniera diretta ed indiretta, alla redazione di quest'opera.

In particolar modo l'Autore intende ringraziare Gianfranco Morelli e Stefano Del Ghianda di GeoStudi Astier srl per il materiale fornito, le idee, i commenti, le revisioni e tutti i suggerimenti ed il supporto umano e professionale; Andrea Viezzoli ed Antonio Menghini di Aarhus Geofisica srl per il materiale fornito, le revisioni e i commenti; Giovanni Leucci dell'IBAM-CNR di Lecce per i preziosi insegnamenti e per la sua continua disponibilità; le società Patberg and Schrameck e Progea Consulting del dr. G. Cerasoli per il materiale fornito.

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

Indice

Premessa

Introduzione

1. Cenni teorici

1.1. Onde elettromagnetiche e quantità fondamentali	»	15
1.2. Relazioni di fase tra campo EM primario e campo EM secondario	»	18
1.3. Principi operativi dei metodi FDEM a basso numero di induzione.....	»	21
1.4. Il segnale EM in funzione della profondità	»	24

2. La strumentazione per eseguire misure FDEM

2.1. Generalità.....	»	27
2.2. Alcuni esempi di strumentazione disponibile.....	»	28
2.2.1. Geonics EM31-MK2	»	28
2.2.2. GSSI EMP-400 Profiler.....	»	29
2.2.3. Dualem	»	30

3. Le misure di campagna FDEM

3.1. Progettazione di una campagna di misure FDEM	»	33
3.2. Acquisizione dati FDEM	»	36
3.2.1. Modalità di acquisizione	»	39
3.3. Analisi dei dati FDEM.....	»	44
3.4. Interpretazione dei dati	»	46

4. Casi di studio

4.1. Ricerca di metalli sepolti e cavità in area di discarica.....	»	47
4.1.1. Introduzione	»	47
4.1.2. Risultati e conclusioni	»	50
4.2. Ricerca di ordigni bellici inesplosi in area di prossima costruzione	»	54

4.2.1.	Introduzione	»	54
4.2.2.	Risultati e conclusioni	»	57
4.3.	Ricerca di oggetti vari in campo prove, in condizioni controllate.....	»	58
4.3.1.	Introduzione	»	58
4.3.2.	Alcune considerazioni sul test effettuato.....	»	62
4.3.3.	Risultati e conclusioni	»	62
4.4.	Ricerca di inquinanti.....	»	69
4.4.1.	Introduzione	»	69
4.4.2.	Risultati e conclusioni	»	74
4.5.	Ricerca di elementi metallici sepolti in area di costruzione privata	»	78
4.5.1.	Introduzione	»	78
4.5.2.	Risultati e conclusioni	»	80
4.6.	Ricerca archeologica di base su vasta area	»	82
4.6.1.	Introduzione	»	82
4.6.2.	Risultati e conclusioni	»	84

5. I metodi TDEM (*Time Domain Electromagnetic*) e AEM (*Airborne Electromagnetic o aviotrasportato*)

5.1.	TDEM (<i>Time Domain Electromagnetic</i>)	»	87
5.2.	AEM (<i>Airborne Electromagnetic</i>)	»	94
5.2.1.	Elaborazione ed inversione dei dati AEM.....	»	97

Bibliografia citata ed approfondimenti suggeriti	»	103
---	----------	------------

Premessa

Le tecniche di Geofisica Applicata trovano un gran numero di applicazioni di carattere ambientale, geologico, geotecnico, ingegneristico, così come nel campo della ricerca di idrocarburi o della ricerca scientifica in generale. Conseguentemente, gli aspetti logistico, progettuale, di acquisizione, analisi ed interpretazione dati, nonché di rappresentazione degli stessi, devono essere valutati caso per caso ed attentamente posti in essere.

Qualunque sia la tecnica geofisica impiegata in una campagna di esplorazione del sottosuolo, l'obiettivo è sempre ricercare variazioni di una specifica proprietà fisica misurabile nel contesto del sistema investigato e risalire al fattore naturale o antropico che ha causato tale variazione.

Le proprietà fisiche che più comunemente sono oggetto di ricerca in Geofisica Applicata sono la resistività elettrica, la conducibilità elettrica, la velocità di propagazione delle onde sismiche (nella loro componente verticale e/o orizzontale), la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche, la costante dielettrica, il campo magnetico, l'accelerazione di gravità e così via.

La misurazione delle proprietà di cui sopra, sia essa effettuata in foro di sondaggio, in superficie, in mare o aviotrasportata, viene eseguita con strumentazione appositamente costruita, ed i dati con essa acquisiti sono elaborati con software specifici in grado di evidenziare anche variazioni molto piccole di una grandezza fisica. Le operazioni di campagna e di laboratorio mirate all'acquisizione ed analisi di specifici dati risultano nelle metodologie geofisiche che conosciamo come Metodi Geoelettrici, Metodi Elettromagnetici a Induzione, Metodi Sismici (sismica a rifrazione, sismica a riflessione), Metodi Ultrasonici, Metodi Elettromagnetici impulsivi (Georadar), Metodi Magnetici, Microgravimetria, ecc. La lista non è certamente esaustiva, ma restituisce un'idea delle grandi macro-famiglie all'interno delle quali rientrano le tecniche geofisiche più comunemente impiegate tanto nella ricerca scientifica quanto nell'industria e nella pratica professionale. La strumentazione impiegata per l'acquisizione dati, così come i software adoperati per il *data processing* e la visualizzazione, sono oggi piuttosto complessi e di specifico utilizzo; inoltre, l'applicabilità di una tecnica piuttosto che di un'altra in uno specifico contesto non può prescindere da una conoscenza delle linee te-

oriche di base sulle quali ogni tecnica geofisica si fonda. Ne segue che un insufficiente approfondimento conoscitivo rispetto agli aspetti strumentali, *software* e teorici di cui sopra, condurrà a scelte tecniche relative alla più appropriata tecnica geofisica da impiegare in un contesto precipuo, che ridurrà le possibilità di successo della campagna di misure stessa.

Un altro fattore molto importante quando si procede alla progettazione ed esecuzione di una campagna di misure geofisiche è l'acquisizione della maggior quantità possibile di informazioni circa l'oggetto della ricerca (*target*) ed il sistema (*background*) all'interno del quale esso si trova "immerso". La conoscenza di ciò condurrà alla scelta di quella tecnica geofisica che, una volta impiegata, presenta la maggiore probabilità di accentuare le differenze tra le variazioni di una determinata grandezza fisica tra il *background* ed il *target*, e quindi di individuare quest'ultimo diminuendo l'incertezza del risultato ed aumentandone la risoluzione.

Nelle pagine che seguono si approfondiranno gli aspetti teorici, pratici ed applicativi riguardanti la tecnica Elettromagnetica ad Induzione FDEM (dall'acronimo inglese *Frequency Domain Electro-Magnetic*), ovvero *metodo elettromagnetico induttivo nel dominio delle frequenze*.

In particolare verranno discusse le basi teoriche sulle quali si fonda il metodo FDEM: questo aspetto verrà illustrato senza entrare nei dettagli fisico-matematici più complessi (che sono al di fuori dello scopo di quest'opera), ma con un approfondimento tale da consentire al lettore di comprendere quali possano essere le applicazioni elettive della tecnica e di come la strumentazione disponibile in commercio sia progettata per consentire di massimizzare la capacità di osservare le variazioni di conducibilità elettrica del sottosuolo fino ad una determinata profondità.

Verranno poi illustrate alcune tra le più note strumentazioni in commercio (elettromagnetometri), esaminandone le caratteristiche principali dal punto di vista costruttivo ed operativo.

Successivamente verranno analizzati gli aspetti relativi alla progettazione di una campagna di misure FDEM affinché si possa realizzare il miglior compromesso possibile tra le richieste del committente, la logistica di campo, le risorse a disposizione e la possibilità di acquisire dati di alta qualità.

Infine, sempre nell'ambito della descrizione di una campagna di misure, si illustreranno gli aspetti relativi all'acquisizione dati, nonché all'analisi e visualizzazione di essi.

Seguiranno *case histories*, con l'obiettivo di evidenziare gli aspetti tecnici e pratici che possono risultare di maggior interesse per il Geofisico che si avvicina all'impiego della tecnica FDEM.

Un aspetto piuttosto interessante che sarà evidenziato è il fatto che la metodologia Elettromagnetica a Induzione è ancora oggi sotto-utilizzata rispetto alle sue

potenzialità, in particolar modo in Italia, se paragonata ad altre tecniche geofisiche che trovano maggior favore nella pratica professionale, come Tomografia Elettrica di Resistività (ERT), sismica a rifrazione, *MASW*, sismica *down-hole*, Georadar, che rappresentano le tecniche maggiormente adoperate dai professionisti e dagli operatori del settore. Il sotto-utilizzo del metodo FDEM risulta particolarmente accentuato nel contesto dell'esplorazione del sottosuolo in aree di grande estensione ove gli aspetti economici e di dispendio di tempo assumono una notevole importanza, evidenziando ancor più la sua economicità, rapidità di utilizzo, e precisione di risultato.

Introduzione

Esistono molte tecniche geofisiche basate sulla propagazione di campi elettromagnetici (EM), ed una loro univoca classificazione basata su pochi e ben definiti punti cardine risulta ardua e, talvolta, di incerta utilità ai fini pratici. È però opportuno avere una visione quanto più possibile chiara dell'insieme di tecniche EM disponibili e di ciò che le distingue reciprocamente, al fine di ottimizzare il risultato derivante dal loro impiego.

Una prima differenziazione può essere fondata sul fatto che, come sorgente di energia elettromagnetica, vengano impiegati trasmettitori artificiali con caratteristiche note di frequenza ed ampiezza del segnale emesso (come avviene nei metodi TDEM, *Time Domain Electromagnetic*, metodi FDEM, *Frequency Domain Electromagnetic*, e nelle tecniche Georadar), oppure che si misuri l'interazione di fonti naturali di energia elettromagnetica con il sottosuolo, come avviene nei metodi MT (*magnetotellurici*), AMT (*Audio Magneto Telluric*), AFMAG (*Audio Frequency Magneto Telluric*). In tal senso, le prime possono essere classificate come tecniche EM "attive" e le ultime tecniche EM "passive".

Altro modo per caratterizzare uno o un gruppo di metodi EM rispetto ad altri risiede nel fatto che il segnale generato da una corrente AC, di ampiezza e frequenza noti, sia emesso in modo continuo (metodi FDEM), oppure che la bobina trasmittente emetta un segnale EM transitorio e che la bobina ricevente misuri il tempo di decadimento di questo segnale dopo che la trasmittente è stata "spenta" (metodi TDEM).

Possiamo inoltre classificare un metodo EM a seconda della posizione relativa tra bobina trasmittente e bobina ricevente: queste, infatti, possono avere una interdistanza fissa o variabile. Sulla base di questa peculiarità operativa distinguiamo i metodi Turam (D.S. Parasnis, 1979), Slingram, Conduttivimetro (GCM, *Ground Conductivity-meter*), VLF (*Very Low Frequencies*).

P.V. Sharma (1997) introduce una classificazione basata sul fatto che il campo elettromagnetico primario sia continuo, transitorio oppure a banda larga; secondo questa classificazione avremo:

- metodi con campi EM continui (FDEM);

- metodi con campi EM transitori (TDEM);
- metodi magnetotellurici (MT).

Indipendentemente da qualsiasi classificazione, ogni metodo EM viene applicato allo scopo di caratterizzare il sottosuolo sulla base della sua conducibilità elettrica.

Nelle pagine che seguono, la trattazione sarà riferita solo ai metodi EM nel dominio delle frequenze (FDEM) a basso numero di induzione. Più avanti si illustrerà il significato del termine “numero di induzione”, e quale sia il ruolo di tale parametro rispetto alla progettazione degli elettromagnetometri disponibili in commercio, così come nella misurazione della conducibilità elettrica. Nel seguito, per semplicità, si farà riferimento a questo metodo con il nome di metodo EM a induzione o semplicemente FDEM. Nella parte conclusiva verranno illustrati brevemente i metodi *Time Domain Electromagnetic* (TDEM) ed *Airborne Electromagnetic* (AEM).

Il metodo EM a induzione si basa sul principio fisico dell'induzione elettromagnetica; la strumentazione che consente di effettuare le misurazioni (elettromagnetometri o GCM, *Ground Conductivity-meters*) è costituita essenzialmente da una bobina trasmittente alimentata da una batteria e da una bobina ricevente. Trasmittente e ricevente sono separate da una distanza fissa, e la lunghezza totale dello strumento varia da 120 cm (GSSI, EMP-400 Profiler) a circa 400 cm (Geonics, EM31; DualEM 4s) in dipendenza dal modello e dal produttore. Gli elettromagnetometri operano generando campi elettromagnetici, con frequenze singole o a più frequenze contemporaneamente, variabili nell'intorno compreso tra 1 e 16 kHz. Sono strumenti portatili il cui peso varia tra i 5 kg ed i 12 kg circa. Le grandezze misurate dagli elettromagnetometri sono la conducibilità elettrica (in milliSiemens/m) con *range* dinamico compreso tra 1 e 1000 mS/m (J.D. McNeill, 1980), la componente in fase (in ppm) e la componente in quadratura (in ppm). In dipendenza dalle frequenze di acquisizione e dalla spaziatura tra le bobine, la profondità di investigazione può giungere a 6 m circa.

Le caratteristiche costruttive degli elettromagnetometri (conduttivimetri) così come i principi fisici incorporati nelle componenti elettroniche che li costituiscono convergono in due aspetti fondamentali:

1. nella maggior parte delle configurazioni disponibili, i conduttivimetri sono strumenti portatili che necessitano di un solo operatore per acquisire i dati di campagna;
2. non è necessario alcun contatto tra il suolo e lo strumento perché le misure di conducibilità possano essere effettuate.

Gli aspetti di cui sopra e, più in generale, le caratteristiche metodologiche della tecnica FDEM conducono ad una serie di vantaggi, tra cui troviamo:

- *ottima risoluzione nella mappatura di conducibilità nella direzione orizzontale*: gli elettromagnetometri sono gestiti, in fase di acquisizione dati, da software che consentono di variare anche la frequenza di campionamento del dato. Ciò consente di acquisire, camminando lungo linee di acquisizione prestabilite, una grandissima quantità di dati per unità di superficie investigata;
- *riduzione dei tempi di acquisizione dati*: poiché la metodologia EM si basa sul principio di induzione elettromagnetica, essa non necessita di alcun contatto tra la bobina trasmittente ed il suolo, come invece avviene nel metodo geoelettrico in cui una coppia di elettrodi viene infissa nel terreno per poter immettere corrente nel sottosuolo, ed un'altra coppia di elettrodi ne misura il relativo potenziale. Questo aspetto consente di acquisire dati in maniera continua camminando con l'elettromagnetometro lungo direzioni prefissate all'interno dell'area di lavoro. In condizioni di terreno poco accidentato, possono essere acquisiti dati lungo un'estensione pari a circa 10 km lineari per giorno;
- *riduzioni dei costi*: per quanto al punto precedente, ne consegue che i costi economici di acquisizione sono notevolmente ridotti rispetto ad altre metodologie geofisiche ed a parità di superficie investigata.

Come per ogni tecnica di geofisica applicata, anche i metodi FDEM presentano limitazioni, tra i quali troviamo:

- *calibrazione dello strumento prima della misura*: la misura del campo elettromagnetico secondario dovuto all'interazione del primario con il sottosuolo viene effettuata in rapporto ad un segnale di riferimento. Per questo motivo, prima di eseguire le misure, bisogna calibrare lo strumento in una zona dell'area di indagine all'interno della quale si ritiene che non vi siano anomalie (una zona ad alta resistività, ad esempio);
- *limitata risoluzione verticale*: il dato acquisito si riferisce ad un volume di sottosuolo al disotto del punto medio tra la bobina trasmittente e la bobina ricevente, per cui esso deve essere considerato come un dato di conducibilità "apparente";
- *ridotto range dinamico*: come evidenziato in McNeill (1980), quando il sottosuolo presenta valori molto bassi di conducibilità elettrica (suoli molto resistivi) risulta piuttosto arduo "indurre" il sottosuolo, tramite l'elettromagnetometro, a generare correnti sufficientemente grandi per cui il campo magnetico secondario (indotto) possa essere misurato da strumenti con *range* dinamico compreso tra 1 e 1000 mS/m.

In generale, quindi, i metodi FDEM a induzione funzionano nella seguente maniera: un operatore trasporta, ad una velocità di circa 0.5-0.75 m/s, l'elettromagnetometro lungo linee di acquisizione parallele opportunamente collocate in ragione dell'obiettivo della campagna di misure; la bobina trasmittente emette un

segnale EM (primario) a frequenza ed ampiezza noti, che giunge al sottosuolo in maniera continua e con esso interagisce generando campi elettrici; i campi elettrici così prodotti genereranno a loro volta campi magnetici (secondario) che si propagheranno in tutte le direzioni dello spazio e verranno misurati dalla bobina ricevente. Il campo magnetico secondario misurato è “distorto” rispetto al primario per via delle caratteristiche fisiche proprie del sottosuolo stesso, ed il rapporto tra il campo EM secondario ed il campo EM primario consentirà di calcolare la conducibilità apparente del sottosuolo.

I metodi FDEM trovano moltissime applicazioni in ambito ambientale, ingegneristico ed archeologico. Essi possono essere condotti sia in superficie che in foro di sondaggio, che in mare o aviotrasportati. A seconda dell’ambiente nel quale vengono condotte le misure, le caratteristiche strutturali della strumentazione di misura è notevolmente diversa da quella appena descritta in quanto essa viene “ospitata” in sonde da pozzo di forma e dimensioni apposite, piuttosto che in strutture appositamente costruite per essere trasportate da elicotteri o piccoli velivoli.

I campi di applicazione che consentono di esaltare le peculiarità dei metodi FDEM e di ottimizzarne il risultato finale sono:

- mappatura di intrusione di acque saline;
- individuazione di tubazioni metalliche interrato;
- individuazione di ordigni inesplosi;
- ricerca di cavità (in alcuni tipi di suolo);
- mappatura di *plumes* di inquinanti;
- individuazione di possibili zone di frattura dello strato di HDPE in discarica controllata di RSU;
- mappatura di zone ad interesse archeologico;
- ricerche di metalli sepolti, in genere;
- ricerche di risorse minerarie;
- individuazione di discariche non autorizzate.

Quello di cui sopra è un elenco generico e certamente non esaustivo; ogni campagna di misure per l’esplorazione del sottosuolo deve essere progettata ed eseguita con criteri strettamente specifici rispetto all’oggetto della campagna stessa.

1. Cenni teorici

1.1. Onde elettromagnetiche e quantità fondamentali

I metodi FDEM a induzione trovano fondamento teorico su concetti di fisica di base molto complessi: la teoria della propagazione delle onde elettromagnetiche. Nel seguito della trattazione non si entrerà approfonditamente nel dettaglio fisico-matematico della teoria, che è al di fuori dello scopo di quest'opera, ma si cercherà di dare una visione dei principi base ragionevolmente semplificata ed al contempo di supporto alla comprensione della metodologia FDEM. A questo scopo si introdurranno due esperimenti di laboratorio.

Sia dato un amperometro ai cui estremi sia collegato un avvolgimento elettrico (una bobina) come schematizzato in figura 1.1.

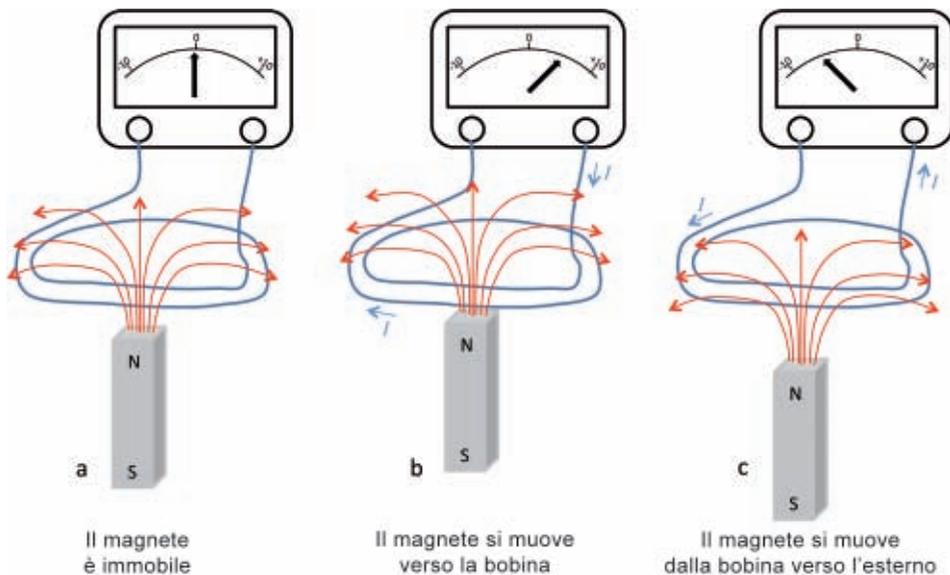


Figura 1.1. a) Il magnete non si muove e nessuna corrente è misurata dallo strumento; b) l'amperometro misura una corrente di segno positivo quando il magnete si muove verso l'avvolgimento ad esso connesso; c) l'amperometro misura una corrente di segno negativo quando il magnete si muove dalla bobina verso l'esterno della stessa

Si approssimi ad esso un magnete, che verrà di seguito mantenuto in posizione stazionaria (figura 1.1a). Si osserva, in tal caso, che l'amperometro non misura alcun passaggio di corrente ai suoi estremi. Se il magnete viene spostato verso la bobina (figura 1.1b), facendo sì che le spire di cui essa è costituita siano intercettate dal magnete stesso e dai campi magnetici da esso generati, si osserva che lo strumento registrerà il passaggio di una corrente elettrica di segno positivo. Quando invece il magnete si muoverà nel verso opposto (al di fuori della bobina, figura 1.1c), la corrente elettrica misurata avrà segno opposto. Da ciò deduciamo che un campo magnetico variabile nel tempo posto in prossimità di un conduttore metallico "produce" in esso una corrente elettrica.

Il concetto ora espresso è applicato alla costruzione dei sismografi (*geofoni*), i quali sono costituiti da un avvolgimento elettrico all'interno del quale è posto un magnete: l'avvolgimento è reso solidale con la struttura del geofono, mentre il magnete è "libero" di muoversi al suo interno. Quando un'onda sismica intercetta il geofono, il magnete al suo interno comincia a muoversi "copiando" il moto oscillatorio dell'onda sismica stessa; tale moto si traduce in un segnale elettrico sinusoidale con frequenza ed ampiezza misurabili e proporzionale all'onda sismica che lo ha generato. Con opportune tecniche di digitalizzazione del segnale, tale oscillazione viene visualizzata sotto forma di sismogrammi.

Il secondo esperimento è schematizzato in figura 1.2, in cui un avvolgimento metallico è percorso da una corrente elettrica I .

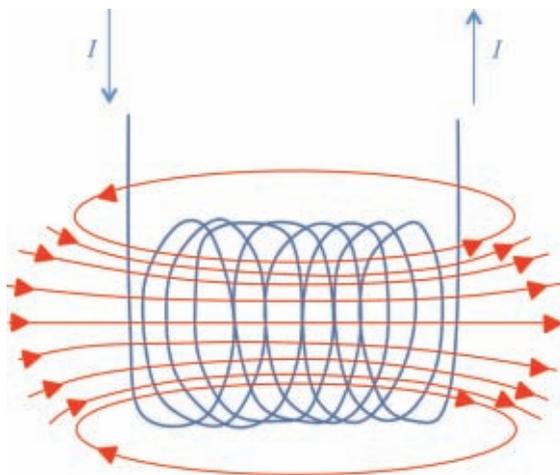


Figura 1.2. Le linee continue di colore rosso indicano un campo magnetico generato da una corrente elettrica alternata che attraversa un avvolgimento elettrico (bobina, di colore blu)

Si dimostra sperimentalmente che una bobina metallica percorsa da una corrente elettrica I genera un campo magnetico. L'ampiezza del campo magnetico è proporzionale all'intensità della corrente elettrica. Per verificare ciò, si colleghi ad

un avvolgimento metallico una piccola batteria; si ponga poi all'interno delle spire dell'avvolgimento un piccolo ago di metallo (l'ago non dovrà essere a contatto con le spire). Si osserva quindi che quando si collegherà la batteria l'ago risulterà leggermente magnetizzato e attirerà ai suoi estremi (poli del magnete) della fine limatura di ferro.

I risultati illustrati dall'esperimento di cui in figura 1.1 sono descritti dalla legge di Faraday, la quale stabilisce che un campo magnetico variabile nel tempo, esercitato in prossimità di una bobina metallica (conduttore), genera in esso un campo elettrico. La legge di Faraday si esprime con la seguente formulazione matematica:

$$\operatorname{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.1)$$

Nella (1.1) E rappresenta l'intensità di campo elettrico misurato (V/m) e B il vettore induzione magnetica (Weber/m² oppure tesla).

In figura 1.2, invece, si illustra la legge di Ampere, la quale stabilisce che ad un campo elettrico variabile nel tempo è associato un campo magnetico. La legge di Ampere può essere espressa tramite la seguente funzione:

$$\operatorname{rot}H = I + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1.2)$$

Nella (1.2) H è l'intensità del campo magnetico (in A/m), I è la densità di corrente elettrica (A/m²), e D il cosiddetto spostamento elettrico (C/m²).

Inoltre il campo elettrico (così come il campo magnetico) sono messi in relazione con le loro sorgenti tramite la legge di Gauss, espressa dalle seguenti equazioni:

$$\operatorname{div}B = 0 \quad (1.3)$$

$$\operatorname{div}D = q \quad (1.4)$$

Le (1.1), (1.2), (1.3) e (1.4) sono note come *equazioni di Maxwell* e mettono in relazione le grandezze vettoriali di cui sopra con le loro sorgenti, nonché con la densità di carica elettrica q (C/m³), e con la densità di corrente elettrica I (A/m²) (P.V. Sharma, 1997).

Le grandezze vettoriali E , D , B , H , sono inoltre connesse alle grandezze ε costante dielettrica (in F/m), μ permeabilità magnetica (H/m), σ conducibilità elettrica (S/m), tramite le seguenti relazioni:

$$D = \varepsilon E \quad (1.5)$$

$$B = \mu H \quad (1.6)$$

$$I = \sigma E \quad (1.7)$$



Figura 4.11. Risultati FDEM. Mappa della componente in fase con dipoli orizzontali co-planari posti a 6 m di distanza (immagini concesse da Patberg e Schrameck, www.psingenieure.eu)

4.2. Ricerca di ordigni bellici inesplosi in area di prossima costruzione

4.2.1. Introduzione

Scopo dell'indagine relativa a questo caso è l'individuazione di possibili ordigni inesplosi sepolti al di sotto di un'area di prossima costruzione di un edificio industriale. Nelle figure 4.12-4.14 sono illustrati alcuni dettagli dell'area di lavoro, inclusa la planimetria con indicazione delle linee di acquisizione ed una foto del sito oggetto di indagine geofisica.

Dati:

- località: Italia;
- strumentazione: Geonics EM31;
- spaziatura tra linee di acquisizione: 1 m;
- dimensioni dell'area: circa 60 m lunghezza, circa 20 m larghezza;
- estensione lineare totale acquisita: circa 2 km;
- durata delle misure in campo: 2 ore circa.



Figura 4.12. Area di lavoro. Il poligono rosso individua l'area all'interno della quale sono state effettuate le misure FDEM



Figura 4.13. Area di lavoro. Il poligono rosso individua l'area all'interno della quale sono state effettuate le misure FDEM; le linee gialle illustrano la posizione GPS delle linee di acquisizione. P1 e P2 rappresentano la posizione di vegetazione arborea che ha parzialmente impedito l'acquisizione dati



Figura 4.14. Fase di acquisizione dati FDEM con Geonics EM31

4.2.2. Risultati e conclusioni

Nelle figure 4.15-4.16 sono illustrate la mappa di conducibilità elettrica e la mappa relativa alla componente in fase per acquisizioni a dipoli orizzontali coplanari. L'analisi dei risultati conduce alle seguenti considerazioni conclusive:

- l'area di lavoro è caratterizzata da una superficie pianeggiante con rada vegetazione spontanea. Tuttavia, in prossimità dei punti P1 e P2 evidenziati in figura 4.13 sono presenti due gruppi di vegetazione arborea che impediscono l'attraversamento di questi settori. Di conseguenza, il dato elettromagnetico mostrato nelle figure 4.15 e 4.16, in corrispondenza di queste due aree, presenta ridotta attendibilità;
- nelle figure 4.15 e 4.16 sono illustrate le mappe di conducibilità apparente e della componente in fase: si evidenzia come in prossimità dei punti A e B vi siano due anomalie alto-conduttive. Queste anomalie si collocano in posizione adiacente la linea di confine con una zona di proprietà differente da quella dell'area di interesse per questa campagna di misure;
- in figura 4.15 e figura 4.16 non si riscontra nessuna altra anomalia elettromagnetica di particolare rilevanza. I valori di conducibilità elettrica e di componente in fase presentano variazioni, all'interno dell'area di indagine, compatibili con le normali variazioni litologiche del sottosuolo e del suo grado di saturazione;

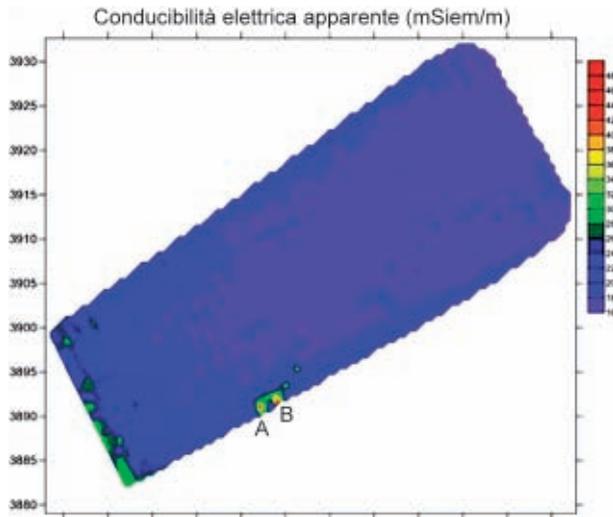


Figura 4.15. Risultati FDEM. Mappa di conducibilità elettrica apparente con dipoli orizzontali co-planari e frequenza pari a 9.7 kHz. Le coordinate spaziali sono espresse in UTM. Le coordinate nord sono parzialmente occultate. Con A e B si indicano due anomalie EM evidenziate

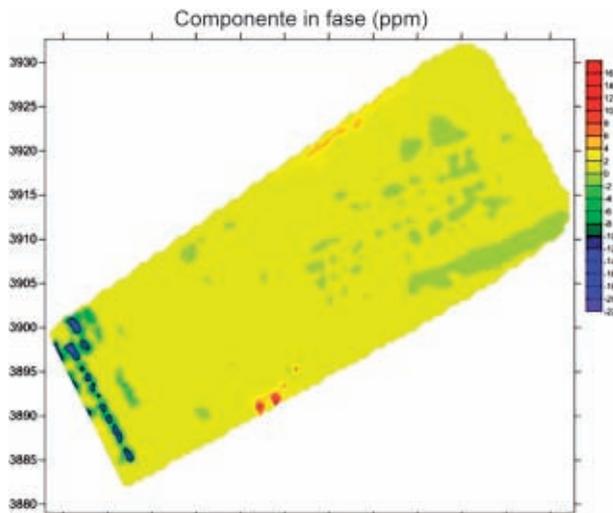


Figura 4.16. Risultati FDEM. Mappa di componente in fase con dipoli orizzontali co-planari e frequenza pari a 9.7 kHz. Le coordinate spaziali sono espresse in UTM. Le coordinate nord sono parzialmente occultate. Con A e B si indicano due anomalie EM evidenziate



Figura 4.51. Area di lavoro. In magenta sono evidenziati gli elementi strutturali della futura costruzione; in azzurro sono evidenziate le posizioni delle linee di acquisizione dati (immagine concessa da GeoStudi Astier srl, www.geostudias-tier.com)



Figura 4.52. Area di lavoro. Particolare dell'elettromagnetometro EMP-400 Profiler durante le fasi di calibrazione (immagine concessa da GeoStudi Astier srl, www.geostudias-tier.com)



Figura 4.53. Area di lavoro. Alcuni dettagli del sito in esame (immagine concessa da GeoStudi Astier srl, www.geostudias-tier.com)

4.5.2. Risultati e conclusioni

Nelle figure 4.54-4.56 sono illustrate le mappe della componente in quadratura e della componente in fase per acquisizioni a dipoli orizzontali co-planari con frequenza di acquisizione pari 3, 9 e 15 kHz. I dettagli relativi ad ogni singola mappa illustrata sono descritti nelle relative didascalie.

Nel caso specifico, poiché sono stati acquisiti anche dati Georadar, l'interpretazione è stata eseguita in maniera integrata tra le due metodologie. In relazione alla fase di interpretazione dei dati EM è da rilevare il fatto che ai bordi dell'area indagata le misure risultano meno attendibili a causa dell'effetto di disturbo generato dai muri perimetrali, dalla loro fondazione.

Le mappe ottenute dalle misure FDEM, come è noto, non consentono di identificare la profondità esatta delle anomalie riscontrate, in quanto l'impulso EM può essere più o meno attenuato in funzione della conducibilità elettrica del mezzo attraversato; è però possibile asserire che le mappe a frequenza più bassa si riferiscono ad un volume di terreno di spessore maggiore rispetto a quelle a frequenza più alta. Sulla base delle caratteristiche dielettriche dei terreni presenti si valuta che le mappe riportate possano essere riferite ad una profondità massima complessiva di circa 3-4 m dal piano di campagna.

all'approccio, proposto da Viezzoli et al. nel 2008, noto con il nome di *Spatially Constrained Inversion* (SCI): si tratta di una metodologia che, grazie all'uso di vincoli (*constraints*) orizzontali e verticali, è in grado di trasferire le informazioni ricavate da un singolo modello 1D a tutti quelli circostanti. In tal modo si riesce ad ottenere, entro limiti imposti comunque dall'operatore, una certa continuità laterale, compatibile con la maggior parte delle condizioni geologico-stratigrafiche. È altresì possibile guadagnare in risoluzione rispetto a strati che altrimenti sarebbero più difficilmente modellizzabili tramite la singola inversione 1D (A. Menghini e A. Viezzoli, 2012). D'altro canto, rimane a tutt'oggi non praticabile un approccio all'inversione dei dati AEM in modalità effettivamente 3D.

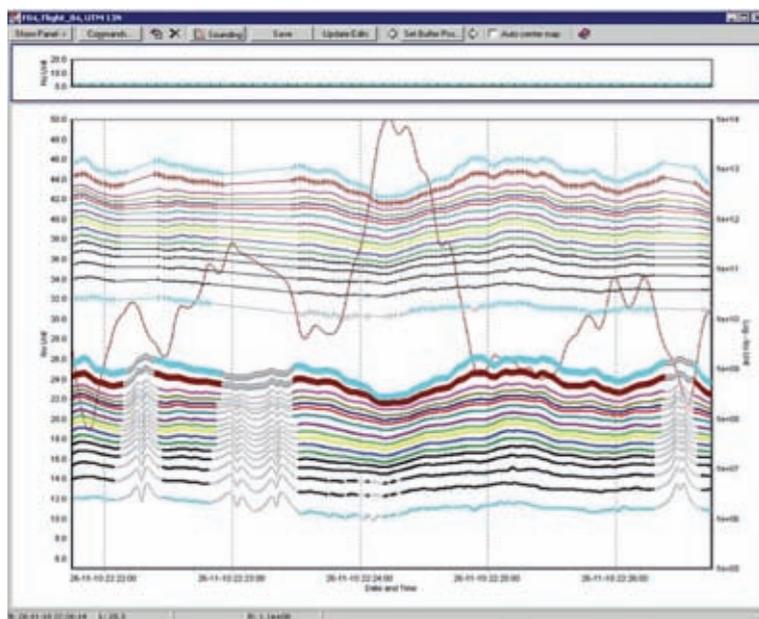


Figura 5.15. Esempio di elaborazione dei dati in fase di *de-coupling* e filtraggio. In grigio si evidenziano i dati filtrati che non verranno impiegati per la successiva fase di inversione (da A. Menghini e A. Viezzoli, 2012)

In figura 5.16 si mostra un confronto della SCI con una semplice concatenazione di singoli modelli 1D (A) e con quella che viene definita *Laterally Constrained Inversion* (figura 5.16a, ovvero una inversione nello spazio 2D eseguita su modelli 1D posti sullo stesso allineamento). In 5.16a non vi è alcuna altra forma di elaborazione del dato, mentre con la LCI si trasferiscono i *constraints* solamente lungo le linee di volo.

Si noti come il contatto argilla-calcarei, intercettato dal pozzo sul lato sinistro del profilo (5.16a), è risolto con precisione solo nel caso della LCI (b) e della SCI (c), mentre la figura 5.16a mostrerebbe una sovrastima dello spessore della copertura argillosa più conduttiva. (A. Menghini e A. Viezzoli, 2012).

Bibliografia citata ed approfondimenti suggeriti

ASTM D6639–01 (2008), *Standard Guide for Using the Frequency Domain Electromagnetic Method for Subsurface Investigations*.

Christensen N.B., Sørensen K.I. (1998), *Surface and Borehole Electric and Electromagnetic Methods for Hydrogeophysical Investigations*, *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 3(1), pp. 75-90.

Danielsen J.E., Auken E., Jørgensen F., Sødergaard V., Sørensen K.I. (2003), *The Application of the Transient Electromagnetic Method in Hydrogeophysics Surveys*, *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier.

Kearey P., Brooks M., Hill I. (2002), *An Introduction to Geophysical Exploration*, terza edizione, Blackwell Science, Oxford.

Kirsch R. (2006), *Groundwater Geophysics. A Tool for Hydrogeology*, Springer, Berlin-Heidelberg.

McNeill J.D. (1980), *Electromagnetic Terrain Conductivity Measurements at Low Induction Number*, Technical note TN-6, Geonics Ltd. (www.geonics.com).

McNeill J.D. (1980), *Applications of Transient Electromagnetic Techniques*, Technical note TN-7, Geonics Ltd. (www.geonics.com).

McNeill J.D. (1990), *Use of Electromagnetic Methods for Groundwater Studies*, in Ward S.H. (ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics*, vol.1, Soc. Expl. Geophys, Tulsa, pp. 191-218.

Menghini A., Viezzoli A. (2012), *Il metodo Airborne EM: un approccio innovativo allo studio del territorio*, Geologia Tecnica e Ambiente, Ordine Nazionale dei Geologi, Roma.

Menghini A., Pagano G., Floris S., Bernini E., Pelorosso M. (2010), *TDEM Method for Hydrothermal Water Detection*, *First Break* (vol. 28), European Association of Geoscientist and Engineers (EAGE).

Parasnis D.S. (1979), *Principles of Applied Geophysics*, terza edizione, Chapman and Hall, London.

Siemon B., Christiansen A.V., Auken E. (2009), *A Review of Helicopter-Borne Electromagnetic Methods for Groundwater Exploration*, *Near Surface Geophysics* 7, pp. 629-646.

Sørensen K.I., Auken E. (2004), *A New High-Resolution Helicopter Transient Electromagnetic System*, *Exploration Geophysics* 35, pp. 191-199.

Sharma P.V. (1997), *Environmental and engineering geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge.

Viezzoli A., Christiansen A.V., Auken E., Sørensen K.I. (2008), *Quasi-3D Modelling of Airborne TEM Data by Spatially Constrained Inversion*, *Geophysics* 73, F105-F113.

Ward S.H., Hohmann G.W. (1988), *Electromagnetic Theory for Geophysical Applications*, in Nabighian M.N. (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, vol. 1: Theory, Society of Exploration Geophysicists, IG n. 3, Tulsa, pp. 130-310.

West G.F., Macnae J.C. (1991), *Physics of the Electromagnetic Induction Exploration Method*, in Nabighian M.N., Corbett J.D. (eds.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, pp. 5-45.