



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Geoscienze

Direttore: prof.ssa Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**MISURE GEOFISICHE PER LO STUDIO DELLA
CONTAMINAZIONE DEL SOTTOSUOLO PRESSO
L'AEROPORTO MILITARE DI DECIMOMANNU (CA)**

Relatore: *prof. Giorgio Cassiani*

Correlatore: *dott. Jacopo Boaga*

Laureando: Beniamino Morrone

Matricola: 1130837

ANNO ACCADEMICO 2017/2018

Indice

Abstract	5
Introduzione	7
Capitolo 1	9
1.1 Inquadramento geografico e caratteristiche della contaminazione	9
1.2 Inquadramento geologico.....	15
1.2.1 Risultati delle analisi granulometriche.....	20
1.2.2 Valori di permeabilità(K) determinati con le prove in foro (Lefranc)..	22
1.2.3 Stime di portate di esercizio (Q) ottenuti con le prove a gradini di portata	22
1.2.4 Sezioni geologiche	23
1.2.5 Ricostruzione del modello geologico.....	27
1.3 Inquadramento idrogeologico	29
Capitolo 2.....	31
2.1 Tecniche geofisiche e di indagine in sito	31
2.1.1 La tomografia elettrica di resistività (ERT)	31
2.1.2 Elaborazione dei dati ERT	35
2.1.3 Indagini elettromagnetiche (EM)	41
2.1.4 Misure con tecniche di polarizzazione indotta (PI)	45
2.1.5 Test di iniezione tramite misure di tomografia elettrica (ERT) in time-lapse.	48
2.2 Misure di fluorescenza indotta da Laser (LIF).....	50
Capitolo 3.....	53
3.1 Indagini adottate sul sito di Decimomannu.....	53
3.2 Strumentazione e configurazioni utilizzate.....	54
3.3 Cronoprogramma, ubicazione delle misure e risultati.	58
Capitolo 4.....	77
4.1 Confronto tra le misure	77
Conclusioni	87
Bibliografia	89

Abstract

The Decimomannu NATO air base, located in the south of Sardinia, north-west of Cagliari, was affected in 2007, 2009 and 2010 by underground spills of organic contaminants (jet fuel: JP8). In the monitoring phases carried out during the site remediation, in addition to the classic point techniques, non-invasive geophysical measurements, such as electrical resistivity tomography (ERT), electromagnetic investigations (EM), induced polarization, (IP) and injection test using time-lapse ERT measurements, were used to identify the subsoil contamination.

The geophysical investigation allowed to identify two areas of high conductivity in which, potentially, the contamination could be identified, however the comparison between these measurements and the geological and hydrogeological data obtained with the classical measurements on site, allowed to localize the contaminant only along the southern border of the site and immediately southwest of this.

Introduzione

Una problematica fondamentale che sorge durante la progettazione di un intervento di bonifica e le fasi di monitoraggio realizzate su un sito contaminato, è l'individuazione del contaminante nel sottosuolo.

Le classiche tecniche utilizzate, come sondaggi, campionamento dei terreni e analisi delle acque, sono efficaci, ma forniscono dati puntuali e possono, nelle situazioni più delicate, favorire fenomeni di trascinamento della contaminazione. Alla luce di ciò, come supporto alle tecniche classiche vengono impiegate, sempre più frequentemente, **le tecniche geofisiche non invasive**, le quali, permettono di mappare porzioni di sottosuolo in maniera continua e speditiva, senza perturbare la contaminazione e consentendo di orientare efficacemente le indagini puntuali classiche.

Il lavoro di seguito illustrato tratta dell'individuazione di **contaminanti organici** nel sottosuolo attraverso tecniche geofisiche non invasive che consentono di misurare parametri come la resistività elettrica apparente (ρ_a), la conducibilità elettrica (σ) e la caricabilità elettrica apparente (m_a), del terreno. Le tecniche utilizzate sono quelle di tomografia di resistività elettrica (ERT), indagini elettromagnetiche (EM), polarizzazione indotta (PI) e test di iniezione tramite misure ERT in *time-lapse*, che sono state confrontate tra di loro e in seguito con prove in sito come le indagini di fluorescenza indotta da laser (LIF).

I contaminanti organici, di per se, generano un segnale resistivo, tuttavia questi sono soggetti a biodegradazione naturale ad opera di batteri, i quali, generano sottoprodotti che sono causa di un incremento della conduttività elettrica (σ) del terreno (Cassiani et al. 2014).

Il sito contaminato preso in esame è la base aerea militare NATO di Decimomannu (CA), in Sardegna, interessata negli anni 2007, 2009 e 2010 da sversamenti di carburante aereo (JP8), dovuti alla rottura di condotte interrato. Il

contaminante è stato classificato come LNAPL, con conseguente comportamento da surnatante. A seguito dell'intervento di messa in sicurezza di emergenza (M.I.S.E.) realizzato tra il 2007 e il 2011, è stata prevista, nel 2012, la redazione del piano di caratterizzazione sito specifico necessario alla realizzazione dell'intervento di bonifica. Il seguente lavoro si inserisce nelle fasi di monitoraggio della contaminazione previste durante l'intervento di bonifica e vede la collaborazione dell'Università di Padova, Cagliari e Roma, con l'obiettivo di caratterizzare il sito da un punto di vista geologico-tecnico e identificare la geometria della contaminazione. Nel caso delle indagini geofisiche è di fondamentale importanza sapere che *segnali simili possono avere origini diverse* di fatto, l'obiettivo principale di questo lavoro è stato quello di discriminare il segnale derivante da una sorgente litologica conduttiva (argille nocciola), da quello derivante effettivamente dal contaminante, connettendo i risultati delle indagini geofisiche con i dati geologici e idrogeologici del sito preso in esame.

Capitolo 1

1.1 Inquadramento geografico e caratteristiche della contaminazione

Il sito di interesse è l'aeroporto militare di Decimomannu (Giovanni Farina), situato nella parte sud della Sardegna, a nord-ovest di Cagliari. Nato come spazio di manovra durante lo scoppio della Seconda Guerra Mondiale, venne reso ufficiale il 3 giugno 1940. Dopo il conflitto mondiale, l'aeroporto divenne sede d'addestramento delle forze aeree della NATO (uno dei primi Air Weapons Training Installation; A.W.T.I.) e nel 1986 venne impiegato per realizzare i primi combattimenti simulati legali. Dal 1998 la base viene utilizzata dai soli velivoli delle Aeronautiche Militari Italiana e Tedesca che, ancora oggi, continuano le attività di addestramento.

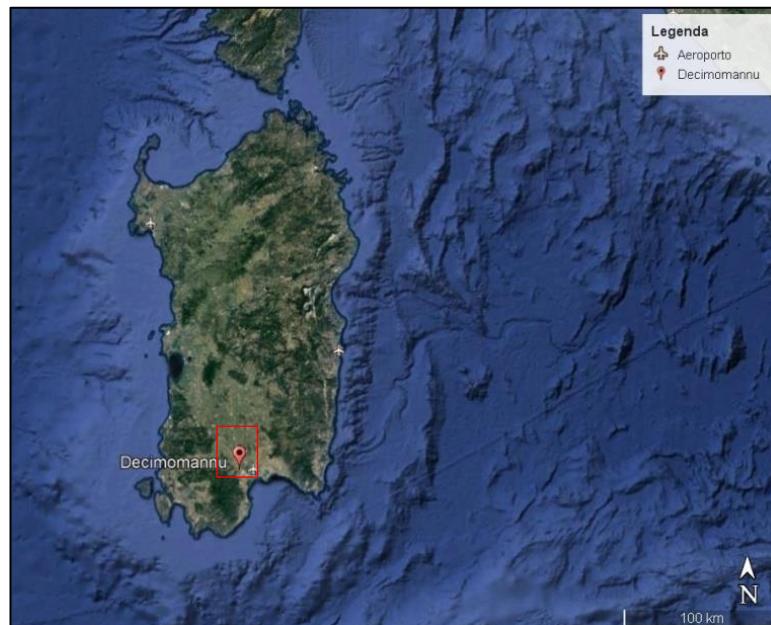


Figura 1: Inquadramento geografico dell'area di studio.

Il sito è stato interessato da tre sversamenti di carburante aereo (JP8), che hanno contaminato soprattutto il suolo profondo e la falda superficiale.

- Luglio 2007 (40000 l di JP8 dalla condotta posta a 2 m di profondità)
- Dicembre 2009 (5000 l nello stesso punto)
- Aprile 2010 (5000 l di perdita)

I punti in cui si sono verificati gli sversamenti sono indicati nella figura 2

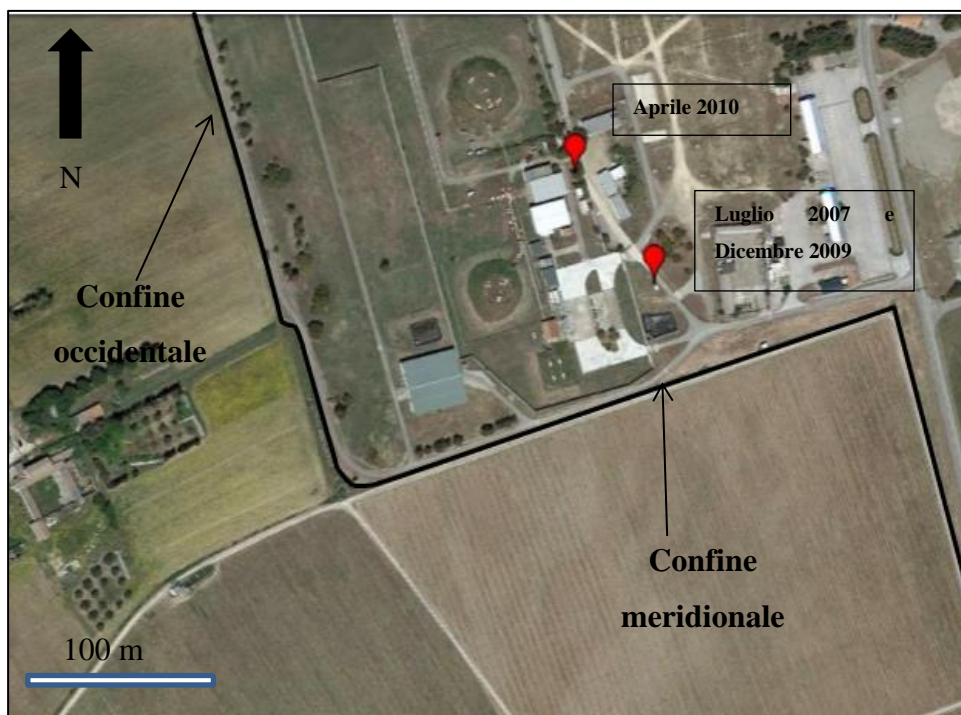


Figura 2: Posizione degli sversamenti verificatisi nella base militare di Decimomannu.

A seguito delle indagini chimiche svolte nella falda, sono stati riscontrati superamenti delle concentrazioni soglia di contaminazione (CSC) per Fe, Mn (elementi spesso associati alla presenza di contaminazione da idrocarburi) e Idrocarburi totali (TPH), localizzati, oltre che all'interno della base, anche lungo il confine meridionale del sito (figura 3), ad una profondità che va da 1 a 4 m al di sotto del piano campagna. Trattandosi di un contaminante organico questo presenterà bassa solubilità e densità inferiore a quella dell'acqua, di conseguenza può essere classificato come LNAPL (Report monitoraggio acque 2015) e il suo movimento avverrà, in parte in soluzione nella falda e in parte come surnatante.

Altra caratteristica fondamentale di questo contaminante è la sua naturale biodegradazione ad opera di batteri che si nutrono del contaminante stesso ossidandolo e sviluppando prodotti secondari come acidi organici e gas che, a loro volta, incrementano la conducibilità elettrica (σ) del terreno rendendo le tecniche geofisiche che sfruttano la corrente, particolarmente efficaci per la sua individuazione. L'effetto di questi batteri è tanto maggiore quanto più il contaminante è situato in zone prossime al piano campagna, oppure quando viene frazionato all'interno della frangia capillare ad opera delle oscillazioni della falda (Cassiani et al. 2014).

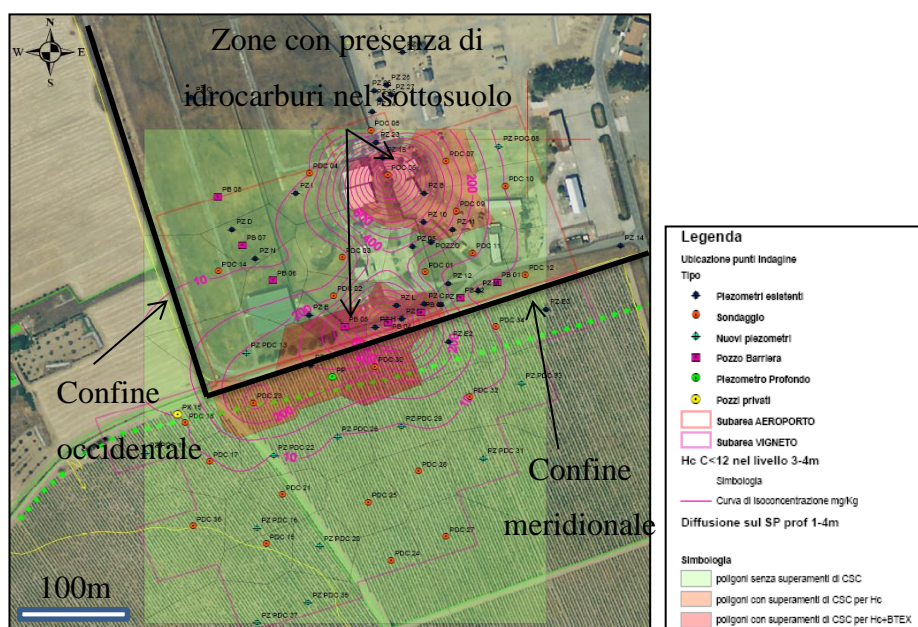


Figura 3: Aree in cui si riscontra la presenza di TPH nel sottosuolo (Piano di caratterizzazione 2012).

	CSC ($\mu\text{g/l}$)	CONCENTRAZIONE ELEMENTI NEL SITO ($\mu\text{g/l}$)
Fe	200	1930 (PzPdC42)
Mn	50	4710 (PzPdC42)
TPH	350	1010.9 (PzPdC42)

Tabella 1: Superamenti delle CSC riscontrati nella falda all'interno della base militare di Decimomannu (Piano di caratterizzazione 2012).

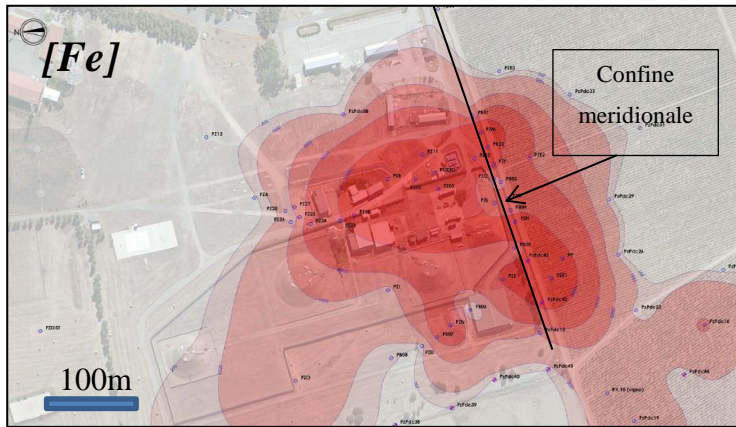


Figura 4: Distribuzione del Fe nella falda superficiale (Modello concettuale definitivo 2013)

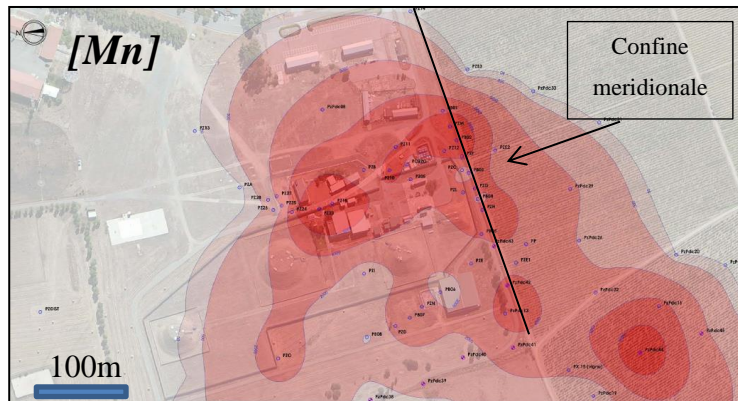


Figura 5: Distribuzione del Mn nella falda superficiale (Modello concettuale definitivo 2013)

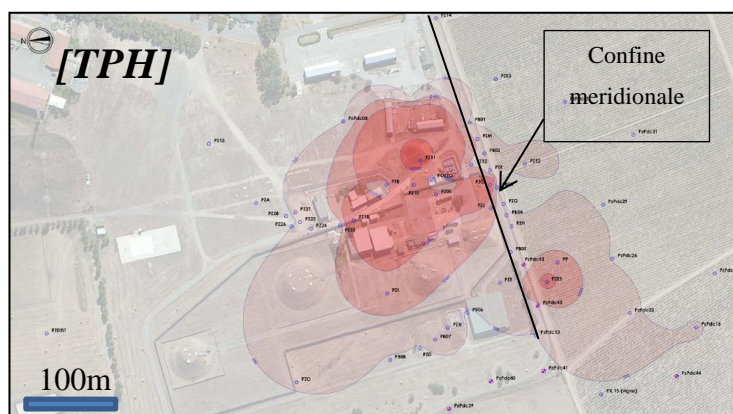


Figura 6: Distribuzione del TPH nella falda superficiale (Modello concettuale definitivo 2013)

A seguito delle indagini è stato realizzato un intervento di messa in sicurezza di emergenza (MISE) tramite l'installazione di una barriera di pozzi (indicati in blu, figura 8) lungo il confine meridionale del sito e nei pressi delle sorgenti di contaminazione interne alla base.



Figura 7: Pozzo localizzato all'interno della base con evidenze visive e olfattive della presenza di contaminante.

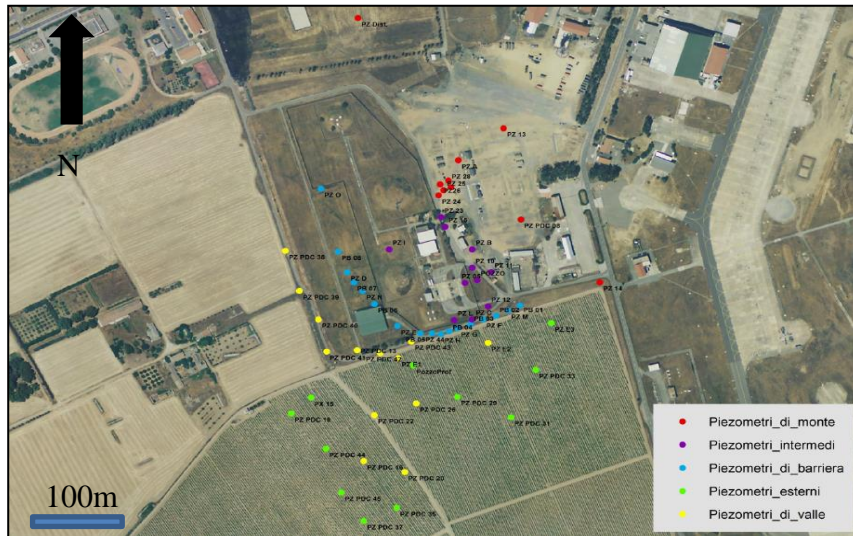


Figura 8: Posizione della barriera di pozzi (Report Monitoraggio Acque 2014).

Dai monitoraggi realizzati durante l'attività di MISE, sono stati nuovamente riscontrati superamenti delle CSC nella falda, sia nelle aree interne della base che nei pozzi immediatamente a valle della barriera posta sul confine meridionale (PZE1,PZE2). Da qui l'esigenza di comprendere la posizione e lo spostamento del plume di contaminazione mediante le tecniche geofisiche e in sito, descritte in questo lavoro.

1.2 Inquadramento geologico

Nonostante presenti una estensione areale ristretta, la Sardegna è caratterizzata da una grande varietà litologica e da un'evoluzione geologica lunga e complessa. Le rocce più antiche che sono state individuate nell'isola, hanno età comprese tra il Precambriano ed il Paleozoico superiore e sono indicate come **Basamento Metamorfico Ercinico**. Queste rocce hanno subito deformazioni erciniche, sviluppatesi dalla collisione tra la placca del Gondwana e dell'Armorica (Devoniano), con sviluppo della linea Posada-Asinara (fascia fortemente deformata, che separa i complessi migmatitico e metamorfico di età ercinica). Rocce magmatiche affiorano estesamente, costituendo il **Complesso Magmatico Tardo-paleozoico**. Trattasi di un complesso intrusivo tardo-ercinico, ad affinità fondamentalmente calcicalina, messi in posto nel Carbonifero superiore-Permiano grazie a meccanismi di tettonica distensiva post-collisionale.

Nel periodo post-ercinico la Sardegna si comporta come un cratone stabile caratterizzato da periodiche trasgressioni e regressioni marine. Solo nel Cenozoico, questa staticità evolutiva, viene interrotta dall'impostazione di fosse tettoniche ("rift sardo") correlate all'apertura del Bacino balearico. In questo periodo si sviluppano **Successioni Sedimentarie e Vulcaniche tardo Paleozoiche e Cenozoiche** (L. Carmignani - P. Conti - A. Funedda - G. Oggiano - S. Pasci, 2012).

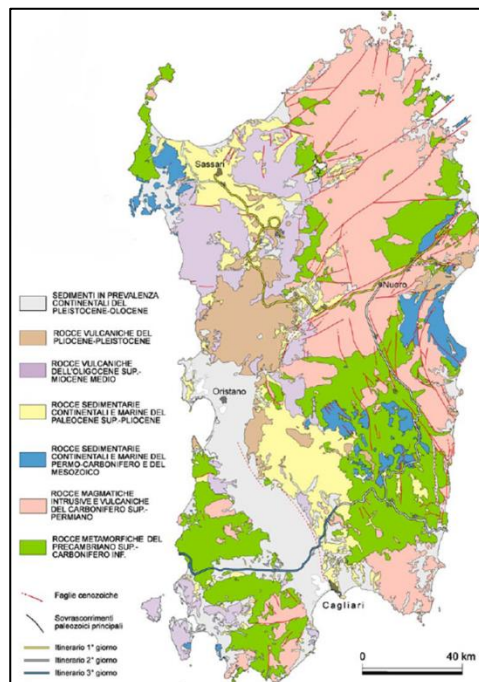


Figura 9: Carta Geologica della Sardegna(L. Carmignani - P. Conti - A. Funedda - G. Oggiano - S. Pasci, 2012)

L'aeroporto di Decimomannu è situato nella Piana del Cixerri caratterizzata da una formazione di siltiti intercalate ad arenarie, con presenza sporadica di calcari e argille lignifere, sviluppatesi tra l'Eocene Medio e l'Oligocene Inferiore e cioè nella fase di sedimentazione molassica post-pireneica (Luca G. Costamagna, Andreas Schäfer 2013).

Nello specifico, l'aeroporto è situato nel settore sud-orientale della piana, costituito quasi totalmente da depositi Olocenici di origine alluvionale, derivanti dall'attività deposizionale dei fiumi Rio Cixerri e Rio Mannu. Il principale elemento tettonico riscontrabile nell'area di interesse, è rappresentato dalla grande faglia, posta a ovest di Decimomannu che separa la pianura del Cixerri dalle colline di Serrenti e Monastir e presenta direzione NNW-SSE.

Le litologie di seguito riportate, sono state ricavate dal **piano di caratterizzazione ambientale**, previsto dall'articolo 242 del D.Lgs. 152/2006

(Testo unico sulle acque), la quale redazione, è stata prevista nel 2012, a seguito degli sversamenti del 2007, 2009, 2010.

- **Terreno vegetale**, costituito da **limi-argillosi** con abbondanti ciottoli o da **ghiaie sabbioso-limose**, il loro spessore varia da 0,4 m a 1,5 m. In alcuni casi è stato sostituito da un «**Terreno di riporto**».

- **Ghiaie recenti**, caratterizzate da **ghiaie e sabbie con debole presenza di frazione fine** argillosa o limosa. Le profondità variano da 1,5 a 6 m con spessori mediamente tra i 3-4 m e identificano i **fenomeni alluvionali recenti**.

- **Ghiaie antiche**, caratterizzate da **ghiaie e sabbie in matrice limo-argillosa**, con spessori molto variabili compresi fra un minimo di 4 m e un massimo di 8 m. La parte sommitale è contraddistinta da **argille sabbiose-ghiaiose** di colore nocciola («**Argille nocciola**»), presenti in modo discontinuo su tutta l'area. Queste litologie identificano i **fenomeni alluvionali antichi**.

- **Argille di base**, caratterizzate da **argille e argille limo-sabbiose** (basamento impermeabile dell'area in studio), in cui lo spessore misurato in un particolare sondaggio è di circa 13 m , con tetto a 10,5 m dal piano campagna.

- **Ghiaie di base**, caratterizzate da **ghiaie e sabbie**.

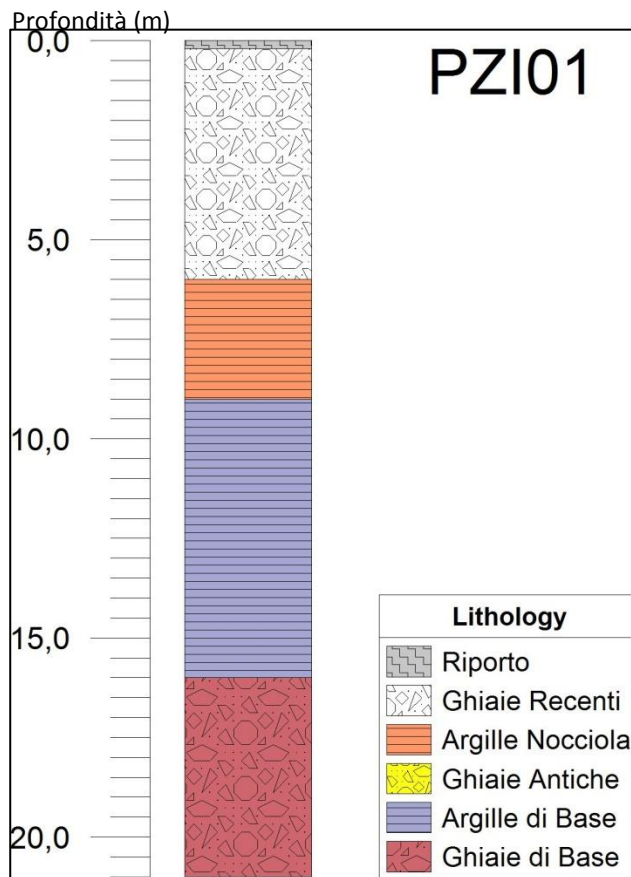


Figura10: Log-stratigrafico dell'area in esame (Piano di caratterizzazione 2012).

La classificazione dei terreni è stata fatta attraverso sondaggi e prove in foro nei pozzi presenti nel sito (figura 11). Sono state inoltre realizzate svariate sezioni geologiche che hanno permesso di ricostruire un modello geologico concettuale del sito.

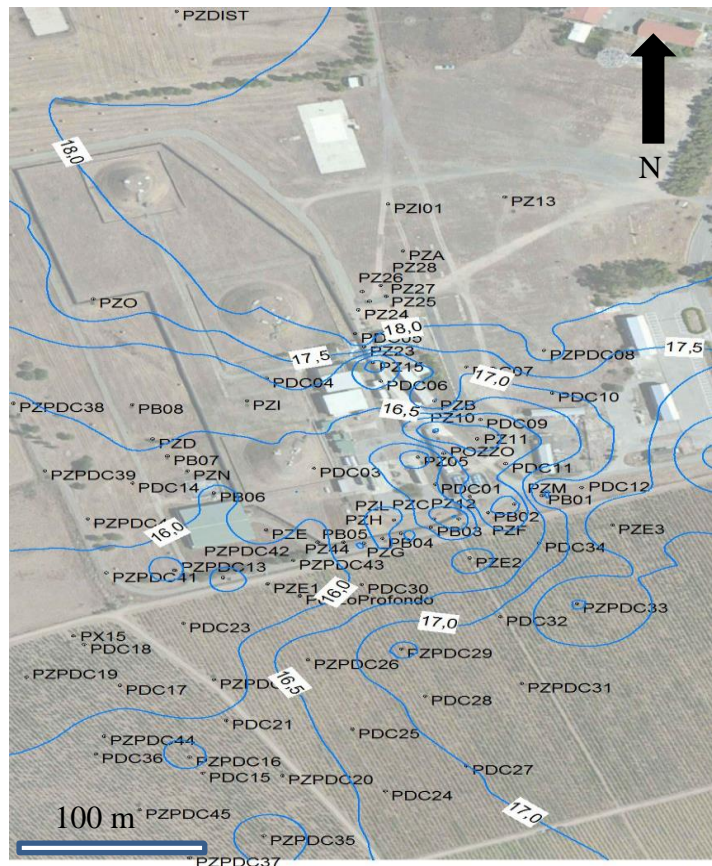


Figura 11: Posizione dei pozzi e ricostruzione delle isofreatiche nell'aeroporto di Decimomannu (Piano di caratterizzazione 2012.)

Di seguito sono riportati gli esiti delle analisi granulometriche e delle prove in foro realizzate nella base militare di Decimomannu nel marzo 2012

1.2.1 Risultati delle analisi granulometriche

❖ Ghiaie recenti

Sondaggio/profondità	Classificazione USCS	% Ghiaie	% Sabbie	% limo	% Argilla	K (m/s)
PdC03 1.0-3.0m	Ghiaie con sabbie debolmente argillose	62	26	5	7	$2.6E^{-6}$
PdC11 2.0-4m	Ghiaie con sabbie debolmente limose	55	33	8	4	$6.5E^{-6}$
PdC22 1.0-3.0m	Ghiaie con sabbie	59	30	5	6	$4.2E^{-6}$
PdC28 2.0-4.0m	Ghiaie con sabbie	70	23	4	3	$1.8E^{-4}$

Tabella 2: Parametri dell'analisi granulometrica per le ghiaie recenti (Piano di caratterizzazione 2012).

❖ Argille nocciola

Sondaggi o/profondità	Classificazione USCS	% Ghiaie	% Sabbie	% limo	% Argilla	K (m/s)
PB07 4.0-5.0m	Ghiaie con argilla sabbiosa	48	20	3	29	$6.1 E^{-9}$
PdC11 5.0-6.0m	Argilla con limo, sabbiosa ghiaiosa	14	21	26	39	$3.4E^{-9}$
PdC13 4.3-4.5m	Determinazione di laboratorio su cella edometrica				$1.0E^{-10}$	

Tabella 3: Parametri dell'analisi granulometrica per le argille nocciola (Piano di caratterizzazione 2012).

Per determinare i valori di permeabilità delle argille di base sono state realizzate delle prove su cella edometrica

❖ Argille di base

<i>SONDAGGIO</i>	<i>PROFONDITA'</i>	<i>Stima di k da prove di permeabilità su cella edometrica</i>
PB07	10/10,5m	9.7 E-11 m/s
PP (Pozzo Profondo)	20,2/20,6m	5.8 E-10 m/s

Tabella 4: Parametri delle argille di base stimati con la prova di permeabilità su cella edometrica (Piano di caratterizzazione 2012).

❖ Ghiaie antiche

Sondaggio o profondità	Classificazione USCS	% Ghiaie	% Sabbie	% limo	% Argilla	K (m/s)
PB01 7.0-8.0m	Ghiaie con sabbia argillosa e debolmente limosa	48	31	8	13	1.9 E ⁻⁸
PB05 7.0-8.0m	Ghiaie con sabbia argillosa	53	26	5	16	1.7E ⁻⁶
PdC07 6.0-8.0m	Ghiaie con sabbia argillosa	56	29	5	10	1.0E ⁻⁷
PzPdC22 6.0-8.0m	Ghiaie con sabbia argillosa e debolmente limosa	42	31	9	18	1.7E ⁻⁸

Tabella 5: Parametri dell'analisi granulometrica per le ghiaie antiche (Piano di caratterizzazione 2012).

1.2.2 Valori di permeabilità(K) determinati con le prove in foro (Lefranc)

ID	PB07	PB08	PdC06	PdC08	PdC19	PdC22	PdC13
K (m/s)	$1.3E^{-5}$	$4.7E^{-7}$	$4.5E^{-7}$	$1.4E^{-5}$	$1.1E^{-6}$	$9.9E^{-7}$	$3.4E^{-6}$
ID	PB01	PB02	PB03	PB04	PB05	PB06	
K (m/s)	$2.2E^{-7}$	$2.0E^{-6}$	$1.0E^{-5}$	$2.2E^{-6}$	$2.0E^{-6}$	$7.5E^{-7}$	

Tabella 6: Valori di permeabilità misurati con le prove in foro (Piano di caratterizzazione 2012).

1.2.3 Stime di portate di esercizio (Q) ottenuti con le prove a gradini di portata

ID	PB01	PB02	PB03	PB04	PB05	PB06	PB07	PB08
Q (l/min)	1	1	10	2	2	1.5	18	1
K(m/s) da prove in foro	$2.2E^{-7}$	$2.0E^{-6}$	$1.0E^{-5}$	$2.2E^{-6}$	$2.0E^{-6}$	$7.5E^{-7}$	$1.3E^{-5}$	$4.7E^{-7}$
K(m/s) da analisi granulom.	$1.9E^{-8}$				$1.7E^{-6}$			

Tabella 7: Valori di portata misurati con prove a gradini di portata (Piano di caratterizzazione 2012).

1.2.4 Sezioni geologiche

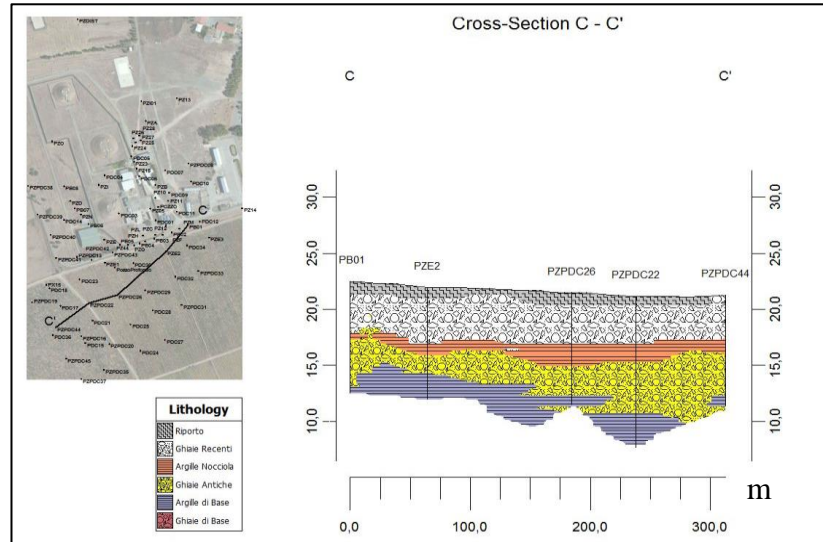


Figura 12: Sezione geologica C-C' (Piano di caratterizzazione 2012).

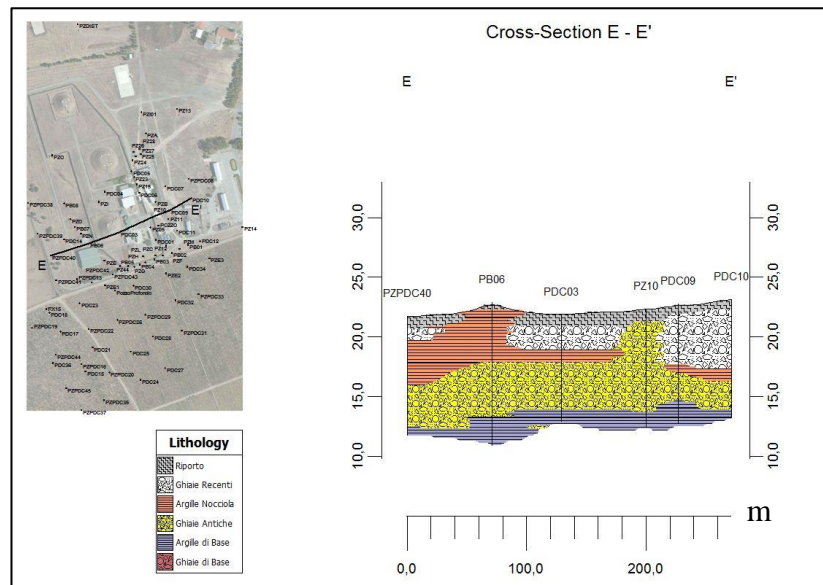


Figura 13: Sezione geologica E-E' (Piano di caratterizzazione 2012).

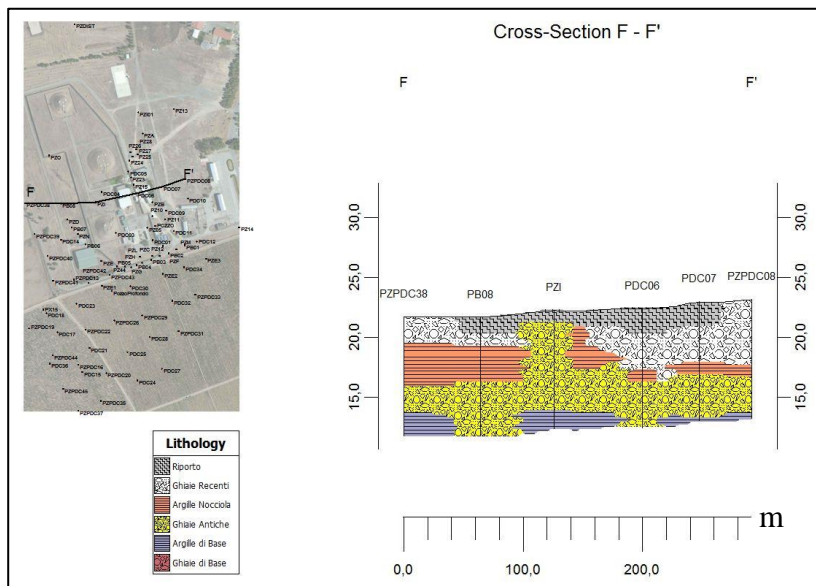


Figura 14: Sezione geologica F-F' (Piano di caratterizzazione 2012).

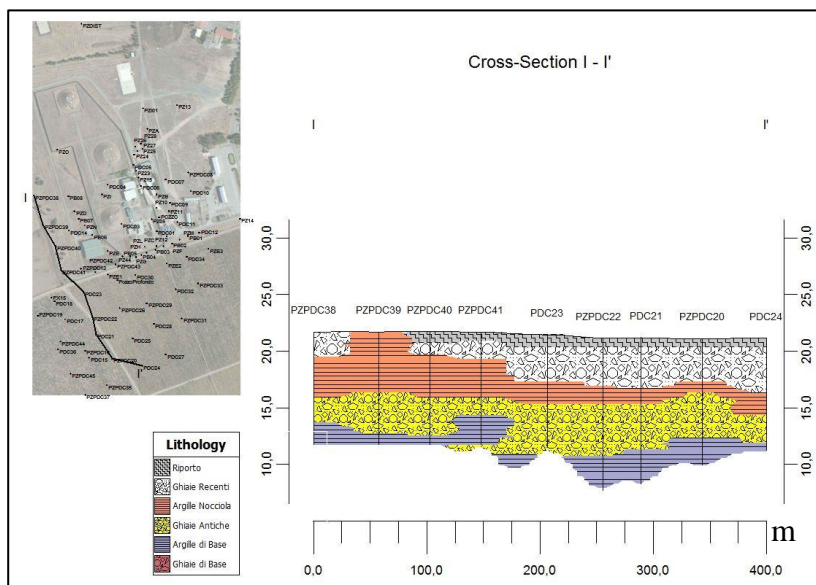


Figura 15: Sezione geologica I-I' (Piano di caratterizzazione 2012).

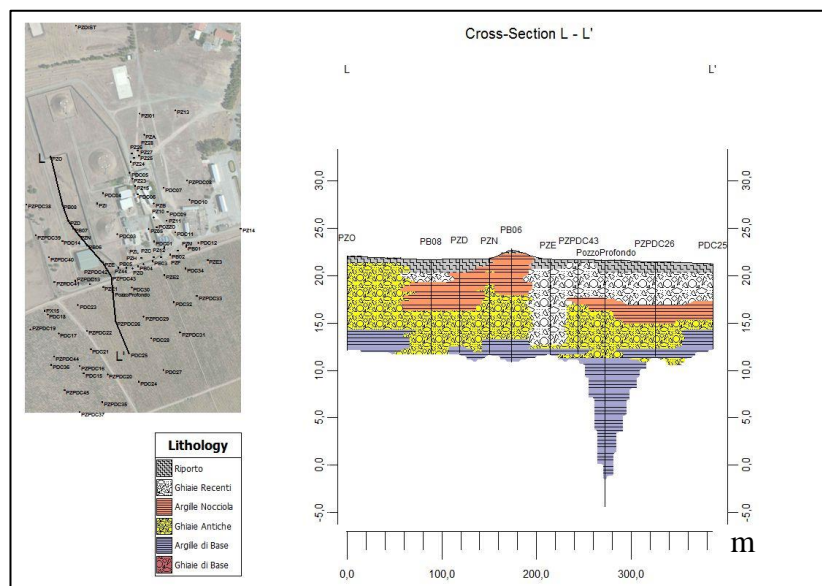


Figura 16: Sezione geologica L-L' (Piano di caratterizzazione 2012).

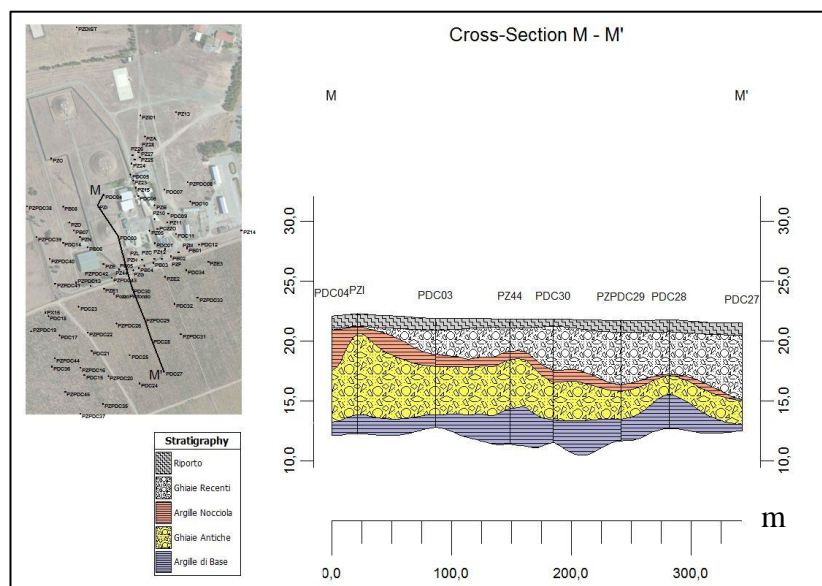


Figura 17: Sezione geologica M-M' (Piano di caratterizzazione 2012).

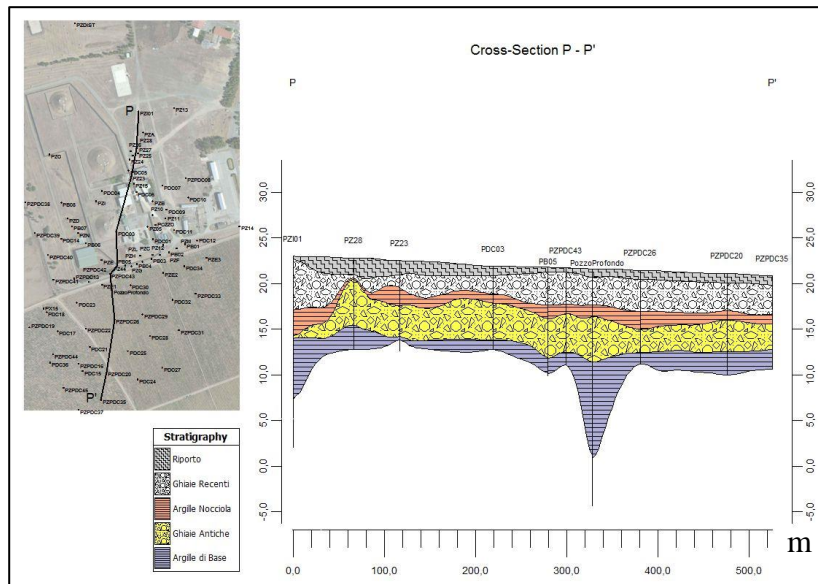


Figura 18: Sezione geologica P-P' (Piano di caratterizzazione 2012)

1.2.5 Ricostruzione del modello geologico

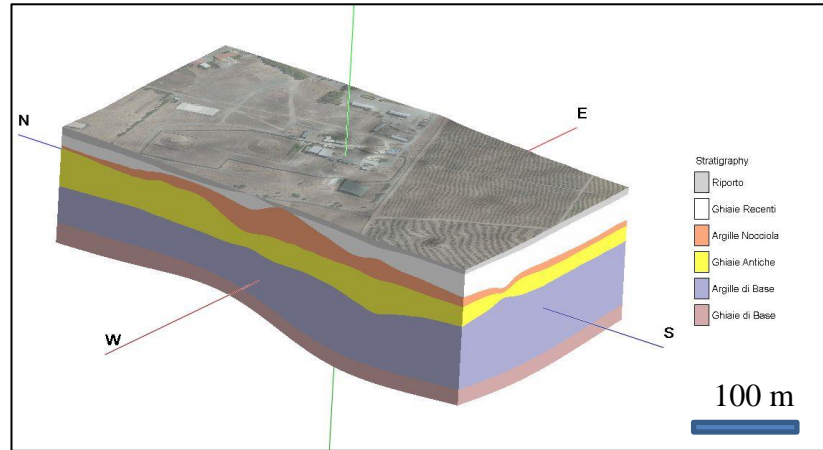


Figura 19: Modello geologico del sito; vista occidentale (Piano di caratterizzazione 2012)

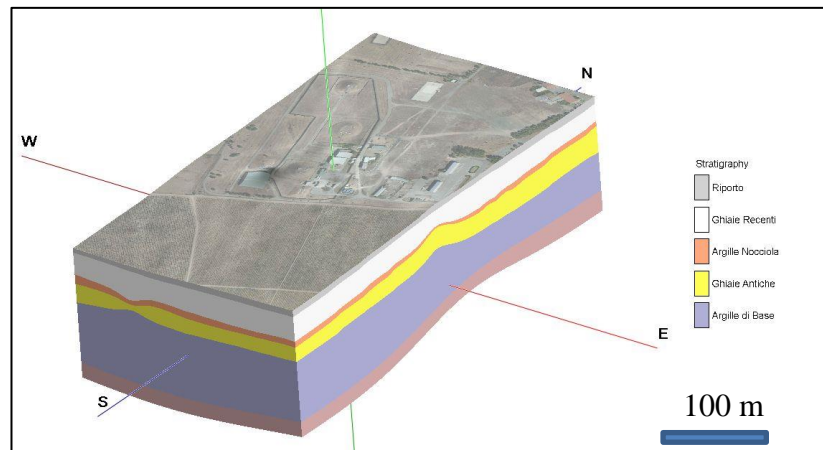


Figura 20: Modello geologico del sito; vista orientale (Piano di caratterizzazione 2012)

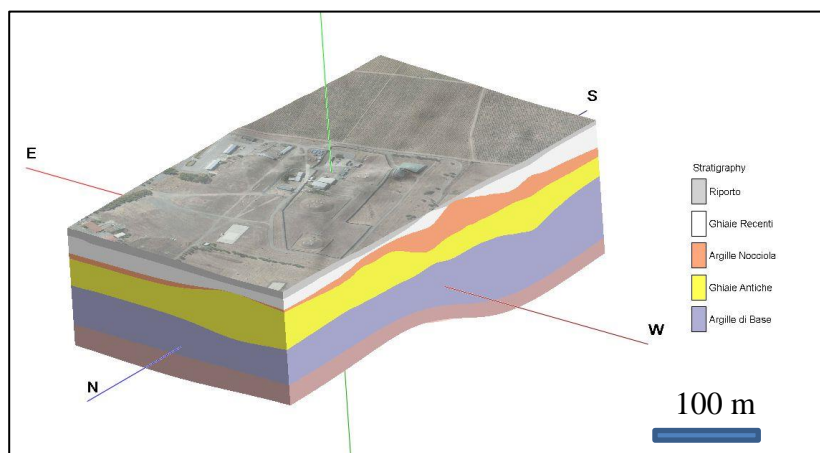


Figura 21: Modello geologico del sito; vista settentrionale (Piano di caratterizzazione 2012)

1.3 Inquadramento idrogeologico

La falda sotterranea della base militare fa parte dell'acquifero detritico alluvionale del Campidano (Mulas M. G. 2010). La quota piezometrica della falda varia tra i 18 e i 15 m.s.l.m. (figura 22) e si nota una deflessione anomala delle isopieze lungo il confine meridionale del sito, connessa all'attività di estrazione dei pozzi installati per l'intervento di messa in sicurezza di emergenza (MISE).

La falda è posta circa 5m al di sotto del piano campagna e compie delle oscillazioni di +/- 2m. Nel complesso, il deflusso di falda ha direzione NE-SW, a NW la linea di deflusso si incurva per la presenza dell'orizzonte di argille nocciola che risulta essere prossimo al piano campagna (figura 22).

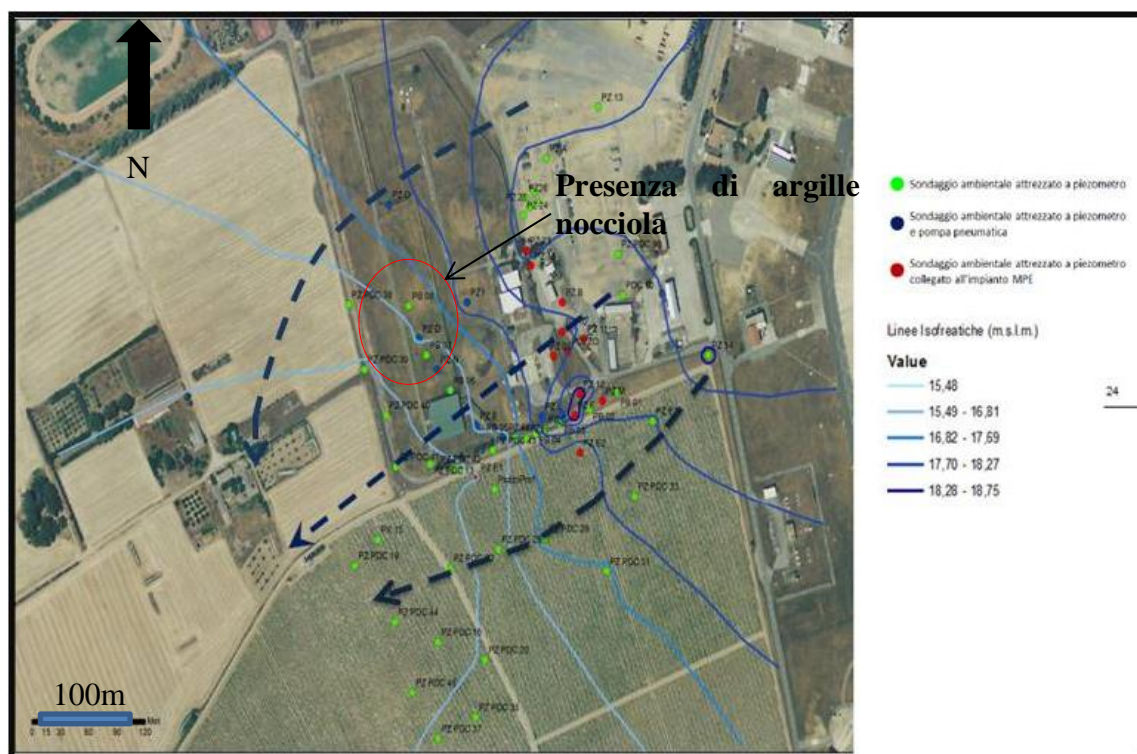


Figura 22: Mappa delle isofreatiche (Report Modifica MISE Nov.2014).

Capitolo 2

2.1 Tecniche geofisiche e di indagine in sito

2.1.1 La tomografia elettrica di resistività (ERT)

La tecnica della tomografia elettrica si sviluppa negli anni Ottanta con la diffusione dei georesistivimetri multielettrodo che, mediante un numero elevato di elettrodi (stendimento) collegati simultaneamente allo strumento, permettono di misurare automaticamente la resistività apparente (ρ_a) per ogni quaterna possibile di elettrodi (quadripoli). L'acquisizione può essere effettuata con una qualunque configurazione di elettrodi (Es: Wenner/Schlumberger/dipolo-dipolo).

La tomografia elettrica si basa essenzialmente sulla *legge di Ohm*, la quale afferma che iniettando una corrente “ I ” tra due elettrodi (A e B), sarà possibile misurare una differenza di potenziale “ ΔV ” in altri due elettrodi (M e N). Questo mi identifica una relazione lineare tra ΔV e I .

$$\text{Legge di Ohm} \quad \Delta V = IR \quad (1)$$

Considerando un conduttore cilindrico di lunghezza “ L ”, sezione “ S ” e resistenza “ R ”, attraversato da una corrente “ I ” che favorirà l'innescò di una differenza di potenziale “ ΔV ”, sarà possibile definire la *seconda legge di Ohm*

$$\text{Seconda legge di Ohm} \quad R = \frac{\rho L}{S} \quad (2)$$

Misurando
la

differenza di potenziale sarà possibile calcolare la resistenza “ R ” dalla (1), per poi esplicitare la (2) e calcolare la resistività “ ρ ”

Resistività elettrica

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (3)$$

la **resistività elettrica “ ρ ”** è una proprietà fisica intrinseca di qualunque materiale e si definisce come “*resistenza al passaggio della corrente di un cubetto del materiale di lato unitario*” (G. Santarato, Nassere Abu Zeid, S. Bignardi, 2015), la sua unità di misura è Ohm*m (Ωm). Essa non dipende soltanto dalla R, ma anche da parametri geometrici come A e L. La ρ è disomogenea e anisotropa, di conseguenza i suoi valori cambiano da punto a punto e in base alla direzione dalla quale vengono misurati.

Altro parametro importante è la **conduttività elettrica “ σ ”** che può essere espresso come reciproco della resistività elettrica e come tale si misura in (Ωm)⁻¹.

Di fondamentale importanza è la *configurazione elettroica (array)*, di fatto, la ΔV misurata è funzione della distanza tra i due elettrodi energizzanti e potenziometrici. Le configurazioni elettroiche più utilizzate per le misure ERT sono:

1. Configurazione di *Wenner*, elettrodi MN (potenziometrici) interni a quelli AB (energizzanti) e sono posti tutti alla stessa distanza “a”.
2. Configurazione di *Schlumberger*, elettrodi MN (potenziometrici) interni a quelli AB (energizzanti), con distanza $MN \ll AB$. In questa configurazione “a” è l’interdistanza tra M e N e “L” l’interdistanza tra A e B.
3. Configurazione *dipolo-dipolo*, in questi casi gli elettrodi MN (potenziometrici) sono posti al di fuori degli elettrodi AB (energizzanti). I dipoli AB e MN hanno uguale distanza “a” e sono posizionati ad una distanza “na” gli uni dagli altri, di conseguenza il potenziale viene misurato nel punto posto ad $1/2 na$.

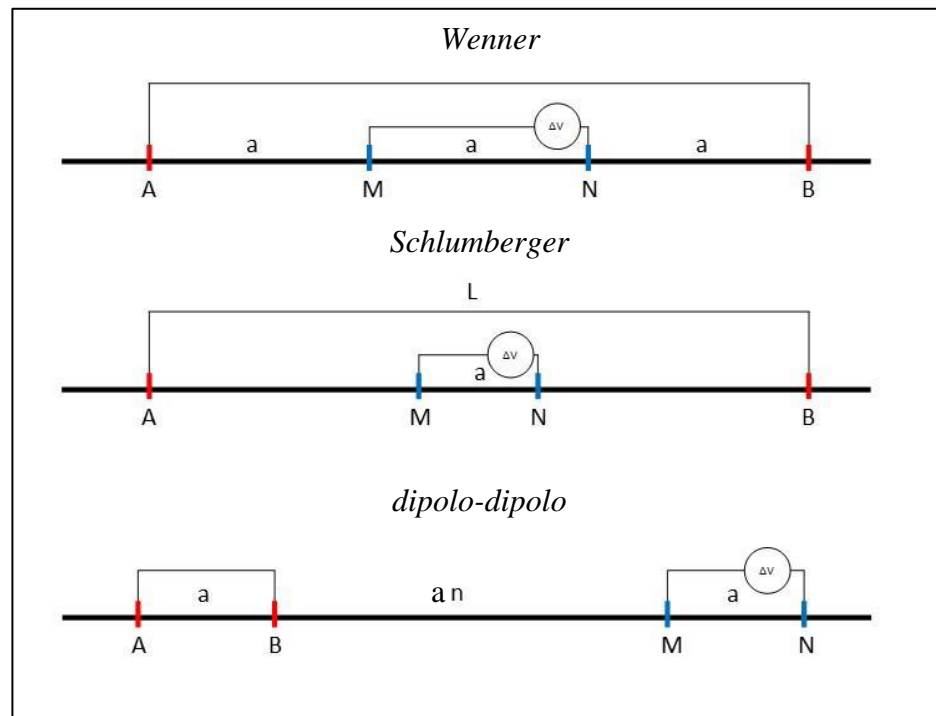


Figura 23: Rappresentazione delle principali configurazioni usate nella tomografia elettrica.

Per capire quale array utilizzare bisogna tenere conto di:

- Profondità di penetrazione.
- Distribuzione della sensibilità ad anomalie verticali e orizzontali.
- Copertura orizzontale.
- Ampiezza del segnale.

I primi due fattori possono essere valutati tramite un'analisi di sensitività che si calcola come la variazione di resistenza misurata determinata dalla variazione di resistività in una regione del sottosuolo.

In base ai patte di sensitività avremo che:

- L'array di *Wenner* ha buona penetrazione, buona risoluzione verticale, ma scarsa risoluzione orizzontale.
- L'array *dipolo-dipolo* ha bassa penetrazione, bassa risoluzione verticale.

- L'array di *Schlumberger* ha caratteristiche intermedie tra Wenner e dipolo-dipolo.

I concetti sopra illustrati vengono applicati in campagna sullo stendimento di elettrodi, ottenendo l'evoluzione verticale e laterale della **resistività apparente** “ ρ_a ”. La profondità di investigazione dello strumento dipende dalla lunghezza dello stendimento (profondità raggiunta circa uguale a $1/4$, $1/5$ dell'estensione), dalla litologia, dal tipo di strumento usato e dalla corrente iniettata. La risoluzione sarà molto buona in prossimità degli elettrodi e andrà a diminuire con la profondità.

Aumentando i periodi di acquisizione e impiegando una corrente alternata, durante una ERT, sarà possibile realizzare anche una misura di polarizzazione indotta (PI), che consente di misurare la **caricabilità apparente** “ m_a ”, del terreno.

2.1.2 Elaborazione dei dati ERT

I dati acquisiti col resistivimetro sono valori di ρ_a che vengono rappresentati all'interno di *pseudosezioni* e cioè un grafico che ha per ascissa la distanza lungo lo stendimento e per ordinata un parametro associato all'apertura del quadripolo (G. Santarato, Nassere Abu Zeid, S. Bignardi, 2015).

Di per se una *pseudosezione* è una rappresentazione efficace del dato in quanto la ρ_a è comunque funzione della resistività reale ρ . Tuttavia, per una migliore interpretazione della sezione è opportuno sostituire i valori di ρ_a con quelli di ρ che sono tipici della geometria di ogni strato, ottenendo così una *sezione reale*.

Creare una *sezione reale* significa realizzare un processo di *inversione* che mi consente di passare dalle ρ_a alle ρ , mediante il confronto del dato con un modello sintetico. Per realizzare un *inversione* è possibile utilizzare una serie di software, ognuno dei quali usa un differente metodo di inversione e può produrre risultati differenti.

Realizzata la misura in campagna (data set), per passare all'elaborazione dei dati, sarà necessario confrontare i quadripoli *diretti* e *reciproci*. Quando si effettua una misura col resistivimetro, ci sarà sempre una coppia di elettrodi che immette corrente (energizzanti) e una coppia di elettrodi che misura la ΔV (potenziometrici).

Se in uno stendimento la coppia di elettrodi A e B sono energizzanti e la coppia M e N sono potenziometrici, sto eseguendo una *misura diretta*.

Nel caso in cui inverte le coppie (M e N sono energizzanti e A e B sono potenziometrici) allora sto eseguendo una *misura di reciproci*.

Per una questione geometrica, le due configurazioni sopra descritte sono identificate nello stesso punto, ed effettuando la misura nello stesso momento, dovrebbero restituire valori di ρ_a simili. Di conseguenza è possibile effettuare un

confronto tra *diretti e reciproci* e scartare la coppia che presenta una differenza percentuale troppo elevata. Le differenze elevate tra i valori *diretti e reciproci* possono essere attribuite a svariati fattori, tra i quali il più comune è connesso alla strumentazione e al cattivo contatto tra gli elettrodi e i cavi. Bisogna, inoltre, scegliere con cura il valore limite percentuale di errore da prendere in considerazione. Se questa percentuale è troppo alta si rischia di prendere in considerazione anche valori errati, che verranno successivamente impiegati nell'inversione, se invece la percentuale di errore è bassa, la selezione sarà più restrittiva e si rischia di scartare troppi valori, ottenendo sezioni "lisce".

Valutata la qualità del dato si passa all'*inversione*. La relazione tra resistività apparente ρ_a e la resistività reale ρ è non lineare e non linearizzabile, di conseguenza per passare da una all'altra è necessario risolvere un problema inverso o di *regressione lineare*" (G. Santarato, Nassere Abu Zeid, S. Bignardi, 2015).

Quando si realizza un'inversione bisogna sempre tenere a mente che:

- I. L'inversione risente fortemente degli errori sistematici (casuali e non) di cui sono affette tutte le misure
- II. Ogni misura è influenzata dalla configurazione di elettrodi utilizzata (diverse configurazioni implicano diverse misure).
- III. Le inversioni non generano mai risultati univoci.

Per realizzare un'inversione è necessario attuare un procedimento numerico che necessita di tre componenti:

- Una griglia di discretizzazione del dominio.
- Un modello diretto 2D, o 3D della distribuzione di ρ_a .
- Un algoritmo di inversione.

Con la griglia di discretizzazione si suddivide il dominio (nel nostro caso il sottosuolo) secondo una griglia di celle rettangolari che presentano larghezza pari a metà del passo di campionamento all'interno del profilo di misura (potere

risolutivo superficiale). Le celle presenteranno larghezza crescente procedendo verso i bordi del dominio e questo permetterà di calcolare il potenziale elettrico (ΔV) all'infinito. L'altezza delle celle corrisponde alla profondità di indagine del quadripolo superficiale più corto e cresce, secondo una funzione logaritmica, verso il basso per tenere conto della perdita di risoluzione tipica dei metodi geoelettrici. Per essere certi di comprendere nell'inversione tutto il volume investigato, il numero di celle usato deve essere molto maggiore del numero dei dati di ρ_a misurati in campagna (G. Santarato, Nassere Abu Zeid, S. Bignardi, 2015). A ognuna di queste celle vengono attribuiti dei valori iniziali di resistività reale che possono anche essere omogenei, ottenendo un modello iniziale, necessario a linearizzare il nostro problema non lineare, con la conseguenza che non si stimeranno i valori di resistività reale per ogni cella, ma la loro variazione rispetto ai valori iniziali assegnati (**distribuzione di resistività**). Per stimare i valori di distribuzione di resistività si deve minimizzare la funzione *obbiettivo* che nel nostro caso consiste nel *misfit* dei dati di resistività apparente.

$$\text{Funzione obbiettivo} \quad \Psi_d = \sum_{i=1}^N \left(\frac{F_i(m) - d_i}{\varepsilon_i} \right)^2 = \| \mathbf{W}_d (F_i(m) - d_i) \|^2 \quad (4)$$

- $F_i(m)$ = i-esima resistenza calcolata.
- d_i = i-esima resistenza misurata.
- ε_i = errore della misura i.
- \mathbf{W}_d = matrice degli errori ε_i .
- N = numero di misure

Un algoritmo alle *differenze finite*, o agli *elementi finiti*, calcola valori di ρ_a , in tutti i punti della griglia nei quali esse sono state misurate, utilizzando la legge costitutiva della diffusione della corrente in 2D.

Legge della diffusione della corrente

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \lambda^2 \sigma v = -I \delta(x) \delta(z) \quad (5)$$

- λ = variabile della trasformata di Fourier in direzione trasversale y .
- σ = **conduttività elettrica** $\left(\frac{1}{\rho}\right)$, viene quindi misurato in $(\Omega m)^{-1}$.
- v = trasformata di Fourier del potenziale.

A questo punto avremo creato un **modello diretto** che contiene i valori di ρ_a e potremo cominciare ad applicare il ciclo iterativo dell'inversione. Si fa la differenza tra le ρ_a , calcolate nel modello diretto, e quelle misurate in campagna, minimizzando la funzione obiettivo e cioè cercando il minimo della sua superficie multidimensionale, ottenendo così un primo insieme di variazioni di resistività reale ρ per ogni cella, che verranno sommate algebricamente ai valori reali stabiliti inizialmente.

Si procede iterativamente facendo nuovamente la differenza tra le ρ_a calcolate e quelle misurate e ottenendo un nuovo insieme di variazioni che saranno sommate algebricamente alla distribuzione di ρ ottenuta dall'iterazione precedente. Queste iterazioni procedono fino a quando le variazioni derivanti dalla minimizzazione della funzione obiettivo non saranno sufficientemente piccole (G. Santarato, Nassere Abu Zeid, S. Bignardi, 2015).

Una problematica di questo metodo è che le celle esterne e quelle in profondità, vengono coinvolte solo marginalmente dalle misure e questo comporterà un "lisciamento" del modello finale. È necessario quindi introdurre una *funzione di stabilizzazione*, che nel nostro caso sarà quella di *minimum roughness*, che impedisce a celle vicine di assumere valori di resistività arbitrariamente diversi. Di conseguenza il passaggio tra corpi a resistività diversa avverrà sempre gradualmente, anche se nella realtà risulta essere netto (G. Santarato, Nassere Abu Zeid, S. Bignardi, 2015).

Il grande vantaggio che questo metodo da rispetto ad altri, consiste nel fatto che il risultato finale non dipende dalla scelta dei dati di partenza (può essere anche arbitraria e omogenea) ma soltanto dai dati raccolti in campagna.

Nel caso specifico di questo elaborato, per realizzare l'inversione dei dati di ERT, è stato utilizzato il software ProfileR version 2.4 distribuito gratuitamente dal Professor Andrew Binley della Lancaster University

([http://www.research.lancs.ac.uk/portal/en/people/andrew-binley\(6cdd0091-9fbb-4501-bdc8-7c5804d05dcf\).html](http://www.research.lancs.ac.uk/portal/en/people/andrew-binley(6cdd0091-9fbb-4501-bdc8-7c5804d05dcf).html)).

Questo software è molto indicato su profili topografici orizzontali come quello dell'aeroporto militare di Decimomannu. A seguito dell'inversione, ProfileR ci restituisce un file ".dat" contenente sulla colonna X la distanza tra i nodi della griglia, lungo la colonna Z la profondità, e nelle altre due colonne i valori di resistività reale e del suo logaritmo.

x	z	Resistivity (Ωm).	log10(resis)
0.25	-0.13908	150.6	2.178
0.25	-0.43116	150.6	2.178
0.25	-0.75244	144.5	2.16
0.25	-1.10585	144.5	2.16
0.25	-1.4946	52.78	1.722
0.25	-1.92223	52.78	1.722
0.25	-2.39262	26.25	1.419
0.25	-2.91004	26.25	1.419
0.25	-3.47921	19.34	1.287
0.25	-4.1053	19.34	1.287
0.25	-4.794	18.05	1.257
0.25	-5.55157	18.05	1.257
0.25	-6.38489	18.71	1.272
0.25	-7.30154	18.71	1.272
0.25	-8.30986	20.04	1.302
0.25	-9.41902	20.04	1.302
0.75	-0.13908	150.6	2.178

Tabella 8: File ricavato dall'inversione dei dati eseguita con ProfileR.

A questo punto i dati sono pronti per il successivo passo di elaborazione che consiste nella realizzazione delle sezioni di ERT. Nel presente lavoro le sezioni ERT sono state realizzate utilizzando il software Surfer® versione 10.3.705, realizzato da Golden Software, che consente di realizzare mappature di superfici 3D e contours (<http://www.goldensoftware.com>).

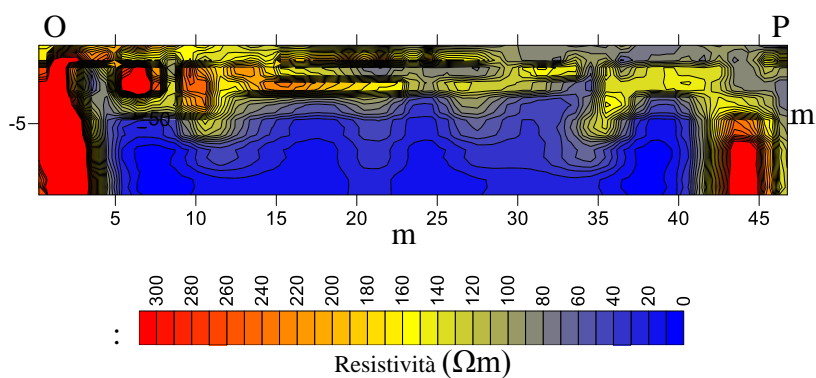


Figura 24: Esempio di sezione ERT realizzata col software Surfer® (dati raccolti nella base militare di Decimomannu).

2.1.3 Indagini elettromagnetiche (EM)

Le tecniche elettromagnetiche (EM) dipendono da proprietà fisiche come la resistività elettrica, la permeabilità magnetica e la permittività dielettrica. Tra queste, le prime due possono essere stimate con metodi geoelettrici e con la magnetometria (oltre che con i metodi elettromagnetici), mentre la permittività dielettrica, può essere misurata esclusivamente con metodi elettromagnetici (georadar o GPR). Tuttavia il grande vantaggio delle tecniche elettromagnetiche consiste nel fatto che ci consentono di stimare la resistività elettrica, in aree in cui è difficile, o addirittura impossibile, iniettare corrente nel terreno (Es. zone desertiche aride, o completamente ghiacciate). Inoltre queste tecniche geofisiche sono molto più speditive della ERT e possono anche essere montate su strumentazioni eli- o avio-trasportata (G. Santarato, Nassere Abu Zeid, S. Bignardi, 2015).

I metodi elettromagnetici si basano sulle leggi di Maxwell riportate di seguito

- ❖ *Legge di Gauss*, anche detta teorema di flusso per il campo elettrico: Il campo elettrico di una superficie chiusa dipende solo dalla carica elettrica al suo interno.

$$\begin{array}{l} \text{Legge di Gauss in} \\ \text{assenza di cariche libere} \end{array} \quad \Delta \cdot \bar{D} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{array}{l} \text{Legge di Gauss in} \\ \text{presenza di cariche} \\ \text{libere} \end{array} \quad \Delta \cdot \bar{D} = \text{densità di cariche} \quad (7)$$

- ❖ *Legge di Faraday* o dell'induzione elettromagnetica: Un campo magnetico variabile nel tempo genera un campo elettrico.

$$\Delta \cdot \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (8)$$

- ❖ *Legge di Gauss per il campo magnetico*: Il campo magnetico attraverso una superficie chiusa qualunque è nullo.

$$\Delta \cdot \bar{B} = 0 \quad (9)$$

- ❖ *Legge di Ampère-Maxwell*: Una corrente di conduzione o di spostamento genera un campo magnetico.

$$\Delta \cdot \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (10)$$

Nelle formule compaiono i seguenti parametri:

- \bar{B} : Vettore densità del flusso magnetico [$\text{Wb}/\text{m}^2 = \text{V} \cdot \text{s}/\text{m}^2$].
- \bar{H} : Vettore intensità del campo magnetico [A/m].
- \bar{E} : Vettore intensità del campo elettrico [V/m].
- \bar{D} : Vettore induzione elettrica [C/m^2].
- \bar{J} : Vettore densità di corrente elettrica [A/m^2].

In base alle leggi descritte e alla teoria di propagazione delle onde elettromagnetiche, è possibile distinguere metodi EM per i quali è valida *l'equazione della diffusione* (detti metodi a induzione) e metodi per i quali vale *l'equazione d'onda* (metodo GPR).

I metodi a induzione possono operare nel dominio della frequenza (FEM), oppure nel dominio del tempo (TEM, TDEM).

Lo strumento usato per realizzare le misure nella base militare di Decimomannu è l'elettromagnetometro a induzione CMD Explorer della Gf Instruments, fornito dal Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, che realizza le misure nel dominio della frequenza (FEM). Lo strumento considera il comportamento del terreno quando questo è attraversato da un campo magnetico, misurando la conduttività elettrica (σ) che poi può essere convertita in resistività (attraverso software come Surfer®). L'elettromagnetometro è costituito da un tubo caratterizzato dalla presenza di tre bobine che generano il campo magnetico. A seconda della distanza a cui sono poste le bobine sarà possibile investigare il terreno a varie profondità che vanno da 0.5 m (minima distanza tra le bobine), fino anche a 6m (massima distanza tra le bobine). Lo strumento è collegato ad un GPS che consente di mappare le aree di misura in maniera immediata, sia seguendo dei profili stabiliti, sia seguendo dei tragitti casuali. In questo modo ad ogni punto di misura dello strumento viene associata una coordinata e nel momento dell'elaborazione dei dati viene creata una mappa georiferita dei valori misurati. (http://www.gfinstruments.cz/index.php?menu=gi&cont=cmd_ov)



Figura 25: Elettromagnetometro a induzione in fase di montaggio

In questo caso i valori ottenuti dalla misura non sono stati invertiti e sono state ricavate delle mappe di resistività elettrica apparente utilizzando il software Surfer® .

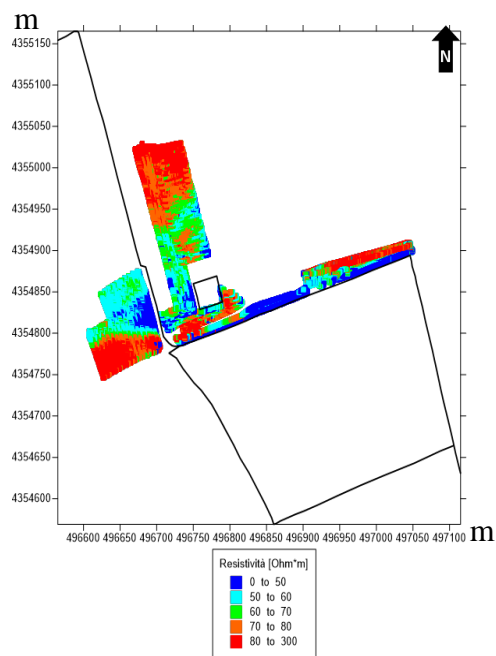


Figura 26: Esempio di mappatura EM realizzata con Surfer® (dati raccolti nella base militare di Decimomannu).

2.1.4 Misure con tecniche di polarizzazione indotta (PI)

La tecnica della polarizzazione indotta venne scoperta da Schlumberger, nei primi anni 90. Egli si rese conto che, durante l'esecuzione di una prova geoelettrica a corrente continua, interrotto il flusso di corrente, l'ago del galvanometro che misurava la differenza di potenziale negli elettrodi potenziometrici, scendeva a zero con velocità diverse, a seconda del contesto in cui si stava effettuando la misura.

Le misure di PI possono essere facilmente realizzate durante l'esecuzione di una ERT. Interrompendo il flusso di corrente si nota che il potenziale elettrico decade in maniera graduale nel tempo (secondi o minuti), fino a raggiungere lo zero. Allo stesso modo, quando si comincia ad iniettare nuovamente corrente, il terreno non presenterà un picco di potenziale istantaneo, ma, questo, necessita di un certo periodo di tempo per essere misurato.

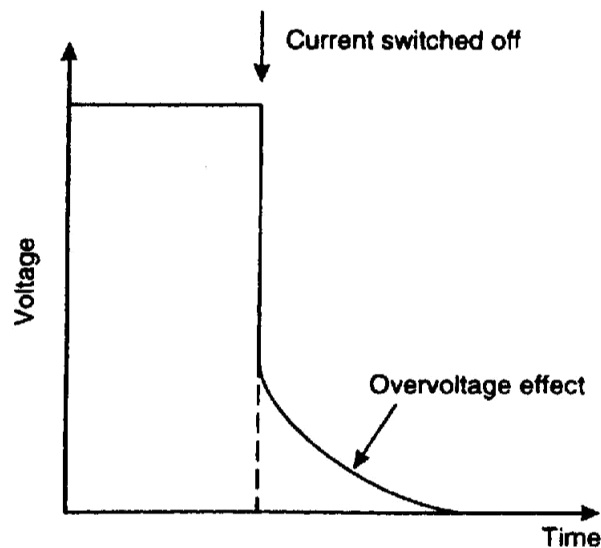


Figura 27: Grafico che mostra il decadimento graduale del potenziale elettrico, all'interruzione della corrente continua

Il fenomeno della caduta graduale di potenziale si verifica perché il terreno si comporta sostanzialmente, come una distribuzione di condensatori e cioè assume temporaneamente la capacità di accumulare corrente elettrica, per poi rilasciarla gradualmente attraverso delle resistenze. Detto in termini semplici il terreno si polarizza.

La PI del terreno è influenzata da parametri del terreno come:

- Composizione mineralogica.
- Tessitura.
- % di acqua (umidità del terreno).
- Composizione chimica dell'acqua interstiziale.

I meccanismi che causano la PI sono ancora ignoti, tuttavia è possibile misurare gli effetti di questo fenomeno secondo vari metodi.

- Nel dominio del tempo o polarizzazione di elettrodo
- Nel dominio della frequenza
- Con la tecnica di polarizzazione indotta spettrale.

Nel presente lavoro i dati di polarizzazione indotta sono stati interpretati nel **dominio del tempo**. In questi casi la PI si genera per una *polarizzazione di elettrodo* che trae origine dalla presenza di minerali metallici come, solfuri (pirite, calcopirite), ossidi (magnetite, ilmenite) e grafite che sono presenti nel terreno (G. Santarato, Nassere Abu Zeid, S. Bignardi, 2015).

Quello che si fa nel dominio del tempo è misurare la caduta di potenziale, che si verifica tra gli elettrodi potenziometrici, nel momento in cui viene interrotta la corrente. Per misurare la caduta di potenziale si stima un parametro definito come **caricabilità “m”** misurata in millisecondi “**msec**”, oppure in millivolt su volt “**mV/V**” (Guida operativa polarizzazione indotta 2017) che può essere espressa nel seguente modo

Caricabilità

$$m = \frac{V_s}{V_p \left(\frac{mV}{V} \right)} \quad (10)$$

dove V_p rappresenta il potenziale misurato nel momento in cui si inietta corrente e viene definito *totale*, questo viene calcolato sommando il potenziale *applicato* V al potenziale di *polarizzazione* V_s che rappresenta il potenziale misurato quando si interrompe il flusso di corrente (Soldoveri M. G.; 2005). La caricabilità esprime la capacità di trattenere corrente da parte del terreno. Nella base militare di Decimomannu sono state realizzate due prove di PI, sulle sezioni ERT, Q-R e S-T, realizzate immediatamente a valle del confine meridionale del sito (vedi capitolo 4).

Quello che si ottiene dalla misura sono comunque dei valori di caricabilità apparente (m_a) che quindi devono essere trasformati in valori di caricabilità reale, di conseguenza, a seguito del confronto tra diretti e reciproci, si procede con un modello inverso che mi permette di ottenere una distribuzione di caricabilità reale (m). Per realizzare l'inversione è stato utilizzato il software RES2DINV della *Geotomo Software*, capace di invertire e restituire contemporaneamente, le sezioni di PI, o anche di ERT. Il programma utilizza un metodo di inversione ai minimi quadrati Gauss-Newton per produrre un modello 2D del sottosuolo, dai soli dati di resistività apparente o di caricabilità apparente.

(<http://www.geotomsoft.com/products.php#2D>)

2.1.5 Test di iniezione tramite misure di tomografia elettrica (ERT) in *time-lapse*.

I test di iniezione rappresentano una tecnica ampiamente utilizzata nell'ambito della caratterizzazione idrogeologica del sottosuolo, per determinare parametri della falda come la sua velocità, la sua direzione di deflusso, il collegamento tra i vari acquiferi e la conducibilità idraulica del terreno (Cassiani et al. 2006). Il test prevede l'iniezione di traccianti reattivi nel terreno, il quale movimento, può essere monitorato mediante tecniche geofisiche come la tomografia di resistività elettrica (ERT), in quanto, i traccianti reattivi vanno a modificare la conduttività elettrica del terreno. Le misure ERT vengono realizzate in *time-lapse* e cioè ad intervalli temporali diversi. Questa tecnica permette di valutare le variazioni della distribuzione di resistività in percentuale nel tempo, connesse alle variazioni temporali e spaziali del plume del tracciante che dipendono dalle eterogeneità idrogeologiche (Cassiani et al. 2006).

Per realizzare misure in *time-lapse* con la tomografia elettrica bisogna fare attenzione ad utilizzare sempre la stessa configurazione dei quadripoli per ogni misura, realizzata in intervalli temporali differenti. Quello che si ottiene dalla misura sono sezioni ERT con uguale posizione degli elettrodi, che presenteranno valori di distribuzione di resistività percentuale diversi, che permetteranno di ricostruire il movimento spaziale e temporale del tracciante.

La valutazione delle variazioni di resistività nelle misure in *time-lapse* viene realizzata facendo un confronto di rapporti di percentuale di resistività tra il time step di misura e il time step di un tempo precedente che viene definito di background e rappresenta il segnale litologico.

$$\frac{R_{t_1}}{R_{t_0}} \cdot 100 = \Delta\rho\% \quad (11)$$

dove R_{t_1} è il valore della resistività di un quadripolo al tempo 1, R_{t_0} è il valore della resistività dello stesso quadripolo ad un tempo precedente e $\Delta\rho\%$ è la

variazione di resistività nell'intervallo di tempo considerato. Se la $\Delta\rho\%$ è maggiore del 100% la resistività sarà aumentata nell'intervallo di tempo considerato, mentre se la percentuale è inferiore al 100% la resistività sarà diminuita. Osservando le variazioni di resistività nel tempo, sarà molto più semplice distinguere i valori di resistenza connessi alle litologie del sottosuolo, di modo da sottrarli a quelli connessi alla contaminazione.

Nel seguente lavoro i dati ottenuti con i test di iniezione sono stati utilizzati per avere un'ulteriore conferma dell'efficacia delle misure geofisiche nel monitorare la risposta dell'acquifero in presenza di fluidi conduttivi e anche per la progettazione dell'intervento di bonifica.

2.2 Misure di fluorescenza indotta da Laser (LIF)

La fluorescenza indotta da laser, o LIF (LASER INDUCED FLUORESCENCE), è una tecnica di **indagine in sito** molto utilizzata per l'individuazione degli IPA (idrocarburi policiclici aromatici). Di fatto questi contaminanti se sottoposti ad una luce con una specifica lunghezza d'onda, si eccitano, ed emettono fluorescenza in un certo intervallo di lunghezza d'onda. Misurando la fluorescenza emessa dal contaminante è possibile mappare la sua geometria, nel suolo e anche nella falda.

Nel caso specifico della base di Decimomannu, le prove LIF sono state eseguite dalla ditta Fugro Germany Land GmbH, con l'impiego del sistema UVOST® (Ultra Violet Optical Screening Tool), accoppiato ad un sistema CPT (Cone Penetration Testing) che oltre a misurare i parametri del terreno permette al sistema laser di entrare a contatto col contaminante. Inserito nel terreno l'UVOST® è stato cablato per emettere radiazioni luminose con lunghezza d'onda di 308 nm e ha permesso di identificare la contaminazione.

<https://www.fugro.com/de/informationen-zu-fugro/standorte/europa/deutschland>

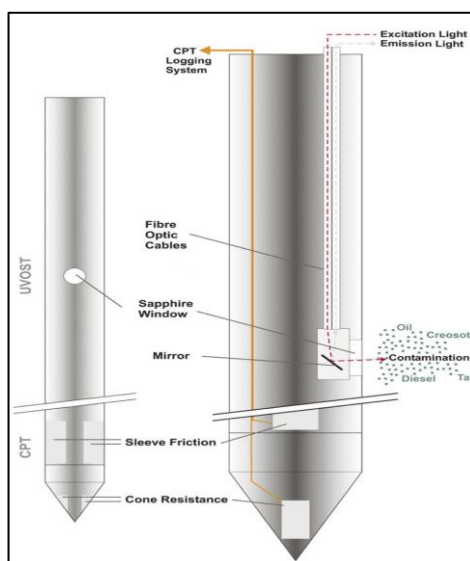


Figura 28: Sistema UVOST® accoppiato a CPT (<https://www.fugro.com/de/informationen-zu-fugro/standorte/europa/deutschland>).

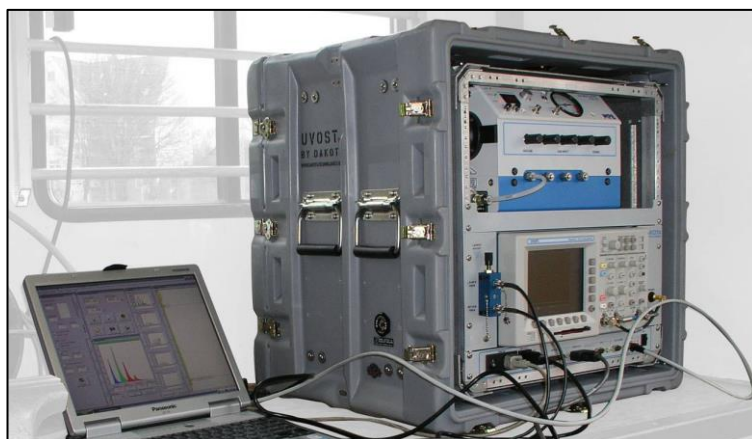


Figura 29: Strumentazione UVOST® (<https://www.fugro.com/de/informationen-zu-fugro/standorte/europa/deutschland>).

Capitolo 3

3.1 Indagini adottate sul sito di Decimomannu

Per identificare la contaminazione, sono state realizzate misure di tomografia elettrica (ERT), elettromagnetiche (EM), polarizzazione indotta (PI), test di iniezione tramite misure di tomografia elettrica in *time-lapse* e misure di fluorescenza indotta da laser (LIF), localizzate all'interno della base e nelle aree limitrofe ai confini meridionale e occidentale.

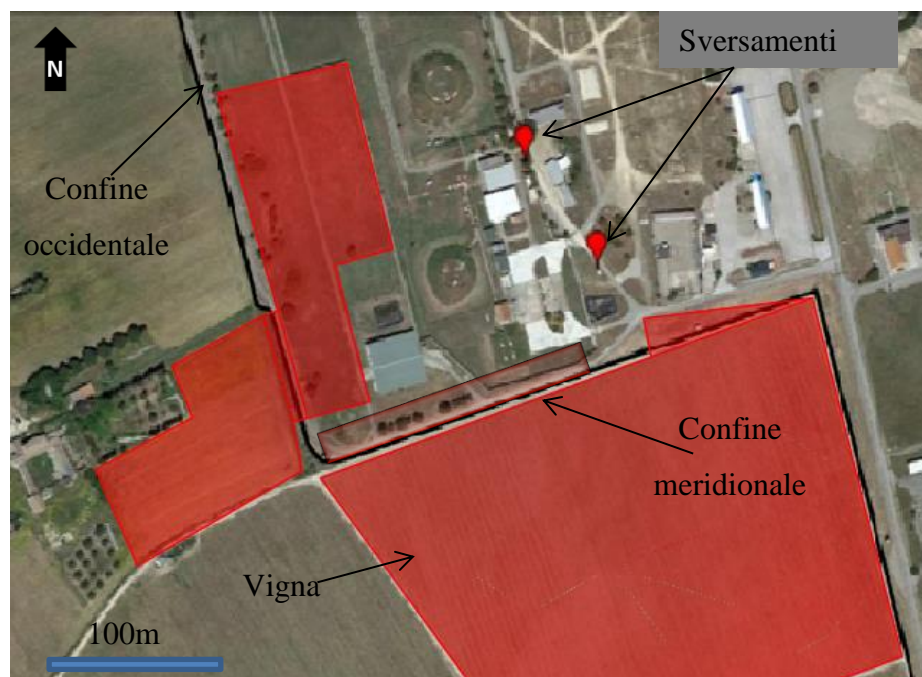


Figura 30: Aree investigate tramite tecniche geofisiche.

3.2 Strumentazione e configurazioni utilizzate

Prima di analizzare i risultati ottenuti attraverso le varie tecniche geofisiche utilizzate, andremo a vedere con quali strumenti e con quali configurazioni queste sono state realizzate.

Tomografia di resistività elettrica (ERT) e Polarizzazione indotta (PI): Per realizzare le misure ERT e PI è stato impiegato il resistivimetro IRIS Syscal Pro 72 della Iris Instrument, in dotazione al Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova. Lo strumento si connette agli elettrodi attraverso dei cavi multicanale ed è collegato ad una batteria per mantenerne la carica.

http://www.iris-instruments.com/Pdf_file/Syscal_pro_sw.pdf



Figura 31: Resistivimetro IRIS Syscal Pro 72 utilizzato per le misure ERT a Decimomannu.

Lo stendimento realizzato è costituito da 48 elettrodi di acciaio distanziati di 1m, inseriti nel terreno attraverso l'uso di un martello e collegati al cavo del

resistivimetro attraverso delle pinze a coccodrillo. La configurazione elettrodica utilizzata è quella *dipolo-dipolo* con skip 4.



Figura 32: Collegamento elettrodo-resistivimetro.

Per ogni stendimento realizzato sono state determinate le coordinate in UTM, del punto iniziale e finale utilizzando un GPS.



Figura 33: Determinazione delle coordinate del punto iniziale dello stendimento

Misure elettromagnetiche (EM): Per le misure EM è stato impiegato l'elettromagnetometro a induzione CMD Explorer della Gf Instruments, fornito dal Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova.

Sull'elettromagnetometro è stato montato sempre un GPS che consente di mappare l'area in cui vengono realizzate le misure.



Figura 34: Elettromagnetometro a induzione CMD Explorer della Gf Instruments utilizzato per le misure EM a Decimomannu.

Nel caso delle misure all'interno della vigna l'elettromagnetometro è stato montato su un carrello trasportabile, mentre per le misure nel campo posto a sud del confine occidentale della base lo strumento è stato direttamente imbracato all'esecutore della misura.

I test di iniezione tramite misura di tomografia elettrica in *time-lapse*, sono stati realizzati mediante l'iniezione di due tipi di traccianti reattivi, monitorate in diversi intervalli temporali, tramite misure di tomografia elettrica.

- 725 litri di soluzione acquosa al 5% di RegenOx®.
- 725 litri di soluzione acquosa al 5% di Petrocleanze® .

I due prodotti iniettati sono entrambi realizzati dalla ditta Regenesis (<https://regenesis.com/en/>) e vengono impiegati sia da traccianti, per valutare la risposta dell'acquifero a seguito di una perturbazione esterna, sia da agenti aggressivi nei confronti del contaminante organico, in quando generano reazioni controllate che tendono a eliminarlo.

I test sono stati realizzati sui pozzi PZ11, PZ15 e PZI con un tasso di iniezione non superiore ai 10 l/m, di conseguenza ciascuna fase di iniezione è stata distanziata di 2-3 ore. In base a ciò è stata effettuata una prova al giorno su ciascun pozzo. Per raggiungere la falda, posta in questa stagione ad una profondità di circa 6-9m, lo stendimento realizzato per la tomografia elettrica è identico a quello descritto in precedenza. Per i pozzi PZ11, PZ15, sono state realizzate rispettivamente la linea L1 e L2 orientate ortogonalmente alla direzione di deflusso principale, mentre, per il pozzo PZI sono state acquisite due linee, L3 ortogonale al flusso ed L4 circa parallela alla direzione di deflusso.

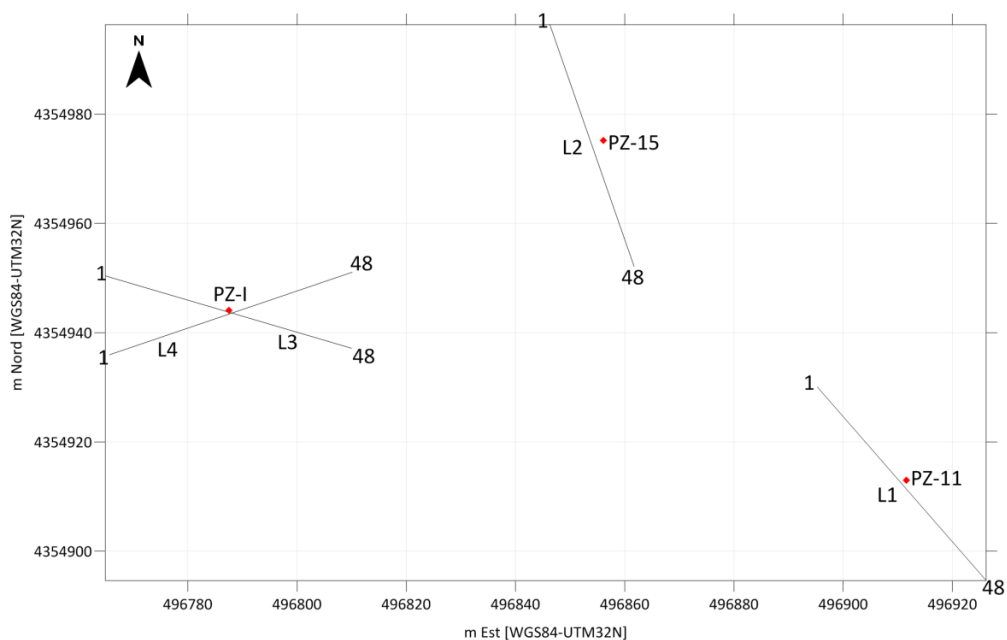


Figura 35: Orientamento delle linee di *time-lapse* realizzate sui pozzi PZ11, PZ15 e PZI, posti all'interno della base.

3.3 Cronoprogramma, ubicazione delle misure e risultati.

- **Settembre 2016**, misure di tomografia elettrica (ERT), realizzate a ridosso del confine meridionale del sito.

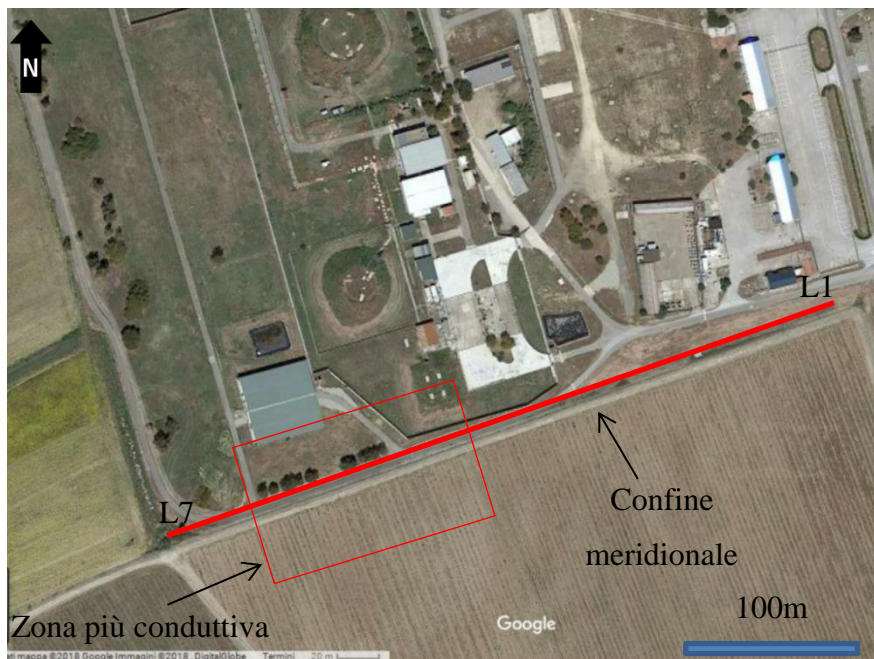


Figura 36: Sezione L1-L7 realizzata nel settembre 2016 lungo il confine meridionale della base militare di Decimomannu

La sezione L1-L7 è il risultato della sovrapposizione di sette sezioni di ERT.

A seguito dell'inversione dei dati e dell'elaborazione grafica è stata ottenuta la seguente sezione ERT.

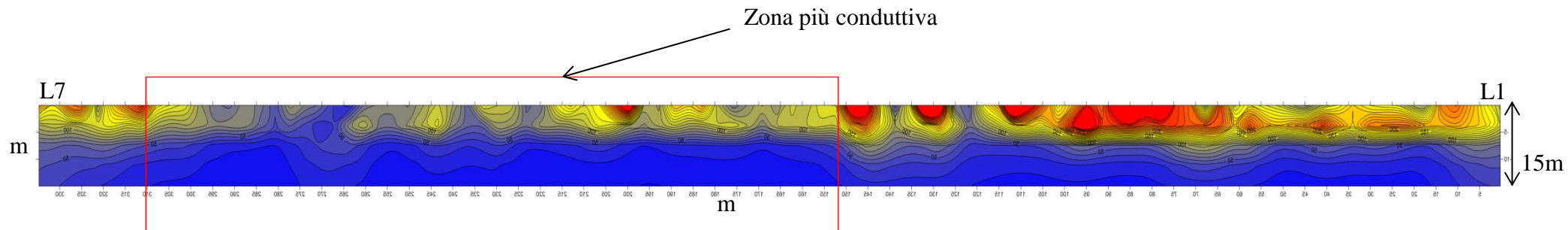


Figura 37: Sezione ERT L1-L7 realizzata lungo il confine meridionale della base militare di Decimomannu.



Resistività (Ωm)

Come è possibile notare dalla figura 37, la sezione L1-L7 evidenzia alti valori di conducibilità elettrica “ σ ”, a S-W del confine meridionale del sito, zona in cui è stata rilevata la presenza di idrocarburi nel sottosuolo (figura 3).

- **17 novembre 2016**, misure elettromagnetiche (EM) realizzate all'interno della base, lungo la parte interna del confine meridionale e occidentale e nella vigna.

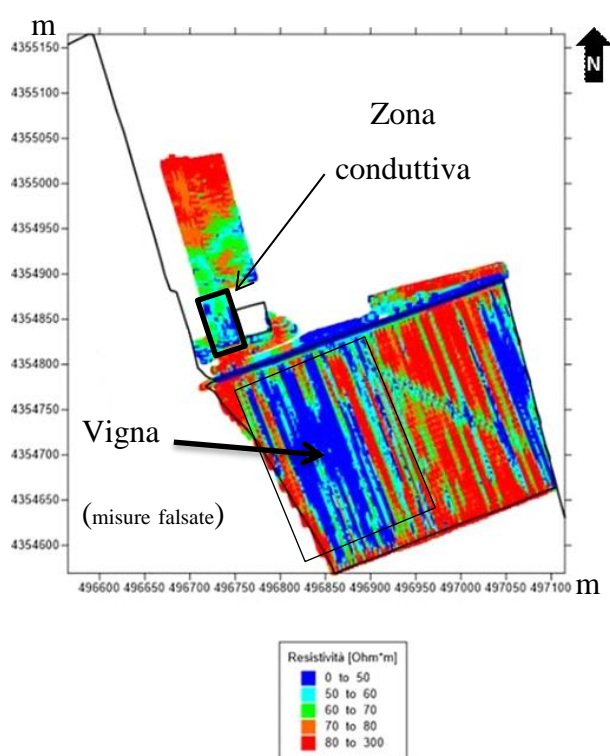


Figura 38: Risultati misure EM realizzate nelle zone interne ai confini e nella vigna.

Nell'area interna della base (zona delimitata in figura 38), le misure di EM hanno permesso di individuare una zona ad alta conducibilità.

Le misure EM realizzate nella vigna risultano essere falsate a causa della presenza di fili metallici utilizzati per il sostegno delle piante che mostrano un segnale altamente conduttivo.



Figura 39: Misure EM realizzate nella vigna con l'elettromagnetometro a induzione CMD Explorer.

- **21 febbraio 2017**, misure di tomografia elettrica (ERT), realizzate all'interno della vigna.

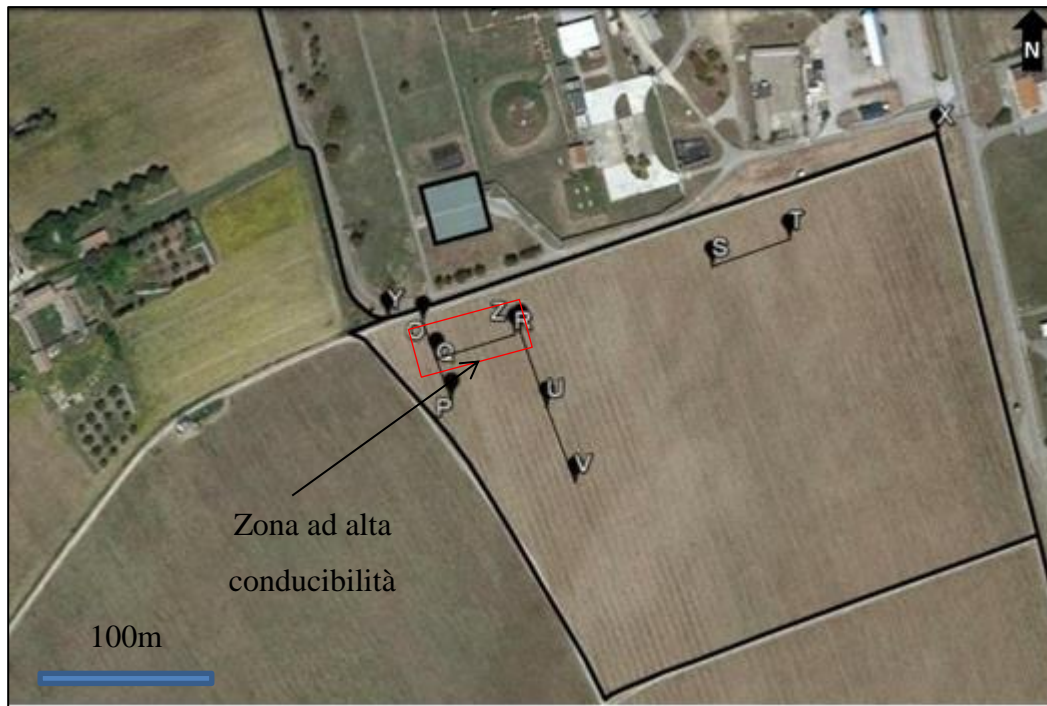


Figura 40: Ubicazione della sezioni di ERT realizzate il 21 febbraio 2017 .

A seguito dell'inversione dei dati e dell'elaborazione grafica sono state ottenute le seguenti sezioni ERT

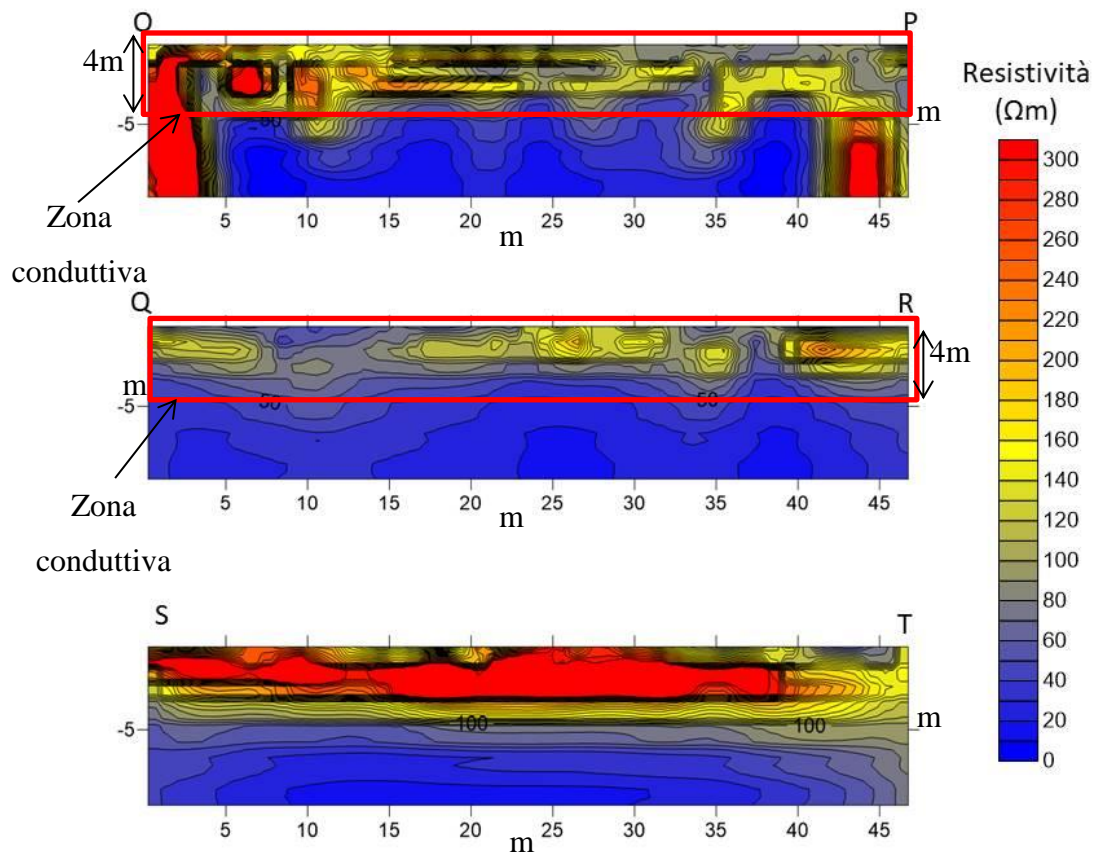


Figura 41: Sezioni ERT O-P, Q-R , S-T realizzate nella vigna.

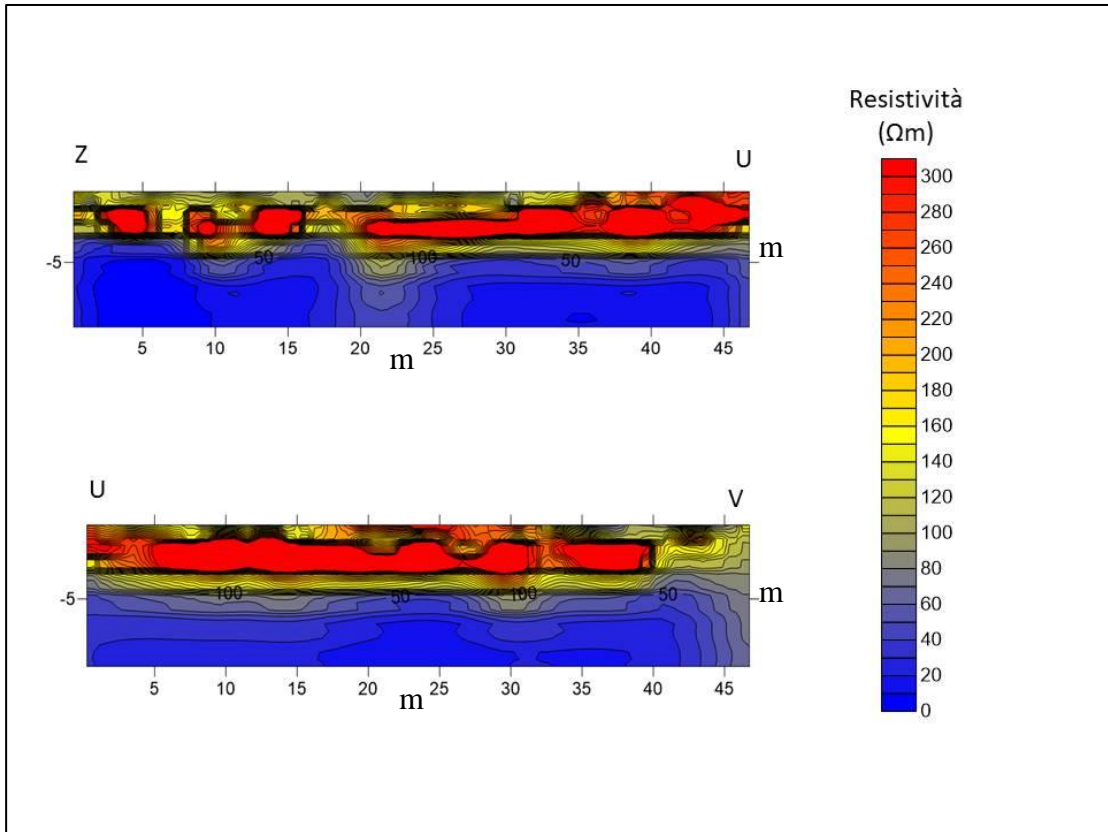


Figura 42: Sezioni ERT ZU, UV realizzate nella vigna.

Si nota un'unica zona conduttiva, che si spinge fino a circa 4m di profondità, evidenziata dai bassi valori di resistività delle sezioni Q-R e O-P. Questa zona conduttiva può essere associata a quella evidenziata anche nella sezione L1-L7 (figura 37)

- **12 aprile 2017**, misure di tomografia elettrica (ERT), ed elettromagnetiche (EM), realizzate all'interno della base (area interna che costeggia il confine occidentale) e all'esterno della base (immediatamente oltre il confine occidentale e orientale).



Figura 43: Ubicazione della sezioni di ERT realizzate il 16 aprile 2017

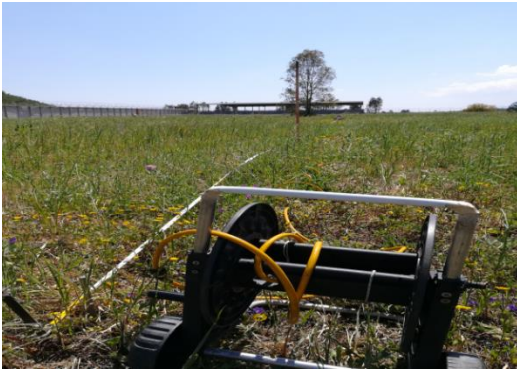


Figura 44: ERT realizzate all'interno della base



Figura 45: Misure ERT realizzate all'esterno della base.

Per quanto riguarda le misure di ERT realizzate all'interno della base, a seguito dell'inversione dei dati e dell'elaborazione grafica sono state ottenute le seguenti sezioni

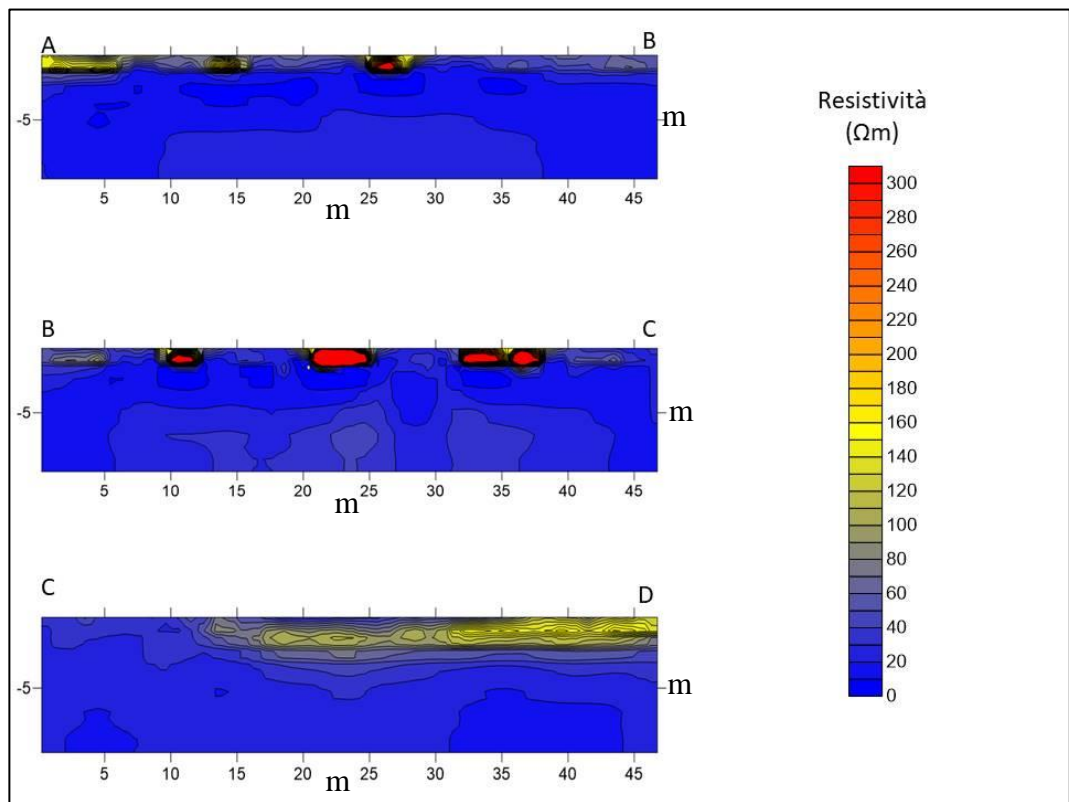


Figura 46: Sezioni ERT A-B, B-C, C-D realizzate all'interno della base.

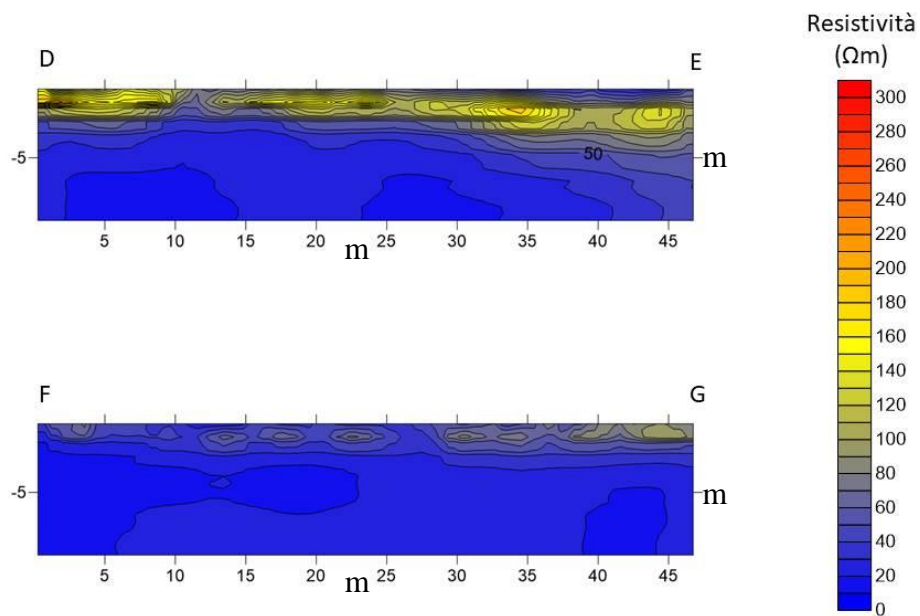


Figura 47: Sezioni ERT D-E, F-G realizzate all'interno della base.

Le sezioni interne A-B, B-C, C-D, D-E, ed F-G, mostrano tutte valori bassi di resistività e di conseguenza evidenziano un'altra area conduttiva (figura 43).

Le misure di ERT realizzate all'esterno della base, hanno prodotto le seguenti sezioni

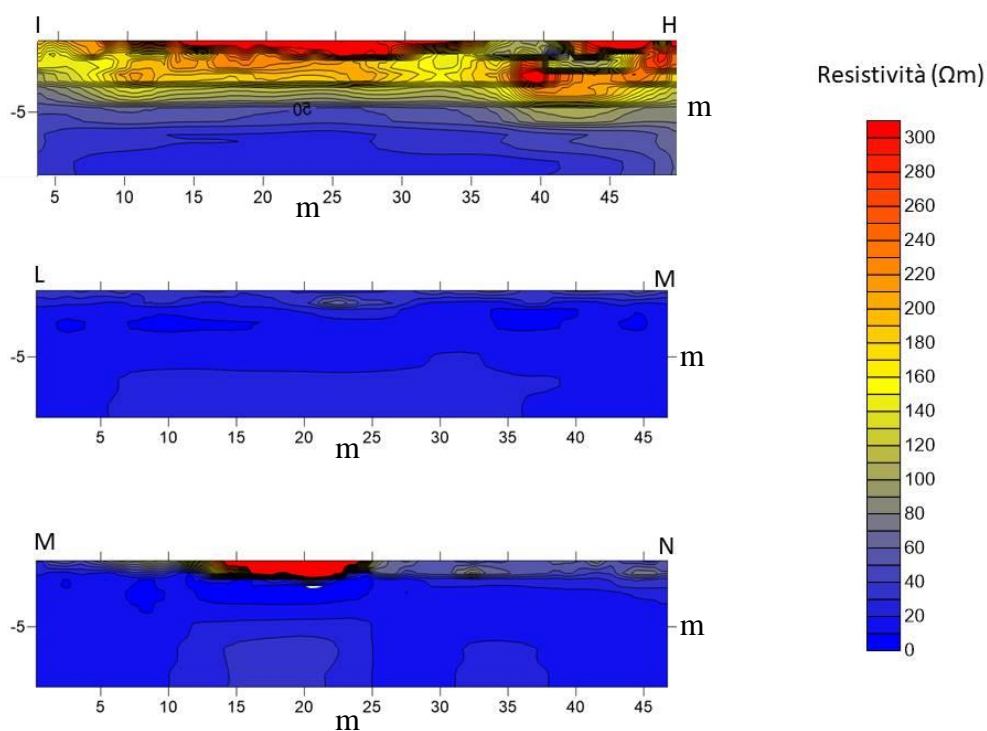


Figura 48: Sezioni ERT I-H, L-M, M-N, realizzate all'esterno della base.

Anche in questi casi, nelle sezioni L-M e M-N, si notano alti valori di conduttività in accordo con le sezioni realizzate all'interno della base.

Sempre nella stessa giornata sono state realizzate misure EM nel campo ubicato a S-W del confine occidentale.



Figura 49: Misure EM realizzate all'esterno della base.

Configurazione EM superficiale

Configurazione EM profonda

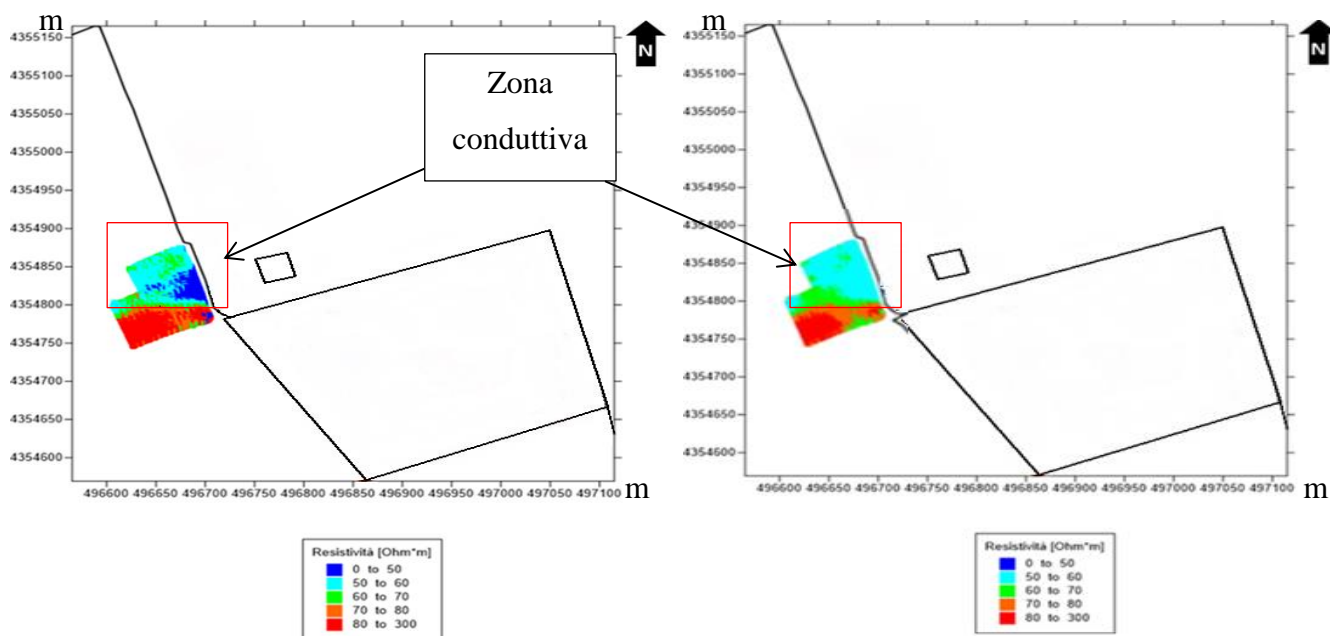


Figura 50: Misure EM realizzate a Decimomannu nel campo posto a S-W del confine occidentale

Anche in questo caso è possibile individuare un'area di alta conducibilità (figura 50), che può essere associata alle misure EM realizzate all'interno della base (figura 38).

- **30 novembre 2017**, prove di fluorescenza indotta da laser (LIF) realizzate all'interno della base.

Le indagini sono state eseguite all'interno della base e lungo i confini meridionale e occidentale. Le prove LIF ci danno un'idea della geometria della contaminazione sia in superficie che in profondità.

- **18 gennaio 2018**, indagini di polarizzazione indotta (PI), realizzate su due sezioni di ERT poste a sud del confine meridionale della base.

Le PI sono state realizzate sulle sezioni ERT, Q-R e S-T poste all'interno della vigna.

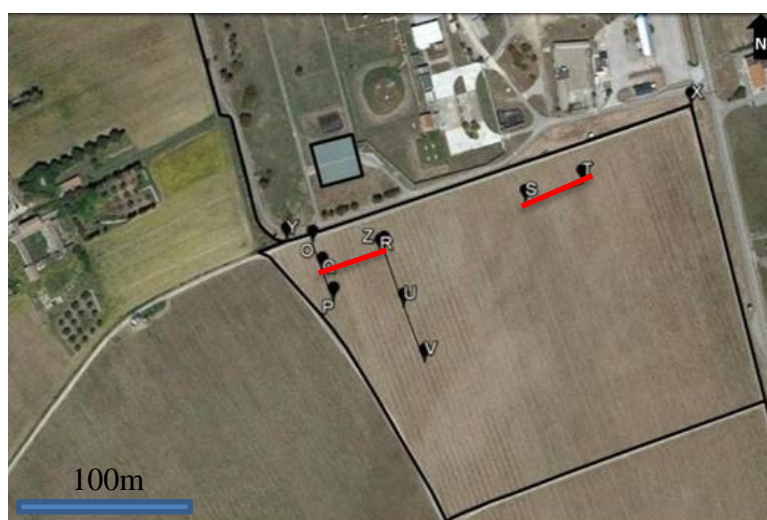


Figura 51: Sezioni ERT sulle quali sono state realizzate misure di PI.

Di seguito vengono riportate le sezioni di PI, ottenute attraverso l'inversione col software RES2DINV .

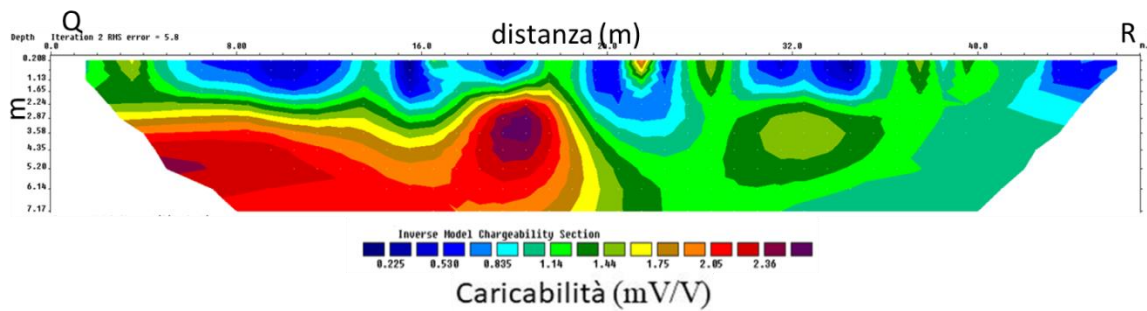


Figura 52: Sezione Q-R di polarizzazione indotta (PI).

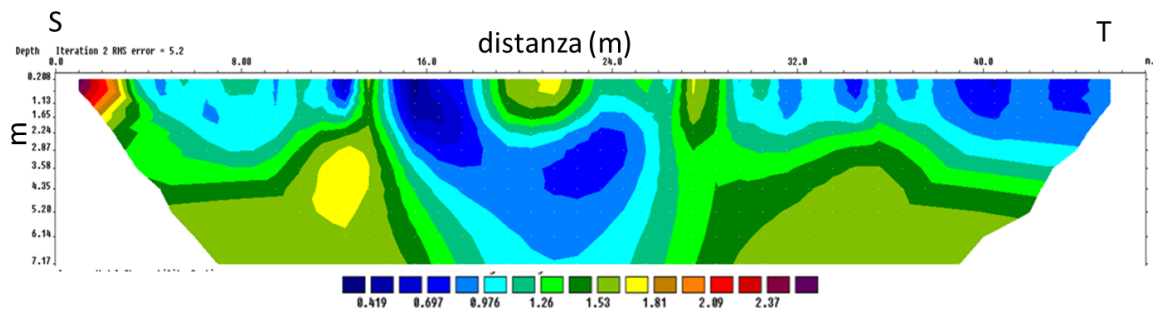


Figura 53: Sezione S-T di polarizzazione indotta (PI).

Nella sezione Q-R si notano alti valori di caricabilità ad una profondità 4m che identificano quindi una zona più conduttiva, mentre la sezione S-T mostra bassi valori di caricabilità e quindi una zona più resistiva.

- **26-27-28 febbraio 2018**, test di iniezione tramite misure di tomografia elettrica (ERT) realizzati sui pozzi PZ11, PZ15 e PZI posti all'interno della base.



Figura 54: Ubicazione dei pozzi sui quali sono state realizzati i test di iniezione.

A seguito dell'inversione dei dati e dell'elaborazione grafica sono state ottenute le seguenti sezioni di tomografia elettrica

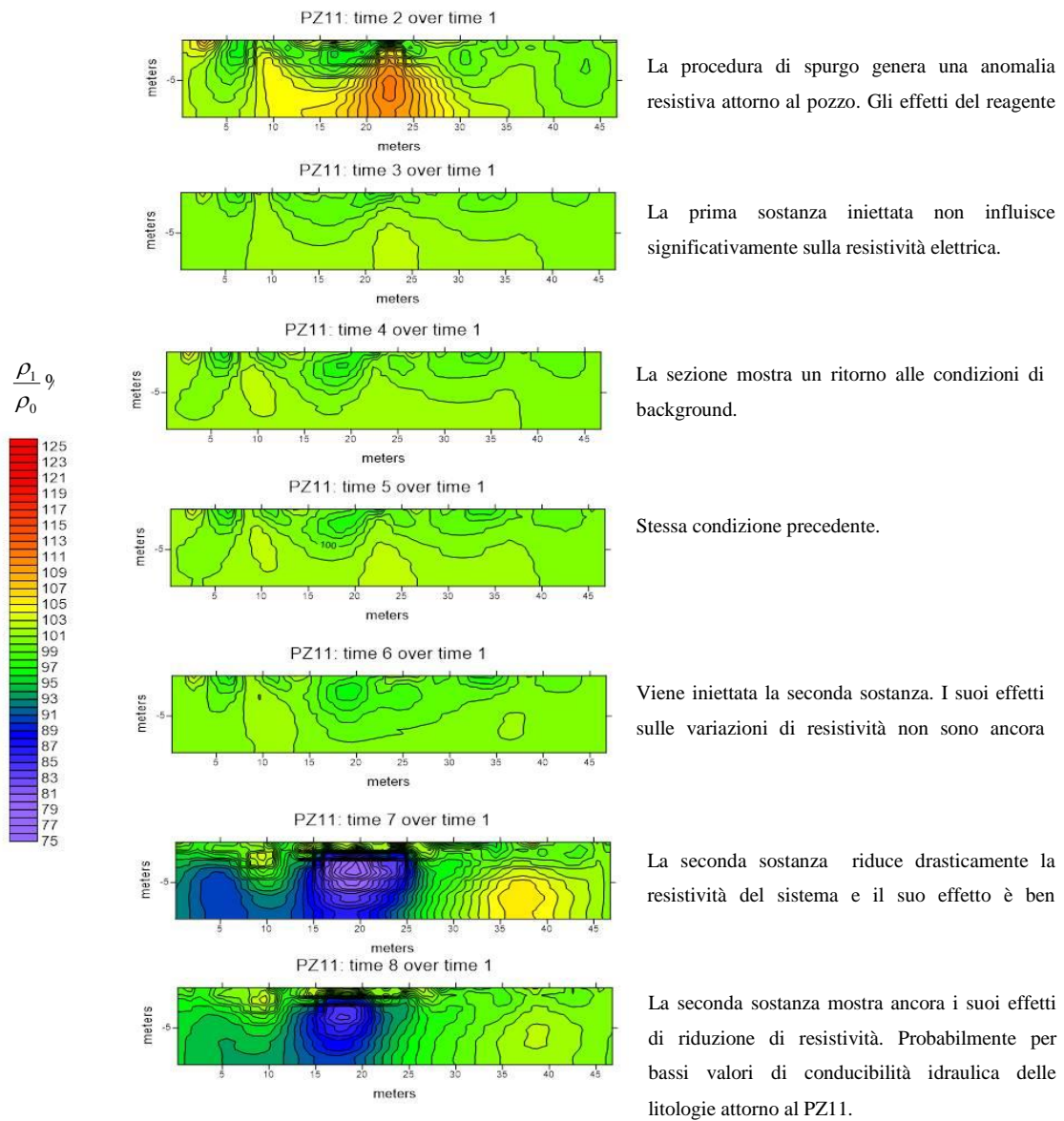


Figura 55: Linea L1 in time-lapse realizzata sul pozzo PZ11 con stendimento orientato ortogonalmente alla direzione di deflusso principale.

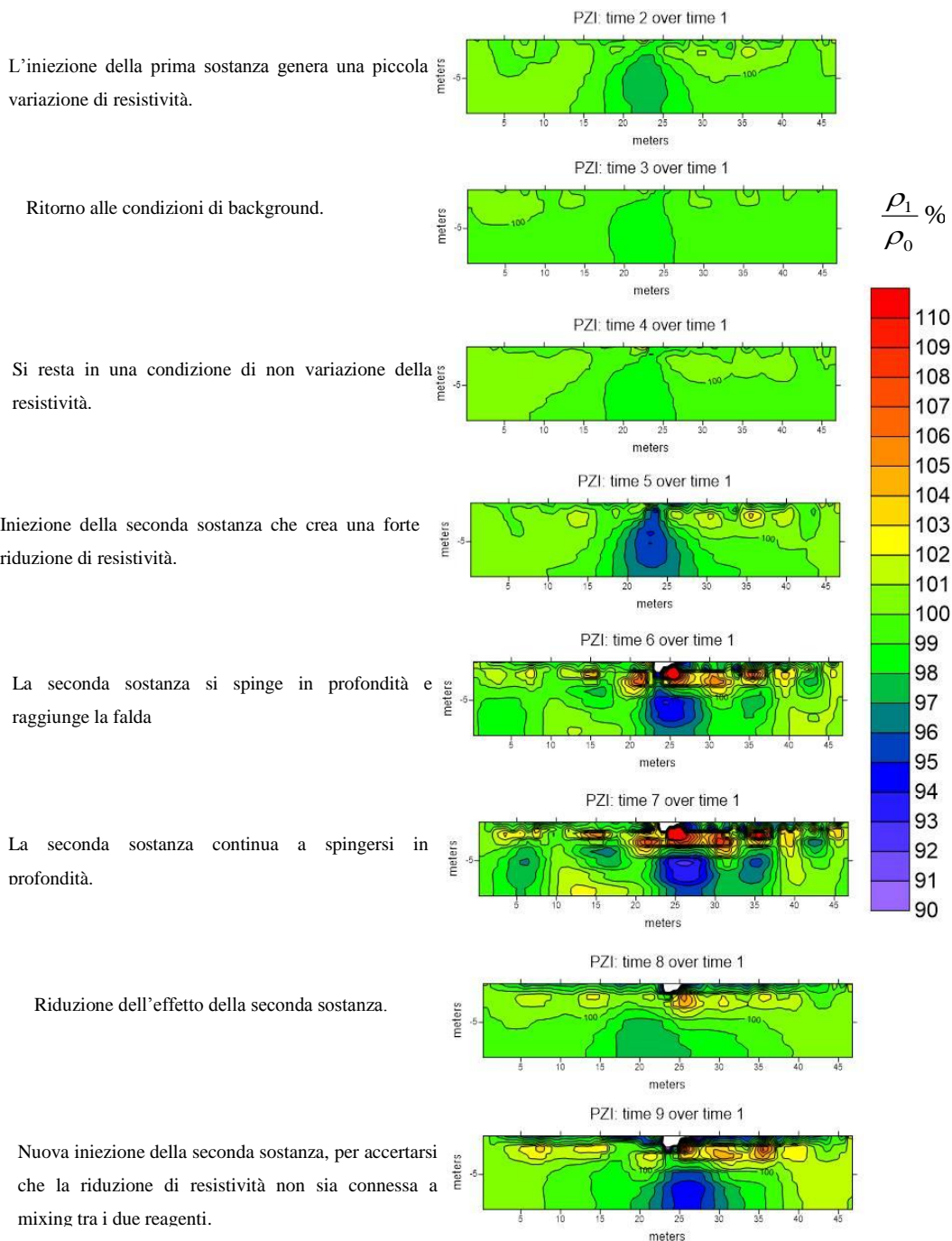


Figura 56: Linea L3 in time-lapse realizzata sul pozzo PZI con stendimento orientato ortogonalmente alla direzione di deflusso principale.

Le misure in *time-lapse* mostrano in maniera molto chiara i due prodotti iniettati e la loro evoluzione temporale e spaziale.

Capitolo 4

4.1 Confronto tra le misure

Per ottenere informazioni che ci permettano di individuare la contaminazione nel sottosuolo, è necessario andare a confrontare i risultati ottenuti dalle indagini geofisiche e dalle prove in sito.

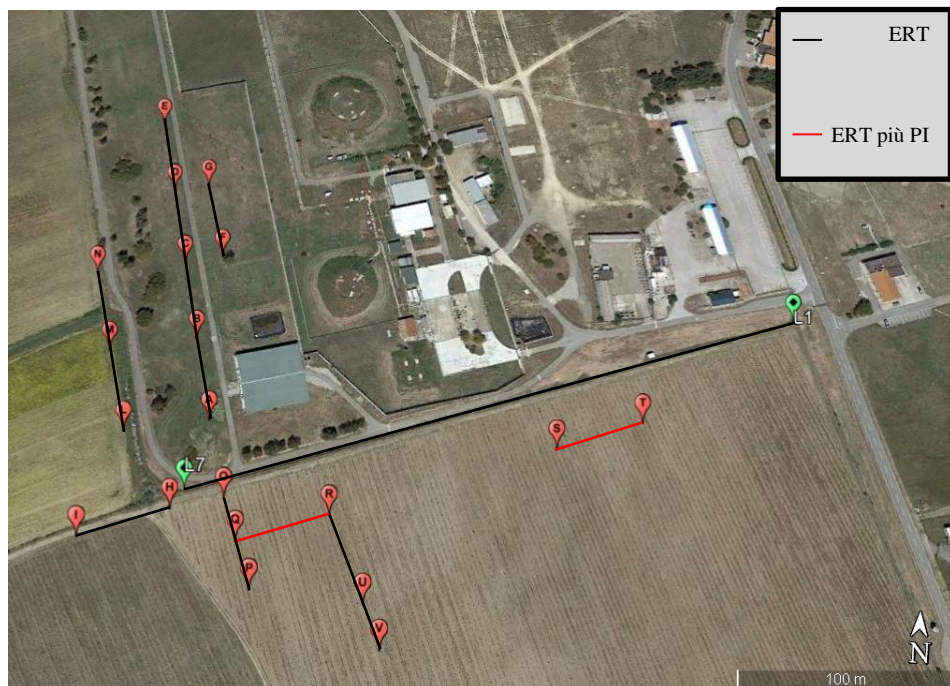


Figura 57: Ubicazione di tutte le misure di ERT realizzate nel sito in esame

Per confrontare in maniera immediata tutte le misure di **tomografia elettrica** realizzate nella base militare di Decimomannu è stato realizzato un modello 3D delle sezioni ERT. Per fare ciò è stato utilizzato il software Voxler 1.0 della Golden software, inc (<http://www.goldensoftware.com/products/voxler>), che permette di realizzare modelli tridimensionali di dati costituiti da più componenti. Nel programma sono state inseriti i valori di distribuzione di resistività reale “ ρ ” ottenuti con l’inversione dei dati, i valori di profondità alla quale sono state realizzate le misure, e i valori delle coordinate di ogni nodo della griglia di inversione, che sono stati ricavati con opportune formule.

X	Y	Z	Resistivity	log10(resis)
496751.9	4354784	-0.13908	157.82	2.198
496751.9	4354784	-0.43116	157.82	2.198
496751.9	4354784	-0.75244	168.636	2.227
496751.9	4354784	-1.10585	168.636	2.227
496751.9	4354784	-1.4946	264.97	2.423
496751.9	4354784	-1.92223	264.97	2.423
496751.9	4354784	-2.39262	305.355	2.485
496751.9	4354784	-2.91004	305.355	2.485
496751.9	4354784	-3.47921	308.397	2.489
496751.9	4354784	-4.1053	308.397	2.489
496751.9	4354784	-4.794	319.142	2.504
496751.9	4354784	-5.55157	319.142	2.504
496751.9	4354784	-6.38489	311.618	2.494
496751.9	4354784	-7.30154	311.618	2.494
496751.9	4354784	-8.30986	267.062	2.427
496751.9	4354784	-9.41902	267.062	2.427
496752	4354784	-0.13908	157.82	2.198
496752	4354784	-0.43116	157.82	2.198
496752	4354784	-0.75244	168.636	2.227

Tabella 9: Esempio di dati inseriti nel software Voxler 1.0 per realizzare un modello 3D delle sezioni di tomografia elettrica

A seguito dell'elaborazione grafica sono stati ottenuti i seguenti modelli 3D delle sezioni di tomografia elettrica

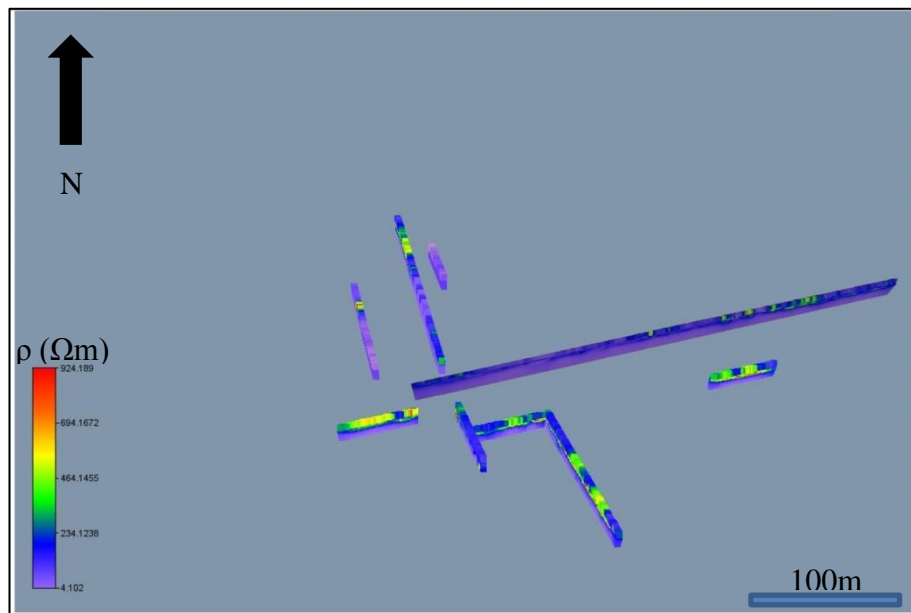


Figura 58: Modello 3D delle sezioni ERT, vista meridionale.

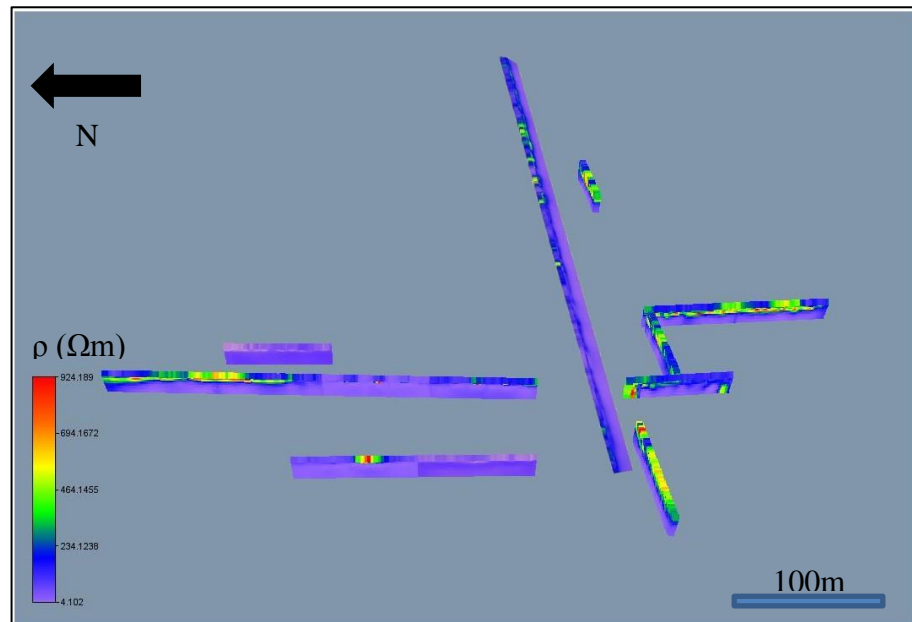


Figura 59: Modello 3D delle sezioni ERT, vista occidentale.

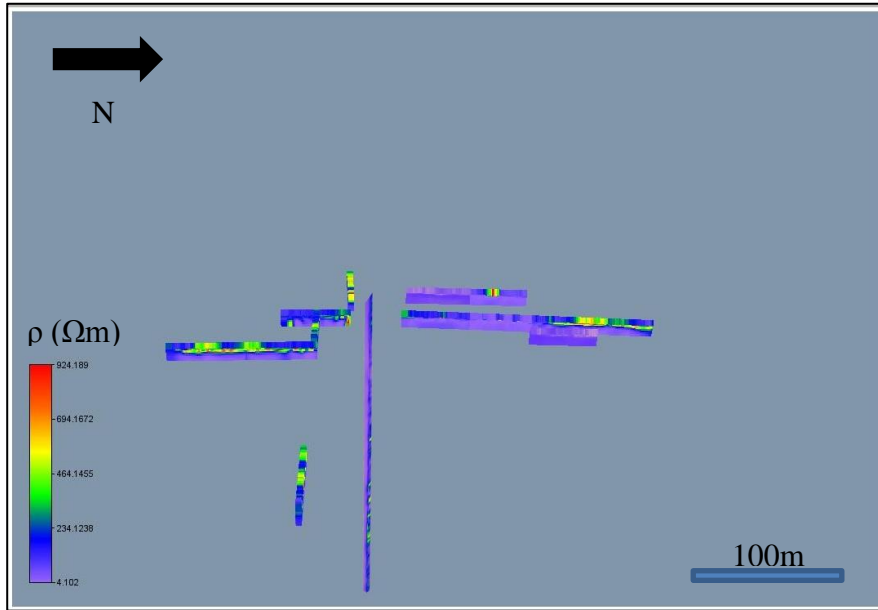


Figura 60: Modello 3D delle sezioni ERT, vista orientale.

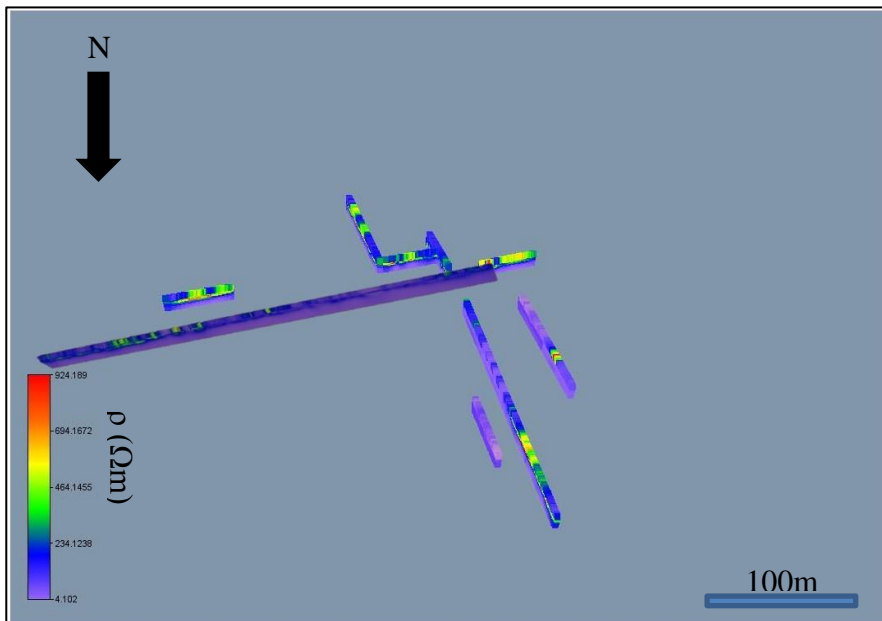


Figura 61: Modello 3D delle sezioni ERT, vista settentrionale.

In questo modo è stato possibile fare un resoconto delle aree ad alta conducibilità individuate con la tomografia di resistività elettrica per comprendere la presenza della contaminazione

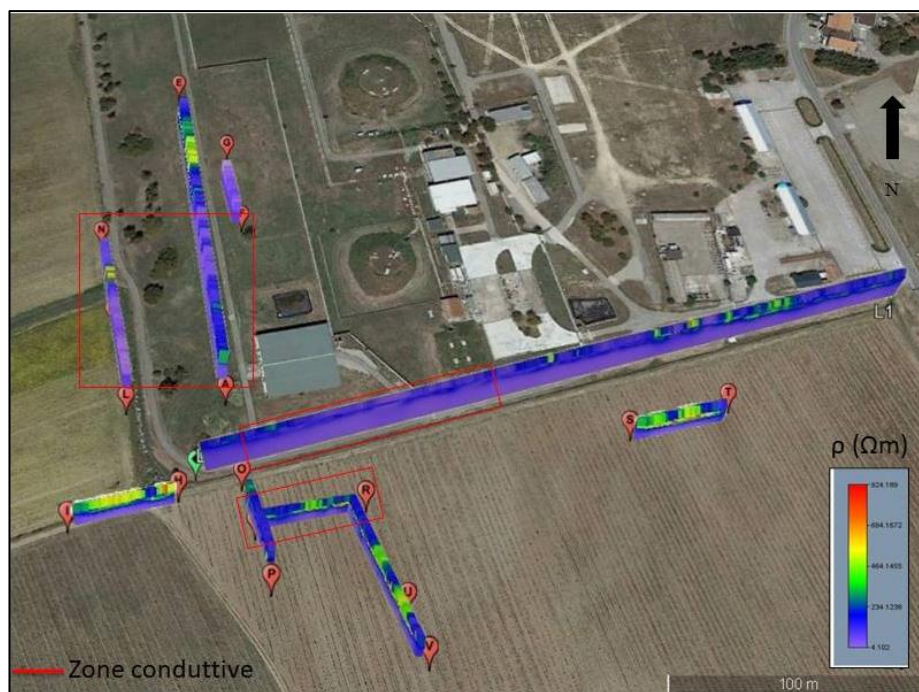


Figura 62: Aree ad alta conducibilità individuate con le indagini ERT.

Anche le misure **elettromagnetiche** hanno permesso di identificare zone conduttive che si sovrappongono a quelle individuate con la tomografia elettrica e rafforzano la nostra ipotesi di presenza della contaminazione.

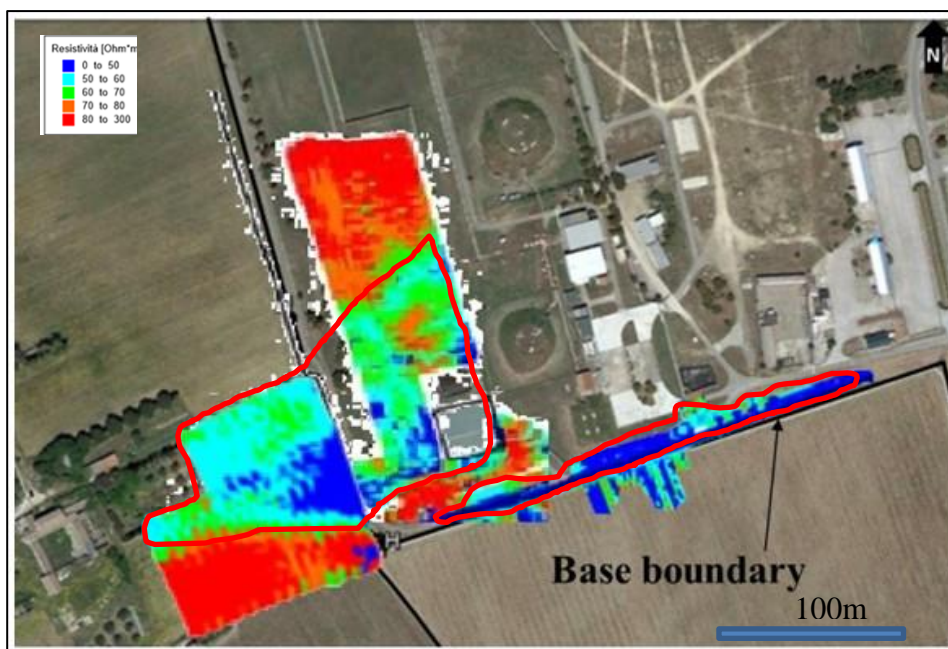


Figura 63: Aree ad alta conducibilità individuate con indagini EM.

Per quanto riguarda le misure di polarizzazione indotta, queste sono state confrontate con le rispettive sezioni ERT sulle quali sono state realizzate

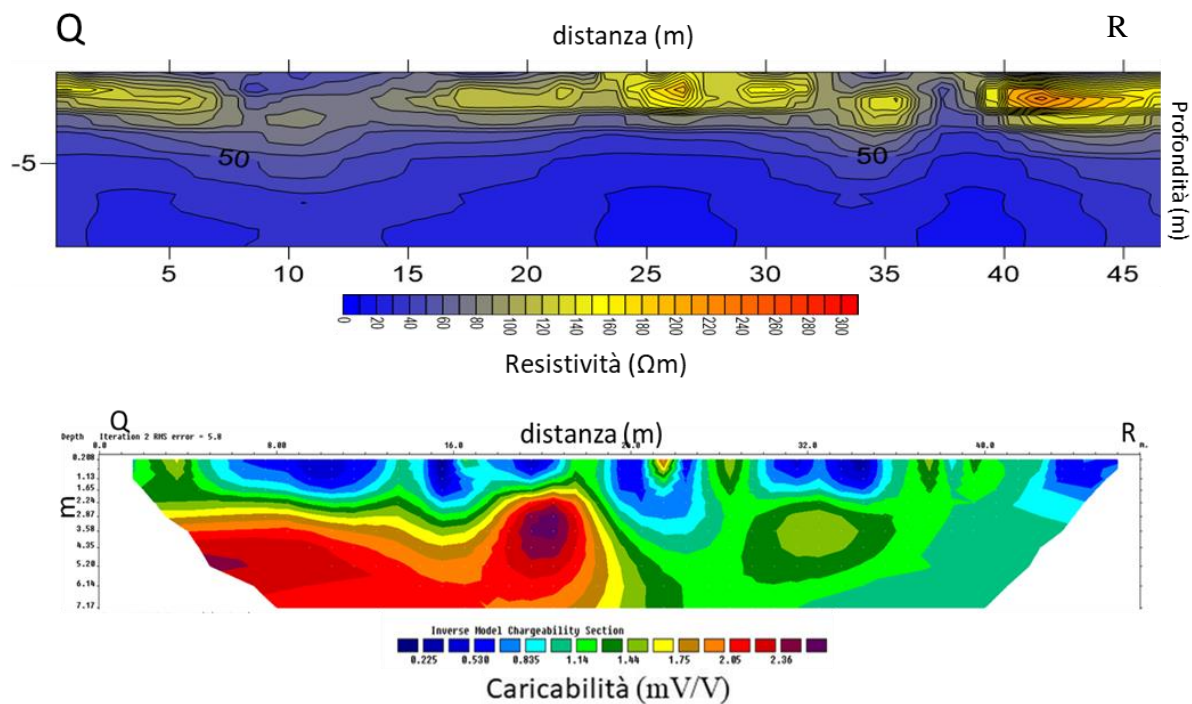


Figura 64: Confronto tra sezione Q-R di polarizzazione indotta e sezione Q-R di tomografia elettrica.

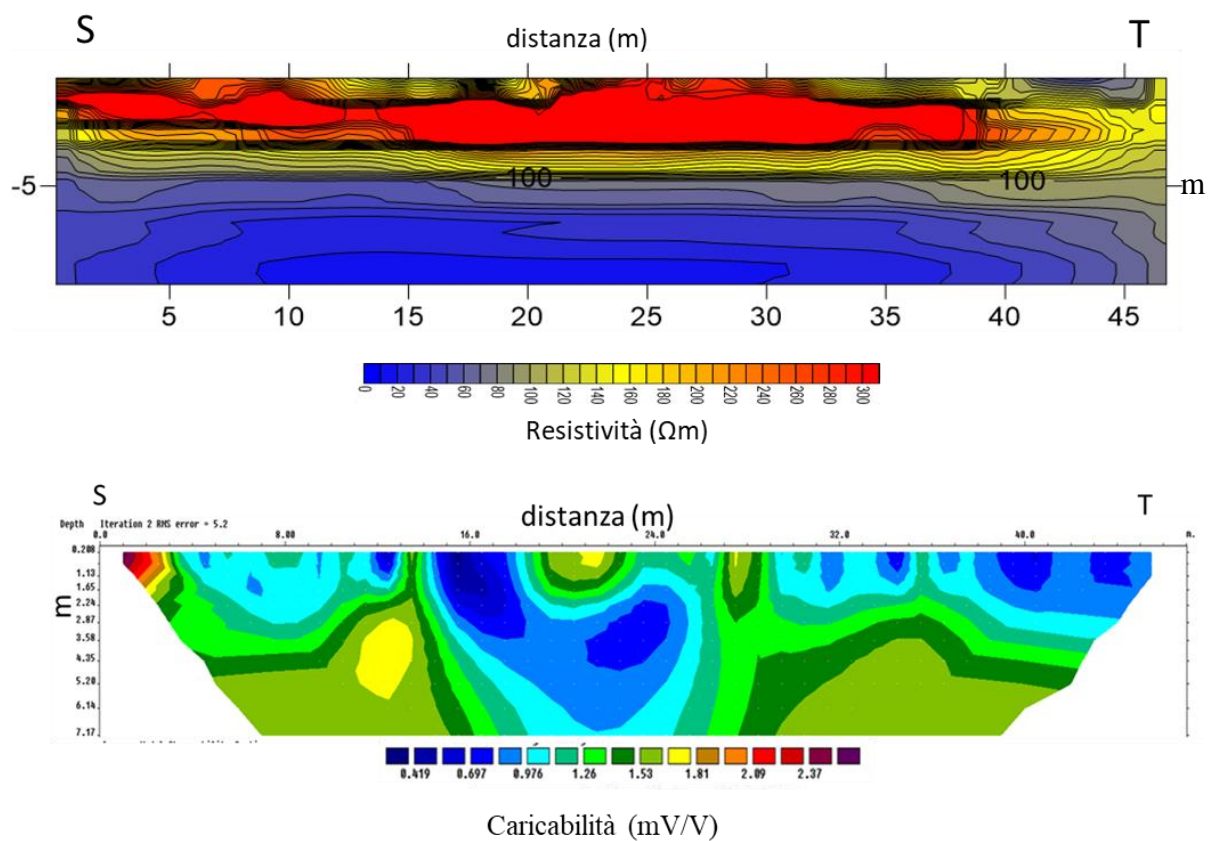


Figura 65: Confronto tra sezione S-T di polarizzazione indotta e sezione S-T di tomografia elettrica.

La sezione Q-T di PI, mostra alti valori di caricabilità che corrispondono, in profondità, con gli alti valori di conduttività della sezione ERT Q-T e ci indicano quindi la probabile presenza del contaminante. Nella sezione S-T i valori di caricabilità sono bassi, in accordo con i bassi valori di conduttività elettrica della sezione ERT.

Anche i dati di **fluorescenza indotta da laser** sono stati confrontati con quelli delle misure geofisiche e mostrano una buona sovrapposizione con le aree ad alta conduttività.

I test di iniezione tramite misure di tomografia elettrica (ERT) in time-lapse, ci hanno permesso di monitorare la risposta dell'acquifero nel momento in cui questo viene attraversato da un agente conduttivo

Le sezioni ERT in time-lapse mostrano chiaramente i prodotti conduttivi iniettati nel terreno e ci permettono di seguirne l'evoluzione nel tempo e nello spazio.

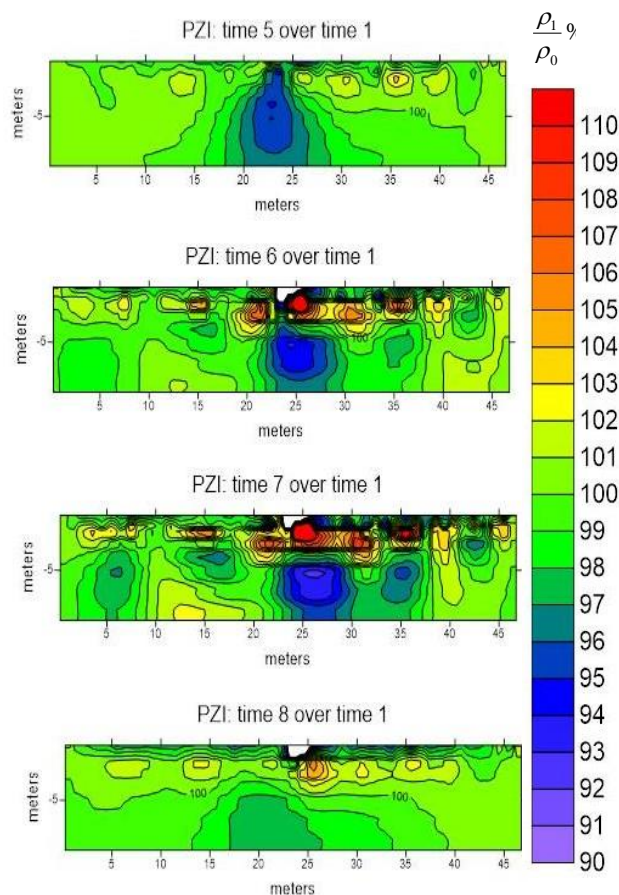


Figura 66: Sezioni ERT in time-lapse realizzate sul pozzo PZI che vanno dal time 5 al time 8.

Come possiamo notare dalla figura sopra illustrata, la misura in time-lapse mostra chiaramente l'iniezione del prodotto (time 5), la sua propagazione in profondità (time 6) e il ritorno ad una condizione di background in seguito al suo passaggio (time 8). I risultati ottenuti con queste misure ci danno una maggiore conferma dell'accuratezza del dato geofisico ottenuto con le tecniche viste precedentemente.

In base al confronto tra dati geofisici è stato possibile individuare due aree ad alta conduttività, una posta nella zona occidentale e l'altra posta a ridosso del confine meridionale e poco più a sud di questo. Per poter stabilire la presenza del contaminante è necessario confrontare questi con quelli geologici e idrogeologici ottenuti con le indagini classiche.

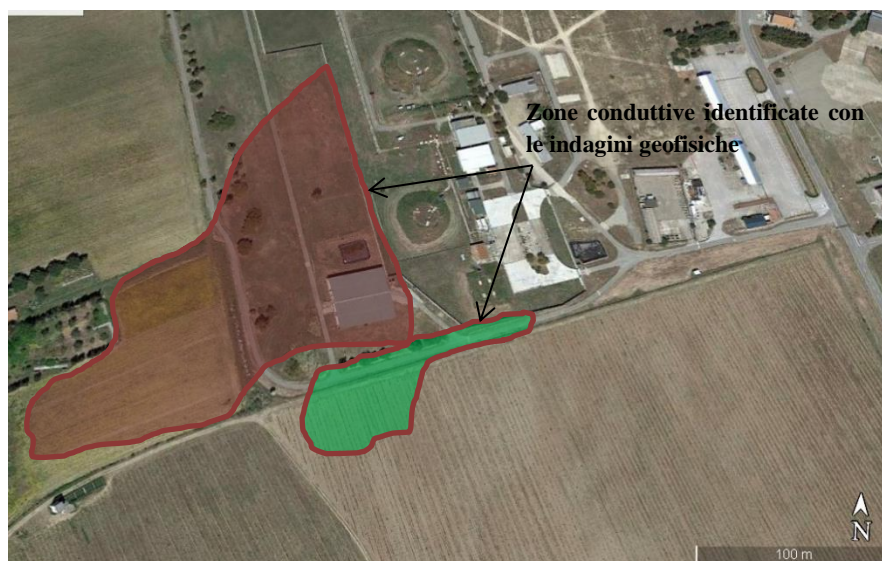


Figura 67: Zone conduttive identificate con le indagini geofisiche.

Conclusioni

Gli studi descritti in questo lavoro sono finalizzati all'individuazione della contaminazione da idrocarburi localizzata nel sottosuolo della base aerea NATO di Decimomannu (CA), a seguito degli sversamenti verificatisi negli anni 2007, 2009 e 2010.

Per perseguire questo obiettivo è stata istituita una campagna di investigazione tramite misure geofisiche non invasive, che si affianca all'indagine puntuale, in sito, tradizionale. Le tecniche geofisiche impiegate sono la tomografia di resistività elettrica (ERT), l'indagine elettromagnetica (EM), la polarizzazione indotta (PI) e test di iniezione monitorati tramite tomografia elettrica in *time-lapse* (vedi capitolo 2).

Il principale parametro rilevato con queste tecniche è la distribuzione di resistività elettrica “ ρ ”, che ci ha permesso di identificare zone conduttive (con bassa resistività) dovute all'attività dei batteri che biodegradano naturalmente il contaminante organico incrementando la conduttività elettrica del terreno tramite il rilascio di prodotti secondari (vedi capitolo 1).

Dal confronto tra i dati geofisici è stato possibile individuare due aree ad alta conduttività elettrica (vedi capitolo 4), situate nella zona occidentale del sito, lungo il confine meridionale e immediatamente a sud di questo (figura 67).

Per accertarci della presenza della contaminazione in queste aree, è stato necessario confrontare i dati geofisici con quelli geologici e idrogeologici delle misure puntuali tradizionali.

Solo grazie a questo confronto è stato possibile appurare che gli alti valori di conducibilità elettrica individuati nella **zona occidentale** del sito, non risultano

connessi alla contaminazione, ma alla presenza dell'orizzonte delle **argille nocciola** che in questa area risulta essere prossimo al piano campagna (figura 19).

Lungo il **confine meridionale e a sud di questo** le misure ERT, EM, e PI evidenziano tutte un area ad alta conduttività (figure 62-63-64), situata nell'orizzonte delle ghiaie recenti e cioè litologie ad alta permeabilità che rappresentano una zona di transito preferenziale per le acque sotterranee e, di conseguenza, per la contaminazione. In base a queste evidenze geologiche, idrogeologiche e geofisiche abbiamo **appurato la presenza di contaminante in questa area.**

L'efficacia delle tecniche geofisiche per l'individuazione nel sottosuolo di contaminanti organici, è stata confermata ulteriormente dai test di iniezione monitorati mediante tomografia elettrica in *time-lapse*, di fatto, le sezioni ERT ottenute hanno permesso di distinguere perfettamente i due prodotti immessi nel terreno (figure 55 e 56).

In conclusione, considerando l'estensione areale del dato fornito e la rapidità con la quale si realizzano, le tecniche geofisiche non invasive rappresentano uno strumento di grande efficienza per l'individuazione di contaminanti organici nel sottosuolo, tuttavia per interpretarne adeguatamente i dati è di fondamentale importanza confrontarli con quelli geologici e idrogeologici ottenuti attraverso le classiche tecniche di indagine puntuale.

Bibliografia

- Carmignani, Conti P., Funedda A., Oggiano G., Pasci S. «Geologia della Sardegna.» Geological Field Trips 2012: 104.
- Cassiani G., Binley A., Kemna A., Werher M., Orozco A. F., Deiana R., Boaga J., Rossi M., Dietrich P., Werban U., Zschornack L., Godio A., Gandomi J.A., Deidda G.P., «Noninvasive characterization of the Trecate (Italy) crude-oil contaminated site: links between contamination and geophysical signals.» Environ Sci Pollut Res DOI 10.1007/s11356-014-2494-7 (2014).
- Cassiani G., Bruno V., Villa A., Fusi N., Binley A. M. «A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography.» Journal of Applied Geophysics (2006): 244-259.
- Costamagna L. G., Schafer A. «The Cixerri Fm (Middle Eocene-Early Oligocene): Analysis of a “Pyrenean” continental molassic system in southern Sardinia .» journal of Mediterranean Earth Sciences (2013): 41-44.
- «Decreto Legislativo 152/2006 parte IV titolo V .» s.d.
- G., Soldoveri M. «Ottimizzazione in acquisizione e ricostruzione 3D per problematiche ambientali e archeologiche.» Tesi di dottorato. Università degli studi di Napoli Federico II., 2015.
- GmbH, Fugro Germany Land. «Cagliari LIF-CPT investigation.» 2017.
- MAE, advanced geophysics instruments. «Guida operativa polarizzazione indotta.» 2017.
- «Modello concettuale definitivo base militare di Decimomannu.» 2013.

«Modifica MISE base militare Decimomannu.» 2014.

«Monitoraggio acque base militare Decimomannu.» 2015.

«Monitoraggio acque base militare di Decimomannu.» 2014.

Mulas M.G., Erbi G., Lascio P., Lorrari M., Ciabatti P., Da Pelo S., Puddu D., Staffa F. «Caratterizzazione, obiettivi e monitoraggio dei corpi idrici sotterranei della Sardegna.» 2010.

«Piano di caratterizzazione base militare di Decimomannu.» 2012.

Santarato G., Abu Zeid N., Brignardi S. LEZIONI DI GEOFISICA APPLICATA.
Libreria universitaria.it edizioni, 2015.

