

PROGETTO MURST/CIPE “Sviluppo di modelli di
simulazione”

Sottoprogetto 2B: “Modellazione di fenomeni
dipendenti dalla densità per problemi d’inquinamento
delle falde acquifere

Workpackage 3

*Contratto tra MURST/CIPE e CRS4 stipulato in data
01/04/00*

Identificazione dei siti di studio e organizzazione del
sistema GIS/database.

Stato di avanzamento attività 3.2

P. Cau, C. Gallo, E. Lorrai, L. Muscas

INTRODUZIONE

Nel presente rapporto viene presentato lo stato di avanzamento dell'attività 3.2 ad un anno dall'inizio del progetto. Detta attività consiste nella realizzazione di un sistema informativo per ciascuno dei siti selezionati comprensivo di mappe, archivi, dati, etc. da utilizzare successivamente per le simulazioni. In questo contesto il lavoro è consistito nell'acquisizione, gestione e analisi di dati eterogenei provenienti da diverse fonti informative. Tali dati sono costituiti da rilievi in campo e/o in laboratorio, cartografia esistente e simulazioni eseguite con i modelli numerici di calcolo che in alcuni casi sono di tipo dinamico, cioè variabili nel tempo.

Mediante l'uso di software GIS commerciali, i dati sono stati organizzati e convertiti in formati consistenti fra loro, e in seguito inseriti e elaborati all'interno del GIS stesso, in modo da arrivare ad un sistema dinamico per la gestione, l'analisi e la rappresentazione dei vari tipi di dati (alfanumerici, tabelle, raster, vettoriali; dati statici e dinamici; etc.). Operazioni di georeferenziazione e correzione in molti casi sono state particolarmente impegnative a causa della scarsa qualità dei dati stessi.

Entrando in maggiore dettaglio sull'attività svolta durante il primo anno, si è fatto un primo "screening" su una serie di siti in Sardegna e non. Questi siti presentano problemi di inquinamento di una certa rilevanza e ad una prima analisi si sono dimostrati dei validi candidati per uno studio maggiormente approfondito.

I siti considerati per lo studio preliminare vengono elencati qui di seguito:

- Ringe
- Capoterra
- Portoscuso
- Muravera
- Oristano

Nei seguenti paragrafi viene data una descrizione di massima dei siti in studio e dei problemi di inquinamento a cui sono soggetti. Infine, sulla base di una serie di considerazioni viene descritta la scelta dei due siti su cui si focalizzerà il progetto.

1. IL SITO RINGE

1.1 Descrizione dell'area in studio

Il sito Ringe (figura 1) è situato in una fabbrica abbandonata in cui venivano prodotti e stoccati asfalto e creosoto (miscela di vari idrocarburi che derivano dagli scarti di colonna di distillazione del petrolio), a circa 20 Km dalla città di Odense, sull'isola di Funen, in Danimarca (vedi figure 2 e 3).

Durante il periodo 1929-1962 in tutta l'area vennero interrati serbatoi per lo stoccaggio di asfalto e creosoto. Il composto (TAR) allo stato grezzo veniva infatti mantenuto all'interno di due serbatoi sotterranei con pareti a mattoni e fondo in cemento. Altri serbatoi venivano usati per lo stoccaggio dell'eccesso giornaliero di TAR scaldato e per la produzione dell'emulsione. In uno dei serbatoi si immagazzinavano benzene, naftalene e ammoniaca per la diluizione del catrame.

Nel periodo successivo 1962-1988 la fabbrica appartenne ad una ditta specializzata nella produzione di catrame (1962-1968), alla FIAT (1968-1974), e infine alla ditta di automobili O.P.N. ApS. (1974-1988).

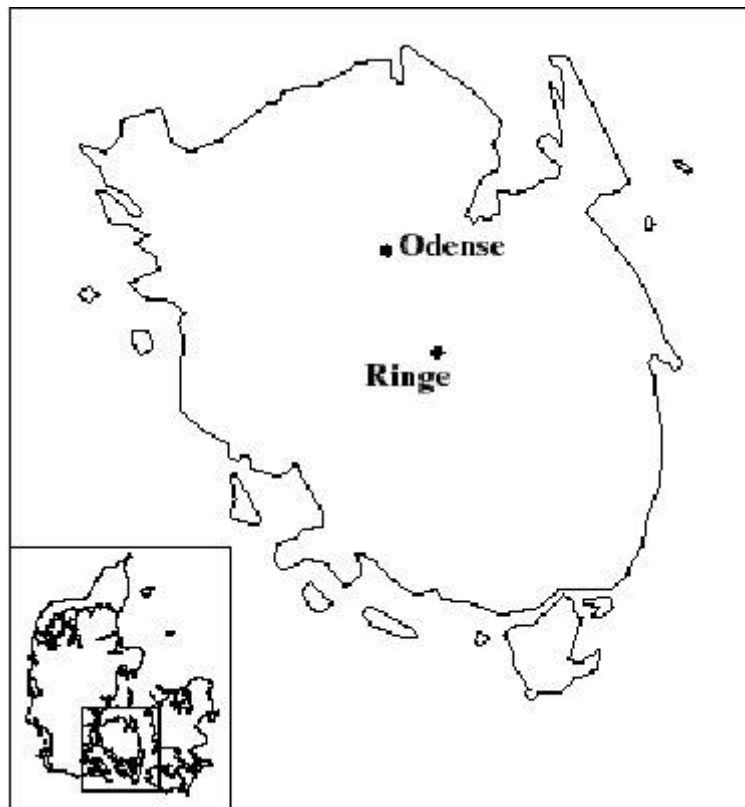


Figura1: Localizzazione del sito Ringe

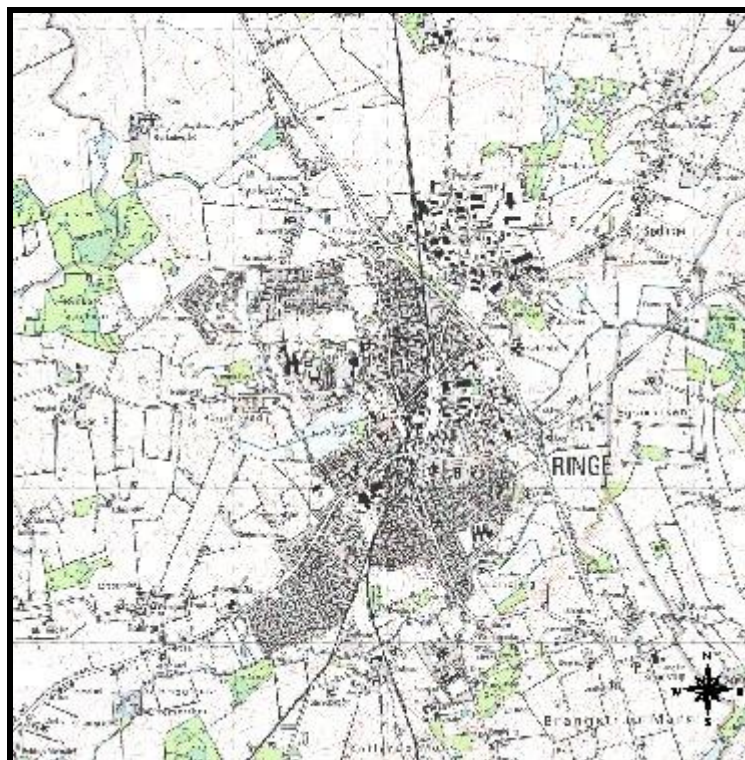
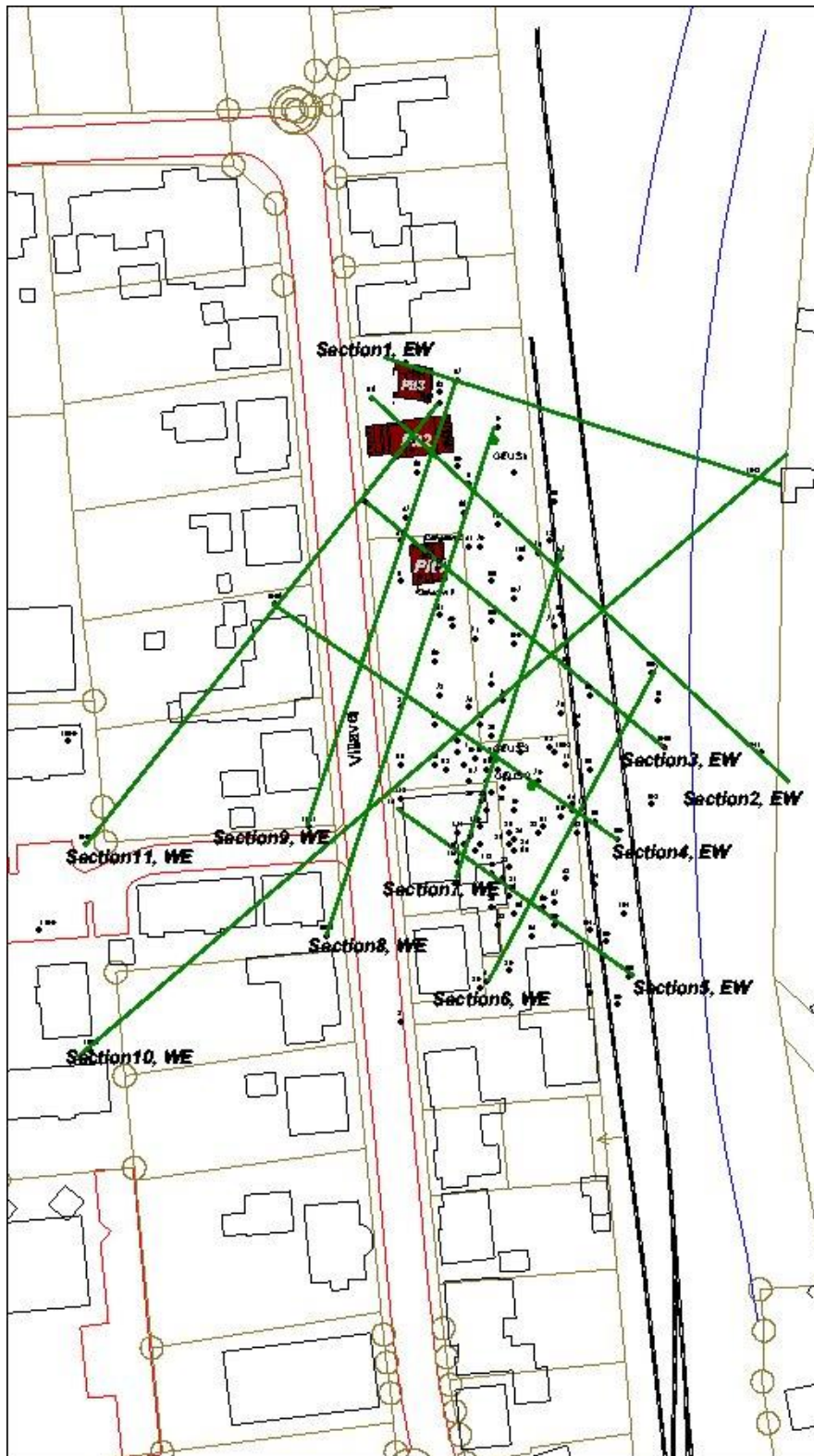


Figura: Mappa della cittadina di Ringe



Location of geological sections 1-11

0 5 10 15 Meters



Legend

- Wells (with no.)
- Wells made within the framework of Pare-to-Core
- Pit
- Stream
- Railway
- Building
- Road
- Cadastral Map

Figura 3: Localizzazione delle sezioni geologiche

L'inquinamento da creosoto nel suolo "till" (ove per *till* si intende un suolo fratturato, argilloso con lenti di sabbia) venne inizialmente rilevato nel 1987. Nel luglio del 1988 l'Agenzia di Protezione Ambientale danese avviò il processo di bonifica. I vecchi edifici furono rimossi assieme al suolo inquinato e ai serbatoi interrati. Oggi gli edifici direttivi, gli unici non dismessi, sono di proprietà della *Dansk Metal*.

1.2 Temi di studio

Al fine di misurare il livello di contaminazione, in vari anni sono stati scavati un certo numero di pozzi (1). In figura 3 sono evidenziati i pozzi e le perforazioni. Le misure effettuate in questi pozzi mostrano che il livello freatico primario si trova a circa 20 metri dalla superficie in un acquifero sabbioso. Il moto di falda principale è diretto verso Sud-Ovest ed è causato dalle stazioni di pompaggio per l'approvvigionamento idrico, situate a Sud della zona in un acquifero artesiano. Nei 15 metri superiori di alcuni pozzi, sono state identificate alcune lenti sabbiose che contengono acquiferi secondari "sospesi" (*perched aquifers*) la cui capacità varia in modo stagionale (2). Nell'acquifero primario è stato riscontrato un alto livello di contaminazione da fenoli e composti aromatici violetti nella parte sottostante la fabbrica di asfalto/creosoto. Il problema di inquinamento del sito Ringe risulta di grande interesse per una serie di motivi:

- disponibilità di dati su problema di inquinamento da liquidi organici oleosi (NAPL);
- complessità del problema che riguarda problematiche di terreni fratturati, inquinante multicomponente, biodegradazione;
- è un clichè di molte situazioni di inquinamento non censite o non ancora studiate in Italia;
- richiede lo studio di soluzioni originali per l'ottenimento dei risultati.

Andando in maggiore dettaglio sul problema di inquinamento, il sito Ringe presenta diversi aspetti da valutare separatamente: il problema degli acquiferi sospesi, il problema di un terreno essenzialmente argilloso, la presenza di vari sistemi di fratture, la presenza di inquinante NAPL sia in fase separata e immiscibile, sia in soluzione acquosa, la presenza di biodegradazione in una parte del terreno e ad una certa distanza dalla sorgente inquinante.

2. IL SITO CAPOTERRA

2.1 Descrizione dell'area in studio

Nella piana alluvionale di Capoterra (Sardegna meridionale) il Dipartimento di Ingegneria del Territorio dell'Università di Cagliari ha svolto, in collaborazione anche con il CRS4, un vasto studio idrogeologico finalizzato allo studio del fenomeno di intrusione salina nel sistema acquifero costiero ed alla sua simulazione numerica (3, 4, 5).

La piana alluvionale di Capoterra, situata nella parte sud-occidentale della fossa tettonica del Campidano, nella Sardegna meridionale, è costituita a Sud dal delta del Rio Santa Lucia, corso d'acqua attualmente a carattere torrentizio, è delimitata ad Est dalla Laguna di Santa Gilla e dalle saline, e a Nord dal Rio Cixerri, infine è interrotta ad Ovest da una serie di rilievi collinari allineati che rappresentano le propaggini del pilastro tettonico che ad occidente del graben sardo è scomposto da due insiemi principali di fratture con orientamento NW-SE e NE-SW. Le conoscenze geologiche, idrogeologiche, geomorfologiche e pedologiche (6) sulla piana hanno permesso di individuare le seguenti Unità Idrogeologiche (figura 4).

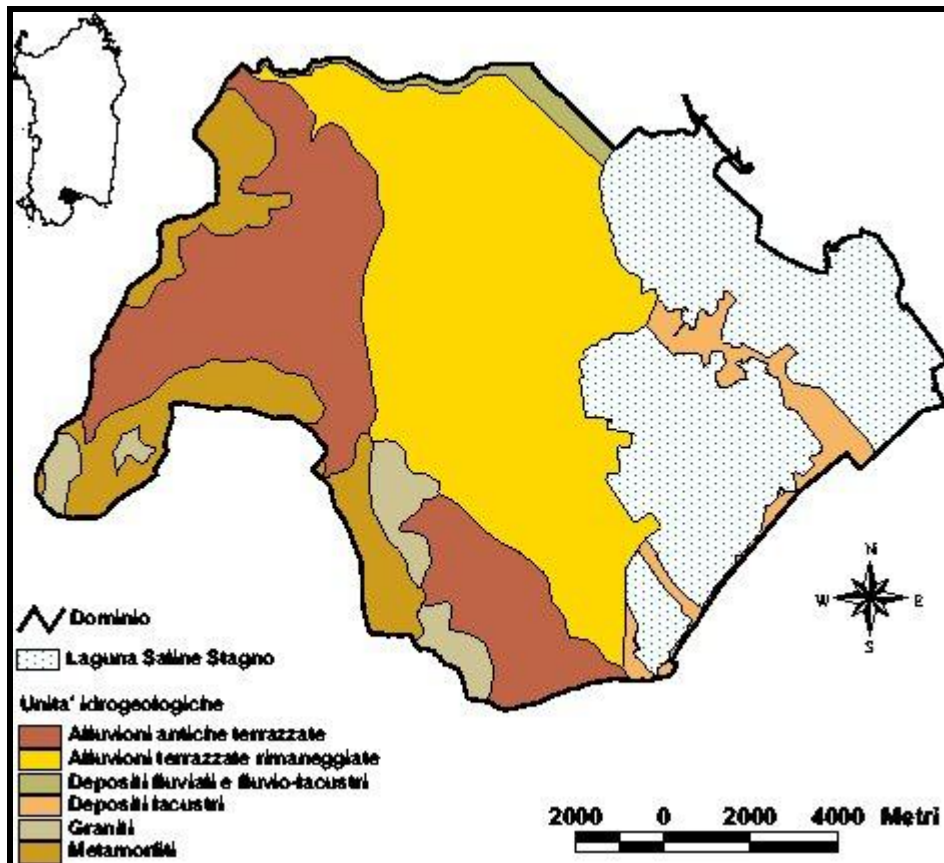


Figura 4: Unità idrogeologiche

Depositi fluviali e fluvio-lacustri, costituiti rispettivamente da sabbie, ghiaie e ciottoli prevalentemente granitici, e da sabbie sciolte fini, solo localmente argillose, con rari piccoli ciottoli di altre rocce paleozoiche, con potenza 0,50-5,50 m e conducibilità idraulica medio-alta. La morfologia, quasi sempre pianeggiante, diviene leggermente depressa in prossimità delle zone costiere (laguna); i suoli, con profili profondi oltre i 100 cm, hanno tessitura variabile da sabbioso-franca a franco-argillosa, contenuto in scheletro vario ed abbondante, drenaggio limitato nelle zone più depresse con pericolo di inondazione. La capacità d'uso dei suoli rientra nella classe I-II, cioè suoli con poche limitazioni che riducono la scelta delle colture e richiedono moderate pratiche di conservazione; l'uso attuale è prevalentemente agricolo, con coltivazioni intensive, erbacee ed arboree, sia in asciutto sia in irriguo. Tale Unità è rappresentata da una zona localizzata lungo il bordo settentrionale dell'area in studio.

Depositi lacustri, costituiti da limi argillosi misti a depositi organici. La morfologia, pianeggiante o depressa, è tipica delle aree poste ai margini di stagni e lagune e lungo le coste; i suoli, con falda acquifera affiorante, normalmente profondi, hanno tessitura argillosa o argilloso-limosa, con drenaggio assai lento e conseguente salinità elevata e pericolo di inondazione. La capacità d'uso dei suoli rientra nella classe VIII, in quanto non presentano nessuna idoneità alle coltivazioni; la vegetazione è igrofila ed alofila.

Alluvioni terrazzate rimaneggiate, prevalentemente costituite da ciottoli di rocce paleozoiche, ben arrotondati, localmente con sabbie grigiastre o rubefatte, compatte, talvolta annerite da resti torbosi e raramente con qualche straterello o arnione di argilla, con potenza 1-10 m e conducibilità medio-alta. La morfologia, quasi sempre pianeggiante, diviene leggermente depressa in prossimità delle zone costiere (laguna, stagno, saline, mare); i suoli profondi, con spessore oltre i 100 cm, hanno tessitura variabile da franco-

sabbiosa a franco-argillosa in superficie e da franco-sabbioso-argillosa ad argilloso-sabbiosa in profondità, con contenuto in scheletro assai vario e abbondante; drenaggio lento ed erodibilità scarsa. La capacità d'uso dei suoli rientra nella classe II-III, cioè suoli con modeste limitazioni che riducono la scelta delle colture e richiedono moderate pratiche di conservazione; l'uso attuale è prevalentemente agricolo, con coltivazioni intensive, erbacee ed arboree, sia in asciutto sia in irriguo.

Alluvioni antiche terrazzate, più o meno ben cementate, costituite da un impasto di ciottoli ben arrotondati di rocce paleozoiche, di svariatissime dimensioni e forme, miste a sabbia ed argilla, ferrettizzate, affioranti o ricoperte da suolo vegetale, con potenza superiore a 100 m; in genere praticamente impermeabili o poco permeabili limitatamente ad aree di discontinuità per giunti, lenti sabbiose di varia estensione, ed alla base della formazione, nella zona di discordanza. Sono disposte in serie di terrazzi degradanti verso il centro del Campidano, con morfologia principalmente pianeggiante, che presenta le maggiori acclività nelle aree di raccordo tra i diversi terrazzi. I suoli profondi, con spessore in media 80-100 cm, sono caratterizzati dalla presenza di orizzonti di accumulo di argilla, con eccesso di scheletro; la tessitura varia da franco-sabbiosa a franco-sabbioso-argillosa in superficie, da franco-sabbioso-argillosa ad argillosa in profondità, con drenaggio da lento a molto lento e moderato pericolo di erosione. La capacità d'uso dei suoli rientra nella classe III-IV, cioè suoli con severe o forti limitazioni che riducono la scelta delle colture e richiedono speciali pratiche di conservazione; l'uso attuale è prevalentemente agricolo, con colture erbacee e, nelle aree più drenate, colture arboree anche irrigue.

Graniti, più o meno fratturati ed arenizzati, in genere poco permeabili per l'intensità dei fenomeni di argillificazione sviluppati nelle zone di frattura. La morfologia è prevalentemente aspra, più o meno tormentata con tratti a forte pendenza; la tessitura varia da sabbioso-franca a franco-sabbioso-argillosa, con drenaggio da lento a molto lento e forte pericolo di erosione; nelle aree morfologicamente più favorevoli è presente una copertura vegetale arbustiva ed arborea. La capacità d'uso dei suoli rientra nella classe VII-VI-IV, cioè suoli con limitazioni forti che riducono il loro uso a pascolo, bosco e riserve naturali.

Metamorfiti, costituiti da scisti più o meno metamorfosati per contatto con i successivi graniti, intrusi nell'orogenesi ercinica; permeabili solo localmente, nelle zone di fratturazione. La morfologia varia da aspra a subpianeggiante, con tessitura da franco-sabbiosa a franco-argillosa, drenaggio da lento a molto lento ed elevato pericolo di erosione; la copertura vegetale è costituita da bosco, macchia ed, a tratti, coltivi. La capacità d'uso dei suoli rientra nella classe VI-VII, cioè suoli con limitazioni forti che riducono il loro uso a pascolo, bosco e riserve naturali.

Le alluvioni terrazzate rimaneggiate, molto permeabili, costituiscono un acquifero freatico sostenuto da un orizzonte argilloso al di sotto del quale vi è un acquifero, multistrato, semiconfinato o confinato localmente.

2.2 Temi di studio

Le diverse campagne di misura hanno messo in evidenza una forte presenza di intrusione salina negli acquiferi. Da studi effettuati (7) l'area risulta caratterizzata da un alto grado di vulnerabilità, in particolare nella parte centrale della piana di Capoterra. Ciò è dovuto probabilmente ad una realtà idrogeologica molto complessa sia a causa di fattori naturali, quali la situazione geologica, la vicinanza al mare, la presenza della laguna e delle saline, sia a causa di fattori antropici dovuti allo sviluppo dell'agricoltura irrigua e della crescente industrializzazione.

2.3 Il sistema informativo geografico

Per la realizzazione del sistema informativo geografico è stato organizzato un database alfanumerico con Microsoft Access e un database geografico attraverso l'utilizzo dei software ArcInfo e ArcView.

2.3.1 Il database alfanumerico

Una rete di monitoraggio e di controllo qualitativo e quantitativo della risorsa idrica è stata predisposta nella parte meridionale della piana di Capoterra, in prossimità del Rio Santa Lucia, nel Giugno 1991, e successivamente ampliata a Nord per interessare anche la zona più prossima al Rio Cixerri, nell'Aprile 1992. La rete consiste di 132 pozzi, dei quali 74 scavati per pochi metri e a largo diametro, relativi quindi all'acquifero superficiale, e 58 trivellati in profondità, relativi quindi all'acquifero profondo; ogni mese negli anni '91, '92 e '93, in tutti i pozzi sono stati misurati i livelli idrici, mentre solo in alcuni più significativi sono stati prelevati campioni d'acqua per le analisi chimiche di laboratorio; sono state anche eseguite prove di portata; una campagna di misura è stata effettuata di recente, nel Luglio '98, per uno studio idrogeologico ed idrogeochimico approfondito della risorsa idrica (8).

Il database relazionale contiene le informazioni ottenute nelle campagne di misura effettuate nei diversi anni e organizzate in tabelle riportanti le coordinate e le quote dei pozzi, le misure piezometriche e i risultati delle analisi chimiche per ogni mese di misura. Sono state create delle maschere che permettono di accedere alle informazioni di un pozzo e ad altre maschere, di stampare report di dati e di tornare all'ultima maschera visualizzata. Le figure 5, 6, 7 e 8 mostrano alcune maschere del database.

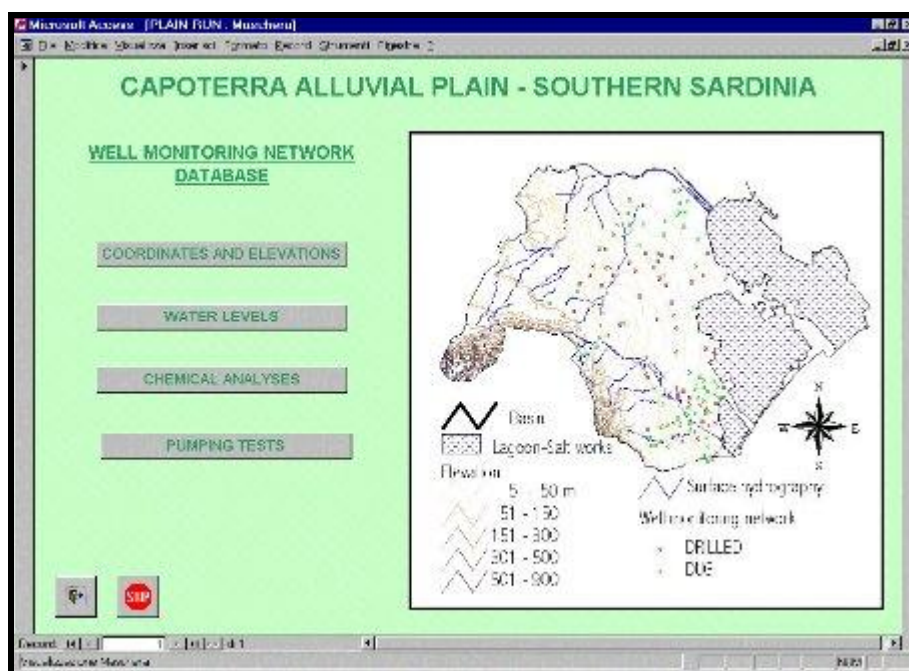


Figura 5: Database alfanumerico, maschera iniziale

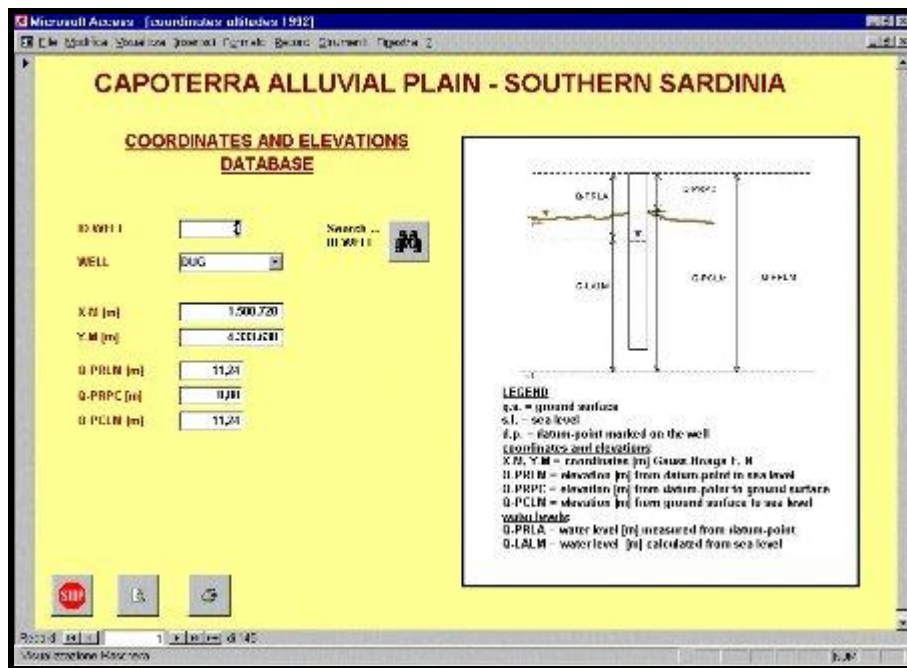


Figura 6: Esempio di maschera relativa alle informazioni sui pozzi

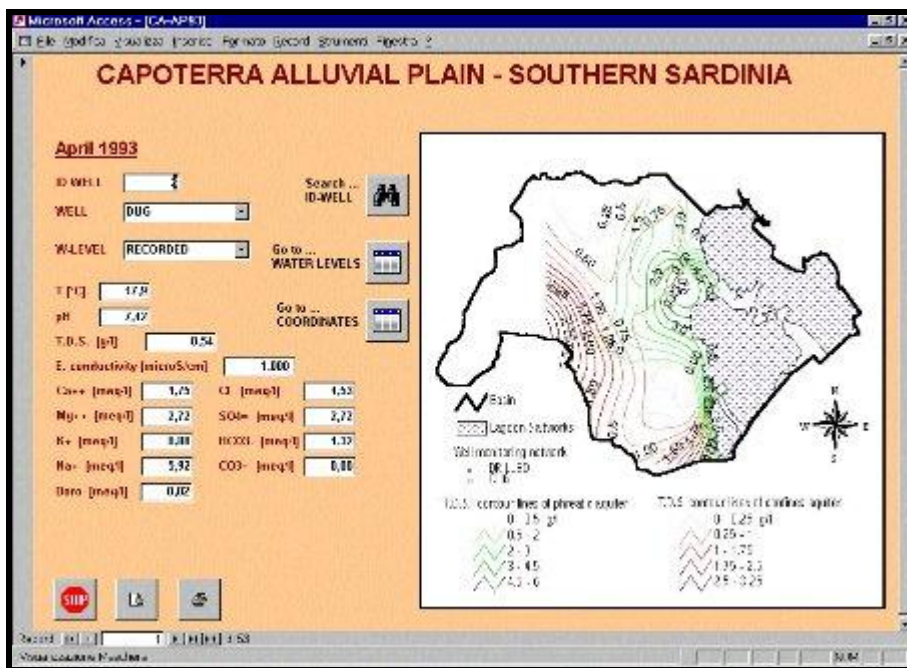


Figura 7: Esempio di maschera relativa alle analisi chimiche

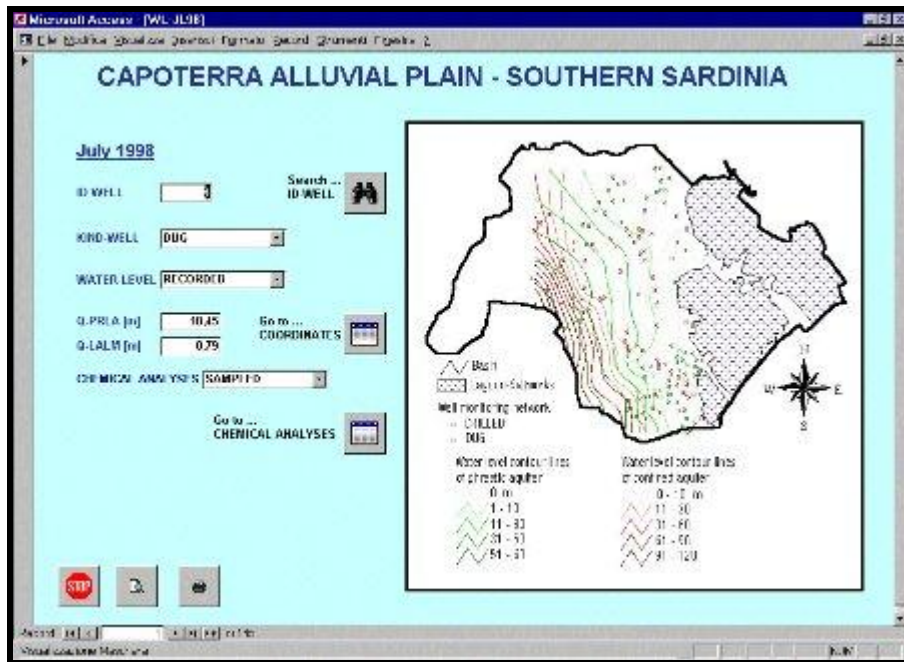


Figura 8: Esempio di maschera relativa alle misure di livello piezometrico

2.3.2 Il database geografico

Il database geografico (figura 9), della piana di Capoterra è costituito da un certo numero di viste e temi:

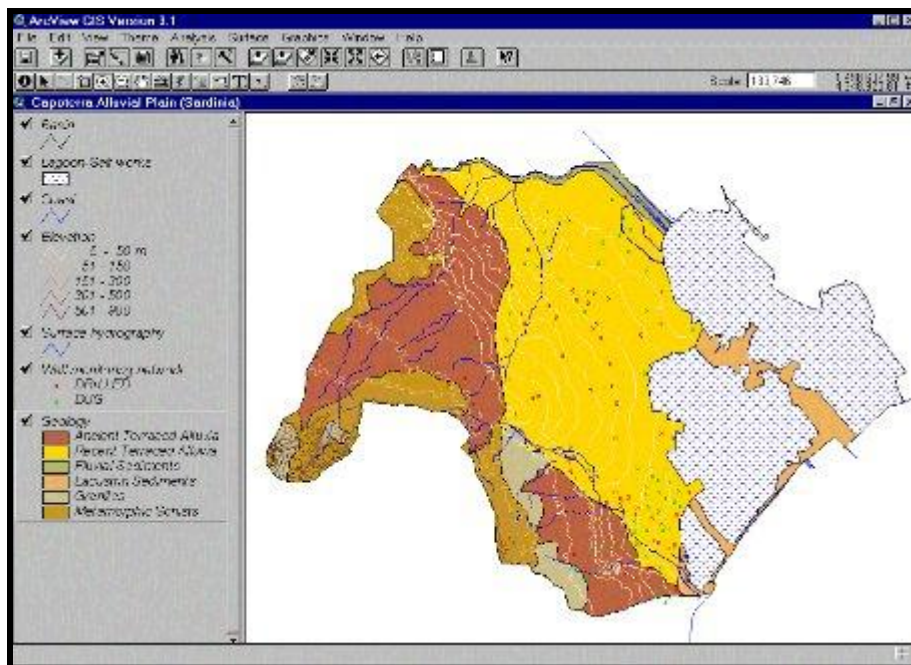


Figura 9: Database geografico

- una vista che contiene livelli di informazione generale che sono stati creati attraverso la conversione ed elaborazione di dati CAD in coverage di ArcInfo e shape di ArcView. Sono essenzialmente la geologia, l'idrogeologia, le curve di livello, i punti quotati, l'idrografia e la rete di monitoraggio;

- una vista per ogni mese di misura contenente le isopiezometriche (nella figura 10 vi è un esempio), le isoconducibilità sia dell'acquifero freatico che di quello confinato, e la distribuzione spaziale dei principali parametri chimico-fisici quali pH, cationi e anioni;
- una vista contenente le informazioni relative alle prime simulazioni modellistiche effettuate (figura 11): mesh di calcolo, linee equipotenziali e di equiconcentrazione.

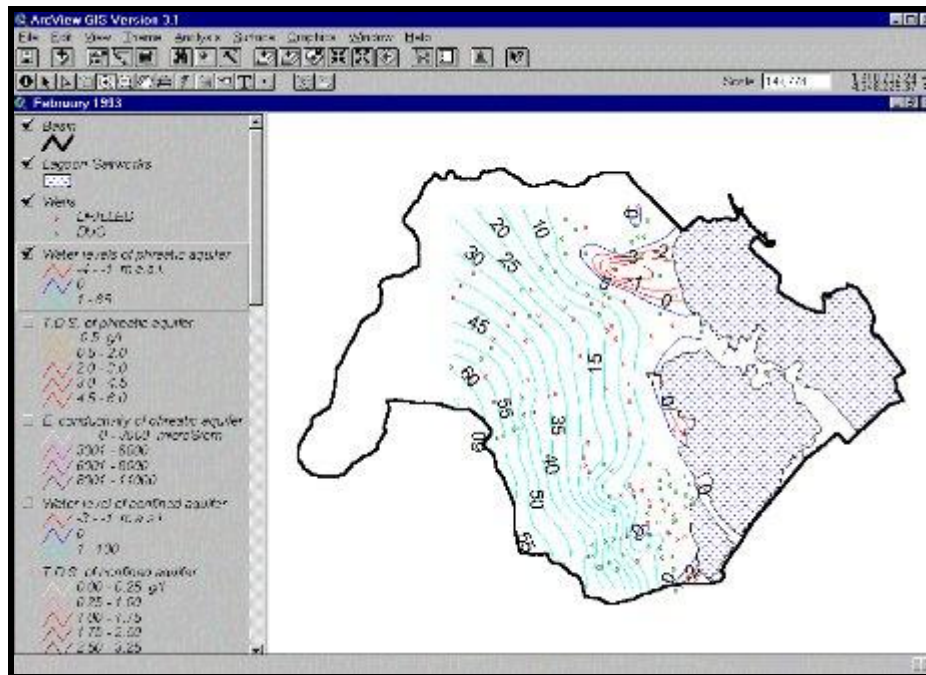


Figura 10: Esempio di vista con livelli isopiezometrici

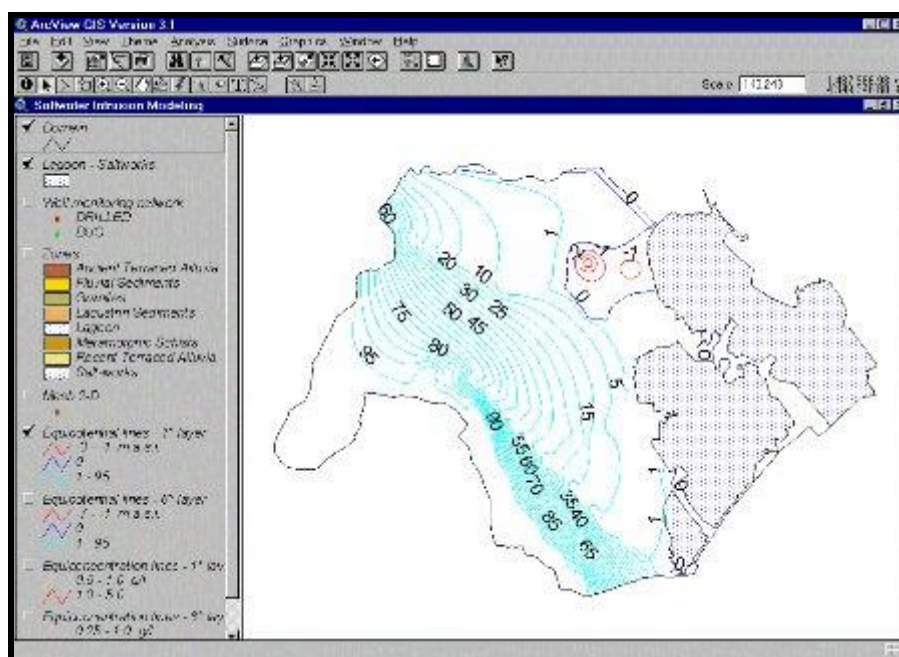


Figura 11: Esempio di vista con elaborazioni ottenute da simulazioni modellistiche

3. IL SITO PORTOSCUSO

3.1 Descrizione dell'area in studio

La piana di Portoscuso (figura 12) è situata nel Sulcis Iglesiente, Sardegna Sud Occidentale. La zona è sede di agglomerati industriali di rilevanti dimensioni operanti nel settore chimico-metallurgico.

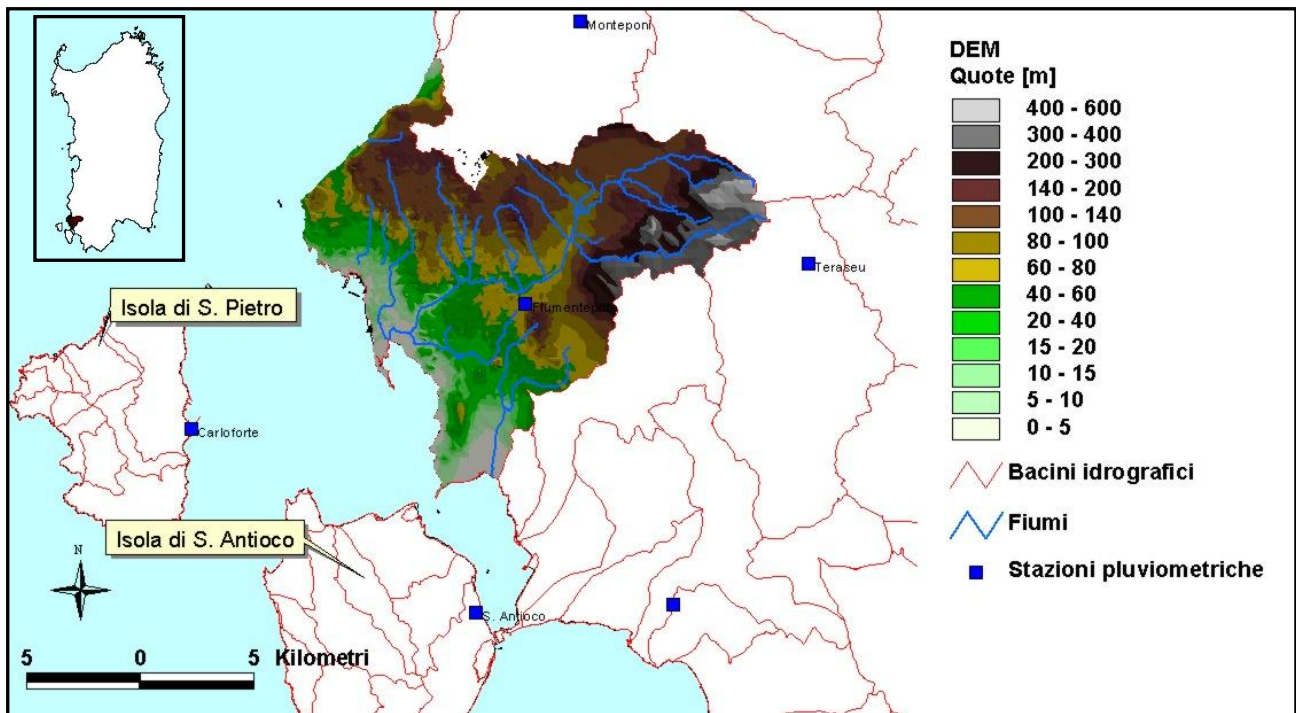


Figura 12: Localizzazione dell'area in studio

I maggiori stabilimenti industriali presenti nella zona sono:

- la centrale termoelettrica dell'Enel, che produce energia elettrica con 3 gruppi da 240 MW e 2 gruppi da 180 MW a turbogas;
- lo stabilimento EURALLUMINA, che produce allumina dalla bauxite;
- lo stabilimento ALCOA, per la produzione di alluminio primario tramite processi di elettrolisi dall'allumina;
- lo stabilimento I.L.A., per la produzione di laminati nastri e fogli sottili per imballaggi;
- lo stabilimento ENRISORSE, per la produzione di piombo, zinco e sottoprodotti quali cadmio, argento e acido solforico.

In data 30 Novembre 1990, con una delibera della Presidenza del Consiglio dei Ministri l'area è stata dichiarata "ad elevato rischio di crisi ambientale". Nella zona sono presenti due acquiferi superficiali e uno profondo. Gli acquiferi superficiali sono impostati entrambi su sedimenti sabbiosi di potenza variabile e sono separati da uno strato di argilla posto ad una profondità media di 15 metri rispetto al piano di campagna. Il letto-tetto del primo-secondo acquifero ha una potenza di 1-2 metri. Il letto del secondo acquifero è costituito dalle vulcaniti, che si trovano ad una profondità progressivamente crescente in direzione N-NW S-SE.

L'acquifero profondo è impostato nelle fratture della formazione ignimbratica ad una profondità variabile da 110 a 170 m dal piano di campagna. Tale acquifero è in pressione con gradi di artesianesimo variabile. Le informazioni reperibili sulla qualità dell'acqua (valori di Ph, conducibilità elettrica, quantità di metalli pesanti quali Cd, Pb ecc. disciolti in acqua, e valori di piezometria (9) si riferiscono all'ultimo ventennio.

L'area in studio è caratterizzata da un clima marittimo con un massimo di piovosità tra Novembre e Dicembre e un minimo nel mese di Luglio. Quale indicatore per l'individuazione dei periodi siccitosi si è scelto l'indice SPI.

I periodi interessati dalle crisi idrologiche più gravi sono stati i periodi 31-32 e 87-89. Nei periodi siccitosi si constata un aumento delle estrazioni d'acqua dalla falda, con conseguente sovrasfruttamento e depauperamento della quantità e qualità della risorsa.

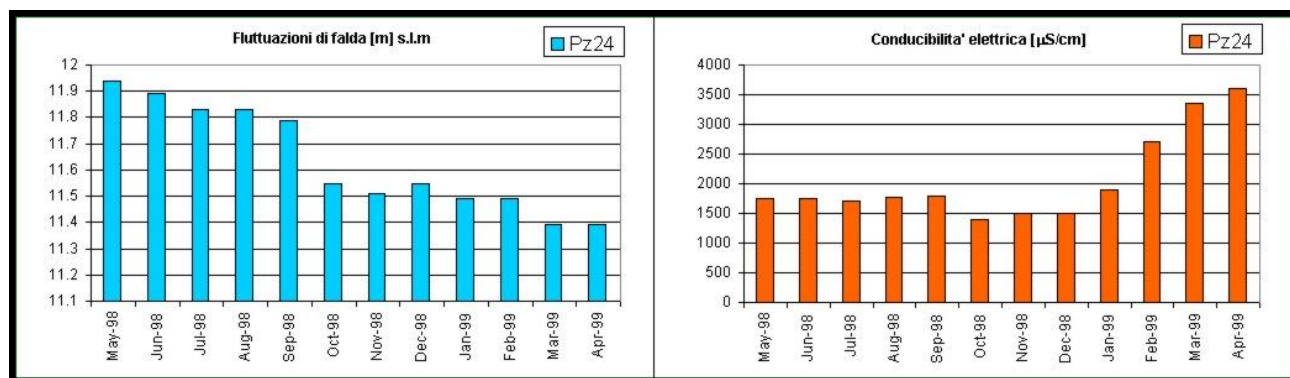


Figura 13: . Fluttuazioni di falda e corrispondente variazione della conducibilità elettrica. Quando il livello piezometrico si abbassa il grado di vulnerazione aumenta.

3.2 Temi di studio

Nel primo acquifero è stata riscontrata una elevata concentrazione di sali disciolti (TDS) dovuta alla mancanza della copertura vegetale del suolo e alle alte permeabilità superficiali che lo rendono fortemente vulnerabile. Nella zona sono stati realizzati parecchi pozzi, più una serie di pali in ghiaia che hanno reso i due acquiferi comunicanti dando luogo a fenomeni di cortocircuitazione delle acque. Di conseguenza anche il secondo acquifero risulta inquinato.

Si è in presenza di ingressione di acqua marina in falda e di fenomeni di idroveicolazione di inquinanti, inerti e non, altamente pericolosi.

Dati ricavati dalla carta tecnica regionale o rilevati direttamente in campagna, dati sulla litologia, geologia e idrogeologia della zona sono stati implementati in un sistema informativo geografico. Si è proceduto inoltre alla raccolta di dati pluvio-termometrici relativi al settantennio che va dal 1922 al 1992.

La disponibilità di dati sul problema di inquinamento da metalli pesanti congiuntamente a fenomeni di intrusione marina in falda, la complessità del problema (terreni fratturati, inquinante multicomponente, biodegradazione), rendono lo studio del sito particolarmente interessante.

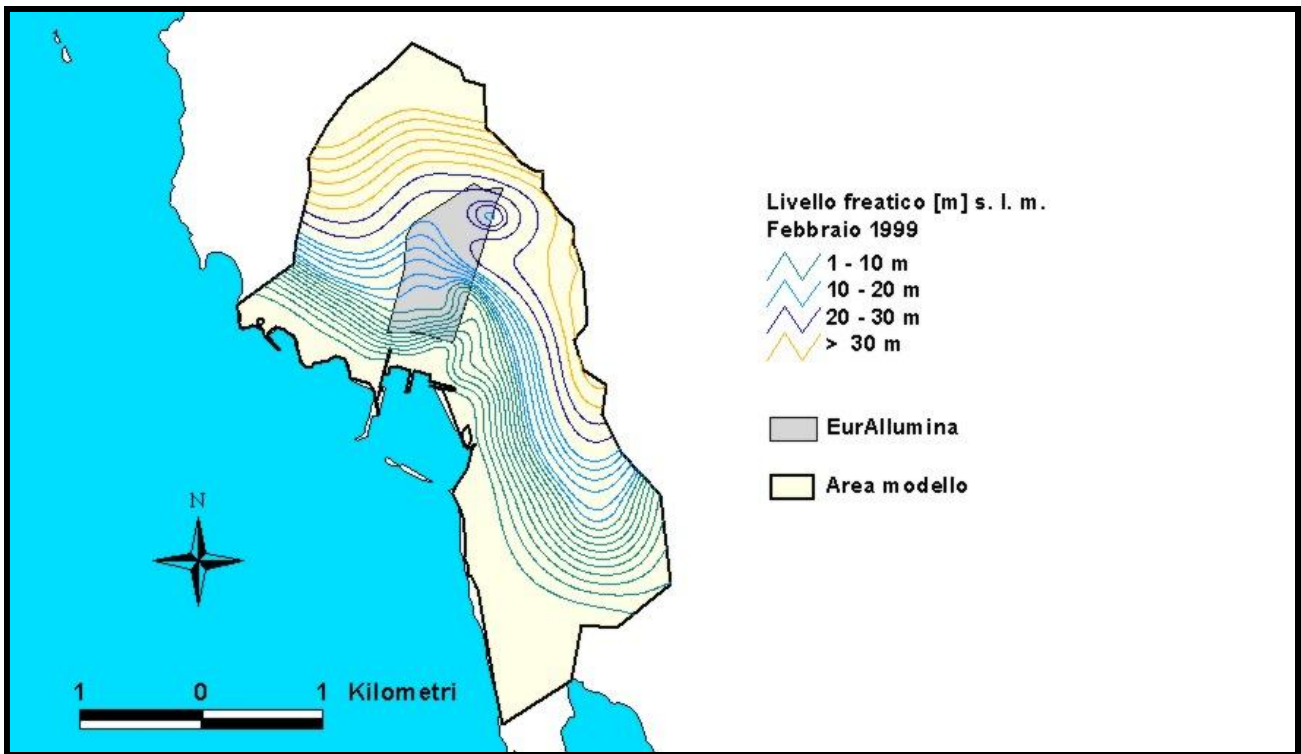


Figura 14: Isopiezometriche [m s.l.m.], Febbraio 1999

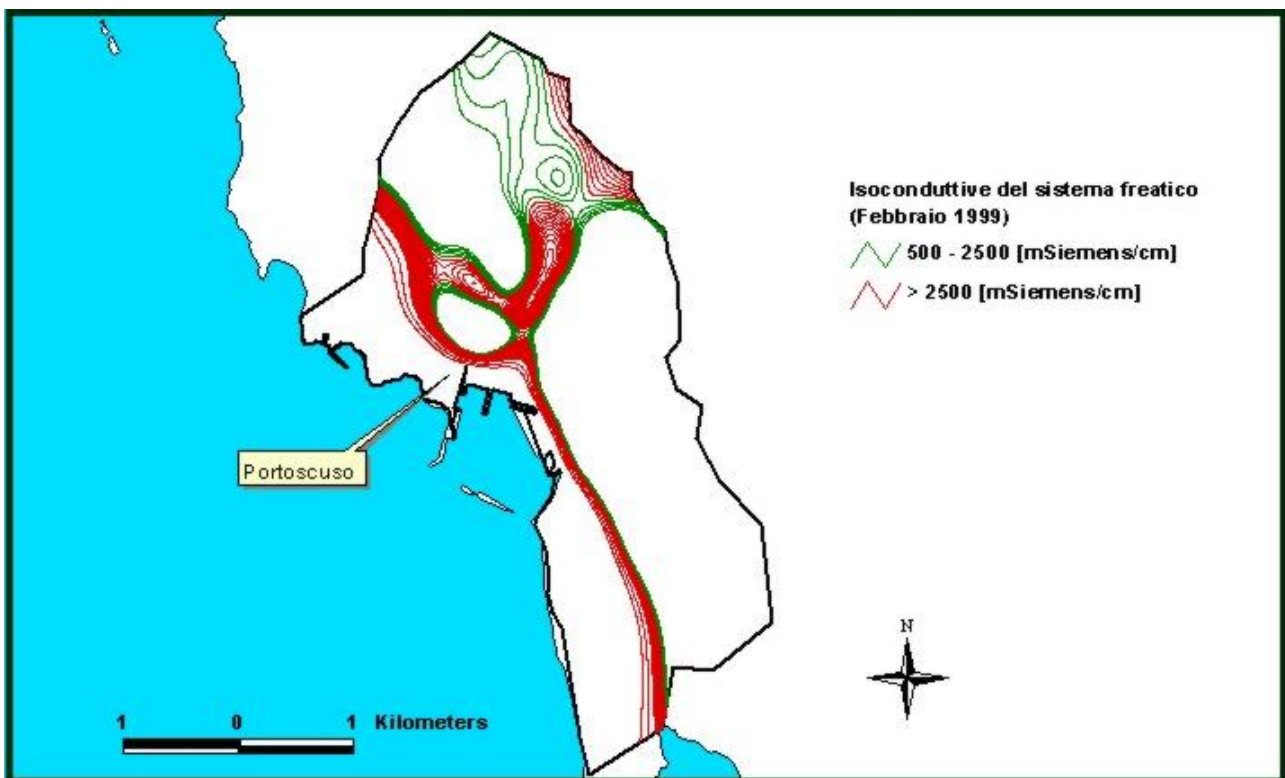


Figura 15: Isoconducibilità [$\mu\text{S}/\text{cm}$], (febbraio 1999)

4 IL SITO MURAVERA

4.1 Descrizione dell'area in studio

La piana di Muravera (figura 16) si trova nella zona del Sarrabus, nella parte sud-orientale della Sardegna, in corrispondenza della foce del fiume lumendosa, e occupa un'area di circa 130 km². Al suo interno ricadono centri abitati di Muravera, Villaputzu e San Vito, con una popolazione totale di circa 13000 abitanti.

Le principali attività economiche nella piana sono l'agricoltura, la coltivazione di agrumeti, l'allevamento di ovini e il turismo.

Il clima è mediterraneo subtropicale, caratterizzato da un regime pluviometrico fortemente variabile, con precipitazioni che variano tra 200 e 700 mm/anno (figure 16 e 17). L'area presenta dei bassorilievi di 200-300 m di altitudine lungo la costa che raggiungono 600-700 m verso Ovest e Nord-Ovest, e la valle tettonica del Flumendosa al centro (figure 18 e 19).

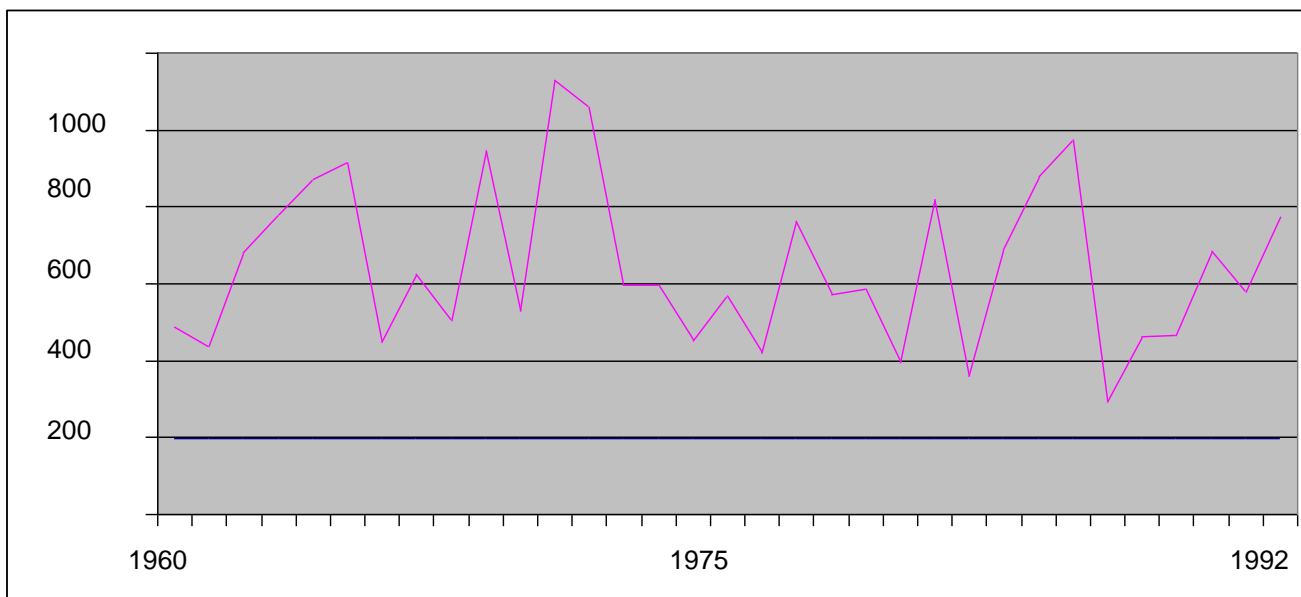


Figura 16: : Precipitazioni medie annuali espresse in mm di pioggia, per la stazione di Muravera

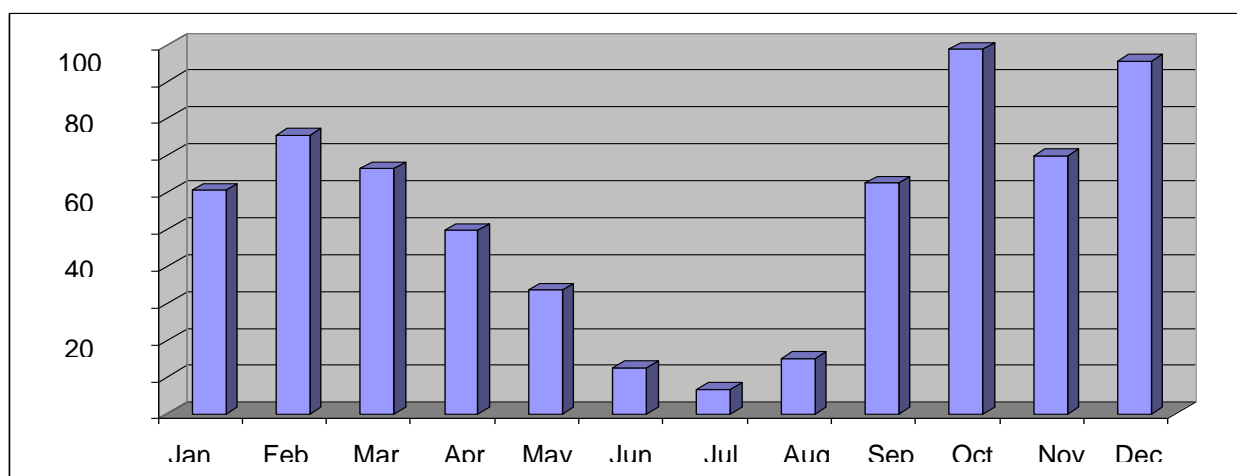


Figura 17: Precipitazioni medie mensili negli anni 1960-1992, espresse in mm di pioggia per la stazione di Muravera

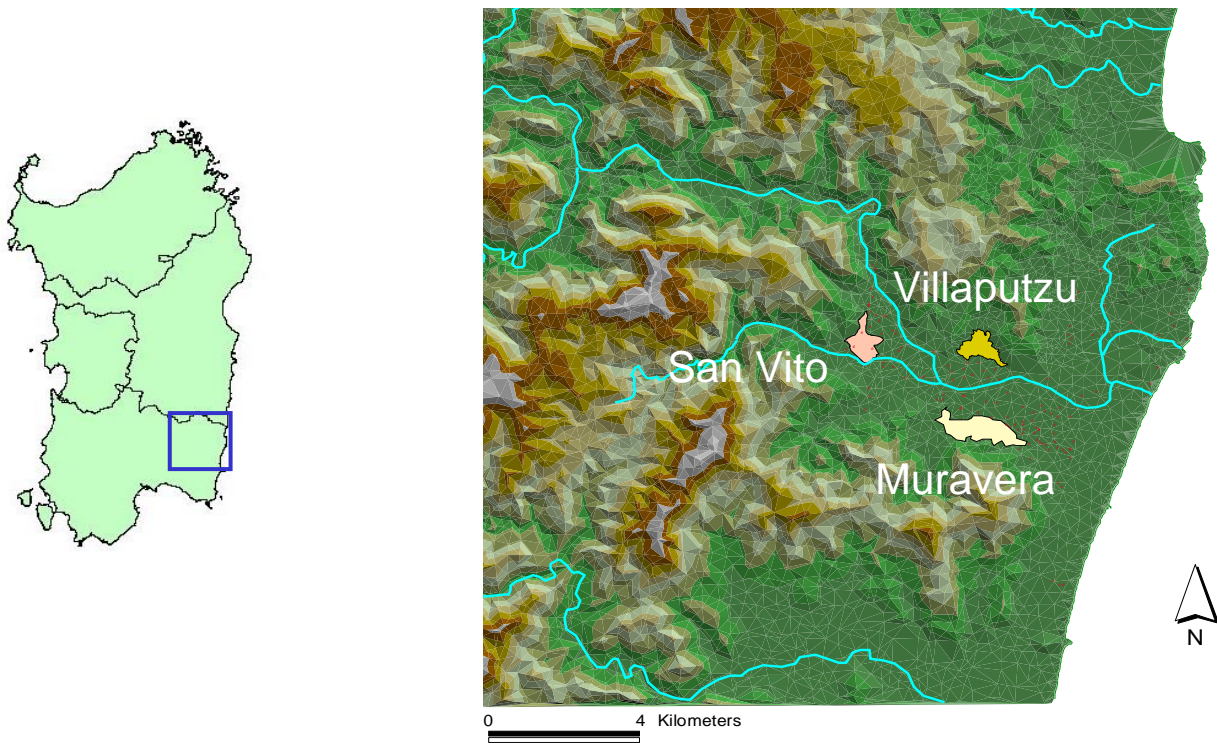


Figura 18: Inquadramento geografico della Piana di Muravera

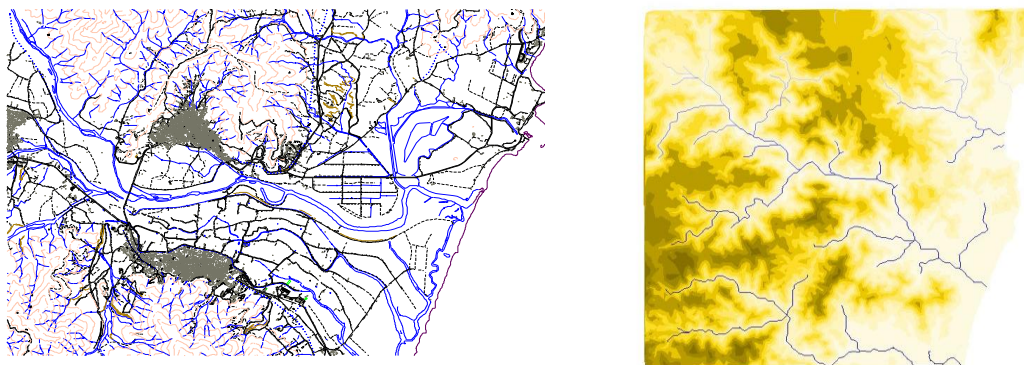


Figura 19: Cartografia di partenza e modello digitale del terreno con idrografia derivata tramite script

La geologia della zona è principalmente caratterizzata da una formazione paleozoica (scisti e rocce vulcaniche metamorfizzate) con intrusioni granitiche erciniche nel bacino montagnoso e pedemontano, da terreni alluvionali terrazzati (Quaternario) nella piana del Flumendosa, da depositi di sabbia lungo la costa e da meandri (denominati foxi) in corrispondenza della foce del Flumendosa.

Nella piana di Muravera sono stati individuati due acquiferi:

- un acquifero non confinato, relativamente superficiale (1-2 m) ma altamente produttivo, giacente su una formazione sabbiosa. Questo acquifero freatico è stato a lungo sfruttato dagli agricoltori della zona, attraverso pozzi di grande diametro, a 4-6 m dal suolo. Il suo spessore decresce da 10-15 m a monte fino a 4-5 m in prossimità del mare;
- un acquifero confinato, in pressione, composto da sabbia e ghiaia, superiormente confinato da un letto di argilla che lo separa dall'acquifero sovrastante. L'esistenza dell'acquifero artesiano è stata accertata dalle differenze di temperatura (alcuni gradi centigradi) e di livello piezometrico (da 10-15 cm fino a 60 cm) rilevate in pozzi profondi trivellati e in pozzi superficiali scavati.

4.2 Temi di studio

Il fenomeno di intrusione salina nella piana, inizialmente osservato negli anni 70, fu attribuito all'abbassamento della falda per cause naturali (ricorrenti periodi di siccità, presenza di formazioni geologiche contenenti sale) e antropiche (eccessivo pompaggio, lavori di ingegneria e allevamento ittico). Oggi entrambi gli acquiferi sono contaminati da acqua marina. Per tutta l'area che si estende dalla costa fino alla zona abitata di Muravera, la conducibilità elettrica nell'acquifero freatico raggiunge valori di 3000-6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con picchi di 8000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; nell'acquifero artesiano i valori di conducibilità sono notevolmente superiori (20000-25000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con picchi di 40000-50000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (10). Diverse misure per il recupero dell'acquifero, tra cui la ricarica artificiale della falda, la costruzione di dighe e la realizzazione di una rete di irrigazione sono state intraprese dall'EAF (Ente Autonomo del Flumendosa). Per lo studio della degradazione dell'acquifero si è scelto di simulare il fenomeno dell'intrusione salina tramite l'utilizzo di un modello matematico di flusso e trasporto. Il lavoro finora svolto ha riguardato l'analisi e l'elaborazione dei dati disponibili forniti dall'EAF in modo da valutare la qualità delle informazioni, sia per l'implementazione di un Sistema Informativo Geografico, sia per la simulazione numerica.

4.3 Il sistema informativo geografico

4.3.1 Dati cartografici

I dati cartografici provenienti dalla carta tecnica regionale (CTR), originariamente in formato CAD, sono stati utilizzati per derivare una serie di layer geografici di base, come le curve di livello, i punti quotati, l'idrografia e i limiti amministrativi. Questi sono stati ulteriormente elaborati tramite le funzionalità dei software GIS ArcInfo e Arcview o tramite la creazione di appositi script. Come esempio, i punti quotati estratti dalla carta tecnica e convertiti in shapefile sono stati utilizzati per generare un modello digitale del terreno che è stato poi processato attraverso un apposito script per la generazione automatica dei sottobacini di drenaggio e della rete idrografica.

4.3.2 Dati idrometeorologici

Il database del nuovo SISS (Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna, EAF 1996), comprendente le serie storiche dal 1922 al 1992 dei dati termometrici, pluviometrici,

afflussi, deflussi, portate, è stato utilizzato per analizzare la pluviometria nelle quattro stazioni ricadenti all'interno del bacino del Flumendosa (Ballao, Muravera, Rio Gironi, Villasalto). La rappresentazione dell'andamento pluviometrico annuale nel periodo 1960-1992 ha evidenziato due significativi periodi di siccità durante gli 1973-1981 e 1986-1991, e dall'analisi delle precipitazioni medie mensili calcolate su base dello stesso trentennio si può notare la forte variabilità delle precipitazioni durante l'anno.

4.3.3 Dati sul monitoraggio dei pozzi

I dati sul monitoraggio dei pozzi, forniti in formato Exel dall'EAF, rappresentano i risultati di una campagna di monitoraggio su 123 pozzi condotta nel 1999 dal Dipartimento di Ingegneria del Territorio dell'Università di Cagliari. Le serie storiche dei dati sulla piezometria e sulla salinità sono però stati forniti solo per due pozzi. Utilizzando altri archivi di dati riguardanti analisi chimiche e stratigrafiche effettuate a partire dalla fine degli anni 50 in poi sono stati ottenuti numerosi diagrammi e mappe per rappresentare in differenti modi alcuni degli indicatori correlati allo sfruttamento dell'acquifero e al degrado delle sue condizioni. Per la rappresentazione grafica della conducibilità elettrica, i valori sono stati classificati in cinque intervalli, in funzione della qualità delle acqua per l'irrigazione, secondo la classificazione di Wilcox (1955). I range delle cinque classi vanno da valori inferiori a 250 (S/cm, adatti a ogni tipo di suolo e di coltivazione, a valori superiori a 3000 (S/cm, del tutto inadatti per scopi irrigui.

4.3.4 Censimento Pozzi

Si tratta di schede derivanti dal censimento pozzi svolto dalla Provincia nel 1994, fornite in formato cartaceo. I dati relativi al Comune di Villaputzu (circa 400) sono stati digitalizzati e archiviati in un database. Dalle schede è stato possibile derivare statistiche sulla effettiva compilazione di campi di interesse (livello piezometrico, portata estratta, tipo di utilizzo ecc.), sulla frequenza e il range dei valori degli stessi parametri. Per quanto riguarda il riferimento geografico, sebbene i dati relativi a latitudine e longitudine del pozzo, richiesti dalla scheda, non risultassero compilati una localizzazione dei pozzi censiti è stata effettuata attraverso l'indicazione del riferimento catastale e l'indirizzo (o toponimo, fuori dalle zone urbanizzate). L'aggancio dei dati del censimento ai tematismi ha comportato un'attività di editing piuttosto pesante, in quanto i toponimi della CTR sono stati digitalizzati come stringhe, unicamente in funzione del layout grafico sulla carta e senza alcuna relazione spaziale con il contesto territoriale di riferimento.

5 IL SITO ORISTANO

5.1 Descrizione dell'area in studio

La piana di Oristano (figura 20 e 21) è impostata su un Graben~\cite{cau00,palacossu94}. Movimenti frustali risalenti al Terziario crearono una zona di rifting tra il continente franco-iberico e la placca sardo-corsa. La stessa si distaccò e successivamente rototraslò in senso anti orario di circa 40°. La fossa tettonica Sarda diretta N-S rappresenta il braccio più orientale del rift. Susseguentemente ad un intenso vulcanismo a carattere calcoalcalino ed al deposito di sedimenti marini e continentali, la fossa fu completamente colmata. Il Graben si formò per la riattivazione di alcune faglie della fossa tettonica Sarda risalente al Plio-Pleistocene. Per quanto riguarda depositi risalenti al periodo Terziario si può dire che nella zona studiata sono presenti affioramenti cenozoici rappresentati da vulcaniti andesitiche. Queste si possono trovare anche lungo la strada statale 131 tra il km 104 e il km 105,5. Sedimenti miocenici marini affiorano ai piedi del monte Palla. Presso il

nuraghe S'Argara sono visibili facies marnose-arenacee. Questi sedimenti risalgono al periodo messiniano. Nella zona a Nord-Est di Solarussa vi sono affioramenti di notevole estensione di basalti, mentre verso Sud questi si trovano ad una profondità di circa 18 m, ricoperti dalle alluvioni del fiume Tirso. Nel resto della piana i basalti pliocenici si trovano ad una profondità superiore, a 300 m circa presso il pozzo "Oristano 1", a circa 200 m presso il pozzo "Oristano 2", riportati in figura 22. Entrambi i pozzi furono scavati nel periodo 1961-1964 da parte della società S.A.I.S, alla ricerca di idrocarburi. Altri affioramenti di basalti sono presenti a Sud-Ovest dello stagno di Cabras nei pressi del nuraghe S'Argara. L'ultima fase di sedimentazione, era Quaternaria, è contraddistinta dal succedersi di depositi fluviali, lacustri, palustri e marini. Dall'analisi stratigrafica eseguita in occasione della perforazione del pozzo "Oristano 2", situato nei pressi di Riola Sardo ai limiti settentrionali della fossa del Campidano ai piedi dell'apparato vulcanico del Monti Ferru è risultata una successione di facies che varia dall'eolico al marino, con frequenti episodi lagunari. Lo strato quaternario risulta molto potente, dell'ordine di qualche centinaio di metri in alcuni casi. La successione stratigrafica, pur avendo caratteristiche diverse da luogo a luogo, è in generale caratterizzata da depositi ghiaiosi, sabbiosi, limosi e argillosi. Si trovano inoltre sabbie eoliche glaci e coni di detrito. A tal proposito sono notevoli i grandi conoidi di deiezione che si aprono dal Monti Ferru attraverso le vallate di Narbolia e di Milis fondendosi, presso Riola, con il conoide di deiezione del Tirso.

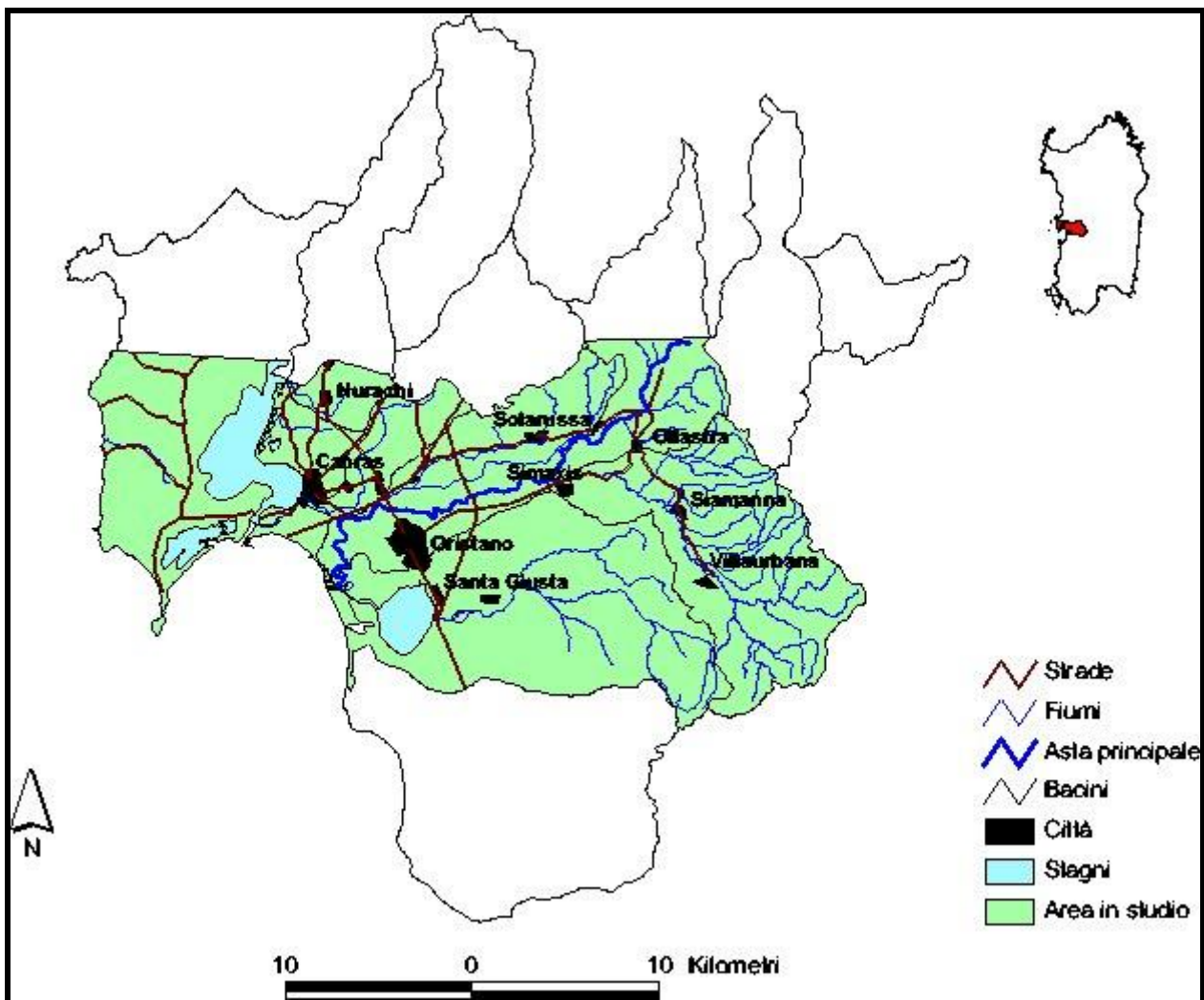


Figura 20: Inquadramento del sito di Oristano

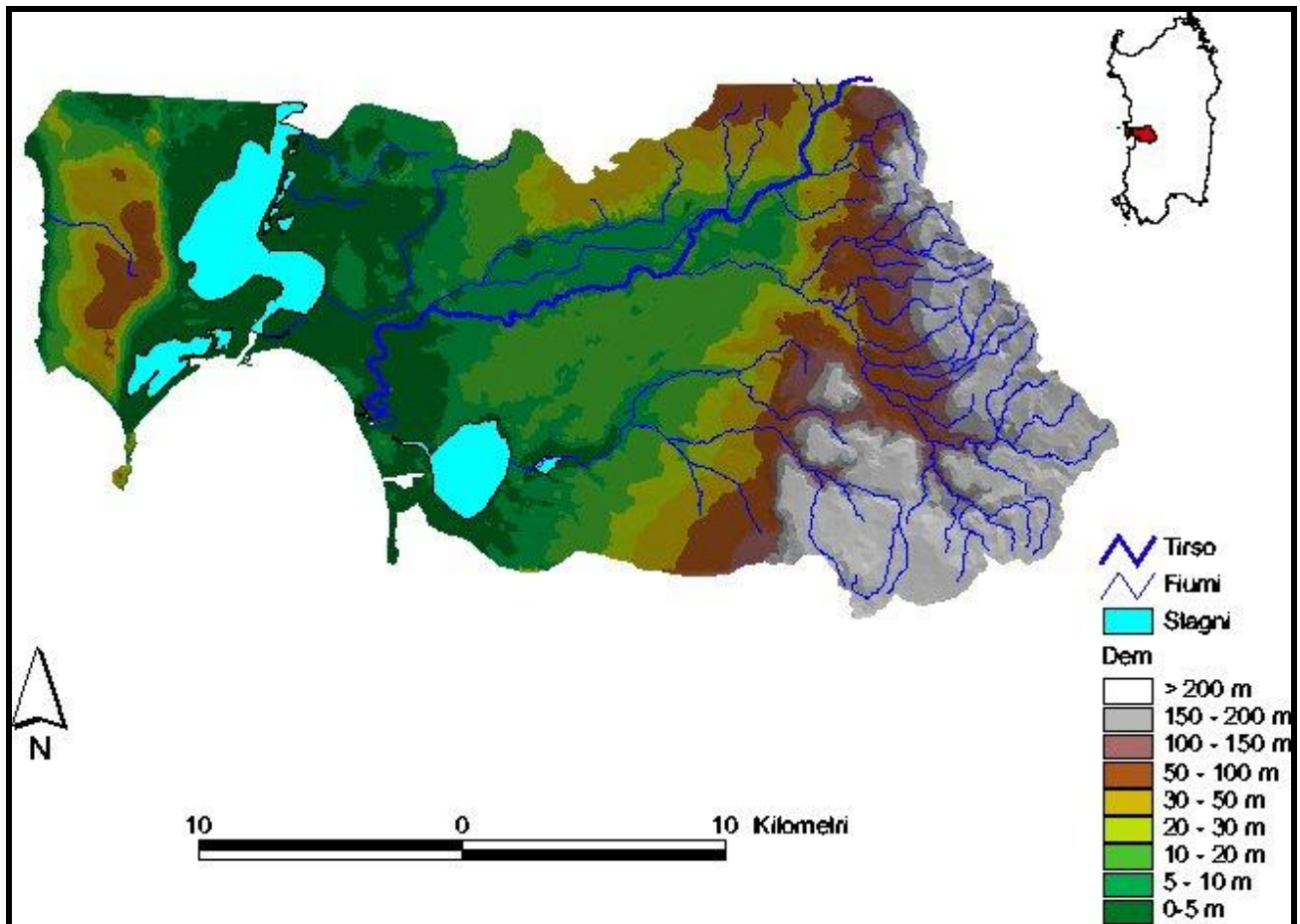


Figura 21: Modello digitale del terreno

Gli affioramenti alluvionali del grande cono di deiezione del fiume Tirso occupano nell'area la superficie maggiore. Il vertice del cono può essere individuato ad una ventina di km circa dalla foce, all'uscita del fiume da una gola incisa nei basalti presso Villanova Truscheddu. Le parti estreme del cono oltrepassano a nord il centro urbano di Riola Sardo e la palude di Mar'e Foghe, mentre verso Sud si spingono oltre lo stagno di Santa Giusta. A Nord di Solarussa le alluvioni sono state fortemente incise e terrazzate dai corsi d'acqua del Roia Pauruis e Riu Baia Traversa. Il sedimento è costituito da una matrice prevalentemente arenacea con ciottoli arrotondati di diversa natura (scisti, basalti, quarziti, graniti). La datazione delle alluvioni terrazzate risulta non semplice. La panchina Tirreniana è presente in due diverse facies, quella conglomeratica affiorante a Sud dello Stagno di Cabras in località Torre del Porto e Sa Perdera, e quella calcareo salmastra che è presente nella parte alta dello stagno di Cabras e nei pressi di Nurachi. Sabbie dunari depositate durante il Wurmiano affiorano lungo tutta la penisola del Sinis ed in una vasta area nei pressi dello stagno di Cabras e a Sud di quello di Santa Giusta. Le alluvioni limose e sabbiose seguono l'andamento dell'attuale letto del fiume Tirso. La granulometria di questi sedimenti è caratterizzata dalla prevalenza di materiale argilloso. Le alluvioni limose seguono anche gli alvei dei torrenti che scendono dal monte Arci. Nei pressi della Palude di Mar'e Foghe vi è una vasta area interessata da materiale limo-argilloso d'età recente che va dall'Olocene all'attuale. Tuttavia la complessa geometria dei diversi orizzonti alluvionali non consente di rilevare sicure correlazioni stratigrafiche di dettaglio, se non in rari casi.

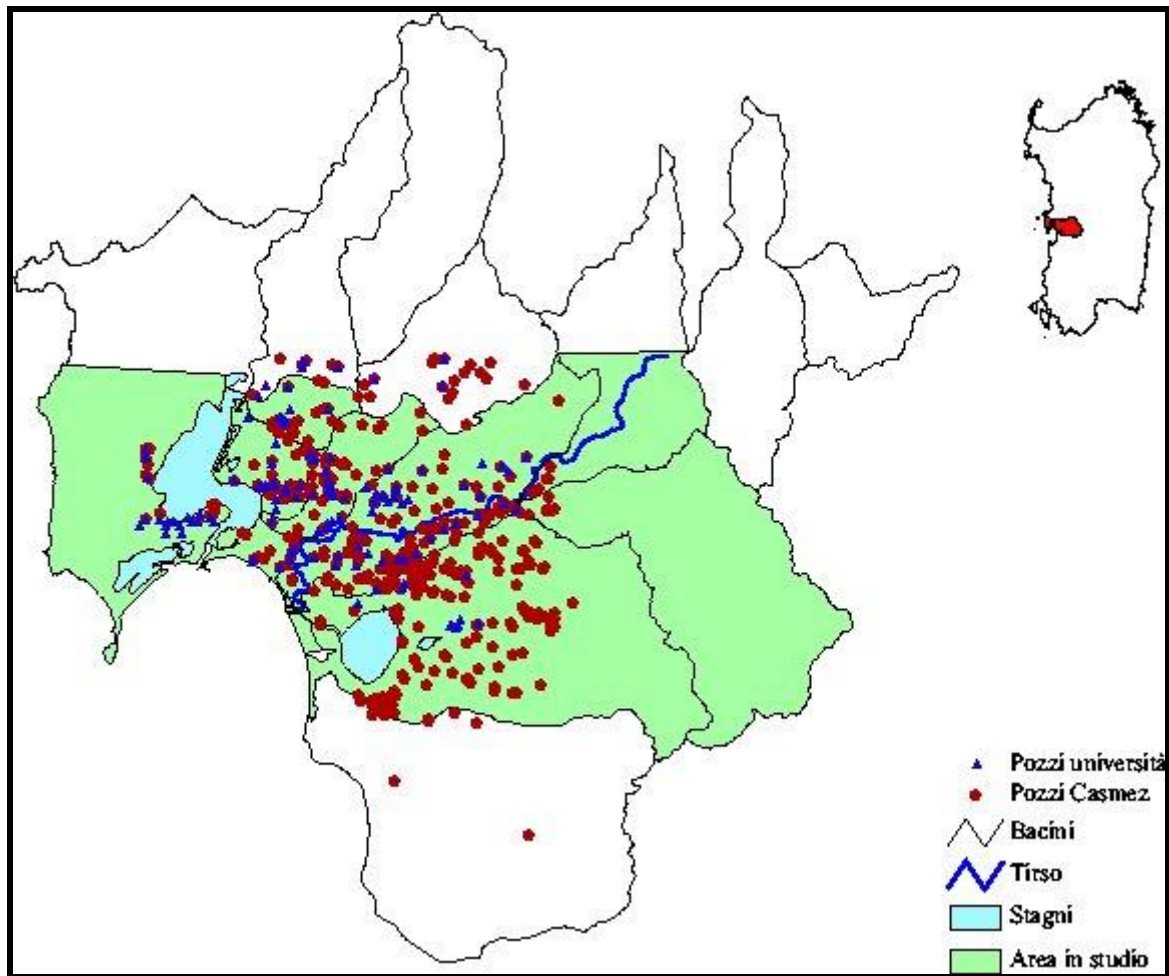


Figura 22: Localizzazione dei pozzi nel sito di Oristano

La successione stratigrafica dalla più recente alla più antica è la seguente:

- Depositi recenti di facies fluviali, lacustri, marine ed eoliche;
- basalti plio-quadernari intercalati nelle formazioni alluvionali antiche e sovrastanti i depositi continentali della formazione di Samassi (Pliocene medio);
- marne arenacee a Foraminiferi e Lamellibranchi (Pliocene inferiore);
- depositi di facies marina e continentale di età miocenica, costituiti da calcari e calcari arenacei poggiati su lipotipi marnosi e marnoso arenacei;
- vulcaniti oligoceniche riodacitiche e subordinatamente basalti ed andesiti con facies piroclastiche ed ignimbristiche;
- complesso sedimentario e metamorfico d'età paleozoica, prevalentemente costituito da conglomerati arenacei, lenti calcaree, scisti arenacei, argilloscisti e micascisti.

5.2 Temi di studio

Nell'area in studio sono presenti alcuni specchi d'acqua naturali (Stagni di Santa Giusta, Cabras e Mistras) che rivestono, unitamente al corso d'acqua del Tirso, un'importanza fondamentale per gli equilibri idrogeologici della zona.

Stando ai dati raccolti dal Dipartimento di Ingegneria del Territorio dell' Università di Cagliari in successive campagne di monitoraggio (1985, 1995, 2000), relativamente a

valori di piezometria e conducibilità elettrica, si è constatata la tendenza ad un graduale peggioramento della qualità dell'acqua con evidenti gravi ripercussioni sulle condizioni socioeconomiche del territorio. Infatti molte zone, per lo più caratterizzate da un'agricoltura di tipo estensivo, sono state marginalizzate ed utilizzate talvolta a magro pascolo (zona del Sinis).

La piana di Oristano nel periodo 1994--1995 è stata interessata da una crisi idrogeologica che ha portato ad una diminuzione degli apporti idrici di ben 330 mm annui di pioggia in meno rispetto alla media (1922--1999) (11). Nei periodi siccitosi si è constatato che le estrazioni dalla falda idrica aumentano proporzionalmente all'intensità della crisi e pertanto l'abbassamento naturale della superficie freatica, accompagnata dalla formazione di forti coni di depressione, ha reso l'acquifero più vulnerabile, aumentando il rischio di intrusione marina-salina in falda. Nell'area in studio tale situazione è aggravata dall'eccessivo numero di pozzi e dal loro errato posizionamento. Ne sono stati censiti più di 500 casualmente distribuiti, ma si stima che i pozzi, funzionanti e non, siano parecchie migliaia. Il frequente cattivo posizionamento dei pozzi ha portato a fenomeni di cortocircuitazione delle acque rendendo gli acquiferi, un tempo distinguibili in superficiale e profondo, comunicanti.

5.3 Il sistema informativo geografico

Per la realizzazione del GIS sono state recuperate diverse informazioni: la carta tecnica regionale, l'uso del suolo, la pedologia, le meteorologia e dati rilevati direttamente in situ (12). Una volta effettuate le tipiche operazioni di conversione ed elaborazione dei dati si è passati alla costruzione del sistema informativo geografico organizzando i diversi livelli informativi in un progetto ArcView contenente due viste: Area GIS (figura 23) e Area Modello (figura 24).

6 SELEZIONE DEI SITI DI STUDIO

La descrizione dei siti precedentemente illustrati offre un'ampia varietà di problematiche che vanno dall'inquinamento dovuto a intrusione salina alla presenza di ioni metallici, all'inquinamento da pH (ossia eccesso di acidità e basicità) fino alla biodegradazione di NAPL.

In tabella vengono elencati i siti considerati e il tipo di inquinamento trovato nel sottosuolo:

Tabella 1: Lista dei siti con relativo tipo di inquinamento

Nome di sito	Localizzazione	I. M.	dati	Geochim.	dati	NAPL	dati
Oristano	Sardegna	p.	buona	p.	n. d.	?	n. d.
Portoscuso	Sardegna	p.	buona	p.	buona	?	n. d.
Capoterra	Sardegna	p.	buona	p.	n. d.	?	n. d.
Muravera	Sardegna	p.	buona	p.	n. d.	?	n. d.
Ringe	Danimarca	n.p.	n. d.	?	n. d.	p.	buona

Legenda: I. M. = intrusione marina; p. = presente; n. p. = non presente; ? = probabile ma non certo; n. d. = informazione/dato non disponibile.

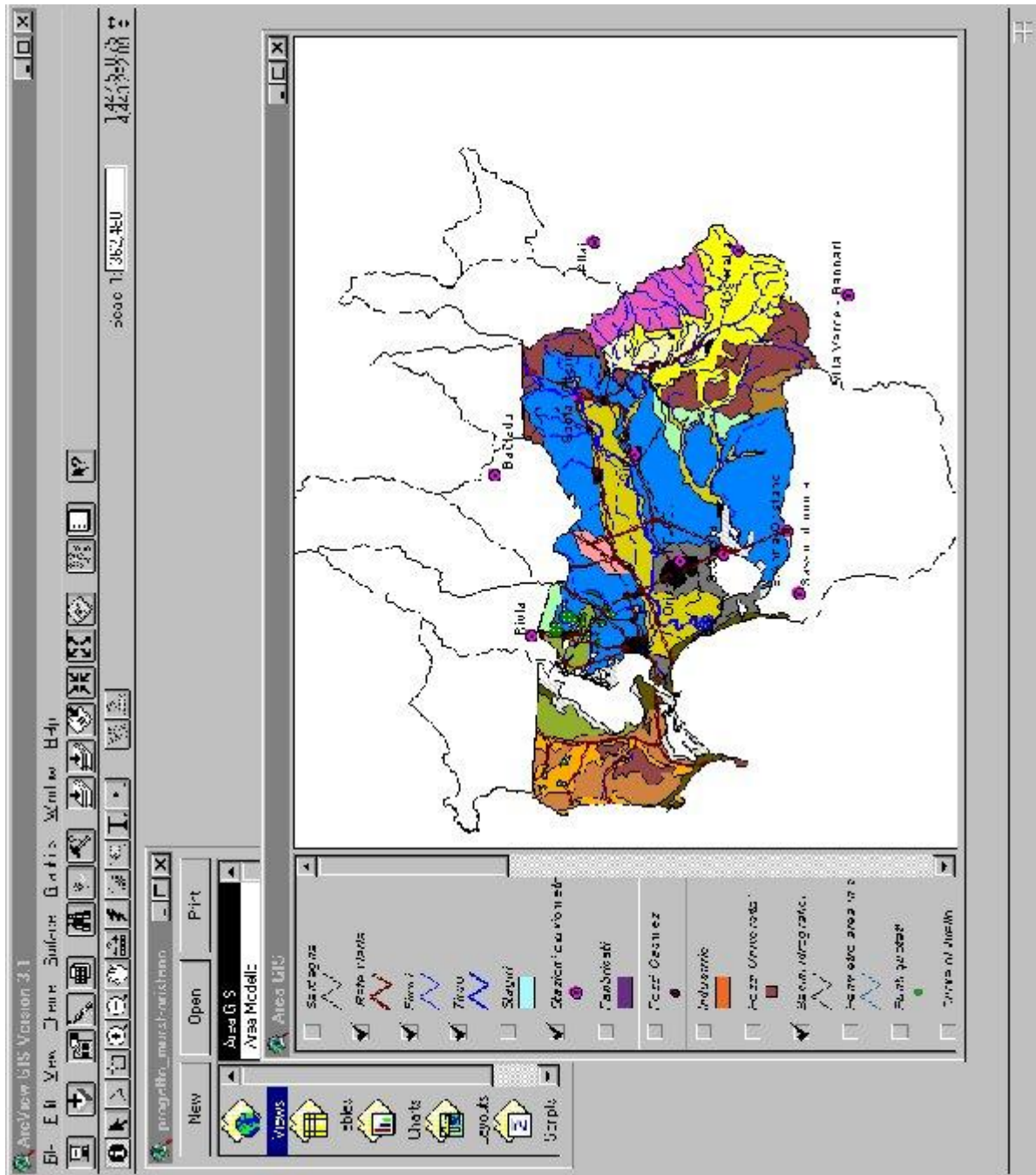


Figura 23: Sistema informativo geografico. È evidenziata l'area GIS

Dei 5 siti si è scelto di approfondire lo studio per Portoscuso e Ringe. La scelta si è basata essenzialmente su criteri di originalità e attualità del problema e sulla disponibilità dei dati. A differenza dei fenomeni di intrusione salina, studiati da tempo attraverso lo sviluppo di metodologie per il monitoraggio, il confinamento o la bonifica dei siti interessati, lo studio dell'inquinamento geochimico e dello spandimento di contaminanti organici è molto complesso e per certi aspetti ancora non conosciuto.

Portoscuso, è un sito di grande importanza in Sardegna in quanto sede di uno dei maggiori poli industriali. Sono presenti vari tipi di inquinamento e la quantità di dati disponibile è sufficiente a compiere uno studio dettagliato. In particolare le informazioni a disposizione oltre a riguardare perforazioni, carotaggi, analisi di campioni, comprendono anche prove di ricarica artificiale effettuate su pozzi pilota e una valutazione del bilancio idrologico. Per quanto riguarda le caratteristiche di inquinamento l'area presenta problemi di contaminazione geochimica (ioni metallici, pH dovuto a rilascio di soda caustica) e fenomeni di intrusione di acqua marina causata soprattutto dalla notevole necessità di acqua di raffreddamento per gli impianti delle industrie.

Lo studio del sito di Portoscuso è interessante sia dal punto di vista modellistica (flusso/trasporto dell'inquinante e simulazione di interventi di bonifica) che dal punto di vista dei sistemi informativi (uso del GIS per la valutazione del grado corrente di vulnerazione e analisi del rischio futuro) con possibilità di far interagire questi per valutazioni di tipo combinato.

Il sito Ringe risulta sicuramente quello maggiormente interessante sia per la complessità del problema (trattamento del suolo fratturato, presenza di biodegradazione in parte della matrice del suolo), sia perchè lo spandimento di inquinanti organici è di recente trattazione in Italia. La disponibilità di dati relativi al suolo, all'inquinamento e all'analisi di campioni è ampia, così come le informazioni riguardanti la biodegradazione della miscela di inquinanti presente. Inoltre la possibilità di effettuare uno studio modellistico di un sito inquinato da NAPL e di avere una notevole quantità di dati relativi a campioni di suolo, analisi chimiche e misure sul campo, rappresenta un fatto eccezionale soprattutto in Italia. Infatti siamo un po' in ritardo rispetto alla comunità scientifica internazionale dal punto di vista dello studio di inquinamento da idrocarburi aromatici immiscibili.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- 1) Kemp & Lauritzen, "*Asphalt and creosote factory in Ringe-soil contamination investigation*", Funen County, Pollution Investigation, Waste deposit n. 473-14, 1992.
- 2) Kemp & Lauritzen, "*Asphalt and creosote factory in Ringe groundwater investigation*", Funen County, Pollution Investigation, Waste deposit n. 473-14, 1992.
- 3) Sciabica M.G., "*Validazione dei modelli concettuali e matematici degli acquiferi con i dati idrogeologici ed idrogeochimici delle reti di monitoraggio*", Tesi di Dottorato, Politecnico di Torino ed Università degli Studi di Cagliari, 1994.
- 4) Barrocu G., Sciabica M.G., Uras G., Cortis A., Vernier E., "*Saltwater intrusion and artificial recharge modelling in the coastal aquifer system of Capoterra (Southern Sardinia)*", Atti di International Conference on Water Problems in the Mediterranean Countries, Near East University Civil Engineering Department Nicosia, North Cyprus, (in stampa), 1997.
- 5) Barrocu G., Sciabica M.G., Uras G., "*Transport modelling of saltwater intrusion processes in the coastal aquifer system of Capoterra (Southern Sardinia, Italy)*", Atti del 15th SWIM (Salt Water Intrusion Meeting), Ghent, Belgio (in stampa), 1998.

- 6) Aru A., Baldaccini P.M, Vacca A, “*Nota illustrativa alla Carta dei Suoli della Sardegna*”, Dipartimento di Scienze della Terra dell’Università degli Studi di Cagliari, Assessorato della Programmazione e Bilancio ed Assetto del Territorio della Regione Autonoma della Sardegna, 1991.
- 7) Barrocu G., Muscas L., Sciabica M.G., “*Prima esperienza di sviluppo di un sistema informativo geografico della piana di Capoterra (Sardegna)*”. In: *Informazione geografica: innovazione e formazione*, ASITA 2000, Genova (Italy), pp 423--428, vol I, 2000.
- 8) Vernier E., “*Studio idrogeologico ed idrogeochimico del sistema acquifero della piana alluvionale di Capoterra (Sardegna meridionale)*”, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Cagliari, 1999.
- 9) Ghiglieri G., “*Sperimentazione di ricarica artificiale negli acquiferi sabbiosi in un sito inquinato da effluenti industriali (Portovesme, Sardegna Sud-Occidentale)*”. Tesi di dottorato, Università degli Studi di Cagliari, 1994.
- 10) E. Lorrai, M.R. Lai, G. Lecca, A. Cadeddu, N. Crobu, A. Giacomelli, “*Saltwater intrusion in the Muravera Plain*”, Proceedings of the First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers, Essaouira, Morocco, 2001
- 11) Cau, P., “*Vulnerabilità dell’acquifero superficiale del Campidano di Oristano: il metodo SINTAC*”,. Tesi di laurea, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Università degli Studio di Cagliari, 2000
- 12) Muscas L., Cau P., « *Descrizione del GIS/Database implementato: sito di Oristano*”, Internal report, CRS4-TECH-REP ID 01/16, novembre 2000.