

INDICE

Capitolo1	1
Introduzione	1
Capitolo 2	5
Caratteristiche del sito.....	5
2.1 Ambiente fisico.....	5
2.1.1. <i>Descrizione dei confini</i>	5
2.1.2 <i>Geologia e geomorfologia</i>	7
2.1.3 <i>Substrato pedogenetico e suolo</i>	10
2.2.1 <i>Sistema idrologico naturale del lago del Biviere</i>	14
2.2.2 <i>Caratterizzazione batimetrica del lago</i>	16
2.3.1 <i>Idrogeologia</i>	20
2.3.1.1 <i>Inquadramento generale</i>	20
2.3.1.2 <i>Sistema lacuale del Biviere di Gela</i>	23
Capitolo 3	35
Criticità e parametri ambientali della R.N.O	35
3.1 Qualità dell'ambiente lacustre e della foce del fiume Dirillo	35
3.1.1 <i>Localizzazione delle stazioni di monitoraggio</i>	35
3.1.2 <i>Caratteristiche idrochimiche ed ottiche istantanee</i>	37
3.1.3 <i>Comparto Acqua</i>	40
3.1.4 <i>Comparto Sedimento</i>	44
3.1.5 <i>Comparto Biologico</i>	45
3.1.6 <i>Qualità delle acque sotterranee</i>	63
Capitolo 4	69
Indagini geofisiche	69
4.1. Indagini geoelettriche.	69
4.2. Metodo della resistività.....	70
4.2.1. <i>Resistività dei terreni</i>	70
4.2.2. <i>Potenziali in mezzo omogeneo</i>	71
4.2.2.1. <i>Elettrodo di corrente singolo</i>	71

4.2.2.2. Quadripoli.....	73
4.3. Procedimenti di misura.....	75
4.3.1. Sondaggio elettrico verticale (SEV).	75
4.3.2. Profili di resistività.....	76
4.3.3. Interpretazione.....	76
4.4. La tomografia elettrica.....	77
4.5. Polarizzazione indotta.....	80
4.6. Strumentazione: M.A.E A 3000 E.	82
4.7. Cenni di teoria dell'inversione.....	86
Capitolo 5	90
Prospezioni geofisiche eseguite c/o Biviere di Gela	90
5.1. Premessa.....	91
5.2. Tomografia geoelettrica.....	92
5.3. Strumentazione utilizzata ed acquisizione dati.	93
5.4. Geometria d'acquisizione.	94
5.5 Software per la gestione e l'interpretazione dei dati.....	95
5.5.1 Il software RES2DINV.....	95
5.6 Matrici dei valori di resistività e caricabilità T.E.1	101
5.7 Matrici dei valori di resistività e caricabilità T.E.2	106
5.8 Risultati.....	110
5.9 Interpretazione dei risultati	112
Conclusioni	115
Ringraziamenti.....	117
Bibliografia.....	119

Capitolo1

Introduzione

La seguente tesi ha lo scopo di illustrare tecnologie non invasive finalizzate alla delimitazione di terreni contaminati da agenti inquinanti. La base teorica su cui si basa il seguente scritto, è che le proprietà fisico-chimiche dei terreni sottoposti ad agenti inquinanti sono nettamente differenti rispetto agli stessi terreni non inquinati.

E' uso comune caratterizzare le proprietà fisico chimiche dei terreni contaminati mediante prospezioni dirette (carotaggi, scavi di pozzetti, ecc...), volte alla raccolta di campioni rappresentativi delle eterogeneità del sottosuolo ed alla distribuzione dell'inquinamento. Tali dati, benché di elevata precisione, per il loro carattere puntuale, non consentono di definire l'esatta geometria della distribuzione degli inquinanti nel sottosuolo comportando spesso l'ampliamento ingiustificato dell'area d'intervento. Inoltre, bisogna considerare il carattere invasivo delle indagini indirette che comporta un inutile aggravio dei costi oltre che un notevole impatto sugli ecosistemi presenti.

Negli ultimi anni, grazie al continuo sviluppo di tecniche geofisiche applicate allo studio ambientale, sono state implementate tecniche che, a costi contenuti, permettano di delimitare le aree contaminate fornendo un'informazione proporzionale all'entità della contaminazione ed alla sua migrazione in profondità (immagine 2D e 3D). Le metodologie geofisiche, oltre ad essere assolutamente non invasive, permettono di misurare la distribuzione areale delle proprietà fisiche del sottosuolo (p. es.: resistività elettrica, polarizzabilità, densità, velocità delle onde sismiche, ...), spesso significativamente modificate dalla presenza di inquinanti. Alcune di queste metodologie sono in grado di rilevare le variazioni di alcuni parametri geofisici legati ad anomalie (geo) chimiche dovute a problematiche ambientali, quali quelle costituite dalla diffusione nel sottosuolo di fluidi inquinanti, nella maggior parte dei casi idrocarburi, solventi organici, oli pesanti, percolati di discariche RSU, ...etc.

Ad esempio la resistività elettrica (resistenza al passaggio della corrente elettrica di un volume cubico di lato unitario), misurata in sito in terreni che hanno interagito con

percolati, è significativamente più bassa rispetto ai valori misurati nella stessa formazione geologica “vergine”. Al contrario, quando i pori sono occupati da contaminanti organici, che in genere sono buoni isolanti, si osserva una diminuzione della conduttività elettrica (aumento della resistività).

Oltre alla misura della resistività del terreno è particolarmente interessante eseguire misure di caricabilità, in pratica le proprietà elettriche di tipo “capacitivo”, che si registrano al passaggio di una corrente elettrica nel sedimento. Essa rispecchia la presenza di meccanismi di accumulo delle cariche elettriche sulle superfici dei minerali costituenti il sedimento, che si comportano come pareti di microscopici condensatori. Ad esempio, i percolati, che sono caratterizzati da condizioni riducenti, presentano significative concentrazioni di solfuri insolubili che aumentano la caricabilità naturale del terreno, mentre i fluidi organici, che aderiscono alle pareti dei pori, ne annullano la proprietà di ritenere cationi inibendo la caricabilità naturale.

Da quanto detto, risulta possibile definire se un terreno è contaminato e la distribuzione areale di tale contaminazione mediante misure di resistività elettrica e di caricabilità, poichè i terreni naturali presentano valori di resistività e di caricabilità notevolmente differenti rispetto agli stessi contaminati.

La costruzione negli anni sessanta dello stabilimento petrolchimico di Gela ha portato alla città di Gela uno sviluppo e un'espansione della città incontrollato. La Città è divenuta da centro agricolo e commerciale, sito industriale.

Inizialmente la scarsa coscienza ambientale e la mancanza di legislazione ambientale ha fatto sì che il territorio venisse sfruttato in maniera esasperata, trasformando la Piana di Gela in una discarica per rifiuti di ogni tipo.

Questi fenomeni di abbandono dei rifiuti incontrollato e ancora non censito ha dato spunto alla mia tesi, infatti la tecnica della Tomografia potrebbe essere adatta al censimento di tali zone e successivamente alla loro bonifica.

Si deve infatti tenere conto che nella Piana di Gela è stato istituito nell'ambito della direttiva 92/43/CEE “Habitat” il SIC/ZPS “Biviere e Macconi di Gela” per una superficie di circa 2000 ha. All'interno dell'area SIC vi è il Biviere di Gela, che occupa una superficie di circa 250 ha, che è stato definito Zona Umida di Importanza

Internazionale (Ramsar 1985) con il D.M. 300/87 e che ha portato all'istituzione della Riserva Naturale Orientata (R.N.O.) DM 585/97.

La presenza della Riserva Naturale Orientata comporta una serie di limitazioni o prescrizioni di legge negli interventi che si possono effettuare, a tutela del delicato ecosistema della stessa.

La tomografia essendo una tecnica di sondaggio non invasiva permette di investigare in queste zone senza turbare il delicato equilibrio ambientale.

La metodologia adottata consiste nel confrontare le immagini elettriche e capacitive dei terreni contaminati con quelle dei terreni naturali vergini non contaminati ricavate attraverso le investigazioni geofisiche.

Da questo confronto scaturisce un modello georesistivo del sito contaminato, tale modello costituisce il riferimento con il quale dovranno essere confrontate le immagini elettroresistive dei terreni da investigare.

Il confronto deve avvenire fra terreni aventi le stesse caratteristiche litologiche.

Quindi si è proceduti nel lavoro andando a fare due allineamenti uno in una zona sicuramente contaminata, uno nella zona vergine.



Fig. 1.1 – Zona contaminata



Fig. 1.2 – Zona contaminata

La zona contaminata è stata scelta sulla base di informazioni inizialmente ricevute dalla memoria dell'uomo, poi verificate con metodi tradizionali, infine confermate dalla nostra indagine.

La zona non contaminata o vergine è stata scelta prendendo una sezione a valle di quella contaminata in cui a memoria d'uomo si aveva certezza che non vi fosse inquinamento, verificato dalla nostra indagine almeno per una parte, infatti nella parte finale dell'allineamento dai valori trovati ci siamo accorti che vi era la presenza di rifiuti, tra cui inerti.

Il confronto delle due sezioni aventi le stesse caratteristiche litologiche ci ha dato il nostro modello georesistivo, il quale potrebbe essere utilizzato per investigare all'interno della R.N.O andando a creare una maglia.

La presente tesi ha avuto lo scopo di evidenziare la possibilità di utilizzare tecniche non invasive per la individuazioni di terreni sottoposti a contaminazione.

Il vantaggio della tecnica geofisica proposta, oltre alla non invasività ed all'assoluto rispetto degli ecosistemi su cui opera, è quello che consente di investigare ampie porzioni territoriali con costi non eccessivi e di valutare le modifiche fisiche dei terreni sottoposti a contaminazione.

Capitolo 2

Caratteristiche del sito

2.1 Ambiente fisico

2.1.1. Descrizione dei confini

Il SIC/ZPS “Biviere e Macconi di Gela” è stato istituito nell’ambito della direttiva 92/43/CEE “Habitat”, con Codice Natura 2000: ITA050001 e direttiva 79/409/CEE “Uccelli”. Il limite dell’area SIC si identifica con quello della Zona Speciale di Conservazione (ZSC) all’interno della rete Natura 2000.

I riferimenti dell’area SIC/ZPS Biviere e Macconi di Gela sono pubblicati nella GURS del 15/12/2002, n.57. L’inserimento dell’area nell’ambito degli elenchi nazionali dei SIC è avvenuto con la pubblicazione del decreto del 3 aprile 2000 nella Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.65 del 22/04/2000.

L’area SIC si trova a circa 3,5 km ad Est della città di Gela, a partire dalla foce del fiume Gela e si estende fino alla foce del fiume Dirillo (o torrente Acate), con una fascia costiera di circa 6 Km ed una superficie di circa 2000 ha.

Amministrativamente ricade per il 90% circa nel comune di Gela prov. di Caltanissetta e per la restante porzione nel comune di Acate, provincia di Ragusa.

Essa è individuabile nei seguenti fogli della CTR della Regione Sicilia:

Sez. 643120

Sez. 643160

Sez. 644090

Sez. 644130

Sez. 647010

Elemento significativo dell'area SIC è il Biviere di Gela, il quale è distante 1.5 Km dal mare, al quale è collegato attraverso il F. Dirillo con un canale artificiale, ed occupa una superficie di circa 250 ha. Ha forma ellittica ed è orientato in direzione NW-SE. E' stato definito Zona Umida di Importanza Internazionale (Ramsar 1985) con il D.M. 300/87 che ha portato all'istituzione della Riserva Naturale Orientata (R.N.O.) DM 585/97. Il Biviere è stato, inoltre, inserito nella lista delle aree individuate con criteri IBA (cod. IBA 1989: IT149 "Biviere e Piana di Gela"), è soggetto a vincolo idrogeologico e a vincolo paesaggistico.

Il lago e buona parte dei terreni circostanti rientrano tra i beni demaniali (il 65% dell'area della Riserva), mentre la parte rimanente è di proprietà privata. La gestione della R.N.O. è affidata alla LIPU (Lega Italiana Protezione Uccelli). Nella figura 1.1 viene riportato il limite dell'area SIC/ZPS "Biviere e Macconi di Gela", con all'interno il limite della Riserva Naturale Orientata.

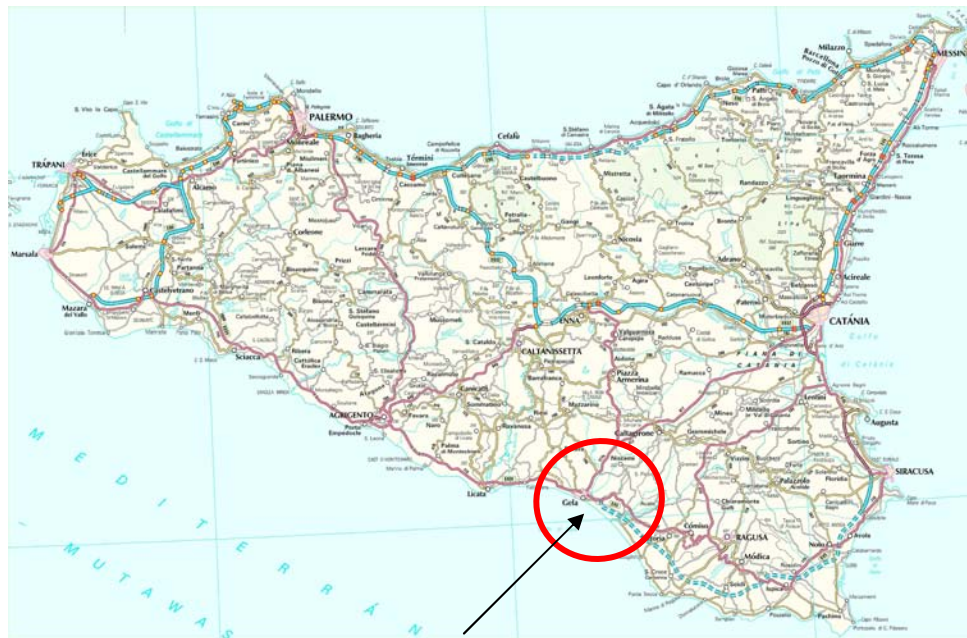


Fig. 2.1

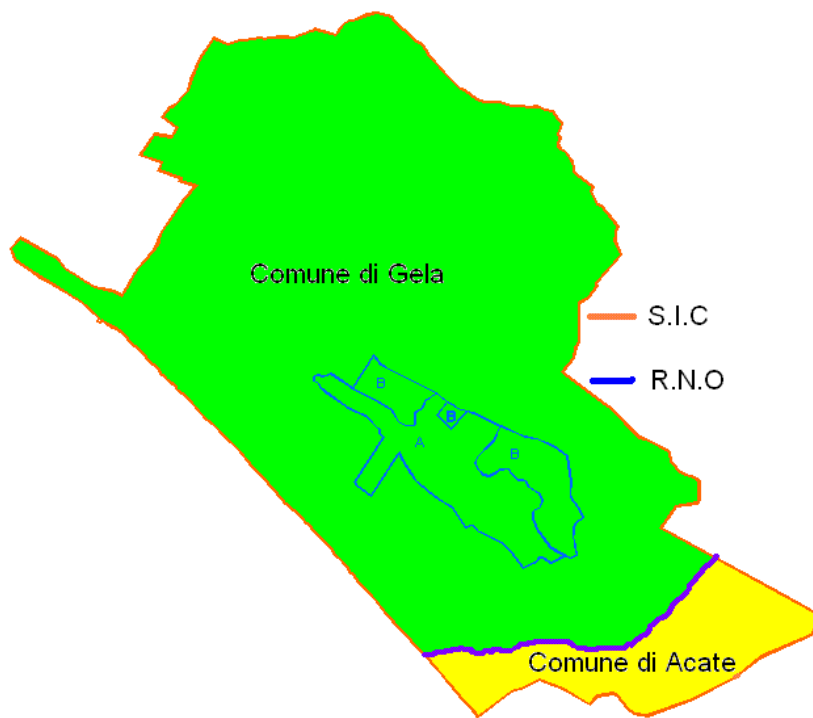


Fig. 2.2

2.1.2 Geologia e geomorfologia

Inquadramento generale

La convergenza tra la placca africana e quella europea ricade nella zona della Sicilia. Nei dintorni di Gela è rappresentata la convergenza tra la Catena Appenninico-Magrebide e l'avampaese Ibleo, parte più settentrionale dell'avampaese africano che si estende fino alla piana di Catania.

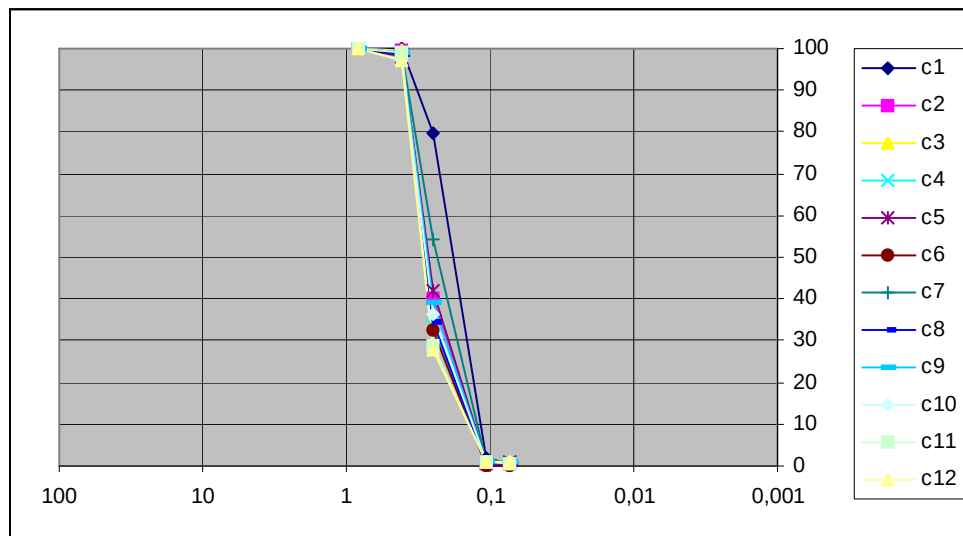
La zona di studio ricade nella piana di Gela al disotto della quale l'avampaese ha continuato ad approfondirsi ed è stato ricoperto tettonicamente dalla "Falda di Gela" con termini, molto tettonizzati, di età miocenica e pliocenica messi in posto, in questo tratto, tra il Pliocene ed il Pleistocene. La falda è infatti ricoperta da sedimenti argilloso-limosi-siltosi del Pleistocene, depositi che ricoprono un'ampia porzione di territorio compreso, sulla costa, da poco ad ovest di Gela fino a poco prima di Marina di Ragusa

ad est, mentre verso l'interno proseguono senza soluzione di continuità fino alla piana di Catania.

In questo contesto la zona SIC, Biviere e Macconi di Gela, ricade completamente nell'ambito della piana di Gela, caratterizzata principalmente dai depositi pleistocenici e da quelli continentali olocenici.

I litotipi presenti nell'ambito di studio sono quindi:

- Sabbie di spiaggia attuale: si tratta di sabbie fini sciolte, omogenee di colorazione giallastra. Dalle analisi granulometriche sono risultate molto omogenee e praticamente tutte con lo stesso fuso granulometrico che le ascrive alle sabbie fini.



(in ascissa le dimensioni dei granuli in mm; in ordinata le percentuali di passante)

Fig. 2.3

- Sabbie eoliche (*Olocene*): sono presenti lungo una fascia costiera che rappresenta la zona interessata dalla duna. Di colore giallastro ocraceo, lo spessore è di alcuni metri (al massimo una decina di metri). Lo spessore tende a diminuire andando da ovest verso est e dalla linea di costa verso l'interno.
- Alluvioni (*Olocene*): sono rappresentate da sabbie, limi ed argille giallastre e grigiastre, con intercalazioni di orizzonti ghiaiosi più frequenti alla base del deposito.

Lo spessore risulta variabile e generalmente compreso tra qualche metro sino a 20-30 m in corrispondenza delle principali valli. Le alluvioni comprendono depositi di natura fluviale, marina e lacustre.

- Alluvioni terrazzate (*olocene*): si tratta di depositi alluvionali altimetricamente disposti a quote più elevate rispetto ai precedenti, costituiti da limi siltosi e, a luoghi, da ghiaie eterometriche.

- Sabbie e calcareniti (*Pleistocene*): si sono deposte alla fine del ciclo regressivo sui depositi limosi sottostanti, anch'essi pleistocenici. La regressione, legata al progressivo sollevamento della zona costiera, ha determinato la deposizione di sedimenti sempre più grossolani verso l'alto e la formazione di spianate morfologiche leggermente vergenti verso mare. La facies evolve verso l'alto da calcareniti organogene medio-fini di colore giallastro ocreo a sabbie medio-grossolane, rossastre se alterate. Lo spessore è compreso da qualche metro sino ad una decina di metri.

- Limi (*Pleistocene*): sono stati cartografati all'interno di questo litotipo la maggior parte dei depositi pleistocenici. Si tratta di limi che sfumano gradualmente a sabbie limose verso l'alto ed ad argille limose verso il basso. Di colorazione grigio chiaro, dove prevale la componente più fine, al giallastro chiaro in corrispondenza verso l'alto dei depositi sabbiosi. Lo spessore è al massimo pari a 100-150 m.

- Argille (*Pleistocene*): è la facies basale della sequenza regressiva pleistocenica. Il contatto limi-argille non è netto ma transizionale. Di colorazione grigio azzurastro. Presentano spessori variabilissimi al massimo compresi entro 600-700 m.

Da un punto di vista strutturale, il territorio in oggetto è caratterizzato da uno stile tettonico di tipo distensivo che coinvolge i depositi pleistocenici poggianti in continuità sulla serie dell'avampaese ibleo.

Questa zona è caratterizzata da faglie sepolte con andamento NE-SW riconducibili a processi di neotettonica, che in superficie sono testimoniati da marcate lineazioni morfologiche e dall'andamento parallelo dei corsi d'acqua.

Tutta la zona, sotto il profilo morfologico, è caratterizzata da bassi rilievi collinari che degradano dolcemente verso la costa. Le quote massime sono di poco superiori ai 120 – 130 m s.m. con pendenze dei versanti contenute a testimonianza di una bassissima energia di rilievo.

Sicuramente le valli principali, tutte orientate da NE verso SO sono, andando da NO verso SE: Valle Priolo, quasi al limite settentrionale dell'area; Valle Torta, che confluisce nel L. Biviere e che divide grossomodo in due la riserva naturale; la valle del Fiume Acate o Dirillo e del T. Ficuzza che rappresenta il limite più orientale della riserva. Oltre a queste zone pianeggianti, sono presenti anche al top dei rilievi collinari, delle spianate morfologiche perlopiù di erosione.

Nell'entroterra non sono presenti eclatanti fenomeni morfoetici: non sono state rilevate frane significative e la stabilità dell'area è generalmente buona. Pesanti invece sono stati nel tempo gli interventi dell'uomo che hanno modificato drasticamente quelli che erano gli originali elementi morfologici. Sono stati fatti numerosi e diffusi sbancamenti e lavori di livellamento per insediare attività produttive, sono state aperte cave (essenzialmente di materiale sabbioso o argilloso per laterizi), si sono gradonati i pendii per consentire l'insediamento di lavorazioni agricole.

2.1.3 Substrato pedogenetico e suolo

Per la definizione delle caratteristiche dei suoli nel territorio in esame si è condotta una ricerca bibliografica presso l'Università degli Studi di Palermo Istituto di Agronomia che in questo settore ha realizzato la Carta dei Suoli della Sicilia in scala 1:250.000 (1988) e La Sicilia e le sue zone irrigue in scala 1:200.000 Quaderno di Agronomia n.8 (1975).

Sono stati esaminati anche studi realizzati a livello locale dall'ESA come il Piano di Sviluppo Agricolo del Gelese all'interno del quale sono stati realizzati 216 campionamenti di suolo.

Di seguito si descrivono i suoli descritti nella cartografia :

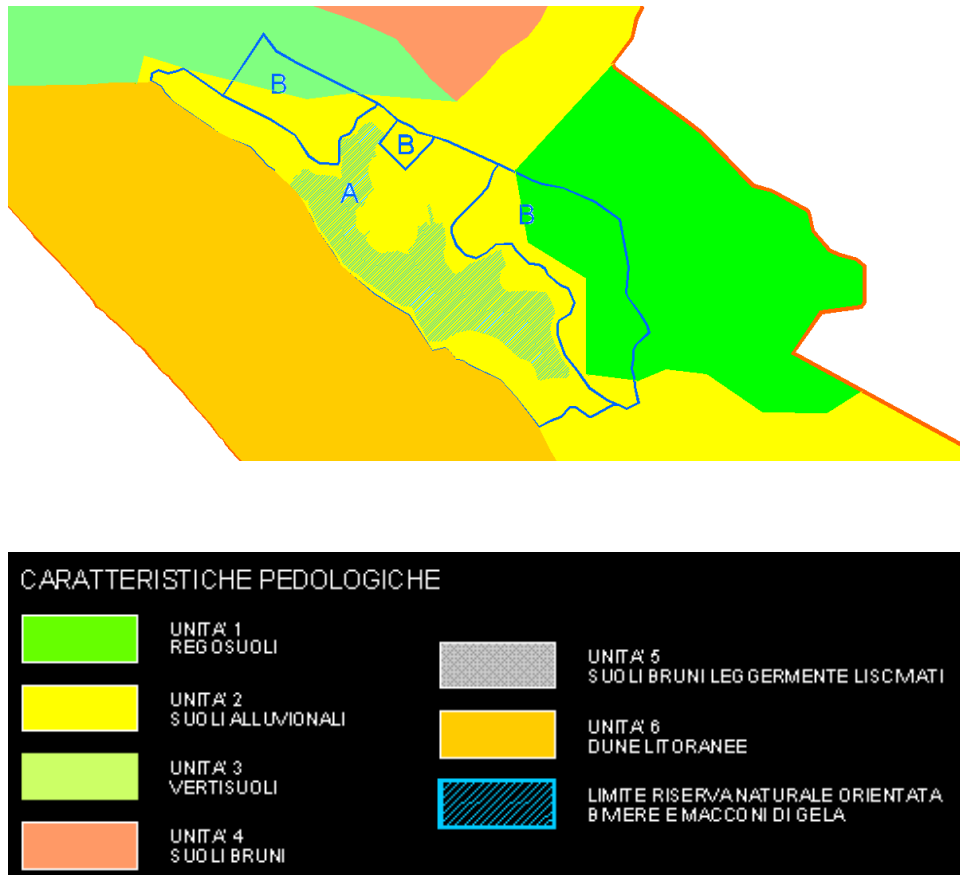


Fig. 1.3

Unità 1

Regosuoli – Typic Xerorthents – Eutric Regosols

Così come per i litosuoli, anche per i regosuoli il concetto centrale è fissato su suoli giovani, ai primi stadi di sviluppo ma, al contrario dei primi, questi evolvono su rocce tenere o su substrati sciolti. Si rinvencono prevalentemente su morfologie collinari con pendici variamente inclinate e mostrano un profilo di tipo A-C. Il colore può variare dal grigio giallastro chiaro al grigio bruno scuro con tutte le tonalità intermedie; lo spessore va da pochi centimetri di profondità (10-15 cm) fino a 30-40 cm laddove l'erosione è nulla. Essendo dei suoli giovani, le proprietà fisico-chimico-idrologiche risultano

fortemente condizionate dal substrato sul quale evolvono ma, nell'insieme, date le loro caratteristiche, la capacità produttiva dei regosuoli siciliani è da giudicare bassa.

Unità 2

SUOLI ALLUVIONALI – TYPIC E/O VERTIC XEROFLUVENTS-TYPIC E/O VERTIC XEROCHREPTS – EUTRIC FLUVISOLS-EUTRIC E/O VERTIC CAMBISOLS

Sono suoli presenti in tutte le maggiori pianure dell'Isola e nei fondovalle. Mostrano un profilo di tipo Ap-C o Ap-B-C, talora di notevole spessore che trae origine da depositi alluvionali di vario tipo. Gran parte delle loro caratteristiche, quali ad esempio la tessitura, il grado di alterazione e di evoluzione, risultano fortemente condizionate dalla composizione mineralogica e dalle dimensioni degli elementi che costituiscono le alluvioni stesse. Così la tessitura può variare dal sabbioso molto permeabile al sabbioso argilloso semipermeabile, all'argilloso compatto impermeabile e, quando la tessitura passa all'argilloso, non è infrequente il caso che i suoli alluvionali presentino caratteri vertici.

I suoli alluvionali sono suoli profondi, ben strutturati, con contenuti variabili di sostanza organica ma più spesso oscillanti su valori medio-bassi e discreta dotazione in carbonato, sia totale che attivo. La permeabilità è buona; la reazione è sub-alcalina; i principali elementi nutritivi sono talora deficitari. In alcune zone si riscontrano anche situazioni podologiche molto carenti, dovute o alla presenza della fase salina o alla tessitura argillosa che, accoppiata ad un difficile drenaggio può condurre alla formazione di una falda stagionale responsabili dei fenomeni di pseudogleificazione.

La loro capacità produttiva è pertanto estremamente variabile in funzione delle differenti situazioni podologiche ma in generale si può definire buona.

Unità 3

Vertisuoli – Typic Chromoxererts e/o Typic Pelloxererts Chromic e/o Pellic Vertisols

La principale caratteristica dei vertisuoli è rappresentata dal fenomeno del rimescolamento dovuto alla natura prevalentemente montmorillonitica dell'argilla, il cui reticolo si espande e si contrae, con l'alternarsi rispettivamente dei periodi umidi e dei periodi asciutti.

Al sopravvenire della stagione asciutta il suolo comincia ad essiccarsi in virtù dell'intensa evaporazione. Tale essiccamento è sufficientemente elevato da provocare la formazione di crepacciature nello strato superficiale del suolo che, col progredire della stagione asciutta, possono approfondirsi fino ad oltre un metro di profondità. Contemporaneamente, in superficie si forma un caratteristico strato di self-mulching che, cadendo insieme ai residui vegetali delle colture all'interno delle crepacciature fino in alcuni casi a riempirne la base, contribuisce a rendere fortemente omogenei i vertisuoli lungo tutto il loro profilo.

Il profilo dei vertisuoli è del tipo A-C o meglio Ap-C, di notevole uniformità e spessore e non di rado raggiunge i due metri. La materia organica, anche se presente in modeste quantità è sempre ben unificata, fortemente legata alle micelle montmorillonitiche, molto stabile e conferisce in superficie la buona struttura granulare e il caratteristico colore molto scuro o più spesso nero che contraddistingue i verti-suoli di tale colore dai più diffusi vertisuoli che presentano un colore più chiaro e dai suoli bruni vertici della collina siciliana. La dotazione in elementi nutritivi è discreta ed ottima per il potassio, la reazione è sub-alcina (pH 7,5-8,0), la capacità di scambio oscilla intorno a 35 m.e.% e risulta sempre saturata in ioni calcio. La capacità di ritenzione idrica è sempre elevata, per cui riescono a mantenersi più a lungo freschi.

Fatta eccezione di questi rari casi, sono sempre suoli di elevata potenzialità agronomica e manifestano una spiccata fertilità che li fa classificare fra i migliori terreni agrari ad indirizzo cerealicolo.

Unità 4

Suoli bruni – Typic e/o Lithic Xerochrepts – Eutric Cambisols

Trattasi di suoli abbastanza profondi che possono anche raggiungere e superare i 100 cm. Le loro caratteristiche generali sono data da un profilo di tipo A-B-C-, con l'orizzonte A di colore bruno scuro, relativamente spesso, che passa in modo molto graduale ad un orizzonte B di alterazione. La prima parte del suolo è normalmente decarbonatata e la reazione è tendenzialmente neutra o sub-alcina. La sostanza organica, discretamente presente assieme al complesso di scambio saturato in ioni calcio, conferisce al suolo una buona struttura, generalmente poliedrica sub-angolare

forte, fine e media, che tende a prismatica, debole, media, nell'orizzonte B. Variabili fra valori medio –scarsi la dotazione in elementi della fertilità. Sono dotati di media potenzialità agronomica.

Unità 5

Suoli bruni leggermente lisciviati – Typic Haploxeralfs – Orthic Luvisols

Si rinvencono su substrati permeabili che favoriscono il fenomeno della lisciviazione, anche con precipitazioni non molto elevate. Presentano un profilo di tipo A-B-C, generalmente profondo, di colore variabile dal bruno-giallastro al bruno-scuro, ben strutturato, ben dotato in sostanza organica, neutro o sub-acido, discretamente fertile. La tessitura è sempre molto sciolta e solo una attenta osservazione, suffragata dalle analisi di laboratorio, consente di mettere in evidenza nell'orizzonte B la presenza di argilla illuviale. Bassa la capacità di scambio che può anche non essere completamente saturata. La loro potenzialità agronomica è discreta o buona in dipendenza delle differenti situazioni morfologiche.

Unità 6

Dune litoranee – Dune land-Typic Xeropsamments – Dune land - Regosols

Sono rappresentate da sabbie marine e/o eoliche. Trattasi di dune vere e proprie che occupano in prevalenza una fascia costiera fra 10 e 20 m di quota, ma che non superano mai i 50 m e che avanzano lentamente verso l'entroterra. Sono stati fatti tentativi di rimboschimento, ma sono soprattutto le recinzioni con arelle e le specie vegetali da macchia a garantire una fissazione delle dune e l'evoluzione pedogenetica di questi substrati quasi inerti.

2.2.1 Sistema idrologico naturale del lago del Biviere

In sintesi, gli elementi attualmente caratterizzanti il sistema idrologico naturale del lago del Biviere, risultano essere:

- elevata evaporazione, stimata in circa 1445 mm medi annui ed equivalente ad un volume compreso tra $0.85 * 10^6 \text{ m}^3$ (con riferimento al livello idrometrico del lago a quota +3.0 m s.m., pari a circa il 77% del corrispondente volume invasato) e $1.45 * 10^6$

m³ (con riferimento al livello idrometrico del lago a quota +5.5 m s.m., pari a circa il 49% del corrispondente volume invasato);

- ridotti apporti pluviali diretti, dell'ordine medio poliennale dei 370 mm (periodo 1974-98 – pari a circa il 25% della corrispondente evaporazione. Il regime temporale degli afflussi è caratterizzato da elevata stagionalità (con contributi estivi trascurabili) e variabilità poliennale ($cv = 0.32$);
- elevata variabilità stagionale e poliennale ($cv = 0.82$) del regime dei deflussi dell'immissario torrente Valle Torta. In particolare, risulta significativa la possibilità di verificarsi di deflussi di entità trascurabile (nulli e/o inferiori ai 10-15 l/s medi mensili) anche per periodi compresi tra i quattro ed i nove mesi consecutivi interessanti in tutto od in parte anche le stagioni primaverile ed autunnale. Complessivamente, l'apporto stimato del torrente Valle Torta è, in anni siccitosi, modesto con valori ricostruiti, con riferimento a tempi di ritorno rispettivamente di 20 e 5 anni, compresi tra $0.59-1.63 \cdot 10^6$ m³ (ipotesi cautelativa) e tra $1.16-2.04 \cdot 10^6$ m³ (ipotesi ottimistica), equivalenti rispettivamente al 20-55% ed al 39-69% della capacità complessiva di invaso del lago riferita alla quota idrometrica di +5.5 m s.m. ed al 32-88% ed al 63-110% della capacità di invaso compresa tra le quote idrometriche +3.0 e +5.5 m s.m. (cfr. Tab.1.1);
- modesti contributi dell'interscambio falda-lago, che costituiscono di fatto un elemento marginale nel bilancio del sistema e, comunque, insufficiente, viste le elevate perdite di evaporazione che caratterizzano il bacino durante l'intero anno, a mantenere, in periodo in cui sono assenti apporti regolati dal fiume Dirillo e naturali dal torrente Valle Torta, volumi d'invaso significativi nel bacino lacustre.

Sulla base dei risultati delle analisi geo-idro-climatologiche sviluppate nell'ambito dello studio e sinteticamente sopra richiamati, si evidenzia come il sistema naturale “lago del Biviere” possa considerarsi “fragile” dal punto di vista idrologico, presentando un rischio significativo di siccità in senso ambientale. Gli apporti naturali dell'immissario torrente Valle Torta non garantiscono infatti con sufficiente continuità temporale il mantenimento di livelli idrometrici ecosostenibili anche in assenza di utilizzi dissipativi della risorsa invasata. Risulta quindi necessario il ricorso a risorse idriche esogene attraverso l'esistente canale di collegamento fiume Dirillo-Biviere, la cui entità dipende

sia dalla particolare annata idrologica, sia dalle specifiche modalità di gestione del sistema lago .

2.2.2 Caratterizzazione batimetrica del lago

Nel mese di novembre 2002 è stato eseguito un rilievo batimetrico-topografico del lago Biviere e dei terreni circostanti a supporto della caratterizzazione dell'ambiente fisico e dell'individuazione di politiche di gestione sostenibili del sistema ambientale di interesse.

Al momento del rilievo batimetrico-topografico, il lago Biviere risultava in condizioni di magra idrologica, disaggregato in due distinte unità non comunicanti superficialmente con il livello del pelo libero a quota di circa 1.60 m s.m. a cui corrispondeva un volume ed una superficie complessiva rispettivamente pari a circa 380.000 m³ ed a 42 ha.

Sulla base dei dati del rilievo batimetrico-topografico, con riferimento all'intervallo altimetrico -0.5 m s.m. (quota minima rilevata) e +8.0 (quota a cui corrisponde un franco minimo spondale di circa 20 cm nel settore occidentale), sono stati stimati i valori dei volumi invasabili nel lago utilizzando il programma Surfer della Golden Software.

E' stato realizzato allo scopo un modello tridimensionale dell'area di interesse (bacino del Biviere e terreni contermini) utilizzando i punti quotati e le isoipse presenti campionate ogni 25 metri. I dati sono stati regionalizzati utilizzando l'algoritmo "Kriging" in modo da ottenere un grid avente una maglia quadrata di due metri per due. Una volta definita la superficie topografica ed i limiti delle aree di elaborazione (isoipsa 8 m s.m.) sono stati calcolati i volumi (e l'area planare associata) tra la topografia modellizzata e piani quotati con passo 10 cm fino alla quota di 8 m s.m. La metodologia di calcolo utilizzata per la valutazione dei volumi è quella "trapezoidale".

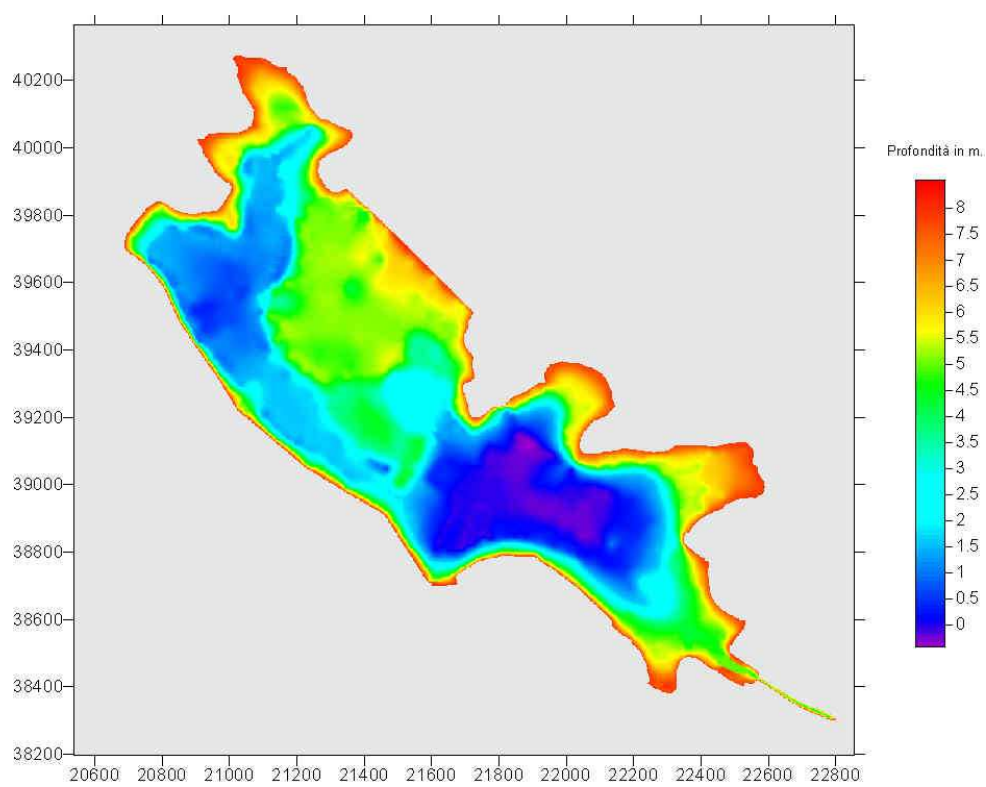
In Tab. 2.1 sono riportati con scansione di 10 centimetri i corrispondenti valori dei volumi (m³) e dell'area planare associata (m²) risultanti dall'elaborazione dei dati del rilievo topografico sopra brevemente richiamata. In Fig. 2.5.a viene visualizzato con opportuno cromatismo l'andamento altimetrico dell'area di interesse, mentre in Fig.

2.5.b viene evidenziata la curva dei volumi di invaso (volume V – quota H) la quale è esprimibile mediante due distinte relazioni di potenza:

- $V = 230011 \cdot H^{1.4814}$ $-0.50 \text{ m s.m.} \leq H \leq +5.00 \text{ m s.m.}$
- $V = 135210 \cdot H^{1.8119}$ $+5.00 \text{ m s.m.} \leq H \leq +8.00 \text{ m s.m.}$

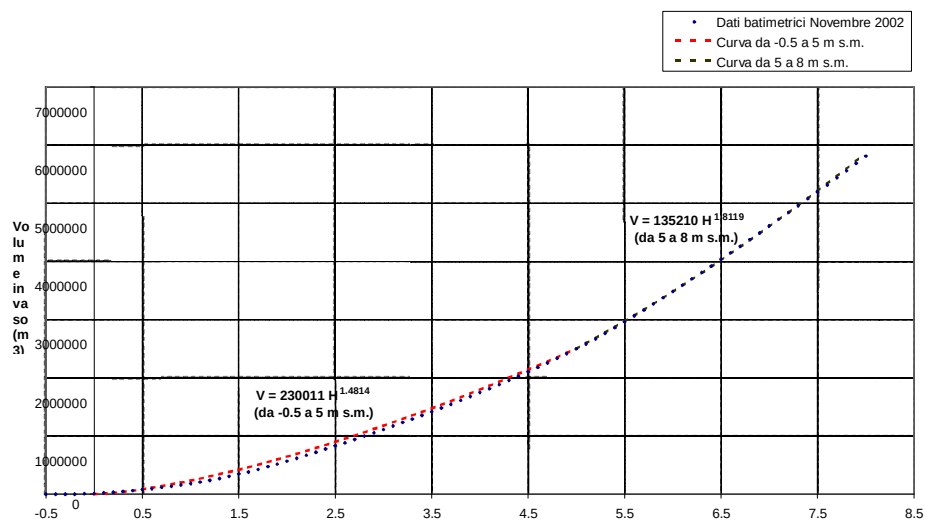
Tb. 2.1. Caratterizzazione geometrica del Biviere tra -0,5 m s.m. e +8,0 m (base: rilievo batimetrico-topografico del

Quot (m)	Volum (m ³)	Area (m ²)	Quot (m)	Volum (m ³)	Area (m ²)
-0.5	0.00	2.00	3.8	1610500.3	666126.7
-0.4	4.12	350.4	3.9	1677683.2	677658.9
-0.3	128.2	2279.9	4	1746025.0	689101.7
-0.2	1045.3	20992.3	4.1	1815487.1	699998.2
-0.1	4475.1	45848.7	4.2	1886021.8	710839.5
0	10995.2	84741.9	4.3	1957741.4	723900.9
0.1	20718.5	108119.7	4.4	2030774.1	736572.8
0.2	32402.3	125265.0	4.5	2104949.9	746781.9
0.3	45727.2	141056.3	4.6	2180180.1	757858.0
0.4	60636.4	157170.7	4.7	2256523.5	769213.3
0.5	77000.3	170042.5	4.8	2334141.5	784271.2
0.6	94651.2	183198.5	4.9	2413657.9	806572.0
0.7	113891.8	201357.3	5	2495451.6	831732.1
0.8	134745.5	215520.4	5.1	2580100.4	864661.7
0.9	157025.1	230521.2	5.2	2669811.9	926720.7
1	181077.6	252221.5	5.3	2764123.1	956520.7
1.1	207665.0	280191.9	5.4	2860970.7	980145.5
1.2	237054.1	307439.2	5.5	2960083.2	1002558.4
1.3	269275.0	337329.6	5.6	3061366.0	1021996.7
1.4	304468.9	365630.4	5.7	3164379.0	1038089.2
1.5	342226.5	388660.9	5.8	3268930.0	1052846.0
1.6	382419.6	419125.2	5.9	3374895.3	1066243.1
1.7	425788.1	445126.5	6	3482154.2	1078704.1
1.8	471121.7	460907.5	6.1	3590622.7	1090647.1
1.9	517871.2	473754.3	6.2	3700223.0	1101024.0
2	565924.6	487884.2	6.3	3810783.8	1110019.9
2.1	615572.1	506517.3	6.4	3922208.0	1118374.8
2.2	666979.9	521000.8	6.5	4034444.0	1126288.0
2.3	719644.3	532093.4	6.6	4147457.2	1133924.7
2.4	773352.8	541838.4	6.7	4261222.9	1141348.2
2.5	827978.5	550524.0	6.8	4375723.9	1148666.4
2.6	883438.2	558594.0	6.9	4490957.1	1156009.8
2.7	939682.1	566226.8	7	4606930.4	1163479.1
2.8	996674.0	573577.4	7.1	4723662.4	1171144.8
2.9	1054393.2	580795.1	7.2	4841180.3	1179168.1
3	1112830.4	587938.3	7.3	4959518.3	1187447.4
3.1	1171980.9	595078.5	7.4	5078707.0	1196052.4
3.2	1231848.4	602296.5	7.5	5198784.7	1205102.0
3.3	1292458.3	610134.3	7.6	5319828.7	1214898.6
3.4	1353888.4	618559.6	7.7	5441882.6	1224609.0
3.5	1416202.1	628061.9	7.8	5564962.6	1234194.1
3.6	1479637.0	641124.3	7.9	5689113.9	1243062.7
3.7	1544452.8	654738.0	8	5814287.2	1247680.9

**Fig. 2.5.a**

Lago Biviere – andamento plano-batimetrico (nov.2002)

Fig. 2.5. b Lago Biviere
Curva dei volumi d'invaso
(rilievo Novembre 2002)



In Tab. 2.2 sono riportati, per alcune quote significative comprese tra -0.50 m s.m. ed $+8.00 \text{ m s.m.}$, i valori dei volumi invasabili nel Biviere valutati sulla base del rilievo del novembre 2002 e quelli corrispondenti tratti dal “Progetto dei lavori di sistemazione del bacino imbrifero della Valle Torta e sistemazione a serbatoio per uso irriguo del Lago Biviere con l'utilizzazione delle acque del Fiume Dirillo” redatto dal Consorzio di Bonifica della Piana di Gela nell'anno 1952. Dall'esame della tabella si evidenzia una riduzione generalizzata dei volumi invasabili, dell'ordine al massimo di alcune centinaia di migliaia di metri cubi, riduzione in parte riferibile all'apporto solido degli immissari, in particolare del torrente Valle Torta. La riduzione della capacità di invaso risulta significativa in termini percentuali per valori della quota del pelo libero inferiori ad 1 m s.m. e compresa tra il 2.5% ed il 14.5% per quote del pelo libero variabili tra 2 m s.m. ed 8 m s.m. .

Tab. 2.2 - Biviere, confronto tra i volumi (m³) rilievo del Nov. 2002 ed del 1952

Quot (m)	Volum (m ³)		
	rif. 2002	rif. 1952	(A) -
-0.5	0	4500	-
0.0	1099	10990	-
1.0	18107	27840	-
2.0	56592	59390	-
3.0	111283	113990	-
4.0	174602	189915	-
5.0	249545	285855	-
6.0	348215	380930	-
7.0	460693	490910	-
8.0	581428	609090	-

2.3.1 Idrogeologia

Il quadro idrogeologico locale è stato composto attraverso la revisione e rielaborazione del materiale bibliografico disponibile.

La ricostruzione del sistema idrogeologico, estesa all'intera area di studio, è stata oggetto di specifico approfondimento nella zona di Piana del Signore e nel comprensorio lacuale del Biviere di Gela, in virtù della loro valenza ambientale e nella prospettiva di una corretta definizione degli interventi più idonei alla loro riqualificazione ambientale.

2.3.1.1 Inquadramento generale

Nell'ambito dell'area d'indagine è presente un sistema articolato di circolazione delle acque sotterranee, in parte afferente al sistema lacuale del Biviere di Gela, che interessa terreni acquiferi di diversa tipologia.

Facendo riferimento alla classificazione dei terreni operata in termini di valenza idrogeologica, gli elementi maggiormente significativi sono di seguito analizzati.

I principali acquiferi alluvionali si localizzano nei depositi del torrente Valle Torta, dei fiumi Acate-Dirillo e Priolo, oltre all'estremo settore orientale della Piana di Gela, conosciuto come Piana del Signore.

Le potenzialità di tali sistemi variano in maniera molto sensibile in funzione sia degli spessori delle coltri alluvionali, sia della costituzione litologica delle stesse.

Nel settore occidentale, dove sono situate la valle del fiume Priolo e la Piana del Signore, i depositi sono di natura principalmente pelitica (limi ed argille), e la circolazione idrica sotterranea è ristretta, almeno limitatamente alla Piana del Signore, ad una coltre sabbiosa superficiale di spessore estremamente ridotto. Nella valle del Fiume Priolo, pur in assenza di informazioni di ambito specifico, si può comunque ritenere che i depositi vallivi siano costituiti prevalentemente da sedimenti a bassa permeabilità, fondando tale supposizione sia nel riscontro della generalizzata assenza di pozzi, sia facendo riferimento alla natura prevalentemente fine dei terreni che ne costituiscono il bacino.

Dei depositi alluvionali delle valli del Valle Torta e dell'Acate-Dirillo non si dispone di dati sufficientemente dettagliati. Per quanto riscontrabile dagli studi precedentemente realizzati nel settore, alla evidenziata complessità litologica, con termini variabili da limi a sabbie associati a subordinati orizzonti ghiaiosi, si possono far corrispondere condizioni di permeabilità estremamente variabili.

I principali rilievi dell'area sono costituiti dalla sequenza deposizionale marina del Pleistocene, che caratterizza, nei suoi termini superiori, il complesso acquifero sabbioso/sabbioso-limoso pleistocenico.

Tale complesso acquifero, a permeabilità primaria, si connota per una permeabilità alta-medio/alta dei termini sabbiosi più elevati (*Sabbie e Calcareni*), costituenti le parti sommitali dei rilievi principali, che decresce progressivamente nei termini limosi inferiori (*Limi*), in transizione graduale verso il basso a facies limoso-argillose.

In tal senso, nell'attribuzione del carattere idrogeologico a questo intervallo della sequenza pleistocenica, si è cercato di differenziare la porzione basale, più argillosa e con caratteri più propriamente assimilabili a quelli di un acquitardo, rispetto a quella superiore, più marcatamente sabbiosa. La parte basale costituisce la transizione al

termine più antico della sequenza pleistocenica (*Argille*), rappresentato da un potente acquicludo argilloso.

Le porzioni limose basali, a permeabilità ridotta, sono presenti ai margini dei segmenti più interni delle valli del fiume Priolo e torrente Valle Torta.

Solo al margine della Piana del Signore è presente, in affioramento significativo, l'acquicludo argilloso pleistocenico. Affioramenti più contenuti, significativi comunque nel condizionare la struttura idrogeologica locale, si riscontrano anche, per effetto dei fenomeni erosivi costieri che interessano la parte frontale dell'esteso deposito dunare, nel tratto della ripa d'erosione marina compreso tra Macconi Santa Lucia e la Caserma forestale.

Esaminando l'intero sistema acquifero pleistocenico, considerandone cioè l'intera sequenza sabbioso-prevalente, si può ritenere che, al di là della generalizzazione classificativa, possa esistere comunque una differenziazione idraulica, anche significativa, tra gli orizzonti acquiferi posti a diverse altezze della sequenza, condizionatamente sia alla localizzazione ed al rilievo delle aree di alimentazione, sia alla variabilità della permeabilità verticale entro la sequenza considerata.

Sulla parte costiera è presente inoltre un esteso acquifero sabbioso, di origine *eolica*, a elevata permeabilità primaria, che si sviluppa con continuità dal margine orientale a quello occidentale dell'area di studio.

Dalle stratigrafie disponibili per tale zona si determinano per tale acquifero spessori contenuti normalmente entro la decina di metri, con sovrapposizione diretta, almeno sulla parte frontale, sui terreni argillosi pleistocenici.

In termini strettamente strutturali, si osserva come sulla parte frontale vi sia una risalita sensibile del substrato argilloso, che determina la presenza di una soglia, talvolta affiorante come nel tratto già citato tra Macconi Santa Lucia e la Caserma forestale, che condiziona fortemente i deflussi della falda in direzione mare.

Nell'ambito ristretto del lago sono presenti depositi francamente lacustri, principalmente limosi, in transizione e/o sovrapposizione ripetuta, con modalità e proporzioni condizionate dalla posizione rispetto al torrente immissario (Valle Torta), con depositi di ambiente fluviale-deltizio. Gli stessi sedimenti lacustri attuali di fondo lago sono costituiti principalmente da materiale fine, limoso-argilloso.

Lo spessore di tali depositi sembra generalmente contenuto, e comunque non superiore, nei punti di massimo sviluppo, alla decina di metri. In termini complessivi la loro permeabilità è da ritenere piuttosto contenuta in considerazione del prevalere delle granulometrie fini, anche se incrementi sensibili possono corrispondere a quei settori dove diviene apprezzabile o preponderante la componente grossolana trasportata dal torrente Valle Torta o dai rivi minori.

2.3.1.2 Sistema lacuale del Biviere di Gela

Lo studio sistematico del contesto idrogeologico afferente il Biviere di Gela è stato realizzato per fasi successive, sviluppandosi lungo un percorso orientato ad una comprensione sempre migliore della reale interazione tra il sistema di circolazione sotterranea ed il lago medesimo, focalizzando in particolare l'attenzione al comportamento del sistema nei periodi più siccitosi, quando maggiore è la fragilità idrologica dell'ecosistema lacustre.

Sintesi degli studi esistenti

Sulla base dei dati dello Studio Geologico Generale per il P.R.G. di Gela (1999) e richiamando le caratteristiche delle unità litostratigrafiche individuate, schematizzate in Fig. 2.6 in una sezione geolitologica orientata SO-NE, risultava già evidente il ruolo delle argille pleistoceniche marine come substrato impermeabile delle soprastanti formazioni permeabili della successione marina pleistocenica. L'assetto generale della sequenza risulta caratterizzato da una immersione blanda e regolare verso SW.

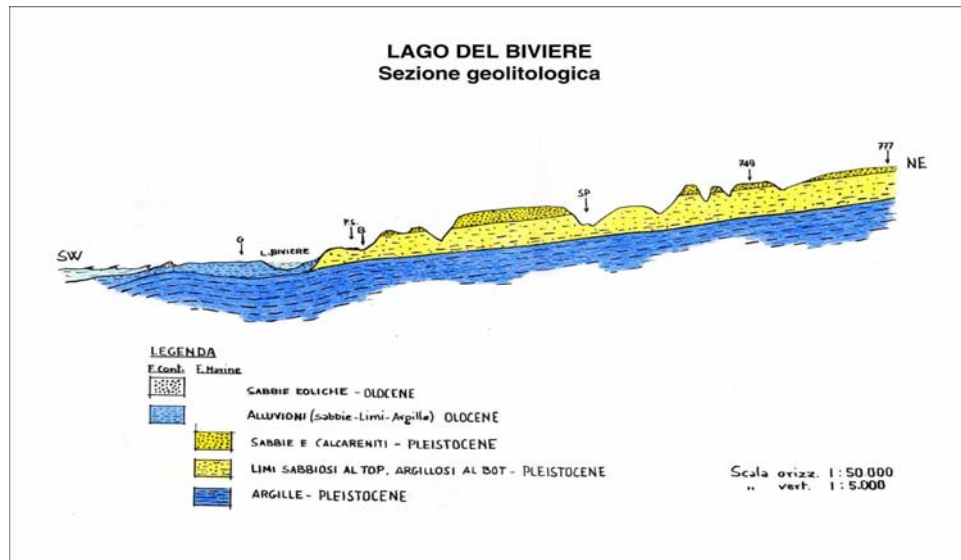


Fig. 2.6

Nei dintorni del lago Biviere veniva evidenziata la presenza di depositi alluvionali con facies dominante sabbiosa e lenti di limo e di ghiaie variamente intercalate. A partire da una profondità di 10-12 metri venivano riscontrati anche livelli di torbe.

Rilievi speditivi sul terreno, confortati dai riscontri derivanti dalla perforazione dei nuovi piezometri, portano tuttavia ad un sensibile ridimensionamento dell'estensione, almeno areale, di tali affioramenti alluvionali, facendo ritenere più probabile che la parte sommitale dei depositi presenti nel settore a valle del Biviere sia costituita principalmente da sabbie litorali di origine eolica.

Come già ricordato in precedenza, i sistemi acquiferi locali sono schematizzabili nella sovrapposizione di terreni permeabili alla spessa sequenza argillosa plestocenica.

La disponibilità di stratigrafie di pozzi ubicati in vari punti dell'area ha consentito una ricostruzione di massima della morfologia del substrato argilloso.

Da tale ricostruzione, riportata in Fig. 2.7, si osserva, oltre ad una immersione verso SO, in accordo con quella del tilting regionale, e ad un innalzamento del substrato su una direttrice SO-NE a monte del Biviere, una marcata depressione nel settore immediatamente a valle del lago, con risalita significativa delle quote proprio sul fronte mare.

Nell'ambito del lavoro citato fu elaborata anche una ricostruzione della superficie piezometrica della falda superficiale, sulla base di una campagna di misure dei livelli in una serie di pozzi censiti espressamente per tale circostanza, della quale si riporta, per completezza d'informazione, uno stralcio cartografico riferito al settore del Biviere . (Fig.2.8)

Il citato studio evidenziava, in particolare, i forti disturbi alla piezometria determinati localmente dagli emungimenti in atto, sia a monte che a valle del Biviere, e il ruolo sostanzialmente alimentante del lago, in un periodo in cui il livello dello stesso risultava circa a quota 5 m s.m.

In merito alle caratteristiche dell'acquifero, nel corso di tale studio furono inoltre eseguite delle valutazioni sui coefficienti di permeabilità idraulica caratteristici, ricorrendo ad una interpretazione sommaria delle caratteristiche idrodinamiche di 12 pozzi esistenti sulla base delle loro caratteristiche e degli abbassamenti indotti dalle portate d'esercizio degli stessi. Per quanto approssimativi, i valori che si ottennero, schematizzati in Fig. 2.9 mostrano nell'esteso settore di monte una permeabilità piuttosto elevata, compresa normalmente tra 10^{-5} e 10^{-4} m/s, con i valori più elevati rilevati nei pozzi più vicini al lago.

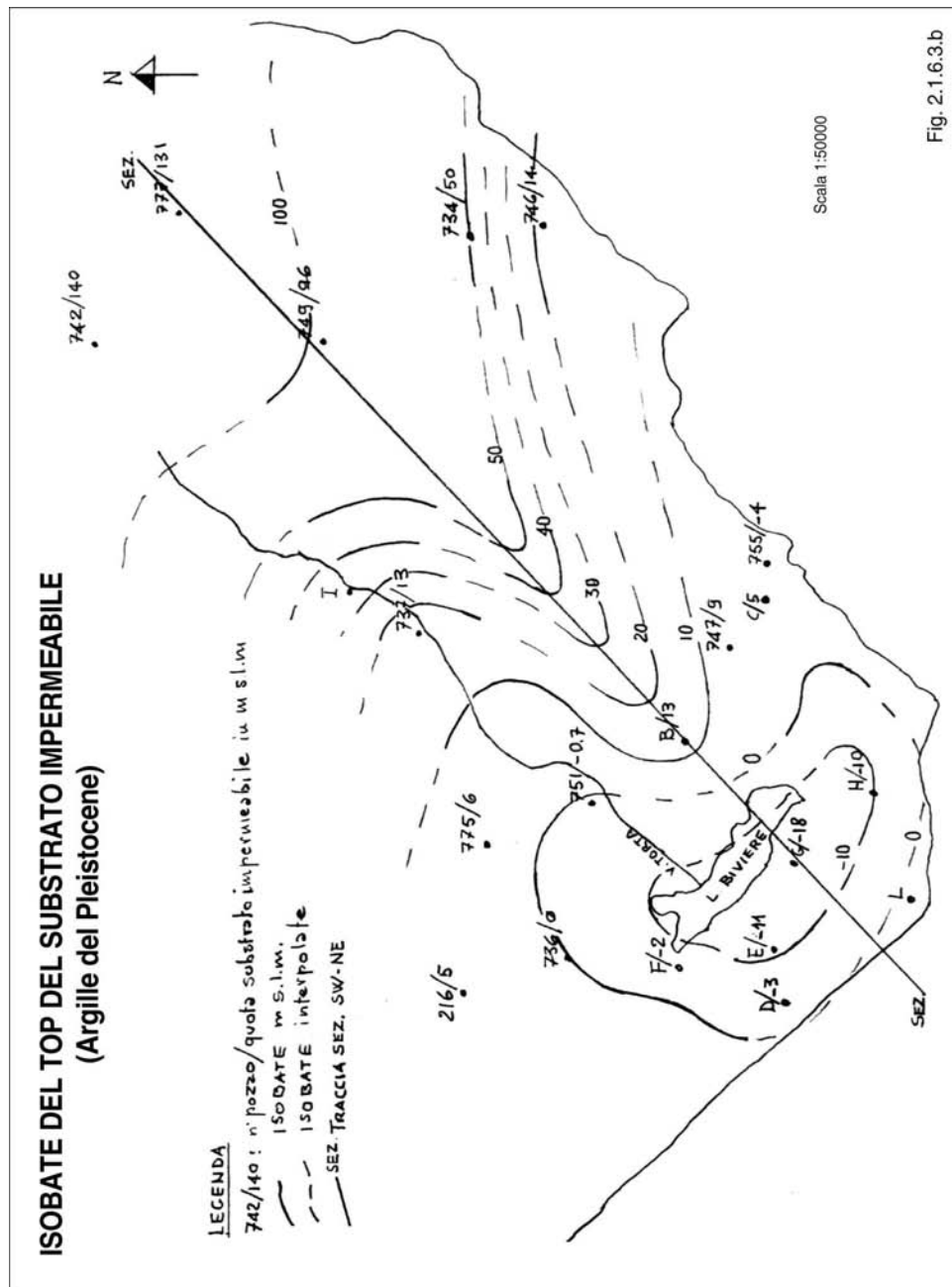


Fig.2.7

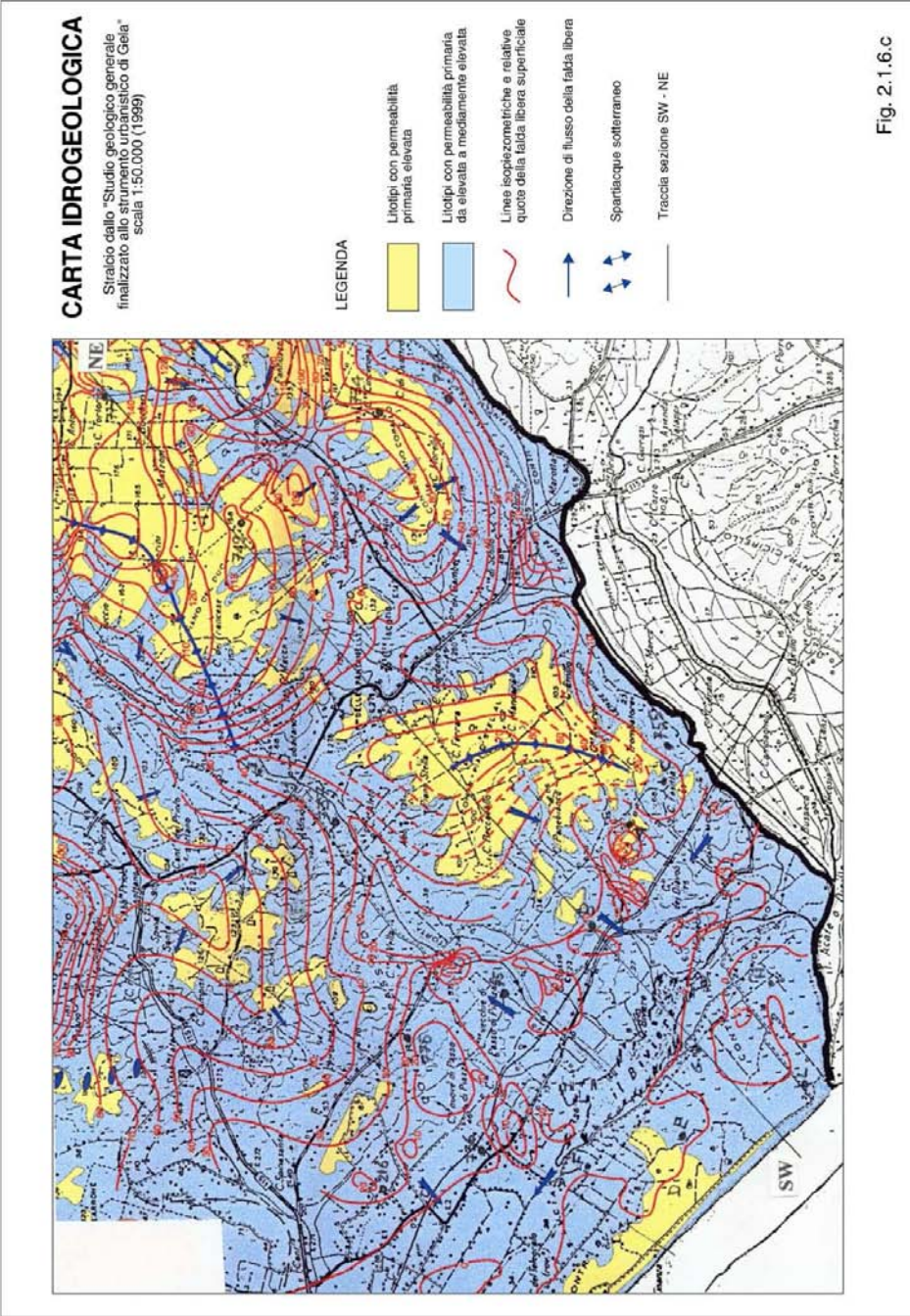


Fig. 2.1.6.c

Fig. 2.8

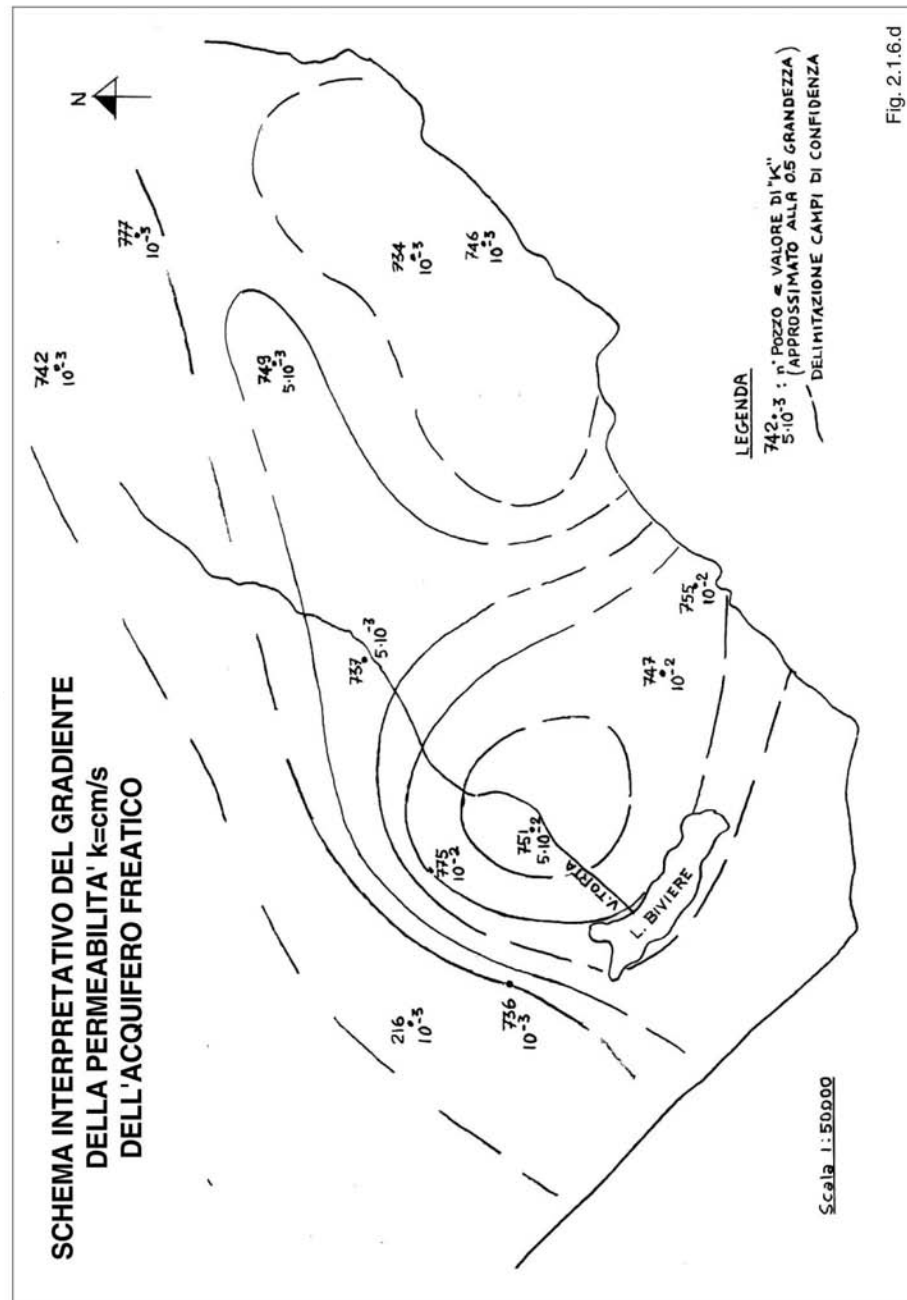


Fig.2.9

Conclusioni

Sulla scorta di quanto sopra riportato risulta poco sostenibile il ricondurre ad un unico modello lo schema dei rapporti esistenti tra la falda ed il lago, le cui dinamiche risentono dell'inerzia dei terreni acquiferi circostanti rispetto alla rapidità con cui si accumulano o si riducono le acque invase in lago.

Per quanto si possa comunque caratterizzare il sistema attraverso flussi alimentanti della falda da monte a cui si associa una dispersione di valle nei terreni acquiferi della zona dunare, dalle ricostruzioni piezometriche si osserva tuttavia come il regime dei flussi che caratterizza il rapporto lago-falda sia fortemente condizionato dai transitori indotti sia da consistenti incrementi del livello del lago, sia dalle uscite (prelievi diretti, periodi di intensa evaporazione) che caratterizzano il sistema.

In condizioni di invaso significativo, sussiste infatti una temporanea inversione dei flussi verso monte, più o meno durevole in funzione del permanere del maggior carico delle acque del lago rispetto a quello della falda circostante. Al contrario, rapidi svuotamenti, connessi potenzialmente sia allo sfruttamento eccessivo delle acque invase sia alle forti perdite per evaporazione, possono indurre anche limitati effetti di richiamo dalla zona dell'acquifero di valle.

Allo scopo di valutare la possibile entità dell'apporto idrico del sistema acquifero sotterraneo al lago in condizioni di massima criticità ambientale (periodi siccitosi e scarsa disponibilità di risorse idriche integrative), cercando di tener conto anche degli impatti degli esistenti sfruttamenti localizzati della falda, si è comunque tentato un approccio che permettesse di pervenire ad una stima sostenibile, delle caratteristiche di funzionamento del sistema naturale del Biviere.

In condizioni usuali l'alimentazione dei sistemi acquiferi ad un lago si concentra lungo una fascia prossimale alla linea di costa, più o meno estesa in funzione sia del contrasto di permeabilità tra i terreni del corpo acquifero ed i sedimenti lacustri, sia del gradiente effettivamente esistente tra il carico idraulico della falda al disotto dei sedimenti ed il carico dovuto al livello del lago. L'andamento della superficie piezometrica in prossimità del lago, raccordandosi alla superficie di acqua libera, non riflette esattamente il diverso carico idraulico della falda rispetto al lago, che tende a ridursi, fino ad elidersi, in allontanamento dalla riva, compatibilmente con una situazione

d'equilibrio dinamico stabilito, e potendosi, in funzione del contesto idrogeologico e ambientale, anche invertirsi sul fronte di valle come succede al Biviere, almeno limitatamente al periodo dell'ultimo rilievo piezometrico.

Pur se un'approccio modellistico avrebbe potuto tener conto in maniera più accurata della variabilità dei fattori che determinano il bilancio degli afflussi sotterranei al lago, si è comunque ritenuto che un calcolo ricondotto ad un schema semplificato del rapporto falda-lago potesse fornire una stima sostenibile dei volumi di acqua che filtrano al lago dalla falda. Tale stima è stata effettuata sulla base dei dati piezometrici e di livello del lago caratterizzanti il sistema nel gennaio 2003.

Si è schematizzato il lago come se fosse completamente privo di sedimenti fini di fondo, diversamente da quanto invece determinato sia in sede di campionamento dei sedimenti lacustri sia da sopralluoghi in sito, e ipotizzando che tutto il flusso sotterraneo a monte del lago avvenga secondo un moto prevalentemente orizzontale.

Si è cioè effettuato un calcolo di portata della sola porzione acquifera sovrastante la quota media del fondo lago (0,9 m slm), determinata mediando in maniera ponderale le quote relative alla trasversale del lago batimetricamente più depressa.

Nel calcolo si è utilizzato la Formula di Kamenskij (1943), più adeguata per falde con linee di flusso non parallele:

$$Q = K \frac{L_1 - L_2}{\ln L_1 - \ln L_2} \frac{H_1^2 - H_2^2}{2l}$$

dove:

K = coefficiente di permeabilità medio dell'acquifero

L_1 = lunghezza del fronte acquifero nella sezione di monte

L_2 = lunghezza del fronte acquifero nella sezione di valle

H_1 = spessore dell'acquifero nella sezione di monte

H_2 = spessore dell'acquifero nella sezione di valle

l = distanza tra le sezioni di monte e di valle

I valori utilizzati sono quelli ricavabili dalla piezometria del gennaio 2003, utilizzando la coppia delle isopieze 8-6 m s.m., meno influenzata dalla caduta piezometrica in prossimità del lago, e, per confronto, anche quella delle isopieze 6-4 ms.m.

Vista la variabilità dei gradienti, si è inoltre verificato il risultato per varie distanze delle isopieze. Il coefficiente di permeabilità usato per il calcolo è stato 10^{-5} m/s, intendendo comunque metterci in condizioni di considerare la falda più produttiva di quanto non sembrerebbero indicare i risultati ottenuti delle prove di permeabilità.

Il risultato che si ottiene dal calcolo della portata della falda è riportato nella tabella seguente:

Portata falda al Biviere ($k=10^{-5}$ m/s)

<i>coppia isopieze 8-6</i>	0,00048 m ³ /s	<i>Coppia isopieze 6-4</i>	0,000321 m ³ /s
$l_{\max} = 500$ m	1.244 m ³ /mese	$l_{\max} = 600$ m	831 m ³ /mese
<i>coppia isopieze 8-6</i>	0,00060 m ³ /s	<i>Coppia isopieze 6-4</i>	0,000641 m ³ /s
$l_{\text{med}} = 400$ m	1.555 m ³ /mese	$l_{\text{med}} = 300$ m	1.663 m ³ /mese
<i>coppia isopieze 8-6</i>	0,00120 m ³ /s	<i>Coppia isopieze 6-4</i>	0,001283 m ³ /s
$l_{\min} = 200$ m	3.109 m ³ /mese	$L_{\min} = 150$ m	3.325 m ³ /mese

Considerando la stima di apporto al lago più ottimistica, dal confronto con l'entità dell'evaporazione diretta stimata per il lago, e riportata nella tabella seguente :

Evaporazione dalla superficie libera (m³/mese)

<i>livello lago</i>	0 m	0,5 m	1,0 m	1,5 m	2,0 m	2,5 m
Gennaio	7.538	15.130	22.428	34.532	43.432	48.950
Febbraio	7.708	15.470	22.932	35.308	44.408	50.050
Marzo	7.792	15.640	23.184	35.696	44.896	50.600
Aprile	8.639	17.340	25.704	39.576	49.776	56.100
Maggio	10.418	20.910	30.996	47.724	60.024	67.650

Giugno	12.366	24.820	36.792	56.648	71.248	80.300
Luglio	13.213	26.520	39.312	60.528	76.128	85.800
Agosto	13.637	27.370	40.572	62.468	78.568	88.550
Settembre	12.282	24.650	36.540	56.260	70.760	79.750
Ottobre	11.096	22.270	33.012	50.828	63.928	72.050
Novembre	9.402	18.870	27.972	43.068	54.168	61.050
Dicembre	7.962	15.980	23.688	36.472	45.872	51.700

I quantitativi che evaporano mediamente nel periodo considerato, con il lago a un livello prossimo a 2,5 m s.m., risultano pari a **48.950 m³/mese**, tali cioè da non consentire una adeguata compensazione dell'evaporato attraverso la sola alimentazione dalla falda.

Anche considerando che, in assenza di apporti superficiali consistenti, gli abbassamenti dovuti al deficit di ricarica farebbero convergere ad un equilibrio di compensazione la portata della falda ed i quantitativi in evaporazione, risulta piuttosto facile immaginare che tale compensazione possa avvenire ad altezza del livello del lago senz'altro inferiori a 1,5-2 m s.m.

Volendo tentare anche la strada di una valutazione che consideri un'alimentazione verticale dall'acquifero al lago attraverso uno strato di fondo, spesso un metro, formato da sedimenti fini, l'impossibilità da parte della falda di garantire una compensazione dell'evaporato risulta da una semplice applicazione delle legge di Darcy.

Considerando infatti un carico delle acque invase corrispondente a 1,5 m s.m. ed un carico medio dell'acquifero sabbioso circostante arbitrariamente posto a 4 m s.m., senz'altro eccessivo per le condizioni del sistema, si ottiene che, perché la compensazione possa avvenire in queste condizioni (gradiente idraulico 2,5; superficie di flusso circa 400.000 m²), anche considerando il periodo invernale, si dovrebbero avere sedimenti di fondo con permeabilità dell'ordine di 10⁻², valori senz'altro irragionevoli in considerazione delle loro caratteristiche granulometriche.

Da quanto sopra si ritiene che gli invasi che caratterizzano il Biviere di Gela siano determinati quasi esclusivamente dagli apporti superficiali (naturali dal torrente Valle Torta e regolati dal fiume Dirillo) e che i contributi della falda costituiscano un elemento marginale nel bilancio del sistema, e comunque insufficiente, viste le elevate

perdite di evaporazione che caratterizzano il bacino durante l'intero anno, a mantenere, in periodo in cui sono assenti apporti dal Dirillo e dal Valle Torta, volumi d'invaso significativi nel bacino.

Infatti, considerando ad esempio il periodo giugno-settembre 2002, periodo caratterizzato, sulla base delle informazioni disponibili, da assenza sia di apporti naturali e/o regolati che di prelievi ad uso irriguo, la variazione rilevata del livello idrometrico del Biviere, compresa tra +2.20 m s.m. (inizio giugno) e +1.60 m s.m. (fine settembre) può essere attribuita praticamente alla sola evaporazione diretta, come evidenziato nella tabella di seguito riportata, a conferma dell'entità marginale in termini assoluti del possibile contributo dell'interscambio falda-lago.

Lago del Biviere:

Ricostruzione dei livelli idrometrici, periodo giugno-settembre 2002

riferimento temporale	livello idrometrico (m s.m.)	volume (m ³)	superficie (m ²)	evaporazione (m ³)
01/06/02	2.20	666980	521000	
				76222
01/07/02	2.05	590758	497200	
				77663
01/08/02	1.89	513095	472469	
				76257
01/09/02	1.72	436838	448282	
				65270
01/10/02	1.57	371568	409985	

Note:

- 1) la geometria del lago (livelli idrometrici, volumi e superfici) è stata ricostruita sulla base del rilievo batimetrico-topografico eseguito nel mese di novembre 2002 (cfr. Tab. 2.1);
- 2) l'evaporazione dal lago è riferita ai valori medi mensili poliennali ricostruiti mediante la formula di Vicentini.

Capitolo 3

Criticità e parametri ambientali della R.N.O

3.1 Qualità dell'ambiente lacustre e della foce del fiume Dirillo

Le indagini condotte per individuare le principali caratteristiche limnologiche del Biviere di Gela hanno riguardato diversi, ma fra loro interattivi, aspetti:

- ✓ chimismo delle acque;
- ✓ livello di trofia dell'ambiente lacustre;
- ✓ chimismo dei sedimenti;
- ✓ popolamenti fitoplanctonici;
- ✓ popolamenti zooplanctonici;
- ✓ comunità macrozoobentoniche litorali e pelagiche.

Nell'impostare le ricerche si sono tenute in attenta considerazione le modalità di campionamento e le analisi di monitoraggio che il "Testo unico sulla tutela delle acque dall'inquinamento" (D.L. 152/99, D.L. 258/00) contempla per definire i criteri di conoscenza e la classificazione di Acque, Sedimenti e Biota in Laghi, Acque Marine Costiere, Acque di Transizione.

Per facilitare la consultazione e commentare in modo organico i risultati conseguiti, i risultati delle singole analisi ed indagini sono stati riportati in dettaglio solo nelle tabelle conclusive.

3.1.1 Localizzazione delle stazioni di monitoraggio

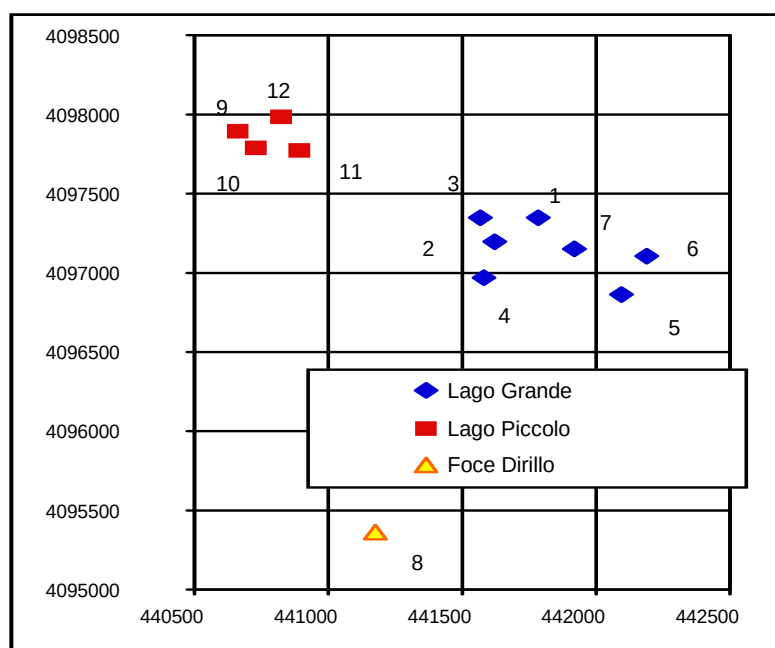
Nella condizione idrologica riscontrata il 4 e 5 novembre 2002, date dei sopralluoghi e dei campionamenti, il Lago Biviere di Gela era nettamente diviso in due

distinti invasi identificati come Lago Grande e Lago Piccolo per le dissimili dimensioni. Anche la Foce del Fiume Dirillo è stata oggetto di indagine in un'unica sezione.

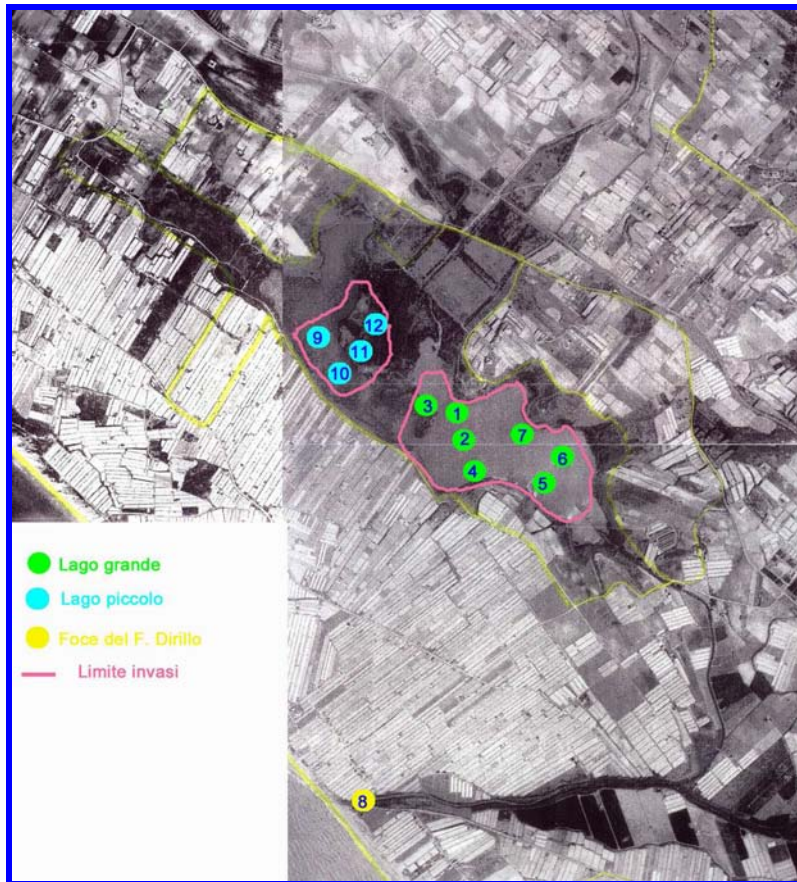
Le sigle numeriche identificative dei punti analizzati e le coordinate, rilevate con navigatore portatile eTrex della GARMIN Corporation, ed espresse in UTM 32 sono le seguenti:

Lago Grande	N	E		N	E
1	4097351	441778	Foce Dirillo	4095358	441177
2	4097198	441625			
3	4097343	441570	Lago Piccolo		
4	4096976	441580	9	4097895	440667
5	4096863	442097	10	4097784	440730
6	4097104	442191	11	4097769	440891
7	4097150	441920	12	4097986	440820

Le distanze spaziali fra i punti sono modeste ed individuabili dalla seguente immagine grafica, ricavata dalle coordinate geografiche:



Nella seguente mappa sono individuate le zone oggetto di monitoraggio.



3.1.2 Caratteristiche idrochimiche ed ottiche istantanee

Le misure eseguite in campo mediante sonda Sonda YELLOW SPRING INC. (mod. YSI 556 MPS) e disco di Secchi, permettono di tracciare un profilo alquanto preciso delle condizioni ambientali del Biviere. Nel Lago Grande i valori rilevati sono i seguenti:

N°	Prof. max	Temperatura	pH	Cond. Tot.	O.D.	O.D.	Redox	Trasparenza
	m	°C	-	µS/cm	mg/l	% satur.	mV	m
1	0.70	19.8	7.2	5182	6.4	71	-100	0.15
2	1.20	20.0	7.6	5179	10.3	115	-117	0.15
3	0.50	20.1	7.7	5181	13.9	155	-95	0.10
4	0.30	19.8	7.8	5175	16.0	178	-100	0.10
5	0.20	20.2	7.8	5007	16.5	185	-100	0.10
6	0.40	20.7	7.9	5202	21.1	239	-90	0.10
7	1.00	20.0	7.8	5168	16.3	182	-94	0.20

Poiché sono state eseguite varie misure, dalla superficie al fondo, si è appurato che anche nelle sezioni con maggiore profondità non ci assolutamente gradienti verticali imputabili ad eventuale stratificazione termica. Le condizioni morfometriche del Biviere, tipiche dei laghi piatti, con modesti battenti idrici ed ampie superfici fanno sì che il moto del vento renda omogenei i profili verticali. Per contro in senso spaziale le differenze sono più evidenti ed imputabili anche alla diversa influenza delle condizioni litorali. Questa considerazione vale in particolare per la stazione 1 nella quale il valore di pH e la concentrazione dell'ossigeno disciolto con la relativa percentuale di saturazione sono nettamente inferiori rispetto a tutte le altre zone.

E' lo stesso ossigeno disciolto il parametro che mostra la massima variabilità spaziale e raggiunge nel punto identificato con il numero 6, in un tratto litorale, la massima concentrazione con una percentuale di saturazione di ben 2,4 volte superiore all'equilibrio fisico-chimico fra acqua ed atmosfera. Le sovrasaturazioni, del resto molto comuni in tutti i rilievi, ad eccezione della citata stazione 1, sono il segnale evidente di un elevato livello di trofia con la conseguente produzione di ossigeno disciolto da parte della componente fitoplanctonica. A conferma di questa condizione si ha un innalzamento dei valori di pH e i generalmente molto modesti valori di trasparenza. Inoltre si deve mettere in evidenza che si è constatata la completa assenza di macrofite acquatiche nelle aree pelagiche (a maggiore distanza dalla riva) ed anche la fascia litorale appare (vedi foto) alquanto spoglia, probabilmente a causa del forte abbassamento del livello del lago. Quindi per queste ragioni si ha la certezza che l'elevata produttività primaria è svolta dai popolamenti fitoplanctonici.

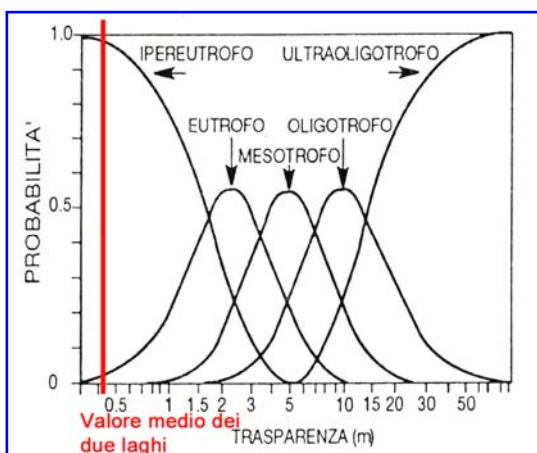
La trasparenza oscilla fra i 10 e 20 cm, valori decisamente bassi che tuttavia fanno ritenere che lo strato eufotico, quello nel quale arriva radiazione solare sufficiente agli organismi autotrofi, si estende dalla superficie a 30-60 cm coinvolgendo quindi, per le limitate profondità, ampie zone del lago. Si pone quindi il quesito: perché le macrofite acquatiche sono quasi del tutto assenti nonostante le condizioni ambientali siano a loro estremamente favorevoli?

Nella parte del Biviere identificata come Lago Piccolo e alla foce del F. Dirillo le condizioni istantanee sono le seguenti:

N°	Prof. max	Temperatura	pH	Cond. Tot.	O.D.	O.D.	Redox	Trasparenza
	m	°C	-	μS/cm	mg/l	% satur	mV	m
9	0.3	19.8	7.6	7400	18.2	204	-87	0.15
10	0.2	19.5	7.7	7442	20.9	233	-90	0.15
11	1.0	20.2	7.4	7350	21.3	240	-89	0.25
12	0.3	19.5	7.4	5014	18.5	205	-85	0.10
Foce	0.6	20.4	7.8	13570	19.7	229	-84	0.10

Le acque lacustri delle stazioni 9, 19 e 11 hanno una conducibilità totale nettamente superiore a quella misurata nel Lago Grande, e il F. Dirillo ha, nell'unico punto di campionamento, un valore di conducibilità doppio rispetto al Lago Piccolo.

I motivi di queste differenze si possono individuare nel limitato volume di acque invase nel Lago Piccolo e nella vicinanza fra mare e foce del F. Dirillo. Le elevate percentuali di saturazione dell'ossigeno disciolto fanno ritenere anche il Lago Piccolo eccessivamente produttivo nella componente fitoplanctonica anche se lo sviluppo delle macrofite riparie è leggermente superiore a quello osservato nel Lago Grande. I valori di trasparenza delle acque di entrambi gli invasi sono particolarmente bassi. E' risaputo che la diffusione della radiazione solare nel mezzo

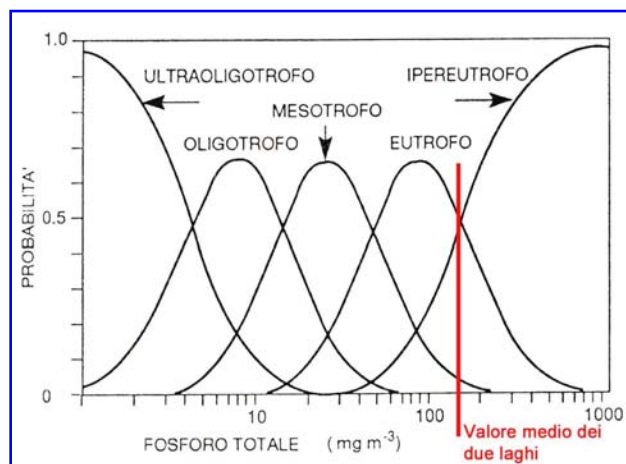


acquatico è condizionata dalle “particelle” organiche ed inorganiche sospese nelle acque. La torbidità minerale e lo sviluppo dei popolamenti fitoplanctonici concorrono a causare la rapida estinzione della radiazione solare incidente. E’ tuttavia possibile individuare il probabile livello di trofia adottando modelli probabilistici testati su innumerevoli laghi e proposti da organizzazioni internazionali (EOCD). Nello specifico caso del Biviere, i valori di trasparenza misurati forniscono l’indicazione di un livello di trofia particolarmente elevato con il 98% di probabilità che siano acque iperutrofizzate e il 2% eutrofizzate.

3.1.3 Comparto Acqua

I risultati completi delle analisi eseguite sui campioni di acque prelevati nelle diverse stazioni sono riportati nella Tab 2.1. Rispetto alle esigenze della fauna ittica Ciprinicola i dati acquisiti permettono di asserire che:

- in tutte le stazioni, con la sola eccezione della prima si hanno percentuali di saturazione dell’ossigeno disciolto di gran lunga superiori ai limiti;
- in alcune stazioni (3; 5; 6; 8; 12) si ha un eccesso di Materiali in Sospensione;
- le concentrazioni di Fosforo totale sono quasi sempre superiori al valore guida;
- i Tensioattivi anionici sono sempre superiori al limite prefissato.



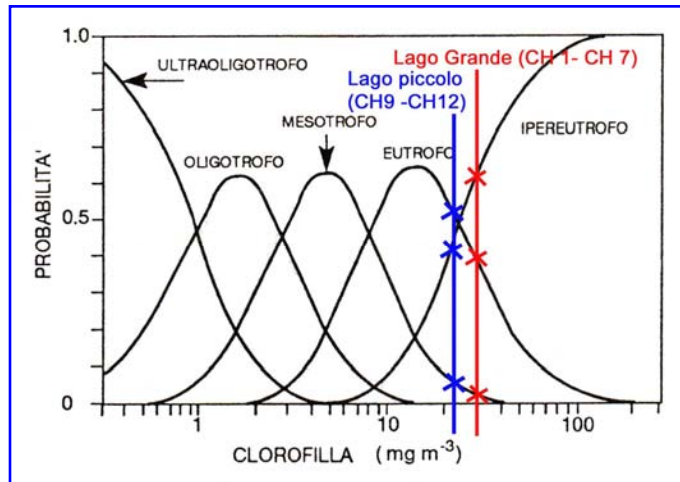
Fra gli aspetti positivi si segnala un tenore di metalli pesanti sempre inferiore ai limiti consentiti e la limitata concentrazione di idrocarburi di origine petrolifera, nettamente più bassa della soglia di legge. Risulta quindi evidente che l’attuale condizione idrochimica dovrebbe

essere oggetto di specifiche azioni mirate alla riduzione di alcuni elementi e composti. Per giudicare il livello di trofia delle acque si sono applicati diversi metodi e modelli.

In base alle concentrazioni medie di Fosforo totale il Lago del Biviere è un ambiente fortemente produttivo, infatti come si apprezza dal grafico a fianco, si trova nella prevalente condizione di Eutrofia-Ipertrofia.

Dal rapporto fra Azoto inorganico e Fosforo totale si ricava un valore molto basso, compreso fra 1 e 3 e questo evidenzia un eccesso di Fosforo che quindi non rappresenta il fattore limitante.

Infatti con rapporti ponderali inferiori a 7 il fattore limitante potenziale è l'Azoto, con N/P compreso fra 7 e 12 entrambi i nutrienti non sono limitanti e per valori superiori a 12 il fosforo assume questo



ruolo di controllo (Jorgensen & Vollenveider, 1989; OSCE, 1982).

Con le concentrazioni medie di Clorofilla *a* presenti nelle acque dei due invasi si è adottata un'analoga strategia valutativa e si sono individuati i livelli di trofia confrontando i valori sulle curve probabilistiche. In questo caso si riscontra una modesta differenza fra la condizione dei due invasi, quello definito grande ha concentrazioni di Clorofilla maggiori e di conseguenza una condizione leggermente più rivolta all'ipertrofia delle acque.

Al fine di una prima ed integrata classificazione dello stato ecologico del lago Biviere si è valutato lo stato trofico così come indicato in tabella 11 del D.L.152/99. La classe attribuita è quella che emerge dal risultato peggiore tra i quattro parametri indicati.

PARAMETRO	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3	CLASSE 4	CLASSE 5
TRASPARENZA (M)	> 5	≤ 5	≤ 2	≤ 1,5	≤ 1
OSSIGENO IPOLIMNICO (%DI SATURAZIONE)	> 80%	≤ 80%	≤ 60%	≤ 40%	≤ 20%
CLOROFILLA "A" (µG/L)	< 3	≤ 6	≤ 10	≤ 25	> 25
FOSFORO TOTALE (P µG/L)	< 10	≤ 25	≤ 50	≤ 75	> 100

Lo stato ecologico appartiene alla V classe, la peggiore e non si è tenuto conto della percentuale di saturazione dell'ossigeno ipolimnico in quanto nei laghi piatti come il Biviere, nei quali per la limitata profondità e l'ampia superficie non si instaurano gradienti termici persistenti, i deficit in ossigeno sono da ricercare non nell'ipolimnio ma nelle ultime ore della nottata, quando sono intervenuti solo processi degradativi e non produttivi.

I risultati delle indagini mostrano che lo stato ambientale del Biviere è "Pessimo", nonostante i bassi valori rilevati con le analisi dei metalli pesanti e dei composti organici.

Stato Ecologico ⇒	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Concentrazione inquinanti di cui alla Tabella 1 ⇓					
≤ Valore Soglia	ELEVATO	BUONO	SUFFICIENTE	SCADENTE	PESSIMO
> Valore Soglia	SCADENTE	SCADENTE	SCADENTE	SCADENTE	PESSIMO

Infine si è applicato un ulteriore metodo integrato, proposto dal D.L. 152/99 per valutare lo stato ecologico e chimico delle acque marine costiere. Si tratta dell'indice trofico TRIX che è così formulato:

$$\text{INDICE TROFICO TRIx} = [\text{Log}_{10} (\text{CHA} \cdot \text{D\%O} \cdot \text{N} \cdot \text{P}) + 1,5] / 1,2$$

CHA= CLOROFILLA "A" (MG/M³)

D%O= OSSIGENO DISCIOLTO COME DEVIAZIONE % ASSOLUTA DELLA SATURAZIONE
(100-O₂D%)

P= FOSFORO TOTALE (MG/ M³)

N= N-(NO₃ + NO₂ + NH₃) (MG/M³)

I valori che si ottengono possono essere confrontati con la seguente scala di valutazione:

Indice di trofia	Stato
2 – 4	ELEVATO
4 – 5	BUONO
5 – 6	MEDIOCRE
6 – 8	SCADENTE

NEL CASO DEL BIVIERE L'INDICE TRIx È 7,6 PER IL LAGO GRANDE E 7.9 PER QUELLO PICCOLO, QUINDI IN ENTRAMBI GLI SPECCHI SI HANNO VALORI PROPRI DI AMBIENTI GIUDICABILI "SCADENTE" E A QUESTO GIUDIZIO SEGUE, SEMPRE IN RELAZIONE ALLA STESSO DECRETO LEGGE, UNA SCHEMATICA IDENTIFICAZIONE DELLE PRINCIPALI CONDIZIONI:

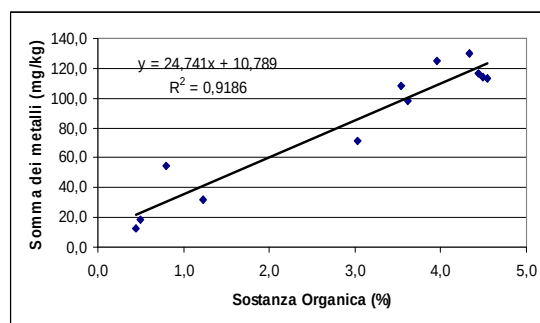
STATO SCADENTE	ELEVATA TORPIDITÀ DELLE ACQUE DIFFUSE E PERSISTENTI ANOMALIE NELLA COLORAZIONE DELLE ACQUE DIFFUSE E PERSISTENTI IPOSSIE/ANOSSIE NELLE ACQUE BENTICHE MORIE DI ORGANISMI BENTONICI ALTERAZIONE/SEMPLIFICAZIONE DELLE COMUNITÀ BENTONICHE DANNI ECONOMICI NEI SETTORI DEL TURISMO, PESCA ED ACQUICOLTURA
-----------------------	---

3.1.4 Comparto Sedimento

Come per le altre indagini analitiche, i risultati delle specifiche analisi sono riportate in dettaglio nelle Tab. 2.2 e 2.3. La granulometria prevalente delle singole bennate, le caratteristiche visive ed olfattive del sedimento, oltre ad una sintetica descrizione di alcune osservazioni immediate sono tutte



informazioni riportate nelle tabelle 2.1.7.f e 2.1.7.g relative alla fauna macrobentonica. In generale è bene sottolineare che la maggioranza dei sedimenti apparivano



prevalentemente composti da argilla e limo, avevano un colore molto scuro, sintomatico di frequenti e prolungatiti deficit di ossigeno ed erano ricoperti da una “poltiglia vegetale” costituita da alghe sedimentate, come risulta dalla foto a fianco. In altri casi, là

dove predomina il sedimento sabbioso, la prima pellicola, di alcuni millimetri è di colore chiaro, ambiente ossidato ma al di sotto, invece il sedimento appariva completamente scuro e quindi anossico.

Osservando i risultati analitici risulta subito molto evidente che si ha una buona correlazione, altamente significativa, fra la ricchezza in sostanza organica e la sommatoria delle concentrazioni dei metalli pesanti.

L'esame delle singole concentrazioni dei parametri misurati mette in evidenza che il contenuto di metalli pesanti è omogeneamente basso, entro i limiti tipici di un terreno naturale (valori ricavati da: Intervallo di concentrazione e valori dei suoli. - Fonte IPLA).

Dal confronto dei risultati conseguiti con i limiti proposti dall'EPA per giudicare il grado d'inquinamento dei sedimenti e con i limiti stabiliti dal Ministero dell'Ambiente

dell'Ontario per individuare un eventuale effetto di tossicità nella rete alimentare risulta che le sole concentrazioni di Arsenico sono proprie di ambienti fortemente inquinati in tutti i sedimenti con l'eccezione di quelli campionati nella stazione 12. Sono superiori, per la normativa dell'Ontario al limite "basso effetto" (Le) e inferiori al "limite di tolleranza" (Tl) delle specie acquatiche. Anche il Nichel nelle stazioni 1, 5, 7 e 11 ha concentrazioni superiori al limite dell'assenza di effetto (Ne), ma inferiori a quelle di "basso effetto" per un'eventuale trasferimento di tossicità all'interno degli organismi acquatici.

E' opportuno mettere in evidenza che tutti gli altri elementi e composti (PCB, IPA e Diossine comprese) hanno concentrazioni accettabili, contenute all'interno della variabilità naturale, ma le concentrazioni dell'Arsenico sono da considerare con grande attenzione perché i valori sono propri del range definibile biologicamente disponibile, in una concentrazione tale da non arrecare immediati danni vitali alle specie acquatiche, ma sufficienti per entrare nella rete alimentare e produrre in livelli successivi un grave danno da bioaccumulo.

3.1.5 Comparto Biologico

Sono stati oggetto di indagine i popolamenti fitoplanctonici, quelli zooplanctoci e quelli bentonici. Tutti e tre questi comparti biologici hanno in comune due aspetti contrapposti ma reciprocamente dipendenti: la limitatezza di specie o Unità sistematiche individuate e la elevata abbondanza numerica delle poche specie presenti. E' una situazione che è facile riscontrare negli ambienti soggetti a inquinamenti o disturbi di varia natura, le elevate densità sono indotte dal fatto che i pochi organismi che riescono a sopravvivere in questi ambienti hanno a disposizione una grande quantità di risorse alimentari ed hanno una limitatissima o nulla competizione e predazione da parte delle altre specie.

La consistenza numerica o densità, espressa per milioni di cellule al litro, delle singole specie che compongono i popolamenti fitoplanctonici del Biviere è la seguente tabella:

	Lago Grande		Lago Piccolo	
FITOPLANCTON	St. 2	St. 7	St. 10	St. 11
Cianoficee				
<i>Anabaena augstumalis</i>	3.7			7.5
<i>Aphanizomenon gracile</i>	357.8	514.3	125.8	310.3
<i>Aphanothece stagnina</i>	14.9	22.4		
Dinoflagellate				
<i>Glenodinium ulginosum</i>	0.2	0.7		
<i>Gymnodinium palustre</i>	0.2	1.4	0.2	
Criptoficee				
<i>Chlamydomonas pisiiformis</i>	0.5	2.3	0.2	0.7
Cloroficee				
<i>Volvox globator</i>	14.9	14.9		14.9
<i>Spondylomorum quaternarium</i>	1.9		3.7	
Densità TOTALE (cell. 10⁶/l)	394.1	556.0	130.0	333.3

Le informazioni che si ricavano dall'indagine compiuta sulla componente fitoplanctonica sono particolarmente importanti e degne di grande attenzione per gli eventuali interventi di risanamento. Infatti, oltre alle elevate densità totali, mediamente maggiori nelle stazioni campionate nell'invaso grande, risulta evidente la particolare monotonia perché un solo organismo: *Aphanizomenon gracile* costituisce dal 91 al 97% della densità complessiva.

Siamo di fronte ad un invaso che è:

- ◆ eutrofizzato e le elevate densità fitoplanctoniche confermano quanto si era notato dai risultati delle analisi chimiche e ottiche delle acque;
- ◆ dominato dalle Cianoficee, che al momento del campionamento mostrano una elevata fioritura (bloom algale).

Le Cianoficee, fra i possibili gruppi fitoplanctonici colonizzatori delle acque interne, sono quelle che mostrano le maggiori problematiche ambientali in quanto alcuni gruppi producono ittiotossine, altre sono fissatrici di azoto molecolare, altre ancora impartiscono odori e sapori sgradevoli alle acque.

In particolare di *Aphanizomenon gracile* si sa che probabilmente causa nanismo nei pesci e direttamente o indirettamente produce ittiotossine. La produzione indiretta di ittiotossine è stata messa in evidenza quando per motivi termici, ottici e di pressione queste alghe formano un tappeto superficiale. In questo caso, per l'esposizione diretta alla radiazione solare le alghe muoiono, si adagiano sul fondo e vanno incontro ad una rapida decomposizione con conseguente forte consumo di ossigeno disciolto e liberazione di prodotti intermedi che sono risultati tossici per molti pesci. Il sedimento del Lago Biviere è infatti ricoperto da una "poltiglia vegetale" costituita da alghe sedimentate.

Quanto è stato rilevato nel Lago Biviere è quindi un aspetto grave ma ben conosciuto, infatti si verifica in molte località temperate, nel periodo estivo, in laghi ad elevata trofia e queste fioriture di Cianoficee possono essere viste come una situazione in cui si realizza un equilibrio monospecifico, favorito dal perdurare di condizioni di elevata temperatura ed elevato apporto di nutrienti.

Il confronto fra i valori sintetici di varietà e densità fitoplanctonica (segue tabella):

	Lago Grande		Lago Piccolo	
	St. 2	St. 7	St. 10	St. 11
Varietà (n. specie)	8	6	4	4
Densità ($10^6/l$)	394.1	556.0	130.0	333.3

evidenza che nel Biviere sussistono condizioni ambientali particolarmente squilibrate e il Lago Piccolo è quello che mostra la minore variabilità tassonomica. I valori degli indici di diversità e dominanza, sinteticamente, illustrano la situazione riscontrata (segue tabella):

	Lago Grande		Lago Piccolo	
Indici di diversità	St. 2	St. 7	St. 10	St. 11
H'	0.61	0.50	0.23	0.44
H max	3.00	2.58	2.00	2.00
J	0.20	0.19	0.11	0.22
D	1.08	0.77	0.63	0.55

La diversità è particolarmente bassa, sempre inferiore al 20% della diversità massima e la ricchezza in specie (D) è altrettanto modesta.

Lo zooplancton è costituito dai seguenti organismi, con relativa densità (segue tabella):

	Lago Grande		Lago Piccolo	
ZOOPLANKTON	St. 2	St. 7	St. 10	St. 11
Rotiferi				
<i>Asplanchna brightwelli-sieboldi</i>	249	498	498	249
<i>Brachionus calyciflorus</i>		249		
<i>Keratella cochlearis</i>		249	746	1742
<i>Polyarthra sp.</i>	249			498
Cladoceri				
<i>Acantholeberis curvirostris</i>	995	746	249	2239
<i>Alona rectangula</i>		249		
Copepodi				
Naupli	995	249	498	995
Copepoditi	2239	498	1244	1990
<i>Macrocylops albidus</i>	249		746	249
Densità TOTALE (org./m³)	4976.1	2736.9	3980.9	7961.8

Le specie più abbondanti sono i copepoditi e un Cladocero (*Acantholeberis curvirostris*) che è chiamato anche “granchietto di palude”.

La comunità zooplanctonica, seppure limitata nella varietà di specie risulta ben equilibrata dal punto di vista numerico, infatti l'indice di Diversità varia da 2,1 a 2,7 e costituisce l'81-95% della diversità massima (segue tabella):

	Lago Grande		Lago Piccolo	
	St. 2	St. 7	St. 10	St. 11
Varietà (n.specie)	6	7	6	7
H'	2.10	2.66	2.43	2.43
H max	2.58	2.81	2.58	2.81
J	0.81	0.95	0.94	0.87
D	2.00	2.92	2.16	2.02

Le caratteristiche granulometriche e visive del sedimento che ospita le comunità macrobentoniche sono le seguenti tabelle:

Condizioni del sedimento	Lago Grande						
	1	2	3	4	5	6	7
Granulometria	limo-argilla	limo-argilla	limo-argilla	Limo-argilla	limo	sabbia	sabbia-limo
colore	Scuri	scuri	scuri	Scuri	chiaro	chiaro	chiaro
stato	anossico	anossico	anossico	anossico	ossidato	ossidato	ossidato

Condizioni del sedimento	Foce Dirillo	Lago Piccolo			
		8	9	10	11
Granulometria		limo-argilla	sabbia	sabbia	limo-argilla
Colore		chiaro	chiaro	chiaro	chiaro
Stato		ossidato solo in superficie	ossidato solo in superficie	ossidato solo in superficie	ossidato solo in superficie

Il macrozoobentos lacustre è costituito dai seguenti organismi, con relativa abbondanza (segue tabella):

			Lago Grande							Lago Piccolo			
			1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12
	DITTERI												
	Chironomidae	R											
	Chironomus salinarius	R	4	12	4	8	19		11	11	7	6	6
	Chironomus plumosus	R	10	3	9	5	1		7	8	9	11	3
	Pupe di Chironomidae	R	3	1	2	1	4		4	4		2	3
	exuvie di Chironomidae	R	4	2	2				1		1	3	1
	CROSTACEI												

Palaemonidae	T									2		
OLIGOCHETI												
Naididae	R	14	6	17	15	7	2	11	4	14		5
Tubificidae	R	31	9	27	10	19	4	3	21	19	21	9
<i>Branchiura sowerbyi</i>	R	3		3	6			2	3	3		4
GASTEROPODI												
Physidae	S											
<i>Physa</i>	S				2							
Hydrobioidea	S											
<i>Hydrobia</i>	S				2							

Le specie limicole, quelle più adattabili alle prolungate carenze di ossigeno disciolto sono gli organismi che caratterizzano la fauna bentonica del Biviere. La loro particolare dominanza numerica e quasi esclusiva presenza avvallano le osservazioni fatte a riguardo dell'elevato livello di trofia delle acque e alla fioritura e successiva moria di Cianoficee.

La fascia litorale, probabilmente a causa della progressiva riduzione di livello e per la mancanza di vegetazione riparia, non ha, come di solito accade, una maggiore varietà di organismi bentonici, anzi sembra che nel Biviere si verifichi la condizione opposta.

I risultati sintetici riportati nella sottostante tabella mostrano che fra le diverse aree del Biviere c'è una notevole differenza qualitativa e quantitativa delle comunità bentoniche (segue tabella):

	Lago Grande							Lago Piccolo			
Stazioni	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12
Abbondanza relativa	69	33	64	49	50	6	39	51	55	43	31
Varietà	7	6	7	8	5	2	7	6	7	5	7
H'	2.26	2.20	2.20	2.62	1.86	0.92	2.45	2.24	2.35	1.88	2.59
H max	2.81	2.58	2.81	3.00	2.32	1.00	2.81	2.58	2.81	2.32	2.81
J	0.80	0.85	0.78	0.87	0.80	0.92	0.87	0.87	0.84	0.81	0.92
D	1.65	1.72	1.68	2.06	1.28	1.12	1.91	1.53	1.75	1.33	2.04

La comunità macrobentonica rilevata nel Fiume Dirillo è, come era facile attendersi, decisamente più ricca per varietà rispetto a quella lacustre e sono presenti, seppure non abbondanti, organismi tipici delle acque correnti (segue tabella):

Foce Dirillo				
EFEMEROTTERI	Baetidae	<i>Centroptilum sp.</i>	R	1
COLEOTTERI	Dytiscidae	<i>Dytiscus sp.</i>	P	2
DITTERI	Ceratopogonidae		P	1
	Chironomidae	<i>Chironomus salinarius</i>	R	4
		<i>Chironomus plumosus</i>	R	12
		Pupe di Chironomidae	R	7
		exuvie di Chironomidae	R	4
CROSTACEI	Asellidae	<i>Asellus aquaticus</i>	T	1
	Gammaridae	<i>Gammarus italicus</i>	T	2
OLIGOCHETI	Naididae		R	8
	Tubificidae	<i>Tubifex sp.</i>	R	8
		<i>Branchiura sowerbyi</i>	R	6
GASTEROPODI	Physidae	<i>Physa</i>	S	2

Per poter giudicare la qualità di questo corso d'acqua si è applicato alla comunità zoobentonica campionata l'Indice Biotico Esteso (I.B.E.) previsto dal D.L. 152/99. Il valore dell'I.B.E. del Fiume Dirillo è 6 e la classe di qualità è la III, propria di un "Ambiente inquinato o comunque alterato".

Repertorio Fotografico

**FOCE DEL FIUME
DIRILLO, STAZIONE 8**



**FOCE DEL FIUME
DIRILLO, STAZIONE 8**



**FOCE DEL FIUME
DIRILLO, STAZIONE 8**



**FOCE DEL FIUME
DIRILLO, STAZIONE 8**



**LAGO GRANDE,
STAZIONE 1 E 2**



**LAGO GRANDE,
STAZIONE 3**



**LAGO GRANDE,
STAZIONE 4**



**LAGO GRANDE,
STAZIONE 5**



**LAGO GRANDE,
STAZIONE 6**



**LAGO PICCOLO,
STAZIONE 9 E 10**



**LAGO PICCOLO,
STAZIONE 11**



**LAGO PICCOLO,
STAZIONE 12**



Tab. 3.1 A

Descrizione campione		Acqua 1	Acqua 2	Acqua 3	Acqua 4	Acqua 5	Acqua 6
Data Consegna		08-nov-2002	08-nov-2002	08-nov-2002	08-nov-2002	08-nov-2002	08-nov-2002
Analisi n°		2002024402	2002024403	2002024404	2002024405	2002024406	2002024407
Parametri	U.M.	Risultati	Risultati	Risultati	Risultati	Risultati	Risultati
Materiali in sosp. totali (MST)	mg/l	67,5	42	81,7	67,5	110	208
BOD5	mg/l	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5	4	< 2,5
Alcalinità totale (CaCO ₃)	mg/l	108	108	100	104	100	88
Clorofilla A	mg/l	0,036	0,027	0,017	0,028	0,038	0,035
Ortofosfati (ione fosfato)	mg/l	< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,15
Fosforo totale (P)	mg/l	0,15	0,16	0,18	0,14	0,17	0,21
Ammoniaca non ionizzata (NH ₃)	mg/l	0,06	< 0,025	< 0,025	< 0,025	< 0,025	< 0,025
Azoto ammoniacale (ione ammonio)	mg/l	0,06	0,06	0,06	0,02	0,09	0,04
Azoto nitroso (N)	mg/l	0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01
Azoto nitrico (N)	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Azoto totale (N)	mg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Tensioattivi anionici (MBAS)	mg/l	0,31	0,25	0,28	0,28	0,27	0,32
Cloro residuo totale (HOCl)	mg/l	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004
Cadmio (Cd)	mg/l	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005
Cromo totale (Cr)	mg/l	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Mercurio (Hg)	mg/l	0,00013	0,00006	0,00006	0,00005	0,00005	< 0,00005
Nichel (Ni)	mg/l	0,003	0,002	0,002	< 0,002	0,002	0,003
Piombo (Pb)	mg/l	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007
Rame (Cu)	mg/l	< 0,002	< 0,002	< 0,002	0,012	< 0,002	< 0,002
Zinco (Zn)	mg/l	< 0,001	0,014	0,029	0,007	0,014	< 0,001
Idrocarburi < C12	mg/l	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Idrocarburi > C12	mg/l	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Composti fenolici	mg/l	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

ANALISI ACQUE SUPERFICIALI

Tab. 3.1 B

Descrizione campione		Acqua 7	Acqua 8	Acqua 9	Acqua 10	Acqua 11	Acqua 12
Data Consegna		08-nov-2002	08-nov-2002	08-nov-2002	08-nov-2002	08-nov-2002	08-nov-2002
Analisi n°		2002024408	2002024409	2002024410	2002024411	2002024412	2002024413
Parametri	U.M.	Risultati	Risultati	Risultati	Risultati	Risultati	Risultati
Materiali in sosp. totali (MST)	mg/l	89	172	72	75	74	402
BOD5	mg/l	< 2,5	2,5	10	< 2,5	< 2,5	< 2,5
Alcalinità totale (CaCO ₃)	mg/l	120	164	112	108	108	104
Clorofilla A	mg/l	0,032	0,003	0,006	0,016	0,018	0,054
Ortofosfati (ione fosfato)	mg/l	< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,15
Fosforo totale (P)	mg/l	0,15	0,18	0,12	0,11	0,17	0,24
Ammoniaca non ionizzata (NH ₃)	mg/l	< 0,025	< 0,025	< 0,025	< 0,025	< 0,025	< 0,025
Azoto ammoniacale (ione ammonio)	mg/l	0,04	0,04	0,05	0,06	0,04	0,07
Azoto nitroso (N)	mg/l	0,01	0,01	0,03	0,06	0,04	0,09
Azoto nitrico (N)	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Azoto totale (N)	mg/l	< 1	< 1	1,5	< 1	< 1	< 1
Tensioattivi anionici (MBAS)	mg/l	0,26	0,42	0,26	0,31	0,34	0,32
Cloro residuo totale (HOCl)	mg/l	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004
Cadmio (Cd)	mg/l	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005
Cromo totale (Cr)	mg/l	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Mercurio (Hg)	mg/l	< 0,00005	0,00009	0,0005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005
Nichel (Ni)	mg/l	< 0,002	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003
Piombo (Pb)	mg/l	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007
Rame (Cu)	mg/l	< 0,002	0,005	< 0,002	0,002	< 0,002	0,002
Zinco (Zn)	mg/l	0,007	0,009	< 0,001	0,066	0,012	0,009
Idrocarburi < C12	mg/l	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Idrocarburi > C12	mg/l	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Composti fenolici	mg/l	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

ANALISI ACQUE SUPERFICIALI

Tab.3.2 A

Descrizione campione		Sedimento 1	Sedimento 3	Sedimento 4	Sedimento 5	Sedimento 6
Data Consegna		08-nov-2002	08-nov-2002	08-nov-2002	08-nov-2002	08-nov-2002
Analisi n°		2002024414	2002024416	2002024417	2002024418	2002024419
Parametri	U.M.	Risultati	Risultati	Risultati	Risultati	Risultati
Sostanza organica	% s.s.	4,44	3,62	4,49	4,54	0,49
Arsenico (As)	mg/Kg s.s.	16,4	16,2	20,1	16,4	4,55
Cadmio (Cd)	mg/Kg s.s.	0,238	0,101	0,121	0,174	0,115
Cromo (Cr)	mg/Kg s.s.	18,7	14,4	17,3	18,1	2,2
Mercurio (Hg)	mg/Kg s.s.	0,0493	0,0374	0,0844	0,0346	0,0054
Nichel (Ni)	mg/Kg s.s.	15,1	12,2	14,4	15,2	2,2
Piombo (Pb)	mg/Kg s.s.	11,1	9,2	10,2	9,11	1,14
Rame (Cu)	mg/Kg s.s.	10,6	9,1	10,7	11,9	0,9
Zinco (Zn)	mg/Kg s.s.	44,7	37,3	40,9	42,3	7,1
Pesticidi organoclorurati	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
PCB	mg/Kg s.s.	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici):	---	---	---	---	---	---
Naftalene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Acenaftilene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Acenaftene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fluorene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fenantrene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Antracene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fluorantene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Pirene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[a]antracene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Crisene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo(b)fluorantene	mg/kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo(k)fluorantene	mg/kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[a]pirene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Indeno[1,2,3-cd]pirene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Dibenzo[a,h]antracene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[ghi]perilene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Saggio tossicità acuta (Vibrio bischeri)	% inibizione	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20

ANALISI SEDIMENTI

Tab.3.2 B

Descrizione campione	Sedimento 7		Sedimento 8	Sedimento 9	Sedimento 11	Sedimento 12
Data Consegna	08-nov-2002		08-nov-2002	08-nov-2002	08-nov-2002	08-nov-2002
Analisi n°	2002024420		2002024421	2002024422	2002024424	2002024425
Parametri	U.M.	Risultati	Risultati	Risultati	Risultati	Risultati
Sostanza organica	% s.s.	3,96	3,03	1,23	4,33	0,45
Arsenico (As)	mg/Kg s.s.	17,2	10,1	8,7	24,4	2,51
Cadmio (Cd)	mg/Kg s.s.	0,151	0,122	0,068	0,551	0,084
Cromo (Cr)	mg/Kg s.s.	21,2	10,9	3,2	19,1	1,3
Mercurio (Hg)	mg/Kg s.s.	0,0336	0,0368	0,0077	0,0451	0,0333
Nichel (Ni)	mg/Kg s.s.	16,2	8,4	3,7	15,6	1,5
Piombo (Pb)	mg/Kg s.s.	12,7	6,22	3,2	13,2	1,57
Rame (Cu)	mg/Kg s.s.	11,5	8,1	1,8	11,1	0,7
Zinco (Zn)	mg/Kg s.s.	46,1	27,3	11,6	46,4	5,2
Pesticidi organoclorurati	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
PCB	mg/Kg s.s.	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici):	---	---	---	---	---	---
Naftalene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Acenaftilene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Acenaftene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fluorene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fenantrene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Antracene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fluorantene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Pirene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[a]antracene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Crisene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo(b)fluorantene	mg/kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo(k)fluorantene	mg/kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[a]pirene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Indeno[1,2,3-cd]pirene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Dibenzo[a,h]antracene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[ghi]perilene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Saggio tossicità acuta (Vibrio bischeri)	% inibizione	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20

ANALISI SEDIMENTI

Tab.3.3

Descrizione campione		Sedimento 2	Sedimento 10
Data Consegna		08-nov-2002	08-nov-2002
Analisi n°		2002024415	2002024423
Parametri	U.M.	Risultati	Risultati
Sostanza organica	% s.s.	3,54	0,8
Arsenico (As)	mg/Kg s.s.	16,4	14,2
Cadmio (Cd)	mg/Kg s.s.	0,125	0,067
Cromo (Cr)	mg/Kg s.s.	17,2	5,6
Mercurio (Hg)	mg/Kg s.s.	0,0501	0,0064
Nichel (Ni)	mg/Kg s.s.	13,9	8,2
Piombo (Pb)	mg/Kg s.s.	9,44	4,08
Rame (Cu)	mg/Kg s.s.	9,8	9,6
Zinco (Zn)	mg/Kg s.s.	41,3	12,9
Pesticidi organoclorurati	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
PCB	mg/Kg s.s.	< 0,1	< 0,1
IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici):	---	---	---
Naftalene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Acenaftilene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Acenaftene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Fluorene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Fenantrene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Antracene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Fluorantene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Pirene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[a]antracene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Crisene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Benzo(b)fluorantene	mg/kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Benzo(k)fluorantene	mg/kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[a]pirene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Indeno[1,2,3-cd]pirene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Dibenzo[a,h]antracene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[ghi]perilene	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Sommatoria PCDD,PCDF (conversione T.E.)	mg/Kg s.s.	< 0,0001	< 0,0001
Saggio tossicità acuta (Vibrio fischeri)	% inibizione	< 20	< 20

3.1.6 Qualità delle acque sotterranee

Le analisi illustrate nella tabella allegata, per la descrizione della qualità, sono state confrontate con i limiti per le acque sotterranee DM 471/99 (valori in **grassetto**), con i limiti dell'acqua potabile Dlgs. 31/01 (valori in *corsivo*) e con i limiti della Legge 152/99 (valori normali).

I dati evidenziano che non si ha contaminazione da sostanze organiche:

- Pesticidi organoclorurati, solventi aromatici e IPA sono risultati sempre inferiori ai rispettivi limiti di rilevabilità, gli idrocarburi totali sono presenti nel pozzo 6A in tracce e negli altri in concentrazioni inferiori al limite di rilevabilità.

Per quanto riguarda il contenuto di sostanze inorganiche e metalli si è osservato quanto di seguito descritto:

- Il pH misurato ha valori prossimi alla neutralità, con tenori compresi fra 6,82 e 7,29;
- La conducibilità elettrica supera il limite per l'uso potabile nei pozzi 1A, 18, 2A, 6A, 50, 7A e 12A;
- N nitroso supera il limite di accettabilità nel solo pozzo 2A, dove sono presenti in concentrazioni significative, fosforo e fosfati (P_2O_5);
- Il contenuto di tensioattivi è elevato in tutti i pozzi con il 12A e 15A che hanno valori inferiori a 0,5 che rappresenta il limite ultimo per la potabilizzazione delle acque secondo la Legge 152/99;
- Si evidenzia infine la presenza di mercurio nel pozzo 12A in concentrazioni superiori al limite di accettabilità per le acque sotterranee (DM 471/99).

In sintesi le acque risultano leggermente salmastre, di qualità scadente a causa della presenza diffusa di tensioattivi e per la presenza puntuale di nitriti e fosfati (pozzo 2A), e di mercurio (pozzo 12A).

Al contrario le sostanze organiche risultano sempre inferiori ai rispettivi limiti di rilevabilità, ad eccezione del pozzo 6A che contiene idrocarburi in tracce, comunque molto al disotto del limite di accettabilità per le acque sotterranee (DM 471/99).

Tab. 3.4

Descrizione campione		DM 471/99	Acqua Pozzo 1°	Acqua Pozzo 18	Acqua Pozzo 2A	Acqua Pozzo 6A	Acqua Pozzo 50
Data Consegna			08-nov-2002	11-nov-2002	11-nov-2002	11-nov-2002	11-nov-2002
Analisi n°			2002024654	2002024655	2002024656	2002024657	2002024658
Parametri	U.M.		Risultati	Risultati	Risultati	Risultati	Risultati
pH	unità pH	6.5 – 9.5	7,15	7,04	6,88	7,14	7,19
Conducibilità elettrica a 20 °C	µS/cm	2500	3020	3340	3440	3810	3250
BOD5	mg/l		7	4	6	6	4
Alcalinità totale (CaCO3)	mg/l		200	248	224	196	176
Azoto ammoniacale (ione ammonio)	mg/l		0,18	0,05	0,13	0,03	< 0,02
Azoto nitroso (N)	mg/l	0.5	0,01	0,03	4,3	0,1	0,02
Azoto nitrico (N)	mg/l	50	7,29	14,4	9,24	37,6	63
Azoto totale (N)	mg/l		17,8	28,3	32,4	44	75,7
Carbonati (CaCO3)	mg/l		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Bicarbonati (ione bicarbonato)	mg/l		244	303	273	239	215
Ortofosfati (ione fosfato)	mg/l		< 0,15	< 0,15	2,35	< 0,15	< 0,15
Fosforo totale (P)	mg/l		< 0,05	< 0,05	0,8	< 0,05	0,05
Tensioattivi totali	mg/l		0,58	0,59	0,52	0,63	0,68
Cloro residuo totale (HOCl)	mg/l		< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004
Arsenico (As)	mg/l	0.01	0,001	0,001	0,002	0,009	0,008
Calcio (Ca)	mg/l		175	155	304	234	239
Cadmio (Cd)	mg/l	0.005	0,00011	< 0,00005	0,00006	< 0,00005	< 0,00005
Cromo totale (Cr)	mg/l	0.05	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Magnesio (Mg)	mg/l		43,5	80,9	66,6	97,1	94,7
Mercurio (Hg)	mg/l	0.001	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005
Nichel (Ni)	mg/l	0.02	0,005	0,002	0,009	0,004	0,003
Piombo (Pb)	mg/l	0.01	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007
Potassio (K)	mg/l		18,3	12,1	4,02	57,5	51,9
Rame (Cu)	mg/l	1	0,014	< 0,002	0,004	0,005	0,003
Sodio (Na)	mg/l		360	402	298	364	323
Zinco (Zn)	mg/l	3	0,091	0,011	0,045	0,022	0,021
Composti fenolici	mg/l		< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Pesticidi organoclorurati	mg/l		< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Solventi aromatici	mg/l		< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Idrocarburi totali (come n-esano)	mg/l		< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI	---		---	---	---	---	---
Naftalene	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Acenaftilene	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Acenafte	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fluorene	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fenantrene	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Antracene	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fluorantene	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Pirene	mg/l	0.05	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[a]antracene	mg/l	0.0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Crisene	mg/l	0.005	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[b]fluorantene	mg/l	0.0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[k]fluorantene	mg/l	0.00005	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[a]pirene	mg/l	0.00001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Indeno[1,2,3-cd]pirene	mg/l	0.0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Dibenzo[a,h]antracene	mg/l	0.00001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[ghi]perilene	mg/l	0.00001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Tab. 3.5

Descrizione campione		DM 471/99	Acqua 4°	Acqua 7A	Acqua 11A	Acqua 12A	Acqua 15A
Data Consegna			03-dic-2002	03-dic-2002	03-dic-2002	03-dic-2002	03-dic-2002
Analisi n°			2002026481	2002026482	2002026483	2002026484	2002026485
Parametri	U.M.		Risultati	Risultati	Risultati	Risultati	Risultati
pH	unità pH	6.5 – 9.5	7,25	7,29	7,26	6,82	6,94
Conducibilità elettrica a 20 °C	µS/cm	2500	2270	3790	2350	4640	2280
BOD5	mg/l		< 2,5	5	4	< 2,5	< 2,5
Alcalinità totale (CaCO3)	mg/l		276	208	176	324	288
Azoto ammoniacale (ioneammonio)	mg/l		0,09	0,03	0,06	< 0,02	0,05
Azoto nitroso (N)	mg/l	0.5	0,02	0,03	0,01	< 0,01	0,04
Azoto nitrico (N)	mg/l	50	19,1	62,4	52,6	32,8	8,04
Azoto totale (N)	mg/l		25,6	74,7	63,3	62,8	9,85
Carbonati (CaCO3)	mg/l		24	< 0,5	16	< 0,5	8
Bicarbonati (ione bicarbonato)	mg/l		307	254	195	395	342
Ortofosfati (ione fosfato)	mg/l		< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,15
Fosforo totale (P)	mg/l		0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Tensioattivi totali	mg/l		0,56	0,85	0,68	0,48	0,46
Cloro residuo totale (HOCl)	mg/l		< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004
Arsenico (As)	mg/l	0.01	0,001	0,016	0,008	0,003	0,001
Calcio (Ca)	mg/l		200	261	252	396	261
Cadmio (Cd)	mg/l	0.005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005	< 0,00005
Cromo totale (Cr)	mg/l	0.05	< 0,002	0,003	0,002	0,004	0,002
Magnesio (Mg)	mg/l		33,1	112	36,2	154	38,9
Mercurio (Hg)	mg/l	0.001	< 0,00005	0,00007	< 0,00005	0,00358	0,00006
Nichel (Ni)	mg/l	0.02	0,002	0,005	0,003	0,007	0,003
Piombo (Pb)	mg/l	0.01	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007
Potassio (K)	mg/l		4,91	76	29,2	4,16	6,58
Rame (Cu)	mg/l	1	< 0,002	0,003	< 0,002	0,003	< 0,002
Sodio (Na)	mg/l		295	478	198	666	278
Zinco (Zn)	mg/l	3	0,054	0,014	0,023	0,003	0,001
Composti fenolici	mg/l		< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Pesticidi organoclorurati	mg/l		< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Solventi aromatici	mg/l		< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Idrocarburi totali (come n-esano)	mg/l		< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
IDROCARBURI POLICICLICI A	---		---	---	---	---	---
Naftaline	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Acenaftilene	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Acenaftene	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fluorene	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fenantrene	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Antracene	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fluorantene	mg/l		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Pirene	mg/l	0.05	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[a]antracene	mg/l	0.0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Crisene	mg/l	0.005	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[b]fluorantene	mg/l	0.0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[k]fluorantene	mg/l	0.00005	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[a]pirene	mg/l	0.00001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Indeno[1,2,3-cd]pirene	mg/l	0.0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Dibenzo[a,h]antracene	mg/l	0.00001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Benzo[ghi]terilene	mg/l	0.00001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Capitolo 4

Indagini geofisiche

Le indagini geofisiche permettono di individuare, esplorare, controllare e stimare le condizioni fisiche presenti nel sottosuolo. Esistono a tal proposito due metodi: geosismici e quello geoelettrici. I metodi geosismici misurano la velocità delle onde sismiche di taglio e di compressione con le quali si risale alle condizioni fisiche del terreno analizzato. I metodi geoelettrici impiegano corrente continua o a frequenze molto basse, determinando la resistività elettrica del sottosuolo misurando in superficie la caduta di potenziale originata da una corrente applicata.

I metodi di tipo elettrico risultano tra i più adatti a fornire un valido contributo nell'individuazione e nella definizione di volumi contaminati nei suoli e nelle falde, in quanto le caratteristiche elettriche del sottosuolo sono fortemente influenzate dalla presenza di sostanze inquinanti, sia di natura inorganica che organica. In particolare sui materiali di discarica esiste un differente comportamento elettrico del percolato, biogas, rifiuti e suolo di impermeabilizzazione del fondo vasca.

Grazie all'affinarsi delle tecniche di inversione dei dati, le indagini geofisiche si sono diffuse nei vari campi ambientali, grazie alla possibilità di condurre le misure in superficie in maniera non distruttiva, economica e veloce.

4.1. Indagini geoelettriche.

Confrontando i diversi metodi geofisici si è visto come le indagini geoelettriche rappresentano il miglior compromesso tra qualità dei risultati e costi di indagine per uno studio e una caratterizzazione qualitativa delle discariche. Altri pregi sono la scarsa sensibilità al rumore di fondo, la strumentazione semplice e standardizzata, la disponibilità di software per il trattamento dei dati (inversione).

Le indagini geosismiche riescono pure a indagare il terreno con buoni risultati però danno delle difficoltà nel riconoscere cavità o plume inquinante. Le indagini con il georadar invece forniscono una scarsa profondità d'indagine.

I metodi geoelettrici impiegano corrente continua o a frequenze molto basse per determinare la distribuzione della resistività elettrica e della polarizzazione indotta (e/o caricabilità) nel sottosuolo. Combinando queste misure si ottengono le informazioni per poter effettuare una discriminazione sul tipo di inquinante. Zone a bassa resistività individuano probabilmente zone di accumulo di percolato e quindi di cariche ioniche mentre zone ad alta resistività sono dovute all'accumulo di biogas che essendo in fase aeriforme risulta poco conduttivo.

4.2. Metodo della resistività.

4.2.1. Resistività dei terreni.

La resistività dei terreni, delle rocce e dell'acqua eventualmente presente nei pori di queste, presenta in natura una grandissima variabilità di circa sei ordini di grandezza.

La presenza di soluzioni mineralizzate circolanti altera in misura notevole la resistività apparente dei terreni e dei litotipi perché queste soluzioni risultano generalmente più conduttive (se si tratta di percolati oleosi) o più resistenti (nel caso di derivati di idrocarburi) rispetto all'acqua dolce.

La resistività dei sedimenti è controllata principalmente dai seguenti fattori:

- grado di saturazione dei pori;
- porosità;
- salinità del fluido presente nei pori;
- temperatura;
- presenza di sostanze organiche (idrocarburi, solventi, ecc.);
- presenza di argilla;
- presenza di cavità.

Considerando un campione di roccia, la resistenza elettrica tra due facce estreme è data da

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

dove:

ρ = resistività (resistenza al passaggio di corrente in un conduttore di lunghezza e sezione unitaria);

l = lunghezza del provino;

S = sezione del provino.

Applicando tra le due facce del provino una differenza di potenziale, per la legge di Ohm fluisce nel corpo una corrente di intensità I legata alla differenza di potenziale dalla relazione:

$$\Delta V = R \times I$$

La conduzione elettrica nel terreno può avvenire in tre maniere:

- elettronica (o metallica): se la corrente è costituita da elettroni;
- elettrolitica (o ionica): se la corrente è costituita da ioni (spostamento di particelle di materia);
- dielettrica (o di spostamento): avviene nei materiali isolanti con poche o nessuna carica libera nei quali si ha il fenomeno della polarizzazione dielettrica. Questo tipo di correnti risultano trascurabili nella prospezione geoelettrica.
- La resistività del terreno inoltre dipende dal tipo di terreno; dall'acqua contenuta nei pori e nelle fessure a cui è dovuta la conducibilità elettrolitica; dalla temperatura il cui aumento diminuisce la resistività in quanto aumenta il grado di dissociazione ionica.

4.2.2. Potenziali in mezzo omogeneo.

4.2.2.1. Elettrodo di corrente singolo.

Applichiamo in un terreno omogeneo e isotropo di resistività ρ un elettrodo fornendo una corrente di intensità I . I filetti di corrente si distribuiscono in tutte le direzioni e la superficie equipotenziale (perpendicolari ad esse) risultano sfere concentriche rispetto al punto di applicazione dell'elettrodo.

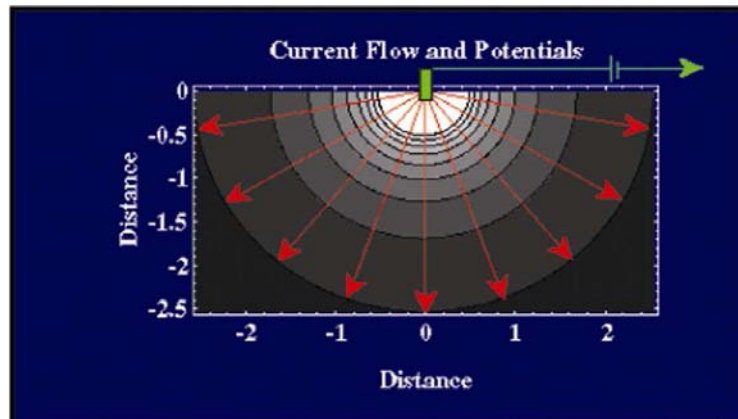


Fig. 4.1 - Flusso di corrente e distribuzione di potenziale dovuto a una carica puntiforme.

Per simmetria del sistema il potenziale è funzione della sola distanza r del punto di applicazione dell'elettrodo. Considerando due superfici equipotenziali di raggio r e $r+dr$ e del guscio risultante un cilindretto di sezione unitaria. Sia dV la differenza di potenziale agli estremi del cilindretto, si ha:

$$dV = -\rho \, i \, dr$$

$$\text{con : } i = \frac{I}{4\pi r^2},$$

e il segno meno che indica come il potenziale diminuisca con la distanza dal punto di energizzazione.

Osserviamo che il terreno può assimilarsi a un conduttore sferico o meglio semisferico.

Il potenziale elettrico di un punto M distante r_1 dall'elettrodo sarà:

$$V_M = \int_{r_1}^{\infty} dV = \frac{\rho I}{4\pi r_1}$$

Se il potenziale fosse in superficie, le superfici equipotenziali risulterebbero semisferiche e il potenziale sarebbe:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi r_1}$$

4.2.2.2. Quadripoli.

Consideriamo due elettrodi di corrente A e B distanti r_1 ed r_2 da una sonda posta in M che misura la differenza di potenziale. Il potenziale del punto M sarà dato dalla somma dei due potenziali dovuti ai due elettrodi dove passa una corrente uguale ma di segno opposto:

$$V_M = V_M^1 + V_M^2 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Considerando un'altra sonda N che dista r_1' ed r_2' dai due elettrodi, il potenziale che si misurerà sarà:

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1'} - \frac{1}{r_2'} \right)$$

La differenza di potenziale tra i punti M ed N sarà:

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1'} + \frac{1}{r_2'} \right)$$

A questa disposizione si dà il nome di quadripolo (figura 2). Data la vicinanza dei due elettrodi di corrente le due semisfere equipotenziali risultano deformate.

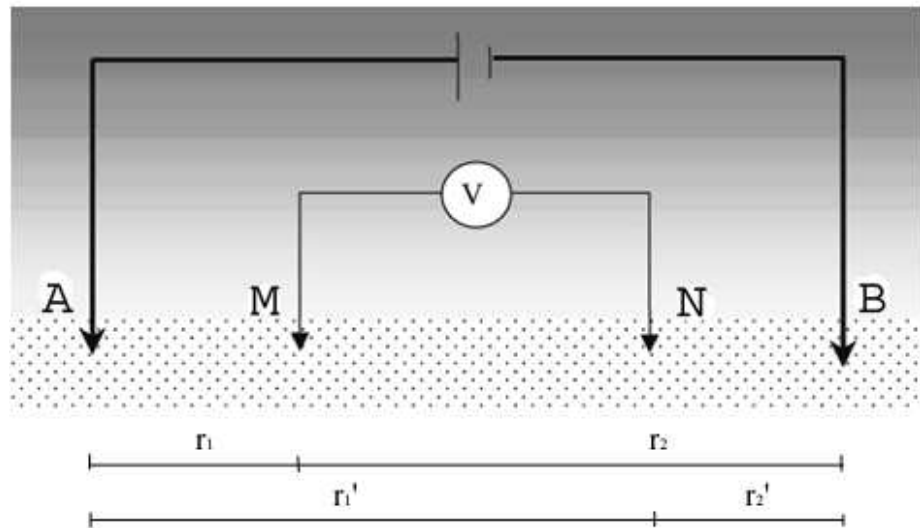


Figura 4.2 - Schema di un quadripolo.

A seconda della distanza con cui si posizionano gli elettrodi avremo:

- quadripolo di Wenner dove $r_1 = r_2' = a$ ed $r_1' = r_2 = 2a$. La resistività sarà

$$\frac{\Delta V}{I} \quad \text{dunque pari a } \rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} ;$$

- quadripolo di Schlumberger dove $r_1 = r_2' = \frac{L-a}{2}$ ed $r_1' = r_2 = \frac{L+a}{2}$. La

$$\rho_a = \frac{\pi(L^2 - a^2)}{4a} \frac{\Delta V}{I} ;$$

- tripolo o polo-dipolo con $r_1 = a$, $r_1' = b$, $r_2 = r_2' = \infty$. La resistività sarà quindi

$$\rho_a = \frac{2\pi ab}{b-a} \frac{\Delta V}{I} ;$$

- dipolo-dipolo ove gli elettrodi di corrente sono collegati a molta distanza dagli elettrodi di misura. La resistività dipenderà dalla disposizione degli elettrodi che potrà essere radiale, azimutale, polare, equatoriale.

Nelle prime tre disposizioni, la distanza degli elettrodi dipende dalla lunghezza dei cavi e dalle difficoltà pratiche per il loro stendimento nel terreno, mentre nell'ultima disposizione la disposizione degli elettrodi di misura da quelli di corrente trova solo limite alla sensibilità degli strumenti e al rumore di fondo e per questo motivo il dipolo-dipolo è adatta per investigazioni profonde.

4.3. Procedimenti di misura.

Il sondaggio elettrico verticale permette di conoscere le variazioni verticali di resistività mentre il profilo di resistività le variazioni laterali.

4.3.1. Sondaggio elettrico verticale (SEV).

Il SEV consiste nell'eseguire misure di resistività del terreno allargando progressivamente gli elettrodi di corrente e mantenendo fisso il centro del dispositivo di misura. Questo perché sperimentalmente si è visto che la frazione di corrente che fluisce in profondità dipende dalla distanza degli elettrodi di corrente.

Sia il terreno costituito da due strati orizzontali con la resistività dello strato superiore ρ_1 maggiore rispetto a quella inferiore ρ_2 . Per piccole distanze interelettrodiche saranno solo piccole porzioni del primo strato ad essere utilizzate per cui $\rho = \rho_1$. Allargando gli elettrodi cresceranno i volumi interessati dalla corrente fino a comprendere anche il secondo strato misurando in questo caso una resistività apparente, che non corrisponde alla reale resistività del sottosuolo ma un valore apparente che si ottiene considerando il sottosuolo un semispazio omogeneo. La relazione tra resistività apparente e resistività reale è molto complessa e per risalire dai valori apparenti a quelli reali occorre risolvere il cosiddetto problema inverso. I valori di resistività ottenuti si riportano in un diagramma bilogarithmico in funzione di a se si utilizza la disposizione di Wenner, di $AB/2$ se si utilizza Schlumberger.

Nell'eseguire il SEV con Wenner si allargano a ogni misura tutti e quattro gli elettrodi. Con Schlumberger basterebbe in teoria allargare gli elettrodi di corrente ma per distanze elevate di AB la misura corretta non sarebbe possibile in quanto la differenza di potenziale sarebbe troppo piccola, confrontabile col rumore di fondo. In

pratica si fissa MN e partendo da un AB uguale a quattro volte MN si distanziano successivamente gli elettrodi di corrente fino a raggiungere una lunghezza per AB di venti volte MN; le ultime due misure di ogni serie vengono con l'MN allargato per la serie successiva.

4.3.2. Profili di resistività.

Un profilo di resistività consente di conoscere le variazioni di resistività lateralmente. Con la disposizione di Schlumberger si collocano gli elettrodi di corrente a grande distanza e si trasla di volta in volta il dipolo MN. Invece con Wenner si spostano, verso una determinata posizione, tutte e quattro gli elettrodi.

Poiché per ogni stazione si esamina lo stesso volume di terreno, traslando il dispositivo lungo il profilo viene esplorata una porzione di terreno avente grosso modo la stessa sezione.

4.3.3. Interpretazione.

Interpretare un diagramma di resistività, eseguendo un SEV, significa determinare resistività e spessore dei diversi terreni costituenti il sottosuolo. Per l'interpretazione di questi diagrammi si comincia da considerazioni qualitative o morfologiche delle curve che danno una prima idea sul numero dei terreni e sulla resistività del terreno più superficiale e più profondo.

Per ricavare la resistività e lo spessore di ogni strato esistono in letteratura degli abachi nei quali bisogna individuare la curva teorica che si sovrappone a quella sperimentale.

Il problema diretto di ricavare l'equazione di una curva teorica di resistività per un terreno di n strati orizzontali omogenei e isotropi, dati gli spessori e la resistività, ammette soluzione ed è unica. Invece ricavare dalle curve sperimentali del SEV il numero degli strati, i loro spessori e le rispettive resistività non fornisce un'unica soluzione.

La risoluzione del metodo risulta limitata da due principi:

1. principio di soppressione: più grande è la profondità di uno strato e più grande deve essere il suo spessore affinché il suo effetto sia visibile sulla curva di resistività apparente;
2. principio di equivalenza: uno strato resistente situato tra 2 conduttori può essere definito solo dalla resistenza trasversale $T = \rho h$ con h spessore dello strato; invece uno strato conduttore tra due resistenti può essere definito dalla conduttanza longitudinale $S = h / \rho$. In questi casi possiamo ricavare dalle curve di resistività solo il valore di T o S e quindi occorre effettuare altri sondaggi per ottenere uno dei due parametri.

Se i sondaggi elettrici sono distribuiti su una data area si possono costruire anche le carte di resistività apparente, che rappresentano la distribuzione laterale della resistività misurata. Esse costituiscono la cartografia elettrica del sottosuolo e mettono in evidenza le zone elettricamente anomale.

4.4. La tomografia elettrica.

La tomografia elettrica è eseguibile praticamente in ogni situazione, basta che ci sia la possibilità di immettere corrente nel terreno. Combina le tecniche di misura dei SEV e dei profili di resistività e permette quindi di investigare contemporaneamente sia le variazioni laterali sia le variazioni verticali della resistività elettrica ottenendo dei profili geoelettrici che mostrano la distribuzione bidimensionale o tridimensionale delle caratteristiche elettriche dei materiali indagati. Il principio fisico è lo stesso alla base dei SEV, ma invece di energizzare e misurare da quattro elettrodi che vengono spostati di volta in volta, vengono utilizzati più elettrodi (16, 24, 32, 48 fino a 256) con cui è possibile ottenere un numero molto alto di combinazioni, indagando quindi non più solo lungo una verticale, ma lungo tutta una sezione.

Ogni profilo di indagine viene effettuato utilizzando degli elettrodi allineati ed equidistanziati sulla superficie del terreno con un passo variabile da 0.5 a 10-15 m in funzione della profondità che si vuole raggiungere e della risoluzione che si vuole ottenere.

La corrente viene applicata ad una prima coppia di elettrodi (detti convenzionalmente A e B), misurando poi la differenza di potenziale tra tutte le altre

coppie disponibili (denominati M e N) nella configurazione scelta. Si passa poi ad una seconda coppia di trasmissione e si procede allo stesso modo fino a raggiungere il numero massimo di misure indipendenti consentito dagli elettrodi disponibili.

Tramite un cavo multiconduttore gli elettrodi vengono collegati ad un sistema d'acquisizione. Grazie ad un'unità di controllo, che permette di selezionare in modo automatico quattro elettrodi di misura alla volta, secondo una sequenza prestabilita, è possibile eseguire in modo veloce e automatico una serie di misure della resistività elettrica per tutta la lunghezza dello stendimento. I risultati delle misure forniscono una sezione del sottosuolo chiamata pseudosezione della resistività apparente, dalla quale attraverso un apposito algoritmo di inversione è possibile risalire ad un'immagine della resistività reale.

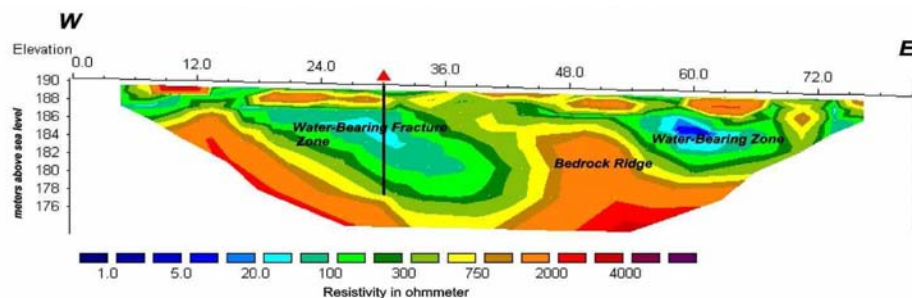


Figura 4.3 - Pseudezione di resistività del sottosuolo.

Ovviamente la profondità d'esplorazione, la risoluzione e la lunghezza della pseudosezione dipendono principalmente dalla equidistanza elettroica e dal numero degli elettrodi utilizzati per i rilievi. Questa disposizione viene ottimizzata per minimizzare il numero di stendimenti e in base alla tipologia dell'indagine ed alla topografia del sito in esame. I risultati sono quantitativi e supportati dalla vasta conoscenza delle caratteristiche elettriche dei terreni.

Nella prospezione geoelettrica si utilizza sempre più frequentemente la configurazione elettronica dipolo-dipolo, che rappresenta una evoluzione dei tradizionali sistemi di misura impiegati. Tale configurazione è costituita da una doppia coppia di elettrodi, formata ognuna da un polo di corrente e da un polo di potenziale. Nelle operazioni di misura, mentre una coppia rimane fissa a rappresentare il punto di

riferimento, l'altra coppia, quale sistema di acquisizione dati, si sposta sul terreno su tutti i punti di misura. La tecnica dipolo-dipolo consente di ottenere due sostanziali vantaggi rispetto a quelle tradizionali Wenner o Schlumberger, vale a dire: una maggiore precisione e velocità di misura e un'alta sensibilità di discriminazione delle irregolarità elettriche potenzialmente legate alle strutture archeologiche. Tale configurazione si utilizzerà per le indagini della presente tesi.

Configurazione Dipolo-Dipolo

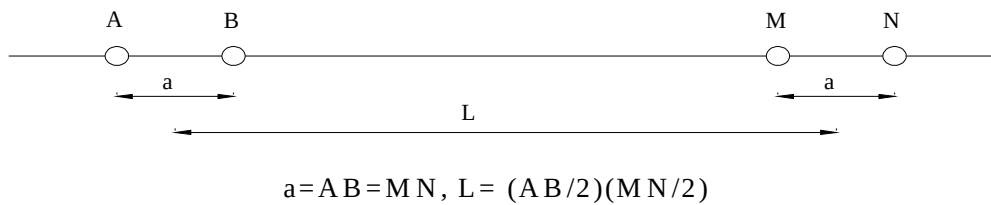


Figura 4.4 – Configurazione Dipolo-Dipolo.

La tomografia elettrica prevede l'utilizzo di elettrodi fissi installati in fori di sondaggio (Tomografia Elettrica in Foro) e/o in stendimenti lineari sulla superficie (Profili Tomografici di Superficie), a seconda della tipologia di intervento.

I profili tomografici di superficie (PTS) sono adoperati per evidenziare, ad esempio, la presenza di idrocarburi surnatanti, adottando distanze elettrodiche anche inferiori a 1 metro, con stendimenti in linea di lunghezza massima pari a 255 m, comunque garantendo profondità massime di investigazione intorno ai 15-20 metri. Stendimenti di 300-500-1000 metri aumentano la profondità di indagine a costo di una minore risoluzione e sono abitualmente utilizzati per target estesi (profondità della falda, ricostruzioni stratigrafiche, ricerca mineraria ecc).

Nella tomografia elettrica in foro o pozzo (TEP) i piccoli fori (generalmente 2") prodotti dalla sonda penetrometrica o quelli per i sondaggi geognostici (generalmente 4"), possono essere utilizzati per installare elettrodi permanenti (montati sulla parte

esterna di tubi in PVC e collegati da un cavo multiconduttore), collegati allo strumento di misura in superficie in modo da poter effettuare misure periodiche in foro.

Le sezioni di resistività ottenute da misure cross-hole hanno ovviamente una precisione maggiore rispetto alle sezioni ottenute con PTS (gli elettrodi sono in diretto contatto con il suolo in profondità) e possono essere ripetute nel tempo per controlli specifici sulla diffusione di inquinanti nel sottosuolo o nel caso di monitoraggio di operazioni di bonifica in situ.

I limiti della tomografia elettrica sono fondamentalmente dovuti al fatto che solitamente si interpretano bidimensionalmente situazioni in cui invece la geometria dei corpi è tridimensionale. Infatti se ci sono variazioni significative nella direzione perpendicolare alla linea di misura, questo può causare distorsioni significative nelle parti basse del modello ottenuto. I punti misurati con le spaziature maggiori tra gli elettrodi possono essere infatti influenzate dalle strutture che si trovano orizzontalmente distanti dalla linea di misura.

4.5. Polarizzazione indotta

La maggior parte delle apparecchiature per le misure tomografiche sono anche in grado di effettuare misure di polarizzazione indotta. Tali tecniche si sono sviluppate negli anni '50 nel campo dell'esplorazione mineraria, in particolar modo giacimenti di solfuri metallici a mineralizzazione dispersa.

L'effetto di polarizzazione indotta è causata fondamentalmente da due meccanismi principali: la polarizzazione di membrana e la polarizzazione di elettrodo; il primo è prevalentemente causato dai minerali argillosi presenti nelle rocce o nei sedimenti, per cui diventa rilevante nelle indagini ingegneristiche e ambientali. Il secondo è causato dai minerali conduttivi presenti nei pori e nelle fratturazioni delle rocce, tali che il flusso di corrente sia parzialmente elettrolitico (attraverso le acque che circolano nel sistema di fratturazioni) e parzialmente elettronico (per mezzo dei minerali conduttivi); tale effetto diventa importante nel campo della ricerca di minerali metallici come i solfuri disseminati.

Le misurazioni di polarizzazione indotta sono solitamente effettuate in dominio di tempo o in dominio di frequenza; in dominio di tempo l'effetto di polarizzazione indotta

si stima in seguito alla misura del decadimento della tensione dopo che la corrente inviata viene interrotta. L'unità di polarizzazione indotta, denominata caricabilità apparente, è solitamente espressa in mV/V o in ms. La caricabilità apparente è data dalla relazione:

$$M_{app} = \frac{1}{\Phi_m} \int_{t_1}^{t_2} \Phi_s(t) dt$$

dove le grandezze Φ_m e Φ_s sono definite in figura

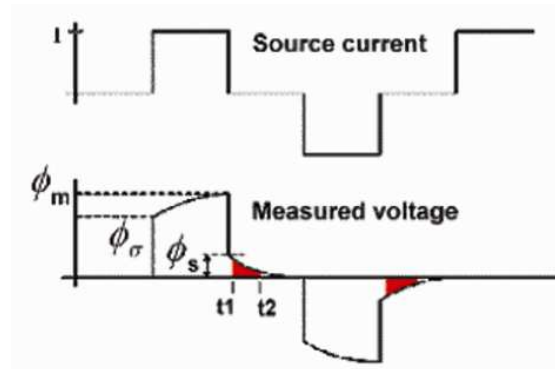


Fig. 4.5 - Forme d'onda della corrente inviata e della risposta misurata.

Un fenomeno che accompagna spesso le misure di polarizzazione indotta è la presenza di valori osservati oltre i 1000 ms (oppure meno di -1000 ms.); tali valori sono quasi certamente causati dal rumore dovuto ad un modesto segnale di polarizzazione indotta.

Le misure di caricabilità apparente vengono presentate anch'esse sotto forma di pseudosezione e i valori ottenuti vengono sottoposti a procedura di inversione per ricavare un teorico modello di caricabilità.

Se si hanno conoscenze a monte del problema è possibile far corrispondere per esempio zone ad elevata caricabilità a zone di accumulo di rifiuti liquidi, di sostanze organiche o metalli, oppure associare zone a bassa caricabilità con porzioni di discarica non saturate.

4.6. Strumentazione: M.A.E A 3000 E.

Il georesistivimetro M.A.E A 3000 F con una risoluzione a 16 bit accoppiato ad un sistema di 64 elettrodi permette tramite un software del tipo RES 2D – RES 3D di rappresentare resistività in applicazioni come:

- elettrostratigrafie;
- monitoraggio di inquinanti nel sottosuolo;
- ricostruire la geometria del “bedrock”;
- localizzare perdite nelle discariche ;
- localizzare zone di frattura nel “bedrock”;
- individuare cavità sotterranee;
- localizzare infiltrazioni attraverso le dighe;
- ricostruire i percorsi dell'intrusione di acqua marina nella falda;
- ricerche idriche;
- esplorazioni minerarie;
- esplorazioni su depositi sabbiosi e ghiaiosi;
- misure di resistività per studi sulla corrosione;
- verifiche di integrità sul rivestimento interno delle discariche;
- verifiche della continuità elettrica in condutture;
- misure di laboratorio sulla resistività di campioni di suolo;
- mappatura di siti archeologici.

Il sistema M.A.E viene utilizzato per la registrazione automatica di qualsiasi configurazione elettronica ed è apprezzabile soprattutto nell'esecuzione di rappresentazioni di resistività in quanto moltissimi dati vengono automaticamente registrati e salvati nella memoria interna.



Figura 4.6 – M.A.E A 3000



Figura 4.7 – Centralina (BOX 8/N).

Il sistema elettronico M.A.E A 3000 E è progettato per l'acquisizione di una grande quantità di dati di resistività durante l'esecuzione di indagini topografiche. Un sistema completo è composto da un box interfaccia e da 64 elettrodi posizionati su picchetti in acciaio inossidabile e collegati tramite un cavo multipolare all'unità di interfaccia centrale, si ricorre all'utilizzo di avvolgi cavo nel caso in cui il cavo multipolare non riesca a coprire la distanza richiesta.



Figura 4.8 – Connessione Centralina-Cavi.

Gli strumenti possono avviare automaticamente un'indagine completa dipolo-dipolo o qualsiasi altra configurazione programmata dall'utente (Schlumberger, Wenner, polo-polo, stendimento quadrato, ecc).



Figura 4.9 – Morsetti-Elettrodi.

La procedura di misurazione è semplice. Conficcare i picchetti fino ad una profondità pari a circa i 2/3 della lunghezza secondo interassi opportunamente calcolati in base alla configurazione da utilizzare. Collegare i morsetti ai picchetti e alle centraline (BOX 8/N). Per i picchetti più distanti sono stati utilizzati degli avvolgi cavo. Infine connettere le varie centraline con l'elaboratore dati. L'alimentazione del sistema è affidata ad una batteria elettrica.



Figura 4.10 - Batteria-Morsetti-Elaboratori Dati.

I dati acquisiti, opportunamente elaborati, permettono una ricostruzione bidimensionale del sottosuolo. I risultati del profilo topografico sono costituiti da una pseudosezione di resistività apparente misurata, da una pseudosezione calcolata e da una sezione di resistività derivante dal modello inverso di calcolo.

La presenza di fluidi salini e/o le variazioni del grado di saturazioni del terreno comportano modifiche percentuali significative della resistività elettrica del sottosuolo. L'analisi delle distribuzioni della resistività permette quindi l'individuazione e il monitoraggio di pennacchi inquinanti nelle aree di discarica o nel caso di sversamenti di fluidi inquinanti sul suolo, consente il controllo dei fenomeni legati all'intrusione marina negli acquifere costiere, la stima dei tempi di percolazione nel non saturo e verifiche quali-quantitative in tutti i casi di valutazione della vulnerabilità degli acquiferi.

4.7. Cenni di teoria dell'inversione

Attraverso una inversione si vuole stimare quel modello che fornisca una risposta simile ai valori misurati; tale modello è una rappresentazione matematica e ideale di una porzione di sottosuolo e che è caratterizzato da dei parametri di modello che sono le quantità fisiche che si vuole stimare dai dati misurati. La risposta del modello sono i dati sintetici che si possono calcolare per quel gruppo di parametri di modello. Tutti i metodi di inversione cercano essenzialmente di determinare un modello di sottosuolo la cui risposta sia in accordo con le misure effettuate eventualmente sottostando ad alcune restrizioni.

Il programma di inversione utilizzato nella presente tesi, chiamato RES2DINV, sfrutta un algoritmo basato sulla suddivisione dello spazio indagato in celle o blocchi, i cui parametri di modello sono le resistività delle celle, mentre i dati sono le resistività apparenti misurate. Il collegamento matematico tra i parametri di modello e la risposta del modello è fornito dagli algoritmi agli elementi finiti o alle differenze finite.

In tutti i metodi di ottimizzazione si ha un modello iniziale che viene modificato iterativamente in modo tale che le differenze tra la risposta di modello e i dati osservati si riducano. Il gruppo di osservazioni può essere scritto in forma vettoriale con il vettore y , nella forma:

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_m]'$$

dove m è il numero di misurazioni effettuate.

La risposta del modello può essere scritta nella forma analoga :

$$f = [f_1, f_2, \dots, f_m]'$$

Nei problemi di resistività si usa comunemente il logaritmo delle resistività apparenti e della risposta del modello.

I parametri di modello possono essere rappresentati anch'essi da un vettore :

$$q = [q_1, q_2, \dots, q_n]'$$

dove n è il numero di parametri di modello.

La differenza tra i dati osservati e la risposta del modello è dato dal vettore discrepanza g definito come :

$$g = y - f$$

Attraverso il metodo di ottimizzazione ai minimi quadrati, il modello iniziale è modificato in modo tale che la somma quadrata dell'errore E delle differenze tra la risposta del modello e i dati misurati sia minimizzata:

$$E = g' g$$

Per ridurre tale errore si utilizza l'equazione di Gauss-Newton per determinare il vettore cambiamento nei parametri di modello che possano ridurre l'errore E. Tale equazione è:

$$J' J \Delta q_i = J' g$$

Dove Δq_i è il vettore di cambiamento nei parametri di modello, e J è la matrice Jacobiano (di dimensioni m x n) delle derivate parziali; gli elementi dello Jacobiano sono:

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j}$$

cioè il cambiamento della i-esima risposta del modello dovuta ad un cambiamento nel j-esimo parametro di modello. Calcolato il vettore di cambiamenti, si ottiene un nuovo modello definito come :

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k$$

Nella pratica l'equazione di Gauss-Newton viene raramente utilizzata da sola nelle inversioni dei dati geofisici, poiché $J'J$ può essere singolare e quindi non può esistere alcun Δq . Un altro problema comune è che il prodotto $J'J$ sia quasi singolare, e questo accade quando si usa un modello iniziale molto diverso da quello ottimale, cosicché il vettore di cambiamento può assumere valori non realistici.

Una possibile soluzione è la modifica Marquardt-Levenberg all'equazione di Gauss-Newton :

$$(J'J + \lambda I) \Delta q_i = J'g$$

dove I è la matrice di identità. Il coefficiente λ è il cosiddetto fattore di attenuazione che permette di limitare effettivamente l'intervallo dei valori del vettore di cambiamento Δq . Inoltre il metodo Marquardt-Levenberg minimizza anche una combinazione delle ampiezze del vettore discrepanza e del vettore di cambiamento; questa tecnica funziona bene quando il numero di strati del modello è modesto, mentre nel caso di modelli 2D (o 3D) l'algoritmo può produrre distribuzioni errate di resistività con zone spurie a bassa o alta resistività.

Per ovviare a questo problema, l'equazione di Gauss-Newton viene ulteriormente modificata per minimizzare la variazione spaziale nei parametri di modello, in modo tale che i valori di resistività cambino in maniera graduale (smoothed). Il metodo che si ottiene è denominato "metodo ai minimi quadrati con vincoli di continuità" e ha la seguente forma:

$$(J'J + \lambda F) \Delta q_k = J'g - \lambda F q_k$$

dove $F = \alpha_x C_x' C_x + \alpha_y C_y' C_y + \alpha_z C_z' C_z$ e C_x , C_y e C_z sono le matrici di levigatezza nelle direzioni $\{x,y,z\}$. α_x , α_y e α_z sono i pesi relativi forniti alle matrici filtro nelle tre dimensioni. Una forma tipica per la matrice di levigatezza è la matrice delle differenze di primo ordine:

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ & & & \dots & \dots & & & \\ & & & & \dots & \dots & & \\ & & & & & \dots & \dots & \\ & & & & & & \dots & \dots \\ & & & & & & & \dots \end{bmatrix}$$

L'equazione ottenuta col metodo ai minimi quadrati con vincoli di continuità cerca inoltre di minimizzare i quadrati nei cambiamenti spaziali (la cosiddetta ruvidezza) dei valori di resistività del modello, poiché è una ottimizzazione a norma l2 , che cerca di produrre un modello con variazioni dolci nei valori di resistività.

In alcuni casi la geologia del sottosuolo consiste in una serie di regioni a confini netti e ciascuna con resistività abbastanza omogenee, per cui il metodo ai minimi quadrati con vincoli di continuità può essere ulteriormente modificato in modo tale che minimizzi le variazioni assolute dei cambiamenti nei valori di resistività del modello. Tecnicamente questo si chiama metodo di ottimizzazione a norma l1 o inversione robusta. Una tecnica comunemente utilizzata per implementare un metodo di ottimizzazione a norma l1 è il cosiddetto metodo ai minimi quadrati iterativamente

ripesato, che appare nella forma :

$$(J' J + \lambda F_R) \Delta q_k = J' R_d g - \lambda F_R q_k$$

$$\text{con } F_R = \alpha_x C_x' R_m C_x + \alpha_y C_y' R_m C_y + \alpha_z C_z' R_m C_z$$

dove Rd e Rm sono matrici di peso introdotte in modo tale che al vettore di ruvidezza del modello e agli errori nei dati di partenza vengano attribuiti gli stessi pesi nel processo di inversione.

Capitolo 5

Prospezioni geofisiche eseguite c/o

Biviere di Gela

TOMOGRFIA ELETTRICA APPLICATA PER LA CARATTERIZZAZIONE
GEOLETTRICA E CAPACITIVA DI TERRENI CONTAMINATI DA
IDROCARBURI



Figura 5.1 Vista BIVIERE DI GELA

5.1. Premessa.

La pianificazione di una campagna di misura è una fase molto delicata nella realizzazione di un progetto, poiché occorre giungere ad un bilanciamento di diversi fattori come la fattibilità (presenza di ostacoli naturali o artificiali), la celerità, l'efficienza, i costi e l'accuratezza delle misure.

Sovente l'acquisizione dei dati di partenza e l'interpretazione dei medesimi vengono resi incerti da una frettolosa o inefficace fase di pianificazione che per esempio non ha previsto un accurato sopralluogo del sito da investigare.

Il seguente rapporto tecnico tratta i risultati ottenuti in una specifica campagna di prospezioni geofisica di tomografia elettrica. Tali prospezioni sono state eseguite presso il Biviere di Gela, ed hanno avuto come fine quello della ricostruzione dell'immagine elettroresistiva del sottosuolo.

Le misurazioni effettuate per la presente tesi sono state condotte il 25 Agosto 2006 nel Biviere di Gela nel territorio comunale di Gela (CL).

Tali prospezioni hanno avuto lo scopo di valutare lo spessore della discarica di idrocarburi, evidenziandone eventuali accumuli, e di verificarne il percorso.

A tal fine è stata ricostruita l'immagine elettrica della discarica, sia in termini di resistività (tomografia elettrica) sia in termini capacitivi (tomografia polarizzazione indotta).

Per il caso specifico sono state eseguite n.2 tomografie, così distribuite:

- TOMO1 SEZ A-A', (L=64 m) sono state eseguite lungo la zona di contaminazione.
- TOMO2 SEZ B-B' (L=64 m) sono state eseguite a valle della zona di contaminazione.



Figura 5.2 - TOMO1 A-A'. - TOMO2 B-B'.

5.2. Tomografia geoelettrica.

La “Tomografia Elettrica” consiste nella determinazione di profili di resistività e/o caricabilità attraverso la disposizione sul terreno di un numero elevato di elettrodi. Tali elettrodi sono progressivamente spostati lungo una data direzione variando la distanza inter-elettrodica al fine di aumentare la profondità d’investigazione. In tal modo è possibile costruire una matrice di valori di resistività e/o di caricabilità, la cui inversione, mediante algoritmi matematici, permette di ricostruire l’immagine elettro-resistiva e/o capacitiva del sottosuolo. (“immagine elettrica”).

Il presente studio è stato affrontato in considerazione del fatto che la resistività elettrica (resistenza al passaggio della corrente elettrica di un volume cubico di lato unitario), misurata in sito in terreni che presentano idrocarburi, risulta significativamente più alta rispetto ai valori misurati nella stessa formazione geologica in posto. Tale comportamento dipende dalla natura delle rocce, dall’inquinante, e dalle interazioni chimiche e dalle conseguenti modificazioni chimico-fisiche delle litologie coinvolte. Quando i pori vengono occupati da contaminanti organici, che in genere sono buoni isolanti, si osserva una diminuzione della conduttività elettrica.

Per quanto concerne le misure di caricabilità, cioè di una proprietà elettrica di tipo “capacitivo” che si registra al passaggio di una corrente elettrica nel sedimento in determinate condizioni. I fluidi organici, che aderiscono alle pareti dei pori, “sporcandole”, ne annullano la proprietà di ritenere cationi e di provocare con ciò i doppi strati che ne inibiscono la caricabilità naturale.

5.3. Strumentazione utilizzata ed acquisizione dati.

La strumentazione utilizzata consiste in un geo-resistivimetro multielettrodo digitale (16 bit) con risoluzione fino a 100 microvolts, dotato di una gestione automatica degli elettrodi, in grado cioè, di commutare gli elettrodi disposti lungo la sezione da investigare in elettrodi d'immissione ed in elettrodi di misura con tutte le possibili combinazioni quadripolari degli elettrodi (Figura seguente).



Fig.5.3 Connessione cavi-centralina

La strumentazione utilizzata è costituita da:

- Geo-resistivimetro;
- Centraline computerizzate per la gestione degli elettrodi;
- Generatore di tensione;
- Picchetti d'acciaio;
- Cavi elettrici

L'acquisizione dei dati consiste nel misurare la differenza di potenziale che si genera nei picchetti di misura M-N e, nel caso della polarizzazione indotta, i tempi di scarica.

Nel dettaglio l'operazione d'acquisizione può essere riassunta così come segue:

- Disposizione sul terreno degli elettrodi lungo un dato profilo;

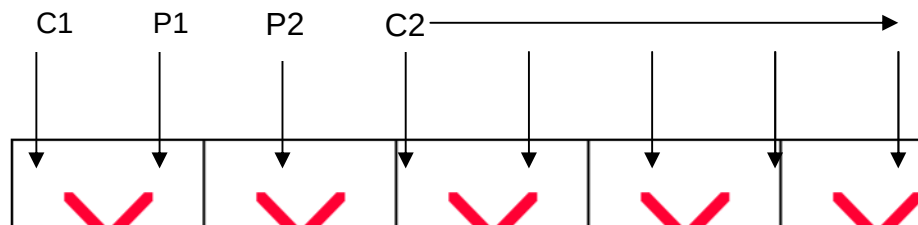
- Scelta della configurazione geometrica (nel caso specifico dipolo-dipolo);
- Test di continuità elettrica;
- Misura della resistività di contatto;
- Definizione della forma d'onda della corrente (durata immissione corrente);
- Annullamento dei potenziali spontanei;
- Immissione della corrente;
- Misura ed archiviazione dati.

La restituzione dei dati avviene in forma matriciale consentendone l'immediata elaborazione.

5.4. Geometria d'acquisizione.

Da quanto detto, risulta che la scelta della geometria da adottare è uno degli aspetti più importanti nell'esecuzione della tomografia elettrica, spesso dettata dalle condizioni logistiche in cui si opera. Esistono diverse configurazioni geometriche ciascuna delle quali ha una sua peculiarità. Nella fattispecie è stata valutata la possibilità di utilizzare la geometria Wenner.

La prospezione geoelettrica WENNER consiste nel disporre due elettrodi d'immissione (coppia dipolare A-B) e due elettrodi di misura (coppia dipolare M-N). La distanza tra ciascuna coppia d'elettrodi è uguale ad a



$(C1 \leftarrow a \rightarrow P1; P2 \leftarrow a \rightarrow C2).$

Disposizione geometrica- Misura Multielettrodo tipo Wenner

Tale configurazione geometrica consente di indagare un punto del mezzo pari a circa 0,5a e consente di risolvere, con maggiore dettaglio, i cambiamenti verticali di resistività (strutture orizzontali) rispetto a quelli orizzontali (strutture verticali).

5.5 Software per la gestione e l'interpretazione dei dati.

5.5.1 Il software *RES2DINV*.

RES2DINV è un programma che permette di determinare automaticamente un modello bidimensionale di resistività del sottosuolo indagato attraverso le misure di resistività apparente realizzate in superficie e in foro.

Nell'interpretazione bidimensionale il modello di resistività consiste in una serie di blocchi rettangolari posizionati in modo tale da seguire la distribuzione dei punti misurati riportati nella pseudosezione. La distribuzione e la dimensione dei blocchi vengono generate automaticamente dal programma in modo tale che il numero di blocchi solitamente non ecceda il numero dei punti sperimentali; in casi particolari è comunque possibile impostare un numero di blocchi superiore alle misurazioni. La profondità dell'ultima riga di blocchi viene fissata all'incirca pari alla profondità equivalente di investigazione dei punti misurati con la spaziatura maggiore.

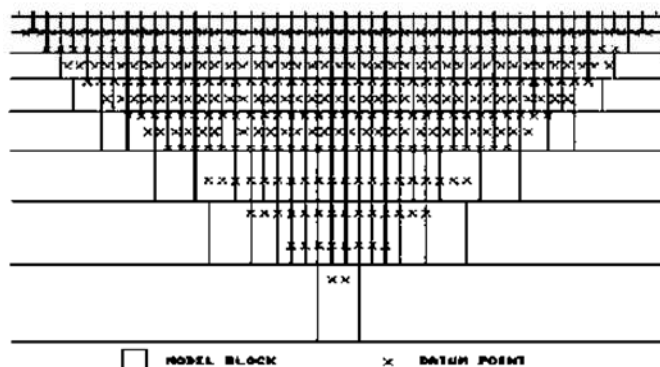


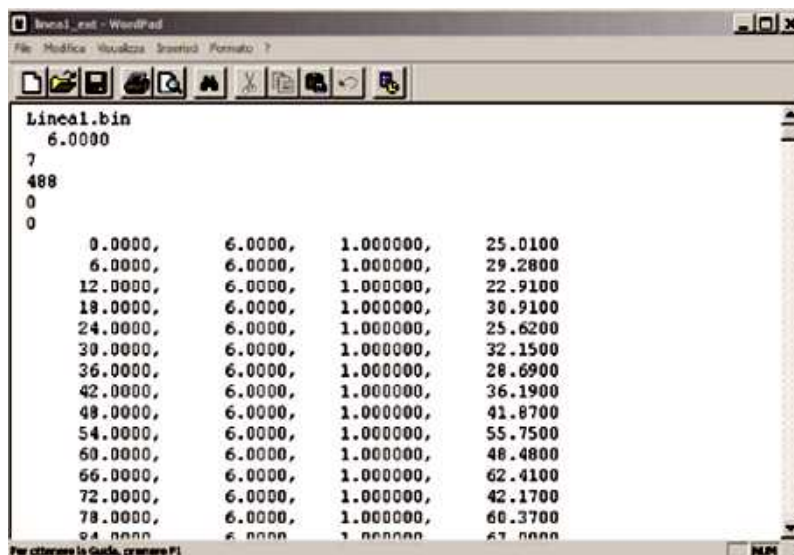
Figura 5.4 – Disposizione dei blocchi utilizzati per la costruzione del modello e collocazione dei punti di misura.

Il programma utilizza l'algoritmo di forward modeling per calcolare i valori di resistività apparenti del modello e una tecnica di ottimizzazione ai minimi quadrati non lineare per effettuare l'inversione dei dati. Le tecniche numeriche di forward modeling possono essere agli elementi finiti o alle differenze finite.

La routine di inversione usata dal programma è basata sul metodo ai minimi quadrati con vincoli di continuità, tuttavia è possibile utilizzare una implementazione del metodo chiamata tecnica di ottimizzazione quasi-Newton che risulta circa dieci volte più veloce del metodo ai minimi quadrati convenzionale (specialmente in presenza di un elevato numero di misure) e richiede una minore memoria macchina. La tecnica Gauss-Newton risulta più lenta del metodo quasi-Newton, ma in aree in cui esistono contrasti di resistività superiori a 10:1 si possono ottenere risultati migliori. Una alternativa valida che offre il programma è utilizzare la tecnica Gauss-Newton per le prime due o tre iterazioni per poi passare al metodo quasi-Newton.

Come già affermato, il modello teorico utilizzato dal programma è una serie di blocchi rettangolari; l'obiettivo è quello di determinare le resistività ai nodi della maglia tale da generare una pseudosezione in accordo con quella derivante dalle misure sperimentali. Il metodo di ottimizzazione cerca di ridurre le differenze tra i valori di resistività apparenti misurate e calcolate modificando iterativamente le resistività dei blocchi di modello. Una misura di questa differenza è dato dall'errore quadratico medio (RMS): il modello con l'errore RMS minore può talvolta determinare variazioni di resistività eccessive e non realistiche. In generale l'approccio più prudente è quello di scegliere il modello quando il valore dell'errore RMS non è cambiato significativamente tra una iterazione a quella .

Il programma prevede come input un file con estensione ".DAT" generato automaticamente dall'interfaccia software che permette di scaricare i dati dal georesistivimetro e di depurarli da valori errati.



```

Lineal.bin
6.0000
7
488
0
0

```

0.0000,	6.0000,	1.000000,	25.0100
6.0000,	6.0000,	1.000000,	29.2800
12.0000,	6.0000,	1.000000,	22.9100
18.0000,	6.0000,	1.000000,	30.9100
24.0000,	6.0000,	1.000000,	25.6200
30.0000,	6.0000,	1.000000,	32.1500
36.0000,	6.0000,	1.000000,	28.6900
42.0000,	6.0000,	1.000000,	36.1900
48.0000,	6.0000,	1.000000,	41.8700
54.0000,	6.0000,	1.000000,	55.7500
60.0000,	6.0000,	1.000000,	48.4800
66.0000,	6.0000,	1.000000,	62.4100
72.0000,	6.0000,	1.000000,	42.1700
78.0000,	6.0000,	1.000000,	60.3700
84.0000,	6.0000,	1.000000,	67.0000

Figura 5.5 – Formato di file dat leggibili dal software RES2DINV.

La prima operazione che è stata effettuata con il programma è consistita nella esclusione dal processo di inversione dei punti che hanno mostrato resistività anomale, attraverso l'esame visivo di uno schema simile a quello indicato in figura.

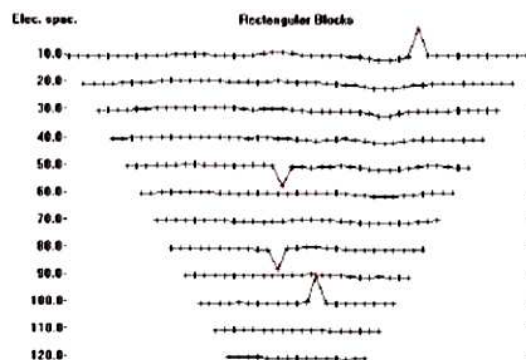


Figura 5.6 – Opzione di visualizzazione dei punti di misura per l'esclusione dei valori anomali.

I valori anomali possono essere dovuti ad un guasto negli interruttori degli elettrodi, oppure ad un contatto inefficace tra gli elettrodi e un terreno asciutto, oppure ad una cortocircuitazione lungo il cavo multipolare a causa di condizioni umide nella

superficie di campagna. Per la linea di misura i punti anomali sono stati eliminati in modo tale da non influenzare il procedimento di inversione.

Tra gli innumerevoli parametri selezionabili attraverso il programma RES2DINV, ne viene proposto un elenco ridotto corrispondente ai parametri comuni e più significativi che hanno caratterizzato le inversioni dei dati della linea e che hanno permesso di ottenere (dopo differenti prove) i risultati migliori:

- fattore di attenuazione (λ) : se i dati sono particolarmente rumorosi occorre utilizzare un fattore di attenuazione maggiore (~ 0.30), mentre invece se i dati sono affetti da un rumore inferiore si può utilizzare un valore minore (~ 0.1);
- variazione del fattore di attenuazione con la profondità : dal momento che la risoluzione delle indagini geoelettriche diminuisce esponenzialmente con la profondità, il fattore di attenuazione utilizzato viene automaticamente incrementato negli strati più profondi, in modo tale da stabilizzare il processo di inversione. Normalmente l'incremento da uno strato all'altro è pari a 1,05 del valore dello strato precedente, ma si possono usare dei valori maggiori se il modello ottenuto mostra oscillazioni non naturali nei valori di resistività;
- limiti nell'intervallo di resistività : è possibile limitare l'intervallo di variazione dei valori di resistività per evitare che il modello produca blocchi a resistività eccessivamente elevate o eccessivamente basse che risulterebbero non realistiche;
- numero di nodi della griglia: è possibile scegliere se costruire una griglia con due o quattro nodi tra due elettrodi adiacenti; con quattro nodi il calcolo delle resistività apparenti effettuato attraverso il forward modeling risulta più accurato che con due nodi, specialmente in presenza di elevati contrasti di resistività, anche se può venire penalizzato il tempo di computazione. In tutte le inversioni effettuate per la presente tesi si è scelto di utilizzare una griglia a quattro nodi;
- dimensione verticale della griglia: il calcolo delle resistività apparenti con il metodo delle differenze finite o degli elementi finiti risulta tanto più accurato quanto è fitta la griglia dei punti in senso verticale, anche se la precisione del computo è a scapito del tempo di elaborazione e dalla richiesta di memoria.

L'uso di una griglia fitta può dare risultati migliori nei casi in cui si hanno contrasti di resistività superiori a 20:1, ed è particolarmente efficace quando si ha uno strato meno resistivo posto al di sotto di uno molto resistivo. Nelle inversioni della presente tesi per il calcolo delle resistività apparenti si è scelta la griglia più fitta (l'opzione finest del programma);

- limite di convergenza: permette di stabilire il limite inferiore per il cambio relativo dell'errore RMS tra due iterazioni successive e il valore di default è pari a 0.05, lo stesso scelto in tutte le elaborazioni della presente tesi;
- smoothing dei valori di modello: la formulazione del metodo ai minimi quadrati applica un limite solo al vettore di perturbazione del modello Δq , ma non direttamente ai valori di resistività del modello; nella maggior parte dei casi ciò produce modelli che hanno una variazione ragionevolmente levigata nei valori di resistività. In alcuni casi, specialmente quando si hanno dati particolarmente spuri, si possono ottenere risultati migliori applicando un vincolo anche ai valori di resistività del modello;
- calcolo dello Jacobiano: è possibile scegliere se stimare la matrice Jacobiano con il metodo quasi-Newton oppure ricalcolarlo ad ogni iterazione. La prima tecnica è più speditiva, ma meno precisa, per cui diventa utile quando si vogliono esaminare rapidamente i dati già sul campo; la seconda tecnica è più accurata, ma necessita di potenze di calcolo superiori. Inoltre nei casi in cui è possibile evidenziare elevati contrasti di resistività (per esempio il valore massimo è 10 volte maggiore del valore minimo) ricalcolare lo Jacobiano ad ogni iterazione può permettere di ricostruire con maggiore fedeltà le forme dei corpi che generano le anomalie. Per tutte le inversioni della presente tesi si è impostato il calcolo della matrice Jacobiano ad ogni iterazione;
- spessore degli strati : lo spessore degli strati può essere incrementato del 10% o del 25% ad ogni livello inferiore; solitamente si sceglie l'opzione 10% se ci sono pochi livelli di dati (8 o meno), ma se ci sono molti livelli e sono distanziati allora è bene impostare il 25% di incremento, specialmente se l'ultima riga dei blocchi è al di sopra dell'ultimo livello dei dati. Nella presente

tesi la scelta di un incremento del 25% dello spessore dei blocchi si è rivelata la più efficace;

- permettere che il numero dei blocchi ecceda i punti sperimentali : il programma automaticamente provvede alla costruzione di un modello a blocchi in modo tale che questi non eccedano il numero dei punti di misura, che è la soluzione migliore per i gruppi di dati da mediamente estesi a molto ampi. Per le campagne che prevedono un numero di minore di misure, può essere utile rilassare questa condizione e permettere al numero di parametri di modello di eccedere il numero di punti misurati;
- ridurre l'effetto dei blocchi laterali : questa opzione coinvolge il calcolo dei valori dello Jacobiano corrispondenti ai blocchi laterali e sul fondo della sezione. Normalmente ad un blocco collocato lateralmente viene associato un peso maggiore rispetto a quello dei blocchi interni e in alcuni casi, specialmente quando viene utilizzata l'opzione di inversione robusta, possono determinarsi valori di resistività troppo alti o troppo bassi per i blocchi laterali. Questa opzione traslascia il contributo degli elementi della griglia fuori dai limiti di indagine della linea di misura per il calcolo dei valori della matrice Jacobiano per i blocchi laterali. Sulla base di prove effettuate cambiando questo parametro, per le inversioni della presente tesi si è deciso di non ridurre l'effetto dei blocchi laterali;
- modellazione topografica: il programma prevede l'inserimento nel file DAT di input dei valori delle coordinate di alcuni riferimenti topografici posti sulla linea di misura. Sulla base di questi dati il programma elabora una modifica nella griglia di forward modeling a seconda dell'opzione di modellazione topografica scelta (distorsione uniforme, attenuata, trasformazione secondo il metodo S-C);
- vincolamento degli strati: inserendo nel file DAT opportune istruzioni è possibile specificare la presenza di alcuni strati nel modello (per esempio utilizzando le informazioni provenienti da una indagine sismica, oppure da una stratigrafia, o da un sondaggio) vincolando il procedimento di inversione alla ricostruzione di questi strati.

5.6 Matrici dei valori di resistività e caricabilità T.E.1

Località:					GELA						
Configurazione					WENNER						
intervallo:					2						
mis	A	B	M	N	I (mA)	V (mV)	PS(mV)	r (Ω*m)	var	M (ms)	
1	1	4	2	3	134.82	01/05/1900 1.36	4.45	273.04.00	0.15	5.05	
2	2	5	3	4	94.27.00	2310.83	-194.85	308.04.00	2.16	22.04	
3	3	6	4	5	69.31.00	897.03.00	-342.26	162.74	6	44.06.00	
4	4	7	5	6	151.12.00	2597.52.00	-236.31	216	0,09375	8.06	
5	5	8	6	7	145.47.00	1992.43.00	-222.52	172.11.00	2.08	20.06	
6	6	9	7	8	194.36.00	2190.23.00	-159.24	141.61	0,084722	16.02	
7	7	10	8	9	204.79	1544.73	-348.66	94.79	0.13	17.07	
8	8	11	9	10	125.02.00	588.39.00	-171.67	59.06.00	3.01	61.06.00	
9	9	12	10	11	100.59.00	738.11.00	-211.66	92.21.00	3.37	38.05.00	
10	10	13	11	12	142.05.00	1447.33.00	-278.82	128.04.00	1.01	23.09	
11	11	14	12	13	51.51.00	600.08.00	-159.84	146.58.00	8.44	60.08.00	
12	12	15	13	14	66.47.00	897.41.00	-227.98	169.66	0,26875	36.05.00	
13	13	16	14	15	72.76	839.45.00	-154.19	145	0,233333	37.04.00	
14	14	17	15	16	0,769444	168.26.00	-265.41	118.31.00	21.25	167.02.00	
15	15	18	16	17	0,352778	79.92	-72.33	127.06.00	60.93	293.02.00	
16	16	19	17	18	91.69	242.49.00	-291.38	33.25.00	7.36	162.03.00	
17	17	20	18	19	5.59	130.61	-348.93	106.17.00	150.14.00	452.04.00	
18	18	21	19	20	8.18	28.83	483.02.00	44.26.00	0,545833	1983	
19	19	22	20	21	129.78	779.94	-295.67	75.52.00	2	36.03.00	
20	20	23	21	22	118.71	1424.93	-433.35	150.83	2.07	20.03	
21	21	24	22	23	132.32.00	1414.08.00	-230.7	134.29.00	0.23	16.03	
22	22	25	23	24	131.55.00	2080.42.00	-150.83	198.73	2.47	14.09	
23	23	26	24	25	122.19.00	2143.88	-223.84	220.47.00	2.04	12.05	
24	24	27	25	26	93.01.00	2338.36.00	-157.2	315.93	0,188194	14.06	
25	25	28	26	27	130.27.00	2817.62	-269.63	271.08.00	2.09	11.07	
26	26	29	27	28	132.95	3283.69	-397.85	310.37.00	4.16	13.06	
27	27	30	28	29	101.21.00	2185.59.00	-291.56	271.37.00	7.59	28.07.00	
28	28	31	29	30	109.24.00	2655.27.00	-266.24	305.44.00	4.16	15.02	
29	29	32	30	31	118.95	3065.69	-307.09	323.87	4.46	15.03	
30	1	7	3	5	136.16.00	989.13.00	82.16.00	182.58.00	0.26	8.09	

31	2	8	4	6	105.51.00	404.06.00	-15.9	96.37.00	0.01	2.04
32	3	9	5	7	70.41.00	195.03.00	-323.52	69.72	1.08	52.02.00
33	4	10	6	8	181.88	643.41.00	-237.18	88.91	0.55	15.07
34	5	11	7	9	111.37.00	471.18.00	-163.19	106.33.00	1.05	14.04
35	6	12	8	10	99.77	302.88	-169.19	76.03.00	0,050694	15
36	7	13	9	11	132.07.00	333.08.00	-40.67	63.38.00	0.58	13.06
37	8	14	10	12	59.09.00	151.95	-147.21	64.63	0.09	25
38	9	15	11	13	113.35.00	218.84	7.01	48.52.00	0.25	17.02
39	10	16	12	14	100.99	163.56.00	0,88125	40.07.00	0.32	20.06
40	11	17	13	15	21.38	39.91	-119.21	46.92	2.31	96.04.00
41	12	18	14	16	0,357639	0,683333333	-96.3	50.07.00	10.57	280.06.00
42	13	19	15	17	124.44.00	146.64	-27.1	29.62	0.35	25.06.00
43	14	20	16	18	43.17.00	159.77	93.21.00	128.06.00	147.72	207.06.00
44	15	21	17	19	103.18.00	89.06.00	-236.84	0,931944	0,053472	70.06.00
45	16	22	18	20	74.87	71.98	204.05.00	24.16.00	0,047222	64
46	17	23	19	21	21.41	27.01.00	-38.56	31.82	3.14	130.05.00
47	18	24	20	22	6.16	0,900694444	-479.6	97.67	51.18.00	2937.01.00
48	19	25	21	23	191.54.00	348.36.00	251.54.00	45.71	0.11	4.01
49	20	26	22	24	156.09.00	330.79	455.47.00	53.26.00	0.04	18.03
50	21	27	23	25	113.91	381.41.00	-308.75	84.16.00	0,063889	20.08
51	22	28	24	26	98.11.00	441.42.00	-395.96	113.07.00	1.35	22.03
52	23	29	25	27	104.17.00	352.26.00	-113.11	84.99	0,043056	12.03
53	24	30	26	28	116.42.00	350.19.00	-193.08	75.06.00	0,044444	14.08
54	25	31	27	29	152.17.00	629.08.00	-17.56	104.02.00	0.56	9.09
55	26	32	28	30	142.33.00	860.46.00	-49.37	151.95	0.57	7.06
56	1	10	4	7	147.02.00	318.63	-32.45	81.61	0.23	6.01
57	2	11	5	8	85.11.00	125.29.00	-28.95	55.05.00	0	4.07
58	3	12	6	9	48.99	189.82	-34.37	146.17.00	49.43.00	1355.02.00
59	4	13	7	10	127.47.00	148.92	-236.73	44.04.00	0.58	25.05.00
60	5	14	8	11	56.42.00	69.01.00	-305.51	46.17.00	1.14	43.05.00
61	6	15	9	12	112.13.00	371.54.00	-17.19	124.92	52.57.00	84.06.00
62	7	16	10	13	95.15.00	105.44.00	-32.41	41.78	0.26	13.04
63	8	17	11	14	22.35	1,027083333	-67.28	40.45.00	2.28	63.01.00
64	9	18	12	15	8.34	22.05	72.93	101.77	78.47.00	119.05.00
65	10	19	13	16	170.14.00	118.84	-104.81	26.33.00	0.18	17.01
66	11	20	14	17	118.02.00	85.06.00	120.49.00	27.17.00	0.31	13.09
67	12	21	15	18	93.36.00	38.06.00	13.27	15.37	1.27	97.08.00

68	13	22	16	19	96.11.00	50.28.00	-244.75	0,841667	0.07	68.05.00
69	14	23	17	20	52.11.00	23.28	-282.78	0,725	1.13	149.06.00
70	15	24	18	21	86.02.00	47.44.00	-245.02	0,888194	0,057639	115.08.00
71	16	25	19	22	91.95	60.81	-41.01	24.93	0.35	23.09
72	17	26	20	23	22.23	15	120.83	25.44.00	1.07	125
73	18	27	21	24	8.29	5.23	77.56.00	1,0125	0,227083	368.01.00
74	19	28	22	25	128.03.00	111.95	43.15.00	32.89	0.36	20.01
75	20	29	23	26	128.37.00	127.59.00	107.23.00	37.47.00	0.21	11.05
76	21	30	24	27	149.63	149.55.00	-20.16	37.68	0.05	6.06
77	22	31	25	28	110.58.00	115.71	-157.28	39.45.00	0.47	21.01
78	23	32	26	29	109.31.00	115.19.00	-306.22	39.73	0.58	26.01.00
79	1	13	5	9	98.69	60.96	-84.24	31.05.00	0.42	373.03.00
80	2	14	6	10	48.38.00	20.09	6.48	0,924306	0.18	27.04.00
81	3	15	7	11	51.59.00	15.17	-11.5	0,6375	0.27	55
82	4	16	8	12	92.12.00	36.34.00	-21.11	0,849306	0.39	26.03.00
83	5	17	9	13	0,921528	98.31.00	-100.82	227.83	97.72	1547.03.00
84	6	18	10	14	8.52	9.14	-230.77	53.94	0,058333	299.05.00
85	7	19	11	15	203.04.00	131.02.00	-204.12	32.38.00	0.24	15.05
86	8	20	12	16	159.91	89.43.00	-174.54	28.11.00	0.28	21.05
87	9	21	13	17	209.76	108.11.00	48.66	25.91	0.31	12.05
88	10	22	14	18	150.01.00	62.01.00	61.96	20.08	0.19	60.07.00
89	11	23	15	19	96.17.00	30.06.00	-232.99	16	0,045833	84.07.00
90	12	24	16	20	79.22.00	24.09.00	-242.42	15.29	0.53	65.01.00
91	13	25	17	21	126.76	34.88	-317.53	0,599306	0.56	75.03.00
92	14	26	18	22	59.27.00	26.18.00	-303.47	22.21	1.03	166.02.00
93	15	27	19	23	77.71	22.16	65.96	14.34	0.01	24.05.00
94	16	28	20	24	73.81	1,002083333	71.08.00	16.09	0.16	34.02.00
95	17	29	21	25	21.24	8.44	42.29.00	0,859722	0,110417	176
96	18	30	22	26	8.47	2.08	121.36.00	0,709722	4.24	587
97	19	31	23	27	149.36.00	75.73	-116.61	25.48.00	0.03	10.09
98	20	32	24	28	136.05.00	70.51.00	-113.97	25.96	0.27	22.01
99	1	16	6	11	75.05.00	23.57	54.61	0,842361	0.15	64.05.00
100	2	17	7	12	20.19	5.24	-52.54	16.03	0,102083	151.01.00
101	3	18	8	13	0,35	2.39	-22.24	19.18	0,147222	330.08.00
102	4	19	9	14	192.23.00	36.23.00	-32.41	0,516667	0,058333	22.02
103	5	20	10	15	140.76	46.81	-33.51	0,895139	0.03	8.03
104	6	21	11	16	203.84	84.08.00	-191.8	25.92	0.13	15.04

105	7	22	12	17	139.32.00	57.89	-44.59	26.11.00	0.07	14.05
106	8	23	13	18	123.07.00	41.29.00	-104.51	0,900694	0,04375	52.04.00
107	9	24	14	19	151.21.00	38.11.00	-329.55	0,683333	0.56	80.08.00
108	10	25	15	20	177.94	32.99	-371.88	0,503472	0.26	59.07.00
109	11	26	16	21	121.84	0,894444444	-247.77	0,470139	0.44	79.07.00
110	12	27	17	22	72.03.00	0,559027778	-352.51	11.17	0,067361	153.02.00
111	13	28	18	23	95.47.00	0,688888889	-187.99	10.48	0,05	213.02.00
112	14	29	19	24	54.86	0,359722222	-9.87	9.14	0.14	104.09.00
113	15	30	20	25	93.56.00	19.45	31.85	13.06	0.42	58.08.00
114	16	31	21	26	80.25.00	23.14	84.12.00	18.12	0.04	54.05.00
115	17	32	22	27	21.19	4.57	46.28.00	13.55	0,097917	417.04.00
116	1	19	7	13	134.43.00	24.34.00	0,760417	0,586806	0.05	70.01.00
117	2	20	8	14	100.36.00	12.36	-55.1	9.29	0.25	104.01.00
118	3	21	9	15	67.02.00	0,840972222	0,793056	22.14	0,263194	105.05.00
119	4	22	10	16	134.46.00	24.54.00	0,505556	0,594444	0.41	55.02.00
120	5	23	11	17	112	27.05.00	-68.86	18.52	0.13	27.05.00
121	6	24	12	18	148.54.00	45.18.00	-57.82	0,98125	0.13	66.04.00
122	7	25	13	19	208.56.00	45.13.00	-362.98	16.32	0.51	68.01.00
123	8	26	14	20	167.59.00	26.39.00	-371.05	0,51875	0.41	75.03.00
124	9	27	15	21	127.71	17.07	-385.67	10.45	0,044444	130.08.00
125	10	28	16	22	147.41.00	19.01	-425.25	0,428472	0.34	93.01.00
126	11	29	17	23	104.23.00	11.07	-197	8.47	0.55	116.03.00
127	12	30	18	24	86.09.00	14.27	-208.65	12.05	0,049306	199.03.00
128	13	31	19	25	107.12.00	0,640277778	-27.63	10.43	0.02	40.09.00
129	14	32	20	26	56.33.00	9.58	105.87	0,557639	0,061111	129.08.00
130	1	22	8	15	102.05.00	13.43	-110.35	11.52	0.26	36.03.00
131	2	23	9	16	84.16.00	12.48	-17.98	13.04	0,188889	574
132	3	24	10	17	58.91	7.39	-122.57	11.02	0,136806	194.09.00
133	4	25	11	18	197.61	25.34.00	-106.43	11.28	0	59.08.00
134	5	26	12	19	147.87	22.12	-209.51	13.16	0.05	78.01.00
135	6	27	13	20	125.84	0,797222222	-358.5	13.06	0.25	69.04.00
136	7	28	14	21	136.08.00	16.49	-281.27	10.06	0.25	70.08.00
137	8	29	15	22	136.64	15.47	-377.5	0,441667	0.27	67.04.00
138	9	30	16	23	172.95	18.43	-203.9	9.37	0.05	54.09.00
139	10	31	17	24	175.13.00	0,681944444	-211.62	0,357639	0.02	66.08.00
140	11	32	18	25	108.91	13.03	-195.83	10.53	0,043056	234.01.00
141	1	25	9	17	137.27.00	0,979861111	-66.75	0,720139	22.17	7561.01.00

142	2	26	10	18	103.61	0,76875	-185.88	17.34	0,0875	279.08.00
143	3	27	11	19	54.71	5.53	-219.73	10.17	2.09	413
144	4	28	12	20	131.91	0,556944444	-249.62	0,428472	0.16	40.06.00
145	5	29	13	21	123.03.00	12.15	-259.15	9.09	0.02	48.09.00
146	6	30	14	22	169.63	0,731944444	-306.07	10.04	0.19	38.04.00
147	7	31	15	23	160.52.00	15.48	-134.17	9.07	0.09	39.01.00
148	8	32	16	24	145.01.00	13.44	-199.07	9.31	0.02	35.08.00
149	1	28	10	19	101.01.00	9.45	-148.12	10.57	0,047222	104.08.00
150	2	29	11	20	90.57.00	0,313194444	-283.42	0,376389	0.39	90.06.00
151	3	30	12	21	62.29.00	3.26	-191.57	0,272222	0,043056	160.08.00
152	4	31	13	22	153.07.00	12.39	-315.87	9.12	0.02	33.05.00
153	5	32	14	23	130.18.00	10.28	-99.95	0,397917	0.13	39.05.00
154	1	31	11	21	113.82	8.35	-233.67	9.22	0.41	69.08.00
155	2	32	12	22	94.04.00	0,263194444	-267.78	0,342361	0.39	87.05.00

5.7 Matrici dei valori di resistività e caricabilità T.E.2

Località:						GELA					
configurazione:						WENNER					
intervallo:						2					
mis	A	B	M	N	I (mA)	V (mV)	PS(mV)	r (O*m)	var	M (ms)	
mis	A	B	M	N	I (mA)	V (mV)	PS (mV)	r (O*m)	var	M (ms)	
1	1	4	2	3	331.57.00	106.28.00	0,151389	4.03.00	0.02	7.05	
2	2	5	3	4	241.17.00	99.23.00	-550.3	5.17	1.42	266.08.00	
3	3	6	4	5	259.01.00	106.59.00	-222.67	5.17	0,0674	7.02	
4	4	7	5	6	359.06.00	145.82	-285.46	5.01.00	0,0458	10.05	
5	5	8	6	7	274.35.00	114.52.00	-9.61	5.25	1.13	19.06	
6	6	9	7	8	319.78	133.12.00	-243.17	5.23	0,0569	3.08	
7	7	10	8	9	416.04.00	149.48.00	-170.05	4.52.00	0.58	153.08.00	
8	8	11	9	10	283.26.00	107.34.00	-277.77	0,219444	0.58	232.03.00	
9	9	12	10	11	428.52.00	161.32.00	-109.75	0,21875	0.41	12.03	
10	10	13	11	12	354.86	131.02.00	-118.87	0,211111	0.04	212.08.00	
11	11	14	12	13	295.35.00	102.14.00	-259.53	4.35	0.28	198.01.00	
12	12	15	13	14	418.26.00	142.04.00	-305.62	4.27	0.42	147.03.00	
13	13	16	14	15	292.07.00	95.33.00	-192.21	4.01.00	0,0444	215.04.00	
14	14	17	15	16	244.44.00	74.62	-97.35	0,182639	0.27	219.08.00	
15	15	18	16	17	324.22.00	89.17.00	-70.4	3.46.00	0.04	160.03.00	
16	16	19	17	18	6.06	89.61	-118.95	0,182639	0.42.00	180.09.00	
17	17	20	18	19	20.49	90.96	-186.9	0,174306	0.26	203.02.00	
18	18	21	19	20	281.21.00	81.87	-125.92	0,170833	0.24	182.02.00	
19	19	22	20	21	267.78	81.32.00	-90.6	0,181944	0.18	1.09	
20	20	23	21	22	403.96	114.08.00	-151.17	3.57.00	0.34	10.03	
21	21	24	22	23	340.52.00	114.07.00	-342.59	4.21	0.25	21.01	
22	22	25	23	24	278.44.00	113.74	-32.94	5.13.00	0,0563	18.08	
23	23	26	24	25	359.37.00	149.53.00	-340.75	5.23	0,0528	8.03	
24	24	27	25	26	389.42.00	205.93	-262.66	0,294444	0,0542	8.08	
25	25	28	26	27	249.21.00	165.71	-248.82	8.35.00	1.43	12.08	
26	26	29	27	28	220.94	1324.88	-86.76	75.36.00	0.07	10.08.00	
27	27	30	28	29	251.06.00	1118.67	-331.21	55.99	0,0611	22.05	
28	28	31	29	30	228.07.00	1941.45.00	81.48.00	106.99	27.76	0.00	
29	29	32	30	31	212.05.00	1763.33.00	-34.3	104.28.00	1.23	20.04	

30	1	7	3	5	344.41.00	1560.00.00	6.56	0,218056	0.03	6.03
31	2	8	4	6	264.45.00	49.43.00	-27.66	4.07	0.02	120.00.00
32	3	9	5	7	352.13.00	71.55.00	-243.59	5.11	0.31	6.03
33	4	10	6	8	394.27.00	81.55.00	-216.9	5.02.00	0.28	9.07
34	5	11	7	9	317.01.00	62.27.00	-69.08	0,231944	0.14	55.01.00
35	6	12	8	10	367.69	72.84	-155.2	0,234722	0.02	9.06
36	7	13	9	11	282.23.00	58.63	4.18	5.22	0.19	128.04.00
37	8	14	10	12	293.13.00	61.28.00	18.54	5.25.00	0.18	5.06
38	9	15	11	13	281.32.00	53.99	-52.27	0,223611	0.15	21.04
39	10	16	12	14	249.78	45.63	-255.95	4.59	0.12	92.05.00
40	11	17	13	15	413.06.00	76.69	-210.19	0,2125	0.07	45.01.00
41	12	18	14	16	350.48.00	62.12.00	-36.75	4.45	0.01	1440.00.00
42	13	19	15	17	278.17.00	46.24.00	29.07.00	4.18.00	0.01	67.09.00
43	14	20	16	18	454.68	71.14.00	-6.93	0,189583	0	51.04.00
44	15	21	17	19	366.12.00	60.89	-87.06	4.18.00	0.01	79.07.00
45	16	22	18	20	285.87	50.46.00	-34.52	4.44	0.09	79.06.00
46	17	23	19	21	303.77	52.54.00	29.96	4.35	0.07.00	56.04.00
47	18	24	20	22	268.74	41.84	-75.19	0,188194	0.02	0.00
48	19	25	21	23	277.12.00	49.55.00	-248.45	4.49.00	0.26	10.07
49	20	26	22	24	256.89	52.17.00	-115.74	5.01.00	0.01	20.05
50	21	27	23	25	391.54.00	84.57.00	-43.98	5.43.00	0.24	23.09
51	22	28	24	26	319.11.00	68.79	-170.77	5.42	0.29	5.02
52	23	29	25	27	225.99	62.03.00	-116.61	0,314583	0.38	18.01
53	24	30	26	28	250.05.00	160.88	-143.97	16.17.00	0.23	2.02
54	25	31	27	29	214.41.00	145.94	-117.33	17.11	0.38	12.04
55	26	32	28	30	271.96	148.93	-41.87	0,594444	0.25	14.06
56	1	10	4	7	374.93	55.56.00	-0.6	5.59.00	0.03	18.02
57	2	11	5	8	278.24.00	41.06.00	0,342361	5.56.00	0.00.00	5.08.00
58	3	12	6	9	406.85	58.92	34.56.00	5.46.00	0.00	3.09.00
59	4	13	7	10	263.85	40.04.00	-249.05	0,258333	0.16	154.06.00
60	5	14	8	11	323.75	50.16.00	-48.02	0,266667	0.28.00	132.08.00
61	6	15	9	12	320.34.00	50.71	5.31	0,275694	0.27	20.03
62	7	16	10	13	375.88	56.97	108.66	0,257639	0.08	31.02.00
63	8	17	11	14	264.89	15.18	-196.51	5.58	0.07.00	50.06.00
64	9	18	12	15	339.99	48.82	-248.33	5.41.00	0.04	2.04
65	10	19	13	16	357.03.00	50.58.00	-155.24	5.34.00	0.08	3.04
66	11	20	14	17	387.03.00	52.13.00	1.37	5.08	0.02	26.06.00

67	12	21	15	18	491.12.00	64.68	73.68	0,234028	0.00	36.08.00
68	13	22	16	19	262.36.00	11.41	-25.36	5.09	0.01	66.07.00
69	14	23	17	20	345.08.00	48.44.00	-33.13	5.28	0.07	55.06.00
70	15	24	18	21	354.06.00	48.47.00	-58.31	5.16	0.05	9.07
71	16	25	19	22	244.72	32.08.00	-30.87	5.05.00	0.12	61.03.00
72	17	26	20	23	383.78	4.07	-210.04	5.11	0.12	63.09.00
73	18	27	21	24	373.31.00	54.51.00	-93.43	5.05	0.11	6.06
74	19	28	22	25	323.36.00	50.22.00	-125.32	0,268056	0.15	19.09
75	20	29	23	26	238.46.00	42.73	10.03	0,302778	0.33	0.00
76	21	30	24	27	251.95	42.62	-131.2	6.38.00	0.14	8.03
77	22	31	25	28	261.09.00	69.45.00	-191.31	10.03	0.18	34.03.00
78	23	32	26	29	313.05.00	71.92	-169.38	0,379167	0.08	23.02.00
79	1	13	5	9	410.16.00	1.34	-14.96	6.08	0,3146	2611.05.00
80	2	14	6	10	257.73	30.91	52.39.00	6.03	0.01	5.06
81	3	15	7	11	345.77	34.04.00	32.04.00	0,232639	1.06	523.07.00
82	4	16	8	12	362.09.00	45.16.00	88.46.00	6.27	0.04	3.04.00
83	5	17	9	13	308.91	15.11	21.48	6.36	0.15	427.03.00
84	6	18	10	14	344.93	44.64	-208.04	6.51.00	0.16	7.08
85	7	19	11	15	280.63	34.95	-211.62	6.26.00	0.09	21.03
86	8	20	12	16	321.83	38.95	-191.42	6.08	0.06	21.09
87	9	21	13	17	392.54.00	45.67	-104.59	0,267361	0.05	29.09.00
88	10	22	14	18	345.34.00	40.24.00	116.35.00	0,268056	0.04	816.00.00
89	11	23	15	19	326.28.00	38.11.00	0,722917	0,26875	0.02	43.06.00
90	12	24	16	20	448.07.00	51.73	60.91	0,263194	0.01	23.01.00
91	13	25	17	21	275.18.00	32.83	10.18	0.00	0.05	34.04.00
92	14	26	18	22	406.01.00	46.67	-88.95	0,2625	0.09	47.05.00
93	15	27	19	23	345.62	40.83	-174.54	0,273611	0.01	49.02.00
94	16	28	20	24	281.93	9.32	-153.89	0,273611	0.11	58.05.00
95	17	29	21	25	17.25	30.78	-160.48	0,29375	0.18	75.05.00
96	18	30	22	26	273.79	36.98	-124.41	0,304861	0.18	18.09
97	19	31	23	27	260.97	35.47.00	-14.74	0,307639	0.01	8.06
98	20	32	24	28	364.15.00	11.35	-195.57	8.19	0.07	20.06.00
99	1	16	6	11	342.93	36.96	71.53.00	0,303472	0.06	10.05.00
100	2	17	7	12	274.33.00	2.02	0,344444	0,275	0.34	25416.00.00
101	3	18	8	13	372.67	40.55.00	61.04.00	0,308333	0.02	0.00
102	4	19	9	14	266.21.00	20.06	30.53.00	0,217361	0.15	19.04
103	5	20	10	15	335.71	36.77	26.57.00	0,311111	0.04	21.01

104	6	21	11	16	360.24.00	39.32.00	-155.2	0,309722	0.13	0.00
105	7	22	12	17	274.99	29.36.00	-92.34	0,299306	0.09	43.08.00
106	8	23	13	18	400.47.00	42.08.00	-61.36	6.06	0.11	44.07.00
107	9	24	14	19	377.77	38.59.00	-127.5	6.42	0.08	1272.00.00
108	10	25	15	20	258.26.00	26.05.00	-27.1	6.45	0.18	70.07.00
109	11	26	16	21	396.34.00	39.74	57.48.00	6.03	0.02	8.08.00
110	12	27	17	22	406.27.00	40.92	-56.12	6.33	0.01	41.03.00
111	13	28	18	23	321.88	32.28.00	-226.44	6.03	0.09	53.06.00
112	14	29	19	24	236.99	25.64	-79.37	6.08	0.15	51.04.00
113	15	30	20	25	267.13.00	28.62	-166.36	0,300694	0.11	52.04.00
114	16	31	21	26	248.73	27.76	-135.57	7.01	0.02	64.07.00
115	17	32	22	27	332.21.00	36.09.00	-139.22	0,318056	0.07	23.04.00
116	1	19	7	13	409.94	2.39	7.58	0,225694	0.03	677.05.00
117	2	20	8	14	264.07.00	25.51.00	72.48.00	7.27	0.06	45.06.00
118	3	21	9	15	389.85	34.96	30.79	0,302778	0.41	563.04.00
119	4	22	10	16	261.01.00	25.73	49	7.43	0.05	1392.00.00
120	5	23	11	17	291.34.00	27.44.00	105.38.00	7.01	0.15	79.06.00
121	6	24	12	18	357.02.00	33.26.00	-47.71	7.02	0.02	13.03.00
122	7	25	13	19	271.77	576.00.00	-140.47	0,295833	0.28	100.07.00
123	8	26	14	20	332.53.00	6.35	-91.32	0,311111	0.02	63.09.00
124	9	27	15	21	350.89	7.26	-52.2	0,3	0.15	48.03.00
125	10	28	16	22	300.18.00	1.37	-84.57	6.37	0.17	80.06.00
126	11	29	17	23	235.85	22.16	-318.44	7.08	0.34	110.02.00
127	12	30	18	24	257.83	23.04	-110.54	0,308333	0.16	56.08.00
128	13	31	19	25	260.57.00	0.18	-26.12	7	0.04	44.02.00
129	14	32	20	26	348.63	8.31	-110.35	0,31875	0.05	35.06.00
130	1	22	8	15	403.87	12.28	-24.84	7.09	0.03	17
131	2	23	9	16	268.21.00	29.71	-19.03	0,426389	0.56	14712.00.00
132	3	24	10	17	384.33.00	33.39.00	6.07	0,336111	0.02	10.04.00
133	4	25	11	18	268.91	23.15	-57.02	7.57	0.11	30.06.00
134	5	26	12	19	275.86	23.08	-110.88	7.36	0.15	48.02.00
135	6	27	13	20	268.24.00	13.38	-47.19	4.39	0.21	788.06.00
136	7	28	14	21	277.35.00	0,929166667	-92.07	0,313194	0.14	54.01.00
137	8	29	15	22	225.17.00	0,767361111	-38.41	0,317361	0.28	89.05.00
138	9	30	16	23	267.11.00	20.51	-158.33	0,302778	0.14	55.07.00
139	10	31	17	24	253.72	0,850694444	-130.74	0,311111	0.25	70.01.00
140	11	32	18	25	341.46.00	26.56.00	-36.11	0,308333	0.07	22.05.00

141	1	25	9	17	264.15.00	7.34	-33.39	0,138194	1.31	3454.05.00
142	2	26	10	18	253.06.00	20.07	-101.91	8.21	0,0493	176.02.00
143	3	27	11	19	282.29.00	22.16	-156.94	0,353472	0.42	140.07.00
144	4	28	12	20	271.69	19.06	-52.01	7.25	0.01	9.06.00
145	5	29	13	21	207.43.00	8.45	-15.23	4.01	1.09	18264.00.00
146	6	30	14	22	244.01.00	16.06	-43.27	0,308333	0.01	40.04.00
147	7	31	15	23	246.41.00	0,719444444	-94.83	0,308333	0.01	21.04.00
148	8	32	16	24	294.27.00	19.25	-40.86	6.58	0.07	22.01.00
149	1	28	10	19	261.75	0,770138889	-65.65	0,342361	0.00	19.03.00
150	2	29	11	20	191.25.00	0,563888889	-71.53	0,336111	0.17	36.02.00
151	3	30	12	21	249.02.00	0,683333333	-33.58	7.19	0.05	7.04.00
152	4	31	13	22	245.21.00	0,425	-9.61	4.48	0.54	588.02.00
153	5	32	14	23	264.71	15.36	-132.63	6.56	0.02	23.08.00
154	1	31	11	21	241.17.00	0,609027778	-49.37	7.28	0.08	18.06.00

5.8 Risultati.

Lo scopo del lavoro è stato quello di confrontare l'immagine elettroresistiva dei terreni definiti naturali con quelli contaminati da agenti inquinanti.

Le sezioni tomografiche sono, per questo, state ubicate in terreni sicuramente interessati da idrocarburi (T.E. 1) ed in terreni non interessati da contaminazioni apparenti (T.E.2).

Dal punto di vista geo-litologico i terreni investigati sono costituiti da sabbie e calcareniti in matrice limo-sabbiosa poggianti su sedimenti di natura argillosa.

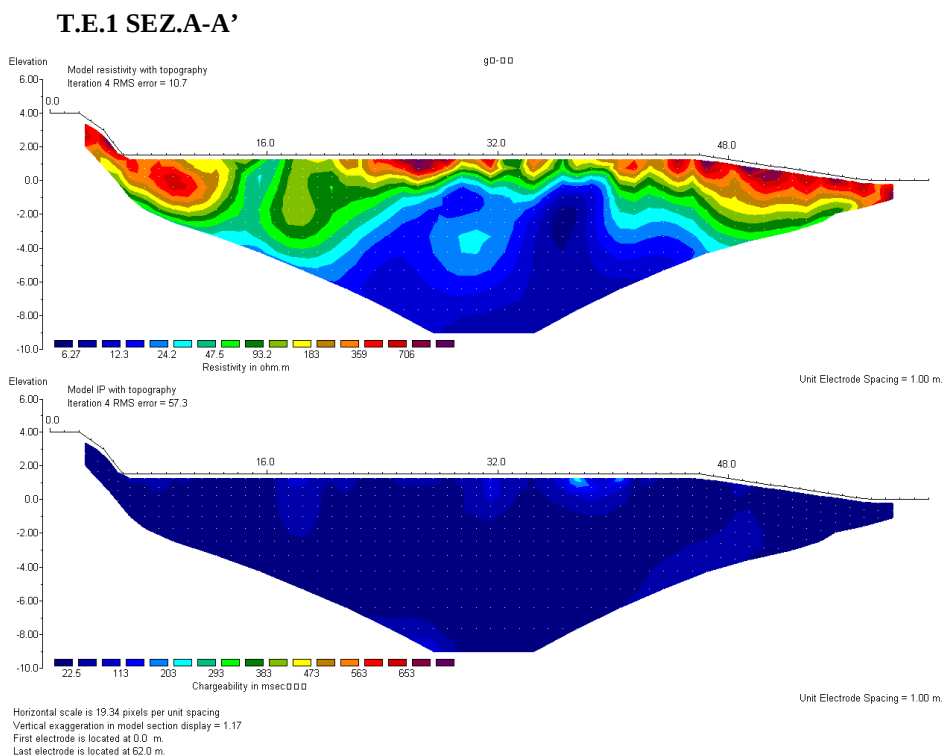
L'analisi delle immagini tomografiche ha consentito di bene discriminare i terreni contaminati da quelli naturali. Ciò risulta sia nella T.E.1 ed anche nella T.E. 2.

Relativamente alla T.E.1 si osservano valori di resistività compresi tra 6.27 ohm*m ed oltre 1200 ohm*m.

L'immagine elettrica rileva che gli elettrostrati con valori di resistività > 706 ohm*m sono concentrati nella parte più superficiale della sezione tomografica, si presentano in maniera discontinua e con geometria nucleiforme. Questi elettrostrati sono riferibili alla presenza di idrocarburi.

Gli elettrostrati superficiali sono contenuti in un'elettrostrato caratterizzato da valori di resistività compresi tra 47.5 ohm*m e 93.2 ohm*m, questi valori di resistività sono riferibili a terreni limo sabbiosi con grado di saturazione che aumenta con la profondità.

Alla profondità di circa 2 m dal piano campagna si intercetta un altro elettrostrato con valori di resistività compresi tra 6.10 ohm*m e 47.5 ohm*m. Tale elettrostrato è caratterizzato da continuità laterale ed è riferibile alla falda.



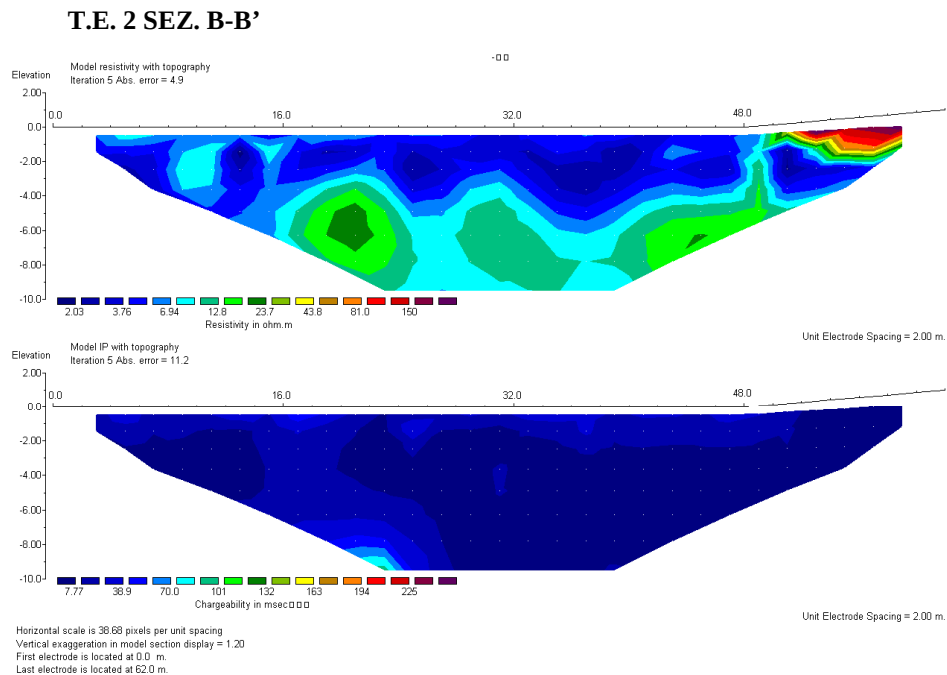
L'immagine della sezione capacitiva del terreno non evidenzia particolari fenomeni di polarizzazione.

Relativamente alla T.E.2 la sezione è caratterizzata da elettrostrati con valori resistività compresi tra 2.03 ohm*m e 450 ohm*m.

L'immagine elettrica è data dalla sovrapposizione di due elettrostrati:

- Il primo più superficiale ha valori di resistività minori di 12.8 ohm*m (falda);
- Il secondo, più profondo, è caratterizzato da valori di resistività compresi tra 12.8 ohm*m e 33.5 ohm*m (terreni saturi).

Da osservare che nella parte più superficiale della sezione, al 52° metro del nostro allineamento, si riscontra un terzo elettrostrato con valori di resistività di 450 ohm*m. Tali valori sono riconducibili alla presenza di inerti e altri agenti inquinanti.



L'immagine della sezione capacitiva del terreno non evidenzia particolari fenomeni di polarizzazione.

5.9 Interpretazione dei risultati

Lo scopo del lavoro è stato quello di confrontare l'immagine elettroresistiva dei terreni definiti naturali da quelli contaminati da agenti inquinanti ed il loro sviluppo latero-verticale. Le sezioni tomografiche sono, per questo, state ubicate in terreni

sicuramente interessati da idrocarburi (T.E. 1) ed in terreni non interessati da contaminazioni apparenti (T.E.2).

Le linee tomografiche sono state eseguite a NW della riserva in zona A come si evidenzia nella figura seguente.

I principali risultati ottenuti possono essere così sintetizzati:

- La presenza di idrocarburi è marcata da valori elevati di resistività ($\text{res.} > 889 \text{ ohm}\cdot\text{m}$)
- I terreni naturali presentano valori di resistività compresi tra $6.10 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ e $150 \text{ ohm}\cdot\text{m}$, valori riferibili a litotipi di natura sabbiosa ed argillosa
- Le proprietà capacitive dei terreni risultano non modificate dagli agenti inquinanti.



Figura 5.7 UBICAZIONE SONDAGGI ELETTRICI

Conclusioni

Il limite delle tecniche geofisiche è quello di essere indagini indirette, per cui per interpretare in maniera più possibile attinente alla realtà è spesso necessario utilizzare informazioni aggiuntive dirette, come per esempio le stratigrafie provenienti dai sondaggi effettuati nella zona indagata o in prossimità di essa.

La caratterizzazione mediante tecniche geofisiche di zone di accumulo di idrocarburi sono state effettuate per mezzo di un lavoro sperimentale attraverso l'utilizzo dei software RES2DINV (per l'inversione dei dati misurati in campo).

Lo studio condotto per la presente tesi ha riguardato la discarica di idrocarburi nel Biviere di Gela. Nel luogo in cui si è operato si aveva certezza della contaminazione in quanto a memoria d'uomo, in quel punto, che è molto vicino alla strada, si ricorda l'abbandono di questo materiale e infine già nel 2003 si era eseguito un piccolo sondaggio attraverso uno scavo per la conferma. Uno degli scopi del lavoro è stato quindi quello di capire le dimensioni di tale discarica e se vi era un contatto diretto con la falda. Un altro obiettivo raggiunto è stato quello di individuare altri agenti inquinanti nell'area di studio. Infatti se il primo allineamento è stato scelto per avere una sezione sicuramente contaminata, la seconda sezione è stata scelta per avere un'immagine di confronto di terreni vergini con le stesse caratteristiche litologiche. Invece anche nella seconda sezione è stato riscontrato abbandono di agenti inquinanti, andando a individuare una seconda discarica, di cui successivamente si potrebbero studiare le caratteristiche. Ma il vero obiettivo di questo lavoro è stato quello di dimostrare che attraverso l'utilizzo di questa tecnica non invasiva, si potrebbero censire le discariche presenti all'interno del SIC – ZPS, andando a indagare nei posti limitrofi alla carreggiata stradale in cui a memoria d'uomo si ricordano sversamenti di rifiuti e solo successivamente procedere con indagini dirette per capire le caratteristiche dell'inquinante.

La fase sperimentale si è focalizzata sulla realizzazione di tomografia elettrica di resistività e caricabilità : i risultati delle indagini, calibrati per mezzo della costruzione

di modelli teorici di resistività e caricabilità, hanno evidenziato la necessità di procedere con cautela nell'associare univocamente le anomalie conduttive individuate con l'effettiva natura e geometria dei corpi che le hanno generate e gli algoritmi di inversione non sempre sono in grado di riprodurre modelli ove siano separabili i singoli contributi. Per ottenere risultati più dettagliati la riduzione della spaziatura tra gli elettrodi potrebbe consentire una interpretazione di maggior dettaglio delle anomalie evidenziate.

Per avere comunque una visione completa del sottosuolo si potrebbe effettuare una ricostruzione tridimensionale collegando le varie tomografie come un tutt'uno, legando i set di dati acquisiti utilizzando l'apposito software RES3DINV, che permette di combinare le misure provenienti da una griglia di punti. Se effettivamente si volesse intraprendere questa strada, allora sarebbero necessari alcuni accorgimenti: la griglia di punti dovrebbe essere il più possibile quadrata per non ottenere ricostruzioni distorte (oblunghie) delle anomalie, per cui la spaziatura degli elettrodi delle linee più lunghe e quelle trasversali dovrebbe essere simile; la configurazione elettrodica dipolo-dipolo sarebbe vivamente consigliata perché gli altri sistemi forniscono una ridotta copertura in prossimità degli estremi della linea di misura; la distanza fra le linee dovrebbe essere abbastanza simile alla spaziatura fra gli elettrodi, per cui nel presente caso si renderebbero effettivamente necessarie nuove acquisizioni per infittire la maglia delle misurazioni.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare pubblicamente tutte le persone che mi hanno aiutato nella realizzazione di questa tesi di laurea: i miei familiari, gli amici, i colleghi;

Il professore G. Siracusa e la dott. D. La Rosa;

La ditta Geoscheck s.r.l. in particolare i geologi Dott.G.Coco e Dott.G.Caruso;

Il direttore della R.N.O del Biviere di Gela Emilio Giudice.

Bibliografia.

Norinelli A. Elementi di geofisica applicata.

Carrara E. Rappolla A. Roberti N. Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici.

Decreto Legislativo 13 Gennaio 2003 n. 36.

Dahlin T. and Bernstone C. A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays. Reno, Nevada.

Li Y. and Oldenburg, D.W. 1992. Approximate inverse mappings in DC resistivity problems. *Geophysical Journal International*.

Aristodemou E., Thomas-Betts A. DC resistivity and induced polarisation investigations at a waste disposal site and its environments. *Journal of applied geophysics*.

Dahlin T. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications.

Dey A., Morrison H.F. Resistivity modelling for arbitrarily shaped two dimensional structures. *Geophysical prospecting*.

Dillon W. R Multivariate analysis : methods and applications. John Wiley & sons.

Edwards L.S. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*.

Loke M.H. Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite difference and the finite element methods.

Loke M.H. Tutorial : 2D and 3D electrical imaging surveys. 1° Seminario informale su tomografia elettrica “Lo stato dell’arte ed i programmi RES2DINV e RES3DINV”. IGS IdroGeoStudi, Catania.

Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical prospecting.

Martoglio E.. Applicazione di tomografie elettriche e di polarizzazione indotta allo studio dei corpi di discarica RSU. Tesi di laurea, Politecnico di Torino.

Attività di tutoraggio svolte dall’Ing A.Gruszka presso la Geovetical s.r.l.

STING Instruction Manual.

Bourelly, P., 1966, 1968, 1970. Les algues d'eau douce.- I, II, III Ed. N. Boubee et C^{le}, Paris.

Braioni, M.G. e D. Gelmini. 1983. Rotiferi Monogononti. In: Ruffo, S. (Ed.) Guide per il riconoscimento delle specie animali delle acque interne italiane. Consiglio Nazionale delle Ricerche, 23: 180 pp.

Brinkhurst, R.O. and B.G.M. Jamieson 1971. *Aquatic Oligochaeta of the World*. Oliver & Boyd, Edinburgh, 860 pp.

C.N.R., 1977-1986. *Guide per il riconoscimento delle specie animali delle acque interne italiane*. RUFFO S., (Editor), Collana del Progetto Finalizzato “Promozione della Qualità dell’Ambiente”, C.N.R., ROMA.

- Campaioli S., Gheti P.T., Minelli A. & Ruffo S., 1994. *Manuale per il riconoscimento dei macroinvertebrati delle acque dolci italiane*. Volume I. APR & B (eds), Trento. p. 356.
- Campaioli S., Gheti P.T., Minelli A. & Ruffo S., 1999. *Manuale per il riconoscimento dei macroinvertebrati delle acque dolci italiane*. Volume II. ARPA Trento (eds), Trento. p.358-484
- Clasen J. and H. Bernhardt , 1980. OECD Eutrophication Programme. Project, Shallow Lakes and Reservoirs, Final Report: 289 pp.
- CNR-IRSA 1994 - *Metodi analitici per le acque*. Quaderni dell'Istituto di Ricerca Sulle Acque. Roma.
- Decreto Legislativo 152. 1999. *Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana n.101/L, Roma
- Decreto Legislativo 258. 2000. Disposizioni correttive e integrative del decreto legislativo 11 maggio 1999, n.152, in materia di tutela delle acque dall'inquinamento, a norma dell'articolo 1, comma 4, della legge 24 aprile 1998, n.128. Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana n.153/L, Roma.
- Dussart , B. 1967. Les Copépodes des eaux continentales. Tome I: Calanoides et Harpacticoides. Editions N. Boubée & Cie, Paris-VI: 500 pp.
- Dussart , B. 1969. Les Copépodes des eaux continentales. Tome II: Cyclopoides et Biologie. Editions N. Boubée & Cie, Paris-VI: 292 pp.

EC Directive 60/2000, Framework for Community Action in the Field of Water Policy.
L.327, 2000.

Ghetti, P.F. (1997) - *Indice Biotico Esteso (I.B.E.). I macroinvertebrati nel controllo della qualità degli ambienti di acque corrente*. Provincia Autonoma di Trento. pp. 222.

Golterman, H. L. and R.S. Clymo, 1969. Methods for physical and chemical analyses of fresh waters. IBP Handbook N°8: 172 pp.

Krebs C.J., 1989. *Ecological Methodology*. Harper & Row, Publishers, New York 654 pp.

Margalef R., 1958 - Information theory in ecology. *Gen. Syst.*, 3:37-71.

OCDE, 1982. Eutrophication of waters. Monitoring, assesment and control. OCDE, Paris.

Resh V.H., Brown A.V., Covich A.P., Gurtz M.E., Li W.H., Mindhall G.W., Reice S.R., Sheldon A.L., Wallace J.B. And Wissmar R., 1988 - The role of disturbance in stream ecology. *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 7 (4) 433-455.

Ruttner-Kolisko, A. 1974. Plankton rotifers. Biology and taxonomy. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart: 146 pp.

Sansoni G. (1988): *Macroinvertebrati dei corsi d'acqua italiani*. APR & B (eds) - Trento 190 pp.

Shackleford, B. 1988 - *Rapid Bioassessments of Lotic Macroinvertebrate Communities*. Biocriteria Development. Arkansas Department of Pollution Control and Ecology. 45 pp.

Shannon C.E. & Weaver W., 1963. *The mathematical theory of communication*. Univ. Illinois Press, Urbana.

Tachet, H., Bournaud, M. et Richoux, P. 1980 - *Introduction a l'etude des macroinvertébrés des eaux douces*. Imprimerie C.R.D.P. Lyon, 155 pp.

Utermohl H. 1958 Zur Vervollkommung der quantitativen Phytoplankton-Metodik. *Mitt. int. Verein theor. angew. Limnol.* 17: 47-71.

Washington H.G. 1982. Diversity, biotic and similarity indices. A review with special relevance to aquatic ecosystem. *Water Res.* 18 (6):653-694.

Wetzel, R.G., 1975. *Limnology*. Saunders W. B. Co. Philadelphia: 743 pp.

Nome file: Tesi definitiva Davide Giordano
Directory: C:\Documents and Settings\Lipu80\Desktop
Modello: C:\Documents and Settings\Lipu80\Dati applicazioni\Microsoft\Modelli\Normal.dot
Titolo: 1
Oggetto:
Autore: .
Parole chiave:
Commenti:
Data creazione: 28/06/2007 17.03.00
Numero revisione: 4
Data ultimo salvataggio: 09/07/2007 16.33.00
Autore ultimo salvataggio: LIPU
Tempo totale modifica 29 minuti
Data ultima stampa: 21/04/2008 16.32.00
Come da ultima stampa completa
Numero pagine: 125
Numero parole: 26.077 (circa)
Numero caratteri: 148.644 (circa)