Politecnico di Bari

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in "Ingegneria dei Sistemi Edilizi"

Dipartimento di Architettura ed Urbanistica

Tesi di Laurea in Topografia e Tecniche di Rilevamento

Accoppiamento del Metodo di Rilievo GPS di Precisione con Sondaggio del Sottosuolo e Relative Applicazioni

Coupling of Gps Precision Survey Method with Substratum Probing and Relatives Applications

Relatore
Professor Francesco Mancini
Co-Relatore
Ingegner Claudia Ceppi

Laureando
Luigi Mele
Matricola 547852

Anno Accademico 2011 - 2012

ai Ricercatori Italiani,
una speranza per il futuro

INDICE

PREMESSA.....7

Capitolo 1 Il GPS: Funzionamento, Modalità di posizionamento, Precisione e Limiti.....10

1.1 Nascita del NAVSTAR GPS.....12

1.2 Funzionamento del GPS.....13

1.2.1 Segmento Spaziale.....13

1.2.2 Segmento di Controllo.....18

1.2.3 Segmento di Utilizzo.....21

1.2.4 Il Segnale GPS.....23

1.3 Modalità di Posizionamento.....26

1.3.1 Posizionamento Assoluto.....27

1.3.2 Posizionamento Differenziale.....35

1.3.3 Posizionamento Relativo.....38

1.4 Precisione e Limiti.....43

1.4.1 Errori Accidentali di Misura.....44

1.4.2 Errori Sistematici o di Modello.....44

1.4.3 Errori Vari di Osservazione.....48

Capitolo 2 Metodi Indiretti di Indagine Geofisica, La Geoelettrica e Il GPR: Teoria, Potenzialità ed Utilizzi.....51

2.1 Metodi Indiretti di Indagine Geofisica.....53

2.1.1 Metodo Gravimetrico.....53

2.1.2 Metodo Magnetometrico.....57

2.1.3 Metodo Sismico a Riflessione e Rifrazione.....63

2.2 Metodo Geoelettrico.....69

2.2.1 Teoria.....70

2.2.2 Disposizione Strumentale al Suolo.....71

2.2.3 Risultati di una Indagine Geoelettrica.....74

2.3 Il Ground Probing Radar.....76

2.3.1 Nascita del GPR.....78

2.2.2 Funzionamento del Georadar.....79

Capitolo 3 Precedenti Tentativi di Accoppiamento di Prospezioni Geofisiche / GPS: Risultati e Problematiche.....95

3.1 GPR e GPS Data Integration: Esempio di Applicazione in Antartide.....97

3.1.1 GPR and GPS Data Integration for Glaceological Purposes. 99

3.1.2 Integrazione GPR / GPS per la Stratigrafia delle Nevi.....100

3.1.3 Conclusioni per la Campagna Antartica.....102

3.2 Use of GPR and GPS for Road Inspection.....103

3.2.1 Strumentazione e Metodologia Utilizzata.....104

3.2.2 Risultati.....105
3.2.3 Conclusioni.....108
3.3 Remote Sensing in Archeologia.....109
3.3.1 Acquisizione ed Elaborazione Dati.....110
3.3.2 Magnetometria e Misure GPS.....112
3.3.3 Risultati e Conclusioni.....115
3.4 Prospezioni Geofisiche a Montearatro (FG).....116
3.4.1 Panoramica sulla Prospezione.....116
3.4.1 Conclusioni sulla Campagna a Montearatro.....120
3.5 Misure GPR e Geoelettriche in ambiente costiero.....121
3.5.1 Misura GPR.....121
3.5.2 Indagine Geoelettrica.....124
3.6 Monitoraggio Integrato su una Discarica.....126
3.6.1 Evoluzione dell'Indagine.....127
3.6.2 Conclusioni.....130
3.7 Indagini Geoelettriche sui Fiumi.....130
3.7.1 Indagine Archeologica sul fiume Arno.....132
3.7.2 Riscontri.....132
3.8 Precauzioni per le Future Campagne di Indagine.....134

Capitolo 4 Utilizzo delle Prospezioni Geofisiche e del GPS nello studio delle dinamiche della Città di Tuzla (Bosnia Erzegovina).....136

4.1 Generalità sulla città di Tuzla.....138
4.1.1 I Sinkholes caratteristici e la differenza con il caso Tuzla…140
4.1.2 Dati Tecnici Storici.....144

4.2 Istituzione della Rete GPS e della Nuove Linee di Livellazione. 147

4.2.1 Specifiche sulla Rete GPS.....148

4.2.2 Dati di Livellazione.....150

4.3 La Geoelettrica nel caso di Tuzla.....156

4.3.1 Strumentazione Utilizzata e Dati Ottenuti.....157

4.3.2 Interpretazione dei Grafici.....160

4.4 Deduzioni Scaturite dalle Analisi Effettuate.....168

Capitolo 5 Elaborazione Tridimensionale in Ambiente GIS ed integrazione dei nuovi Dati.....171

5.1 Ambiente GIS in Global Mapper.....173

5.1.1 Creazione del Global Mapper Workspace.....173

5.1.2 Modifica delle Tomografie in Photoshop.....178

5.2 Interpretazione Stratigrafica.....182

CONCLUSIONI.....188

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....191

RINGRAZIAMENTI.....195

PREMESSA

Sin dai tempi degli antichi egizi e romani, si è presentata la necessità di misurare e rilevare il terreno interessato dai processi di antropizzazione ed immediatamente limitrofi. Dal XVII secolo si iniziò ad effettuare rilievi e rappresentazioni cartografiche di una certa precisione, con l'adozione di strumenti che portarono alla definizione del teodolite prima, e della stazione totale poi.

Il termine Topografia deriva dal greco topos, luogo e graphein, scrivere, e consiste nell'insieme di procedure teoriche ed operative finalizzate al rilievo di aree di limitata estensione e di oggetti. Tali rilievi vanno quindi riportati ad una opportuna superficie di riferimento, la terra, la cui forma è oggetto di studio nella disciplina della Geodesia.

L'evoluzione della precisione della determinazione delle superfici di riferimento e nel rilievo fisico, ha permesso l'esportazione della rappresentazione in ambito informatico, trasformando la cartografia generica in cartografia digitale, permettendo di accorpare ad essa una maggiore quantità di informazioni, non strettamente legate alla riproduzione grafica, ed originando il Sistema Informativo Territoriale, o S.I.T.

Sul finire degli anni '60 il dipartimento della difesa statunitense iniziò a sviluppare il sistema NAVSTAR GPS che consentiva l'individuazione in tempo reale, tramite triangolamento satellitare, della posizione tridimensionale su di una superficie di riferimento con accuratezza di decine di metri. Ovviamente il sistema è stato notevolmente implementato negli anni, fondendosi con altri tipologie di navigazione satellitare e integrando un numero sempre maggiore di satelliti.

Attualmente è possibile ottenere una precisione variabile tra i 2 ed i 5 millimetri su scala entro i 1000 km di raggio.

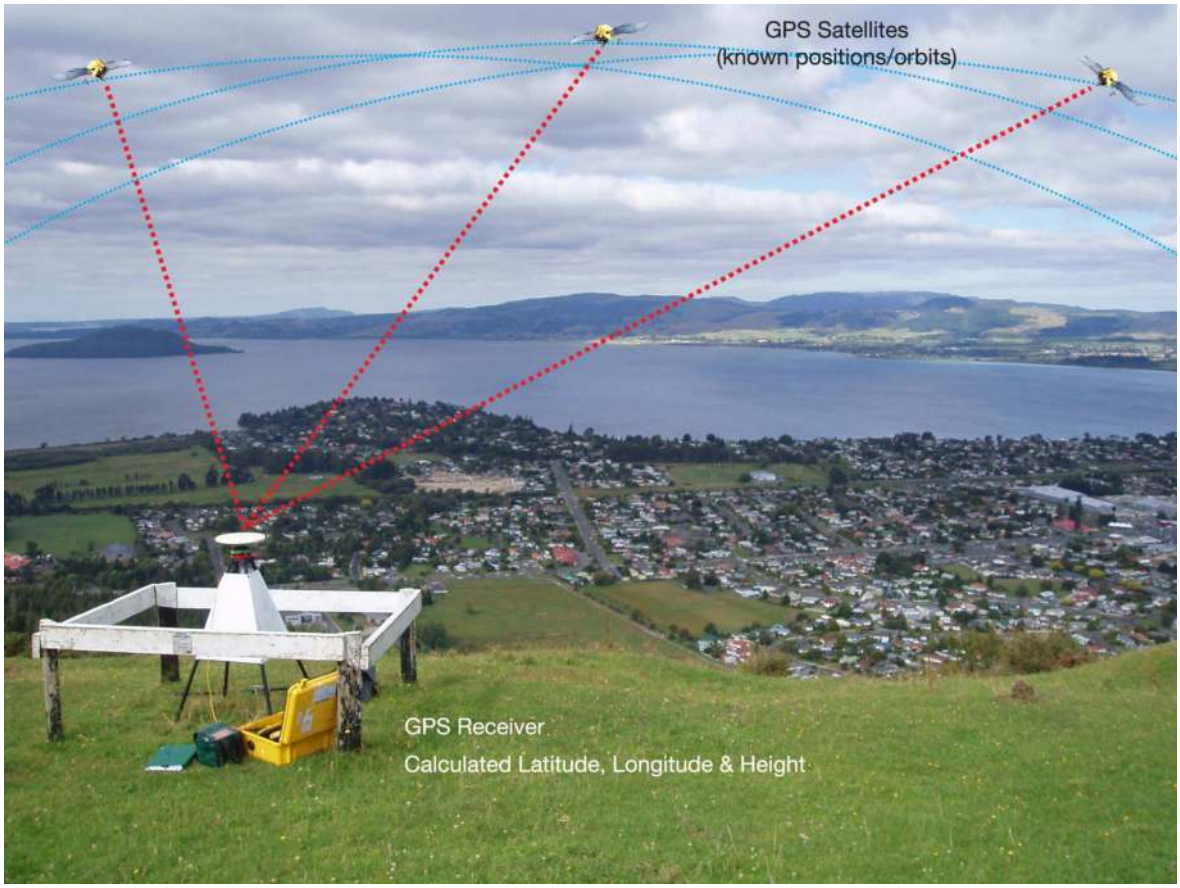


Illustrazione 1: Esempio di Posizionamento GPS

Nel corso dello studio di tesi verranno illustrate, nel dettaglio, le prospezioni geofisiche di cui attualmente si fa largo uso come strumenti atti a sondare le caratteristiche interne dei materiali costituenti il sottosuolo ed i substrati.

Tenteremo di dimostrare che l'utilizzo congiunto delle informazioni di rilievo territoriale classico e delle prospezioni di profondità generano un prodotto finale di più semplice interpretazione e che si presta più agevolmente alla comprensione delle cause delle dinamiche di dissesto in atto per determinati ambiti di studio.

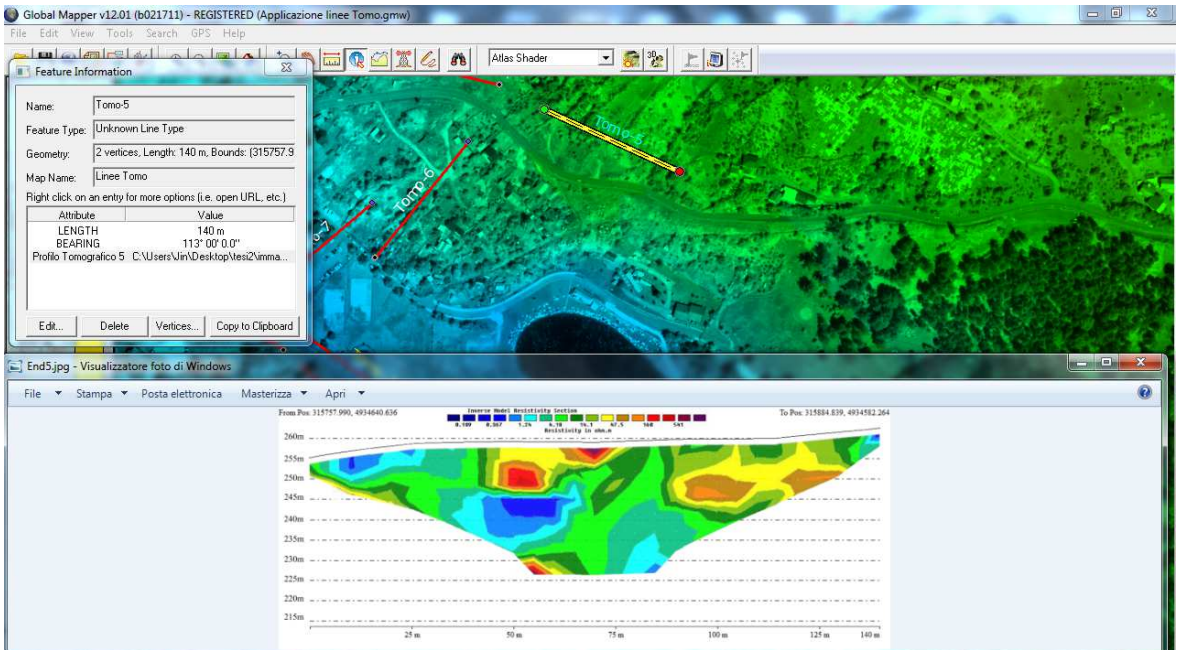


Illustrazione 2: Esempio di Prospezione Geoelettrica Georeferenziata in GIS

A tal fine verranno presi in esame i dati raccolti nell'ambito del *"Nato Science for Peace Programme"*, in merito al fenomeno di subsidenza riscontrato per il centro storico della città di Tuzla, in Bosnia Erzegovina, tentando di verificare se la metodologia di studio territoriale proposta possa fornire, in concreto, informazioni utili alla comprensione del fenomeno.

Capitolo 1

Il GPS: Funzionamento, Modalità di posizionamento, Precisione e Limiti

Conoscere profondamente la teoria che sita alla base del rilevamento è una tappa tanto necessaria quanto interessante, alcuni semplici aneddoti sulla realizzazione e le essenziali diversità da un rilievo classico saranno oggetto di descrizione nella seguente parte del trattato.

In questo capitolo mi impegnerò a descrivere nel dettaglio cosa sia in realtà il rilievo tramite strumentazione GPS, cosa c'è alla base della determinazione del risultato di posizionamento, come avviene il posizionamento e quali errori possono influire sulla accuratezza del risultato.

Vedremo quali siano le potenzialità in base ai vari metodi e strumenti adoperabili e quali siano i fattori limitanti che influiscono sulla praticità dell'utilizzo d'alta precisione.

Il sistema di posizionamento GPS continua ad essere oggetto di modifiche e miglioramenti secondo un programma di modernizzazione che, nei prossimi anni, porterà all'introduzione di nuovi segnali portanti in grado di garantire precisioni d'alto livello anche per utilizzi civili.

1.1 Nascita del NAVSTAR GPS

Il dipartimento della difesa degli Stati Uniti D'America, a seguito del successo ottenuto dal sistema “Transit” sviluppato per la marina militare, una flotta di satelliti lanciata in orbita a partire dal 1960 con lo scopo di referenziare in mare aperto ed in tempo reale la posizione di navi e sommergibili americane, decise, sul finire degli anni '60 del secolo scorso, di sviluppare e migliorare la tecnologia di posizionamento satellitare in tempo reale su scala globale.

Lo studio portò alla realizzazione del sistema NAVSTAR GPS, acronimo di Navigation Satellite Timing and Ranging for Global Positioning System, ossia Allineamento e Cronometraggio della Navigazione Satellitare per il Sistema di Posizionamento Globale; successivamente ridotto per brevità a GPS.

Il NAVSTAR GPS nacque con lo scopo di consentire la determinazione della posizione con accuratezze nell'ordine delle decine di metri.

1.2 Funzionamento del GPS

Di seguito verrà illustrato nel dettaglio come è costituito il sistema GPS. Verrà spiegato quale sia il tipo di segnale utilizzato in questo tipo di rilievo ed i relativi metodi di posizionamento.

Il GPS è suddiviso in tre parti: il segmento spaziale, il segmento di controllo ed il segmento di utilizzo. Le seguenti informazioni sono reperibili dal sito governativo www.gps.gov.

1.2.1 Segmento Spaziale

Per funzionare, il sistema di posizionamento globale inizialmente prevedeva una costellazione di 24 satelliti orbitanti secondo sei piani orbitali, inclinati di 55° rispetto al piano equatoriale e sfasati longitudinalmente di 60°, seguendo traiettorie denominate medium earth orbit, orbite terrestri medie quasi circolari, ad una quota di circa 20.200 km. Su ogni traiettoria sono dislocati 4 satelliti che orbitano secondo un periodo di 11 ore 58 minuti e 2 secondi, ossia metà della durata del giorno siderale. Tale considerazione permette al generico utente di poter utilizzare un numero variabile tra i 4 e gli 8 satelliti contemporaneamente e la rivoluzione dei satelliti consente inoltre di poter osservare la medesima configurazione satellitare circa ogni 23 ore 56 minuti e 4 secondi. Nei recenti anni passati, la Forza Aerea Statunitense ha tenuto in volo ed operativi 31 satelliti GPS, ed altri 3-4 in satelliti in orbita chiamati residuali in quanto non attivi ma con la possibilità di essere riattivati all'occorrenza.

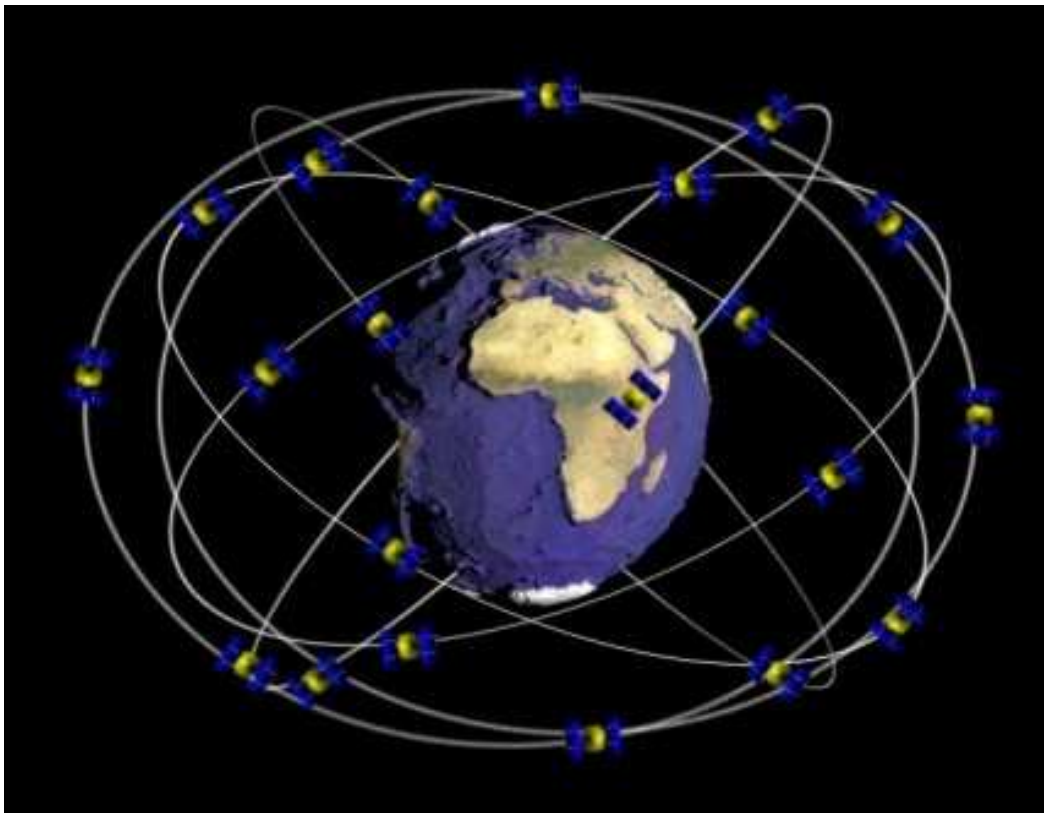


Illustrazione 3: Costellazione Satellitare GPS

In sostanza, un satellite GPS trasmette segnali codificati verso gli utenti, purché dotati di strumentazione adeguata alla ricezione, con una temporizzazione molto accurata dal quale dipende la qualità del posizionamento ottenuto.

Per poter assolvere tali funzioni, i satelliti GPS sono forniti di oscillatori atomici basati su diversi elementi per determinare il tempo nel modo più accurato possibile, apparati di ricezione e trasmissione dati, memorie, unità di calcolo, sistema di auto-alimentazione a pannelli solari e apparato di navigazione a propulsione per correggere periodicamente la traiettoria.

Ogni satellite trasmette segnali di navigazione in modulazione di fase su due frequenze portanti chiamate L1 ed L2, entrambe multiple della frequenza fondamentale degli oscillatori atomici f_0 (pari a 10,23 Mhz). Viene trasmesso , inoltre, un segnale a bassa frequenza contenente informazioni riguardo alla posizione del satellite stesso, queste informazioni prendono il nome di effemeridi (dal greco ἐφημερίς = efemeris che significa giornaliero) nome adottato per indicare tabelle contenenti valori calcolati, nel corso di un particolare intervallo di tempo, di diverse grandezze astronomiche variabili.

I satelliti GPS sinora utilizzati sono divisi in 6 classi chiamate rispettivamente Blocco I, Blocco II, Blocco IIA (Advanced), Blocco IIR (Replacement), Blocco IIR-M (Improved), Blocco IIF (Follow-On), Blocco III.

Le prime due generazioni di satelliti sono state rimpiazzate dalle successive ed il Blocco III attualmente in fase di realizzazione dalla Lockheed Martin verrà lanciato a partire dal 2014. I satelliti della serie GPS III saranno in grado di potenziare il segnale in campo di accuratezza e integrità, avranno una vita utile di 15 anni, le lunghezze dei segmenti di codice avranno una successione ridotta rispetto alla norma e sarà previsto il loro impiego per la Distress Alerting Satellite System (DASS), Sistema Satellitare di Allerta per la ricerca e salvataggio.

Attualmente Orbitanti attorno alla terra ci sono 10 satelliti del Blocco IIA, 12 satelliti del Blocco IIR, Sette Satelliti del Blocco IIR-M e Due satelliti del Blocco IIF (Aggiornamento al 24 maggio 2010) per un totale di 31 satelliti su un massimo gestibile da terra di 32.

Dettagli al riguardo dei satelliti in orbita:

Blocco IIA: vennero lanciati 19 satelliti di questo tipo tra il 1990 ed il 1997 e rappresentano un ulteriore sviluppo di satelliti Block II dall'originale. Essi sono stati in grado di operare in modalità degradata per il comparto civile. Sono dotati di due orologi atomici al cesio e due orologi al rubidio. Hanno segnato, nel 1993, l'inizio della fase operativa del GPS. Al 2010 erano attivi 10 satelliti della generazione IIA;

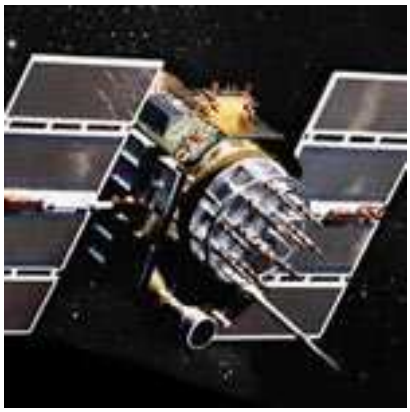


Illustrazione 4: Satellite Blocco IIA

Blocco IIR: i satelliti Bloco IIR sono dotati di maggiore autonomia, costruiti dalla Lockheed Martin Corporation e messi in orbita tra il 1997 e il 2009, possono scambiarsi messaggi senza nessun contatto con la Terra, consentendo agli operatori di sistema di comunicare con i satelliti che non sono accessibili in comunicazione diretta. Sono dotati di tre orologi atomici al rubidio. Ventuno dei satelliti di questo blocco sono stati lanciati il 17 agosto 2009 e venti sono ancora attivi. Gli ultimi otto sono nominati con l'acronimo IIR-M perché emettono un nuovo codice (L2C) per uso civile e un nuovo codice

militare (M). Il satellite IIR-M7 ha portato a bordo un emettitore sperimentale in grado di trasmettere sulla frequenza di 1176,45 MHz, chiamata L5, che sarà adottata dai satelliti del Blocco F. I segnali L1 ed L2 saranno inutilizzabili a causa di interferenze tra questi segnali ed il segnale L5;

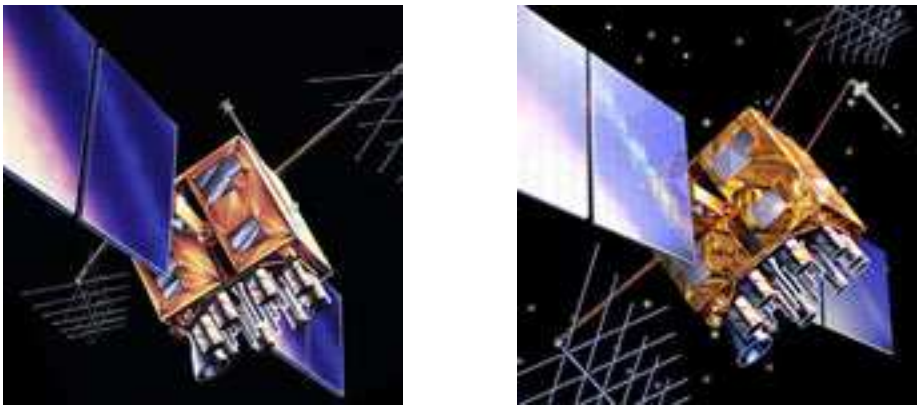


Illustrazione 5: Satelliti Blocco IIR e Blocco IIR-M

Blocco IIF: i satelliti del blocco IIF (Follow-On) sono costruiti dalla Boeing e ne sono previsti 12 esemplari. Il primo della serie è stato lanciato nel maggio 2010 ed il lancio di altri satelliti verrà effettuato gradualmente fino al 2014. Il programma si prefigge di raggiungere una costellazione di 33 satelliti in totale. Il prossimo lancio è previsto per il 28/9/2012 alle 9:24 GPS IIF-3.

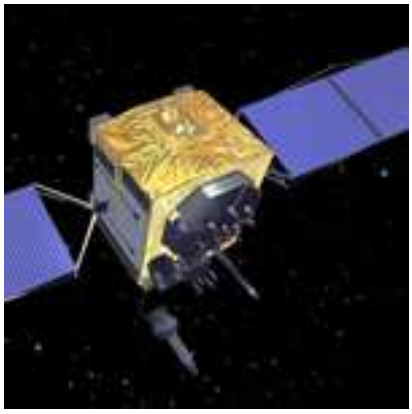


Illustrazione 6: Satelliti Blocco IIF

1.2.2 Segmento di Controllo

Il Segmento di Controllo GPS consiste in una rete globale di strutture di terra che tracciano i satelliti GPS, ne monitorano le trasmissioni, sviluppano analisi ed inviano dati ed ordini alla costellazione.

L'attuale segmento di controllo operativo include una Master Control Station, una Master Control Station Alternativa, dodici antenne di comando e controllo e sedici siti di monitoraggio.

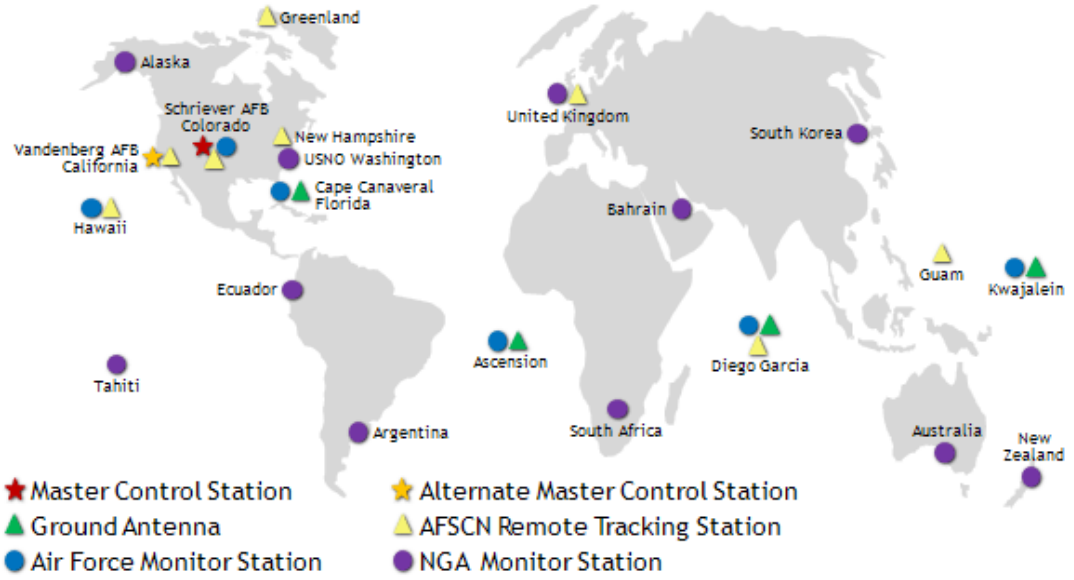


Illustrazione 7: Segmento di Controllo

La Master Control Station, sita in Colorado Springs, ha il compito di raccogliere tutti i dati ricevuti dalle altre stazioni minori, elaborarli e determinare le effemeridi ed altri parametri relativi al segmento spaziale mentre le altre stazioni ricevono i dati rielaborati e li inviano nuovamente ai satelliti. Nella MCS lavora, 24 ore al giorno e 7 giorni a settimana, il corpo dei 2SOPS (The 2nd Space Operations Squadron at Schriever) della forza aerea statunitense, la squadra è responsabile del controllo ed elaborazione dati e garantisce il funzionamento del GPS per scopi civili e militari al contempo.

La MCS monitora i messaggi di navigazione e l'integrità del sistema, rendendo possibile al 2SOPS conoscere lo stato di salute della costellazione. In caso di anomalie o eventi inusuali, dalla MCS è possibile riconfigurare l'intera costellazione per mantenere una condizione ottimale del segnale.
In merito alle effemeridi, la rielaborazione avviene su base dei dati raccolti nell'ultima settimana, effettuando una stima della traiettoria che i satelliti seguiranno nella settimana successiva con una precisione associata di 50 metri circa. Le effemeridi ricalcolate prendono il nome di effemeridi di riferimento, queste vengono confrontate e corrette con i dati raccolti nelle ultime 12-24 ottenendo le *"Effemeridi Predette"(Broadcast Ephemerides).*
Le Effemeridi Predette vengono inviate al satellite che le rigirerà all'utente dotato di adeguata strumentazione, così che possa determinare la distanza stazione-satellite con una precisione che ah ordine di 1 metro per la componente radiale (stazione-satellite), 7 metri per la componente tangente (direzione orbitante del satellite) e 3 metri per la componente normale (direzione normale alle due precedenti). E' inoltre possibile richiedere, con un ritardo di 3-5 giorni, le *Effemeridi Precise* dei satelliti che ci riguardano per poter affinare ulteriormente il posizionamento effettuato.

Come parte del programma di modernizzazione del GPS, la Forza Aerea ha continuamente aggiornato il segmento di controllo negli ultimi anni.
La *"Legacy Accuracy Improvement Initiative (L-AII)"*, Iniziativa per il Miglioramento della Accuratezza Ereditaria, completata nel 2008, estese il numero di stazioni di monitoraggio operative da 6 a 16, triplicando la quantità di dati collezionati riguardanti le orbite GPS, ottenendo un miglioramento dell'accuratezza delle informazioni Broadcast variabile tra il 10% e il 15% .

Gli ulteriori dieci siti di monitoraggio sono sotto il controllo della National Geospatial-Intelligence Agency (NGA).

Nel settembre 2007, la Forza Aerea aggiornò l'originale Master Control Station con una di nuova realizzazione con la più recente tecnologia disponibile. Il Piano per l'Evoluzione Architettonica (Architecture Evolution Plan, AEP) rimpiazzò i computer mainframe obsoleti con elaboratori nuovi che migliorarono la flessibilità e la reattività delle operazioni GPS. Questa operazione di aggiornamento terminò nell'Aprile 2011 con la dichiarazione di completa operatività.

Il Sistema Operazionale di Controllo di Prossima Generazione (Next Generation Operational Control System, OCX) è un programma avviatosi nel 2008. Il Sistema aggiungerà molte altre capacità all'attuale segmento di controllo GPS, includendo l'abilità di controllare pienamente i nuovi tipi di segnali studiati ad uso civile (L2C, L5 e L1C).

Illustrazione 8: Programma di Modernizzazione GPS

L'OCX verrà consegnato per blocchi, il primo dei quali rimpiazzerà l'esistente segmento di comando e controllo per supportare le operazioni di missione dei primi satelliti GPS III. L'entrata in servizio del Blocco 1 OCX è in programma per il 2016, e controllerà il segnale di tipo L2C. Con il Blocco 2 saranno introdotti i controlli anche per gli altri due segnali. Il Blocco 3 aggiungerà ulteriori funzioni ancora in fase di sviluppo.

1.2.3 Segmento di Utilizzo

Il segmento di utilizzo consiste in un equipaggiamento di ricezione GPS, che riceva il segnale satellitare ed adoperi l'informazione trasmessa per calcolare la posizione tridimensionale dell'utente ed il tempo. Tale operazione può essere effettuata in tempo reale, sfruttando le effemeridi broadcast, o in un secondo momento, tramite procedimenti differenziali con effemeridi precise. Naturalmente, la precisione ottenibile è notevolmente influenzata dalle caratteristiche di base della strumentazione ricevente utilizzata.

Illustrazione 9: Ricevitore GPS1200 Leica

Come internet, il GPS è divenuto un elemento essenziale tra le infrastrutture globali d'informazione. La gratuità e apertura del GPS ha fatto si che si sviluppassero centinaia di applicazioni che influiscono su ogni aspetto della vita moderna. Basti pensare che questa tecnologia è ormai implementata ovunque dai cellulari ai bulldozer da cantiere ai containers.

Il GPS accelera la produttività riducendo notevolmente le spese, includendo i settori agricoli, delle costruzioni, minerari, controllo, consegna spedizioni e supporti logistici. Grandi reti di comunicazione, sistemi bancarie e mercati finanziari dipendono fortemente dalle precise sincronizzazione del tempo GPS, alcuni tipi di servizi wireless non potrebbero operare senza di esso.

Il GPS salva vite prevenendo incidenti di trasporto, aiutando nelle operazioni di ricerca ed il salvataggio e accelerando la consegna di servizi d'emergenza. Il GPS risulta vitale per la prossima generazione del sistema di trasporto aereo che incrementerà la sicurezza di volo mentre accrescerà di fatto la capacità dello spazio aereo. E' anche utilizzato come arma scientifica per controllare le situazioni meteorologiche, per il monitoraggio dei terremoti e per la protezione dell'ambiente.
Infine, il GPS resta critico nel campo della sicurezza nazionale degli stati uniti e le sue applicazioni sono virtualmente in ogni settore delle operazioni militari.

1.2.4 Il segnale GPS

Come annunciato precedentemente, ogni satellite trasmette un segnale complesso derivante da una serie di elaborazioni effettuate sulla frequenza fondamentale dell'oscillatore atomico f_0.

Attualmente le componenti del segnale sono:

- Frequenze Portanti (Carrier), L1 e L2, due onde con frequenza rispettivamente pari a 154 f_0 e 120 f_0, di lunghezza d'onda 19 cm e 24 cm. La doppia frequenza è necessaria per abbattere il disturbo creato dall'attraversamento della ionosfera.
- Codici, C/A, P e W, sono codici pseudorandom, cioè una sequenza di stato +1 e -1 casuali che si ripetono dopo un certo intervallo di tempo. Il codice C/A (Coarse/Acquisition o Clear/Access) ha una sequenza che viene emessa con frequenza pari a 0,1 f_0 , si ripete ad intervalli di 10^{-3} secondi ed ha una lunghezza d'onda di 300 metri; ogni satellite è associato ad un codice C/A che permette di identificarlo. Il codice P (Precision o Protected) si ripete ogni settimana, ha una frequenza pari ad f_0, una lunghezza d'onda pari a 30 metri ed è un segnale maggiormente accurato. Tale segnale può essere ulteriormente criptato dal codice W, noto solo ad alcuni utenti abilitati, e viene emesso ad una frequenza di 0,2 f_0. Tale operazione, denominata *Anti-Spoofing,* genera un codice indicato con la lettera Y.
- Messaggio D, è un messaggio che informa l'utente dello stato di salute del satellite, della condizione dell'orologio e dell'orbita che il satellite segue tramite le effemeridi. Viene trasmesso con una frequenza di 50 Hertz.

Il segnale risulta quindi conformato nel seguente modo:

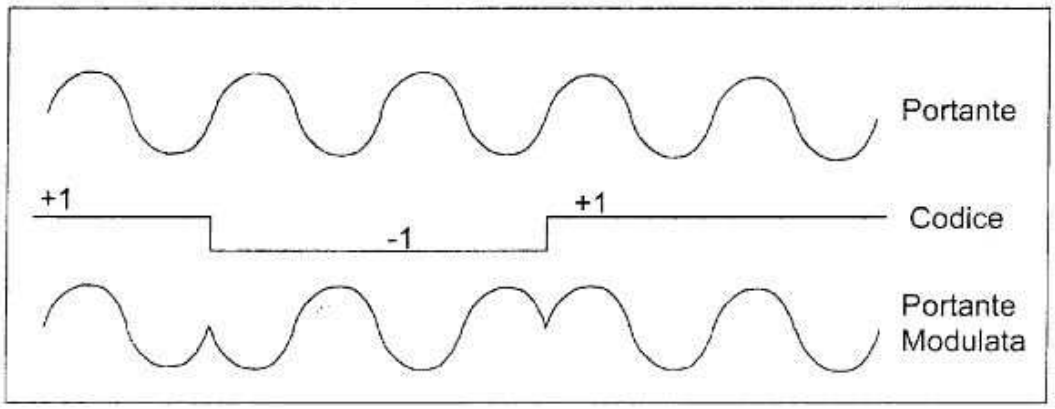
$L1(t)=a_1[C/A(t)]D(t)[sen(f_{L1}t+\phi_{L1})]+a_1[P(t)W(t)]D(t)[cos(f_{L1}t+\phi_{L1})]$

$L2(t)=a_2[P(t)W(t)]D(t)[cos(f_{L2}t+\phi_{L2})]$

Il codice C/A è modulato sulla frequenza L1 mentre il codice P è modulato su entrambe le portanti, ciò fa comprendere come ricevitori di fascia economica, che non riescano a rilevare il codice P, ottengano informazioni meno accurate che non ricevitori in grado di rilevare entrambe le tipologie di codice.

La modulazione dei codici sulle fasi viene operata dal satellite e poi inviata al ricevitore di terra che si propone di decodificare il segnale ed ottenere nuovamente fasi separate da utilizzare per il posizionamento.

La demodulazione confronta il segnale proveniente dal satellite ed una sua replica identica generata dal ricevitore, entrambi ancora criptati. I due segnali quindi vengono moltiplicati tra loro ottenendo coppie quadratiche di +1 e -1.



Modulazione della portante

Illustrazione 10: Schema di Modulazione

Se il ricevitore fosse perfettamente sincronizzato con il segnale in arrivo dal satellite, la sovrapposizione perfetta del segnale genererebbe una serie di +1, ossia si riesce ad identificare sia il segnale relativo allo specifico satellite che il codice applicato ad esso, rendendo possibile quindi la rimozione dei codici e riottenendo la fase originale.

Il codice in ingresso e la replica del ricevitore non possono essere sincronizzati istantaneamente in quanto il segnale, per percorrere la distanza dal satellite al ricevitore richiede un certo tempo, che chiameremo ritardo (time delay), inoltre risulta che tale ritardo del segnale sia dovuto anche all'errore di sincronizzazione degli orologi del ricevitore con gli oscillatori satellitari, offset degli orologi. Solo dopo una serie di confronti, è possibile ridurre gli errori ritrovando la massima correlazione tra i segnali. Conoscere il ritardo dovuto alla trasmissione del segnale significa conoscere la distanza satellite-ricevitore, che da adesso in poi chiameremo *range.* (Mancini, 2010)

1.3 Modalità di Posizionamento

In base alla metodologia scelta per operare, il GPS può fornire diversi livelli di precisione. Tutte le metodologie sfruttano un numero segnali satellitari superiore a 4, tale molteplicità permette al ricevitore di triangolare la posizione nel modo che illustreremo a breve.

Il segnale emesso dal satellite viene captato dall'antenna del ricevitore e demodulato, i dati vengono raccolti in una scheda di memoria e salvati come osservazione. Ogni satellite tracciato, viene identificato grazie al proprio codice PRN (pseudorandom noise) ed i suoi dati vengono archiviati su un canale di ricezione dedicato, ottenendo così *Codice* e *Fase* del satellite, che saranno la base per il calcolo della posizione del ricevitore. La misura di Codici viene utilizzata per operazioni in tempo reale, porta con se una maggiore quantità di indeterminatezze che ricadono sulla accuratezza del rilievo della posizione (ordine delle decine di metri). La misura di Fasi fornisce risultati più accurati e viene utilizzata per il calcolo in post-elaborazione (ordine di grandezze anche inferiori al centimetro)

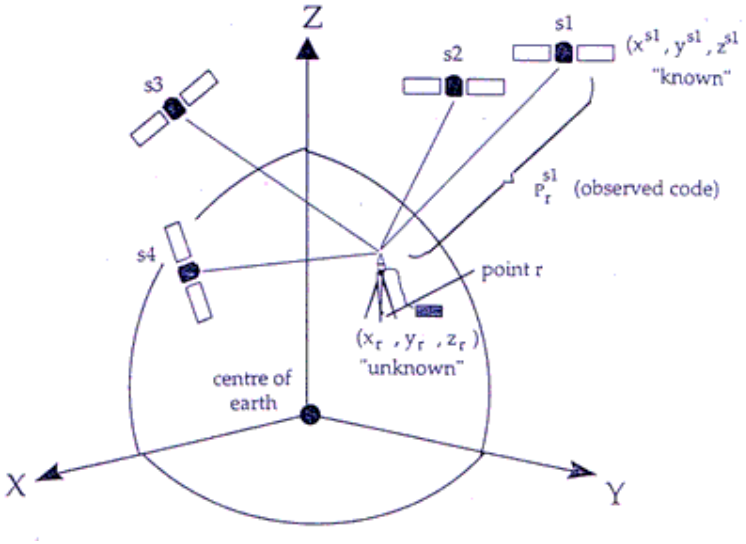


Illustrazione 11: Schema di Posizionamento Assoluto

Esistono tre categorie di posizionamento GPS, suddivise in base al tipo di precisione che si è scelto di conseguire:

- Posizionamento Assoluto; utilizza un unico ricevitore e determina la posizione assoluta nel sistema di riferimento globale del GPS, il WGS 84.
- Posizionamento Differenziale; simile al Posizionamento Assoluto, corregge i dati provenienti dalla stazione ricevente, con i dati provenienti da una seconda stazione sita su di un vertice di coordinate note. Questo tipo di procedura permette di individuare, epoca dopo epoca, l'errore sistematico associato alla posizione nota, e quindi di epurare i dati ottenuti durante il posizionamento in post elaborazione.
- Posizionamento Relativo; si realizza sfruttando almeno due ricevitori in contemporanea. Tale metodo serve a determinare un vettore baseline, di unione dei due punti. Entrambi i ricevitori saranno affetti dagli stessi errori, per cui in post-elaborazione, i dati ottenuti potranno essere corretti. Il Posizionamento Relativo consente la massima precisione.

1.3.1 Posizionamento Assoluto

Se vi fosse perfetta sincronizzazione tra l'emissione del codice generato dal satellite e quello generato dal ricevitore, il segnale in partenza all'istante t_j giungerebbe al ricevitore all'istante t_i con un ritardo pari al tempo necessario per compiere il range. In realtà gli orologi non possono essere perfettamente sincronizzati tra di essi e con il tempo GPS, ossia la scala dei tempi determinata su base stabile facendo ricorso a fenomeni naturali ciclici con periodicità costante (fenomeni atomici quali il tempo che un elettrone impiega per transitare da uno stato all'altro). Gli orologi dei satelliti sono molto stabili, con variazione di frequenza dell'ordine di $10^{-13}/10^{-14}$ a seconda del tipo.

L'orologio del ricevitore è invece al quarzo e la stabilità di questi orologi è almeno 1000 volte inferiore di quella degli oscillatori dei satelliti. Tutti gli orologi hanno quindi ad un certo istante t un certo offset rispetto al tempo ufficiale di riferimento ma, mentre per gli orologi dei satelliti questo offset viene controllato dal segmento di controllo e tenuto allineato al tempo GPS con una ristretta banda di oscillazione, dell'ordine delle decine di nanosecondi, l'instabilità dell'orologio del ricevitore non è controllabile in termini economicamente convenienti, e l'asincronia rispetto al tempo GPS va considerata come una incognita. Questi errori di sfasamento prendono il nome di *bias.*

Nella determinazione della distanza reale satellite-ricevitore con il metodo della *misura di codici*, il bias quindi influisce in una certa misura ignota, che è complementare della distanza approssimata fornita dal codice che prende il nome di *pseudorange*.

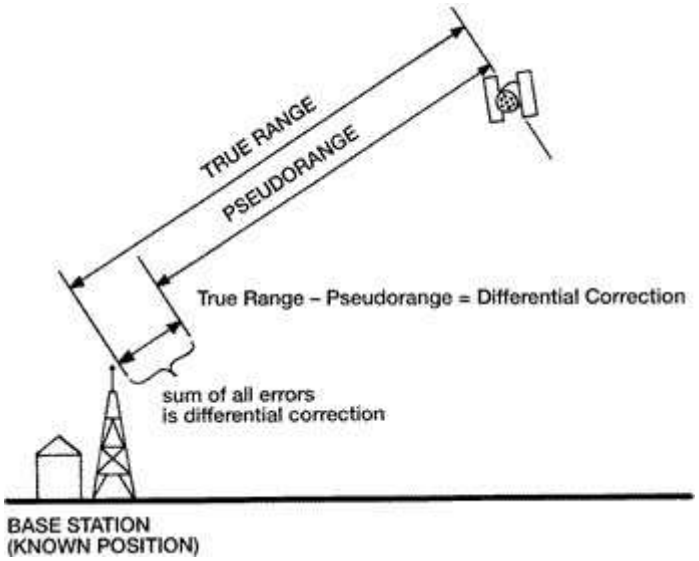


Illustrazione 12: Determinazione del True Range

La misura del ritardo si può esprimere nella forma:

$$\Delta t = [\ t_i(GPS) - \delta_i\ ] - [\ t^j(GPS) - \delta^j\ ]$$

Con δ_i Bias associato all'orologio del ricevitore e δ^j Bias associato all'oscillatore del satellite j-esimo. Conosciuto quindi il tempo impiegato dal codice, non ci resta che moltiplicarlo per la velocità di propagazione, ossia la velocità della luce nel vuoto c.

$$R_i^j(t) = c\,\Delta t\ (t) = c\,\Delta t\ (GPS) - c\delta_i^j(t) = \rho\ (t) - c\delta_i^j(t)$$

$$\rho_i^j = \sqrt{\left(X^j(t) - X_i\right)^2 + \left(Y^j(t) - Y_i\right)^2 + \left(Z^j(t) - Z_i\right)^2}$$

Le tre coordinate associate al ricevitore risultano incognite, mentre le coordinate della posizione del satellite j-esimo sono fornite dalle effemeridi in via approssimata.

Il GPS traccia i satelliti costantemente, ma ne registra i valori solo ad intervalli definiti denominati *epoche di acquisizione*, fornendoci un numero di osservazioni pari a $n_j x\ n_t$, dove n_j è il numero di satelliti visibili al ricevitore in quel momento e n_t è il numero di epoche registrate per ogni satellite.

Quando il ricevitore è fermo, si parla di *posizionamento statico,* le incognite del problema risultano pari a $3 + n_t$:

- 3 coordinate del punto di stazione;
- un bias associato all'orologio del ricevitore per ogni epoca (in quanto ignoto e variabile)

Quindi per poter risolvere il problema deve necessariamente risultare che il numero di osservazioni totali sia maggiore delle incognite:

$$n_j \, x \;\; n_t \geq 3 + n_t$$

ossia

$$n_t \geq \frac{3}{n_j - 1}$$

Che evidenzia la necessità di avere almeno 2 satelliti in vista tracciati per almeno tre epoche di acquisizione oppure 4 satelliti tracciati per una epoca.

Qualora il nostro ricevitore sia in movimento, *posizionamento cinematico*, le incognite associate alla posizione cambieranno di epoca in epoca divenendo $3n_t + n_t = 4\, n_t$. Il numero minimo di osservazioni sarà dato da:

$$n_j \, x \;\; n_t \geq 4\, n_t$$

ossia $n_j \geq 4$

Un minimo di quattro satelliti tracciati dal ricevitore permettono di impostare il sistema ed ottenere il posizionamento in tempo reale anche nel caso cinematico.

Il posizionamento assoluto può avvenire anche attraverso la *misura di fasi*, tracciando il generico satellite j-esimo lungo la sua orbita per un periodo sufficientemente lungo da garantire la ricezione di un certo numero di cicli, dal tempo t_0 al tempo t. Diversamente dal metodo precedente, si effettua il confronto sull'onda radio portante depurata dei codici. La misura consiste nell'effettuare un confronto tra la fase portante trasmessa dal satellite ed un segnale a pari frequenza generato dal ricevitore. Va tenuto presente, però, che

l'onda proveniente dal satellite viene ricevuta a terra con una frequenza variata rispetto a quella di emissione, per l'effetto Doppler dovuto alla velocità relativa fra satellite e ricevitore a terra. La "replica" del segnale generata dal ricevitore è invece stabile sulla frequenza nominale.

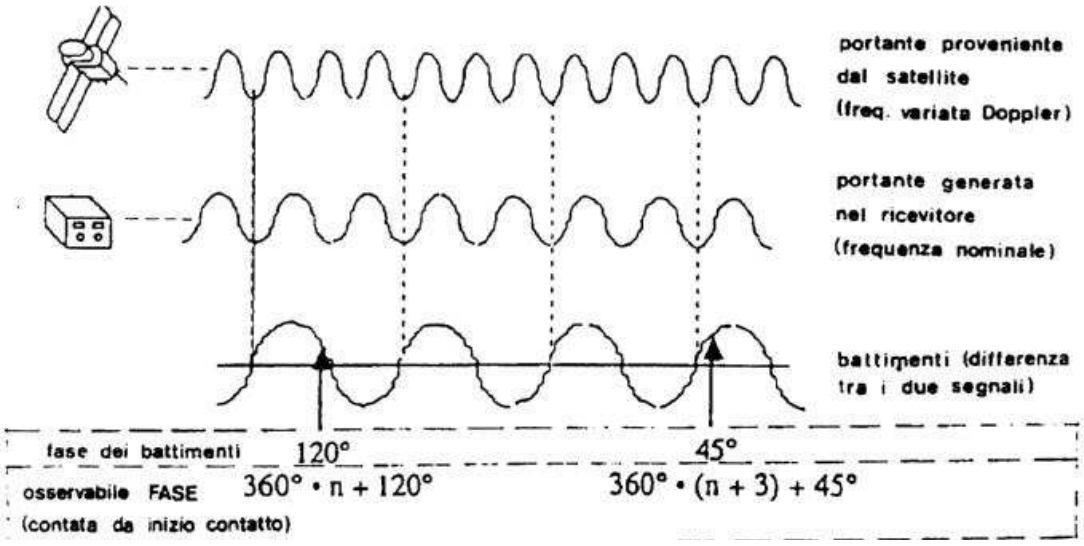


Illustrazione 13: Misurazione di Fase

Dal confronto fra le due onde, di frequenza poco diversa, risulta un'onda di battimenti. La "osservabile" (ovvero la grandezza misurata) FASE è definita come la differenza tra la fase del segnale proveniente dal satellite e quella della replica generata nel ricevitore; si può dimostrare che tale differenza coincide con la fase di battimenti di cui si è detto, definita a meno di un numero intero di cicli N, denominato *Ambiguità di Fase*, che è incognito.(Caprioli, 2007)

La precisione è nettamente maggiore rispetto alle tecniche che adoperano la misura di codice in quando si opera su di un segnarle con lunghezza d'onda molto inferiore (dai 30-300 metri dei codici ai 19-24 centimetri delle portanti).

All'istante t_0 viene registrata una frazione di fase $\phi_i^j(t_0)$, ma il segnale rilevato comprende anche l'ambiguità. Dal momento t_0 in poi il ricevitore registra una serie di cicli interi sino all'epoca t.

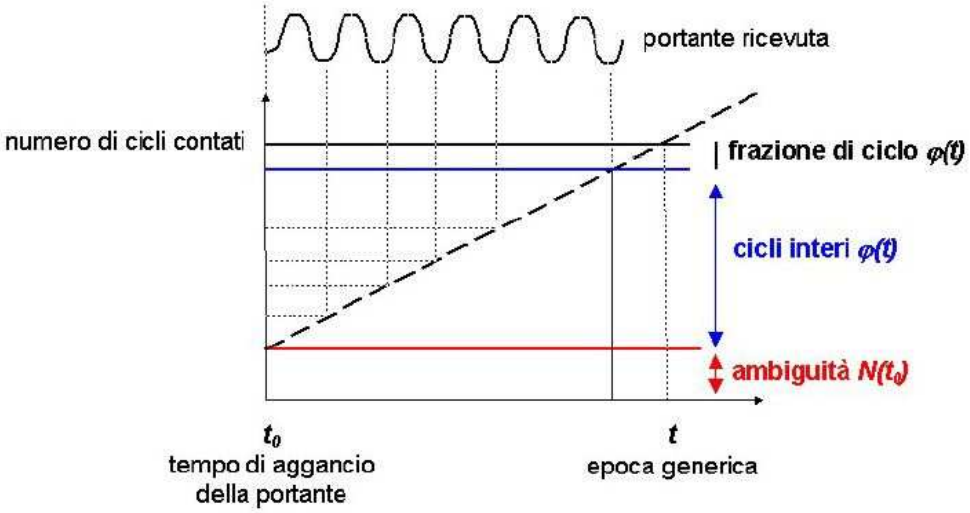


Illustrazione 14: Composizione del segnale registrato

Il valore delle ambiguità N rimane costante durante il tracking del satellite ed ovviamente esisterà un valore diverso di ambiguità per ogni satellite tracciato. Se, per un motivo qualsiasi, il ricevitore perde il contatto con uno dei satelliti in vista, al riaggancio si stabilirà una nuova incognita N che si sommerà all'ambiguità precedente. Questo effetto prende il nome di *Cycle Slip* (Slittamento di Ciclo), e determina un'ulteriore peggioramento della qualità della misura. (Mancini, 2010)

Quindi il valore di range dalla misura della fase, all'epoca generica t, si può esprimere attraverso la somma delle ambiguità N e dei cicli di fase contati dal

ricevitore (a loro volta suddivisi in componente intera e frazionaria).

L'equazione generale della fase per un ricevitore sito nel punto P ed a distanza ρ dal satellite è esprimibile così:

$$\phi = f(t - t_r) = f(t - \rho / c)$$

Dove ρ / c indica il tempo necessario al segnale per percorrere il range, con c velocità della luce nel vuoto.

Definisco ora le equazioni di fase provenienti dal satellite ed emesse dal ricevitore.

$$\phi^s(t) = f^s(t) - f^s \rho / c - \phi_0^s$$

$$\phi_r(t) = f_r(t) - \phi_{0r}$$

Le fasi all'istante iniziale recano con se gli errori di sfasamento degli orologi indico $\phi_0^s = f^s \delta^s$ e $\phi_{0r} = f_r \delta_r$, con f si indica la frequenza del segnale e con δ il bias della componente. Effettuo la sottrazione membro a membro:

$$\phi^s(t) - \phi_r(t) = f^s(t) - f_r(t) - f^s \rho / c - f^s \delta^s + f_r \delta_r$$

$$\phi_r^s(t) = (f^s - f_r)\, t - f^s \rho / c - f^s \delta^s + f_r \delta_r$$

posso trascurare il termine $(fs - fr)\, t$ in quando di scarsa rilevanza ai fini della accuratezza:

$$\phi_r^s(t) = - f^s \rho / c - f^s \delta^s + f_r \delta_r$$

che ricordiamo equivalere al numero di cicli contati ed il valore di ambiguità:

$$\phi_r^s(t) = -f^s \rho/c - f^s \delta^s + f_r \delta_r = \Delta \phi^s|_{t_0}^t + N$$

si evidenzia, inoltre, che il valore della *f/c* è pari all'inverso della lunghezza d'onda λ. L'equazione di fase per un satellite:

$$-\phi(t) = \rho/\lambda + f^s \delta^s - f_r \delta_r + N$$

generalizzando, ottengo l'equazione indifferenziata del posizionamento con misura di fasi tra ricevitore e satellite j-esimo:

$$\phi_{r-j}(t) = \frac{RJ(t)}{\lambda} - N_{r-j} - f \cdot \left[\delta t_r + \delta t_j\right]$$

Dove *RJ* è il range dal ricevitore al generico satellite j.

Come per il posizionamento assoluto con misura di codici, ci troviamo con un numero di osservazioni pari a $n_j \; x \; n_t$, ma il numero di incognite è maggiore in quanto avremo un valore di ambiguità per ogni satellite tracciato:

- 3 coordinate del punto di stazione;
- un bias associato all'orologio del ricevitore per ogni epoca;
- un valore di ambiguità per ogni satellite disponibile.

Per un totale di $3 + n_t + n_j$, che ci porta alla disequazione

$$n_j \; x \; n_t \geq 3 + n_t + n_j$$

ossia

$$n_t \geq \frac{n_j + 3}{n_j - 1}$$

Il numero minimo di satelliti richiesti per ottenere una soluzione è 2 con 5 epoche di acquisizione. Con 4 satelliti disponibili, il tempo di acquisizione si riduce ad un minimo di 3.

Nel caso di posizionamento cinematico, le incognite associate alla posizione cambieranno di epoca in epoca divenendo $3n_t + n_t + n_j = 4\,n_t + n_j$. Il numero minimo di osservazioni sarà dato da:

$$nj \;\; x \;\; nt \geq 4\,nt + nj$$

ossia

$$n_t \geq \frac{n_j}{n_j - 4}$$

Che necessita di almeno 5 satelliti tracciati per 5 epoche di acquisizione. Con 4 satelliti disponibili, il tempo di acquisizione si riduce ad un minimo di 3.

1.3.2 Posizionamento Differenziale

Nel posizionamento differenziale (DGPS) le misure di posizionamento assoluto eseguite da un ricevitore mobile, denominato *Rover,* vengono corrette in fase di campagna o in un secondo momento, tramite analoghe misure eseguite da un secondo ricevitore, denominato *Master,* in stazione su un punto di coordinate nota.

Queste correzioni estrapolate dal Master, chiamate *PseudoRange Correction o PRC,* e loro variazioni nel tempo, *Range Rate Correction* o *RRC,* possono essere applicate alle misure effettuate dal Rover nell'ipotesi cui l'andamento degli errori che affliggono le ricezioni del Master non siano troppo diversi da quelli presenti nelle ricezioni del rover; è quindi necessario che i satelliti tracciati siano gli stessi per tutti e due i ricevitori. La contemporaneità delle ricezioni e la correlazione spaziale degli effetti sistematici consente di ridurre, o addirittura eliminare, alcuni errori. Per distanze ridotte tra Rover e Master si raggiungono precisioni, per il rilievo in real time, dell'ordine del metro o di pochi metri purché le correzioni vengano trasmesse al Rover con un modesto ritardo (tempo di latenza). Il DGPS sfrutta la tecnica di posizionamento assoluto associandone la correzione degli *pseudoranges* calcolata dalla stazione fissa. Le correzioni possono essere calcolate, analogamente al posizionamento assoluto, sia dai codici che dalle fasi.

Richiamo la distanza reale satellite-ricevitore con il metodo della *misura di codici*, considerando come punto di stazione il vertice di coordinate note F:

$$R_F^j(t_0) = \rho_F^j(t_0) + \Delta\rho_F^j(t_0) + c\delta_F^j(t_0)$$

Il termine aggiunto $\Delta\rho_F^j(t_0)$ comprende gli errori della componente radiale dell'orbita del satellite j-esimo in vista, ossia l'errore più influente nella determinazione dello pseudorange. Il range geometrico, invece, risulta definito in quanto, abbiamo le coordinate precise nel sistema di riferimento e l'accesso ai dati delle effemeridi precise e relativa correzione.

La correzione del range, ottenuto da misure di codice, tra satellite j-esimo e vertice noto sarà:

$$PRC^j(t_0) = -R_F^j(t_0) + \rho_F^j(t_0) = -\Delta\rho_F^j(t_0) - c\delta_F^j(t_0)$$

Le PRC vengono registrate nel tempo ricavando le Range Rate Correction RRC, necessarie alla correzione dei valori registrati dalla stazione rover.

$$PRC^j(t) = PRC^j(t_0) + RRC^j(t_0)(t - t_0))$$

La stazione Rover sul punto B fornirà la propria misura Pseudorange, che correggiamo del valore PRC (t):

$$R_B^j(t) = \rho_B^j(t) + \Delta\rho_B^j(t) + c\delta_F^j(t)$$

$$R_B^j(t)_{corretto} = R_B^j(t) - PRC^j(t)$$

L'accuratezza ottenibile varia dai 50 cm ai 5 cm.

Nel caso di posizionamento differenziale con utilizzo di fasi le equazioni dello pseudorange tra una stazione fissa ed il satellite j-esimo si palesa nella seguente forma:

$$\lambda\phi_F^j(t_0) = \rho_F^j(t_0) + \Delta\rho_F^j(t_0) + c\delta^j(t_0) - c\delta_F(t_0) + \lambda N_F^j$$

Dove ancora una volta ritroviamo il contributo dell'errore dovuto alla componente radiale dell'orbita. Analogamente al metodo con misura di codici, determiniamo il valore dello pseudorange e scriviamo l'equazione del punto B relativo alla stazione rover e ne applichiamo la correzione.

$$PRC^j(t_0) = -\lambda\phi_F^j(t_0) + \rho_F^j(t_0) =$$

$$= -\Delta_F^j(\rho_0) - c\delta^j(t_0) + c\delta_F(t_0) - \lambda N_F^j$$

Da cui il valore del range rate correction e la correzione della misura di fase nel punto B:

$$PRC^j(t) = PRC^j(t_0) + RRC^j(t_0)(t - t_0))$$

$$\lambda\phi_B^j(t)_{corretto} = \lambda\phi_B^j(t) + PRC^j(t)$$

Bisogna specificare che restano ancora ignoti i valori di ambiguità tra le stazioni F e B ed il satellite j-esimo. L'accuratezza del metodo differenziale con misura di fasi è leggermente maggiore rispetto alla misura di codici.

1.3.3 Posizionamento Relativo

Il posizionamento relativo consiste nel rilievo contemporaneo delle coordinate di due stazioni riceventi mobili. Le coordinate precise dei punti, definiscono un vettore di collegamento tra gli stessi che chiamiamo *Baseline.* Se si conoscono le coordinate di un generico punto A in un sistema di riferimento ed è noto il vettore che lo collega ad un secondo punto B,

possiamo determinare le coordinate del secondo punto. Rilevando contemporanea mente sia le coordinate fornite dal satellite e sia il vettore *baseline* siamo in grado di eliminare alcuni errori tipici del posizionamento. Tale metodo fornisce dati solo in post elaborazione. Il punto di avvio di tale posizionamento è l'equazione delle fasi; ne definiamo per entrambi i ricevitori, una volta demodulate.

Riporto inizialmente l'equazione indifferenziata e la riscrivo in forma di A e B:

$$\phi_{r-j}(t) = \frac{RJ(t)}{\lambda} - N_{r-j} - f \cdot \left[\delta t_r + \delta t_j\right]$$

Che riscritta per A e B e per un singolo satellite j diviene:

$$\Phi_A{}^j(t) = \rho_A{}^j(t)/\lambda + f\ \delta^j(t) - f\ \delta_A(t) + N_A{}^j$$

$$\Phi_B{}^j(t) = \rho_B{}^j(t)/\lambda + f\ \delta^j(t) - f\ \delta_B(t) + N_B{}^j$$

Queste due equazioni ci permettono di applicare il *metodo delle differenze singole*, ossia sottraendo membro a membro riesco ad eliminare dall'equazione finale l'influenza del bias del satellite tracciato

$$\Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) = \frac{1}{\lambda}\left[\rho_B^j - \rho_A^j\right] - f\delta_B(t) + f\delta_A(t) + N_B^j - N_A^j$$

$$\Phi_{AB}{}^j(t) = \rho_{AB}{}^j(t)/\lambda - f\ \delta_{AB}(t) + N_{AB}{}^j$$

Se i satelliti tracciati per i due punti sono due, j e k, posso applicare il metodo delle doppie differenze, analogamente a quanto scritto precedentemente per

due satelliti posso scrivere due equazioni alle singole differenze e sottrarle ancora una volta membro a membro, eliminando così il bias associato al ricevitore.

$$\Phi_{AB}{}^{j}(t) = \rho_{AB}{}^{j}(t) / \lambda - f \ \delta_{AB}(t) + N_{AB}{}^{j}$$

$$\Phi_{AB}{}^{k}(t) = \rho_{AB}{}^{k}(t) / \lambda - f \ \delta_{AB}(t) + N_{AB}{}^{k}$$

ottengo

$$\Phi_{AB}{}^{jk}(t) = \rho_{AB}{}^{jk}(t) / \lambda + N_{AB}{}^{jk}$$

Estendendo ulteriormente il concetto, tracciando i 2 satelliti j e k per due epoche consecutive, posso applicare il metodo delle triple differenze. Scriviamo due equazioni alle doppie differenze ed eliminiamo definitivamente l'ambiguità N:

$$\Phi_{AB}{}^{jk}(t_1) = \rho_{AB}{}^{jk}(t_1) / \lambda + N_{AB}{}^{jk}$$

$$\Phi_{AB}{}^{jk}(t_2) = \rho_{AB}{}^{jk}(t_2) / \lambda + N_{AB}{}^{jk}$$

ottengo

$$\Phi_{AB}{}^{jk}(t_{12}) = \rho_{AB}{}^{jk}(t_{12}) / \lambda$$

Il metodo delle differenze triple sembrerebbe il più preciso ed affidabile, se non fosse che mostra delle brusche variazioni di precisione nel caso di salti di

ciclo. Questo ne limita fortemente l'utilizzo, per cui si preferisce adottare il metodo delle doppie differenze nel calcolo dei vettori baseline.

Nel caso di posizionamento statico alle doppie differenze la disequazione prevede che il numero di osservazioni disponibili per ogni coppia di ricevitori sia pari a $(n_j - 1)\, n_t$, ricordando che n_j è il numero di satelliti tracciati e n_t il numero di epoche. Le incognite saranno:

- 3 coordinate per ogni ricevitore;
- $(n_j - 1)$ valori di ambiguità per ogni coppia di satelliti.

Per un totale di $3 + (n_j - 1)$, che ci porta alla disequazione

$$(n_j - 1)\, n_t \geq 3 + (n_j - 1)$$

ossia

$$n_t \geq \frac{n_j + 2}{n_j - 1}$$

Il numero minimo di satelliti richiesti per ottenere una soluzione è 2 con 4 epoche di acquisizione. Con 4 satelliti disponibili, il tempo di acquisizione si riduce ad un minimo di 2. Il posizionamento prolungato fornisce dati ridondanti che, permettono di verificare il posizionamento con configurazioni satellitari differenti.

Nel caso di posizionamento cinematico, le incognite associate alla posizione cambieranno di epoca in epoca avendo al secondo membro $3n_t + (n_j - 1)$. Il numero minimo di osservazioni sarà dato da:

$$(n_j - 1)\, n_t \geq 3n_t + (n_j - 1)$$

ossia

$$n_t \geq \frac{n_j - 1}{n_j - 4}$$

Che necessita di almeno 5 satelliti e 4 epoche per fornire una soluzione.

1.4 Precisione e Limiti

Come si è visto nei paragrafi precedenti, il GPS sfrutta una metodologia affetta da alcuni errori. Tali errori hanno influenza più o meno marcata sulla accuratezza finale delle misure determinate. Le metodologie illustrate sinora possono essere ricondotte ad uno schema grafico di tipo semplice

Posizionamento	Metodo	Precisione	Applicazione
Posizionamento assoluto in tempo reale	Singolo Ricevitore	10 – 20 metri	Navigazione e Diporto
Posizionamento assoluto statico	Singolo Ricevitore per più epoche di acquisizione	1 – 5 metri	Georeferenziazione
Posizionamento Differenziale Statico con misura di codici	Due Ricevitori di cui uno in posizione nota	5 – 50 centimetri	Mappatura di moderata precisione per esplorazioni sismiche e Navigazione
Posizionamento Differenziale con misura di fasi in tempo reale in post-elaborazione	Due Ricevitori di cui uno in posizione nota	0.2 – 2 metri	Navigazione di precisione, Topografia d'alta precisione e sorveglianza delle strutture
Posizionamento Relativo Statico	Due o più ricevitori stazionano su postazioni incognite	2 – 5 millimetri	Controllo delle deformazioni, Reti di inquadramento topografico.

Gli errori che influenzano il rilievo GPS sono suddivisibili in tre categorie:

- Errori Accidentali di Misura;
- Errori Sistematici o di Modello;
- Errori Vari di Osservazione.

1.4.1. Errori Accidentali di Misura

Gli errori accidentali di misura influiscono per una quantità stimata pari all'uno percento della lunghezza d'onda, in base quindi al tipo di frequenza utilizzata per determinare la posizione, avremo errori di diversa entità:

Codice C/A	± 3 metri
Codice P	± 30 centimetri
Portanti L1 e L2	± 2 millimetri

1.4.2. Errori Sistematici o di Modello

Influenzano sia il calcolo con misure di codici che quello con misura di fasi e sono di quattro tipologie:

Errori di Orbita

Come già illustrato, il segnale emesso dal satellite fornisce le effemeridi Broadcast con errori dell'ordine 20 – 40 metri sull'orbita totale. Tale Precisione è stata notevolmente migliorata dal segmento spaziale del Blocco IIR, garantendo, ai ricevitori abilitati, la possibilità di ricevere effemeridi Broadcast con precisione anche dell'ordine di 2 – 3 metri. Il servizio internazionale International GPS Service (IGS), sfruttando una rete di stazioni di monitoraggio distribuite su tutta la superficie terrestre e dotate di ricevitori doppia frequenza e operanti con continuità, misura la posizione dei satelliti e permette il calcolo delle orbite realmente seguite dai satelliti.

I dati dell'IGS sono resi disponibili in rete all'utenza sotto tre forme:

- prodotto finale, rilasciato con un ritardo di 12 giorni, con accuratezza nell'ordine dei 5 cm;

- orbite Rapide, disponibili con una latenza di circa 17 ore;
- orbite Ultra rapide, creata due volte al giorno, con una validità di 48 ore.

Le orbite definiscono la posizione dei satelliti nel Sistema Geodetico ITRF (attualmente, ITRF00)

Errori degli Orologi

Il tempo misurato dagli orologi del satellite non è perfettamente sincronizzato con il tempo ufficiale GPS, questo Lag si traduce evidentemente in un errore sul range in quanto ottenuta come funzione del tempo e della velocità di propagazione. Si consideri che uno sfasamento pari ad un decimo di nanosecondo corrisponde a 3 cm circa. La sincronizzazione degli oscillatori a bordo col tempo GPS è controllata da terra e nel messaggio di navigazione sono riportate le correzioni da apportare, sotto forma dei coefficienti di un polinomio di secondo grado:

$$^{TM}{}_{t}{}^{S} = a\,(t - t_o)^2 + b\,(t - t_o) + c.$$

Nel caso di cattivo funzionamento degli orologi c'è una segnalazione di mal funzionamento con conseguente esclusione di quel satellite dalla elaborazione dei dati. Gli orologi dei ricevitori sono talmente poco precisi e stabili che il loro comportamento non può essere modellato efficacemente, per cui l'errore di sincronizzazione costituisce una incognita che influisce per un valore variabile tra i 10 ed i 100 metri.

Errore Ionosferico

La ionosfera è la parte più alta dell'atmosfera che si estende tra 50 e 1000 km di quota. In questa zona, soprattutto a causa dei raggi ultravioletti ed in funzione dell'attività solare, è presenta una concentrazione di ioni Neon che produce un indice di rifrazione dipendente dalla frequenza della radiazione che si propaga.

L'indice di rifrazione legato alla velocità di fase e l'indice di velocità di gruppo valgono:

$$n_f \approx 1 + c\ Ne / f^2$$

$$n_f \approx 1 - c\ Ne / f^2$$

Ciò mette in evidenza che le misure di codice risultano ritardate mentre le misure delle portanti sono anticipate, per cui gli pseudoranges derivanti dai codici sono più lunghi e quelli derivanti dalle fasi sono più corti del reale. La differenza tra valore misurato e valore geometrico del range Δ_{Iono} risulta dipendente dalla frequenza e dall'integrale della concentrazione di ioni lungo il percorso:

$$\Delta_{fase}^{Iono} = -\frac{c\ TEC}{f^2} \qquad \Delta_{gruppo}^{Iono} = +\frac{c\ TEC}{f^2} \qquad , \quad TEC = \int_s N_e\, ds$$

Il contenuto di elettroni varia nel tempo e nello spazio in funzione di vari fattori tra i quali l'attività solare, per cui è difficilmente modellabile.

L'effetto ionosferico è funzione dell'inverso del quadrato della frequenza disponendo di un segnale a due frequenze si può apprezzare il ritardo di una frequenza rispetto l'altra, e tramite questo ricostruire l'effetto della ionosfera.

Combinando opportunamente le portanti L1 e la L2 si può ottenere una frequenza *Ionofree* per la quale l'effetto ionosferico risulta fortemente ridotto.

$$\Phi_{ionofree} = \left(\frac{f_1^2 \Phi_{L_1} - f_2^2 \Phi_{L_2}}{f_1^2 - f_2^2} \right)$$

L'errore associato all'effetto ionosferico, se non corretto risulta variabile tra i 2 ed i 10 metri (Barbarella, 2007)

Errore Troposferico

La troposfera si estende per i primi 40 km al di sopra della superficie terrestre; in questa zona, molecole aventi momento polare, interagiscono con i campi elettromagnetici del segnale inducendo effetti di rifrazione. L'effetto di rifrazione è individuabile in due componenti, quella *secca* o *idrostatica*, dovuta dalle molecole in cui non è presente un momento di dipolo permanente, ed una *umida*, data dal vapor acqueo che si comporta come un dipolo che oscilla sotto l'effetto di onde elettromagnetiche. L'effetto della componente secca è efficacemente modellabile conoscendo le condizioni atmosferiche presenti sulla superficie terrestre (pressione e temperatura), mentre quello della componente umida dipende dalle condizioni presenti lungo tutto il percorso dal segnale, soprattutto per quanto riguarda il contenuto di acqua presente in atmosfera sotto forma di vapore. In generale si può ridurre il disturbo troposferico usando modelli standard del profilo di rifrattività verticale .

I modelli impiegati per descrivere l'effetto troposferico sono differenti per la componente secca (dry) e quella umida (wet) Il fatto che i segnali provenienti da satelliti bassi sull'orizzonte vengono maggiormente ritardati rispetto a quelli

provenienti da satelliti a maggior elevazione, induce ad evitare ricezioni con angolo di elevazione inferiore a 10 - 15 gradi.

Per atmosfere standard, il ritardo troposferico allo zenit è di circa 2,5 m ma può diventare notevolmente più grande per satelliti bassi sull'orizzonte.

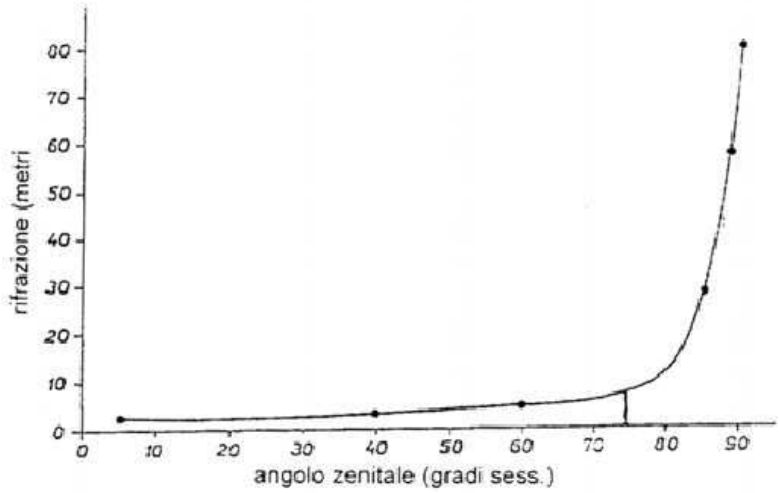


Illustrazione 15: Influenza della rifrazione troposferica

Il ritardo di propagazione del segnale nel passaggio attraverso la troposfera ha notevole ricaduta soprattutto sulla precisione altimetrica, può generare errori sino a 50 metri.

1.4.3 Errori Vari di Osservazione

Sono per lo più effetti che l'operatore inesperto può subire e che possono essere agevolmente evitati ponendo attenzione nella fase di stazione.

Multipath

Tradotto letteralmente significa, Multi-Percorso. Il segnale satellitare può giungere in prossimità del ricevitore che, se circondato da superfici riflettenti, registra una serie di segnali trasversali che si traducono in un disturbo sul

range. L'effetto può distorcere il segnale sino ad un valore di 50 centimetri. Il Design delle antenne è tale da limitare tale effetto, ma una accurata scelta del punto di stazione aiuta a ridurre significativamente il disturbo.

Cycle Slip

Durante il rilievo può avvenire una interruzione nell'acquisizione del segnale a causa di vari fattori, quali la presenza di ostacoli sul percorso del segnale, disturbi elettromagnetici, effetti della ionosfera : tutte queste cause interrompono l'acquisizione della fase e l'interruzione del calcolo del numero intero di cicli. Alla ripresa del segnale, l'ambiguità va considerata come una nuova incognita.

Il rischio connesso alla presenza dei cycle slips consiste nel pericolo di non accorgersi di essi, e quindi non tener conto della comparsa di una nuova incognita di ambiguità; inoltre, se le interruzioni sono frequenti, aumenta considerevolmente il numero delle incognite (anche se riconosciute) nel modello funzionale di calcolo fra osservazioni e incognite e diminuisce la ridondanza delle osservazioni.

Configurazione dei satelliti

A parità della precisione con la quale si determina lo pseudo range tra un ricevitore e un satellite, la precisione della posizione del punto dipende dalla geometria della distribuzione dei satelliti in cielo rispetto al punto stesso.

La miglior soluzione si ha quando i satelliti sono distribuiti regolarmente su tutti e quattro i quadranti. Nel caso di rilievo statico il movimento reciproco tra i satelliti durante la sessione introduce una variabilità della geometria che ha effetti positivi sulla precisione.

Centro di Fase dell'antenna

Il centro di fase dell'antenna è il punto nel quale è effettivamente ricevuto il segnale e a cui si riferisce la posizione calcolata; il suo comportamento è modellizzato attraverso polinomi con coefficienti noti attraverso una procedura standard di calibrazione. E' importantissimo nel caso di rilievi ad alta precisione ed è presente sopratutto in strumenti nei quali l'antenna è separata dal corpo del ricevitore.

Capitolo 2

Metodi Indiretti di Indagine Geofisica, La Geoelettrica e Il GPR:Teoria, Potenzialità ed Utilizzi

In questo capitolo verranno mostrate alcune tecniche di indagine del sottosuolo, la teoria generica che vi è alla base di ogni metodo ed il motivo per cui sono stati realizzati.

In modo particolare verranno illustrati nel dettaglio il metodo Geoelettrico ed il Ground Probing Radar, GPR, dalla nascita al funzionamento ed alcuni importanti esempi nei vari campi d'applicazione.

2.1 Metodi Indiretti di Indagine Geofisica

Quando ci si trova in condizione d'operare in zone di terreno molto vaste vengono di norma effettuate le *indagini geofisiche*, basate su principi fisici, che consentono di analizzare il terreno a profondità anche maggiori rispetto alle perforazioni.

Chiamiamo *Prospezioni* l'insieme delle indagini condotte sul terreno, in una determinata area, al fine di accertare e valutare la presenza di giacimenti minerari, per ricerche idrologiche, di ingegneria civile e di carattere archeologico.

Le prospezioni geofisiche risultano di rapida esecuzione e notevolmente più economiche, ma richiedono la conoscenza pregressa del sottosuolo. Nel tempo è stata ideata una quantità di metodi di indagine, ma i più usati sono quelli gravimetrico, elettrico, sismico, magnetico e radar.

2.1.1 Metodo Gravimetrico

La *gravimetria* è la scienza che studia la gravità terrestre basandosi sulla correlazione tra caratteristiche del terreno e gravità. Permette di studiare la distribuzione della densità del sottosuolo utilizzando la misura dei campi di gravità naturali.

I rilevamenti gravimetrici (ed anche quelli magnetometrici) sono basati su metodi di misurazione non invasivi, noti anche co*me metodi a campo di potenzi*ale, che permettono di definire le eterogeneità principali delle rocce nel sottosuolo sulla base delle variazioni di densità (o di suscettività magnetica). Tali metodi sono anche relativamente economici. La forza gravitazionale di attrazione fra due corpi di dimensioni trascurabili (o sferici) è:

$$F = G\frac{mM}{d^2}$$

dove *G* è la costante di gravitazione universale, pari a 6,6731011 $m^3kg^{-1}s^{-2}$, *M* ed *m* sono le masse dei corpi coinvolti e *d* è la distanza tra i rispettivi centri di massa.

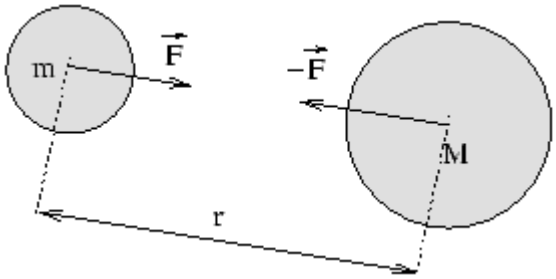


Illustrazione 16: Attrazione Gravitazionale

Il potenziale gravitazionale generato dalla massa *M* alla distanza *r:*

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{GM}{r} + C$$

L'accelerazione di gravità *g* è la forza agente sulla massa unitaria ed è uguale al gradiente del potenziale; il segno è necessario quando *g* è rappresentata da un vettore che punta verso l'interno della Terra. Per convenzione, la costante additiva C si pone uguale a zero. (Gonfalini, 2005)

Il rilevamento gravimetrico consiste nella determinazione delle anomalie dell'accelerazione di gravità prodotte da contrasti di densità tra corpi presenti nel sottosuolo, che portano il campo gravitazionale misurato a discostarsi in modo sensibile dal campo gravitazionale teorico. Un'anomalia positiva segnala la presenza di un corpo con densità maggiore rispetto a quella dell'ambiente circostante ed è indicata da variazioni molto piccole di *g*, rilevabili esclusivamente con strumenti molto sensibili. L'obiettivo della prospezione gravimetrica consiste, dunque, nella misura dei segnali legati alle

eterogeneità nella distribuzione delle masse interne. Per raggiungere questo scopo si deve confrontare l'accelerazione di gravità misurata, alla quale contribuiscono tutte le masse che costituiscono la Terra e la forza centrifuga, con il valore teorico della gravità normale di riferimento. In questo modo la gravimetria consente di ricostruire i principali lineamenti strutturali dei bacini sedimentari: estensione, spessore, presenza di duomi salini, dislocazioni o faglie. L'unità di misura generalmente usata in gravimetria è il Gal, equivalente a 10^{-2} ms^2.

Obiettivi tipici sono l'individuazione di:

- discontinuità tra crosta e mantello, segnalata da anomalie con valori compresi tra decine e centinaia di mGal;
- sistemi di faglia nella crosta terrestre , anomalie di alcuni mGal;
- sinclinali e anticlinali , alcuni mGal;
- duomi salini , alcuni mGal;
- basamento roccioso , variabile nel range 1-0,2 mGal.

Le strutture più profonde coinvolgono grandi volumi di roccia e, di conseguenza, l'estensione e l'ampiezza del segnale gravimetrico risultano elevate. Viceversa, le strutture più superficiali interessano volumi più piccoli e quindi l'estensione e l'ampiezza del segnale sono ridotte.

La misurazione di *g* può essere eseguita mediante gravimetri assoluti o relativi. La misura assoluta dell'accelerazione di gravità si esegue con metodi *balistici,* con cui si raggiungono precisioni dell'ordine di una parte su un miliardo.

Nella prospezione, le misure gravimetriche sono eseguite in modo sistematico sia in terra, che in mare o per via aerea; il rilievo è fatto puntualmente e su base regolare a griglia in modo da coprire l'area da esplorare.

I gravimetri relativi sono essenzialmente costituiti da una massa appesa a una molla elicoidale. La forza di attrazione gravitazionale su una massa costante cambia infatti a ogni variazione del campo gravitazionale. Per rilevare una differenza di gravità di 0,1 mGal si richiede una sensibilità pari a una parte su 10 milioni della gravità totale.

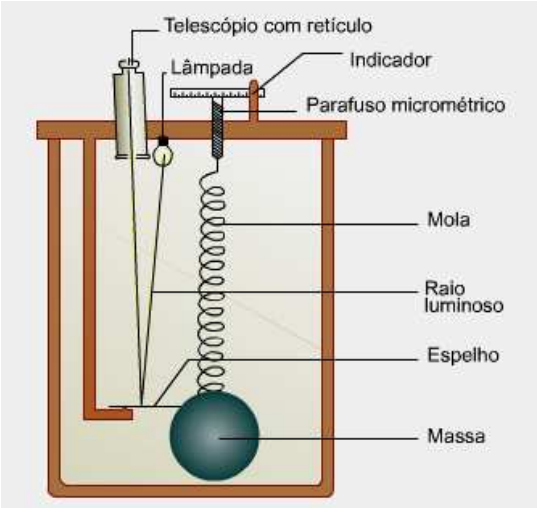


Illustrazione 17: Gravimetro

Generalmente si impiegano gravimetri cosiddetti astatici, che operano con un sistema mobile in condizioni prossime all'instabilità, di modo che piccole variazioni nella gravità producano grandi movimenti. Gli strumenti del tipo astatico sono caratterizzati da un lungo periodo di oscillazione e la loro sensibilità è proporzionale al quadrato del periodo. Lavorando molto vicino al punto d'instabilità, il periodo diventa più lungo, in quanto la forza della molla

principale è bilanciata da una forza contraria data oppure da una molla antagonista.

Con i gravimetri attualmente in uso si raggiungono risoluzioni dell'ordine di alcuni mGal. Per produrre una carta finale dell'anomalia di gravità in ogni punto di osservazione deve essere determinata la differenza di gravità rispetto ad almeno un punto di base, dove il valore assoluto di *g* è noto, e devono essere calcolate correzioni per i contributi generati da sorgenti note e che possono essere rimossi. (Gonfalini, 2005)

2.1.2 Metodo Magnetometrico

Il metodo di prospezione magnetica, impiegato principalmente per le ricerche minerarie, consiste nel misurare, in una serie di posizioni, le anomalie locali del campo magnetico terrestre. Misurato il campo magnetico totale, o le sue componenti, ed eliminate, tramite processo di filtraggio, le influenze attribuibili a fattori regionali, si ottengono le anomalie residue necessarie alla risoluzione del problema ed identificazione dei corpi magnetici locali.

Per molti aspetti il metodo magnetometrico è simile a quello gravimetrico, anche se matematicamente più elaborato, date la variabilità con la latitudine del vettore del campo magnetico terrestre e la possibilità di misurare diverse componenti del campo stesso.

Da un punto di vista geologico, il rilevamento magnetometrico consente di acquisire informazioni sui caratteri strutturali e sulla profondità del basamento suscettivo, e quindi indirettamente sullo spessore della successione sedimentaria presente al di sopra di esso, e di evidenziare la presenza di corpi

vulcanici o plutonici entro la serie sedimentaria, localizzandone dimensioni e profondità.

Il campo magnetico è generato da correnti elettriche presenti nel nucleo esterno della Terra. Si tratta, in prima approssimazione, di una sorgente dipolare, posizionata al centro della Terra e allineata all'incirca con l'asse di rotazione terrestre. Tale campo è descritto, per ogni punto *P* preso sulla superficie terrestre, da un vettore *T* definito in uno spazio tridimensionale.

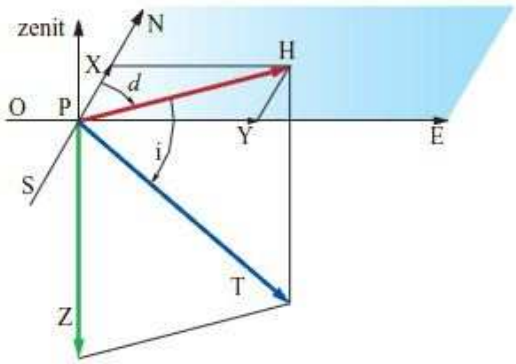


Illustrazione 18: Campo Magnetico

L'illustrazione 18 rappresentata la situazione per l'emisfero settentrionale; gli assi *x* ed *y* giacciono sul piano orizzontale e l'asse *z* sul piano verticale. L'intensità orizzontale *H* è data dalla composizione delle componenti Nord sull'asse *X* ed Est sull'asse *Y* e la declinazione magnetica *d* dall'angolo fra la sua direzione e il Nord astronomico. Il modulo dell'intensità totale *T* è la somma vettoriale delle tre componenti principali e l'inclinazione magnetica *i* è data dall'angolo tra *T* e *H*. Il vettore *T* è orientato verso il Polo Nord geografico della Terra.

Il campo magnetico presenta anomalie con andamento dipendente dalla latitudine magnetica. Il campo magnetico misurato sulla superficie terrestre è la somma di vari contributi di cui il principale è quello del campo generato

all'interno della Terra e che viene utilizzato nelle prospezioni; a questo si aggiungono il campo generato da sorgenti crostali, denominato *campo secondario*, ed il campo dovuto a fenomeni legati all'attività solare agente sulla ionosfera, che innesca correnti variabili le quali inducono il campo magnetico, ma ha influenza ancor più limitata. Il campo secondario, o di *anomalia*, è dovuto sia alla magnetizzazione indotta, propria dei minerali paramagnetici, che è direttamente proporzionale sia all'intensità del campo principale, sia alla suscettività magnetica, sia alla magnetizzazione residua, riscontrabile in alcuni minerali anche quando l'azione del campo inducente è cessata (magnetizzazione termoresidua, di deposizione, chimica, ecc.).

Accade di sovente che molte rocce mantengano una magnetizzazione residua legata a quella indotta subita al tempo della loro genesi o diagenesi, ad esempio nel passaggio dallo stato di magma a quello di roccia solida oppure al momento della sedimentazione, in periodi geologici in cui il campo magnetico principale aveva direzioni diverse da quelle attuali; in ogni caso, la distorsione provocabile dalla magnetizzazione residua sul campo attuale è minima. (Gonfalini, 2005)

È invece importante la magnetizzazione nei materiali ferromagnetici, caratterizzati da un allineamento conforme dei momenti magnetici elementari. Le rocce, infatti, sono magnetizzate in quanto contengono magnetite (Fe_3O_4), che è il minerale ad elevata suscettività magnetica più comune e abbondante entro la crosta. La suscettività magnetica k è un parametro adimensionale definito come $k = \mu - 1$, ove μ è la permeabilità magnetica relativa. Essa è sostanzialmente nulla per gran parte delle rocce sedimentarie, o *diamagnetiche*, modesta per le rocce metamorfiche e rilevante per le rocce ignee, soprattutto quelle basiche, e va comunque posta in relazione al tipo di mineralizzazione. Ad alte temperature, a causa dell'agitazione termica, le

rocce perdono la capacità di allineare i loro momenti magnetici e si comportano come sostanze paramagnetiche, sostanze in cui siano presenti dipoli magnetici permanenti.

L'induzione magnetica terrestre è usualmente espressa in nanotesla *nT,* o in gamma (1 γ = 1 nT), ed ha mediamente valori attorno a 50.000 nT. La magnetizzazione delle rocce, e i contrasti di magnetizzazione fra di esse, determinano l'ampiezza delle anomalie magnetiche osservate.

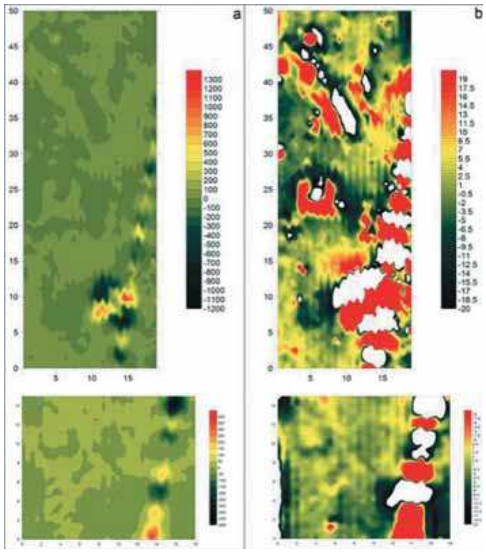


Illustrazione 19: Esempio di mappa delle Anomalie

La strumentazione usata per la misura dell'intensità del campo magnetico prende il nome di *magnetometro;* si basa in gran parte sul sensore *fluxgate,* consistente in due barre, o nuclei, di materiale ferromagnetico di grande permeabilità, affiancate ed avvolte ciascuna da una bobina, ma spirali a senso contrapposto.

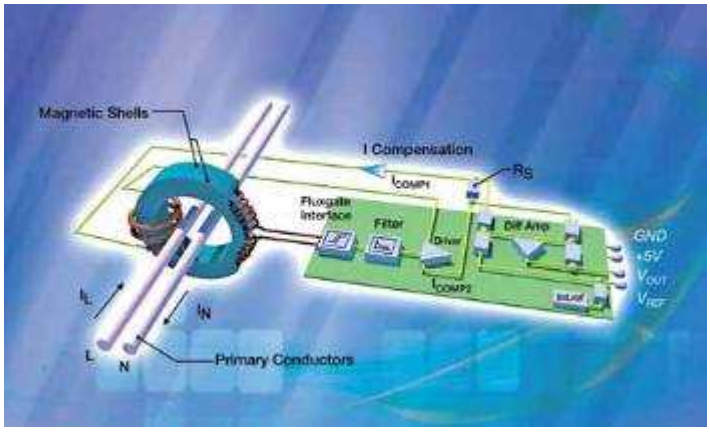


Illustrazione 20: Schema di Sensore Fluxgate

Una corrente alternata di elevata intensità attraversa le bobine e produce un campo, uguale ma con orientazione opposta, nelle due barre; esso è di intensità tale da essere prossimo alla saturazione, ossia quando non vi è più linearità fra il campo inducente ed il campo indotto. Un circuito secondario, ancora una bobina, avvolge tutte e due le barre. Ai capi del circuito secondario non si osserverà alcuna corrente indotta se il campo magnetico della Terra nel sito di misura è assente. Quando invece le barre sono allineate parallelamente a un campo magnetico esterno, in una di esse l'effetto congiunto del campo magnetico esterno e di quello prodotto dalla bobina provoca la saturazione.

Analizzando la differenza fra i segnali sulle due bobine, è possibile ottenere in uscita una tensione proporzionale all'intensità del campo secondo la direzione delle barre; in tal modo si possono rilevare variazioni del campo magnetico terrestre dell'ordine del decimo di nano-Tesla. Si utilizzano sensori triassiali, orientabili, per massimizzare il flusso secondo una direzione preferenziale. Altri strumenti sono i magnetometri a precessione nucleare, basati sul paramagnetismo nucleare, ossia sul principio che i nuclei atomici sono dotati di un momento magnetico proprio, il quale tende ad allinearsi con un campo

magnetico esterno. Sfruttando questa proprietà dei nuclei, e più precisamente dei protoni, si sono costruiti i magnetometri a *precessione protonica*.

Un magnetometro di questo tipo è costituito da una sonda con un recipiente contenente un liquido idrogenato attorno a cui è avvolto un solenoide che, percorso da corrente, crea un campo magnetico di decine di migliaia di nT.

I protoni tendono allora ad allineare il loro momento magnetico parallelamente al campo, lungo l'asse del solenoide, orientato perpendicolarmente al campo magnetico terrestre. Annullando bruscamente il campo del solenoide, i protoni cominciano a descrivere un moto di precessione intorno al campo magnetico terrestre; tale moto induce, ai capi della bobina, una forza elettro magnetica indotta, la cui misura permette di risalire al campo totale.

Eliminando, con altre bobine, la componente verticale o una delle orizzontali, si può procedere alla misurazione di una sola componente. Questi strumenti uniscono grande precisione, nell'ordine degli 0,1 nT, ad una relativa facilità d'uso, notevole speditezza e dimensioni molto contenute rendendoli particolarmente adatti per misure in campagna.

I magnetometri a precessione sono stati ampiamente utilizzati anche nelle prospezioni marine, con sensori trainati dalle navi a varie centinaia di metri di distanza e a profondità controllate, per migliorare la risoluzione ed evitare le interferenze. L'esecuzione di rilevamenti terrestri è effettuata mediante profili o mediante reti, con strumenti tenuti a 2 o 3 m di altezza fuori dalle sorgenti più superficiali e rioccupando una stazione base per il controllo delle derive, al contempo, un'altra stazione provvede al monitoraggio delle variazioni giornaliere del campo. Gran parte dei rilevamenti magnetici per la ricerca petrolifera è condotta utilizzando un aeromobile dotato di strumentazione comprendente radar, per l'altimetria, GPS per il posizionamento satellitare, e magnetometro per la misura l'intensità del campo totale. (Gonfalini, 2005)

2.1.3 Metodo Sismico a Riflessione e Rifrazione

La crosta terrestre è in parte costituita da rocce sedimentarie stratificate, risultato della lenta ma continua deposizione di materiali, principalmente in ambiente marino. In seguito a fenomeni come la variazione del livello del mare e, soprattutto, la compattazione dei depositi dopo l'espulsione dell'acqua interstiziale, favorita dal carico litostatico dei sedimenti sovrastanti, le rocce subiscono variazioni di alcune proprietà come densità e compressibilità, che peraltro variano anche in funzione dell'età di deposizione. Nei bacini sedimentari gli strati possono raggiungere spessori di parecchi chilometri.

Quando in superficie, o in prossimità di questa, si applica una forza variabile nel tempo utilizzando una sorgente di energia, si osserva la generazione di onde sismiche di cui è possibile seguire la propagazione nel sottosuolo. Con opportuni sensori, è possibile misurare i tempi di ritorno in superficie di questi segnali riflessi o rifratti da discontinuità che delimitano le unità sedimentarie principali, fra loro fisicamente differenziate. La propagazione delle onde sismiche trova una descrizione, in termini matematici, nella teoria dell'elasticità. La sorgente è caratterizzata dal segnale da essa generato: una forma d'onda impulsiva di breve durata, che prende il nome di *transiente*, o un treno d'onde sinusoidali più lungo ma di frequenza continuamente variabile, riconducibile, in fase di elaborazione dei dati, nuovamente a un segnale impulsivo di durata di alcuni millisecondi.

La restituzione finale dei risultati, presentata sotto forma di immagini sezione ricavate dall'elaborazione ed interpretazione degli echi registrati in superficie, permette di formulare ipotesi sull'assetto geometrico delle formazioni sepolte, sulla natura delle rocce investigate e sulle loro proprietà litofisiche, comprese

le valutazioni sui fluidi eventualmente contenuti entro le rocce serbatoio. Notevoli complicazioni sorgono quando gli strati sono stati piegati, deformati o fagliati. Per la ricostruzione di queste geometrie complesse, le tecniche più recenti richiedono speciali elaborazioni delle immagini, quali le migrazioni pre-stack o le acquisizioni tridimensionali. (Gonfalini, 2005)

La propagazione delle onde sismiche è basata sulla teoria dell'elasticità che tratta la deformazione di un mezzo sottoposto a uno sforzo, sotto l'ipotesi iniziale che tale mezzo sia omogeneo e isotropo. La nozione elementare di sforzo è legata al bilancio delle azioni e delle reazioni interne fra le differenti parti di un corpo in un determinato punto interno a esso.

Considerata una forza F agente in un punto P, entro un mezzo continuo ed elastico, ed una porzione di superficie ΔS, di normale n, attorno al punto P, lo sforzo applicato in P è definito come il limite per ΔS che tende a zero del rapporto tra F e ΔS.

Lo sforzo può essere considerato come risultante di una componente principale pnn e di due componenti tangenziali $pn1$ e $pn2$, dove 1 e 2 indicano due direzioni ortogonali fra loro e appartenenti al piano passante per P e ortogonale alla normale n. Elaborando in un piano cartesiano e considerando il modulo di elasticità e derivando tutto in funzione del tempo ottengo:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \left(\frac{\varrho}{E}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \left(\frac{\varrho}{\mu}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Le soluzioni delle due equazioni corrispondono rispettivamente a onde di compressione, note come *onde P* o longitudinali, ed onde trasversali note

come *onde S* o di taglio.

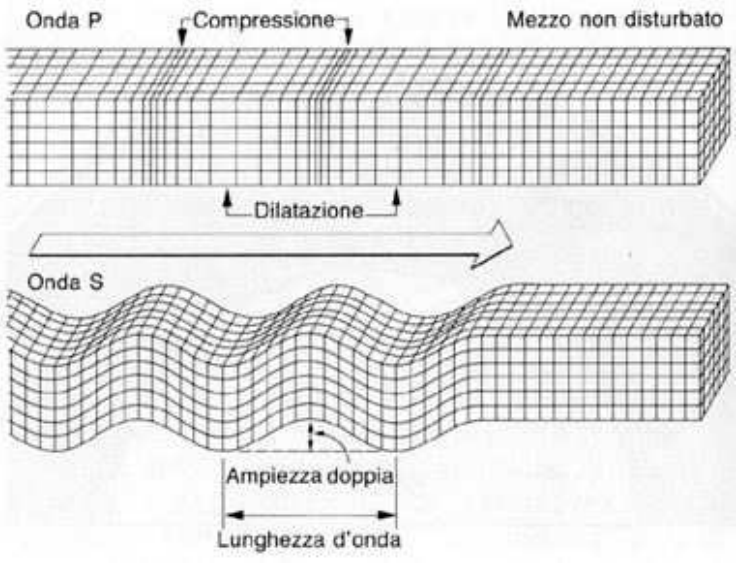


Illustrazione 21: Onde Sismiche di Profondità

I corpi rocciosi attraversati dalle onde sismiche sono caratterizzati da una propria velocità di propagazione delle onde stesse; la misura di questo parametro è importante al fine di ricavare la profondità degli orizzonti sismici, tramite la conversione del dato sismico da tempi a profondità. Le onde P, nelle quali la deformazione del mezzo ha luogo nella stessa direzione in cui avviene la propagazione, sono più veloci delle onde S, che tuttavia risultano più semplici da generare, registrare, analizzare ed interpretare, e sono pertanto le più comunemente utilizzate nell'esplorazione sismica.
Le onde S non si trasmettono in un fluido che è caratterizzato da $\mu = 0$.

Esistono inoltre le onde superficiali, o *onde di Rayleigh,* che si propagano orizzontalmente seguendo la superficie della Terra, sono poco più lente delle onde S ($V_R = 0{,}9\ V_S$) e costituiscono il rumore più importante nella prospezione sismica, *ground roll*.

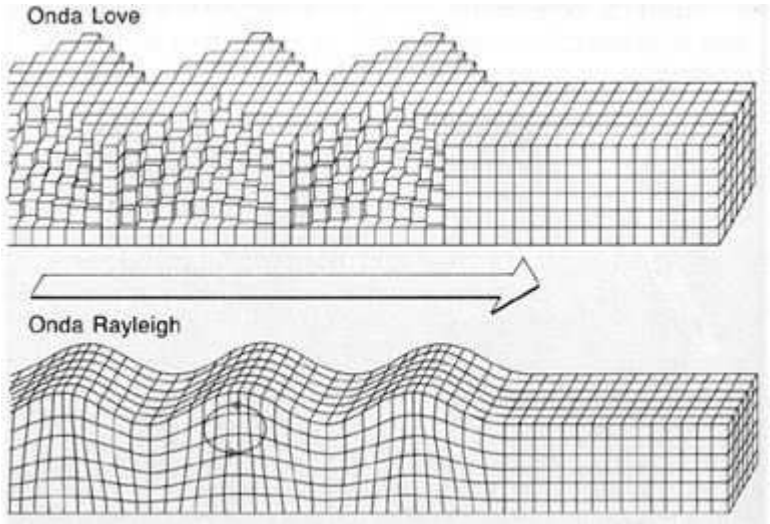


Illustrazione 22: Onde Sismiche di Superficie

Il moto delle particelle in questo caso è retrogrado, ma l'onda si muove parallelamente alla superficie secondo la direzione di propagazione del disturbo. Nella propagazione sismica, l'attenuazione principale delle ampiezze è imputata alla divergenza sferica.

Per un'onda sferica, generata da una sorgente puntiforme, l'energia per unità di superficie diminuisce con il quadrato della distanza dalla sorgente e si osservano di conseguenza echi sempre più deboli all'aumentare dei tempi di ascolto. Le onde di superficie subiscono, invece, un'attenuazione minore nelle direzioni orizzontali, per divergenza cilindrica, essendo confinate in prossimità della superficie libera, mentre si smorzano in profondità in un intervallo di poco superiore ad una lunghezza d'onda, qualche decina di metri. Le onde di volume, onde P e S, sono riflesse, rifratte e diffratte dai corpi eterogenei presenti nel sottosuolo. La loro propagazione può essere rappresentata mediante il fronte d'onda, superficie di egual tempo di transito del disturbo sismico a partire dalla sorgente.

Il fronte d'onda separa il mezzo in cui l'energia è transitata da quello non ancora toccato. La propagazione delle onde sismiche viene rappresentata in modo semplice attraverso raggi, linee ortogonali ai fronti d'onda, almeno nei mezzi isotropi. Le variazioni nella direzione del raggio sono legate alle variazioni della velocità di propagazione nel mezzo. La continuità degli sforzi e delle deformazioni attraverso un'interfaccia che separa due mezzi con velocità diverse è descritta dalla *legge di Snell*, che stabilisce la costanza del rapporto fra la velocità di fase, P o S, in un dato mezzo ed il seno dei rispettivi angoli di incidenza o di trasmissione all'interfaccia. (Gonfalini, 2005)
Questa rappresentazione è dunque basata sulle leggi dell'ottica geometrica per la descrizione dei fenomeni, ma non tiene conto delle variazioni di ampiezza.

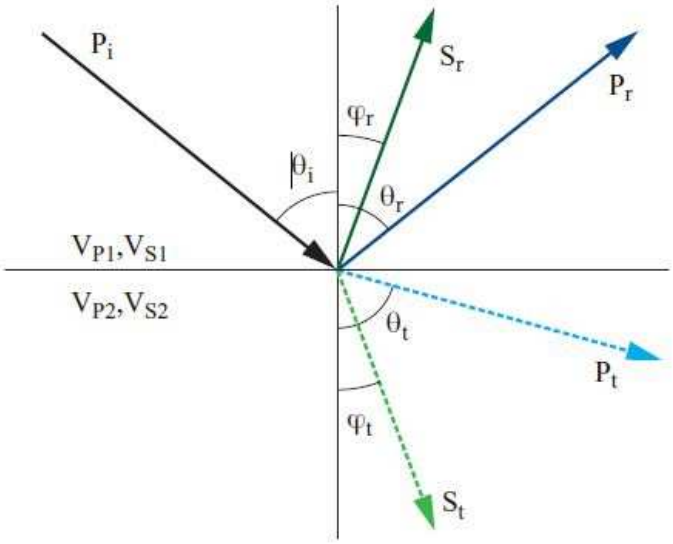


Illustrazione 23: Legge di Snell per un raggio P_i

L'illustrazione mostra il comportamento di un raggio secondo la legge di Snell che stabilisce, per gli angoli d'incidenza *i*, di riflessione *r* e di trasmissione *t*,

all'interfaccia di separazione fra due mezzi, indicata con $j = 1, 2$, la seguente relazione per le onde P e S:

$$\mathrm{sen}\theta_i/V_{Pi}=\mathrm{sen}\theta_r/V_{P1}=\mathrm{sen}\theta_t/V_{P2}=\mathrm{sen}\varphi_r/V_{S1}=\mathrm{sen}\varphi_t/V_{S2}$$

Nella situazione di incidenza normale, angolo di incidenza prossimo a zero, un'onda P o S incidente è in parte riflessa e in parte trasmessa.

A seguito di queste considerazioni, disponendo un certo numero di rilevatori distanti dal punto P di generazione dell'onda, possiamo ottenere una serie di segnali che, raggiungendoli in tempi differenti, indicano la posizione delle varie componenti stratigrafiche e di eventuali anomalie nei mezzi trasmissivi.

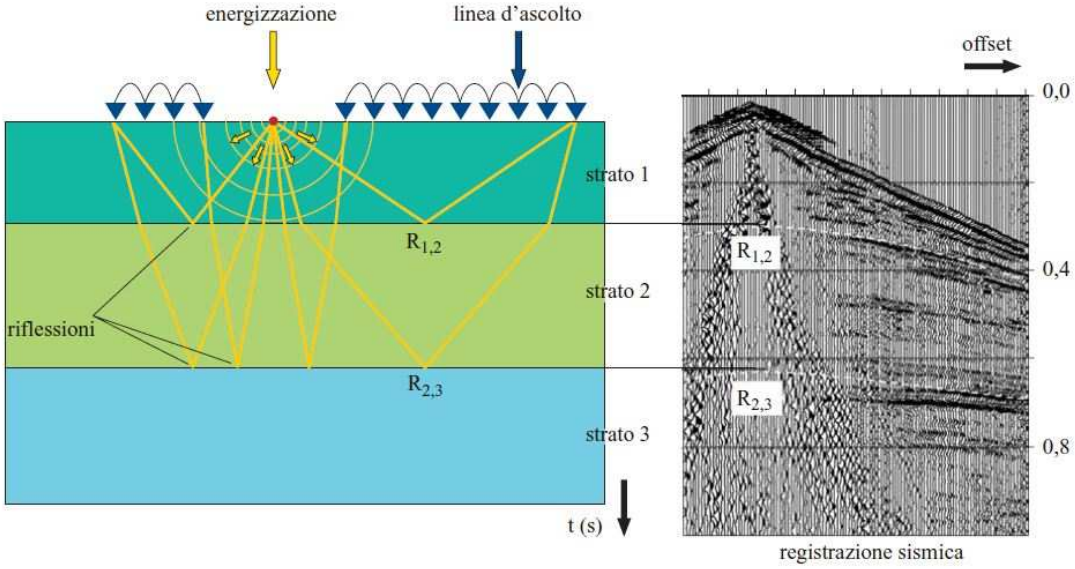


Illustrazione 24: Esempio di registrazione sismica con interpretazione

2.2 Metodo Geoelettrico

Nell'ambito delle metodologie geofisiche correntemente utilizzate per l'esplorazione del sottosuolo, un notevole contributo è dato dalle prospezioni di tipo geoelettrico. La prospezione geoelettrica consiste nella determinazione sperimentale del parametro della *resistività apparente*, attraverso misure congiunte di intensità di corrente elettrica inviata nel sottosuolo mediante una coppia di elettrodi infissi nel terreno , e di tensione ai capi di una seconda coppia di elettrodi, anch'essi a diretto contato con il suolo.

L'analisi del comportamento della resistività apparente, al mutare della dimensione e posizione del dispositivo elettrodico di misura, permette di evidenziare efficacemente i contrasti di resistività esistenti nel sottosuolo, nell'ambito dei volumi investigati, fornendo così informazioni sulla presenza di discontinuità strutturali (faglie, superfici di scorrimento, ecc.), sulla presenza ed andamento nel sottosuolo delle falde acquifere e sulla individuazione dei fenomeni di inquinamento delle falde e dei suoli.

Il metodo geoelettrico risulta tra i più idonei per l'individuazione e la definizione di volumi contaminati eventualmente presenti in suoli e falde, in quanto le caratteristiche elettriche del sottosuolo sono fortemente influenzate dalla presenza di sostanze inquinanti, sia di natura inorganica che organica. Conseguentemente, si possono ottenere informazioni di dettaglio sui percorsi di infiltrazione degli inquinanti, spesso molto articolati, e sull'evoluzione nel tempo del processo di inquinamento, qualora l'indagine geoelettrica venga ripetuta periodicamente.

Le indagini geoelettriche sono tra i metodi geofisici più utilizzati anche per lo studio del sottosuolo in contesti archeologici; il loro scopo è quello di ricavare informazioni riguardanti la geometria e la localizzazione di elementi antropici sepolti, sfruttando le proprietà elettriche dei materiali di cui sono costituiti.

2.2.1 Teoria

Il metodo della resistività consta nella misura della differenza di potenziale elettrico in diversi punti della superficie del terreno. L'obiettivo è, quindi, ricostruire *modelli di resistività* del sottosuolo attraverso un processo di inversione dei dati acquisiti in fase di campagna.

Quando si fanno fluire cariche elettriche ΔQ attraverso un conduttore è possibile misurarne il passaggio in un intervallo di tempo definendo il concetto di *corrente elettrica I*:

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = I$$

In presenza di un conduttore ohmico la corrente elettrica incontra una *resistenza R*, misurata in Ohm, che dipende dalla *differenza di potenziale V*, misurata in Volt, e dalla corrente *I* secondo la Legge di Ohm:

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

che per un conduttore *omogeneo* ed *isotropo* e *cilindrico* di sezione S e lunghezza l *e* resistività tipica del materiale ρ, può essere espressa come:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

che evidenzia che la resistenza elettrica di un materiale dipende non solo dalle sue proprietà fisiche ma anche dalle sue caratteristiche geometriche.

Il metodo geoelettrico della resistività prevede l'energizzazione del terreno con corrente continua I ed una misura diretta, sulla superficie del suolo, della differenza di potenziale V. Combinando le equazioni precedenti ottengo:

$$g \frac{V}{I} = \rho_a$$

dove con g si indica un *fattore geometrico* in metri e con ρ_a la resistività apparente, la quale è influenza dal contributo delle diverse resistività degli elementi presenti nel sottosuolo. A differenza del modello cilindrico precedentemente descritto, nel caso di una misura geofisica non si verificano le condizioni di omogeneità ed isotropia del mezzo, è pertanto necessario introdurre il concetto di resistività apparente. Un successivo processo di inversione consente di passare dalle misure di resistività apparente al modello di resistività. (Jaeger, 1972)

2.2.2 Disposizione Strumentale al Suolo

Per realizzare misure di resistività si utilizzano 2 elettrodi conduttivi a contatto con il terreno, chiamati convenzionalmente A e B, che permettono l'immissione della corrente elettrica. A distanza nota, attraverso altri due

elettrodi, chiamati convenzionalmente M e N, viene misurata la differenza di potenziale *V*. Questa configurazione è chiamata quadripolo.

Le cariche, nel passare da un elettrodo all'altro, percorrono linee di corrente a profondità diverse: maggiore è la separazione tra A e B, maggiore sarà la diffusione della corrente nel terreno e, conseguentemente, la profondità raggiunta, e minore risulterà la differenza di potenziale registrata in superficie al centro del quadripolo con M e N fissati.

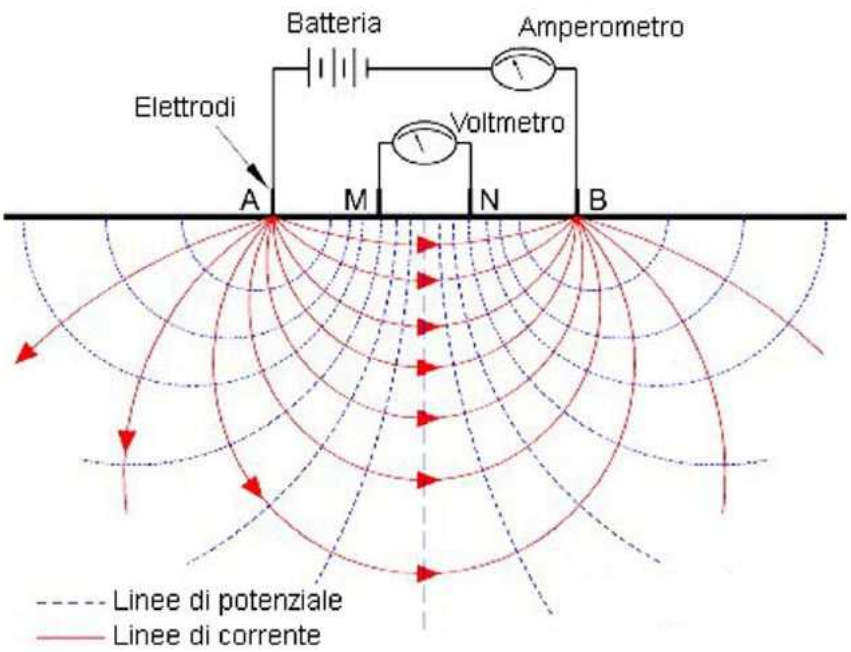


Illustrazione 25: Schema Quadripolare

Una volta che sono stati posizionati gli elettrodi, è possibile compiere una misura, alimentando con una corrente elettrica A e B e registrando la differenza di potenziale M e N. Allargando progressivamente i quattro elettrodi e mantenendo invariato il centro del quadripolo si ottiene un *sondaggio elettrico verticale, SEV*, mentre spostando ad ogni misura i quattro elettrodi lungo un allineamento orizzontale, si realizza un *profilo di resistività* a profondità costante.

In contesti archeologici, in cui la profondità delle strutture antropiche è nota con una buona approssimazione, il profilo di resistività è il metodo più comunemente utilizzato.

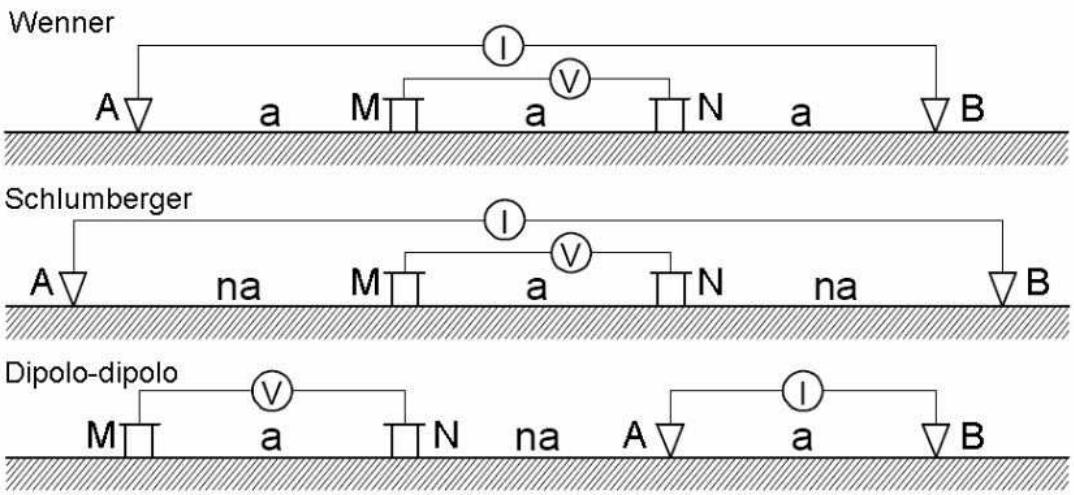


Illustrazione 26: Tipi di disposizione possibili

Nel quadripolo Wenner gli elettrodi sono sistemati in linea in modo da essere equidistanti tra loro secondo lo schema A M N B. Questo metodo risulta essere particolarmente sensibile ai cambiamenti verticali di resistività al di sotto del centro dello stendimento, ma meno sensibile alle variazioni di resistività orizzontali. Esso, pertanto, risulta essere adeguato nel caso si vogliano individuare strutture orizzontali (quali stratificazioni o pavimentazioni). In presenza di strutture verticali (ovvero con variazioni di resistività orizzontali) questo metodo risulta essere meno adatto.

Nel quadripolo Schlumberger lo schema d'acquisizione rimane A M N B, ma la distanza tra gli elettrodi A-M e N-B risulta essere un **multiplo *n*** (*Questo*

fattore n corrisponde al rapporto tra AM/MN = n) della distanza degli elettrodi di corrente A e B. Questa configurazione è discretamente sensibile sia alle strutture orizzontali sia alle strutture verticali.

Nella disposizione dipolo-dipolo, infine, il potenziale elettrico è misurato al di fuori della linea ideale che congiunge gli elettrodi di corrente: lo schema del quadripolo è dunque A B M N. Questo assetto è particolarmente sensibile alle strutture verticali, ma poco adatto all'indagine stratigrafica orizzontale: per questa ragione può essere particolarmente efficace in contesti archeologici il cui obiettivo spesso è quello di evidenziare strutture antropiche (muri, cisterne, trincee, ecc.) che provocano forti discontinuità orizzontali di resistività.

Fissata una linea, è possibile realizzare più profili a profondità crescenti; il risultato è un insieme di misure che formano una sezione 2D di resistività apparente, detta *pseudosezione*. Un sondaggio elettrico bidimensionale è, pertanto, un'indagine che permette lo studio delle variazioni di resistività sia lungo la direzione verticale sia lungo una direzione orizzontale. Attraverso un processo di inversione è possibile elaborare le misure di resistività apparente per ottenere un modello 2D di resistività del sottosuolo chiamato *tomografia elettrica*.

2.2.3 Risultati di una Indagine Geoelettrica

Va ricordato che, oltre alle inevitabili anisotropie e disomogeneità del terreno che impediscono una ricostruzione univoca del modello geometrico, la resistività del sottosuolo dipende da diversi fattori quali porosità, presenza di fluidi, composizione mineralogica, grado di fratturazione, grado di saturazione

nonché presenza di sostanze organiche come idrocarburi, solventi, etc. e, in particolare, la resistività delle rocce è sempre maggiore a quella dell'acqua nei pori, cioè risulta minima in corrispondenza del grado di saturazione massimo ed è tanto minore quanto maggiore è la porosità.

Per singole classi di rocce o terreni, inoltre, si registra una grande variabilità di valori di resistività, che a volte variano per diversi ordini di grandezza.

MATERIALE	*INTERVALLO DI RESISTIVITÁ*
Arenaria	60 – 10^4 Ωm
Argilla	1 – 120 Ωm
Sabbia	100 – 1000 Ωm
Limo	10 – 800 Ωm
Ghiaia	100 – 5000 Ωm
Calcare	100 – 5000 Ωm
Basalto	10 – 10^5 Ωm
Marmo	100 – 10^8 Ωm
Granito	100 – 10^6 Ωm

I sedimenti non consolidati, generalmente, hanno resistività inferiore rispetto alle rocce sedimentarie, tuttavia, proprio perché poco consolidati, risulta difficile stimare il valore della loro resistività, che dipende dalla porosità e dal contenuto in argilla. I terreni argillosi possiedono comunemente valori di resistività inferiori a quelli dei terreni sabbiosi. Il contenuto idrico, infine, ricopre un ruolo importante nella determinazione della resistività apparente del terreno, provocandone un abbassamento della resistività media.

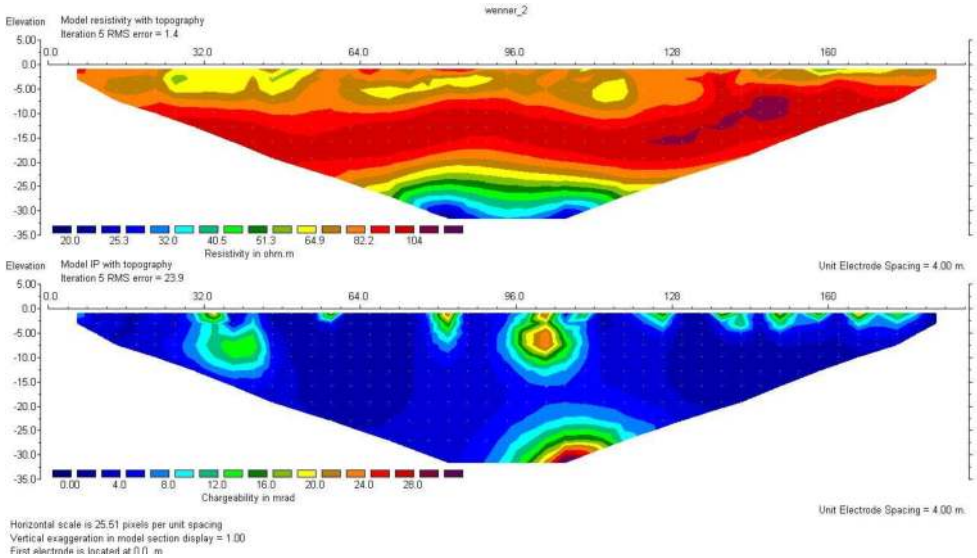


Illustrazione 27: Esempi di Tomografia elettrica

Alla luce di queste considerazioni, del tutto generali, è evidente che non esiste una corrispondenza biunivoca tra valore di resistività riscontrato nel modello e materiale presente nel suolo e nel sottosuolo. L'interpretazione dei dati rilevati non può quindi prescindere delle caratteristiche geologiche, archeologiche e fisiche del sito indagato.

2.3 Il Ground Probing Radar

Il termine Georadar, o Ground Penetrating Radar G.P.R., identifica una apparecchiatura radar dedicata all'indagine del sottosuolo, delle strutture e dei manufatti in genere. La parola radar deriva dalla denominazione inglese *"radio detection and ranging"*, radiorilevamento e misura della distanza, che identifica universalmente le apparecchiature con le quali si effettuano, sfruttando le proprietà delle onde elettromagnetiche, rilevamenti della posizione di oggetti.

Un radar emette un fascio di onde elettromagnetiche che viene diretto contro un bersaglio da rilevare, tale fascio viene riflesso dall'oggetto in questione ed un

ricevitore, collocato in prossimità del trasmettitore, raccoglie una piccola frazione dell'energia riflessa e fornisce le informazioni necessarie al rilevamento.

La distanza, e quindi la posizione, dell'oggetto da rilevare sfrutta la relazione che vi è tra dall'intervallo di tempo che separa l'istante di emissione di un impulso dall'istante di ricezione dell'eco relativa ed il suo rapporto con lo spazio percorso.

Il GPR è un sistema di controllo diagnostico non invasivo che si basa sullo stesso principio dei radar convenzionali, ma con alcune differenze significative:

- in un radar convenzionale l'onda elettromagnetica irradiata si propaga attraverso l'aria, mentre nel radar per introspezione del suolo si propaga nel suolo o in altri materiali solidi;
- i radar convenzionali possono rivelare bersagli a distanza di molti chilometri, mentre il radar per introspezione del suolo opera generalmente a distanze di pochi metri;
- la risoluzione dei radar convenzionali è dell'ordine delle decine o centinaia di metri, mentre il radar per introspezione del suolo ha risoluzioni dell'ordine delle decine di centimetri.

In questi ultimi anni l'utilizzo delle tecniche GPR per le prospezioni geofisiche, ha assunto una sempre maggiore diffusione; si è assistito infatti ad un notevole aumento di interesse nei confronti di questa tecnica geofisica dipendente in gran parte dall'economia dei costi e dei tempi di esecuzione, nonché dal carattere non distruttivo dell'indagine e dalla semplice interpretabilità dei risultati.

Il georadar è uno strumento versatile che consente di ottenere, con alta precisione, un profilo continuo del mezzo investigato, che sia terreno naturale, muratura o pavimentazione stradale, dal quale è possibile ottenere in tempi rapidi numerose informazioni. L'utilizzo di questa tecnologia consente, infatti, di rilevare e

localizzare la presenza nel mezzo investigato di oggetti, strutture sepolte, cavità o comunque di qualsiasi discontinuità presente.

2.3.1 Nascita del GPR

Le prime applicazioni delle tecniche di indagine geofisica risalgono circa al 1930, con applicazioni nella ricerca archeologica finalizzate a captare la profondità di un ghiacciaio. La tecnologia fu ampiamente trascurata fino alla metà del secolo scorso, nell'immediato dopoguerra. In quegli anni si verificò un rapido ed intenso sviluppo di tali tecniche, soprattutto con l'impiego delle tecnologie di derivazione bellica quali i metal detector, sistemi di rilevazione elettromagnetici ed il radar.

Tra il 1950 ed il 1960 le strumentazioni e le attrezzature utilizzate risultavano ancora molto complesse ed ingombranti e richiedevano lunghi tempi per l'acquisizione dei dati.

Recentemente, i notevoli progressi tecnologici nel campo dell'elettronica e dell'informatica hanno trovato applicazioni rivoluzionarie anche nel campo della prospezione geofisica applicata, inizialmente, in campo geologico ed archeologico e, successivamente, in quello edile e civile. Le apparecchiature moderne, ormai di limitate dimensioni, portatili e di facile impiego, sono dotate di gestione e controllo automatico delle operazioni di acquisizione dati e di memorie elettroniche capaci di creare un database dei valori registrati. Con semplici operazioni, i dati rilevati vengono trasferiti direttamente al computer per l'elaborazione automatica e la restituzione grafica, sotto forma di carte o di grafici delle informazioni raccolte, in cui l'andamento, la morfologia delle curve, o di campionature di colori diversi, visualizzano i vari lineamenti strutturali sepolti. (Conte, 2004)

2.3.2 Funzionamento del Georadar

Il GPR ad impulso elettromagnetico è un sistema elettronico, complesso e tecnologicamente avanzato, in grado di indagare i terreni ed i materiali con notevole dettaglio, utilizzando la riflessione di onde elettromagnetiche. La generazione e la ricezione dei segnali a radiofrequenza, compresi di solito nel range 100 Mhz – 1.5 Ghz, è operata da una o più antenne che vengono fatte scorrere sul mezzo che si desidera indagare.

I dati raccolti, opportunamente elaborati, vengono memorizzati e visualizzati su una unità di controllo, la stessa che genera gli impulsi necessari al funzionamento delle antenne. Si perviene così alla visualizzazione di un radargramma, risultato dell'applicazione di una serie di principi fisici.

La teoria di Maxwell afferma che un dipolo, eccitato da un voltaggio ad alta frequenza, genera un campo elettrico parallelo al dipolo stesso. Le cariche elettriche in moto all'interno del campo elettrico generano un campo magnetico perpendicolare al dipolo stesso. Le proprietà elettriche del mezzo investigato esercitano una grande influenza sulla risposta del GPR**,** al contrario di quelle magnetiche che non presentano considerevoli variazioni da materiale a materiale.

Esistono due tipologie di corrente elettrica: corrente di conduzione e corrente di spostamento. La corrente di conduzione è generata dal movimento di cariche attratte dal campo elettrico. La grandezza caratteristica che la contraddistingue è l'intensità di corrente J_c , correlata al campo elettrico dalla relazione lineare:

$$J_c = \sigma E$$

indicando con σ la conduttività, ovvero la capacità del materiale di condurre corrente elettrica, e con E il campo elettrico.

La corrente di spostamento è dovuta alla distanza fra le cariche e risulta direttamente proporzionale al campo elettrico *E* applicato tramite la costante dielettrica del mezzo ε, che misura la capacità di una mezzo di immagazzinare una carica elettrica:

$$D = \varepsilon E$$

L'intensità di corrente di spostamento J_p è la derivata dello spostamento in base al tempo:

$$Jp = \frac{dD}{dt} = \varepsilon \cdot \frac{dE}{dt}$$

La corrente *J,* che attraversa il mezzo durante una indagine con GPR, è la somma della corrente di conduzione e della corrente di spostamento, ovvero:

$$J = J_c + J_p$$

Che scritta nel dominio delle frequenze

$$J = (\sigma + i\,\omega\,\varepsilon)$$

Con $\omega = 2\pi f$

f frequenza di eccitazione

i numero immaginario del campo complesso

Un'antenna, sollecitata da un impulso elettrico, genera un campo elettromagnetico che si propaga attraverso il mezzo che subisce un decadimento dell'ampiezza proporzionalmente alla distanza coperta.

L'equazione di Maxwell che esprime la propagazione del campo elettromagnetico, lungo una direzione z, in un mezzo omogeneo, può essere scritta come:

$$E = E_x \; e^{-\gamma x}$$

dove γ è la costante di propagazione pari a $\gamma = i\alpha + \beta$
con α fattore di attenuazione e β costante di fase, dipendenti dalla conduttività, dalla costante dielettrica e dalla permeabilità del mezzo attraversato.

Nel caso in cui si potesse ritenere nulla la σ del mezzo investigato, questo annullerebbe il fattore d'attenuazione, cosicché non si avrebbe decadimento d'energia con la profondità di investigazione. In generale questo non è ammissibile, ma è tuttavia auspicabile che la conduttività del mezzo sia sufficientemente bassa da determinare un fenomeno di assorbimento ad essa proporzionale.

La velocità con la quale l'onda elettromagnetica attraversa il mezzo può essere espressa dalla formula:

$$V = \sqrt{1/\varepsilon\mu}$$

con $\varepsilon = \varepsilon_o \, \varepsilon_r$, dove ε_o è la costante dielettrica in aria e ε_r è la costante dielettrica relativa e, rispettivamente, $\mu = \mu_o \, \mu_r$ dove μ_o è la permeabilità magnetica in aria e μ_r è la permeabilità relativa.

Indichiamo ora con *C* la velocità dell'onda in aria, essa sarà espressa come:

$$C = \sqrt{1/\varepsilon_0 \mu_0}$$

che ci porta al valore della velocità d'onda elettromagnetica:

$$V = C/\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$$

il valore μ_r risulta circa uguale ad uno in qualunque mezzo, quindi la velocità sarà influenzata esclusivamente dalla costante dielettrica relativa.

Quando un'onda elettromagnetica incide la superficie di separazione fra due mezzi con differenti caratteristiche elettromagnetiche, essa viene in parte riflessa ed in parte trasmessa.

La quantità di energia riflessa e trasmessa dipende dai coefficienti *R* e *T*, che a loro volta sono legati alle impedenze magnetiche Z_1 e Z_2 dei 2 mezzi.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \qquad T = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

L'impedenza elettromagnetica dipende dalla costante dielettrica, dalla permeabilità magnetica e dalla conduttività, ciò implica che, affinché si possa generare una riflessione, è necessario avere un contrasto di μ, ε o σ; ma per quanto già affermato riguardo l'invariabilità di μ, saranno contrasti di σ o ε a determinare tale fenomeno.

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{i\omega\varepsilon + \sigma}}$$

riporto nella pagina seguente una tabella contenente alcuni valori di ε_r , di σ , di V e α sperimentalmente misurati ad una frequenza di 100 MHz, per alcuni materiali geologici caratteristici:

MATERIALE	ε_r	σ *(S/m)*	*V (m/ns)*	α *(dB/m)*
Aria	1	0	0,3	0
Acqua Distillata	80	0,01	0,033	3×10^{-3}
Acqua Dolce	80	0,5	0,033	0,1
Acqua Salata	80	3×10^{4}	0,01	10^{3}
Sabbia Secca	3 - 5	0,01	0,15	0,01
Sabbia Umida	20 - 30	0,1 - 1	0,06	0,03 – 0,3
Argilla	5 - 40	2 - 1000	0,06	1 - 300
Granito	4 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Ghiaccio	3 - 4	0,01	0,16	0,01

Il processo di funzionamento pratico del georadar è riassumibile nella seguente procedura:

- L'unità di controllo genera un impulso trigger;
- L'impulso viene trasmesso, tramite il cavo, all'elettronica trasmittente del trasduttore;
- Nel trasduttore ogni impulso trigger viene trasformato in un impulso bipolare e aumentato in ampiezza (il segnale elettrico diventa onda elettromagnetica);

- L'impulso viene quindi trasferito nel sottosuolo attraverso l'antenna. Le dimensioni dell'antenna e le proprietà elettriche del sottosuolo determinano la frequenza dell'energia propagata;
- Sotto la superficie, le riflessioni avvengono in corrispondenza di contrasti di proprietà dielettriche;
- Il ricevitore dell'antenna intercetta il segnale di ritorno e lo invia all'unità di controllo, dove viene processato e visualizzato.

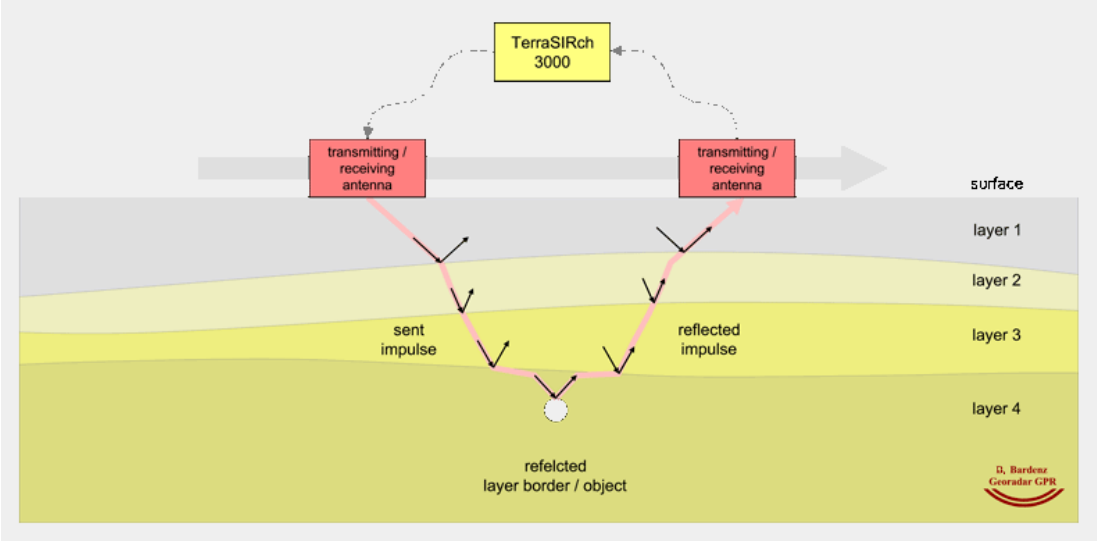


Illustrazione 28: Funzionamento Georadar

I sistemi GPR commerciali sono progettati per produrre segnali a banda larga in maniera da poter essere utilizzati con antenne di frequenze differenti, assecondando così le necessità dell'utilizzatore.

All'interno del ricevitore, i dati raccolti vengono filtrati e campionati per la restituzione di un radargramma, il cui tempo zero non coinciderà con quello di emissione dell'impulso, in quanto risulta necessario considerare il tempo di viaggio dell'onda elettromagnetica attraverso i cavi che collegano il GPR alle antenne.

La scelta dell'antenna è una fase fondamentale di una indagine georadar e si effettua considerando che la frequenza dell'antenna deve tener conto delle caratteristiche meccaniche ed elettriche dei materiali, della risoluzione spaziale richiesta e della profondità da indagare.

I sistemi GPR commerciali utilizzano solitamente antenne dipolari, costituite cioè da una trasmittente TX e una ricevente RX, le cui dimensioni sono dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda del segnale emesso.

Nella Configurazione Mono-statica, trasmettitore e ricevitore sono inclusi all'interno della medesima struttura, questa modalità utilizza per lo più antenne con frequenza medio-alta (400-1500 Mhz).
Nella Configurazione Bi-statica i due elementi sono separati e si impiegano tendenzialmente basse frequenze.

Le antenne non emettono segnale ad un'unica frequenza, bensì all'interno di un certo spettro (bandwidth), compreso fra $fc/2$ e $2\ fc$, con fc frequenza centrale della banda , corrispondente ad un picco di intensità del segnale.
Il comportamento dell'antenna risulta influenzato dagli effetti generati dall'accoppiamento con il terreno: innanzitutto si nota una traslazione dello spettro verso frequenze più basse rispetto a quelle emesse all'origine (downloading effect); in secondo luogo una sensibile modificazione del grafico di radiazione dell'antenna.

Il grafico nel piano ortogonale al dipolo, ossia il piano nella direzione di spostamento del campo elettrico indicato con TE, mostra un massimo in corrispondenza dell'angolo critico all'interfaccia aria-suolo. Al contrario il

grafico nel piano parallelo piano nella direzione dello spostamento del campo magnetico TM, presenta un minimo nella stessa direzione ed è caratterizzato da tre lobi. In ogni caso l'impronta orizzontale sul piano TE risulta più ampia rispetto a quella sul TM, ovvero l'area irradiata nel piano normale al dipolo risulta più ampia rispetto a quella nel piano del dipolo stesso. (Conte, 2004)

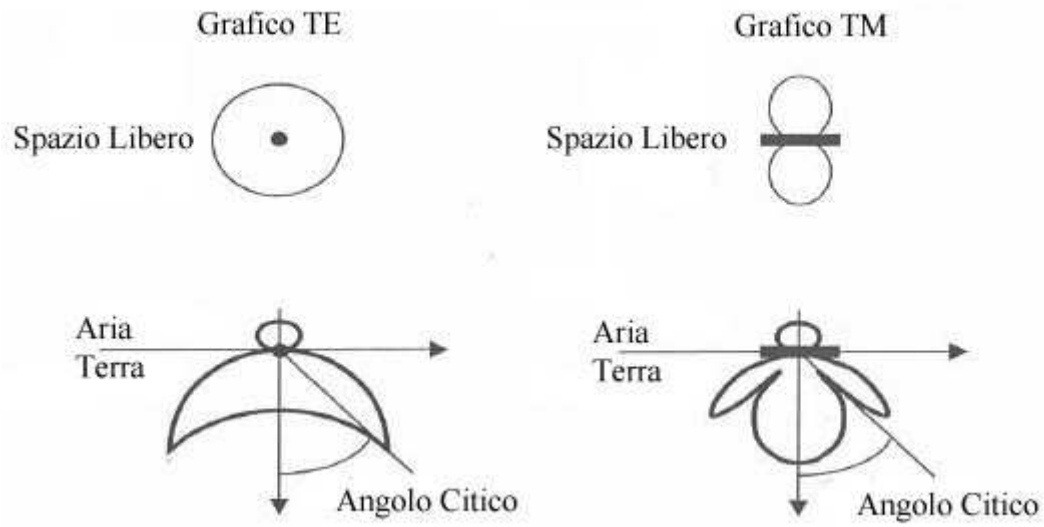


Illustrazione 29: Comportamento delle onde emesse nel terreno

Ciò spiega il motivo per cui la scelta dell'orientamento dell'antenna influenza grandemente i risultati ottenibili dalle indagini. Se la trasmittente e la ricevente sono poste perpendicolarmente alla direzione d'investigazione la sovrapposizione delle loro impronte risulta maggiore e ciò garantisce che oggetti sparsi all'interno del mezzo o riflettori possano essere osservati per profondità e intervalli di distanza più ampi.

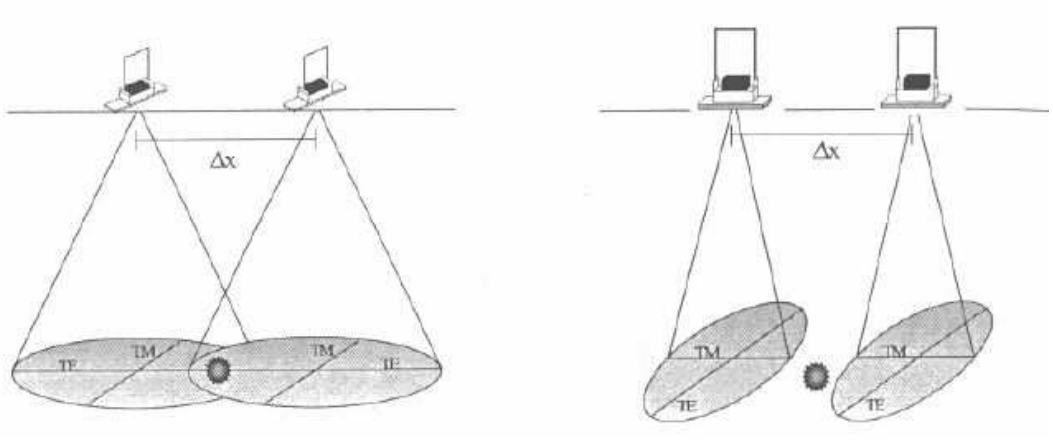


Illustrazione 30: Copertura delle onde nelle due direzioni TE e TM

Ulteriore fattore da considerare nella scelta di una antenna è rappresentato dalla profondità di indagine. A causa della lunghezza del percorso dell'onda verso il target da individuare e dei fenomeni di assorbimento, l'energia di ritorno potrebbe essere più debole rispetto al rumore e quindi irrivelabile.
Antenne ad alta frequenza, superiore ai 400 Mhz, forniscono elevate risoluzioni spaziali ma limitate profondità di penetrazione, quindi sono adatte per investigare spessori modesti. Al contrario, antenne a bassa frequenza consentono una penetrazione superiore, con una penalizzazione, tuttavia, in termini di risoluzione spaziale.

Riassumendo, i fattori che influenzano la scelta di una antenna con una determinata frequenza centrale sono:

- Dimensioni dell'antenna, proporzionali alla lunghezza d'onda;
- Profondità d'indagine, le basse frequenze presentano coefficienti d'assorbimento più bassi;
- Risoluzione, 2 riflessioni orizzontali risultano distinguibili qualora siano distanti fra loro più di $\lambda/4$;

- Effetti di dispersione, se un oggetto presenta dimensioni comparabili con la lunghezza d'onda emessa si riscontra una perdita d'energia a causa dei fenomeni di dispersione.

FREQUENZA CENTRALE (MHz)	PENETRAZIONE (m)	RISOLUZIONE VERTICALE (m)	DIMENSIONI (m)
31	16	1,6	4,8
63	8	0,8	2,4
125	4	0,4	1,2
250	2	0,2	0,6
500	1	0,1	0,3
1000	0,5	0,05	0,15
2000	0,25	0,03	0,075

Il GPR risulta quindi particolarmente adatto per indagare materiali con bassa conduttività elettrica come il calcestruzzo, la sabbia e l'asfalto. Il segnale attraversa tali mezzi con una velocità che dipende dalla loro costante dielettrica ε, ed in particolare risulta inversamente proporzionale ad essa.

La riflessione viene prodotta quando l'onda elettromagnetica intercetta lo strato di separazione fra mezzi con differenti proprietà dielettriche. Tanto più questo contrasto è accentuato, tanto maggiore sarà la riflessione, che espressa come coefficiente di riflessione R:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}}$$

Il metallo, indipendentemente dalle sue dimensioni, è un materiale completamente riflettente, ma impedisce che target posti al di sotto possano essere individuati.

Quando l'onda incide una superficie continua di separazione fra due mezzi, l'antenna riceve in maniera ripetitiva riflessioni provenienti da questa, cosicché l'immagine che ne risulta ricalca il profilo di tale piano.

Qualora invece l'antenna intercetti un target di tipo lineare, come un tubo o una barra d'armatura, la riflessione assume una forma iperbolica. Ciò si verifica perché la trasmittente genera un segnale che viene irradiato all'interno di un cono con una certa apertura angolare e quindi il radar vede l'oggetto non solo quando vi si trova esattamente al di sopra, ma anche quando vi si sta avvicinando.

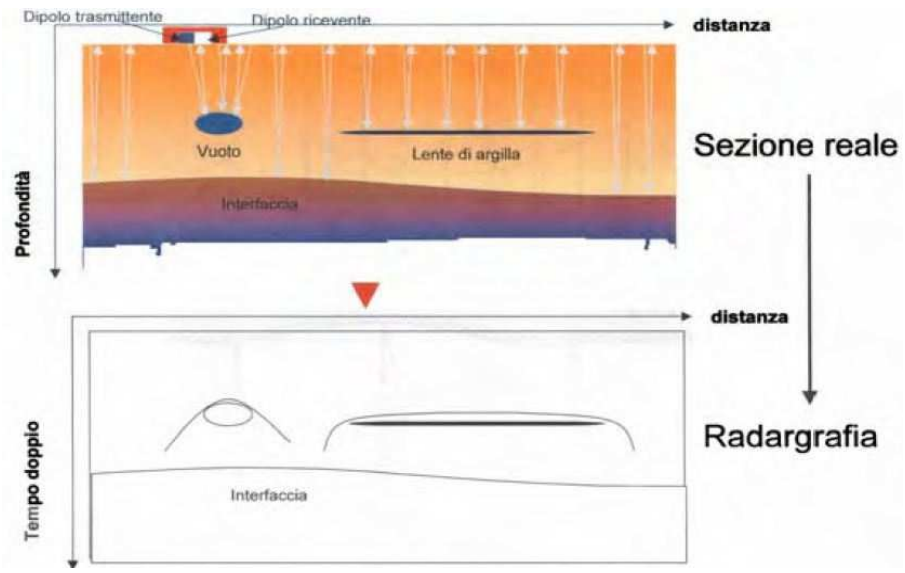


Illustrazione 31: Esempio di traccia radar

La dimensione delle iperboli risulta direttamente proporzionale alla velocità del segnale ed inversamente proporzionale alla spaziatura tra le scansioni.
L'intensità della singola riflessione è legata invece alle caratteristiche del materiale: oggetti metallici producono riflessioni molto luminose, mentre elementi in PVC producono riflessioni meno evidenti. Anche la dimensione del target influisce sulla potenza del segnale di ritorno, che risulta tanto maggiore quanto più cresce il diametro dell'oggetto nascosto.
Due oggetti dello stesso materiale, che presentino stesso diametro ma sezione, una volta cava, una volta piena, producono riflessioni identiche.
Target composti, come condotte in PVC contenenti cavi elettrici, producono riflessioni che danno origine a iperboli distorte.
La forma della riflessione prodotta da un target lineare è, naturalmente, anche legata alla direttrice lungo la quale avviene la scansione: se essa è parallela allo sviluppo dell'elemento, allora l'immagine prodotta sarà simile a quella di un piano continuo; viceversa per una direzione di scansione perpendicolare la riflessione sarà parabolica.

La precisione nell'individuazione dei target dipende dal pattern dell'antenna e dallo *scan spacing*, se il segnale emesso dall'antenna fosse sostanzialmente verticale, l'immagine restituita sarebbe quella di un punto collocato nella sua esatta posizione. Invece le onde sono emesse all'interno di un cono con apertura di circa 60° e questo genera l'iperbole. Il vertice dell'iperbole individua l'esatta posizione, all'interno del mezzo, dell'oggetto che ha determinato la riflessione e la sua ricerca diventerà quindi uno dei principali obiettivi in fase di rielaborazione dei dati. Non potrà tuttavia essere trascurata una certa incertezza, dello stesso ordine di grandezza dello scan spacing e comunque mai inferiore al centimetro.

La risoluzione spaziale dell'antenna, ovvero la sua capacità di produrre immagini distinte di oggetti separati nello spazio, è legata alla lunghezza d'onda dell'onda elettromagnetica emessa.

La distanza minima fra due target, affinché possano percepirsi come distinti all'interno di un radargramma, deve essere almeno pari ad un quarto della lunghezza d'onda emessa, sia lungo la direzione orizzontale che verticale.

Esistono tre principali metodologie per la conduzione di prospezioni tramite GPR:

- Metodo della *riflessione*, è la più diffusa e consta in una coppia di antenne, una trasmittente ed una ricevente, sono utilizzate per raccogliere riflessioni verticali;
- Metodo *Common Midpoint,* consiste nell'aumentare progressivamente la distanza fra l'antenna trasmittente e la ricevente, mantenendo fisse le coordinate del punto di mezzo, affinché le riflessioni provengano sempre dallo stesso punto in profondità, a condizione che il riflettore sia orizzontale. Dall'analisi delle relazioni fra spazio e tempo, si arriva alla stima di come la velocità varia con la profondità;
- Metodo in *trasparenza*, trasmittente e ricevente sono collocate nelle due opposte facce del mezzo da investigare. Questo metodo necessita antenne speciali che possano penetrare all'interno di pozzi, realizzati ad hoc per l'effettuazione dell'indagine. Tale metodo consente di ottenere una tomografia dell'area compresa all'interno dei pozzi.

Una volta effettuata la scelta dell'antenna è immediato stabilire quale dovrà essere l'intervallo di campionamento temporale, *sampling interval*, dei dati.

L'intervallo deve soddisfare il teorema di Nyquist secondo cui la frequenza di campionamento, inverso dell'intervallo di campionamento, deve essere almeno doppia della massima frequenza di segnale, al fine di prevenire fenomeni di aliasing, ossia il fenomeno per il quale due segnali analogici diversi possono diventare indistinguibili una volta campionati.
Poiché le antenne radar sono normalmente progettate per emettere segnale entro una banda larga quanto la frequenza centrale dell'antenna, il suddetto requisito si traduce in:

$$F_c > 2\,(1{,}5\,F) = 3\,F$$

dove F_c è la frequenza centrale di campionamento ed F è la frequenza centrale dell'antenna scelta.
Benché non strettamente necessario, un certo margine oltre a quanto imposto dal teorema di Nyquist può essere conveniente al fine di avere una buona visualizzazione delle forme d'onda.

Il teorema di Nyquist si applica anche per la scelta dell'intervallo di campionamento spaziale, ossia della interdistanza tra le tracce registrate lungo il profilo. Nel caso più generale, il teorema di Nyquisit impone che l'intervallo di campionamento spaziale Δx soddisfi la seguente condizione:

$$\Delta x < \lambda_{min} / 4$$

in cui max $\lambda_{min} = V / F_{max}$ è la minima lunghezza d'onda emessa dall'antenna.

Ma la frequenza massima emessa dall'antenna è circa 1.5 volte la sua frequenza nominale, quindi possiamo scrivere:

$$\Delta x < \frac{V}{6F}$$

Ad esempio, per una muratura in cui il segnale si propaga con velocità di 12 cm/ns e per un'antenna da 1 GHz, il requisito di Nyquisit impone una interdistanza tra le tracce non superiore a 2cm.

Il requisito garantisce l'assenza di fenomeni di aliasing spaziale per qualsiasi direzione di provenienza della riflessione radar. Se in un caso specifico, l'utente può prevedere quale sarà la direzione dei segnali più radenti che si aspetta di registrare, ad esempio quelli prodotti dal riflettore più inclinato di α rispetto alla superficie di scansione allora la relazione per il calcolo di Dx diventa:

$$\Delta x < \frac{V}{6F \sin \alpha}$$

Una volta scelti i parametri di acquisizione occorre decidere come e quanti profili eseguire per raggiungere gli obbiettivi preposti. In molti casi, l'esecuzione di profili bidimensionali è sufficiente allo scopo. Possibilmente si cercherà di eseguire i profili in modalità continua, ossia trascinando l'antenna ad una velocità all'incirca costante senza fermarsi nei punti di acquisizione. Questo riduce di parecchio i tempi di acquisizione rispetto a misure eseguite in modo puntuale.

Per far si che ciò sia possibile occorre che la superficie su cui si esegue il lavoro sia piana, non disturbata da elementi decorativi o ostacoli, in modo che l'antenna possa scivolare senza difficoltà e potendo sfruttare una rotella strumentata chiamata *encoder*.

L'encoder si applica sull'antenna per misurare l'avanzamento della posizione e fornire automaticamente il comando di trigger secondo l'intervallo di campionamento spaziale impostato dall'utente.

L'orientamento del profilo può avere importanza in alcuni casi, soprattutto quando l'indagine ha tra gli obiettivi la localizzazione di elementi in cui una dimensione domina sulle altre come nel caso di travi. (Conte, 2004)

Capitolo 3

Precedenti Tentativi di Accoppiamento di Prospezioni Geofisiche / GPS: Risultati e Problematiche

Nel successivo capitolo verranno illustrati alcuni casi di studio, nazionali ed internazionali, in merito all'utilizzo congiunto della tecnologia di posizionamento GPS ed il rilievo sub-terreno con metodo GPR , Megnetometrico o Geoelettrico.

Ogni caso di studio verrà illustrato nelle sue parti di maggior rilevanza ai fini di questo studio, evidenziandone le difficoltà tecniche della acquisizione dati e della restituzione, le finalità proposte ed i limiti in cui ci si è imbattuti.

Al termine del capitolo si tenterà di organizzare, in base a quanto risaltato dai casi esposti, una procedura che tenda a limitare le problematiche sorte e favorisca al meglio la fase di acquisizione dati.

3.1 GPR e GPS Data Integration: Esempio di applicazione in Antartide

La Comunità Scientifica Internazionale operante in Antartide pianificò un programma scientifico chiamato ITASE, *International Trans Antartic Scientific Expedition* (Spedizione Scientifica Trans Antartica Internazionale) con il presupposto di accrescere la conoscenza del contributo dell'Antartide ai problemi del cambiamento climatico globale.
Il programma era basato su di un numero pianificato di traversate attraverso la piana Antartica ove gli scienziati avrebbero collezionato dati utili alla migliore comprensione dei problemi su scala globale.

Durante l'estate australe del 1998/1999, una traversata scientifica, dalla Terra Nova Bay alla Dome C, fu compiuta da un gruppo di ricerca italiano. L'intento era quello di dimostrare che i cambiamenti su scala globale sono strettamente connessi al cambio climatico e che, una loro memoria incontaminata, è registrata nei ghiacciai del continente antartico. Analisi sul nucleo di ghiaccio mostrano la stratigrafia dell'accumulo di nevi anno dopo anno, conformatesi in base alle condizioni ambientali circostanti. Le variazioni spaziali dell'accumulo di nevi, rilevato tramite informazioni localizzate, non risultava sufficientemente rappresentativo delle condizioni al contorno.

La possibilità di connettere informazioni sui nuclei ghiacciati ritrovò riscontro nella tecnica della prospezione GPR, ed i dati topografici vennero corretti tramite il posizionamento GPS. La spedizione Trans Antartica italiana poté beneficiare di trattori pesanti, come Caterpillar e gatti delle nevi, trainanti slitte per il trasporto di carburante e tutta la strumentazione necessaria per il rilievo e per la sopravvivenza del gruppo di studio per i successivi tre mesi.

L'Antartide è principalmente composto da un altopiano, situato a circa 2500 metri sul livello del mare e la sua unica zona costiera è caratterizzata da montagne e ghiacciai di sbocco.

Il punto di inizio della spedizione italiana fu localizzato, appunto, lungo la costa; ciò significava che, per raggiungere la piana, risultava necessario attraversare uno dei ghiacciai, chiamato *Ghiacciaio Reeves,* ove fu rilevata la presenza di una moltitudine crepacci. La traversata intersecò all'incirca 300 km di terreno pericoloso che necessitò la preventiva ispezione della rotta da seguire, per garantire la sicurezza del team.

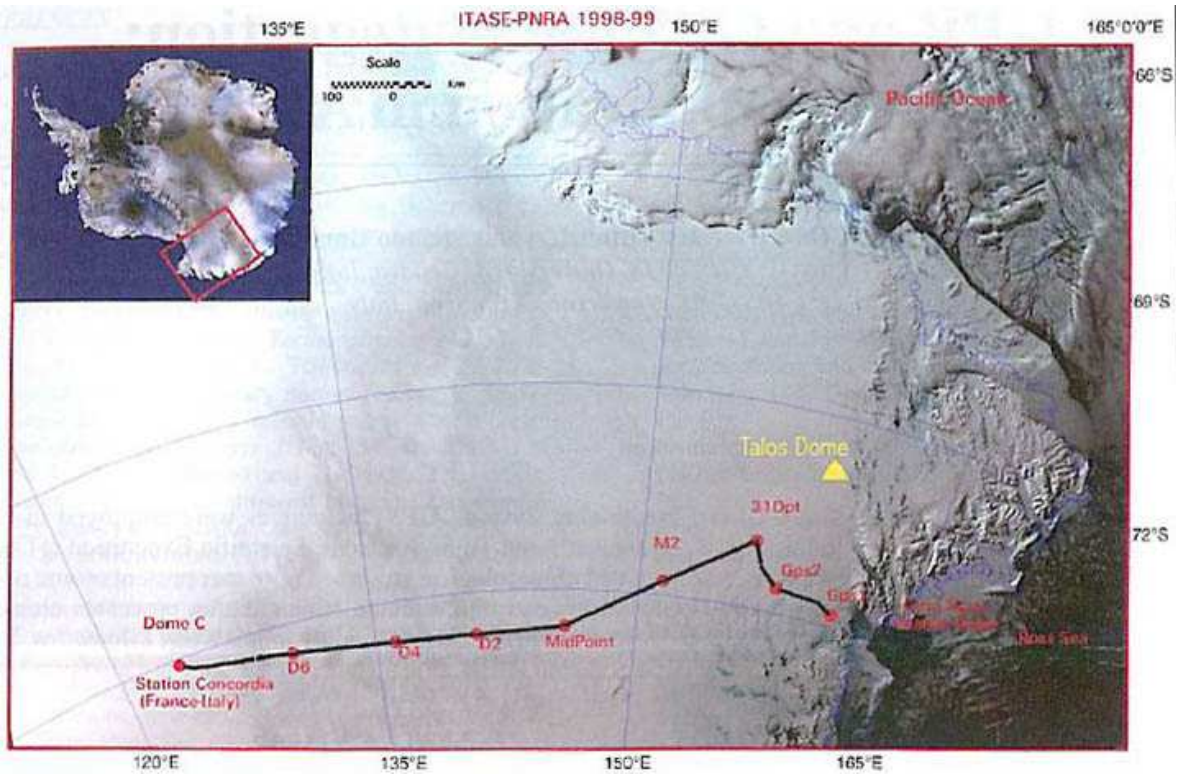


Illustrazione 32: Rotta della Spedizione Italiana 1998-1999

3.1.1 GPR and GPS Integration for Glaceological Purposes

Le tecniche geofisiche GPR e GPS, nel corso degli anni, sono state oggetto di notevoli migliorie; progettate per obbiettivi estremamente differenti, per anni sono state utilizzate come punto di riferimento dei rispettivi campi di applicazione. La tecnologia GPR è attualmente tra le più importanti indagini non distruttive ed è con successo applicata in molte condizioni differenti tra le quali: individuazione di oggetti sepolti, prospezioni archeologiche, localizzazione dei vuoti, studi stratigrafici ecc.

Il GPS risulta ormai compatibile con una serie di tecniche di indagine geodetica come, ad esempio, il posizionamento di precisione, individuazione dello scorrimento delle terre, cartografia, navigazione.

In alcuni casi, e per particolari condizioni, è possibile prendere solo alcune delle informazioni necessarie per la corretta interpretazione del problema.

Per queste ragioni, uno dei più importanti aspetti di questa spedizione fu l'integrazione dei due metodi. Utilizzando i risultati GPS come riferimento, i layer stratigrafici desunti dai dati GPR poterono essere posizionati non più rispetto alla superficie, come solitamente accadeva, ma rispetto alla quota ellissoidica o quasi ortometrica.

Con lo scopo di accoppiare i due risultati, si rese necessaria la sincronizzazione delle due acquisizioni su base temporizzata. Per combinare i due tipi di dati collezionati venne studiato un metodo logico espresso nell'*illustrazione n. 32*.

L'acquisizione dei dati GPR venne in fase di campagna regolata direttamente sul tempo GPS e l'intervallo di acquisizione fu calcolato come una frazione intera di minuto. Successivamente, i dati ottenuti da entrambe i rilievi vennero

processati ottenendo una nuova sezione GPR dove la stratigrafia elettromagnetica fu posizionata considerando sia la quota ellissoidale che le coordinate geografiche di superficie.

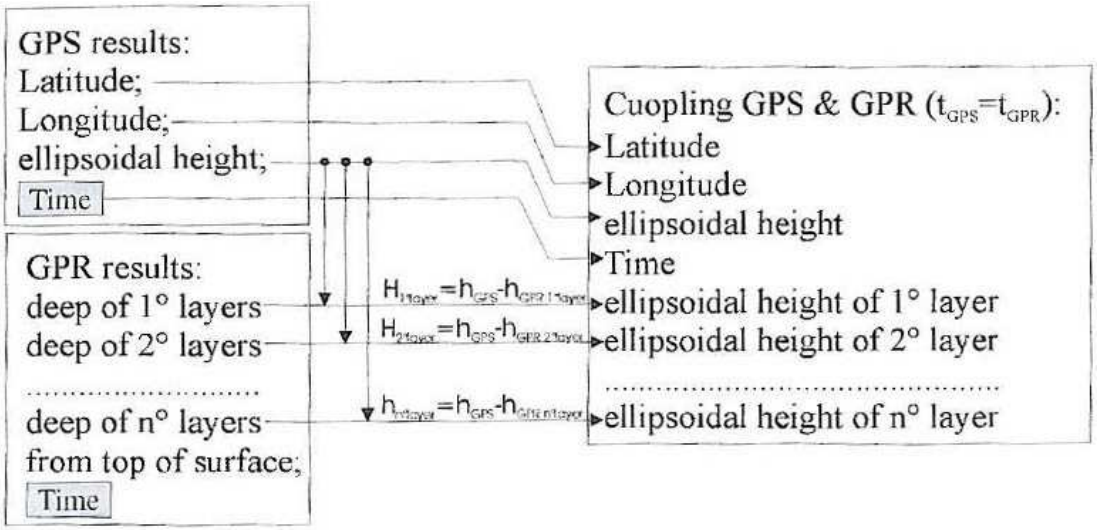


Illustrazione 33: Schema di accoppiamento dati GPR/GPS

3.1.2 Integrazione GPR/GPS per la stratigrafia delle nevi

Sulla base dell'esperienza della prima traversata italiana, dalla Terra Nova Bay alla Talos Dome, l'unità mainframe fu montata all'interno della cabina del gatto delle nevi assieme alla strumentazione GPS, la cui antenna venne posizionata su una piccola base in legno. I principali parametri di acquisizione furono 200 ns, per quanto riguardava l'accuratezza del range verticale, e da 1 a 5 scansioni subterrene. La velocità del gatto delle nevi venne mantenuta tra gli 8 ed i 12 km/h, il che significava all'incirca una scansione ogni 3 metri.

Il metodo GPR venne utilizzato per determinare sia la situazione degli strati lungo la rotta della traversata, sia per la scelta dei siti di perforazione nonché per individuare eventuali crepacci sotterranei. Il rilievo GPS venne poi elaborato utilizzando due Master Station site all'inizio ed alla fine della rotta;

questa situazione logistica non ottimale fu imposta dalla difficoltà di installare ulteriori stazioni GPS di riferimento lungo il tragitto.

A questo problema si aggiunse la condizione della irregolarità della struttura ionosferica che influenzava all'incirca una fascia di $\pm$ 30° dall'equatore geomagnetico nella regione polare. Questo effetto è particolarmente critico per il rilievo GPS di alta precisione, in quanto esso richiede la risoluzione delle ambiguità di fase ed il ripristino dei Cycle Slip. Algoritmi di post-elaborazione, a volte, possono fallire su entrambe le portanti, in condizioni di effetto ionosferico di notevole entità, creando problemi di risolvibilità per un elevato numero di cycle slips.

In Antartide vi è, inoltre, la copertura di un alto numero di satelliti, da sei a dieci, ma con la GDOP Geometric Diluition of Position, indice di qualità del posizionamento, viene evidenziata la scarsa accuratezza dovuta al basso numero di satelliti tracciabili con elevazione ottimale, in quanto la massima è sempre inferiore ai 65°. Dato che la copertura Antartica non risulta ottimale, la disponibilità di un alto numero di satelliti tracciati contemporaneamente è utile per applicazioni cinematiche in quanto rafforza la robustezza del metodo ed aiuta la ricerca delle ambiguità per gli algoritmi.

La determinazione del profilo altimetrico è uno dei più ambiziosi, e problematici, aspetti delle attività geodetiche lungo la traversata. Utilizzando gli approcci standard per il procedimento delle doppie differenze, è necessario utilizzare almeno un GPS come punto di riferimento. Altro aspetto limitante è la configurazione ambientale, la piana antartica è caratterizzata dalla totale assenza di riferimenti naturali, quindi ogni esempio, esperimento ed operazione richiede la massima accuratezza nel posizionamento per essere completo.

Per quanto riguarda le problematiche del GPR, la stratigrafia elettromagnetica

è ispezionata sino ad un massimo di 15-20 metri. Le proprietà dielettriche nella neve sono dipendenti da tre principali fattori: l'aria, il ghiaccio e l'acqua liquida (specialmente nei ghiacciai). La presenza di acqua liquida affligge in particolare la parte immaginaria della costante dielettrica che, nel caso specifico della piana antartica, ipoteticamente asciutta, dovrebbe essere considerata trascurabile.

Se considerassimo esclusivamente i dati provenienti dal rilievo GPR potremmo farci un idea della stratigrafia, ma risulterebbe difficoltoso effettuare una corretta interpretazione della dinamica della loro formazione.

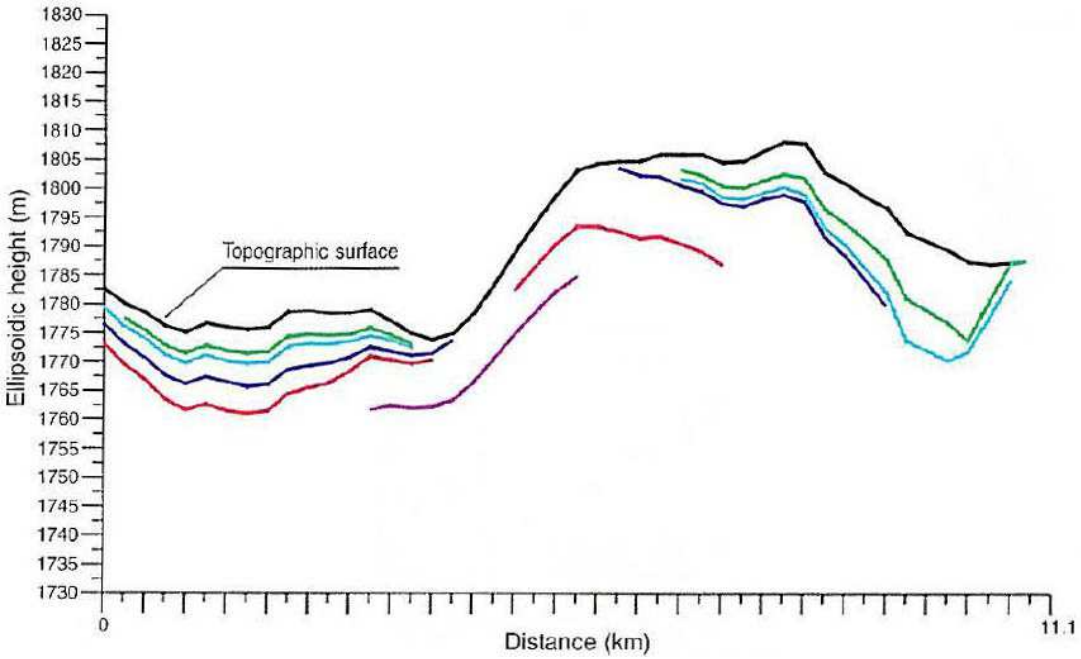


Illustrazione 34: Profilo Altimetrico degli Strati Rilevati

3.1.3 Conclusioni per la campagna Antartica

L'integrazione tra GPR e GPS rese possibile la connessione tra strati sub-terreni e quote ellissoidiche. Questa informazione poté fornire la base per una corretta interpretazione dei processi di ablazione ed accumulazione

delle nevi. I dati ottenuti indicarono che, in alcune aree, la stratigrafia può mutare rapidamente.

L'integrazione delle due metodologie rese possibile la formulazione di ipotesi più accurate in merito alla dinamica di accumulazione delle nevi e sembrava indicare il vento come possibile causa della produzione dell'ablazione, sotto vento, ed accumulazione, sopravento, nelle colline.

A seguito della campagna, tutti i crepacci individuati lungo il tragitto, con caratteristiche e posizione, vennero registrati nel GIS Terascan per consentire una maggiore sicurezza nelle successive traversate sulla piana antartica.

3.2 Use of GPR and GPS for Road Inspection

Nel momento in cui ci si appresta ad effettuare uno studio sfruttando il GPR è interessante realizzare che è possibile basarsi su un certo numero di informazioni provenienti da sorgenti alternative. Tutte le informazioni collezionate, relative all'area di studio, saranno valutate in fasi successive al elaborazione dati ed alla interpretazione delle informazioni GPR.

Attualmente c'è un trend logico verso l'integrazione con periferiche GPS, grazie alla progressiva riduzione delle dimensioni di tali equipaggiamenti ed il loro aumento in accuratezza, inoltre le connessioni tra sistemi vengono garantite dalla tecnologia senza fili.

Lo studio in questione, condotto nel 2002 dal dipartimento di Ingegneria delle Risorse Ambientali e Naturali della Università di Vigo, a Pontevedra in Spagna, puntava alla ricerca di una metodologia di accoppiamento valida per l'ispezione del sottosuolo del manto stradale che fosse anche georeferenziata.

3.2.1 Strumentazione e Metodologia Utilizzata

Per condurre i test venne impiegato un GPR modello RAMAC, della Mala Geoscience, accoppiato al terreno con 3 antenne schermate di frequenza 500, 800 MHz ed 1 Ghz che fornivano i dati alle diverse profondità per un medesimo punto.

In merito al sistema GPS, venne utilizzata una strumentazione a doppia frequenza lavorante con opzione Z- Survey della Ashtech e due modelli di GPS Bluetooth, il ricevitore Fortuna Clip-on Bluetooth GPS e il Pretec GPSBluetooth, che permisero la correzione differenziale basata su SBAS. Durante questo studio venne acquistata una GPS Mobile Mapper, della Thales Navigation, che offriva la possibilità di applicare le correzioni differenziali in post elaborazione. Per trattare i dati registrati vennero utilizzati due software, il GroundVision ed il RoadCam. Il GroundVision permetteva l'acquisizione di dati GPR e GPS tramite connessione computer verso una unità di controllo tramite cavo parallelo e porta seriale. L'interfaccia del software mostrava, in tempo reale, sia le coordinate GPS sia i dati che venivano registrati dal GPR. La comunicazione dati GPS venne impostata sul Baud Rate della NMEA e TSIP permessi dai limiti del programma, ossia tra 110 e 19200 bps. Dal database GPR il programma generava un file Ascii, nel quale le coordinate GPS ricevute vennero associate in un numero traccia.

I dati ottenuti avevano il seguente schema:

Numero Traccia, Data, Latitudine, Longitudine, Altezza, HDOP

Ogni antenna GPR misurava una serie di canali ed ogni canale generava dei suoi file indipendenti.

Il RoadCam, programma parte del pacchetto Road Doctor, permetteva la simultanea acquisizione da una serie di periferiche differenti allo scopo di studiare la superficie stradale. Il dialogo con il GPR fu realizzato attraverso porta parallela, anche se il sistema sembrava in apparenza compatibile esclusivamente con dei radar di tipo SIR per la sorveglianza geofisica. Il baud rate della NMEA consentito dal RoadCam doveva essere impostato tra i 120 ed i 38400 bps. Una volta che tutti i dati vennero sincronizzati, il programma permetteva una serie di processi ed opzioni per l'interpretazione ed organizzazione dei risultati. I programmi descritti vennero utilizzati per la sincronizzazione di tutte le informazioni sul sistema di coordinate GPS al fine di ottenere dati comparabili.

3.2.2 Risultati

Quando si recuperano dati GPR, ci sono certi limiti da considerare. La natura elettromagnetica del segnale causa, in prossimità di elementi metallici, alcune interferenze indesiderate. Queste interferenze rendono difficile la visualizzazione e, successivamente , l'interpretazione dei dati ottenuti.

A causa di questo effetto si rese necessario progettare un carrello speciale che fosse completamente esente da materiali metallici, cosa che si rese complessa a causa dei carichi dinamici che doveva trasportare. Esso consentiva il trasporto sino a due antenne in contemporanea con orientazione modificabili in base al tipo di utilizzo che si rendeva necessario.

Illustrazione 35: Carrello per alloggiamenti Antenne

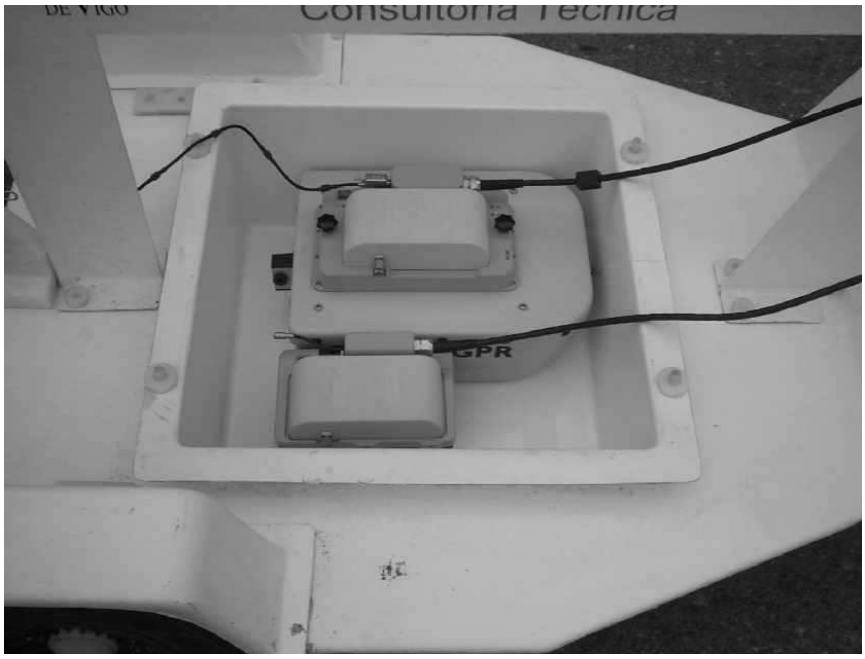


Illustrazione 36: Alloggiamenti Antenne

Come mostrato nell'*Illustrazione n.35*, il resto dell'equipaggiamento venne disposto all'interno del veicolo e controllato direttamente dagli operatori.

Tenendo conto delle future applicazioni dello studio e dell'equipaggiamento disponibile, sono stati predisposti diversi circuiti per valutare e comparare il livello di precisione. Ogni circuito è stato predisposto per sondare, ad un diverso livello, le capacità del metodo tenendo conto delle caratteristiche del circuito stesso, orografia e velocità di acquisizione dati, considerando i limiti imposti dal radar.
Durante la fase di sincronizzazione, nei file traccia-coordinate generati dal GroundVision, ad ogni traccia registrata venne associato un gruppo di coordinate GPS. Nei file fotogramma-coordinate generato dal RoadCam, invece, i parametri NMEA, e quindi le coordinate GPS, risultavano dominanti.

Tutti i messaggi NMEA che arrivavano a programma restavano registrati nell'archivio e, ad ognuno di essi, veniva assegnato un fotogramma e il suo corrispondente in millisecondi. Dopo alcuni test sono sorte alcune irregolarità nei file generati da GroundVision. Alcune immagini, che dovevano risaltare come anomalia, apparivano in diverse tracce nel medesimo secondo con diverse coordinate GPS, così come diverse tracce in diversi momenti avevano le medesime coordinate GPS. Inoltre va menzionato che, in specifiche tracce, casualmente e senza apparente ragione, la data GPS veniva sostituita con la data del sistema.

Queste piccole alterazioni sono state risolte sviluppando l'applicazione di esportazione di un valido file .sync, riconoscibile dal programma Road Doctor

che sincronizzò tutte le informazioni. Da una parte, per il caso di alcune tracce al medesimo momento, venivano generate nuove istruzioni interpolando i fotogrammi ed i tempi in millisecondi, ottenendo un risultato univoco. Dall'altra, quando le tracce presentavano la stesso gruppo di coordinate GPS, queste venivano interpolate seguendo la rotta sino a quel momento seguita.
Al termine delle correzioni il tutto venne inserito in ambiente GIS orientato sulla rete stradale nazionale.

3.2.3 Conclusioni

Con l'idea di sincronizzare tutti i dati per poterli visualizzare simultaneamente sfruttando il Road Doctor, vennero usati 2 computer. Uno di essi collegato al GPR tramite porta parallela e ad un GPS collegato con porta seriale. Eseguito il GroundVision, vennero generati tre file, contenenti il primo dati a 16 bit binario, con estensione .rd3, il secondo che salvava le informazioni di testata, indicato con .rad, e l'ultimo che riportava il numero traccia e la lista dati GPS in formati .cor .utm .wks.
L'altro computer era connesso ad una videocamera, tramite porta firewire, ed al medesimo GPS del primo computer. In questo caso, con il RoadCam in esecuzione, venivano generati due generi di file. Uno contenete la traccia video e l'altro con il numero del fotogramma e la lista dati GPS che prendeva l'estensione file .sync.
Il file .sync fu modificato dalle informazioni traccia-coordinate provenienti dal GroundVision, quindi dovette essere reinterpretato successivamente dal Road Doctor, re-sincronizzando il tutto tramite interpolazioni. Ulteriore problema sorto era la compatibilità della lettura dei file di report generati tra il Road Doctor ed il Ground Vision che restringevano il campo di movimento per le correzioni.

3.3 Remote Sensing in Archeologia

Da diversi anni la ricerca archeologica si avvale di un approccio multidisciplinare per lo studio degli insediamenti antichi. In particolare, sempre più di frequente, metodi di indagine non invasivi, *remote sensing*, sono impiegati per individuare, localizzare e riconoscere le strutture sepolte. Essi costituiscono un formidabile strumento per guidare con successo operazioni di scavo riducendone anche i tempi ed i costi. L'impiego di strumentazioni moderne e lo sviluppo di sempre nuove metodologie per l'elaborazione e rappresentazione bi/tridimensionale dei segnali misurati hanno reso le tecniche di remote sensing particolarmente efficaci anche su grande scala, ordine delle centinaia di ettari, per mappare in maniera estensiva i beni archeologici sepolti.

In contesti territoriali interessati da processi di utilizzazione dello spazio e forme insediative moderne sempre più invasive, una conoscenza preventiva delle strutture sepolte costituisce un presupposto indispensabile per garantire sia la tutela dei beni archeologici che una pianificazione territoriale sostenibile. In tal senso il remote sensing applicato in maniera sistematica può fornire un importante e concreto contributo.

Di seguito verranno presentati alcuni dei risultati ottenuti dal Dipartimento di Geologia e Geofisica del Campus Universitario di Bari nel corso di una ricerca iniziata nel 2003 ancora in corso condotta nella piana del Tavoliere, ove l'esistenza di un elevato numero di siti sepolti databili dal Neolitico al Medio Evo è nota da fonti storiche e da sistematiche campagne di ricognizione a terra ed aerea.

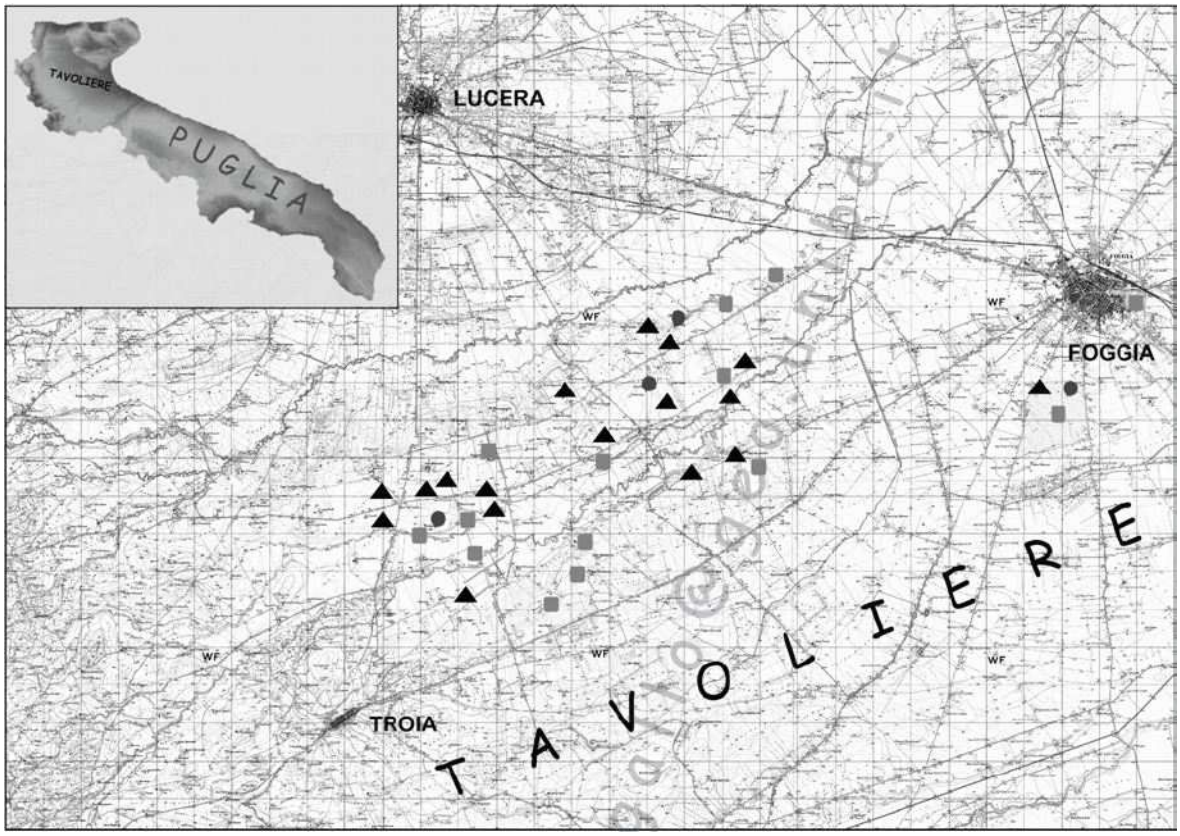


Illustrazione 37: Siti Archeologici Dauni

Attraverso l'applicazione integrata di magnetometria ed aerofotografia, in un'area di oltre 130 ettari, è stato possibile riconoscere e definire con grande dettaglio la forma e la planimetria di strutture sepolte.

3.3.1 Acquisizione ed Elaborazione Dati

Lo studio integrato è iniziato nel maggio 2003 con l'esecuzione di numerosi voli finalizzati ad esplorare il territorio attraverso l'acquisizione di immagini fotografiche di siti già noti o eventualmente ancora sconosciuti.

Questi primi dati, assieme a considerazioni e valutazioni di natura geofisica, geomorfologica e archeologica, hanno permesso di individuare alcune aree ove portare avanti l'indagine integrata in maniera sistematica.

Una prima visualizzazione delle immagini aerofotografiche, seppure deformate dagli effetti prospettici, è servita a riconoscere e quindi a meglio delimitare le aree di potenziale interesse archeologico. Sulla base di queste informazioni è seguita una campagna di rilevamento topografico che ha permesso di ubicare al suolo le griglie all'interno delle quali è stata eseguita l'investigazione magnetometrica di dettaglio. Contemporaneamente sono state effettuate delle misure GPS con tecnica differenziale, necessarie sia alla georeferenziazione delle griglie sia all'elaborazione dei dati aerofotografici.
Al termine delle procedure di elaborazione tutti i dati sono stati inseriti in un sistema GIS. La loro integrazione ha portato a risultati interpretativi di elevata qualità e di estremo dettaglio.

Il Tavoliere rappresenta un'area particolarmente favorevole all'applicazione della fotografia aerea, grazie all'estesa presenza di coltivazioni di cereali.
La scelta del periodo in cui effettuare le riprese risulta fondamentale, in quanto la crescita differenziale della vegetazione, e le conseguenti variazioni cromatiche, sono particolarmente marcate e visibili soltanto per pochi giorni durante l'anno. La maturazione ottimale del grano per gli scopi di questo studio viene raggiunta in generale a partire dall'ultima settimana di maggio protraendosi per circa 15 giorni. Durante tale periodo, dal 2003 al 2008, è stato acquisito un vasto archivio di fotografie aeree oblique a colori, riprese da voli a bassa quota, utilizzando delle REFLEX digitali ad alta risoluzione. Una prima analisi delle immagini aeree ha evidenziato tutte quelle tracce, *crop-marks,* attribuibili alla presenza di strutture sepolte. Queste, il più delle volte molto ben evidenti, hanno permesso sin nella fase iniziale del lavoro di approfondire la conoscenza dei siti fornendo informazioni di carattere

qualitativo sull'estensione, la tipologia e l'età degli insediamenti. L'integrazione delle fotografie aeree oblique con i dati magnetici ed in generale con dati spaziali di altra natura, ha richiesto una correzione via software delle distorsioni geometriche imposte dalla prospettiva, dalla tridimensionalità della superficie terrestre e dall'ottica dei dispositivi fotografici utilizzati.(Doneus, 2001)

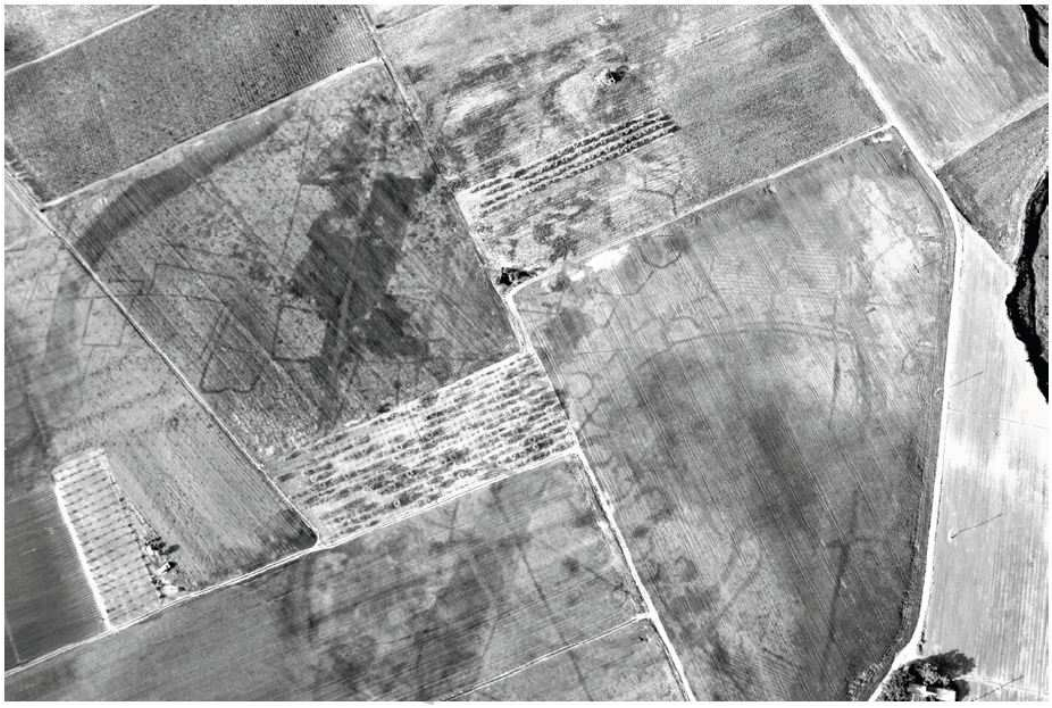


Illustrazione 38:Crop Marks in zona Masseria Anglisano (FG)

3.3.2 Magnetometria e Misure GPS

Per l'acquisizione dei dati sono stati impiegati tre magnetometri a pompaggio ottico. Due Scintrex Smartmag SM4 con sensibilità 10 pT assemblati in configurazione *quadro-sensor* ed un Geometrics G858 con sensibilità 50 pT, montato in configurazione *duo-sensor.* Si sono effettuate misure di intensità di campo magnetico terrestre e l'acquisizione si è svolta in modalità bidirezionale lungo linee parallele equispaziate di 0.50 m. (Becker, 2001)

Complessivamente è stata indagata una superficie di circa 130 ettari, suddivisa in maglie regolari di 40 m x 40 m, adottando un passo medio di campionamento di 0.5 m X 0.125 m. I dati bruti, visualizzati come immagini raster in toni di grigio sono risultati affetti da quei disturbi, comunemente noti in letteratura con i nomi di *spikes*, *stripes* e *zig-zag*, che spesso degradano in maniera significativa il segnale utile associato alle strutture sepolte. Essi possono essere causati dall'accidentale malfunzionamento dello strumento, dalla presenza sul terreno di materiale ferroso sparso, dalle procedure di acquisizione.

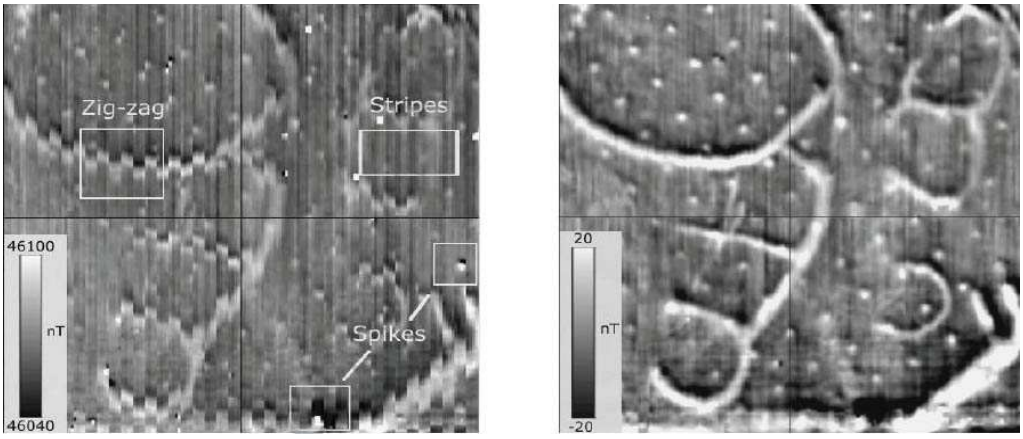


Illustrazione 39:Dati bruti e dati elaborati

Con il fine di ridurre il più possibile questi contributi, e recuperare la forma originaria delle anomalie, facilitandone così l'interpretazione e di conseguenza la corretta localizzazione delle sorgenti archeologiche, i dati sono stati elaborati impiegando algoritmi di calcolo basati su criteri statistici.

Un ulteriore miglioramento nella visualizzazione dei segnali è stato raggiunto attraverso l'impiego di tecniche DIP, *Digital Image Processing*.

I magnetogrammi finali sono stati correttamente posizionati all'interno della griglia di acquisizione in modo da ottenere il mosaico completo delle aree investigate.

I dati sono stati acquisiti impiegando due ricevitori GPS LEICA 530 disposti con baseline di alcuni km in modo da ottenere il posizionamento assoluto dei punti di misura con una precisione decimetrica, per le coordinate nel piano, e leggermente inferiore per la quota.

Al termine di tutte le operazioni di elaborazione i dati magnetici e quelli aerofotografici sono stati integrati utilizzando un software GIS in modo da ottenere una rappresentazione delle aree investigate composta da livelli spazialmente sovrapposti, ciascuno con uno specifico contenuto informativo.

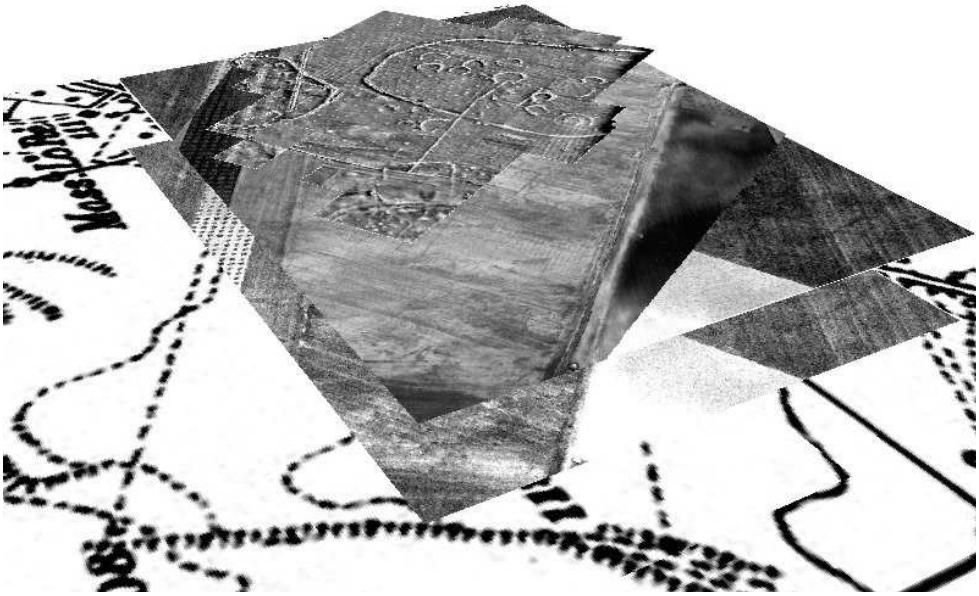


Illustrazione 40:Elaborazione Layer in GIS

Partendo dal livello più basso abbiamo la carta topografica in scala 1:25000, da cui è possibile ricostruire la distribuzione reciproca dei siti all'interno dell'area studiata ed in che modo, nel corso delle varie fasi storiche, gli insediamenti si siano concentrati in zone diverse del Tavoliere.

L'ortofoto a colori in scala 1:10000, in cui già sono visibili alcuni *crop-marks*, può fornire invece indicazioni sui rapporti specifici tra ogni insediamento ed il territorio circostante e su come questo ultimo possa averne condizionato lo sviluppo, imponendo delle limitazioni oppure offrendo delle risorse di qualche tipo. La foto obliqua ortorettificata ed il mosaico magnetico composto da 66 aree 40 m x 40 m, che rappresentano gli ultimi livelli nella illustrazione, offrono infine un'informazione di maggiore dettaglio, permettendo anche con notevole precisione, la localizzazione e la ricostruzione delle strutture sepolte. Il GIS così creato rappresenta un archivio aperto in cui possono essere sempre inseriti nuovi dati. Tutte le informazioni possono essere incrociate o semplicemente combinate per approfondire problematiche specifiche o fare emergere nuovi elementi di interesse.

3.3.3 Risultati e Conclusioni

Il caso discusso mostra le notevoli potenzialità delle tecniche di remote sensing come strumento per la mappatura estensiva dei beni archeologici.

Durante le fasi di campagna svoltesi nel tempo nelle varie località daune è stato possibile individuare con precisione anche strutture sepolte di piccole dimensioni, ordine del metro. Oltre ad aver ricostruito la planimetria degli insediamenti antichi, a tutte le sorgenti archeologiche è stato possibile attribuire la posizione assoluta nello spazio con precisione sub-metrica. L'impiego sistematico di tecniche di remote sensing, assieme alla creazione di un sistema informativo territoriale in cui inserire e strutturare adeguatamente i dati acquisiti, può assumere un ruolo determinante sia in studi di archeologia del paesaggio sia nei processi di pianificazione territoriale.

3.4 Prospezioni Geofisiche a Montearatro (FG)

Da diversi anni il gruppo di ricerca guidato dal prof. Helmut Becker del Department for Archaeological prospection and Aerial Archaeology di Monaco e dal prof. Marcello Ciminale del Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Bari, si occupa dello studio della Valle del fiume Celone (FG), che presenta tracce di un rilevante numero di siti archeologici di varie epoche.
Gli archeologi dell'Università degli Studi di Foggia, infatti, hanno individuato, sulla base di fonti storiche e attraverso ricognizioni sul terreno, oltre 200 siti, anche notevolmente estesi, che coprono un intervallo temporale di oltre 8000 anni.

Lo studio intrapreso dal gruppo di Becker e Ciminale, a partire dal 2004, è articolato su una fase di telerilevamento, eseguito da un aeromobile ultraleggero per la realizzazione di riprese aree georeferenziate, e su una fase geofisica, basata su indagini magnetometriche, con configurazioni strumentali adattate al particolare contesto. Il test è stato condotto su un unico sito per il quale erano disponibili sia le foto aeree, sia le mappe magnetiche. (Ciminale, 2006)

3.4.1 Panoramica sulla prospezione

L'area scelta è denominata Montearatro, sita nelle campagne a qualche km dall'abitato di Lucera in provincia di Foggia. Come si può vedere nelle illustrazioni 40 e 41, in quest'area archeologica sono riconoscibili molti lineamenti, sia in forma di *crop-marks* nelle foto aeree, sia come anomalie magnetiche.
I dati magnetici, acquisiti con un sistema a pompaggio ottico Scintrex Smartmag SM4, in configurazione "quadro-sensor" da Becker nel 2001, hanno evidenziato la presenza di una struttura orientata in maniera diversa rispetto al

corpo principale di quella che gli archeologi hanno identificato come una fattoria romana e ben evidente in foto aerea.

Illustrazione 41:Crop Marks Montearatro

Per il test georadar è stata effettuata la copertura di un'area di 160 x 120 m^2 posta circa al centro dell'area indagata con la magnetometria, in modo da attraversare sia l'area della fattoria, sia quella della forte anomalia magnetica.

Sono stati eseguiti profili ogni metro, in un'unica direzione, sull'intera estensione in quanto non fu possibile incrociare i profili a causa di notevoli accumuli di paglia, resti della raccolta del grano.
Venne impiegato un georadar SIR3000 con antenne monostatiche da 400MHz e da 270MHz, montato su carrello con *encoder* digitale.

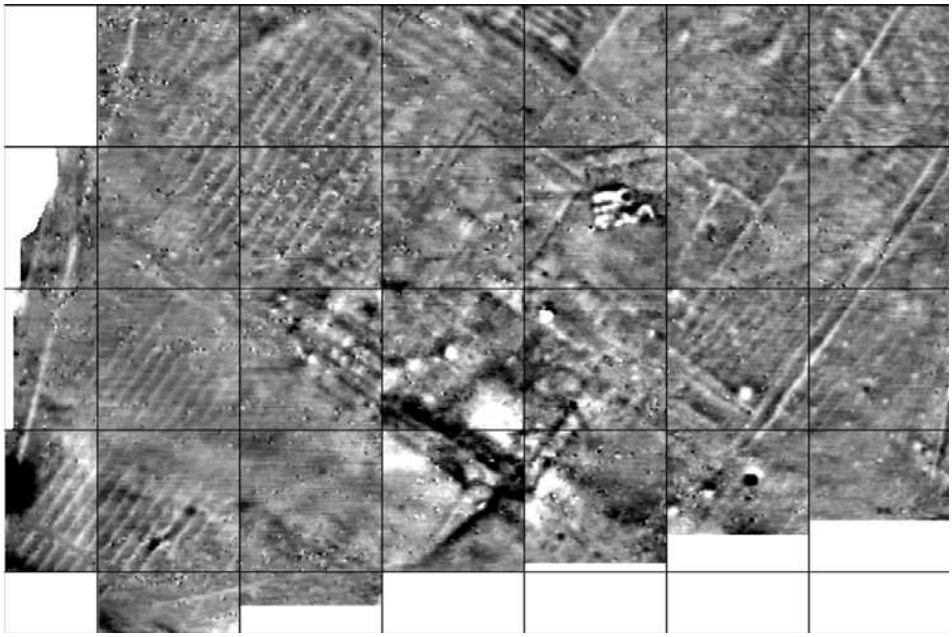


Illustrazione 42:Anomalia Magnetica

L'area indagata, che apparentemente si mostrava priva di ostacoli, ha invece comportato notevoli difficoltà, sia in fase di acquisizione dei dati che in fase di trattamento: infatti, la paglia sparsa a terra celava una grande quantità di ciottoli e resti di laterizi che hanno impedito di ottenere un buon accoppiamento delle antenne con il terreno. Il segnale radar, inoltre, è risultato affetto da fortissimi fenomeni di *scattering* dovuti ai continui sobbalzi a cui erano sottoposte le ruote e quindi anche l'*encoder* digitale.

Lo *scattering* ha impedito la propagazione di sufficiente energia nel terreno e la conseguente ricostruzione di un segnale chiaro e ben riconoscibile.

Anche la composizione del terreno, per quanto ci si aspettasse dalle indagini geologiche un terreno a grana grossa, sabbioso-ghiaioso, mostrava, a causa della notevole siccità, dei caratteristici poligoni di disseccamento, segno evidente di una buona quantità di argilla almeno negli strati più superficiali.

Ciò ha fatto sì che i radargrammi grezzi fossero quasi completamente illeggibili e si sono dovuti applicare diversi filtraggi per riuscire ad ottenere un segnale accettabile; i dati sono stati filtrati in frequenza, è stata eliminata la media ed è stata applicata un'opportuna curva di guadagno.

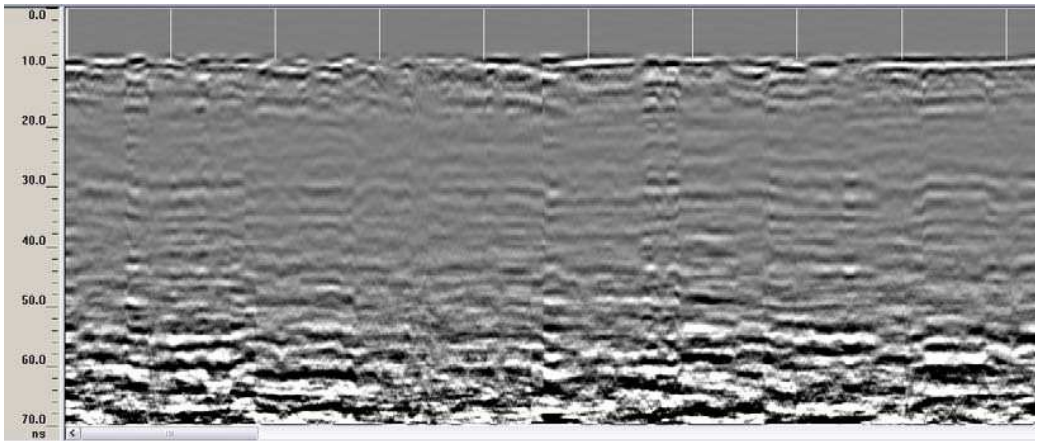


Illustrazione 43:Esempio di Radargramma filtrato

Dopo l'elaborazione di tutti i dati, sono state generate delle *time-slice* utili ad osservare planimetricamente lo sviluppo di alcune anomalie che, seppur localizzate, erano riconoscibili sui radargrammi. L'operazione non ha dato purtroppo risultati positivi, dimostrando che la maggior parte delle anomalie che si osservano sono dovute a blocchi in superficie o subsuperficiali sparsi casualmente e privi di allineamenti preferenziali.

Dall'analisi dei dati si riuscirono a ricavare soltanto informazioni geologiche relative alle stratificazioni più superficiali del terreno e poche conferme di tipo archeologico. Il confronto con il dato magnetico, quindi, è improponibile per motivi eminentemente geologici, ma non per questo è da escludere che le anomalie magnetiche corrispondano a strutture antiche presenti nel terreno.

Molte di esse, riferibili a fossati o trincee, possono essere difficilmente riscontrabili con altre tecniche geofisiche, mentre per aree come quella della fattoria romana è molto probabile che un'indagine geoelettrica possa fornire dati con buon dettaglio; quest'ultima tecnica però non sarebbe adatta a coprire aree maggiori per i noti problemi legati ai tempi e alle modalità di acquisizione.

3.4.2 Conclusioni sulla campagna a Montearatro

Per quanto riguarda le esperienze avute nelle aree archeologiche Montearatro bisogna sottolineare come l'impiego di una sola tecnica geofisica non solo possa essere limitante nell'individuazione delle strutture sepolte in un sito archeologico, ma talvolta possa rivelarsi anche fuorviante nell'interpretazione dell'interno complesso e della sua funzione.

Nell'area di Montearatro, a fronte di scarsissime evidenze emerse dall'indagine radar, limitata non solo da problemi di scarsa penetrazione del segnale ma soprattutto da fortissimi effetti di *scattering* superficiale, la magnetometria ha rilevato anomalie molto intense e ben delimitate relative ad insediamenti romani e precedenti.

L'integrazione di dati provenienti da diverse tecniche non solo permette di ottenere un maggior numero di informazioni, ma consente anche delle riflessioni sull'applicabilità e sulla resa di una determinata metodologia in quel contesto; osservazioni estremamente utili ed esportabili in situazioni e contesti analoghi.

3.5 Misure GPR e Geoelettriche in ambiente costiero

L'indagine è stata eseguita in un tratto di costa adriatica in prossimità della località di San Benedetto de Tronto. L'indagine ha inoltre lo scopo di definire le caratteristiche idrologiche del mezzo sabbioso nel settore di indagine.

La facilità con cui la tecnica di indagine radar consente l'individuazione di fluidi all'interno di un mezzo poroso e la capacità di differenziare fluidi diversi è stata testata in un ambiente naturale.

Le misure sono state eseguite con il sistema georadar con antenna da 400 MHz e georesistivimetro multicanale per tomografia elettrica. Il profilo (O - E) eseguito è perpendicolare alla linea di costa (N - S) per una lunghezza complessiva di 80 metri per ilprofilo radar e 48 metri per il profilo geoelettrico.

3.5.1 Misura GPR

La traccia radar è stata acquisita con georadar SirSystem 3000, utilizzando una antenna di tipo monostatico a frequenza centrale 400MHz.

La determinazione delle velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche è avvenuta per mezzo di una calibrazione su target precedentemente sepolti a profondità note; è stato possibile valutare le velocità per spessori differenti ricavando in una seconda fase dell'analisi i parametri idrologici del mezzo (saturazione residua, saturazione totale, porosità).

La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche in un litotipo sabbioso è pari a circa 0.140 m/ns in condizioni asciutte e 0.06 m/ns per sabbia bagnata. Tali valori hanno trovato conferma nelle misure sperimentali condotte sul corpo sabbioso in esame; questo è stato sottoposto ad un processo di saturazione mediante l'aggiunta di acqua in corrispondenza di due target utilizzati per la calibrazione delle velocità.

La velocità misurata per le condizioni rappresentative di una sabbia asciutta è pari a 0.138 m/ns mentre per le condizioni di saturazione totale la velocità misurata è 0.063 m/ns.

Illustrazione 44:Operazione di Imbibizione Target 2

La scelta delle due diverse profondità di interro dei target è stata definita in modo da caratterizzare in maniera esatta lo spessore di sabbia fino ad una profondità di 1 m mediante la calibrazione a due distinti livelli di profondità.

Il radargramma acquisito in corrispondenza dei due target ha permesso di individuare la presenza di un livello altamente riflettente alla base del target n.2, ad una profondità di circa 1.50 m. Si tratta, con buona probabilità, della riflessione generata da un livello ghiaioso probabilmente messo in posto in fasi di ripascimento della linea di costa.

Sulla base di una operazione di fitting iperbolico sulle iperboli di diffrazione generate dai target e sulla base della conoscenza delle profondità di interro delle stesse, sono stati ricavati i valori di velocità relativi al corpo sabbioso; ciò ha permesso di estrapolare i relativi parametri idrologici (θs, θr, ϕ), sulla base delle relazioni petrofisiche di Topp e del CRIM(*Complex Refractive Index Method*).

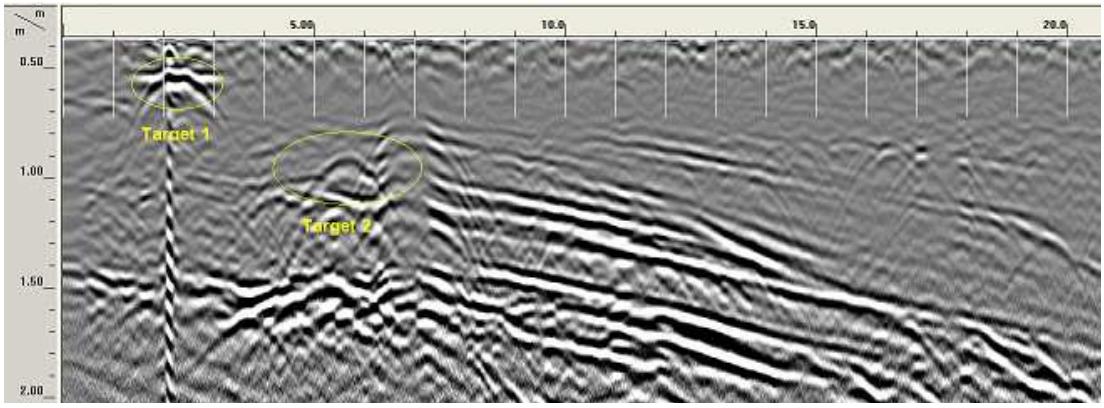


Illustrazione 45:Radargramma acquisito con antenna da 400 MHz in corrispondenza dei due target sepolti

Un ulteriore aspetto messo in luce dall'indagine GPR è l'individuazione della regione interessata dall'ingressione dell'acqua marina.

Il fenomeno è caratterizzato dalla completa attenuazione del segnale radar che mette in luce la particolare geometria legata al fenomeno.

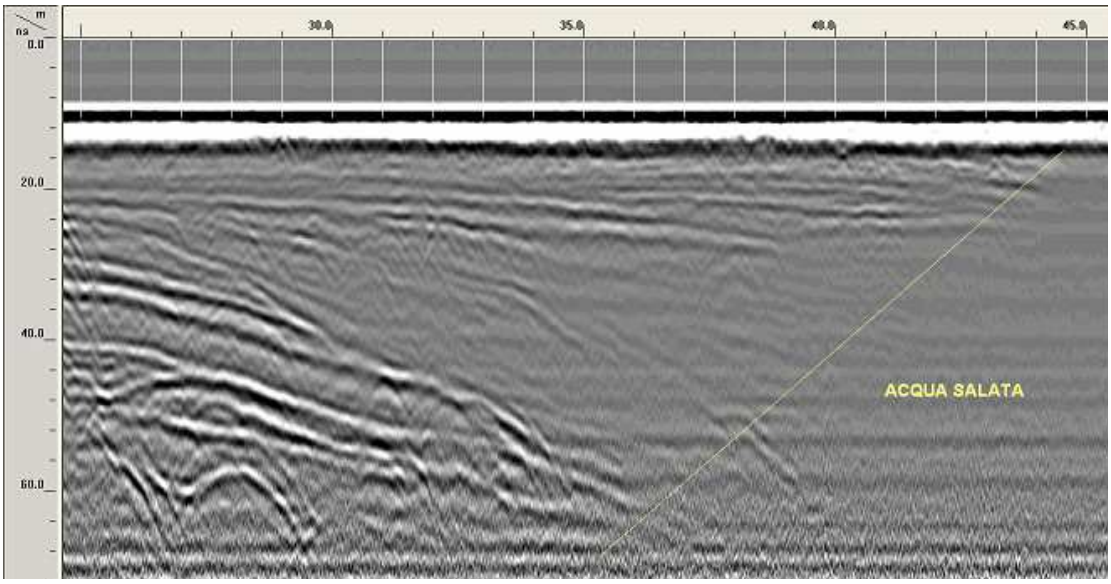


Illustrazione 46:Radargramma regione di contatto tra acqua dolce e salata

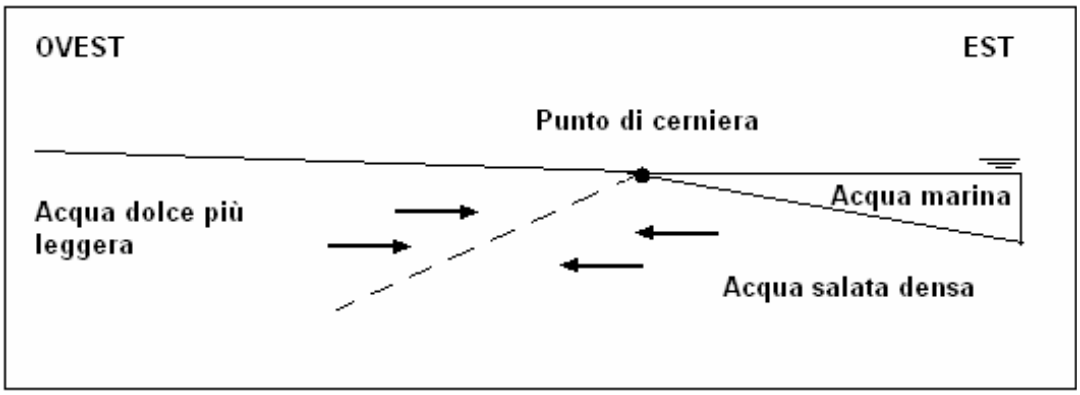


Illustrazione 47:Schematizzazione Radargramma

Si evince che l'acqua salata, più densa, tende a penetrare in profondità al di sotto della zona d'acqua dolce

3.5.2 Indagine Geoelettrica

Il profilo (O-E) ha una lunghezza totale di 48 metri con spaziatura interelettrodica di 1 metro; l'*offset* è di 20 m rispetto alla "zero" della traccia radar lungo la linea di acquisizione.

La misura è stata eseguita secondo differenti disposizioni elettrodiche per la valutazione della sensibilità delle stesse alle variazioni delle caratteristiche dielettriche del mezzo; i quadripoli di tipo Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo hanno fornito un'immagine della stratificazione del corpo sabbioso in esame.

L'indagine geoelettrica ha permesso di localizzare l'andamento dello strato alto resistivo, imputabile alla spiaggia, che mostra un ispessimento procedendo da mare verso l'entroterra. ¨ stato altresì possibile individuare la zona di ingressione di acqua marina, sul margine destra delle sezioni nella

illustrazione 48. Le tre disposizioni denotano la differente sensibilità alle variazioni verticali e laterali.

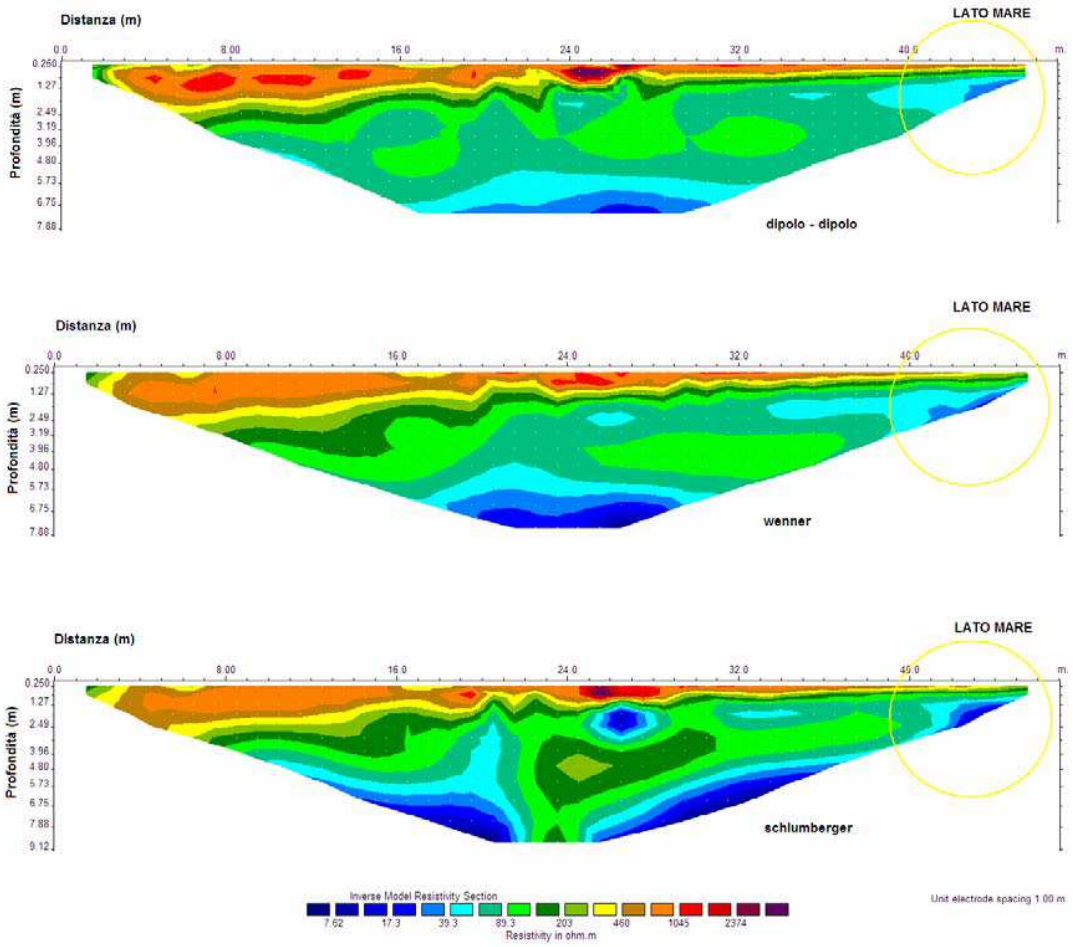


Illustrazione 48:Sezioni geolettriche relative ai differenti tipi di disposizione quadripolare utilizzati nella misura

Alla progressiva metrica 24 m, asse delle sezioni, è localizzato il blocco in travertino precedentemente interrato per la taratura delle velocità nell'indagine GPR. Tutte le sezioni mostrano, in modo concorde, un ispessimento relativo ad un livello più resistivo procedendo dal lato mare verso l'entroterra, si tratta della spiaggia. Evidenziato in giallo si può notare il fenomeno di ingressione marina dell'acqua salata. Questa penetra con una geometria a cuneo.

3.6 Monitoraggio Integrato su una Discarica

La caratterizzazione di depositi di discarica attraverso l'applicazione di tecniche non invasive proprie della geofisica applicata, rappresenta un valido strumento di integrazione alle metodologie tipiche della geologia applicata .

La localizzazione e definizione dei parametri idrologici in mezzi eterogenei, attraverso l'ausilio delle misure geoelettriche, radar e sismiche, è spinta dai caratteri che generalmente contraddistinguono i depositi; essi spesso presentano delle caratteristiche dielettriche molto diverse dai materiali al contorno e dal *bedrock* su cui i depositi possono essere appoggiati, a seconda dello schema costruttivo della discarica stessa.

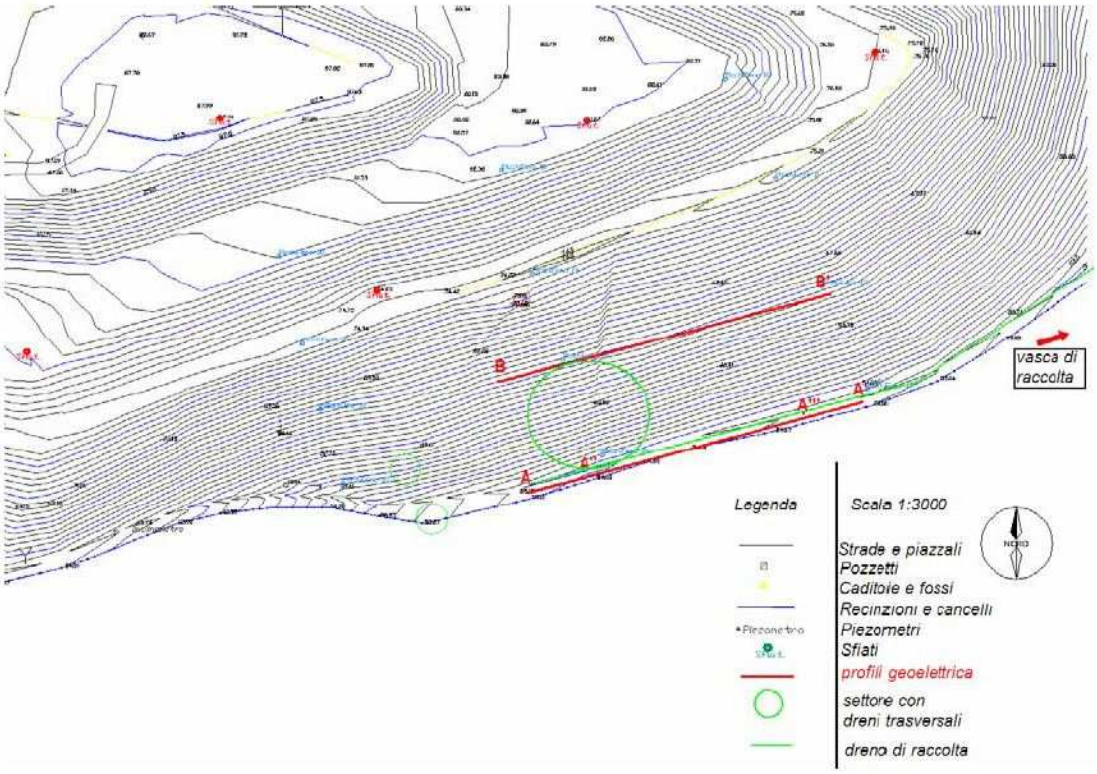


Illustrazione 49:Rappresentazione del versante della discarica

Nel presente lavoro, l'indagine geofisica, eseguita su un corpo di discarica di rifiuti solidi urbani risalente agli anni '60, è finalizzata all'individuazione dell'eventuale presenza e sviluppo di percolato al di fuori del deposito con minacce all'ambiente circostante, oltre alla definizione delle proprietà dielettriche del mezzo. La campagna ha visto l'esecuzione di una serie di profili di geoelettrica riferiti a due differenti periodi.

3.6.1 Evoluzione dell'Indagine

Giugno / '06: l'evidenza di percolato individuata dai tecnici addetti al controllo della discarica ha spinto verso la realizzazione di un sistema di pompaggio dei fluidi di percolato al fine di convogliare gli stessi in una vasca di raccolta. Diversi dreni trasversali sono stati ubicati lungo il fianco della discarica, nel settore di evidenza delle fuoriuscite; un dreno di raccolta alla base del rilevato è stato posizionato all'interno di una trincea profonda circa 2 m e collegato ad una vasca di raccolta e ad una pompa per l'aspirazione.

Agosto / '06: l'efficienza del sistema drenante così costituito è stata monitorata attraverso l'esecuzione di due profili elettrici, uno lungo il fianco della discarica (BB') e l'altro alla base dello stesso (AA'). I due profili sono paralleli tra loro e distanziati 25 m. Il profilo (AA' agosto) mostra chiaramente l'efficienza del sistema drenante almeno per la parte a destra della sezione, ove si nota una situazione caratterizzata da valori di resistività sicuramente maggiori rispetto al resto del settore.

Ciò non si verifica nella parte sinistra della sezione, ove permane la presenza di un livello basso resistivo; sembra dunque essersi rivelato inefficiente il sistema drenante per il settore più lontano dalla vasca di raccolta e dalla pompa di aspirazione.

Febbraio / '07: le misure sono state ripetute lungo gli stessi profili. Non sono state riscontrate evidenze di fuoriuscite di percolato nel bimestre gennaio/febbraio. La sezione (A"A"' febbraio), più corta della (AA' agosto) e riferita alla base del rilevato della discarica, denota un approfondimento della sacca basso resistiva fino ad almeno 16 m di profondità. La realizzazione di un profilo più corto è stata dettata dalla necessità di concentrarsi in un particolare settore di interesse, tralasciando la parte con valori di resistività maggiori.

Le misure sul fianco della discarica (BB') hanno reso possibile apprezzare le variazioni di saturazione imputabili alle due distinte stagioni di misura, e localizzare lo spessore del pacco di deposito. Il profilo (BB') mostra dunque l'andamento del pacco di rifiuto, chiaramente più imbevuto nella sezione relativa al mese di febbraio. Entrambe le sezioni mostrano inoltre un ispessimento dello strato basso resistivo nella parte a sinistra della figura.

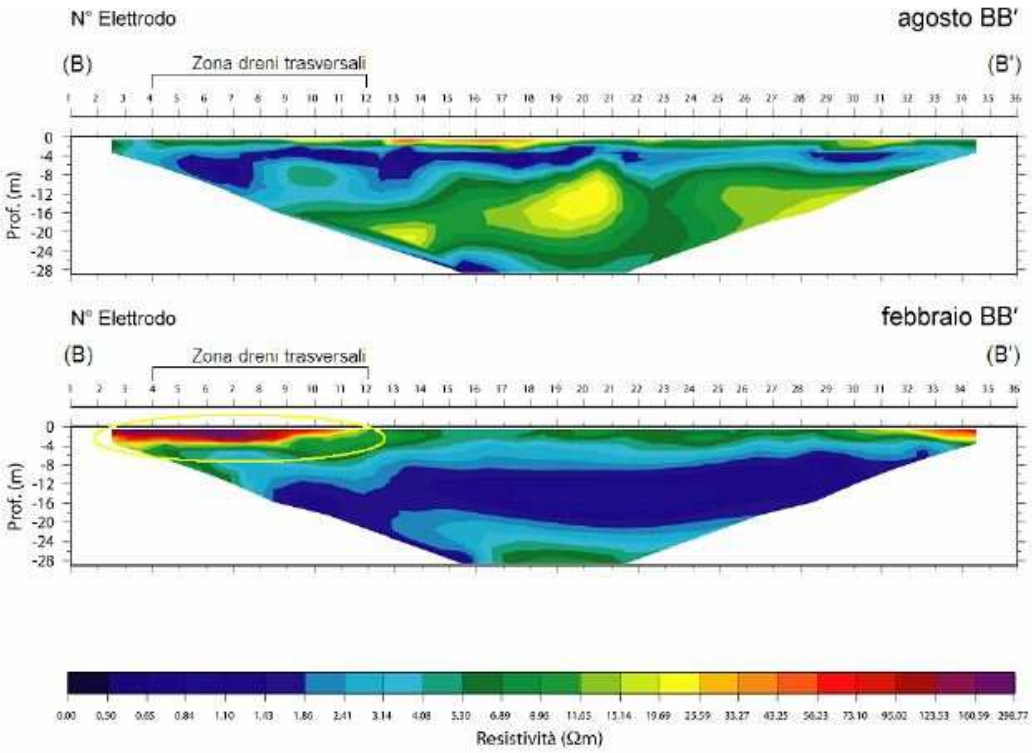


Illustrazione 50:Sezioni BB'

Questo aspetto può essere correlato a quanto osservato nelle sezioni alla base; si può ipotizzare dunque che:

- il sistema drenante è inefficiente per il settore a maggior distanza dalla vasca di raccolta dei fluidi;
- la fuoriuscita di percolato in superficie in questo settore è indicativa di un flusso ben più cospicuo in profondità, come confermato dalle indagini. La completa assenza di fuoriuscite nell'ultimo bimestre (gennaio - febbraio / 07) è dovuta all'effetto del drenaggio superficiale.

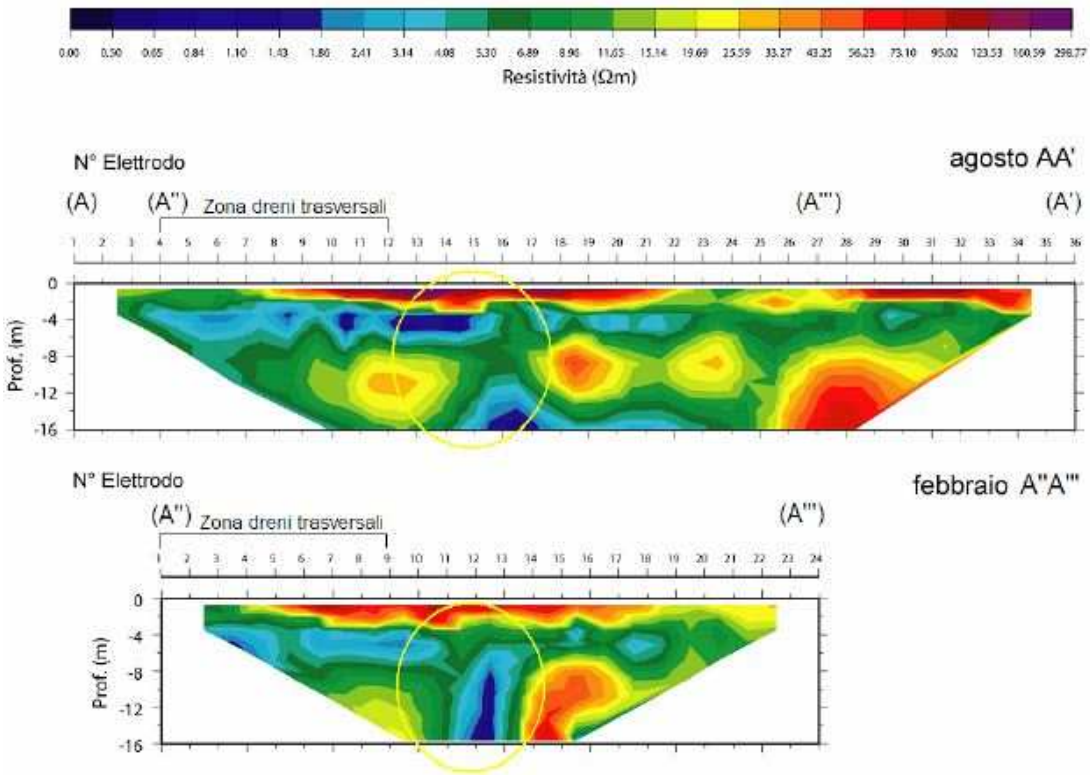


Illustrazione 51:Sezioni AA'

3.6.2 Conclusioni

Le sezioni BB' riportate sono riferite al mese di agosto e febbraio. ¨ indicata la posizione del settore interessato dalla fuoriuscita di percolato (giugno/06) su cui è stato impiantato il sistema di drenaggio; questo ha avuto effetti positivi per i primi 3 - 4 m di suolo (BB' febbraio) che risulta essere più asciutto (evidenziato in giallo) rispetto alla condizione rilevata nel mese di agosto (BB' agosto). Ulteriore aspetto è che lo spessore dello strato basso resistivo relativamente al mese di febbraio è maggiore per via del periodo più piovoso in cui le misure sono state realizzate.

Per la sezione AA' relativa alle misure al mese di agosto è indicata la perfetta efficienza del sistema drenante collegato alla pompa di aspirazione ubicata a circa 200 m verso destra del punto A'. Tale settore mostra valori di resistività nettamente più elevati. Permane e si accentua nelle misure di febbraio la sacca basso resistiva localizzata in corrispondenza degli elettrodi 10 - 14 (sezione febbraio) e 13 - 17 (sezione agosto), mentre la zona superficiale risulta generalmente più resistiva. Quella eseguita nel sito di discarica può essere definita un'indagine preliminare visti i risultati confortanti ottenuti; per tale ragione è stata programmata una campagna per il medio lungo periodo incentrata sul monitoraggio dell'efficienza dei dreni.

3.7 Indagini Geoelettriche sui Fiumi

La ricostruzione stratigrafica-geologica dei fondali marini, dei fiumi e dei laghi, ottenuta mediante l'acquisizione dei parametri geoelettrici in continuo e georeferenziata tramite GPS, può offrire un valido supporto conoscitivo per la costruzione di ponti e dighe, il dragaggio dei fondali, l'individuazione di corpi sepolti ecc.

Il metodo prende il nome di Sub-Bottom Imaging, Immagine Sub-Fondale; esso presuppone l'utilizzo di georesistivimetri di nuova generazione a 10 canali, integrati con sistemi GPS. Il Sub-Bottom Imaging permette di ottenere, in forma dettagliata e rapida, immagini elettrico stratigrafiche dei primi metri di terreno. In aree molto estese questa tecnica riduce notevolmente i tempi e i costi delle indagini di prospezione geoelettrica.

In acquisizione si ottiene anche la batimetria dell'area indagata e, se necessario, è possibile ricavare un'immagine side-scan sonar.

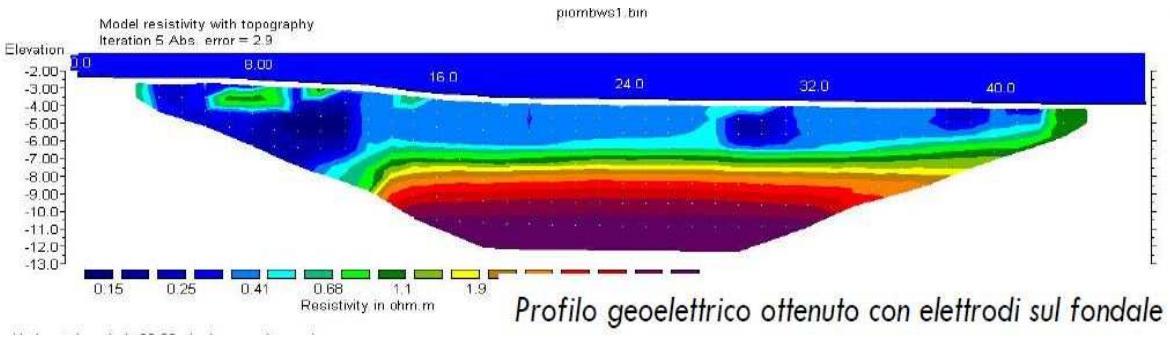


Illustrazione 52:Prospezione in continuo su Fiume

L'indagine geoelettrica in ambiente acquatico può essere effettuata mediante due tipologie di intervento:

a) Elettrodi posati sul fondale per ottenere maggiore risoluzione e profondità nella ricostruzione stratigrafica del fondale.

b) Elettrodi galleggianti, trascinati da una piccola imbarcazione; questo metodo è particolarmente utile in bassi fondali (fino a 10 m).

3.7.1 Indagine Archeologica sul fiume Arno

La Resources Management Company S.r.l. di Pisa, società operante nel campo delle indagini geofisiche non invasive, venne chiamata a verificare la presenza di possibili manufatti di interesse archeologico in una tratto del fiume Arno.

Il metodo di indagine scelto per il rilievo geoelettrico è stato condotto con "elettrodi flottanti" ed il tracciato ottenuto è stato georeferenziato mediante GPS, integrato alla strumentazione di acquisizione, una stazione Syscal-pro a 10 canali.

Considerando la profondità del fondale, dai 2 ai 4 m, è stato scelto uno spazio di 4 m tra i 13 elettrodi flottanti.

Illustrazione 53:Prospezione con elettrodi galleggianti

3.7.2 Riscontri

Il Sub-Bottom Imaging ha permesso la ricostruzione batimetrica e stratigrafica del fondale della tratta di fiume indagata e l'individuazione di un'area con "anomalia" di resistività. La normale stratigrafia del fondale, costituita da uno strato di sedimenti conduttivi, sovrastanti sedimenti più resistivi, nella fattispecie sabbie, si interrompe lateralmente per la presenza di materiale molto resistivo.

Secondo tali riscontri, in tale area si potranno programmare ulteriori indagini archeologiche di dettaglio.

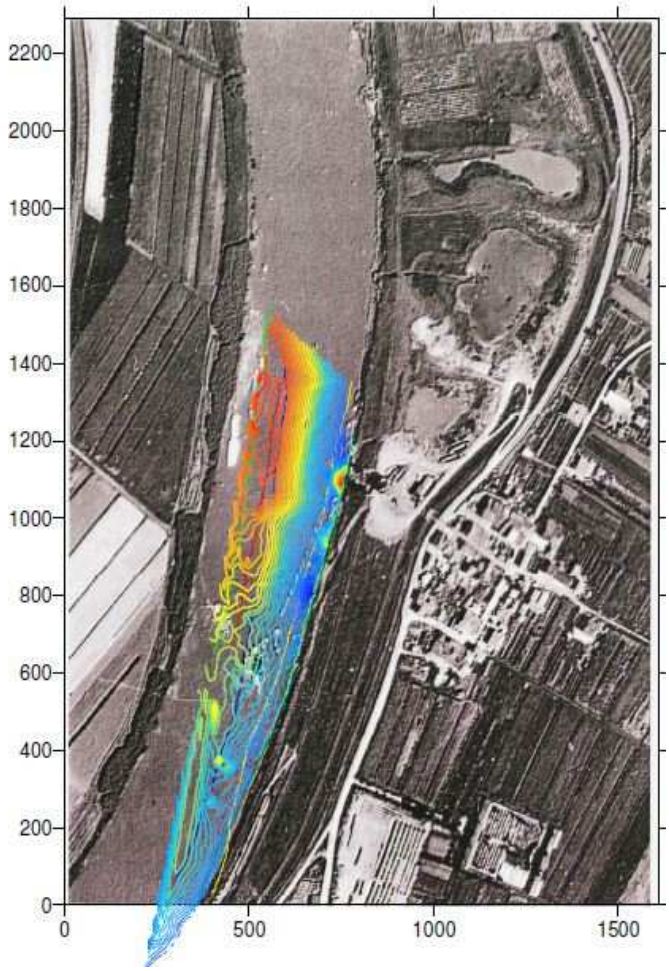


Illustrazione 54:Barimetria Rilevata

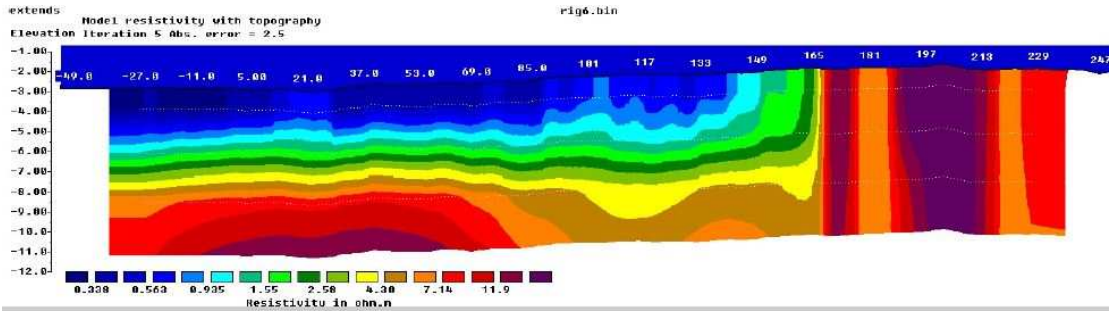


Illustrazione 55:Mappa dell'Anomalia

3.8 Precauzioni per le Future Campagne di Indagine

Le esperienze illustrate indicano che l'integrazione tra GPR e GPS rende effettivamente possibile la connessione tra strati sotterranei e quote ellissoidiche, così da poterne estrapolare una rappresentazione più fedele alla situazione reale.
Per far ciò, risulta evidente che l'acquisizione dei dati vada sincronizzata tramite software adeguati che supportino i formati proposti dalle strumentazioni
Dalle esperienze di campagna sul tavoliere delle Puglie risaltano che le notevoli potenzialità delle tecniche di remote sensing come strumento per la mappatura estensiva dei beni archeologici che trovano immediata applicazione nella creazione di un sistema informativo territoriale GIS in cui inserire e strutturare adeguatamente i dati acquisiti.

Bisogna sottolineare che l'impiego di una sola tecnica geofisica è evidentemente limitante nell'individuazione delle strutture sepolte per applicazioni di carattere archeologico.
Per quanto riguarda l'associazione del metodo geoelettrico con il metodo GPS, ed eventualmente altri generi di prospezioni, esistono strumentazioni, come la Syscal-pro, che già hanno introdotto l'integrazione e forniscono i dati direttamente georeferenziati.

Ulteriore evidenza riportata dai casi di studio sul fiume e sulla costa è l'attenuazione del segnale GPR in concomitanza di zone ad acqua salata mentre e la diminuzione relativa della resistività rispetto alla zona di acqua dolce.
Tali indicazioni saranno utili per pianificare una eventuale campagna di rilievo in presenza di terreni saturi.

Per quanto riguarda le problematiche riscontrate, esse possono essere riassunte in:

- Adeguata Copertura Satellitare al momento della rilievo e riscontro della qualità del segnale tramite GDOP e HDOP;
- Controllo della velocità di spostamento della stazione al momento della acquisizione;
- Controllo delle connessioni tra periferiche e mainframe;
- Adeguata sincronizzazione delle acquisizioni delle periferiche;
- Controllo preventivo di elementi metallici lungo il percorso che possano influenzare la qualità del segnale;
- Controllo della qualità di accoppiamento al terreno delle antenne GPR per evitare fenomeni di Scattering;
- Verifica stato di percorribilità nelle due direzioni della zona da indagare;
- Verifica della qualità del segnale GPS per strumentazioni Geoelettriche Integrate;
- Sensibilità variabile della strumentazione GPR e Geoelettrica ai diversi tipi di concentrazione salina in ambiente acquatico;
- Verifica del livello di saturazione del terreno;
- Preventiva conoscenza geologica della zona di campagna.

Capitolo 4

Utilizzo delle Prospezioni Geofisiche e del GPS nello Studio delle dinamiche della città di Tuzla (Bosnia Erzegovina)

L'adeguata conoscenza delle metodologie di rilievo GPS e delle tecniche di prospezione geofisica permette lo studio approfondito di un ambito di territorio.

Verrà illustrato, di seguito, il caso della città di Tuzla, in Bosnia Erzegovina, una città in cui le miniere di sale e carbone, in passato, hanno reso florida l'economia locale a scapito di problemi di stabilità geologica del terreno su cui poggia.

Tenteremo, analizzando i dati dei rilievi plano-altimetrici in nostro possesso e quelli provenienti dalle prospezioni geofisiche, di ipotizzare le dinamiche del dissesto territoriale della città al fine di poter fornire una possibile soluzione del problema.

4.1 Generalità sulla Città di Tuzla

La città di Tuzla (Bosnia Erzegovina), situata nella zona nordoccidentale della regione, è circondata dalle montagne Majevica, Ozren, Konjuh e Javornikd ed è attraversata dai fiumi Spreča e Jala.

Tuzla è nota, già dal periodo della dominazione ottomana, per la presenza di depositi di salgemma e sorgenti di acqua salata ed il suo stesso nome è derivante dalla parola turca "tuz" che significa sale. L'antico metodo di raccolta consisteva nel convogliare le sorgenti salate, tramite un sistema di tubazioni, in grandi contenitori nei quali, successivamente, veniva fatta evaporare l'acqua in eccesso.

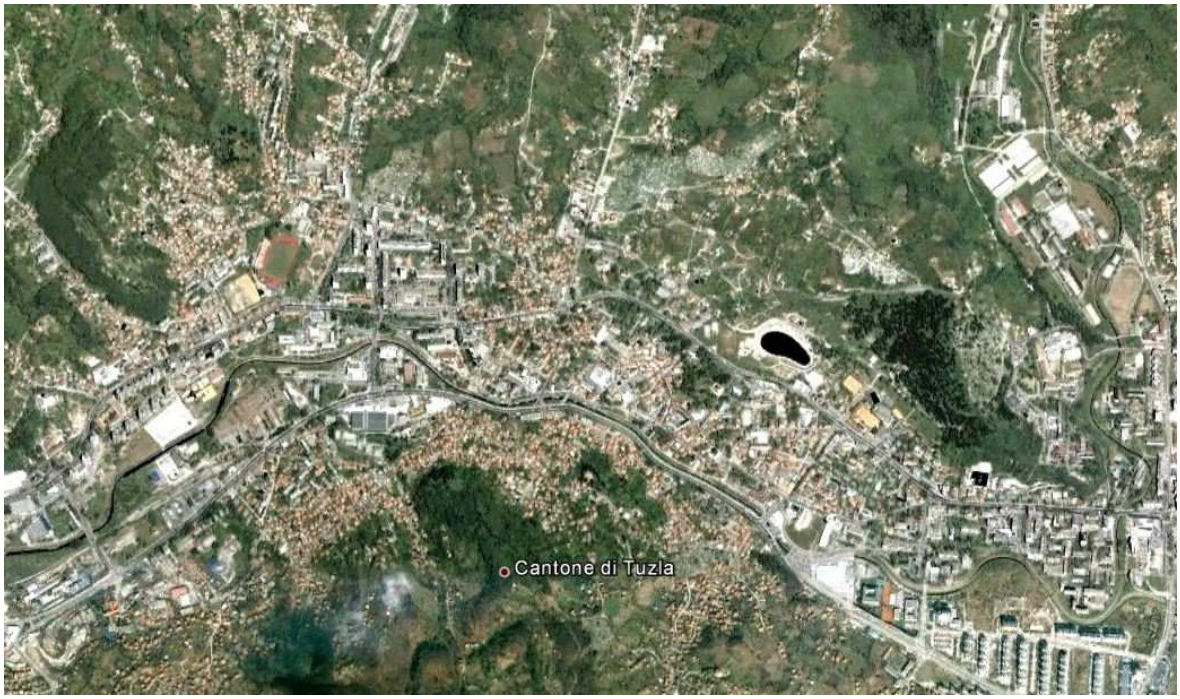


Illustrazione 56:Ortofotografia del Cantone di Tuzla

Dal 1950 circa in poi le estrazioni sono state eseguite per mezzo di escavazioni minerarie e, soprattutto, grazie alla costruzione di circa 150 pozzi di estrazione, tramite i quali era possibile prelevare l'acqua salata dalle falde posizionate a circa 400-500 m di profondità.

Quest'ultima tecnica di estrazione, conosciuta in letteratura come *Wild Brine Pumping*, Pompaggio Selvaggio di Acqua Salmastra, ha originato una dissoluzione dei depositi salini nel sottosuolo difficilmente controllabile, selvaggia appunto, causando intense deformazioni del terreno.

In effetti, la formazione di cavità nel sottosuolo non ha mai portato a fenomeni tipici, quali i *Sinkholes,* per via della tipologia di sedimenti sovrastanti i depositi salini, caratterizzati da formazioni di origine lacustre, lagunare e marina risalenti al Neogene. In un arco di tempo compreso fra i 28 ed i 5 milioni di anni dal presente si sviluppa, entro il cosiddetto bacino Pannonico nell'Europa sud-orientale, un banco di sedimenti che supera i 2,5 Km di spessore su una superficie di oltre 600 Km².

L'area di Tuzla appartiene interamente all'era Miocenica, che rappresenta le caratteristiche tipiche della cronostratigrafia più diffusa e spessa dell'intero bacino. In particolare, i depositi di salgemma, e in generale quelli di natura evaporitica, si sviluppano durante il Miocene Inferiore e si ritrovano intercalati da strati di depositi sedimentari in prevalenza costituiti da marne, argilliti e silt. Per una descrizione completa dei processi deformativi che possono innescarsi a seguito della dissoluzione di livelli evaporitici. (Gutiérrez, 2008).

CENOZOICO	Paleocene	65	Orogenesi alpina. Flora intorno alla Tetide: Laurifille Diversificazione dei Mammiferi
	Eocene	58	Clima tropicale in Europa. Riduzione Cicadali. Primo fossile di *Composite* e di *Graminee*.
	Oligocene	27	Clima sub-tropicale in Europa centro-sett. Diffusione *Graminee*. Sviluppo caducifoglie.
	Miocene	24	Prosciugamento del Mediterraneo. Flora di sclerofille. Ingresso flora steppica.
	Pliocene	5	Raffreddamento generalizzato. Riempimento Mediterraneo. Flora di deserti steppa e savana.
NEOZOICO o QUATERNARIO	Pleistocene	2	Successione di glaciazioni. Immigrazione di specie artiche. Nascono Etna e Eolie.
	Olocene	0,01	Piccole glaciazioni. Azione dell'uomo sulla vegetazione: diffusione di specie sinantropiche.

Illustrazione 57:Ere geologiche piø recenti

L'intenso sfruttamento della falda salata per mezzo dei pozzi di estrazione ha generato una subsidenza molto intensa che, dagli anni '50 ad oggi, ha portato a circa 12 metri di abbassamento complessivo, nelle aree maggiormente coinvolte, con tassi medi annui che raggiungono i 50 cm alla fine degli anni '70.
Tale fenomeno è stato monitorato attraverso misure di livellazione annuali eseguite nel periodo 1956-2003, per opera degli enti locali, su una rete di oltre 800 vertici distribuiti entro un'area di quasi 10 kmq. Tali osservazioni hanno subito un'interruzione in concomitanza della guerra nei Balcani e sono riprese solo parzialmente fino all'anno 2003.

4.1.2 I Sinkholes caratteristici e la differenza con il caso Tuzla

Nella letteratura italiana, il termine sinkhole indicava in principio ampie e profonde depressioni di forma sub-circolare, con diametro e profondità variabili da pochi metri a centinaia di metri, con pareti quasi-verticali e che si aprivano rapidamente in terreni a granulometria variabile.
Tali fenomeni avvengono generalmente su allineamenti tettonici, lungo i quali non è infrequente riscontrare anomalie di fluidi; in tali condizioni i Sinkholes possono subire il fenomeno dell'annegamento, ad opera di acque superficiali, assumendo la fisionomia di laghetti e specchi d'acqua che, localmente, possono subire ulteriore subsidenza.
La continua erosione delle pareti del camino dei Sinkholes provoca il progressivo ricolmamento della voragine, un aumento del diametro e nello stesso tempo una diminuzione della profondità dello specchio d'acqua.
La formazione di questi fenomeni è improvvisa e può avvenire sia in un evento unico che in più eventi con progressivo cedimento delle pareti. (Massari,2001)

In basso, l'illustrazione 58 mostra il Sinkhole del Bottegone, formatosi nei pressi di Grosseto il 29 gennaio 1999; questo Sinkhole presenta assi di dimensioni 180 m per 153 m ed una profondità di 17 metri.

A distanza di quattro anni, il Sinkhole del Bottegone si presenta come un laghetto a causa del processo di annegamento.

Illustrazione 58: Sinkhole del Bottegone (Grosseto),

I meccanismi di erosione dal basso potrebbero essere assimilati a processi di suffosione profonda (Castiglioni,1986) come effetti meccanici dovuti allo scorrimento quasi-superficiale, o profondo, dell'acqua nel terreno quando si presenta crepacciato o poroso e quando l'acqua abbondante ad elevata pressione riesce a trovare vie di scorrimento in cui passare con velocità abbastanza sostenuta. Il passaggio dell'acqua provoca l'erosione di materiale e la formazione di canalicoli e di condotti tubolari lungo le linee idrauliche di flusso, tale fenomeno viene denominato *"Piping"*.

Sprofondamenti in cui è stata accertata la presenza del piping come causa generatrice vengono definiti "*Piping Sinkholes"* (Nisio, 2003).

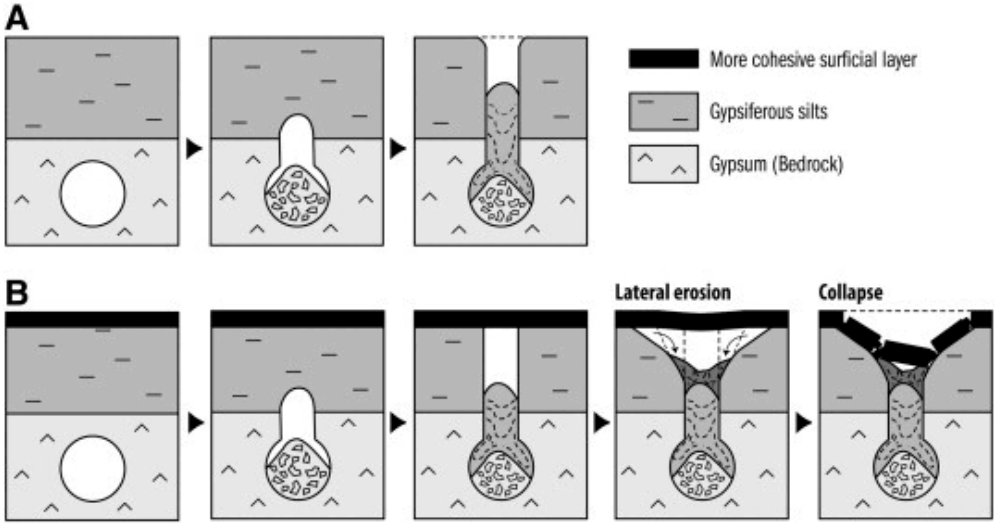


Illustrazione 59: Genesi dei Sinkhole

L'illustrazione 59 mostra due tipi di genesi diversa dei Sinkoles, la prima avviene in modo generalmente graduale con il progressivo sprofondamento del terreno nella cavità, la seconda invece avviene istantaneamente ed in maniera catastrofica, il terreno maggiormente coeso cede di colpo sotto il proprio stesso peso in quanto non più sostenuto dal terreno sottostante.

Uno degli effetti più evidenti, dopo la formazione di un sinkhole, è il processo di "annegamento". Accade di sovente che, al verificarsi di uno sprofondamento catastrofico, in un'area dove il tetto della falda dell'acquifera più superficiale è prossimo al piano campagna, l'acqua di falda si riversi all'interno della depressione dando a questa la fisionomia di un piccolo lago.

In tale situazione, il livello dell'acqua all'interno del piccolo lago subisce delle fluttuazioni stagionali poiché strettamente collegato agli eventi pluviometrici, con condizioni di minimo nella stagione estiva.

In altri casi si osserva che il piccolo lago, ormai formato, non subisce nessuna variazione stagionale di livello ed è inoltre possibile osservare, sulla superficie del lago, bolle di gas risalente dal fondale. (Ciotoli, 2001)

In molti fenomeni studiati si è riscontrato che il chimismo delle acque di alimentazione non è attribuibile alle falde superficiali ma è confrontabile con quello della falda dell'acquifero profondo. In questi casi si può ipotizzare che il fenomeno di annegamento sia influenzato dalla presenza di acquiferi in pressione all'interno del bedrock carbonatico, e che i fenomeni di risalita di fluidi profondi operino in maniera diretta sull'evoluzione di sprofondamenti catastrofici in superficie.

Altro fenomeno a cui può essere sottoposto un sinkhole dopo un certo numero di anni dalla sua formazione è l'estinzione; la cavità può, con il passare del tempo, prosciugarsi e ricolmarsi fino ad estinguersi.

In Italia vi sono molti i casi di estinzione di sinkholes: si possono menzionare alcune cavità ricolmate nella Piana di S. Vittorino ed il caso dell'area del Fosso di S.Martino, Capena, nei pressi di Roma, dove erano presenti sei cavità ospitanti laghetti, di cui solamente una è attiva ancora oggi, ma sembra anche essa ormai in via di estinzione, il Lago Puzzo. (Di Loreto, 1999)

Il caso particolare della città di Tuzla risalta, diversamente da ogni altro sinkhole, per il fatto che l'evento non si è manifestato in maniera istantanea e catastrofica, bensì ha avuto una lunga genesi con progresso pressoché continuo negli ultimi 50 anni. La presenza di falde saline e le continue estrazioni di sale hanno indebolito gli strati più profondi di sale minerario su cui poggiava la città che, nel tempo, ha perso gradualmente ma inesorabilmente il proprio sostegno.

Il caso della municipalità di Tuzla presenta tutte le caratteristiche di un Sinkole, con tanto di processo di annegamento, ma a differenza degli altri fenomeni, è avvenuto in un tempo molto lungo rispetto al processo di sprofondamento istantaneo.

4.1.3 Dati Tecnici Storici

Riporto alcune parti dell'articolo *"Monitoring ground subsidence induced by salt mining in the city of Tuzla":*

Sin dal 1956, serie di dati topografici furono acquisite continuativamente.

La rete topografica era inizialmente composta da 1500 punti, distribuiti su tutta l'area subsidente, e le osservazioni sono state condotte con cadenza annuale, o anche più frequente, sino al 1992. L'interruzione delle misurazioni, durante la guerra dell'ex Yugoslavia, produsse un vuoto di una decade nella serie dei dati, ciò non di meno, le scarse misure disponibili nel periodo compreso tra il 1992 al 2003 permisero almeno l'analisi generale della subsidenza sino a quel momento.

I dati risultanti da ogni campagna annuale furono elaborati dopo la rimozione delle anomalie e delle misure associate a parametri instabili o danneggiati.

L'analisi dei dati dal 1956 al 1992 ha evidenziato un incremento dei tassi di subsidenza sino al 1982 quando, a causa della riduzione nelle attività di estrazione, la subsidenza è di colpo rallentata. L'evoluzione della subsidenza dal 1992 al '95, a causa della coincidenza con la guerra dei balcani, è naturalmente indisponibile e, inoltre, i danni provocati dalla guerra hanno influito notevolmente sui parametri di misura e caposaldi di riferimento causando la perdita ulteriore di dati.

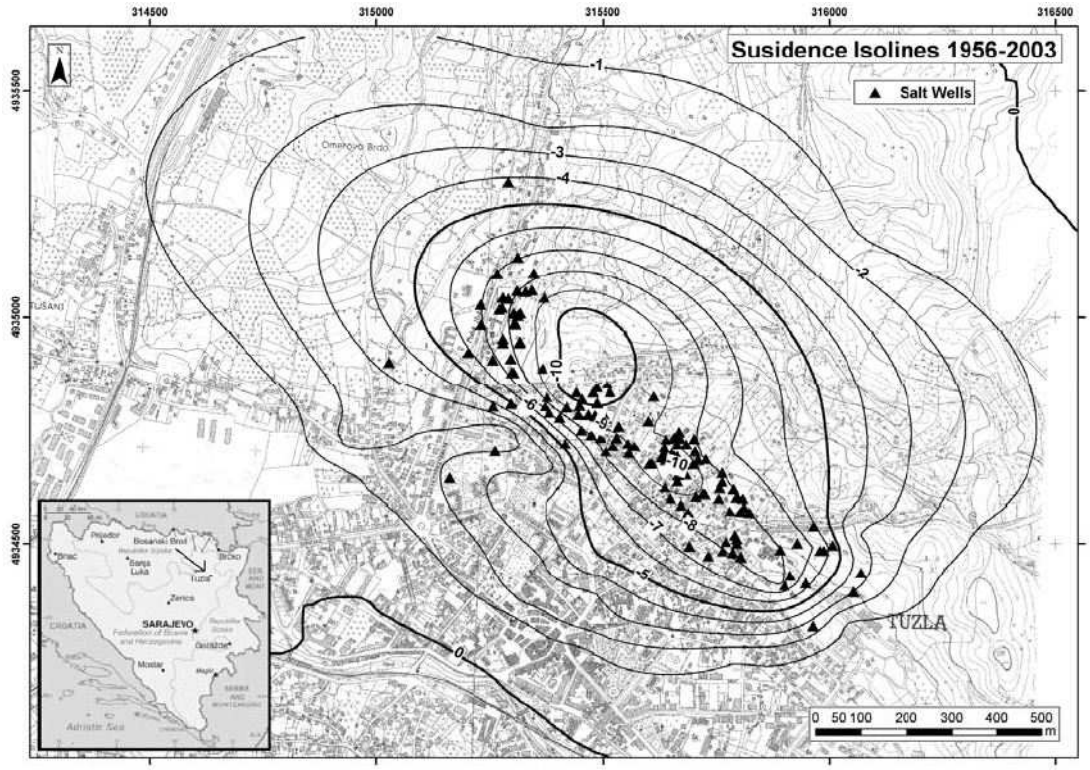


Illustrazione 60: Isolinee di Subsidenza in data 2003

La correlazione tra il fenomeno di affondamento e l'estrazione di sale si è potuta dimostrare grazie al database dei valori annuali di sale estratto elaborato dai tecnici della città di Rotterdam in Olanda.

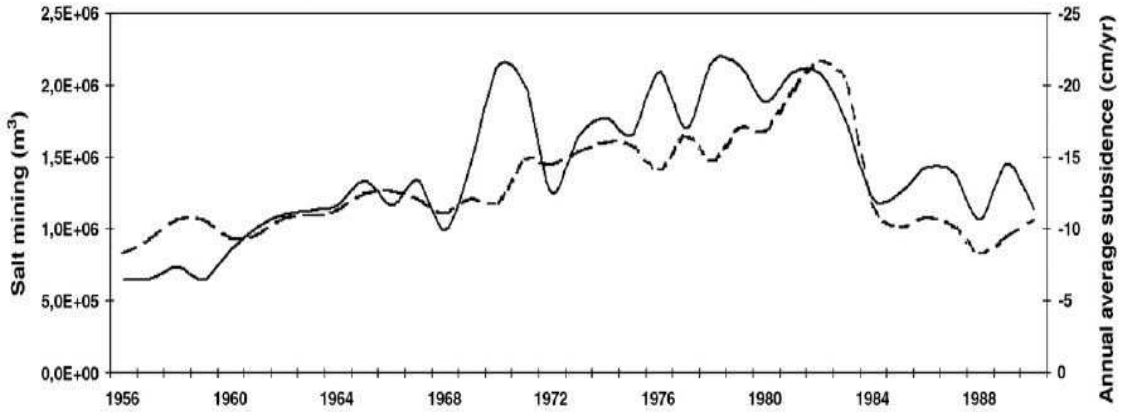


Illustrazione 62: Correlazione tra Subsidenza ed Estrazione di Sale

Un primo confronto espone palesemente un legame tra maggiore subsidenza e numero di pozzi di estrazione salina. L'illustrazione 62 mostra l'andamento della subsidenza media annuale, rappresentata con la linea continua, e la quantità annuale di estrazione salina in metri cubi, con linea tratteggiata.
Il legame tra i due eventi è evidente se si pone attenzione agli anni tra il 1980 ed il 1984, quando l'estrazione salina subisce una riduzione del 50% e , quasi istantaneamente, si ha una riduzione quasi-proporzionale della subsidenza.

L'area interessata da tale cedimento si estende per circa 5 chilometri quadrati a fronte delle aree coperte dalle miniere e dai pozzi d'estrazione salina di superficie 1,5 chilometri quadrati. (Mancini, 2009)

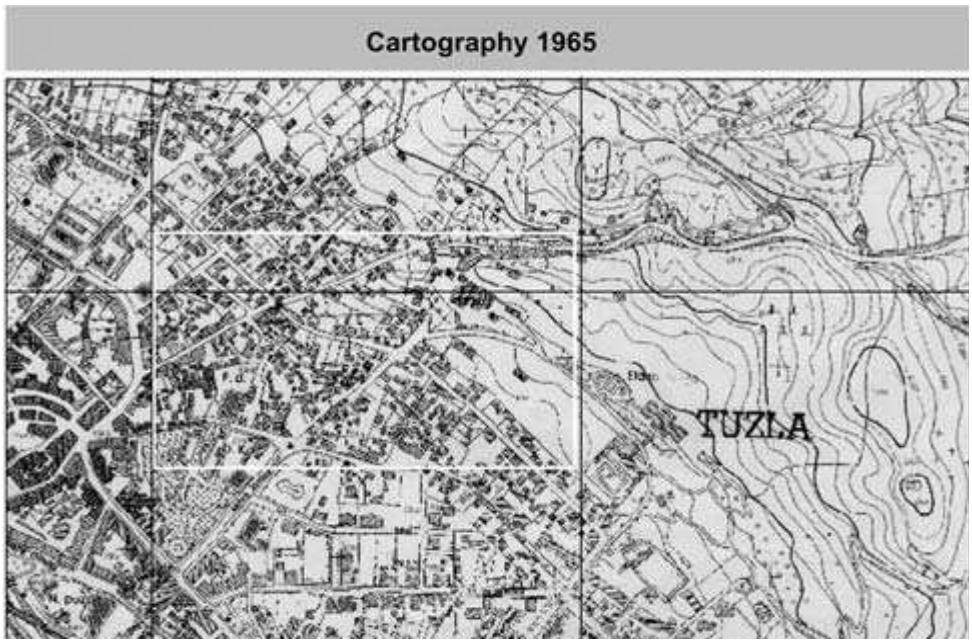


Illustrazione 63: Cartografia di Tuzla del 1965

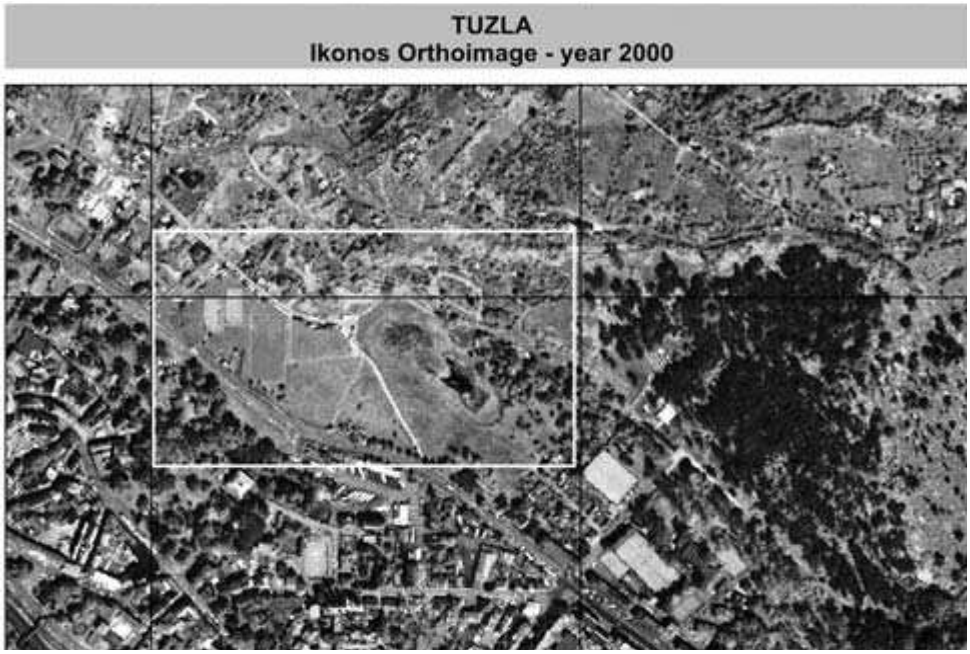


Illustrazione 64: Ortofotografia di Tuzla nel 2000

4.2 Istituzione della Rete GPS e della Nuove Linee di Livellazione

L'utilizzo del GPS venne deciso nel 2004 quando, nell'ambito *"Nato Science for Peace Programme"*, Programma Nato Scienza per la Pace, venne sponsorizzata l'attività di ricerca dal nome *"Development of a Monitoring System to Counter Manage the Risks of Subsidence Deformation on the Population of Tuzla",ossia* Sviluppo di un Sistema di Monitoraggio per Contrastare e Gestire i Rischi della Deformazione da Subsidenza sulla Popolazione di Tuzla, a cui parteciparono attivamente il Centro Interdipartimentale per la Ricerca in Scienze Ambientali ed Il Dipartimento delle Scienze della Terra dell'Università di Bologna, il Dipartimento di Architettura ed Urbanistica del Politecnico di Bari, le Facoltà di Mineralogia, Geologia e Ingegneria Civile della Università di Tuzla ed il Cantone e la Municipalità di Tuzla.

NATO OTAN
This publication is supported by:
The NATO Science for Peace and Security Programme

4.2.2 Specifiche sulla Rete GPS

Richiamo la descrizione del sistema adottato per il monitoraggio GPS illustrata nell'articolo *"Monitoring ground subsidence induced by salt mining in the city of Tuzla":*

Nel 2004, una tecnologia più produttiva ed economica fu scelta dal team Italo-Bosniaco di Monitoraggio. Le nuove informazioni disponibili sulla dinamica attuale della subsidenza che interessa Tuzla divennero le basi per la pianificazione urbanistica e la quantificazione del rischio relazionato alle attività minerarie.

Il metodo scelto per il posizionamento GPS fu del tipo statico relativo, che offriva la potenzialità di individuare anche deformazioni a lenta evoluzione con una accuratezza di 3-4 mm all'anno, a condizione che le osservazioni fossero condotte con una adeguata geometria della rete d'acquisizione.

Una rete GPS di questo tipo fu quindi installata all'esterno dell'area subsidente. Sei caposaldi di riferimento furono installati su posizioni ipoteticamente stabili attorno all'area di sprofondamento ed una più densa rete, composta i 60 punti, venne programmata all'interno dell'area da osservare.

Durante le attività di campagna del 2004 la rete di riferimento impostata venne agganciata alla Rete Internazionale di Riferimento Terrestre ITRF, epoca 2000, ed una prima osservazione fu condotta rapidamente tramite metodologia statica e statica-rapida. (Altamimi, 2002)

Un anno dopo, durante la successiva osservazione, la rete di riferimento fu nuovamente misurata utilizzando la strumentazione GPS e fu realizzato il raffittimento. La stabilità delle stazioni di riferimento fu avvalidata dai dati ottenuti tramite l'interfacciamento con la rete di riferimento esterna, evitando in tal modo di sotto-stimare il tasso di affondamento delle stesse stazioni di

riferimento impiantate.

Il livello di accuratezza ottenuto dall'elaborazione dei dati dell'analisi della rete può essere verificato dalla dimensione dei semiassi delle ellissi d'errore, sempre sotto i 4 mm con un livello di affidabilità dell'86%.

Una volta stabilito che la rete di riferimento era libera da movimenti in elevazione o deformazioni locali, le soluzioni ottenute dall'elaborazione dei dati collezionati dal 2004 al 2005 venne confrontata. Il confronto mostrava un tasso di subsidenza media di 14 cm all'anno con massimi di 22 cm.

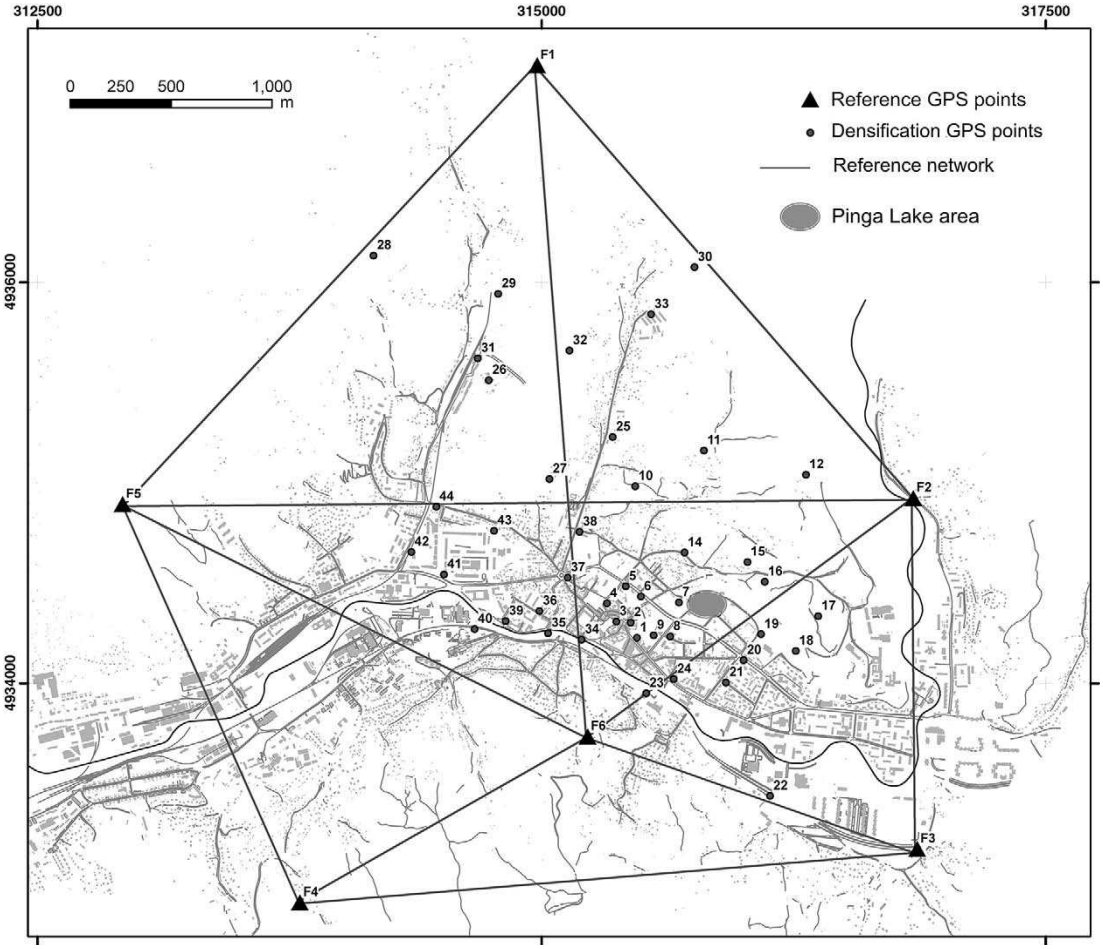


Illustrazione 65: Rete GPS istituita

Gli ultimi tassi di subsidenza desunti dalle osservazioni GPS sono compatibili con il trend decrescente iniziato nel 1982 come conseguenza della riduzione delle estrazioni minerarie. I dati del GPS coincidono con i 730.000 metri cubi di sale estratto nel medesimo periodo dai 10-12 pozzi ancora attivi.
La relazione tra estrazione e subsidenza è tuttora valida in quanto al 1990 il volume medio annuo estratto era di un milione di metri cubi ed il tasso di subsidenza è diminuito del 30 % in questo range temporale. (Mancini, 2009)

4.2.3 Dati di Livellazione

Una volta appurato che il dissesto in atto era causato dalle estrazioni di sale ad opera della Compagnia Mineraria di Tuzla, la stessa si è fatta carico di eseguire nuove campagne di livellazione al fine di comprendere il problema e rimediare in parte ai propri errori. Tali misurazioni sono state condotte con cadenza annuale e talvolta semestrale e, inoltre, la società fornisce attualmente, ai curatori del progetto NATO, anche i dati riguardanti i livelli piezometrici, che risulteranno fondamentali nella comprensione dei fenomeni messi in moto dall'estrazione del sale.

Le osservazioni sono state eseguite omogeneamente sull'area subsidente, ma le campagne differivano nella geometria di acquisizione. Persino con alcune variazioni tra le osservazioni, il valor medio delle misurazioni permise la creazione di mappe di subsidenza utilizzando un software GIS.

L'evoluzione della subsidenza durante l'intero periodo dall'agosto 2006 al novembre 2010, 51 mesi in totale, ebbe il primario scopo di identificare con precisione la zona interessata.

Illustrazione 66: Esemplificazione delle Zone oggetto delle Livellazioni

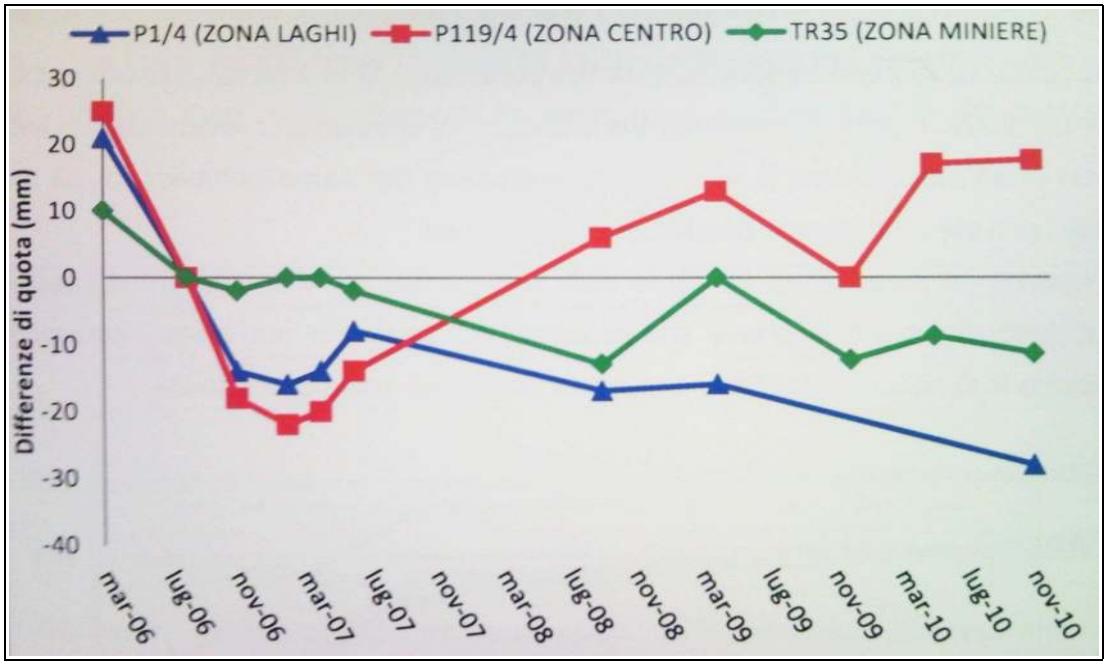


Illustrazione 67: Andamento Medio della Subsidenza nelle 3 Zone

L'area analizzata presenta tre grandi zone principali con differenti caratteristiche di variazione in senso verticale. La città storica a sud, evidenziata in rosso nella illustrazione 66, mostrano una tendenza ad un innalzamento longitudinale di alcuni centimetri. L'area dei laghi è localizzata leggermente più a nord, è evidenziata in blu ed è affetta da una subsidenza intensa, sino a 14 centimetri in quattro anni. L'area delle miniere, a nordovest ed evidenziata in verde, è stata oggetto in passato di escavazioni a secco ed attualmente è interessata da movimenti verticali positivi. Inoltre, queste tre zone di maggior rilievo sono connesse tramite una zona di transizione, lungo la strada principale che attraversa Tuzla puntando verso nord, che denota una inversione della tendenza dei movimenti verticali da positiva a negativa. L'area maggiormente critica è situata lungo la strada che divide la città da nordovest a sudest e che fa da cardine tra l'innalzamento del centro cittadino e l'area subsidente dei laghi, presentando le più evidenti deformazioni del terreno.

L'Illustrazione 67 contiene un grafico rappresentante l'evoluzione dei movimenti verticali nelle tre aree considerate; in esso appare chiaro che, durante il 2006, tutte le aree erano inizialmente affette da subsidenza mentre, agli inizi del 2007, quando il prelievo delle acque salmastre venne bloccato, c'è stata una inversione di tendenza che influì su tutta la città. Dopo questo momento, l'area dei laghi iniziò nuovamente ad affondare, mentre il centro storico divenne teatro di innalzamenti differenziali seppur generalizzati, specialmente ai limiti dell'area dei laghi. L'area delle miniere sembrava tutto sommato stabile in un primo momento, ma anch'essa presenta la tendenza allo sprofondamento, seppur molto meno pronunciata.

Vediamo adesso, nel dettaglio, tre fasi intermedie nell'evoluzione del fenomeno. Nell'illustrazione 68 troviamo l'evoluzione del fenomeno al giugno 2007 evidenziata con un cerchio verde acqua, una seconda fase, evidenziata in blu chiaro, individua il fenomeno sino al settembre 2008 e la terza fase, in rosa, mostra la subsidenza/sollevamento all'aprile 2009.

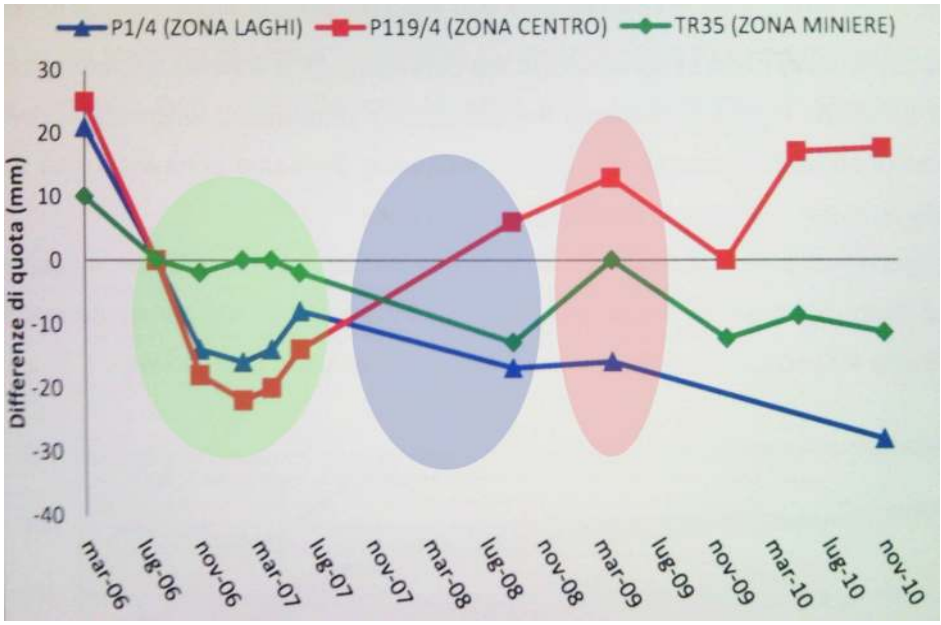


Illustrazione 68: Le tre fasi intermedie

Delle tre fasi esistono delle rappresentazioni grafiche ottenute tramite integrazione dei dati di livellazione e immagine satellitare in ambiente GIS.

La prima fase, più chiaramente esposta nella Illustrazione 69, riporta una chiara subsidenza nella zona dei laghi e delle miniere, indicata con colori dal ciano al verde scuro, ed uno leggero sollevamento della zona del centro storico evidenziata in giallo.

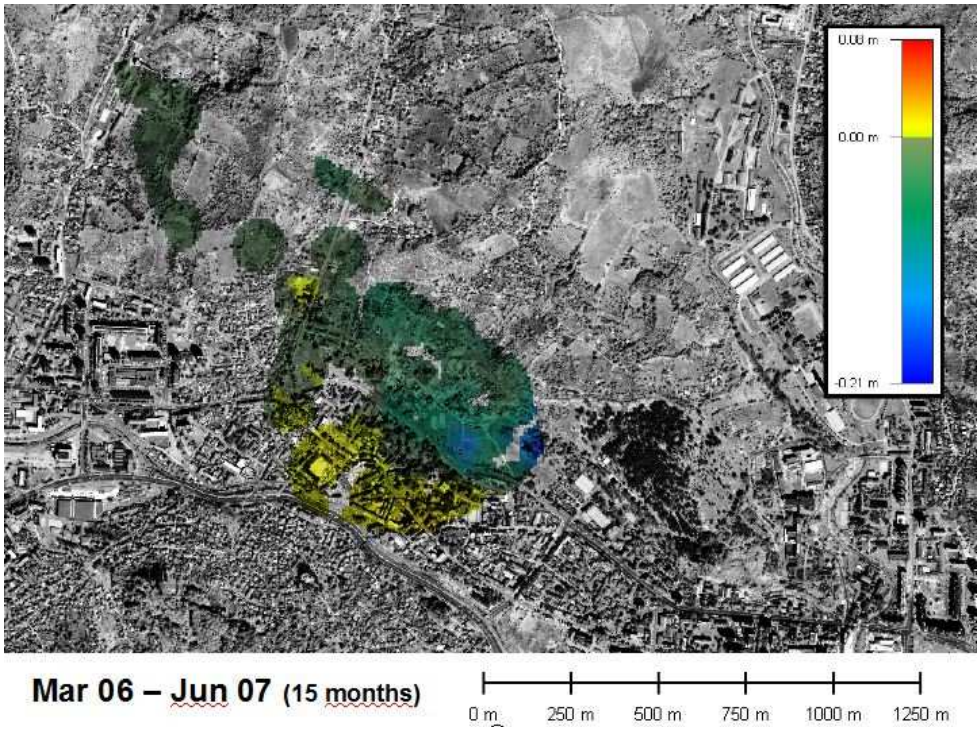


Illustrazione 69: Prima Fase

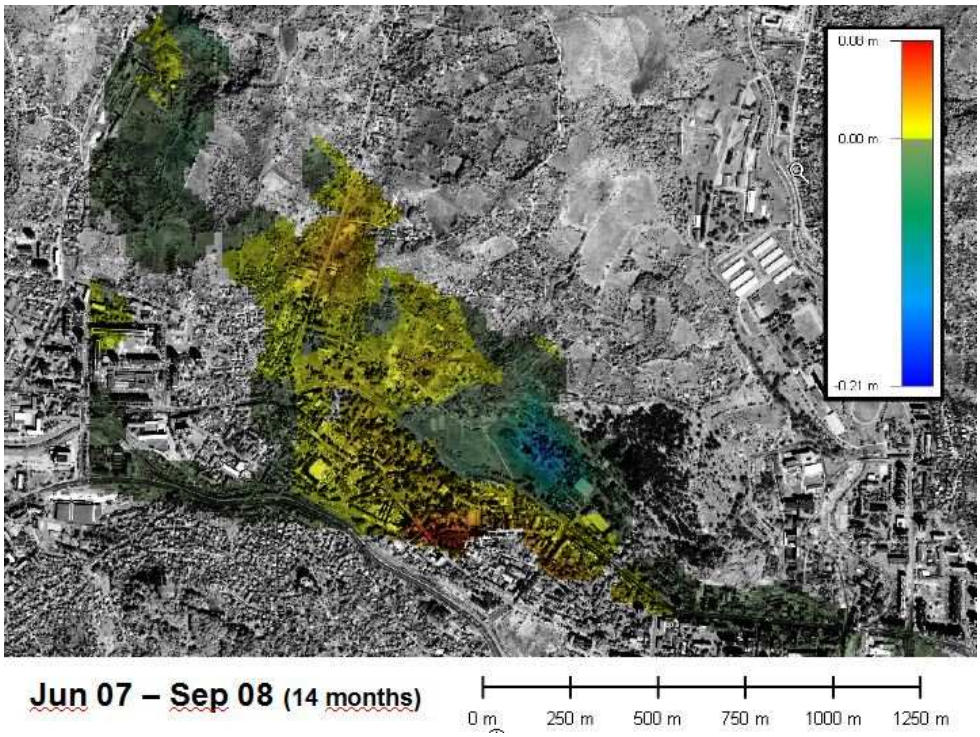


Illustrazione 70: Seconda Fase

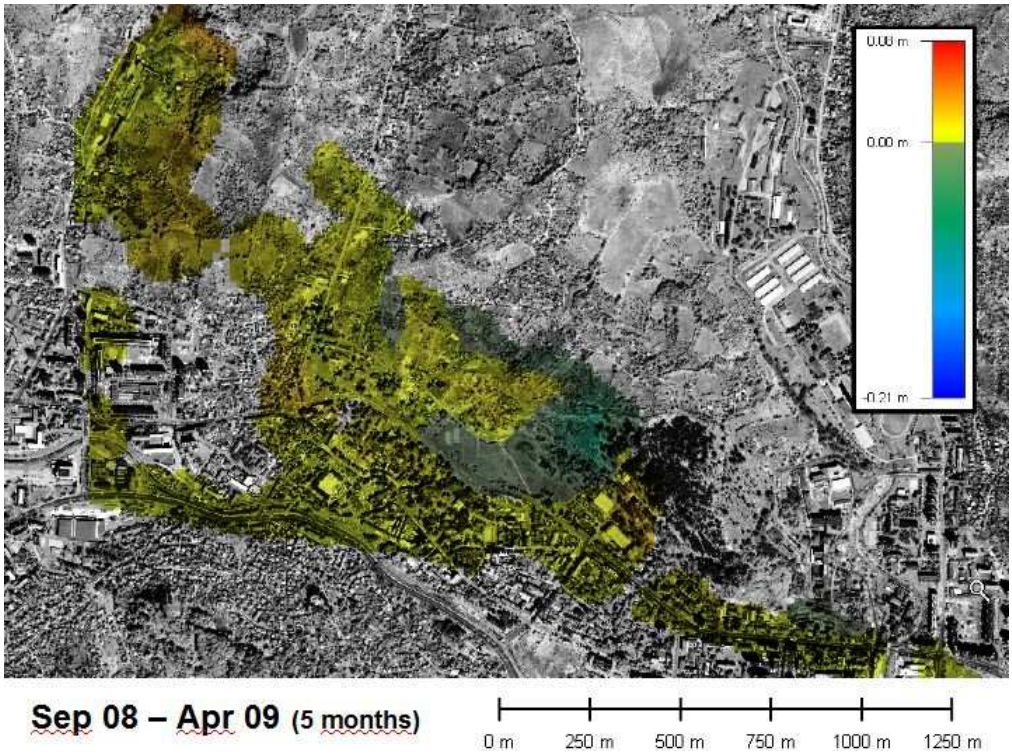


Illustrazione 71: Terza Fase

Nella seconda fase, Illustrazione 70, notiamo una generale riduzione della subsidenza, che continua implacabile la sua azione nelle zone delle miniere e dei laghi, salvo che per alcuni limitati intervalli. La zona del centro storico, invece, continua ad emergere aumentando la propria influenza anche nella zona di transizione tra laghi e miniere.

Nella terza fase, Illustrazione 71, il trend delle miniere risulta ormai invertito, come per la zona di transizione tra le stesse ed i laghi. Il centro storico tende ancora ad emergere e, nella zona dei laghi, il trend di subsidenza presenta una nuova e più evidente azione. Il blocco delle attività di estrazione ha avuto effetti positivi generalizzati per tutta la zona del centro di Tuzla, ma non per l'area di pertinenza dei laghi.

La compagnia delle miniere si fece carico, inoltre, di fare indagini piezometriche su tutta l'area cittadina, tali indagini diedero come esito, negli anni recenti, la conferma di un effettivo innalzamento della falda acquifera che, a causa del mancato prelievo, ha iniziato ad elevarsi ai livelli naturali, per una differenza totale in alcuni punti di oltre 40 metri dall'inizio delle osservazioni nel 2007.

Al termine di tali indagini restava ancora non chiaramente definita la causa dei movimenti di subsidenza in tutta la zona, avendo completamente rimosso la prima causa generatrice del dissesto.

4.3 La Geoelettrica nel caso di Tuzla

L'applicazione del metodo della tomografia elettrica bidimensionale, nel caso di Tuzla, ha lo scopo di generare una rappresentazione continua del sottosuolo, nello spazio bidimensionale, al fine di comprendere in maniera più intima i fenomeni in atto. Il metodo in passato fu applicato con successo anche in condizioni geologiche relativamente complesse e per studi a profondità relativamente elevate, circa 100 metri.

Per le misure nel centro cittadino di Tuzla, si è utilizzata la disposizione Shlumberg e Wenner, in quanto offriva una buona risoluzione verticale necessaria per una migliore, e più accurata, interpretazione geofisica.

L'elaborazione dei dati ottenuti in questa fase è stata condotta tenendo presente sia le condizioni litologiche e strutturali-geologiche dei micro-ambiti nell'area oggetto di indagine, sia la compatibilità con le condizioni montano-geologiche delle rocce massicce presenti al di sotto di tutta l'area di di studio al fine di ottenere informazioni rilevanti e sufficientemente affidabili.

Illustrazione 72: Indicazione dei profili geoelettrici indagati

4.3.2 Strumentazione Utilizzata e Dati Ottenuti

Una parte delle misure di campagna, nel corso di questo progetto, è stata effettuata utilizzando uno strumento a 32 elettrodi della fabbrica italiana PASI, il modello 16SG24.

La caratteristica peculiare di questa strumentazione è la sua estrema modularità, ossia offre la possibilità di gestire le due differenti metodologie d'indagine: sismica a rifrazione/riflessione e tomografia elettrica.

Illustrazione 73: PASI, modello 16SG24

L'attrezzatura completa comprende:

- Elaboratore Modello 16SG24;
- Cavo Sismico a 12 tracce intervallate di 10 metri per un totale di 130 metri di lunghezza;
- 12 Geofoni da 10 Mhz
- Una mazzetta da 8 kg;
- Geofono Starter;
- Cavo schermato di alimentazione da 200 metri;
- Piattello di battuta in alluminio;

- Due Cavi con connettori per 16 elettrodi intervallati di 5 metri per 85 metri di lunghezza;
- Cavo adattatore per configurazione ad Y;
- Due Link Box completi di cavi;
- 32 picchetti in acciaio inossidabile;
- Energizzatore P-300T per la Tomografia Geoelettrica.

Una volta disposta l'attrezzatura sulla superficie del profilo da studiare, si impostano i dati relativi all'intervallo spaziale tra gli elettrodi in modo da fornire allo strumento la base per determinare il coefficiente K, necessario ad avere la resistività apparente ricercata ρ.

Le tomografie elettrica 2d realizzate hanno sfruttato la massima potenzialità dello strumento usando la massima unità spaziale degli elettrodi, ossia 5 metri, per ottenere dati a maggiore profondità.

L'elaborazione ed interpretazione dei dati di campagna è stata effettuata utilizzando il programma RES2DINV che ha la funzione di effettuare l'inversione dei dati misurati apparenti , o modellazione inversa, cioè convertire la pseudo-sezione in un modello di reale resistenza. Le inversioni inoltre tengono conto della sinuosità del terreno e sono state appropriatamente corrette. Le tomografie definitive hanno una dimensione di circa 140 metri di lunghezza per 31 metri di profondità.

4.3.2 Interpretazione dei Grafici

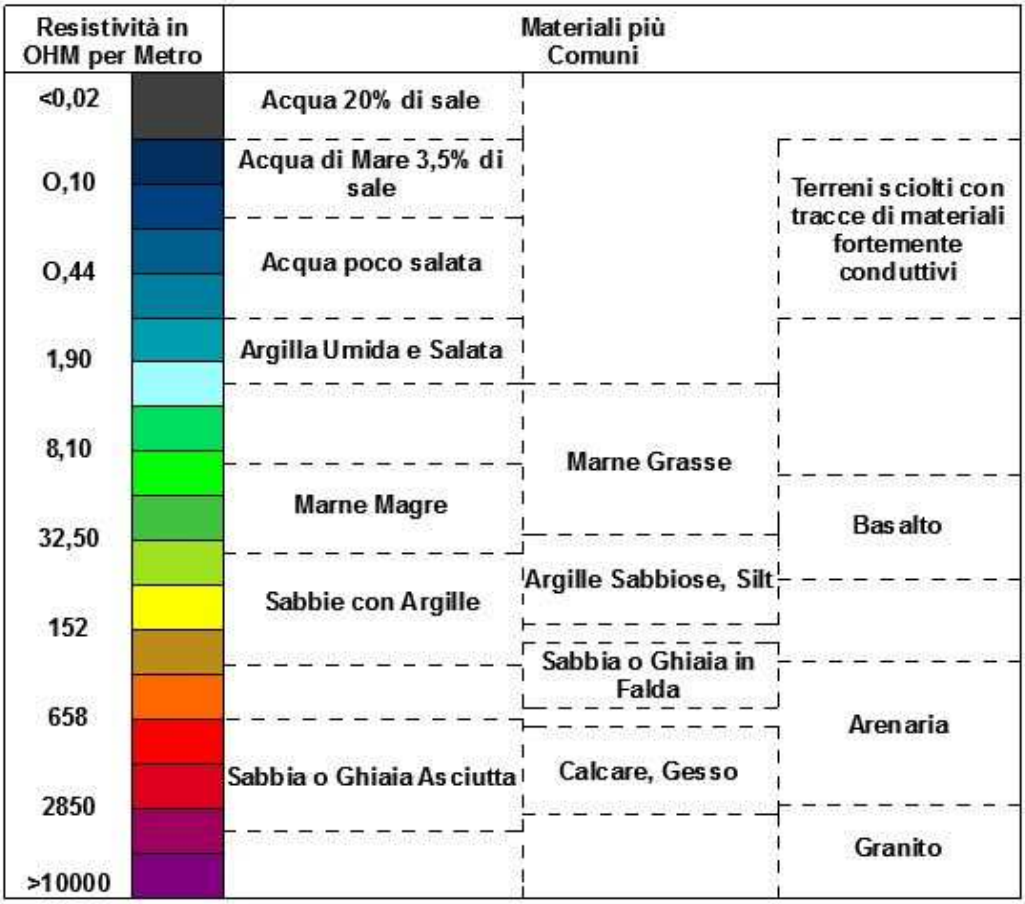


Illustrazione 74: Specchietto di Riferimento delle Resistività dei Materiali

Di seguito riporto un esempio di elaborazione da dati grezzi e dati modellizzati del primo profilo TOMO-1, che va dalla Stazione di Servizio INA alla Chiesa Ortodossa Serba, con relativa interpretazione geologica.

Nell'illustrazione 75 notiamo, in basso, la scala cromatica grafica delle resistenze misurate; le resistenze possono essere associate ad una serie di materiali probabili, classificati nella illustrazione 74, tenendo conto delle caratteristiche geologiche del Bacino Pannonico.

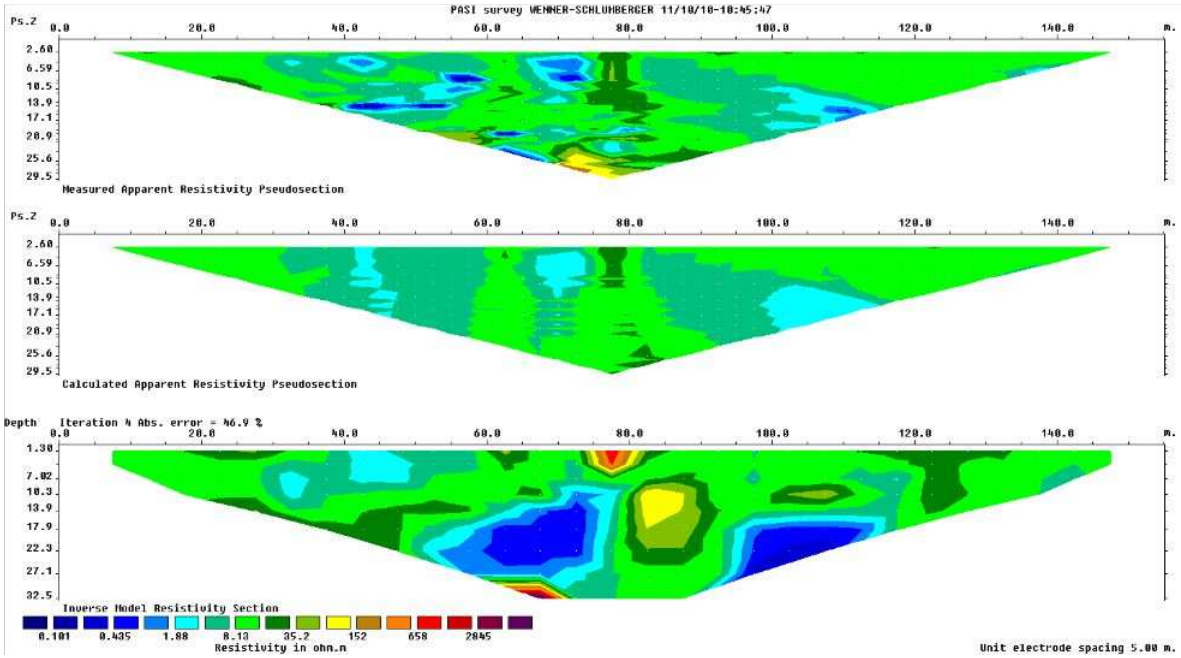


Illustrazione 75: TOMO-1 Apparente Misurata, Calcolata ed Inversa

Facendo riferimento all'Illustrazione 74, possiamo interpretare i dati grafici risultanti dalla elaborazione automatica fornita dalla PASI nell'Illustrazione 75.

Sullo strato più superficiale abbiamo, da sinistra a destra:

Marne Magre, Marne Grasse, Marne Magre, Arenaria al centro, Marne Magre.

Sullo strato immediatamente in basso abbiamo:

Marne Magre, Marne Grasse, Marne Magre, Argilla Umida e Salata, Sabbia con Argilla, Argille Sabbiose Silt, Marne Magre.

Nello strato più profondo troviamo:

Argilla Umida e Salata, Marne Magre, Acque Mediamente Salate o Terreni imbevuti di Soluzioni Saline.

Lo specchietto non è sempre valido per quanto riguarda l'interpretazione cromatica, ma gli intervalli di resistività individuati restano determinati ed aiutano a determinare i materiali anche nelle tomografie di diverso range resistivo.

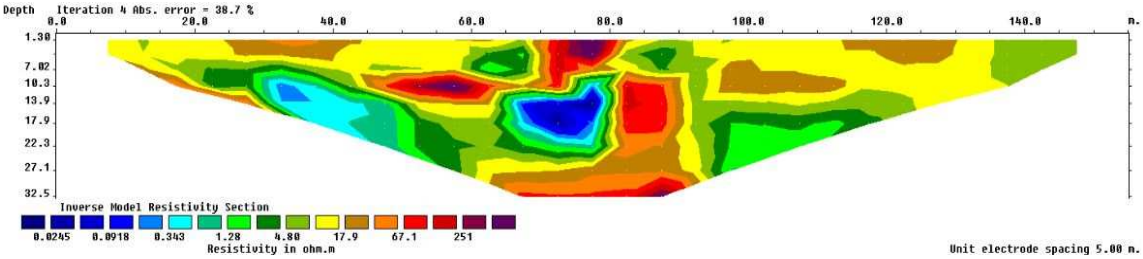


Illustrazione 76: TOMO-2 Lungo la strada della Chiesa Ortodossa Serba

Nell'Illustrazione 76 abbiamo un parametro massimo di resistività di circa 700 Ohm per metro; sullo strato più superficiale individuiamo:

Marne Grasse, Marne Magre, Argille Sabbiose Silt, Sabbia con Argilla al centro, Marne Grasse, Marne Magre, Marne Grasse.

Sullo strato immediatamente in basso abbiamo:

Marne Grasse, Sabbia o Ghiaia in Falda, Arenaria, Marne Magre.

Nello strato più profondo troviamo:

Acque Mediamente Salate o Terreni imbevuti di Soluzioni Saline, Acqua con 20% di Sale, Argilla Umida e Salata.

Al fondo abbiamo una base in Arenaria.

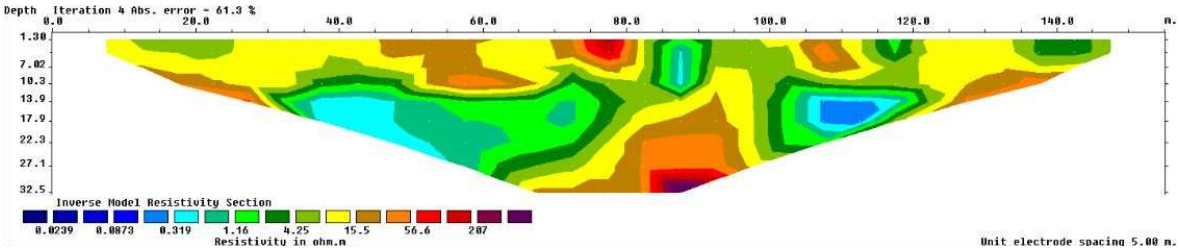


Illustrazione 77: TOMO-3 Dalla stazione di pompaggio Limenka alla Piazza

Nell'Illustrazione 77 abbiamo un parametro massimo di resistività di circa 650 Ohm per metro;sullo strato più superficiale individuiamo:

Marne Magre, Argille Sabbiose Silt, Sabbie con Argilla al centro, Argilla Umida e Salata, Argille Sabbiose Silt, Argilla Umida e Salata, Marne Grasse.

Sullo strato intermedio troviamo:

Marne Magre, Argille Sabbiose Silt, Marne Grasse al centro, Marne Magre, Argilla Umida e Salata.

Nello strato più profondo troviamo:

Argilla Umida e Salata, Argille Sabbiose Silt.

Alla base troviamo:

Marne Magre, Sabbia o Ghiaia in falda.

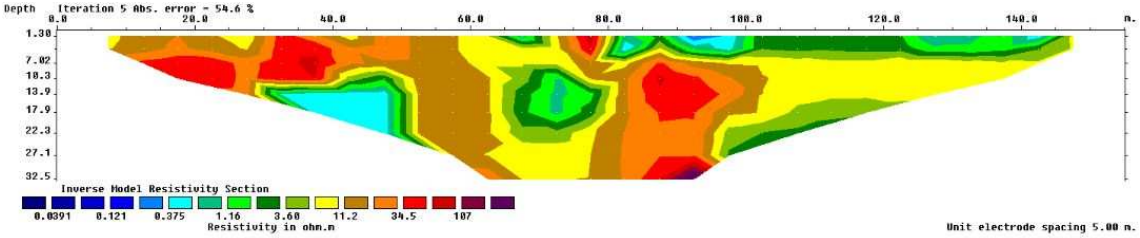


Illustrazione 78: TOMO-4 da Car Parts Boris all'Ospedale

Nell'Illustrazione 78 abbiamo un parametro massimo di resistività di circa 380 Ohm per metro;sullo strato più superficiale individuiamo:

Marne Magre, Argille Sabbiose Silt, Marne Magre, Marne Grasse, Argille Sabbiose Silt al centro, Argilla Umida e Salata, Marne Grasse, Argilla Umida e Salata.

Nello strato intermedio troviamo:

Argille Sabbiose Silt, Marne Magre, Argilla Umida e Salata, Marne Magre, Marne Grasse.

Nello strato più profondo troviamo:

Acque Mediamente Salate o Terreni imbevuti di Soluzioni Saline, Marne Grasse, Argille Sabbiose Silt.

Alla base troviamo:

Sabbia o Ghiaia in falda.

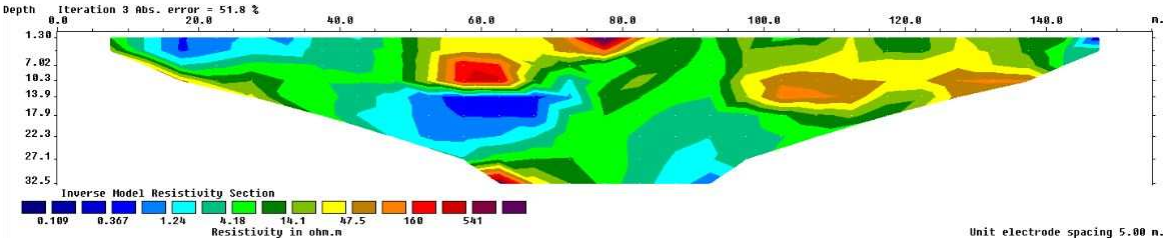


Illustrazione 79: TOMO-5 continua da Car Parts Boris lungo la strada

La Tomo-5 presenta un parametro massimo di resistività di circa 1600 Ohm per metro; sullo strato più superficiale individuiamo:

Marne Grasse, Argilla Umida e Salata, Argille Sabbiose Silt, Arenaria al centro, Marne Grasse, Argille Sabbiose Silt.

Nello strato intermedio troviamo:

Marne Grasse, Sabbie con Argille, Marne Grasse, Argille Sabbiose Silt.

Nello strato più profondo troviamo:

Argilla Umida e Salata, Marne Grasse.

Alla base troviamo:

Sabbie con Argilla, Argilla Umida e Salata.

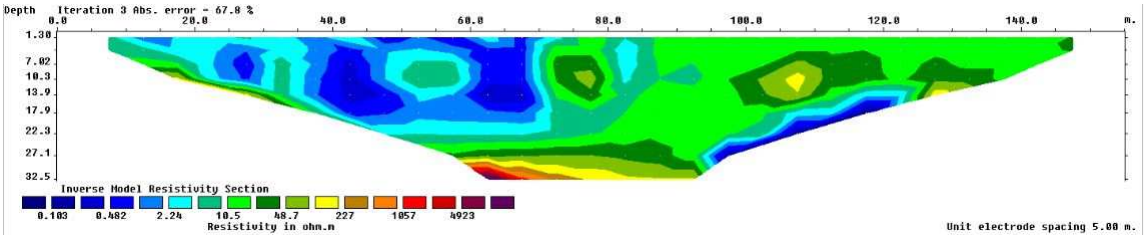


Illustrazione 80: TOMO-6 Dalla strada dello Stadio all'Ospedale

La Tomo-6 presenta un parametro massimo di resistività di circa 18000 Ohm per metro; sullo strato più superficiale individuiamo:

Marne Grasse, Argilla Umida e Salata, Marne Magre e Marne Grasse al Centro, Marne Magre.

Nello strato intermedio troviamo:

Argilla Umida e Salata, Acque Mediamente Salate o Terreni imbevuti di Soluzioni Saline, Marne Magre, Acqua Salata 3,5% circa di concentrazione, Argille Sabbiose Silt, Marne Magre, Sabbie con Argilla.

Nello strato più profondo troviamo:

Argilla Umida e Salata, Acque Mediamente Salate o Terreni imbevuti di Soluzioni Saline, Marne Magre, Acqua Molto Salata.

Alla base troviamo:

Ghiaia Asciutta o Granito.

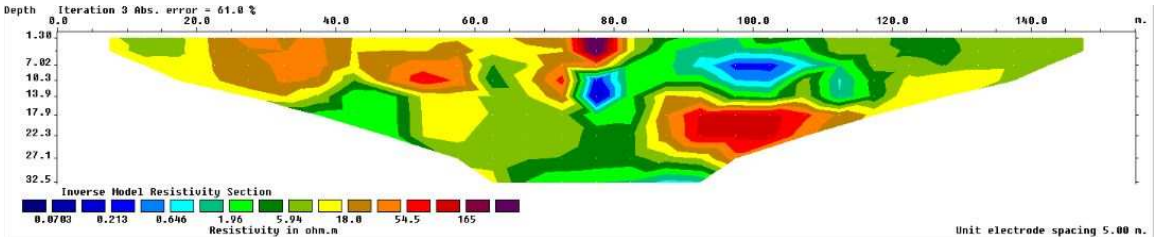


Illustrazione 81: TOMO-7 Dalla strada dello Stadio all'Ospedale

L'Illustrazione 81 presenta un parametro massimo di resistività attorno ai 520 Ohm per metro e sullo strato più superficiale individuiamo:

Marne Magre, Argille Sabbiose Silt, Marne Magre, Sabbia o Ghiaia in Falda al centro, Argilla Umida e Salata, Marne Grasse, Marne Magre.

Nello strato intermedio troviamo:

Argille Sabbiose Silt, Marne Grasse, Acque Mediamente Salate o Terreni imbevuti di Soluzioni Saline, Argilla Umida e Salata, Acque Mediamente Salate o Terreni imbevuti di Soluzioni Saline, Marne Magre

Nello strato più profondo troviamo:

Marne Grasse, Marne Magre, Marne Grasse, Sabbie con Argilla, Argille Sabbiose Silt.

Alla base troviamo un fondo di Marne Grasse.

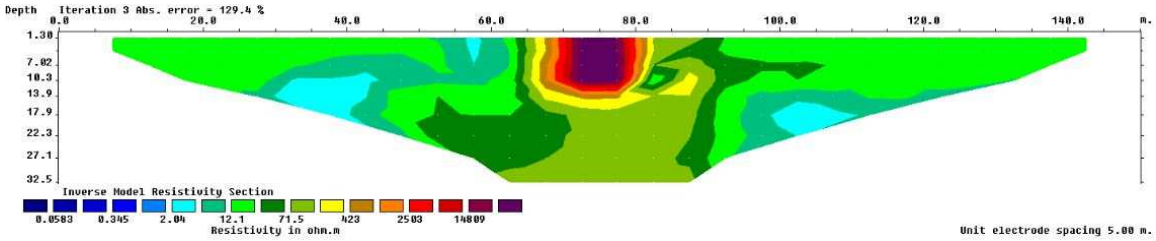


Illustrazione 82: TOMO-8 Dalla Chiesa Serba al Limenka attraverso il Parco

L'Illustrazione 82 presenta un parametro massimo di resistività attorno ai 60000 Ohm per metro e sullo strato più superficiale individuiamo:

Argille Sabbiose Silt, Marne Grasse, Basalto o Granito al centro, Argille Sabbiose Silt.

Nello strato intermedio troviamo:

Marne Grasse, Argille Sabbiose Silt, Sabbia o Ghiaia in Falda al centro, Argille Sabbiose Silt.

Nello strato più profondo troviamo:

Argille Sabbiose Silt e Marne Grasse al lato.

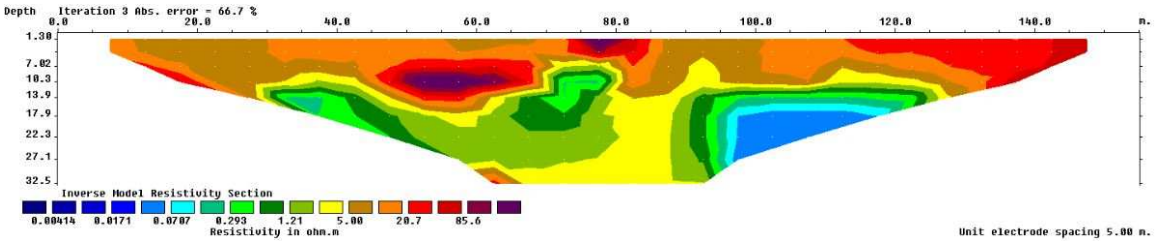


Illustrazione 83: TOMO-9 Da Bankereova al Parco fiancheggiando il Lago

L'Illustrazione 83 presenta un parametro massimo di resistività attorno ai 350 Ohm per metro e sullo strato più superficiale individuiamo:

Marne Magre, Sabbia o Ghiaia in Falda al centro,Marne Magre, Argille Sabbiose Silt.

Nello strato intermedio troviamo:

Marne Magre, Sabbia o Ghiaia in Falda, Acque Mediamente Salate o Terreni imbevuti di Soluzioni Saline al centro, Argilla Umida e Salata, Argille Sabbiose Silt.

Nello strato più profondo troviamo:

Acque Mediamente Salate o Terreni imbevuti di Soluzioni Saline, Argilla Umida e Salata, Acqua Molto Salata 20 % circa di concentrazione.

Alla Base abbiamo Argilla Umida e Salata.

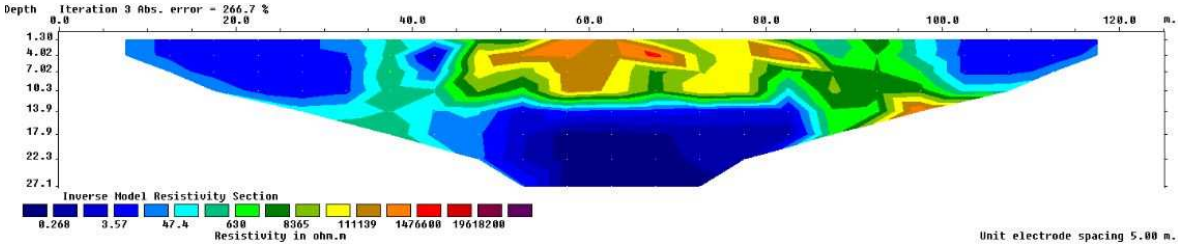


Illustrazione 84: TOMO-10 Da Limenka alla seconda parte del Parco

L'Ultima Tomografia, TOMO-10, presenta un picco di resistività molto elevato, attorno ai 50 milioni di Ohm per metro.

Sullo strato più superficiale individuiamo:

Marne Magre, Sabbia o Ghiaia in Falda, Argille Sabbiose Silt. Granito al centro e di lato, Formazioni Calcaree Asciutte,Sabbia o Ghiaia in Falda, Marne Magre.

Nello strato intermedio troviamo:

Marne Magre, Sabbia o Ghiaia in Falda, Marne magre, Granito al centro circondato da Formazioni Calcaree Asciutte, Calcare al lato, Marne Magre.

Nello strato più profondo troviamo:

Sabbia o Ghiaia in Falda, Marne magre, Marne Grasse, Granito.

Alla Base abbiamo Acqua Molto Salata 20 % circa di concentrazione.

Si può quindi dedurre che, generalmente, al di sotto del centro cittadino di Tuzla vi è un terreno maggiormente composto di Argille, Marne e Silt, come già ipotizzato dalle iniziali ricerche geologiche.

L'indagine Geofisica ha inoltre evidenziato una elevata concentrazione di falde acquifere a carattere salino, con tutta probabilità connesse alle formazioni saline profonde.

4.4 Deduzioni Scaturite dalle Analisi Effettuate

Le analisi dei dati storici di livellazione e delle tabelle di estrazione di sale minerale ha permesso di supporre una diretta correlazione tra fenomeno di subsidenza del centro storico di Tuzla ed il volume di sale estratto. Ipotizzato il motivo di innesco, si è studiato nel dettaglio, negli anni successivi, il territorio a livello sia epidermico, tramite nuovi dati di livellazione e l'istituzione di una rete GPS, sia sotterraneo, tramite le prospezioni geofisiche ed i dati piezometrici.

La correlazione tra subsidenza ed estrazioni ha spinto la Compagnia Mineraria di Tuzla alla progressiva riduzione delle estrazioni sino a giungere al pressoché totale arresto delle estrazioni; il risultato fu di una evidente riduzione del processo di subsidenza sino al termine del 2006, quando il prelievo delle acque saline tramite pozzi di pompaggio venne bloccato.

Negli anni successivi, i dati di livellazione hanno mostrato, per alcune zone, una inversione di tendenza, ossia si stava avviando un processo di emersione delle zone del centro cittadino e delle miniere. Lo studio dettagliato di queste livellazioni ha evidenziato anche la ripresa della subsidenza nella zona dei laghi, tuttavia non esisteva più alcuna evidente motivazione per giustificare tale fenomeno.

Le prospezioni geoelettriche, realizzate dalla Facoltà di Mineralogia, Geologia e Ingegneria Civile della Università di Tuzla ed interpretate in questo studio, evidenziano terreni prevalentemente argillosi e marnosi imbevuti di acque salmastre o con alta concentrazione di sale; tali acque, con tutta probabilità, sono connesse alla risalita naturale della falda acquifera che, avendo trovato nuove vie di passaggio nelle fratture del terreno fagliato e tramite il fenomeno del piping, si è insinuata all'interno dei giacimenti salini presenti al di sotto del lago innescando così un nuovo processo di dissoluzione degli stessi.

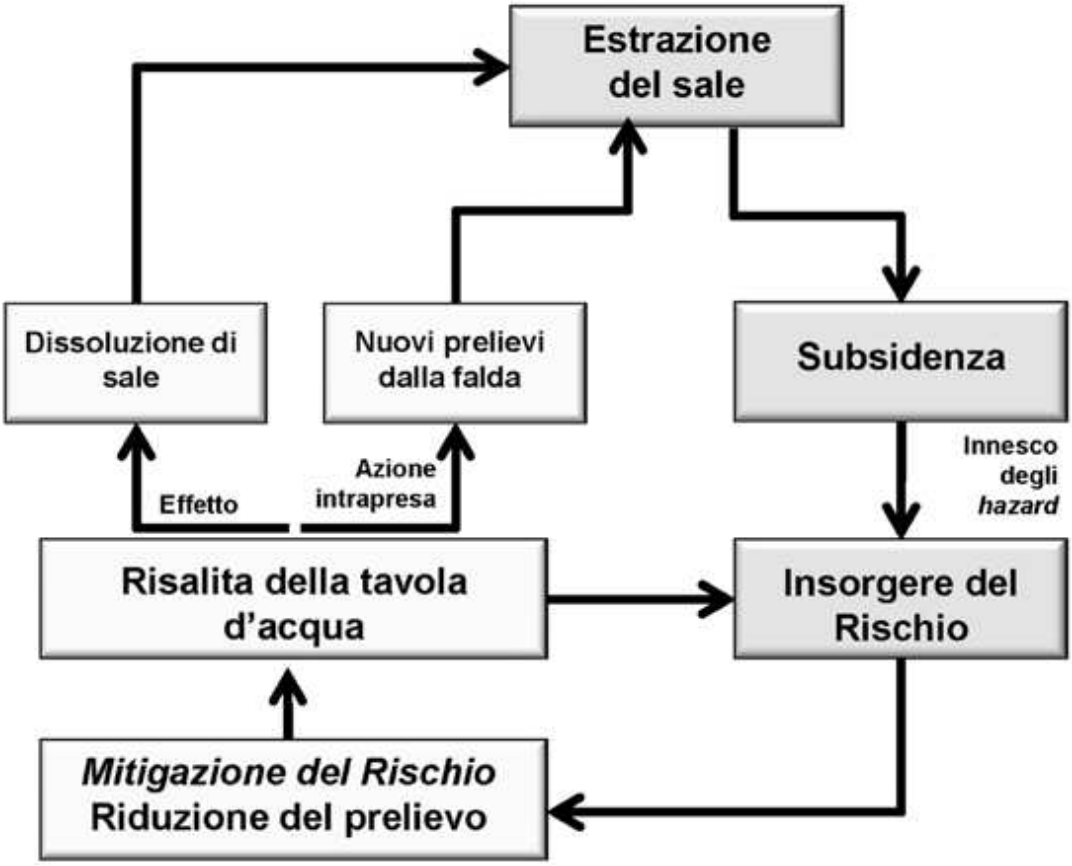


Illustrazione 85: Flow Chart Cause/Effetti della Subsidenza

Il flow chart nell'illustrazione 85 espone in modo semplice il fenomeno: L'estrazione di sali causa la subsidenza iniziale e fa aumentare i rischi legati ad un territorio instabile; bloccando le estrazioni di acque salmastre il processo viene mitigato sino a ridursi al minimo.

La risalita della falda acquifera, dovuta alle fratture createsi per via della subsidenza, innesca un nuovo discioglimento dei sali che è causa della ripresa del processo. (Mancini, 2009)

A questo punto le possibilità restanti sono due:

- Allontanare, tramite pompaggi, le acque in eccesso
- Non intervenire sulla risalita della falda.

Entrambe queste possibilità non arrestano il fenomeno di sprofondamento dell'area dei laghi, che richiede quindi uno studio più dettagliato del nuovo assetto idrogeologico al fine di proporre soluzioni alternative.

Capitolo 5

Elaborazione Tridimensionale in Ambiente GIS ed integrazione dei nuovi Dati

Per una migliore comprensione dei fenomeni in atto, nel successivo capitolo verrà generato un modello digitale tridimensionale a partire dai dati preesistenti da cui estrarremo profili realistici relativi alle linee di terreno sondate.

I profili geoelettrici verranno di seguito adattati ad i profili realistici, estratti dai modelli di elevazione digitale, ottenendo in tal modo l'effettiva elevazione degli elementi individuati nel sottosuolo.

Al termine del capitolo tenteremo di suddividere i suddetti elementi per fasce o strati.

5.1 Ambiente GIS in Global Mapper

Per questa fase dello studio si è fatto uso del sotware di rappresentazione GIS Global Mapper 12.01.

Il Global Mapper permette la visualizzazione di dati topografici, sia grezzi che elaborati, e di immagini georeferenziate; ne permette l'unione e ne genera il modello tridimensionale, permette la creazione di mappe di influenza e fornisce gli strumenti atti all'aggiornamento ulteriore.

5.1.1 Creazione del Global Mapper Workspace

Per creare l'ambiente di lavoro in Global Mapper si è sfruttata la notevole quantità di dati provenienti dalle precedenti campagne di rilievo.

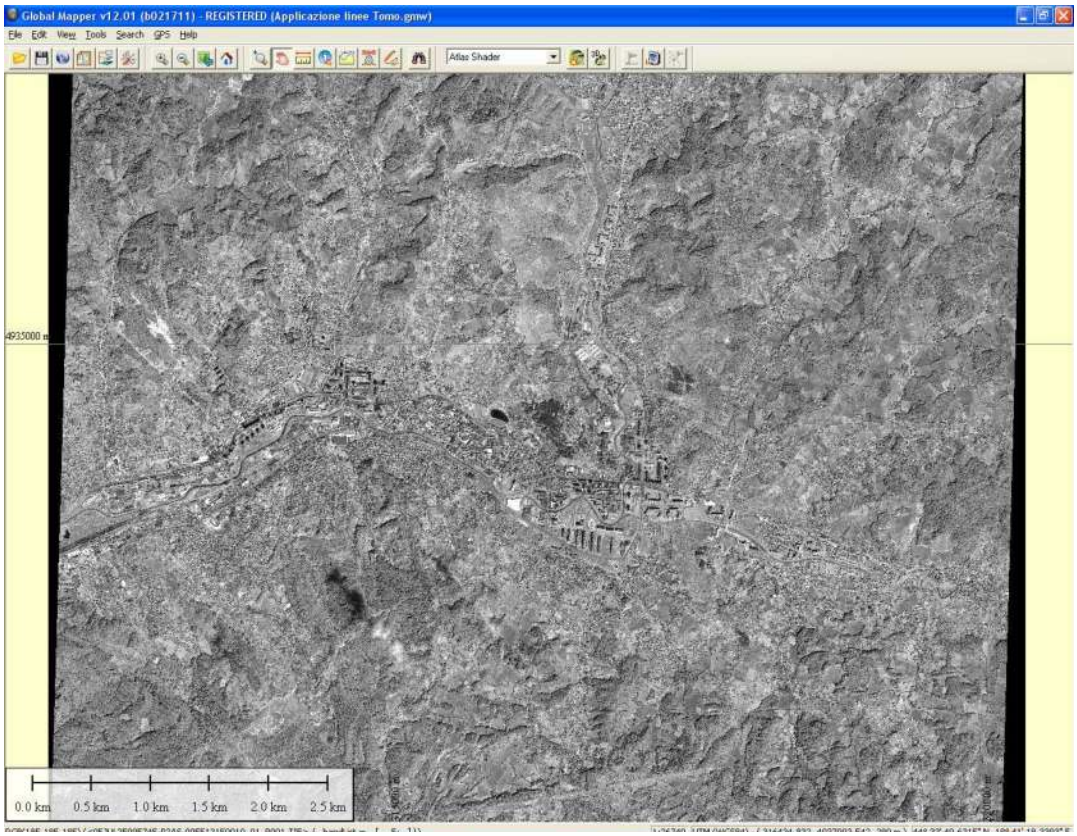


Illustrazione 86: Ortofotografia Satellitare 25-07-2005 in Global Mapper

Su una base ortofotografica, ottenuta tramite foto satellitare il 25 luglio 2005, si sono caricati due modelli digitali di elevazione, DEM, il primo a maglie più larghe, un punto di elevazione ogni 20 metri, relativo a tutta la zona del Cantone di Tuzla, ed il secondo, a maglia più fitta con punti di elevazione rilevati ogni 5 metri, relativo al solo centro cittadino.

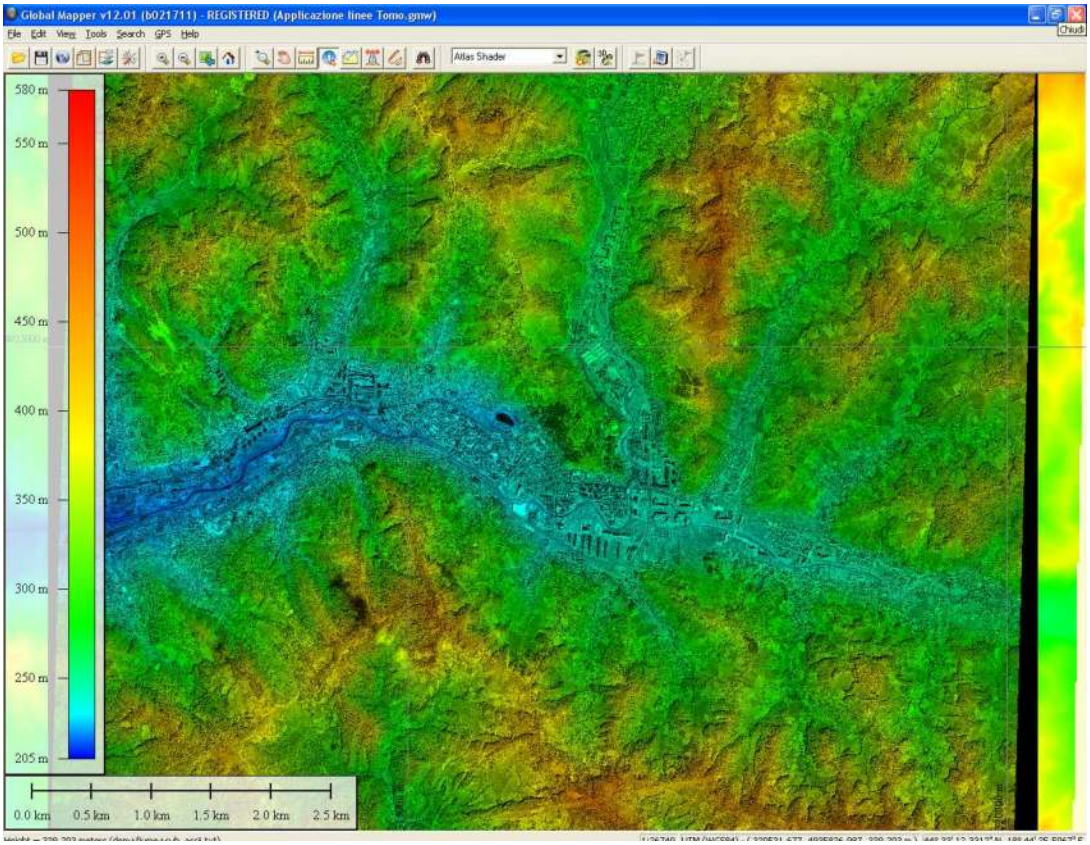


Illustrazione 87: Applicazione dei DEM in Global Mapper

I DEM posti al di sotto della ortofotografia stirano la stessa su dei pendii virtuali dando all'utente la possibilità di visualizzare la stessa in ambiente tridimensionale.

Tramite questa possibilità si è notato che i due DEM, non combaciano perfettamente ai bordi, per un ovvio problema di qualità dell'interpolazione; il secondo DEM è ovviamente più fedele ed accurato del primo.

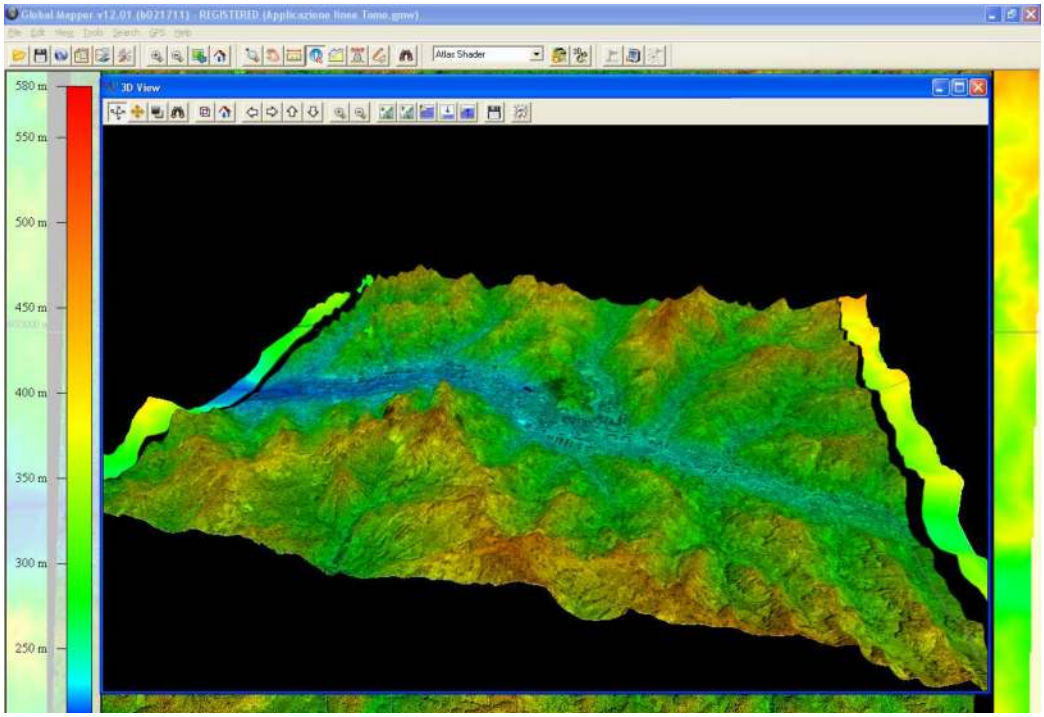


Illustrazione 88: DEM 3D in Global Mapper

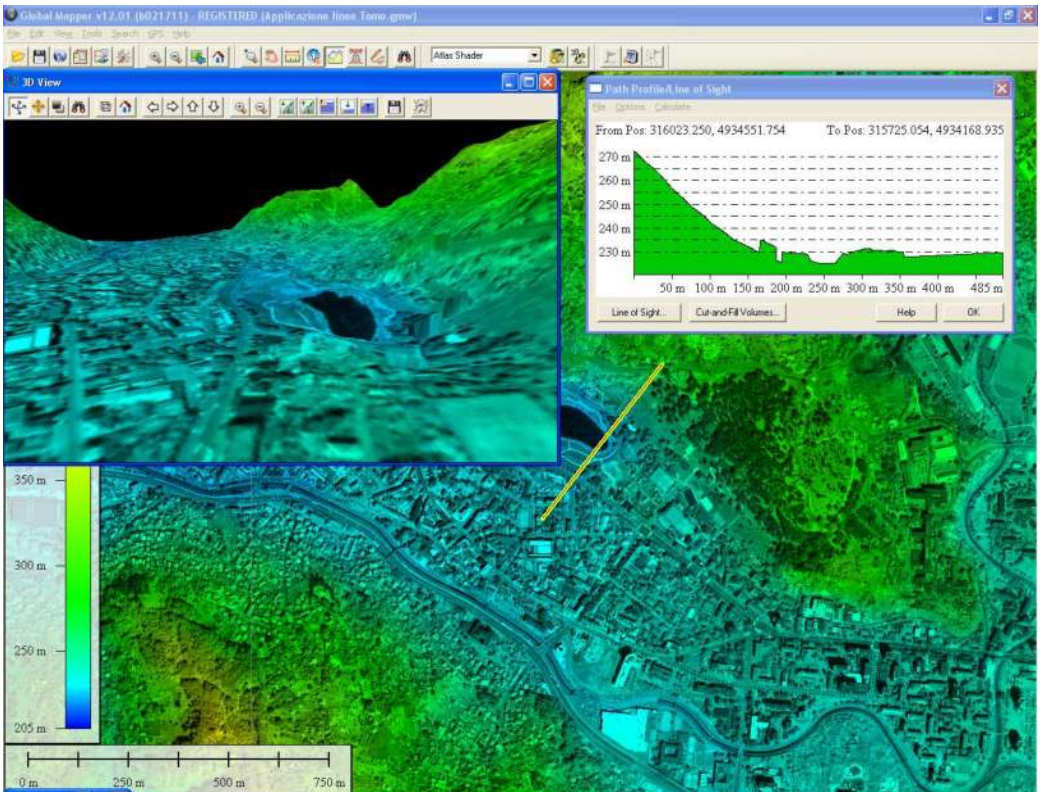


Illustrazione 89: Profilo di Elevazione non modificato

Come descritto poc'anzi, l'illustrazione 89 evidenzia, tramite lo strumento profilo rappresentato nel riquadro in alto a destra, la discrepanza tra i due DEM nella zona centrale. Per ovviare a questo tipo di problematica, si è fatto uso dello strumento "Area", creando tre polilinee spezzate e chiuse che acquisivano dai due DEM i dati di posizione ed elevazione.

I vertici delle polilinee delle aree hanno dato la possibilità di creare una nuova interpolazione tra il modello più accurato ed il modello meno accurato facendo sì che si abbia una più dolce connessione tra i due DEM.

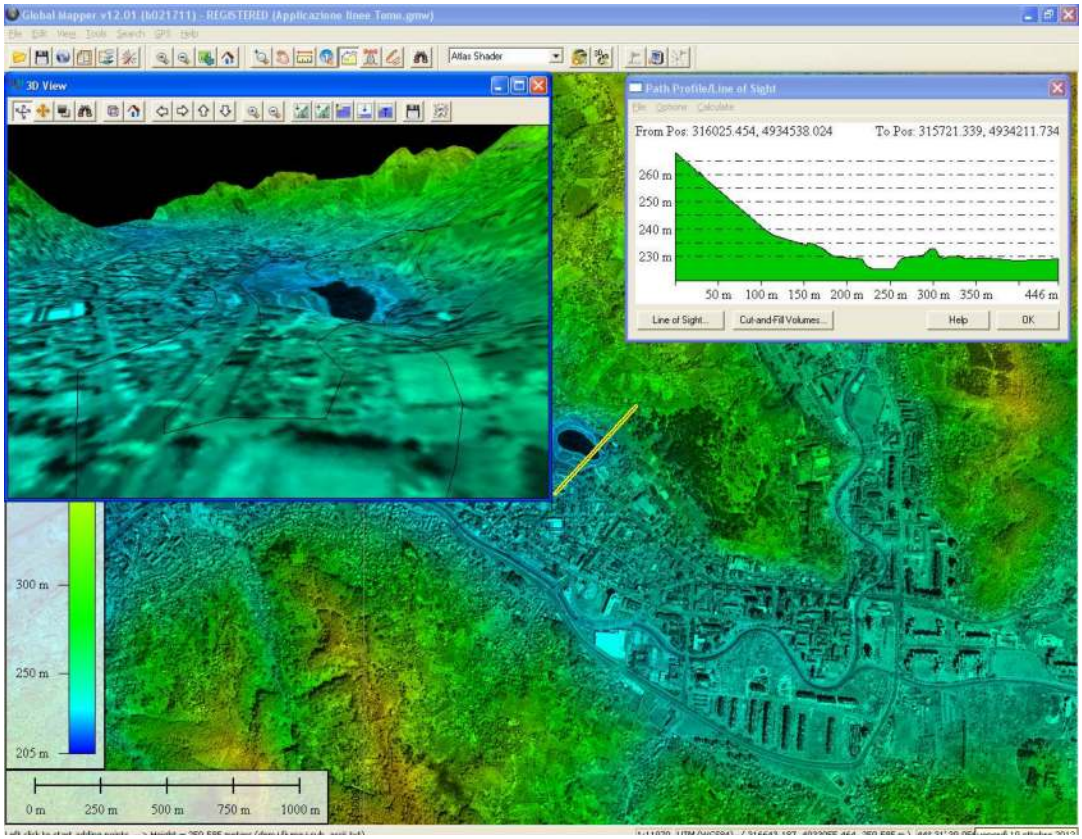


Illustrazione 90: Profilo di Elevazione Modificato

Dall'illustrazione 90 è possibile notare come le polilinee inserite abbiano fornito, con discreto successo, i punti necessari alla transizione tra i due modelli tridimensionali. Il profilo estratto in alto a destra dimostra che la connessione non è più impulsiva ma più morbida.

Tramite le indicazioni presenti nella relazione fornita dall'Università di Tuzla, contenente i profili tomografici successivamente interpretati ed illustrati nel precedente capitolo, è stato possibile indicare, con discreta precisione, le rispettive linee dei profili a terra nel modello tridimensionale generato.

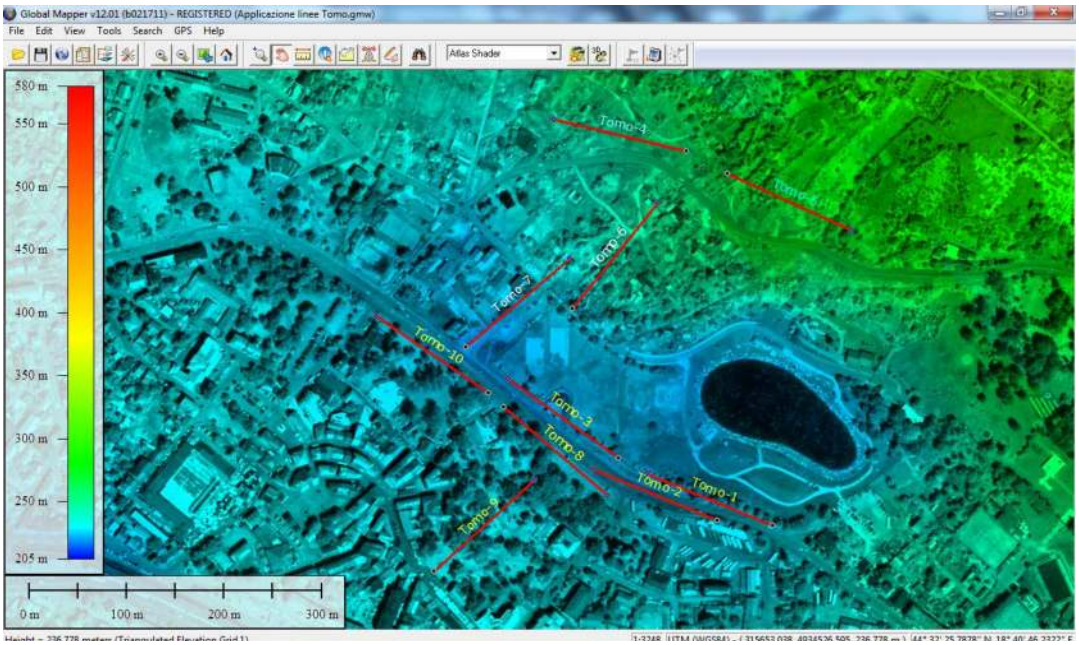


Illustrazione 91: Individuazione Profili

Per questa operazione si è fatto uso dello strumento "Bearing", che disegna nello spazio una linea orientata della dimensione desiderata; nel nostro caso 140 metri.

La retta così realizzata risulta editabile in tutti gli attributi riguardanti i vertici ed è stato possibile aggiungere in seguito un ulteriore attributo contenente il link all'immagine della tomografia riadattata al profilo realistico, altra funzione di Global Mapper.

Di seguito riporto un paio di esempi di profili estratti dal DEM; essi saranno la base su cui verranno fatte le elaborazioni in Adobe Photoshop.

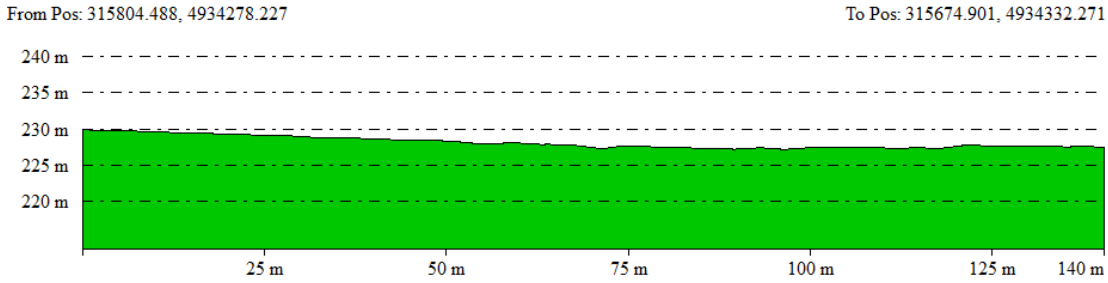


Illustrazione 92: Profilo relativo alla Tomo-1

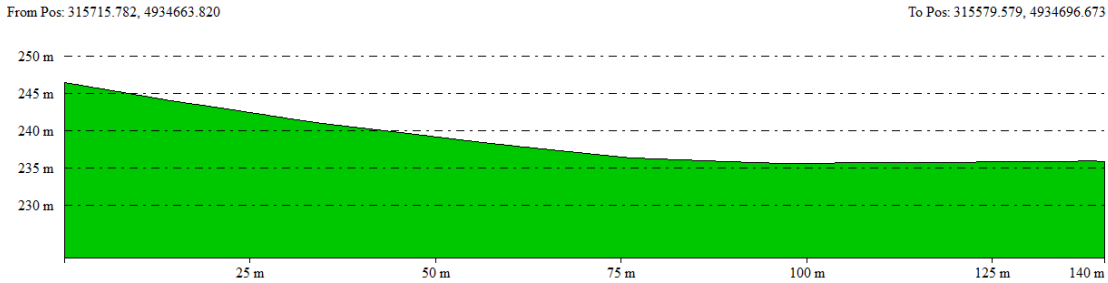


Illustrazione 93: Profilo relativo alla Tomo-4

5.1.2 Modifica delle Tomografie in Photoshop

Una volta estratto il profilo, tramite delle modifiche effettuate in Adobe Photoshop CS4, si è adattata la tomografia originale a quest'ultimo ottenendo i seguenti risultati.

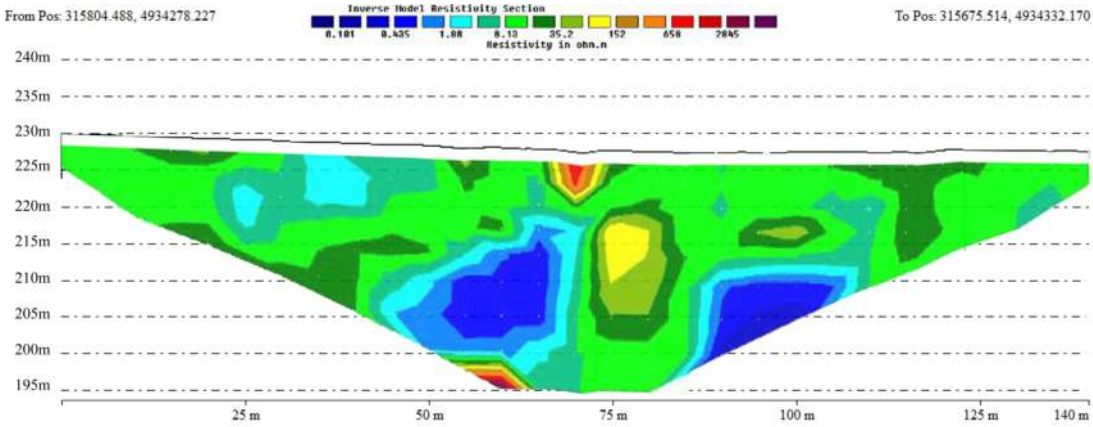


Illustrazione 94: Profilo Realistico Tomo-1

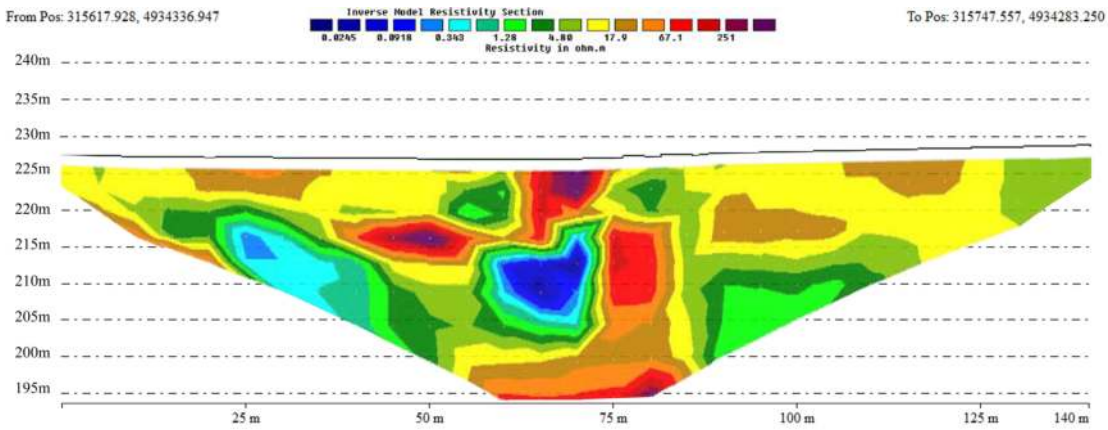


Illustrazione 94: Profilo Realistico Tomo-2

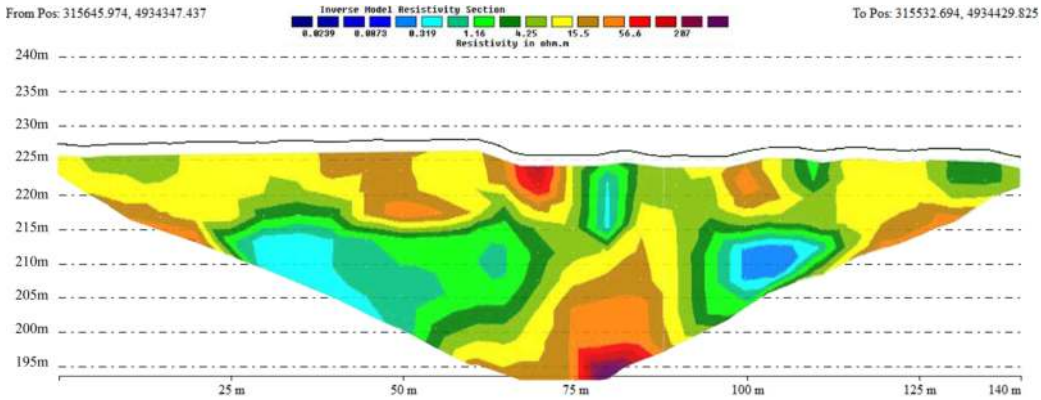


Illustrazione 95: Profilo Realistico Tomo-3

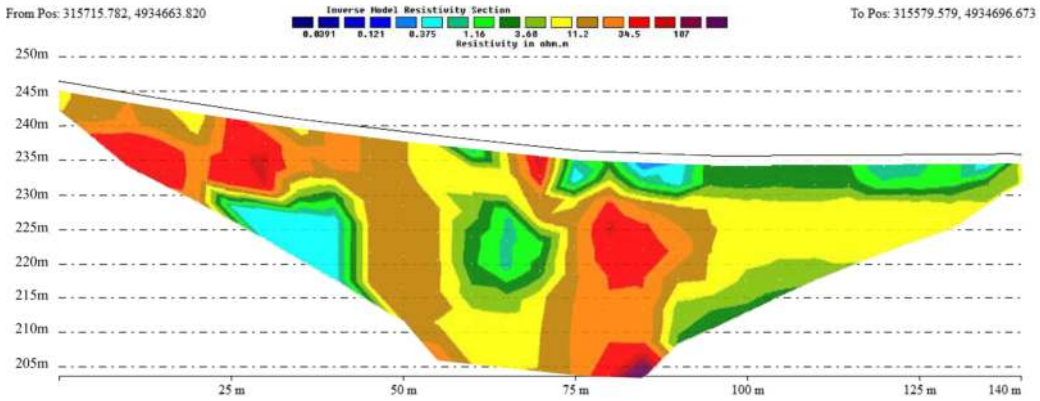


Illustrazione 96: Profilo Realistico Tomo-4

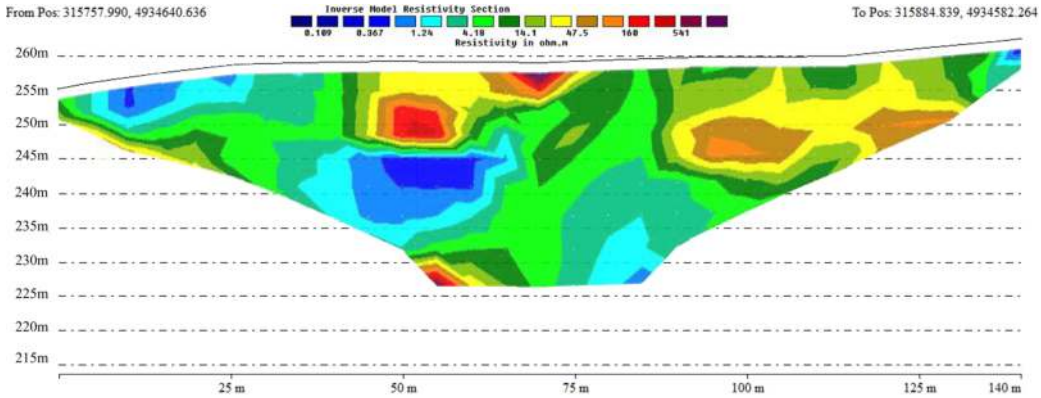


Illustrazione 97: Profilo Realistico Tomo-5

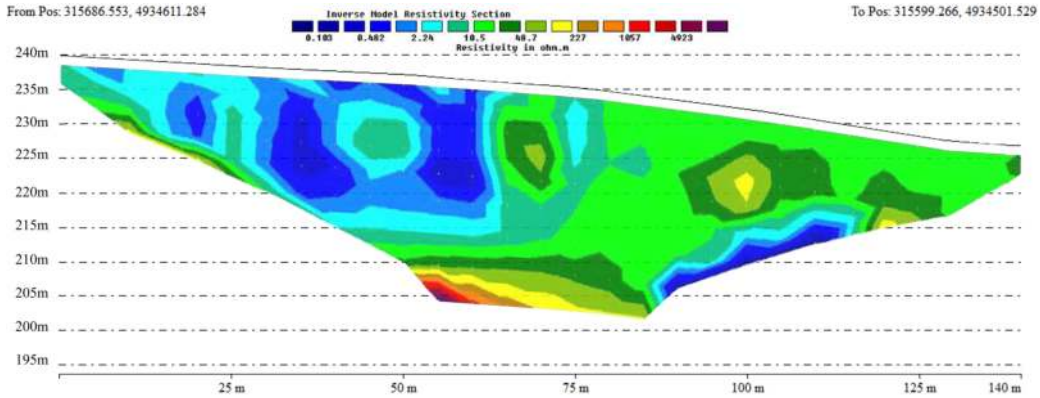


Illustrazione 98: Profilo Realistico Tomo-6

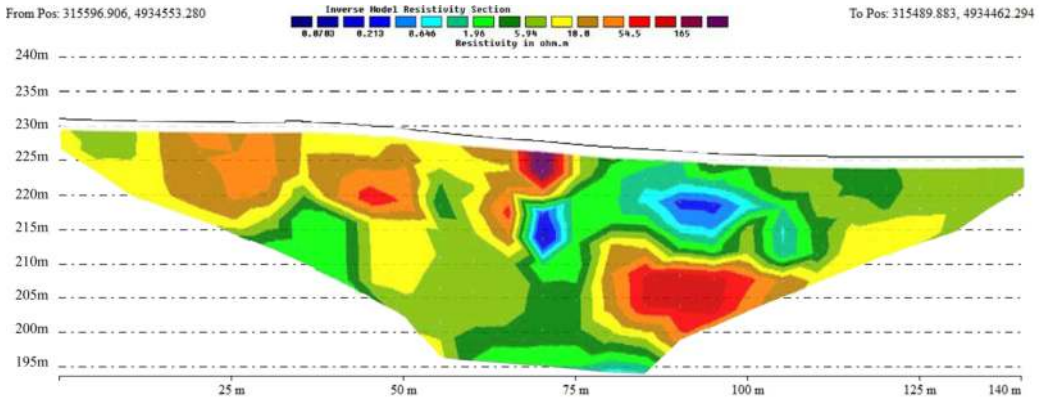


Illustrazione 99: Profilo Realistico Tomo-7

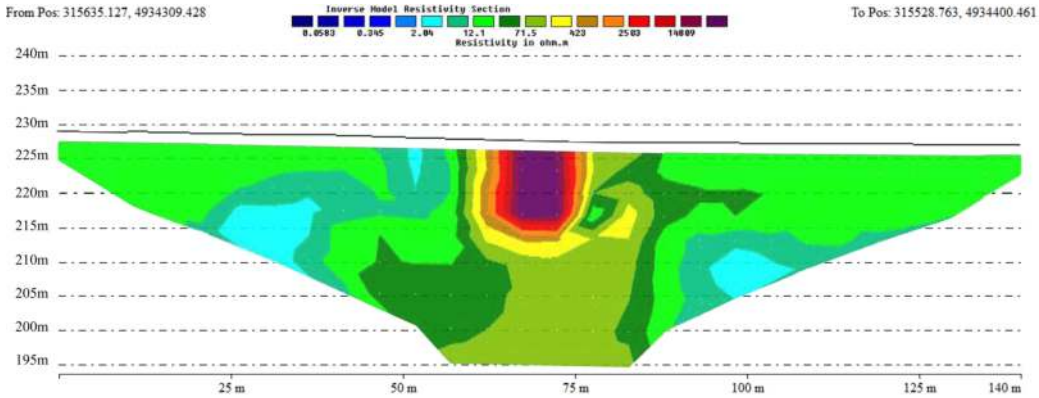


Illustrazione 100: Profilo Realistico Tomo-8

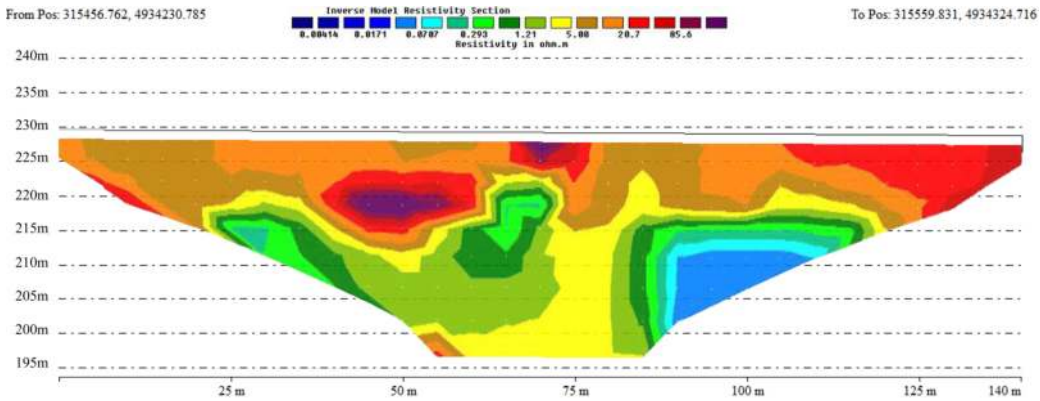


Illustrazione 101: Profilo Realistico Tomo-9

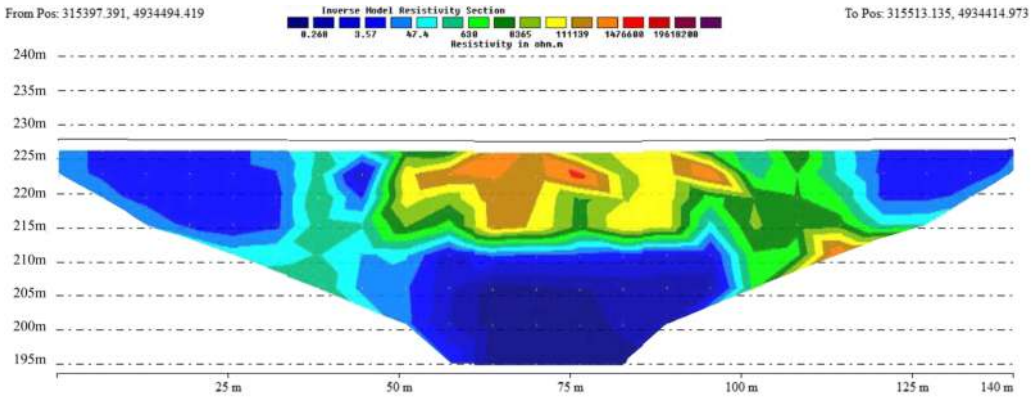


Illustrazione 102: Profilo Realistico Tomo-10

Una volta modificati a dovere i nuovi profili, con indicazione della profondità reale, lo strumento *bearing* ha permesso di allegare, come attributo alla relativa retta nello spazio, il file immagine generato con Photoshop.

Nell'illustrazione 103 è mostrato come è possibile richiamare il file del profilo tomografico realistico.

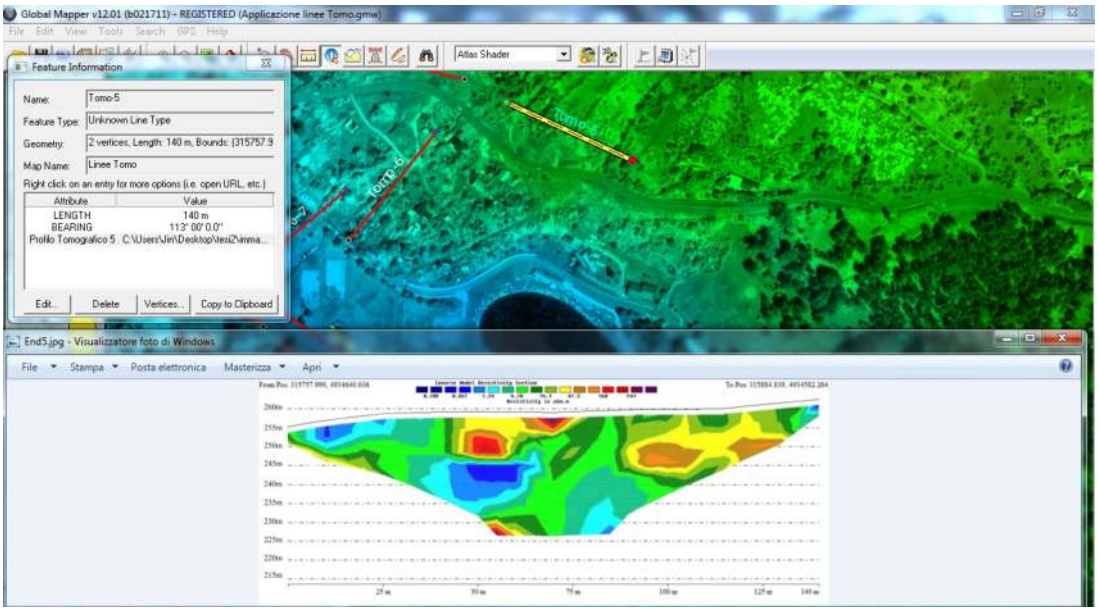


Illustrazione 103: Richiamo del Profilo Tomo-5

5.2 Interpretazione Stratigrafica

Tramite nuovi profili realizzati è stato possibile individuare degli intervalli di quota in cui è possibile trovare i diversi materiali costituenti il terreno.

I dati sono stati raccolti in una tabella per una più immediata consultazione.

Ciò che inizialmente risalta, da questa suddivisione del terreno in strati, è che la maggioranza del terreno è composta da uno spesso strato misto di Argilla umida e salata, Argille sabbiose, Marne Grasse ed Arenaria.

Tipo di Materiale	**Intervallo di Quota (metri S.L.M.)**
Argilla Umida e Salata	Da 262 a 250 ; Da 247 a 194
Argille Sabbiose, Silt	Da 262 a 194
Marne Grasse	Da 262 a 194
Arenaria	Da 262 a 255 ; Da 232 a 194
Marne Magre	Da 247 a 194
Sabbia o Ghiaia in Falda	Da 232 a 194
Acqua molto salata 20%	Da 217 a 194
Acque Mediamente Salate o Terreni imbevuti di Soluzioni Saline	Da 232 a 200
Materiali Altamente Resistivi	Da 229 a 205
Sabbia con Argilla	Da 228 a 210
Calcare	Da 229 a 215
Sabbia Asciutta	Da 200 a 194
Acqua salata 3,5%	Da 230 a 220

A scalare abbiamo:

- Marne Magre sino a quota 247 metri;
- Sabbia o Ghiaia in falda sino a 232 metri;
- Acqua salata al 20% di concentrazione salina a 217 metri.
- Uno strato di terreni imbevuti di acque molto salate che va dai 200 e i 232 metri;
- ed uno strato, dai 220 ed i 230 metri, di acqua salata al 3,5 % di concentrazione salina.

Possiamo quindi dire che questi elementi non costituiscano un vero e proprio strato, ma bensì un insieme eterogeneo di materiali disposti in maniera diffusa e casuale. Inoltre è evidente che la falda acquifera ha una quota sul livello del mare almeno pari a 220 metri con possibile risalita per capillarità nei terreni soprastanti sino a quota di almeno 230 metri s.l.m.

Ipotizziamo altresì, che in quota 217 metri, la falda acquifera entri in contatto con le formazioni di sale minerale.

La chiara presenza di una falda in risalita è inoltre comprovata dalla presenza dei laghi, formatisi a seguito della subsidenza del centro cittadino in quota di circa 226 metri s.l.m.
Dall'esame della stratigrafia vi sono poi alcuni materiali minori composti da formazioni calcaree, granito e strati di sabbia asciutta o con argilla.

E' particolare la presenza della sabbia asciutta dal fondo sino a 200 metri; ciò denota che la falda in risalita non impregna tutta la zona ma solo alcuni percorsi preferenziali, per cui effettueremo una analisi stratigrafica con metodo alternativo, per zone, che potrebbe fornire informazioni di maggiore rilevanza.

Ai fini della più chiara comprensione della distribuzione dei materiali nel sottosuolo si è scelto il seguente raggruppamento:

- Zona 1 (Strada principale a ridosso del lago): Tomo-1, Tomo-2, Tomo-3;
- Zona 2 (Collina a Nord del lago) : Tomo-4, Tomo-5;
- Zona 3 (Collina a Ovest del lago) : Tomo-6, Tomo-7;
- Zona 4 (Strada principale, Parco) : Tomo-8, Tomo-9; Tomo-10.

TABELLA ZONA 1	
Tipo di Materiale	**Intervallo di Quota (metri S.L.M.)**
Marne Magre	Da 230 a 194
Marne Grasse	Da 230 a 210; Da 205 a 194
Arenaria	Da 230 a 205; Da 200 a 194
Argilla Umida e Salata	Da 228 a 200
Argille Sabbiose, Silt	Da 228 a 200
Sabbia o Ghiaia in Falda	Da 220 a 205; Da 200 a 194
Sabbia con Argilla	Da 228 a 210
Acque Mediamente Salate o Terreni imbevuti di Soluzioni Saline	Da 210 a 200
Sabbia Asciutta	Da 200 a 194
Acqua molto salata 20%	Da 205 a 200

Il dato maggiormente rilevante nell'analisi di questa zona è l'abbondante presenza di roccia arenaria e l'anomala presenza di sabbie asciutte seppur a ridosso della zona dei laghi.

C'è da sottolineare che questa anomalia è, con tutta probabilità, giustificata dalle pompe idrovore disposte attorno al lago per evitare fenomeni di tracimazione

TABELLA ZONA 2	
Tipo di Materiale	**Intervallo di Quota (metri S.L.M.)**
Marne Grasse	Da 262 a 205
Argille Sabbiose, Silt	Da 262 a 205
Argilla Umida e Salata	Da 262 a 250; Da 247 a 226
Marne Magre	Da 247 a 203
Sabbia con Argilla	Da 255 a 247; Da 230 a 226
Acque Mediamente Salate o Terreni imbevuti di Soluzioni Saline	Da 230 a 215
Arenaria	Da 262 a 255
Sabbia o Ghiaia in Falda	Da 205 a 203

Ciò che risalta dall'esame della seconda zona è l'assenza di acque, evidentemente dovuto alla maggiore quota dei sondaggi effettuati, fermo restante che vi è notevole quantità di terreni umidi.

TABELLA ZONA 3	
Tipo di Materiale	**Intervallo di Quota (metri S.L.M.)**
Marne Grasse	Da 240 a 194
Marne Magre	Da 240 a 200
Argilla Umida e Salata	Da 240 a 212; Da 200 a 194
Argille Sabbiose, Silt	Da 232 a 200
Sabbia con Argilla	Da 230 a 200
Acque Mediamente Salate o Terreni imbevuti di Soluzioni Saline	Da 230 a 212
Sabbia o Ghiaia in Falda	Da 232 a 222
Acqua salata 3,5%	Da 230 a 220
Acqua molto salata 20%	Da 212 a 205
Materiali Altamente Resistivi	Da 205 a 202

La zona 3 presenta invece maggiori zone ad elevata presenza di acque saline, probabilmente il passaggio della falda è da localizzarsi in questa zona. Difatti, l'evoluzione della zona attualmente ha portato alla formazione del secondo lago.

TABELLA ZONA 4	
Tipo di Materiale	**Intervallo di Quota (metri S.L.M.)**
Argille Sabbiose, Silt	Da 231 a 196
Marne Grasse	Da 229 a 196
Argilla Umida e Salata	Da 229 a 197
Sabbia o Ghiaia in Falda	Da 231 a 200
Marne Magre	Da 231 a 205
Materiali Altamente Resistivi	Da 229 a 205
Acqua molto salata 20%	Da 217 a 195
Calcare	Da 228 a 215

La zona del parco, seppur attraversata dalle acque si presenta con terreni umidi intervallati da zone di materiali altamente coesivi e resistivi. Non presenta ulteriori particolarità geologico-stratigrafiche.

Conclusioni

Con lo scopo di ricercare una metodologia che congiunga, sia in fase di rilievo e che di restituzione, dati di superficie e dati di profondità, lo studio di tesi si è sviluppato in due grandi blocchi. Una prima parte di ricerca, riguardante i metodi del rilevamento satellitare di precisione e sul rilievo del sottosuolo, ed una seconda parte applicativa, in cui i metodi teorici sono stati utilizzati per indagare le dinamiche di subsidenza della città di Tuzla.

Nella prima parte si è descritto, nel dettaglio, il rilievo tramite strumentazione GPS, si sono viste le potenzialità ed i fattori limitanti che influiscono sulla praticità dell'utilizzo d'alta precisione.
Successivamente si sono illustrate alcune tecniche di indagine del sottosuolo, sia nella teoria generica che nella metodologia di utilizzo; in modo particolare sono stati trattati il metodo Geoelettrico ed il Ground Probing Radar.
La trattazione raccoglie inoltre casi di studio, nazionali ed internazionali, in merito all'utilizzo congiunto della tecnologia di posizionamento GPS ed il rilievo sub-terreno con metodologia GPR , Megnetometrico o Geoelettrico, evidenziandone le difficoltà tecniche dell'acquisizione dati e della restituzione, le finalità proposte ed i limiti in cui ci si è imbattuti. Questo ha fatto si che potessimo delineare una procedura limiti le problematiche e favorisca al meglio la fase di acquisizione dati.

Nella seconda parte della trattazione si è studiato il caso della città di Tuzla, in Bosnia Erzegovina, che attualmente presenta problemi di stabilità geologica del terreno su cui poggia. Le analisi dei dati storici di livellazione e delle tabelle di estrazione di sale minerale ha permesso di supporre una diretta correlazione tra fenomeno di subsidenza del centro storico della città ed il volume di sale estratto.

Ipotizzato il motivo di innesco, si è potuto esaminare nel dettaglio il territorio tramite nuovi dati di livellazione, una nuova rete GPS, prospezioni geofisiche ed i dati piezometrici raccolti negli ultimi anni.
Nota la correlazione tra subsidenza ed estrazioni si è optato per il totale arresto delle estrazioni. I dati di livellazione delle campagne successive hanno evidenziato, per alcune zone, un processo di emersione delle zone del centro cittadino e delle miniere, ma si è anche notata la ripresa della subsidenza nella zona dei laghi.

L'interpretazione delle prospezioni geoelettriche evidenzia terreni prevalentemente argillosi e marnosi imbevuti di acque salmastre o con alta concentrazione di sale. Tali acque, probabilmente dovute alla risalita naturale della falda acquifera insinuatasi all'interno dei giacimenti salini al di sotto del lago, innescano un nuovo processo di dissoluzione degli stessi.
Sia l'intervento di allontanare le acque in eccesso, sia il non intervento sulla risalita della falda non arrestano il fenomeno di sprofondamento dell'area dei laghi, che richiede quindi uno studio più dettagliato del nuovo assetto idrogeologico al fine di avere sufficienti informazioni per proporre soluzioni alternative.

Generando un modello digitale tridimensionale a partire dai dati preesistenti, sono stati estratti profili realistici relativi alle linee di terreno sondate dalle prospezioni geoelettriche. I nuovi profili geoelettrici hanno fornito l'effettiva elevazione degli elementi individuati nel sottosuolo, offrendo la possibilità di una analisi stratigrafica per zone.
L'analisi per zone ha messo in luce la effettiva risalita della falda, individuata in quota di circa 220 metri s.l.m, con comprovata risalita per capillarità negli strati argillosi superiori.

In merito al caso specifico della città di Tuzla, le indagini poste in atto, una volta terminate grazie all'ausilio del software GIS, si sono dimostrate notevolmente efficaci ed utili per definire la disposizione dei diversi materiali nel sottosuolo ed hanno permesso di confermare la presenza di acqua in risalita verso gli strati superficiali.
Nello specifico, la conoscenza della presenza o meno di una falda, della sua quota e del suo percorso ha notevole importanza per le successive scelte progettuali che riguarderanno la zona negli anni a venire, inoltre, avendo riscontrato nell'innalzamento della falda acquifera il motivo dell'attuale moto di subsidenza della zona dei laghi, sarà possibile iniziare una progettazione che riguardi la riduzione del rischio di instabilità della stessa.

Più in generale l'integrazione dei dati topografici e geofisici nello stesso ambiente presenta una gran quantità di applicazioni, soprattutto per quanto riguarda le fasi di analisi territoriale. Purtroppo nella trattazione si è riscontrato il limite legato ai software utilizzati, non è stata possibile la completa integrazione delle metodologie in quanto l'aggregazione è stata realizzata per somma di attributi generati singolarmente e non tramite aggregazione di dati originali. Tale tipo di integrazione risulta quindi soggetta ad errori sia strumentali che accidentali.

Riferimenti Bibliografici

TESTI

Hoffmann-Wellenhof, Licthenegger, Collins, ***Global Positioning System: Theory and Practice***, 4th edition, Springer, Berlino, Germania, (1994)

Spilker, ***Global Positioning System: Theory and Applications***, Volume I, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. (1996)

Mauro Gonfalini, ***Enciclopedia degli Idrocarburi***, Istituto Della Enciclopedia Italiana,Giovanni Treccani S.p.A. (2007)

A. Norinelli, ***Elementi di Geofisica Applicata,*** Ed.ìizioni Patron (1996)

A.E. Musset, M. A. Khan, ***Esplorazione del Sottosuolo: Una Introduzione alla Geofisica Applicata***, Zanichelli (2003)

Jaeger, ***Rock Mechanics and Engineering,*** Barla (1972)

Reynolds, ***An introduction to Applied and Enviromental Geophysics***. Wiley (1997)

H.M. Jol, ***Ground Penetrating Radar Theory and Applications***, Elsevier, Amsterdam (2009)

D.J. Daniels, ***Ground Penetrating Radar***, 2nd edition, IEE, London (2004)

J.S.P. Bradford, **The Apulia expedition: an interim report**, *Antiquity*, (1950)

G.D.B. Jones, ***Apulia – Vol. I: Neolithic Settlements in the Tavoliere***. Thames and Hundson Ltd, (1987)

F. Radcliffe, ***Paesaggi seolti in Daunia - John Bradford e la ricerca archeologica dal cielo (1945/1957)***, Foggia, Claudio Grenzi Editore (2006)

H. Becker, ***Duo- and Quadro-sensor Configuration for High Speed/High Resolution Magnetic Prospecting with Caesium Magntometer.*** Magnetic Prospecting in Archaeological Sites, Monuments and Sites, vol. VI, K.M. Lipp Verlag: Munchen (2001)

Ciminale and Loddo, ***Aspects of magnetic data processing,*** Archaeological Prospection, vol. 8 (2001)

Annan, ***GPR methods for hydrogeological studies in hydrogeophysics***, Y. Rubin and S. Hubbard, Springer, New York (2005)

Annan, Cosway, and Redman. ***Water table detection with ground-penetrating radar***, Meet. Soc. Explor. Geophys (1991)

Endres, ***A pore-size scale model for the dielectric properties of water-saturated clean rocks and soils***. Geophysics, Volume 71, Issue 6 (2006)

Facenna C., Florindo F., Funicello R., e Lombardi S., ***Tectonic setting and Sinkhole Features: case histories from western Central Italy.*** Quaternary Proceeding (1993)

Tharp T.M., ***Mechanism of upward propagation of cover collapse sinkhole*** , Engineering Geology (1999)

Nisio, Graciotti, Vita, ***I Fenomeni di Sinkhole in Italia: Terminologia, Meccanismi Genetici e Problematiche Aperte***, Apat, Dipartimento Difesa del Suolo, Roma (2008)

DISPENSE UNIVERSITARIE E TESI

I Metodi di Rilevamento tramite GPS, Francesco Mancini, ***Topografia e Tecniche di Rilevamento*** (2010)

GPS, Mauro Caprioli, ***Appunti delle Lezioni*** (2000)

Errori, Maurizio Barbarella, ***Il Sistema GPS*** (2007)

Principi di fisica per la Geoelettrica, Marta Caterina Bottacchi, Fabio Mantovani (2012)

Metodi Geoelettrici, S. Teggi, ***Metodi Geofisici*** (2007)

Carli Marco, ***Rilevamento Geologico-Strutturale e Indagine Geoelettrica della Porzione Nord Occidentale della frana del Vajont nelle Prealpi Venete***, Tesi di Laurea (2011)

Durante Carlo, ***Applicazione ed integrazione di metodi di prospezione geofisica. Studio idrogeofisico della Zona Insatura in condizioni idriche controllato,*** Tesi di Dottorato (2007)

ARTICOLI IN RIVISTE E RACCOLTE

Cuozzo G., Idili M.G., Marrone V.A., Morelli G., Orrù M., Vacca A., ***Valutazione dell'uso dell'elettromagnetismo indotto e della geoelettrica nel rilevamento dei suoli.*** In N. Senesi e T. Miano (ed.) Atti del Convegno Nazionale della Società Italiana della Scienza del Suolo "Il suolo: sistema centrale nell'ambiente e nell'agricoltura", Bari 21-24 giugno 2005: (2007)

Antonio del Conte, ***Il Radar Penetrante (GPR)***, Pubblicazione, Artemis, Ancona (2004)

Urbini S., Vittuari L., Gandolfi S., ***GPR and GPS data integration:examples of applications in Antartica***, Annali di Geofisica Vol.44, n.4 (2001)

Alley R.B., ***Concerning the deposition and diagenesis of Strata in Polar Firn***, J. Glaciological (1988)

Capra, Radicioni e Vittuari, ***Kinematic GPS profiles of navigation in Antartica***, XVIII ISPRS Congress, Vienna (1996)

Rial, Pereira,Lorenzo, Arias y Novo, ***Use of Ground Penetrating Radar e Global Positioning System for Road Inspection***, Natural Resources & Environmental Engineering, EUET Forestal. Pontevedra (2002)

Ciminale M., Gallo D. ***Il Remote Sensing in Archeologia come Strumento di Conoscenza, Prevenzione e Tutela***, Atti del convegno: Geofisica per l'Archeologia Possibilità e Limiti, Roma (2008)

BeaubienS.E., Ciotoli G., Lombardi S., Nisio S. & Nolasco F., ***Indagini Geologiche e Geochimiche per lo studio del rischio sinkholes nella Piana di S. Vittorino***.,Atti Convegno 4° Forum FIST. Bellaria, Rimini (2003)

Mancini, Ceppi, Stecchi, Gabbianelli, ***Il supporto della geomatica alle attività pianificatorie: analisi del rischio nella città di Tuzla (bih)***, Bollettino SIFET 3 (2011)

Mancini, Antonellini, Stecchi, Gabbianelli, **Approccio Multidisciplinare per lo studio del Fenomeno della Subsidenza nell'Area di Tuzla (BIH),** Asita (2007)

Mancini, Zanni, Stecchi, Gabbianelli, ***Monitoring ground subsidence induced by salt mining in the city of Tuzla (Bosnia and Herzegovina)***, Environ Geol (2009)

Mancini, Stecchi, Gabbianelli, ***GIS-based assessment of risk due to salt mining activities at Tuzla (Bosnia and Herzegovina)***, Engineering Geology (2009)

RIFERIMENTI DA INTERNET

Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics , *http://ww.gps.gov*

Ringraziamenti

Un primissimo ringraziamento al Professor Francesco Mancini, che mi ha permesso di sviluppare questa tesi mettendo in tal modo alla prova le mie capacità di ragionamento e permettendomi di approcciarmi ad uno studio di notevole complessità.

Un ringraziamento sentito al Professor Francesco Selicato, che mi ha spinto a continuare gli studi al termine della Laurea triennale in Ingegneria Edile con parole che mi hanno incoraggiato notevolmente.

Ringrazio inoltre i professori:
Giancarlo Casanova, Luigi Mongelli, Vitantonio Vitone, Carmelo Maria Torre, D'Addabbo, Juan Cagiao Villar, Scionti, Monaco, Beninato e Giannuzzi, La Ragione, Colonna, Damiani, Rotondo, Fatiguso e De Tommasi che sono stati in grado di farmi apprezzare pienamente i propri insegnamenti.

Un Ringraziamento all'A.Di.S.U, che mi ha permesso con le borse di studio e i servizi di alloggio di poter studiare senza distrazioni permettendomi nel contempo di conoscere molti nuovi amici che mi resteranno sempre vicini anche quando sarò lontano.

Ringrazio gli Amici che mi sono stati più vicini in questi anni:
Il mio Fratellone Fabio e mia Sorella Micaela, Alessio detto “Tontaccio”,Franco, Vincenzo, Sebastiano, Pasquale. Cristiano, Stefano, Marylu, Sara, Francy e Lorenzo, Gianni, Andrea e Sara, Stefano che sta in Lombardia, Maria, Fausto e

Enzino che stanno a Genova, Roberto, Luca, Carmelo che sta a Roma. Alessandro e Mariella, Fabbietto, Wilson, Saverio e Valentina, Laura e Michelone.

Gli amici del Collegio Studentesco con cui ho passato tanti felici momenti in questi tre anni: Katia, Vincenzo, Angela, Gaetano, Ottavio, Francesco, Anastasia, Giovanni, Debora, Ornella, Grazia e Grazia, Silvia e Silvia, Serena, Milena, Alessia, Fabrizio, Sabino, Federica, Michele, Mauro, Milena,Gianluca, Elsa, Alessandro, Edison, Olti, Ibra, Gianna, Marika, Savino, Francesco ed ancora tanti altri che ora non mi sovvengono.

Gli amici delle case in cui ho abitato in questi anni: Gaetano, Michelino e Michelone, Vittorio, Matteo, Fabio, Antonio, Luca, Domenico, Pasquale, Luigi, Eldon, Alex, Ivan, Emanuele, Emidio, Giovanni, Leo e Pasquale di mottola, Rossella, Raffella, Emanuela e Maria di Casa Palombo in via Quarto, Rosalinda, Sara, Antonella, Eleonora e Francesca di via Zanardelli.

Per concludere un ringraziamento affettuoso ai miei Genitori, che mi hanno sostenuto ed hanno creduto in me.