



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Geoscienze

Direttore Prof. Domenico Rio

TESI DI LAUREA TRIENNALE IN SCIENZE GEOLOGICHE

**ANALISI COMPARATA DI DATI GPR DA
FORO ACQUISITI SU UN SITO
CONTAMINATO**

Relatore: Dott. Ing. Rita Deiana

Laureanda: Laura Busato

ANNO ACCADEMICO 2010/2011

Abstract

Applied geophysics provides several methods to investigate contaminated areas. The importance of these methods relies on the possibility of monitoring such areas, in order to apply the most appropriate remediation option.

In this work we present the example of the Trecate site, an area contaminated by crude oil caused by the blowout of TR24, an Agip-Eni oil well, in 1994. Several geophysical methods have been used at this site to gain information about the subsurface: one of these methods is bore-hole GPR, an active method based on the reflection of radar pulses at layer boundaries. The GPR surveys in Trecate have been made using both Vertical Radar Profile (VRP) and Zero Offset Profile (ZOP) approaches.

Thanks to this comparison between different surveying strategies (VRP vs ZOP and VRP acquisitions in time-lapse mode) , in terms of velocity and water content, several conclusions can be made. First of all the VRP acquisitions are affected by some physical problems linked to the acquisition geometry. To reduce this problem, we tested a mathematical approach that opens new considerations about the VRP acquisition and the evaluation of their results.

Indice

Abstract	3
Introduzione	7
1 Il sito di Trecate	9
1.1 Inquadramento geologico-stratigrafico e geomorfologico	9
1.2 L'esplosione del pozzo TR24	10
2 Il metodo GPR	13
2.1 Acquisizione dei dati	14
2.2 Velocità GPR e contenuto idrico	15
3 Acquisizione ed elaborazione dei dati: il sito di Trecate	19
3.1 Acquisizione dei dati in campagna	19
3.2 Elaborazione dei dati	21
3.3 Il problema nell'acquisizione dati VRP	22
3.4 Possibile approccio al problema di acquisizione dei dati	24
4 Confronto tra dati	27
4.1 Confronto tra VRP e ZOP tra Central Borehole e Western Bore- hole	27
4.2 Confronto tra VRP del 2003, 2004 e 2011	29
5 Conclusioni	31
Ringraziamenti	33
Bibliografia	34

Introduzione

Nell'ambito di un lavoro di bonifica di un sito contaminato, il controllo ed il monitoraggio sono aspetti fondamentali per la corretta progettazione degli interventi da eseguire e per ottenere un riscontro ed una verifica di quanto già messo in atto. Sotto quest'ottica la geofisica applicata mette a disposizione diversi metodi che possono essere scelti tenendo conto delle caratteristiche dell'inquinante, delle risorse economiche a disposizione, della morfologia del sito, ecc.

A tal proposito un esempio è rappresentato dal sito di Trecate, dove ha avuto luogo l'esplosione di un pozzo per l'estrazione del petrolio, il TR24 dell'Agip-Eni (Fig. 1).

Tra i vari metodi geofisici che sono stati applicati nel sito di Trecate¹, il *GPR* è quello su cui è basato il lavoro di questa tesi triennale. In particolare, i dati sono stati acquisiti in due modalità: VRP (Vertical Radar Profile) e ZOP (Zero Offset Profile). Successivamente all'elaborazione si è proceduto al confronto dei risultati, durante il quale è emersa una problematica legata all'acquisizione dei dati in modalità VRP, per la quale è stato proposto un possibile approccio matematico.



Fig. 1: Esplosione del pozzo TR24.

¹Per approfondimenti si veda [1]

I principali obiettivi di questa tesi sono:

1. Confrontare due modalità di acquisizione di dati GPR in foro (VRP e ZOP);
2. Confrontare i risultati ottenuti da misurazioni VRP effettuate, a distanza di anni, nello stesso pozzo (misure in time-lapse).

Nel primo caso lo scopo è quello di valutare la possibilità di acquisire i dati VRP nel caso in cui si disponga di un unico foro, assumendo la qualità del risultato paragonabile a quella dei dati ZOP, per i quali è invece necessario avere due pozzi.

Nel secondo caso, invece, lo scopo è quello di analizzare il grado di informazione estraibile dal dato VRP ripetuto nel tempo, in un sito inquinato soggetto a dinamiche sotterranee complesse (variazione della falda legata alle coltivazioni, processi di bioattenuazione, ecc.).

Capitolo 1

Il sito di Trecate

Trecate è un centro abitato in provincia di Novara, nel Piemonte orientale. Il sito è tristemente noto per l'esplosione del pozzo TR24 dell'Agip-Eni, progettato per l'estrazione di idrocarburi. Il sito contaminato, in particolare, si trova tra i centri di Trecate e Romentino e rientra all'interno del Parco del Ticino [3].

1.1 Inquadramento geologico-stratigrafico e geomorfologico

La stratigrafia della zona prevede la presenza di un conglomerato, denominato “Ceppo”, presente in banchi spessi, fortemente cementato e di origine fluviale a cui si sovrappongono i depositi morenici formatisi durante le ultime tre glaciazioni del Pleistocene [3].

I depositi morenici sono legati alle glaciazioni Mindel, Riss e Würm, le quali hanno permesso la deposizione ed il rimaneggiamento del materiale, formando depositi di enormi spessori: essi sono principalmente costituiti da ciottoli fortemente alterati e massi erratici (Riss) e alluvioni ghiaioso-ciottolose con una debole alterazione (Würm) [3]. Importante è stata anche la presenza di torrenti glaciali, principalmente attivi nei periodi interglaciali, che hanno permesso la formazione di una “pianura fluvio-glaciale”. Essi, infatti, hanno trasportato a valle il materiale morenico e ne hanno permesso la deposizione secondo varie stratificazioni [1]: in generale si tratta di alluvioni ghiaiose fortemente alterate con componente argillica[3].

Le glaciazioni (oltre alle tre già citate è necessario ricordare anche la Günz) non hanno lasciato la loro traccia solo grazie alla presenza del materiale moreni-

co, ma anche grazie alle forme glaciali che è possibile rinvenire principalmente nelle valli, legate alla presenza dei ghiacciai stessi, alle loro dimensioni, alle variazioni del fronte glaciale, ecc.

La morfologia dell'area di studio è però principalmente pianeggiante, poiché è legata ai fenomeni fluvio-alluvionali che hanno avuto luogo per la presenza del fiume Ticino: esso ha infatti eroso il materiale a monte, depositandolo poi a valle, permettendo la sovrapposizione del materiale alluvionale su quello glaciale [3].

E' però necessario precisare che l'area di studio è stata, ed è tutt'ora, soggetta ad una forte attività antropica che ha modificato sia la morfologia del sito, sia, in misura molto minore, la geologia dell'area, essendo presente uno strato spesso ($< 1\text{m}$) di origine artificiale costituito da materiale ghiaioso-argilloso, il quale ha la funzione di impermeabilizzare il terreno per permettere la formazione delle risaie [2].

La geologia e la morfologia attuali sono quindi il risultato di un'insieme di processi che hanno avuto luogo nel passato più recente dell'area. Si tratta di processi molto complessi e tra di loro interconnessi, così come lo sono i loro effetti, per i quali si rimanda a testi più specifici per una completa descrizione.

1.2 L'esplosione del pozzo TR24

Il 28 febbraio 1994 ha avuto luogo l'esplosione del pozzo TR24 dell'Agip-Eni (Fig. 1) in seguito alla quale grandi quantità di petrolio greggio sono state riversate sulle case e sui terreni circostanti, in un'area di circa 5 km^2 . Il blow-out, unito alle condizioni meteorologiche avverse, non solo ha inquinato le adiacenti risaie e la campagna circostante (soprattutto a Sud Est del pozzo, Fig. 1.1), ma ha anche provocato l'emissione di acido solforico nell'atmosfera, la cui concentrazione non ha comunque raggiunto livelli critici. Secondo alcune stime sono stati dispersi circa 15000 m^3 di petrolio greggio [2], uniti a 1000000 m^3 di gas naturale e 1000 m^3 di acqua [1].

Si ritiene che l'esplosione sia stata causata dalla pressione troppo elevata presente nel pozzo (circa 500 atm): raggiunti i 4800 m di profondità, infatti, alcune tubature si sono distaccate e sono state deformate dalla pressione esistente. L'esplosione ha quindi provocato il collasso della struttura ed il blow-out è continuato nelle successive 36 ore, cessando poi spontaneamente.



Fig. 1.1: Area contaminata da petrolio greggio in seguito al blow-out del pozzo TR24 (indicato dal cerchio).

Nelle ore successive all'incidente è stato messo in atto un piano di emergenza da parte degli esperti dell'Agip-Eni [1].

In un secondo momento sono stati redatti un piano di monitoraggio ambientale ed un piano di bonifica delle aree contaminate. Il monitoraggio ambientale è tutt'ora in atto e, nei vari anni, ha riguardato il controllo non solo del terreno superficiale ma anche dell'atmosfera, dell'idrosfera (corpi idrici superficiali e acque sotterranee) e di fauna e flora. L'obiettivo è quello di monitorare le variazioni in atto, in modo da poter agire con un piano di bonifica adeguato [1].

Capitolo 2

Il metodo GPR

L'acronimo *GPR* significa *Ground Penetrating Radar*, un metodo attivo di indagine geofisica, meglio noto come Georadar.

Esso prevede lo studio della risposta di un mezzo indagato tramite onde elettromagnetiche ad alta frequenza, le quali possono avere una frequenza che varia in un range tra i 10 MHz e 1 GHz. In particolare, maggiore è la frequenza, minore è la capacità di penetrazione e maggiore è la risoluzione (2.3).

Le onde elettromagnetiche vengono immesse nel sottosuolo grazie ad un'antenna trasmittente ed il tempo del loro arrivo al riflettore e di ritorno in superficie (two-way time o tempo a due vie) viene registrato per mezzo di un'antenna ricevente.

I tempi di primo arrivo del segnale sono indicativi della velocità di transito dell'onda radar nei mezzi attraversati sino alla riflessione su una determinata superficie. Dalla loro lettura, *picking*, è pertanto possibile risalire alla velocità, in quanto $v = d/2t$, dove d è lo spazio tra antenne e riflettore e t il tempo di transito.

Questa informazione è particolarmente rilevante se si tiene conto della relazione esistente tra la velocità radar e la *permittività elettrica*, o *costante dielettrica* (ε)(2.1). La variazione di quest'ultima è estremamente importante, in quanto regola sia la profondità di penetrazione del segnale, sia l'*impedenza elettromagnetica* (2.8) propria di ciascun mezzo. La variazione dell'impedenza elettromagnetica all'interfaccia tra due mezzi differenti determina le riflessioni originate appunto dagli orizzonti riflettenti.

2.1 Acquisizione dei dati

Le prospezioni geofisiche permettono, in generale, di acquisire informazioni indirette riguardanti il sottosuolo con un grado di invasività quasi nullo. Nel caso del *GPR* le indagini vengono effettuate mediante l'utilizzo di due antenne, una trasmittente (Tx) e l'altra ricevente (Rx). La prima emette onde elettromagnetiche con la frequenza propria dell'antenna stessa, mentre la seconda permette la ricezione delle onde una volta che queste sono state riflesse dagli orizzonti riflettenti.

La frequenza delle antenne viene scelta in base alle necessità operative, ossia allo scopo dell'indagine. Da un punto di vista operativo la prima distinzione va fatta tra *sistema monostatico* e *sistema bistatico*: nel primo caso sia l'antenna trasmittente che quella ricevente sono contenute all'interno dello stesso "case", quindi la loro distanza reciproca è costante e legata alle caratteristiche del sistema stesso; nel secondo caso le antenne sono fisicamente separate e questo consente di posizionarle in base alla modalità di acquisizione prescelta, come verrà spiegato di seguito.

Tra i pregi del sistema monostatico c'è sicuramente quello di permettere ad un unico operatore di compiere l'acquisizione in completa autonomia (anche utilizzando mezzi a motore). Il sistema bistatico richiede invece la presenza di almeno due operatori, a vantaggio però di una grande versatilità in quanto permette di indagare aree poco accessibili e di effettuare tomografie per transilluminazione.

L'acquisizione dei dati mediante tecniche GPR è realizzabile sia da superficie che in foro.

Nel primo caso sono possibili quattro modalità, di cui tre bistatiche:

1. Common Offset;
2. Wide-Angle Reflection and Refraction (WARR);
3. Common Mid Point (CMP).

La quarta modalità, monostatica, è la riflessione ottenuta trascinandolo l'antenna (Tx/Rx) in superficie.

Anche per le acquisizioni da foro sono disponibili quattro modalità:

1. Vertical Radar Profile (VRP);
2. Zero Offset Profile (ZOP);
3. Multiple Offset Gather (MOG);
4. Riflessione con entrambe le antenne nello stesso foro.

In questo lavoro di tesi sono state prese in considerazione in particolare le modalità *VRP* e *ZOP*.

Il *VRP* prevede che l'antenna trasmittente sia posizionata in superficie e quella ricevente, all'interno di un foro (Fig. 2.1(a)). L'antenna trasmittente è fissa, mentre quella ricevente viene calata nel pozzo a diverse profondità, con step di misurazione differenti a seconda della risoluzione scelta dall'operatore (ad esempio, si può effettuare una misurazione ogni 10 cm). Questo sistema è utile nel caso in cui si abbia a disposizione un unico foro, poiché permette di acquisire informazioni esterne al foro stesso, ricostruendo un profilo verticale di velocità.

Lo *ZOP*, invece, prevede l'inserimento di entrambe le antenne all'interno di due pozzi differenti (Fig. 2.1(b)). Le antenne vengono calate simultaneamente secondo uno step prefissato e consentono di ricostruire un profilo verticale di velocità nello spazio compreso tra i due pozzi. Tuttavia questa modalità di acquisizione è generalmente possibile se i due si trovano ad una distanza ragionevole, generalmente pari a circa metà della profondità dei pozzi stessi. Questo fatto è legato alla frequenza propria delle antenne ed alla loro potenza. Infatti, mentre per le antenne da superficie esistono in commercio un discreto numero frequenze possibili, quelle da foro sono generalmente da 100 MHz.

2.2 Velocità GPR e contenuto idrico

La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche è espressa dalla formula [4][6]:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

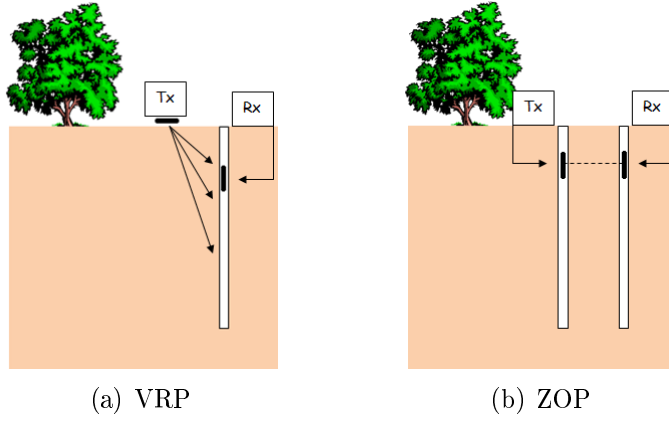


Fig. 2.1: Schemi di acquisizione GPR in foro: (a)VRP e (b)ZOP.

dove c è la velocità dell'onda elettromagnetica in aria (vuoto), con $c = 0.3 \text{ m/ns}$, e ε_r è la *costante dielettrica* del mezzo attraversato, con:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (2.2)$$

(ε è la *permittività elettrica assoluta* del mezzo mentre ε_0 è la permittività elettrica del vuoto).

La *lunghezza d'onda*, λ , è data da:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.3)$$

dove v è la velocità dell'onda misurata tramite l'equazione $v = d/2t$, con d distanza tra antenne e riflettore e t tempo di transito, e f è la frequenza delle onde emesse dall'antenna trasmittente.

Come si nota dall'equazione (2.1), la velocità di propagazione delle onde è inversamente proporzionale a $\sqrt{\varepsilon_r}$. La costante dielettrica, infatti, influenza notevolmente la velocità di propagazione e si ha $3 < \varepsilon_r < 30$ nei mezzi geologici [4]. In particolare, essa è pari ad 1 in aria ed assume il valore massimo, 81, in acqua: questo indica come il contenuto idrico sia un parametro in grado di modificare notevolmente la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche a parità di materiale.

Nel caso in cui si debbano effettuare monitoraggi di variazione di contenuto idrico in un sistema, il GPR, attraverso la costante dielettrica, è quindi in grado di fornire una stima della variazione del contenuto idrico partendo dalle variazioni di velocità. In questo caso si parla di misure ripetute nel tempo o

in *time-lapse*.

La variazione di *contenuto idrico*, θ , può essere descritta con l'utilizzo di formule empiriche come il cosiddetto CRIM (Complex Refractive Index Model)[4]:

$$\sqrt{\varepsilon_r} = (1 - \varphi)\sqrt{\varepsilon_{rs}} + (\varphi - \theta)\sqrt{\varepsilon_{ra}} + \theta\sqrt{\varepsilon_{rw}} \quad (2.4)$$

Da cui:

$$\varepsilon_r = [(1 - \varphi)\sqrt{\varepsilon_{rs}} + \varphi(1 - S_w)\sqrt{\varepsilon_{ra}} + \varphi S_w\sqrt{\varepsilon_{rw}}]^2 \quad (2.5)$$

dove $\theta = S * \varphi$, con S il grado di saturazione e φ la porosità, ed i pedici “s”, “w” e “a” indicanti rispettivamente solido, acqua e aria.

Esiste anche un modello semplificato proposto da Topp et al., 1980 [4]:

$$\varepsilon_r = 3.03 + 9.3\theta + 146\theta^2 - 76.7\theta^3 \quad (2.6)$$

che è quello normalmente utilizzato. La (2.6) può anche essere scritta esplicitando il contenuto idrico θ in funzione della costante dielettrica ε_r :

$$\theta = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2}\varepsilon_r - 5.5 \cdot 10^{-4}\varepsilon_r^2 + 4.3 \cdot 10^{-6}\varepsilon_r^3 \quad (2.7)$$

La costante dielettrica è inoltre importante per definire l'impedenza elettromagnetica, la cui variazione individua i diversi orizzonti riflettenti che permettono la riflessione del segnale radar [4]:

$$Z = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu}{j \cdot \sigma + \varepsilon \cdot \omega}} \quad (2.8)$$

dove ω è la frequenza, μ è la *permeabilità magnetica*, j è un'unità complessa, σ è la *conduttività elettrica* e ε è la costante dielettrica.

Nel caso in cui σ abbia un valore basso è possibile approssimare la (2.8) con la seguente:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (2.9)$$

Il *coefficiente di riflessione per incidenza normale* è definito come:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.10)$$

dove Z_1 e Z_2 sono le impedenze di due mezzi (1 e 2) a contatto. Infine, se il sistema è costituito da mezzi non magnetici (la maggior parte dei mezzi

geologici), cioè nel caso in cui si abbia $\mu_0 = \mu_1 = \mu_2$, si può riscrivere la (2.10) come:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (2.11)$$

Capitolo 3

Acquisizione ed elaborazione dei dati: il sito di Trecate

Il presente lavoro di tesi è basato sui dati acquisiti presso il sito Trecate. La loro acquisizione è stata effettuata mediante le due modalità GPR, VRP e ZOP, secondo quanto descritto nel paragrafo 2.1.

I dati analizzati sono stati registrati nel Marzo 2011. In particolare, per i dati VRP sono state analizzate le acquisizioni ripetute nel tempo (2003, 2004 e 2011) per uno stesso pozzo.

I dati sono stati elaborati con l'utilizzo di un codice commerciale che ha permesso la determinazione dei tempi di primo arrivo dell'onda radar da cui è stata poi ricavata la velocità e la conseguente costante dielettrica, poi convertita in contenuto idrico.

3.1 Acquisizione dei dati in campagna

Il sistema utilizzato per le acquisizioni GPR nel 2011 è il PulseEKKO Pro della Sensor & Software Inc., con antenne da foro da 100 MHz. I dati sono stati acquisiti in 3 pozzi, denominati Western borehole, Central borehole e BB hole (Fig. 3.1).

Nel Western borehole e nel Central borehole i dati sono stati acquisiti sia in modalità VRP che in modalità ZOP. Per quanto riguarda l'acquisizione VRP (Fig. 2.1(a)), l'antenna trasmittente è stata posizionata in superficie, ad ovest del pozzo a 60 cm dall'asse del foro stesso. La ricevente è stata invece posizionata in pozzo, con step di acquisizione di 10 cm e start a 1.1 m di profondità

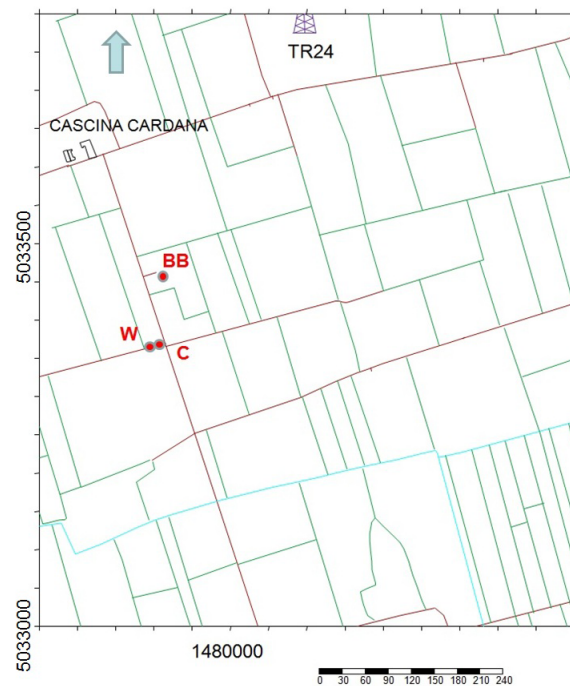


Fig. 3.1: Mappa rappresentante la posizione del Central hole, del Western hole e del BB hole.

rispetto al piano di campagna. Per l'acquisizione ZOP (Fig. 2.1(b)) entrambe le antenne sono state calate nei pozzi (Central e Western). La distanza tra i pozzi è pari a 3.95 m, lo step di acquisizione è di 25 cm e lo start a 1.25 m di profondità rispetto al piano di campagna. I dati sono stati acquisiti tra il 7 ed il 10 Marzo 2011, quando la quota della falda era a 10.40 m di profondità rispetto al piano campagna.

Le acquisizioni nel BB hole (Fig. 3.1) sono state effettuate invece in modalità VRP ed i dati che si hanno disposizione sono stati raccolti il 14 Marzo 2003, il 16 Marzo 2004 e tra il 7 ed il 10 Marzo 2011. In particolare, per i dati VRP acquisiti nel 2011, sono stati utilizzati lo stesso sistema e lo stesso setup scelti per l'acquisizione VRP nel Central borehole e nel Western borehole (PulseEKKo Pro con antenne da 100 MHz, antenna trasmittente posizionata a 60 cm dall'asse del foro, in superficie ad ovest del pozzo e step di acquisizione di 10 cm). Per quanto riguarda le acquisizioni nel 2003 e nel 2004 è stato invece utilizzato il sistema PulseEKKO 100 della Sensor & Software Inc.: l'antenna trasmittente è stata posizionata radialmente, a 70 cm dall'asse del foro, mentre la ricevente è stata calata in pozzo con step di acquisizione pari a 5 cm. Lo start si trovava a 0.75 m di profondità e la falda acquifera si attestava a

10.68 m rispetto al piano di campagna [2].

3.2 Elaborazione dei dati

Per la visualizzazione ed elaborazione dei dati GPR è stato utilizzato il codice commerciale ReflexWin (Sandmeier). L'elaborazione è stata effettuata sui dati acquisiti nel 2011 per tutti i tre pozzi a disposizione, attraverso diversi passaggi:

- *Correzione dei tempi.* Essa è necessaria in quanto l'onda è costretta a viaggiare in aria all'interno del pozzo, prima di raggiungere l'antenna ricevente. I tempi dei primi arrivi sono stati infatti corretti togliendo il tempo di ritardo dell'onda radar, pari a 64.38 ns;
- *Dewow.* Con il termine *wow* si indica un rumore di fondo legato all'elettronica del sistema, che è quindi necessario eliminare. Esso, infatti, provoca una diminuzione del rapporto segnale/rumore all'aumentare della profondità di investigazione [2]. Per effettuare il dewow è stato utilizzato un "residual median filter" come proposto da Gerlitz et al., 1993. In particolare, il dewow sui dati acquisiti è stato effettuato con un filtro con 101 punti.
- *Picking.* Esso permette, una volta che il file contenente i tempi è stato corretto e "ripulito" del rumore di fondo, di ricavare i tempi di primo arrivo delle onde radar all'antenna ricevente.

Effettuati questi passaggi, per ogni dataset VRP (2003, 2004 e 2011) è stato ottenuto un file in cui ad ogni profondità di acquisizione è associato il rispettivo tempo di primo arrivo dell'onda radar, successivamente convertito in velocità. I calcoli effettuati su un foglio Excel, hanno permesso di mettere subito in luce un problema di acquisizione insito alla modalità VRP: alcune delle velocità dell'onda radar calcolate sono risultate negative o superiori a $c = 0.3$ m/ns e quindi inaccettabili (paragrafo 3.3).

Individuato un approccio matematico idoneo alla soluzione del problema (paragrafo 3.4), è stato possibile ricalcolare le velocità dell'onda radar, da cui sono stati poi ottenuti i relativi valori della costante dielettrica ε_r applicando la (2.1). Infine, i dati così ottenuti, sono stati trasformati nel corrispettivo contenuto idrico θ , utilizzando il modello empirico di Topp et al. (2.7). Nella tabella 3.1 sono riportati, a titolo di esempio, alcuni dei valori di profondità,

Profondità (m)	Velocità (m/ns)	Costante Dielettrica, ε_r	Contenuto Idrico, θ
2	0.20	2.32	0.01
3	0.14	4.52	0.07
4	0.15	4.21	0.06
5	0.12	5.86	0.10
6	0.13	5.13	0.08
7	0.11	8.01	0.12

Tabella 3.1: Esempio di valori di profondità, v , ε_r e θ per il Western hole.

velocità v , costante dielettrica ε_r e contenuto idrico θ ottenuti per il Western hole. Per la discussione dei dati ottenuti si veda il capitolo 4.

3.3 Il problema nell'acquisizione dati VRP

L'elaborazione dei dati ottenuti nel 2003, 2004 e 2011 ha permesso di evidenziare un problema insito all'acquisizione dei dati VRP.

Ottenuti i tempi di primo arrivo e le rispettive profondità, debitamente elaborati come descritto nel paragrafo 3.2, sono state ricavate le velocità dell'onda radar, alcune delle quali inaccettabili poiché negative o superiori a $c = 0.3$ m/ns, velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto. Nelle tabelle 3.2 e 3.3 sono riportate alcune delle velocità errate ottenute nel Western hole e nel Central hole.

Profondità (m)	Tempo di primo arrivo (ns)	Velocità (m/ns)
1.3	13.88	-0.08
3.3	25.37	-1.06
3.6	27.03	0.53
5.6	41.60	1.59
6.6	49.79	-1.06
6.8	50.66	1.59
12.6	125.44	-0.79

Tabella 3.2: Esempi di velocità errate, Western hole

Profondità (m)	Tempo di primo arrivo (ns)	Velocità (m/ns)
2.3	21.87	0.45
3.2	28.47	-0.60
3.7	31.24	1.81
9.5	77.44	-0.20
12.3	121.62	0.60
13.2	136.38	-0.21
13.9	155.19	-0.02

Tabella 3.3: Esempi di velocità errate, Central hole

Il fenomeno, ancora in studio, potrebbe essere assimilato ad un effetto di onda guidata nel foro che produce una variazione della velocità misurata del 20-30%.

Per poter studiare il fenomeno ed avvalorare le ipotesi fatte si è quindi proceduto ad una simulazione sintetica del fenomeno stesso, immaginando l'acquisizione VRP con la trasmittente in superficie e la ricevente inserita in un pozzo senza aria e con effetto dell'aria (Fig. 3.2).

La distanza del fronte d'onda nel pozzo con l'aria (Fig. 3.2(b)), simulata con l'acquisizione fittizia, mette in evidenza il fenomeno ipotizzato, ossia una variazione di velocità legata alla presenza del pozzo. Queste considerazioni, pur non facendo parte del presente lavoro di tesi, aiutano a capire il problema riscontrato e a motivare le scelte fatte in fase di elaborazione dei dati.

Allo stato attuale è evidente che il fenomeno, che provoca quindi una distorsione del segnale, è probabilmente causato da un insieme di fattori: i due principali sono la geometria di acquisizione e la presenza del foro stesso.

Il problema merita maggiori approfondimenti, essendo la causa di errori in grado di inficiare le misurazioni effettuate. E' quindi auspicabile la realizzazione di indagini più approfondite, mirate a comprenderne le cause, in modo da poter aver a disposizione gli strumenti adatti per la sua risoluzione. Tuttavia questo esula dallo scopo del seguente lavoro di tesi.

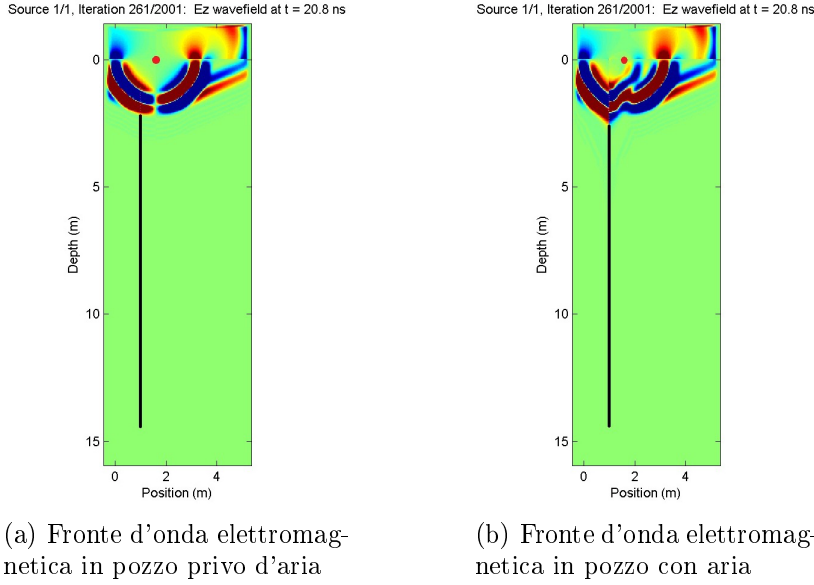


Fig. 3.2: Risultati della simulazione sintetica dell'acquisizione VRP

3.4 Possibile approccio al problema di acquisizione dei dati

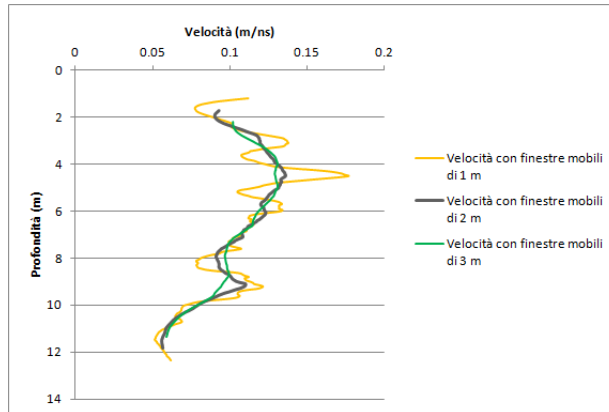


Fig. 3.3: Confronto tra velocità GPR ottenute applicando una regressione lineare con finestre mobili di ampiezza diversa.

Nonostante le poche informazioni riguardanti le cause del problema descritto nel paragrafo 3.3, è qui proposto un possibile approccio matematico da utilizzare nell'elaborazione dei dati VRP.

Per il calcolo delle velocità è stata applicata una regressione lineare con finestra mobile di ampiezza 2 m., scelta fatta sulla base di diversi test con

differenti finestre (Fig. 3.3). Nel caso di finestra mobile con ampiezza di 1 m i dati ottenuti presentano troppo rumore, mentre nel caso di finestra mobile con ampiezza 3 m si può osservare una perdita in risoluzione. Si è ritenuto quindi adatto l'utilizzo di una finestra mobile con ampiezza di 2 m.

Capitolo 4

Confronto tra dati

L'analisi dei risultati dei dati ZOP e VRP può avvenire sia in termini di confronto delle velocità che in termini di confronto di contenuto idrico stimato. Di seguito verranno riportati i risultati di questi confronti per i dati VRP e i dati ZOP acquisiti nel Central hole e nel Western hole ed il confronto tra i dati acquisiti in time-lapse nel BB hole.

4.1 Confronto tra VRP e ZOP tra Central Borehole e Western Borehole

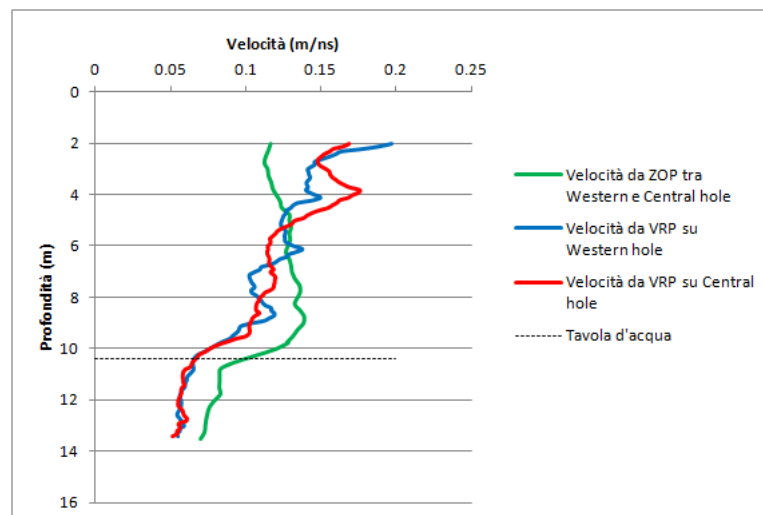


Fig. 4.1: Confronto tra le curve di velocità radar da ZOP e VRP nei pozzi C e W.

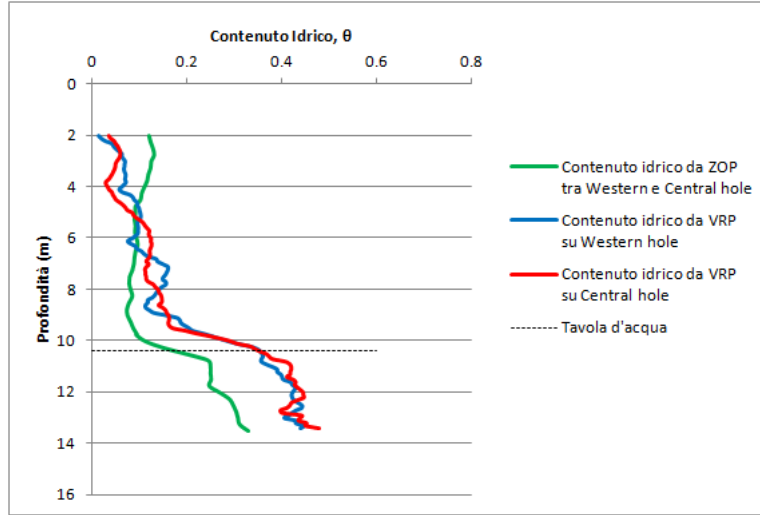


Fig. 4.2: Confronto tra le curve di contenuto idrico da ZOP e VRP nei pozzi C e W.

Dall'analisi delle curve delle velocità ottenute dalle misure VRP nel Central hole e nel Western hole, riportate in Fig. 4.1, emerge come nella parte più superficiale (tra 2 e 4 m di profondità), il segnale sembri viaggiare più velocemente rispetto alla curva relativa alle misure ZOP tra gli stessi pozzi.

Fino alla profondità di 4 m le due curve VRP hanno un andamento simile, anche se, come si osserva sino a circa 10 m di profondità, esiste una sorta di distorsione del segnale che sposta i relativi picchi di velocità lungo la verticale. Questo sfasamento non può essere dovuto a naturali variazioni di contenuto idrico θ (e quindi di velocità v) o variazioni litologiche, dal momento che l'interdistanza tra i due pozzi è pari a 3,95 m, quanto piuttosto a problemi riconducibili alla modalità di acquisizione.

Raggiunta la profondità della tavola d'acqua, quindi in corrispondenza di una forte variazione del contenuto idrico θ , le due curve si sovrappongono, diventando concordi in tutti i punti. Le differenze marcate riscontrate tra i due VRP, su due pozzi molto vicini, nonostante sia stata effettuata una correzione sulle velocità misurate, permettono di evidenziare come i problemi, non ancora risolti e legati a questa modalità di acquisizione, possano produrre dati sui quali non sia garantita la corretta misura delle velocità, che si traduce in una potenziale sottostima nel contenuto idrico.

Questo fatto risulta poi più chiaro se si passa al confronto con la curva ZOP (Fig. 4.1). Anzitutto, nel caso in esame esiste una discrepanza tra gli step di

acquisizione VRP e ZOP che vanno a discapito del dettaglio della curva ZOP (tracce ogni 25 cm), che appare più smussata rispetto alla curva VRP (tracce ogni 10 cm).

Tuttavia al di là del dettaglio della curva, sicuramente esiste una forte discrepanza nell'andamento delle tre curve, almeno per i primi 6 m di profondità rispetto al piano campagna: le curve VRP stimano velocità decisamente maggiori in questa porzione di suolo. Le variazioni marcate di velocità e conseguentemente di contenuto idrico tra 2 m e 4 m potrebbero altresì essere riconducibili a variazioni litologiche, ma non avendo a disposizione informazioni sulla stratigrafia dei pozzi non è possibile in questa sede ottenere un riscontro.

E' pertanto chiaro che in questo caso, per motivi legati ai parametri scelti ed alla geometria di acquisizione, le due modalità GPR non permettono un confronto che possa fornire informazioni univoche sul mezzo investigato.

4.2 Confronto tra VRP del 2003, 2004 e 2011

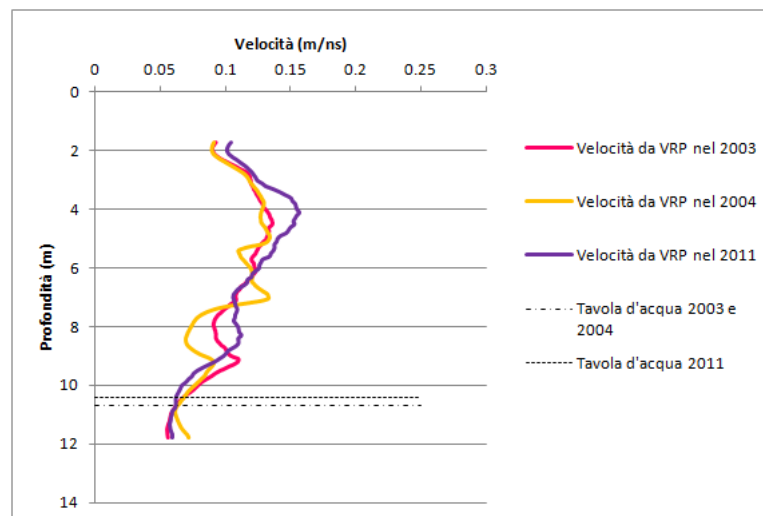


Fig. 4.3: Confronto tra le curve di velocità da VRP acquisiti nel pozzo BB nel 2003, 2004 e 2011

Le curve rappresentate in Fig. 4.3 e Fig. 4.4 descrivono rispettivamente le variazioni di velocità e di contenuto idrico misurate con la modalità VRP nel 2003, 2004 e nel 2011 nel BB hole.

Tutte le curve mostrano un andamento chiaramente simile e mostrano buona coerenza nei primi 6 m di profondità e nell'individuazione della tavola

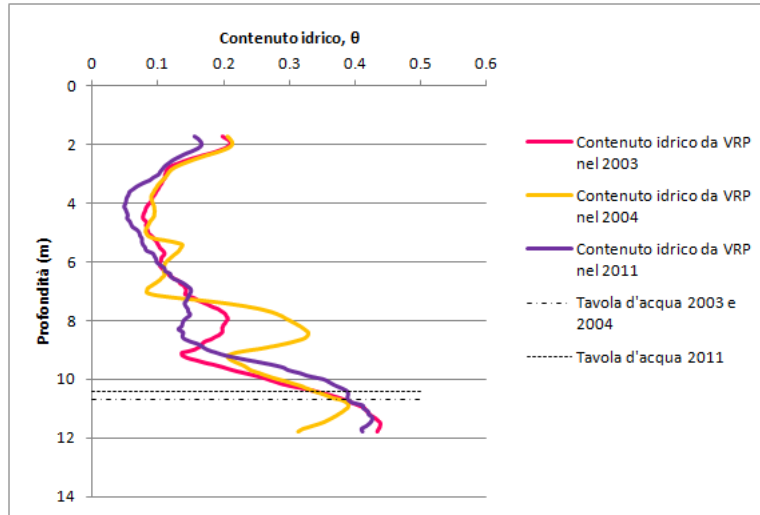


Fig. 4.4: Confronto tra le curve di contenuto idrico da VRP acquisiti nel pozzo BB nel 2003, 2004 e 2011

d'acqua. Sicuramente la curva relativa all'acquisizione del 2004 mostra più rumore e minore coerenza con le altre curve, soprattutto tra 6 m e 7 m di profondità (Fig. 4.3).

Tuttavia è interessante notare come la diminuzione di velocità, misurata tra 7 m e 9 m nel 2003 e nel 2004, veda una brusca variazione nel 2011. Questa variazione così marcata, poco al di sopra della tavola d'acqua, potrebbe essere correlabile ad una significativa variazione avvenuta nel corso degli anni, forse in relazione alla migrazione dell'olio nel suolo in seguito all'esplosione del pozzo.

In virtù di quanto precedentemente discusso per il confronto dei dati VRP sugli altri due pozzi (Fig. 4.1 e Fig. 4.2) resta aperta la questione sulla attendibilità oggettiva dei dati VRP.

Capitolo 5

Conclusioni

Gli strumenti messi a disposizione dalla geofisica applicata sono in generale particolarmente utili nello studio di aree contaminate, soprattutto nel lavoro di monitoraggio e per la bonifica. Nel presente lavoro di tesi sono stati messi in evidenza pregi e difetti di due tecniche GPR da foro, ZOP e VRP, applicate su un sito contaminato.

Per quanto riguarda il confronto tra VRP e ZOP è soprattutto emerso come il dato VRP sia soggetto a distorsioni generate probabilmente dalla geometria di acquisizione che si traducono in una sovrastima delle velocità nei mezzi. Per risolvere il problema si è tentato un approccio matematico per ridurre gli effetti di questa distorsione ed i risultati raggiunti sono decisamente buoni, ma non completamente risolutivi. Sicuramente per il futuro sarà necessario programmare questo genere di acquisizioni prestando particolare attenzione soprattutto alla geometria di acquisizione. Allo stato attuale, si può affermare che le misure VRP e ZOP, per quanto valutato nel presente lavoro, non consentono di ottenere informazioni univoche.

Per quanto riguarda invece le misure VRP in time-lapse, acquisite su uno stesso foro ed analizzate in questa sede, nonostante rimanga il problema dell'incertezza sulla stima delle velocità rilevate, il dato ha permesso una buona lettura delle dinamiche del sistema nel tempo. In conclusione si può affermare che le due tecniche GPR analizzate in questo lavoro di tesi sono potenzialmente in grado di fornire importanti informazioni indirette, non invasive e relativamente veloci su un sistema inquinato e sulle dinamiche nello stesso al variare del tempo. Il loro impiego è quindi auspicabile in un programma di monitoraggio e bonifica di siti inquinati.

I risultati ottenuti in questo lavoro possono inoltre essere considerati come

punto di partenza per pianificare e valutare con più attenzione l'acquisizione dei dati VRP, potenzialmente molto importanti nello studio dei siti in cui si abbia a disposizione un unico pozzo.

Ringraziamenti

Il primo sincero ringraziamento va alla Dott. Ing. Rita Deiana, che non solo mi ha permesso di ampliare le mie, seppur ancora molto limitate, conoscenze della geofisica applicata, ma che mi ha anche seguita con pazienza, simpatia, serietà e disponibilità, doti molto apprezzate in un relatore.

Un doveroso ringraziamento va al Prof. Giorgio Cassiani e al Dott. Matteo Rossi per i risultati relativi alle simulazioni sintetiche presentate nel presente lavoro di tesi.

Come non dimenticare poi i miei amici, sia quelli di vecchia data che quelli conosciuti in questi quattro anni di Università. I primi mi hanno sopportata anche troppo, tra serate “perse” a causa dello studio e supporto morale nei momenti difficili (ma sempre pronti a festeggiare!). Tra gli amici padovani, invece, un sentito grazie lo rivolgo sia ai miei compagni quasi geologi, con i quali ho condiviso un sacco di avventure (nel vero senso della parola!), sia ai miei ex-compagni del Corso di Laurea di Ingegneria Chimica, i quali mi hanno aiutata a capire che il mio futuro non sarebbe stato in un’industria a produrre acido solforico...

Infine, *last but not least*, il ringraziamento più grande va alla mia famiglia, che in questi anni mi ha aiutata economicamente, fisicamente e moralmente, senza la quale probabilmente non sarei arrivata dove sono ora.

Bibliografia

- [1] Bulf A., *Metodi non invasivi per l'identificaizone di contaminanti nel sottosuolo: misure di polarizzazione indotta con verifica in laboratorio*. Tesi di Laurea Magistrale, A.A. 2009/2010;
- [2] Cassiani G., Strobbia C. e Gallotti L., *Vertical Radar Profiles for the Characterization of Deep Vadose Zones*. Vadose Zone Journal, Nov 2004; 3: 1093 - 1105;
- [3] Ciarmiello A. e Del Pero G., *Studio di carattere geologico del territorio del Parco del Ticino con particolari riferimenti alla geologia, idrogeologia e paleogeografia della valle*. Ente di gestione del Parco Naturale della Valle del Ticino, 1999;
- [4] Deiana R., *Materiale fornito durante le lezioni frontali*. Anno Accademico 2010/2011;
- [5] Gerlitz K. et al., *Processing ground penetrating radar data to improve resolution on near-surface targets*. In Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP'93), San Diego, CA. EEGS, Denver, CO.;
- [6] Reynolds J.M. et. al., *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley and Sons Ltd. 2003;
- [7] Voigt H.J., Lange G. , Knödel K., *Environmental Geology: handbook of field methods and case studies*. Springer, 2007.