

Istituto Nazionale di Economia Agraria

**VALUTAZIONE DEL RISCHIO  
DI SALINIZZAZIONE DEI SUOLI  
E DI INTRUSIONE MARINA  
NELLE AREE COSTIERE  
DELLE REGIONI MERIDIONALI  
IN RELAZIONE AGLI USI IRRIGUI**

*a cura di*  
Rosario Napoli

INEA 2010

Il presente lavoro è stato elaborato nell'ambito del progetto "Attività di assistenza tecnica e supporto agli Enti concessionari nel settore dell'uso irriguo delle risorse idriche", affidato all'INEA dal MIPAAF, Gestione Commissariale ex Agensud.

Lo studio è stato redatto dal personale INEA e da alcuni consulenti esterni, con la supervisione ed il referaggio di un comitato tecnico-scientifico all'uopo costituito, formato da:

Ing. Antonino Casciolo – *Funzionario Gestione Commissariale ex Agensud, Responsabile unico del progetto;*

Dr. Guido Bonati – *Responsabile INEA Servizio 4;*

Dr. Pasquale Nino – *Coordinatore INEA del progetto;*

Prof. Ing. Agostino Farroni – *Professore aggregato del corso Idraulica e sistemazioni fluviali presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi dell'Aquila;*

Ing. Giacomo Romano – *Ingegnere idraulico, consulente della Gestione Commissariale ex Agensud.*

#### AUTORI

Dott.Geol. Rosario Napoli – *Responsabile Tecnico Scientifico CRA RPS Roma*

Coordinamento e redazione report finale

Coordinamento-contatti con enti gestori dei dati pedologici, idrogeologici, di uso del suolo e climatici (Regioni, INEA, CRA-CMA)

Metodologia di pre-processing e struttura basi dati

Reperimento dati idrogeologici per rapporti regionali e analisi degli stessi

Supervisione tecnica sviluppo e progettazione modello di rischio di salinizzazione dei suoli

Supervisione tecnica alla generazione e gestione risultati

Stesura del Report Finale

Applicazioni GIS e runnign/gestione risultati modello

Trasferimento dati Presso piattaforma WebGIS dell'Ufficio Gestcomagensud MIPAAF

Dott. Giovanni Allegrì – *CRA ABP Firenze*

Applicazioni GIS e geostatistiche sui dati idrogeologici, metodologia spazializzazione dati, analisi e trasformazione parametri di salinità, elaborazione modello Swap

Dr. Giorgio D'Egidio – *CRA ABP Firenze*

Reperimento/Acquisizione, trasformazione e armonizzazione dati idrogeologici

Dr. Nicola Laruccia – *Consulente esterno CRA*

Correzione/integrazione del dato pedologico per applicazione stima rischio salinizzazione suoli

Costruzione query/maschere per applicazione modello SWAP

Progettazione e Costruzione interfaccia al modello

Costruzione matrice ed analisi dei risultati

#### AUTORI RAPPORTI REGIONALI:

Dott. Geol. Rosario Napoli – *CRA-RPS: Coordinamento tecnico generale raccolta dati, elaborazione e valutazione assetti idrogeologici qualitativi e quantitativi, stesura report finale*

Prof. Giovanni Barrocu, Prof. Antonio Vernier, Dott. Ing. Marcella Sodde – *Dip. Ingegneria del Territorio Università di Cagliari: raccolta dati, elaborazione e valutazione assetti idrogeologici qualitativi e quantitativi:*

Prof. Giorgio Ghiglieri - *Dip. Ingegneria del Territorio Università di Sassari: raccolta dati, elaborazione e valutazione assetti idrogeologici qualitativi e quantitativi:*

Segreteria di redazione: Roberta Capretti

Coordinamento editoriale: Benedetto Venuto

Impaginazione e grafica: Ufficio Grafico Inea (Barone, Cesarini, Lapiana, Mannozi)

# PRESENTAZIONE

*L'irrigazione rappresenta uno dei fattori fondamentali nello sviluppo dell'agricoltura negli ultimi decenni, non solo perché ha consentito di ottenere produzioni elevate e di qualità, ma soprattutto perché ha reso possibile una flessibilità nella scelta degli ordinamenti produttivi da parte degli imprenditori agricoli, svincolandoli dalla scarsità ed incertezza degli apporti idrici derivanti dalle precipitazioni.*

*L'impiego dell'acqua in agricoltura, quale mezzo tecnico della produzione, pone delle problematiche peculiari rispetto agli altri fattori produttivi in quanto risorsa naturale e pertanto non producibile industrialmente e per la sua caratteristica di escludibilità nel consumo, che comporta una forte competizione con gli altri usi (civili, industriali, potabili, ricreativi, etc.).*

*L'INEA, con il servizio "Ricerche su ambiente e risorse naturali in agricoltura" ed in coerenza con gli attuali indirizzi comunitari tesi a garantire un approccio sostenibile alle risorse naturali, realizza studi specifici volti a promuovere un'efficiente gestione delle risorse idriche in agricoltura sia dal punto di vista economico che ambientale. Le attività del servizio pertanto, sono mirate allo sviluppo di strumenti agronomico-territoriali di supporto alla pianificazione e programmazione dell'uso delle acque, in un'ottica di contenimento dei consumi, e ad approfondire gli aspetti di carattere tecnico-ingegneristico, per fornire agli Enti gestori della risorsa un supporto per quanto riguarda le innovazioni tecnologiche adottate nei sistemi irrigui.*

*Questo lavoro in particolare, nasce dalla collaborazione tra INEA e Gestione Commissariale ex Agensud, che hanno dato vita al progetto di "Assistenza tecnica e supporto agli Enti concessionari nel settore dell'uso irriguo delle risorse idriche".*

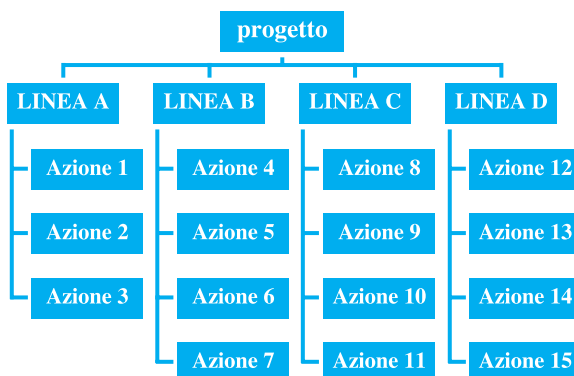
*Il progetto costituisce la prosecuzione e l'approfondimento di precedenti studi effettuati dall'INEA ("Studio sull'uso irriguo della risorsa idrica, sulle produzioni agricole irrigate e sulla loro redditività", finanziato con le risorse del QCS 1994-1999 nell'ambito del Programma Operativo Multiregionale "Ampliamento e adeguamento della disponibilità e dei sistemi di adduzione e distribuzione delle risorse idriche nelle regioni dell'Obiettivo 1" – sottoprogramma III, misura 3; studio "Assistenza tecnica nel settore delle risorse idriche" linee C, D ed E del Progetto Operativo, facente parte del "Programma Operativo Nazionale Assistenza Tecnica e Azioni di Sistema QCS Obiettivo 1 2000-2006" (PON ATAS) – misura 1.2: Azioni di assistenza tecnica e supporto operativo per l'organizzazione e la realizzazione delle attività di indirizzo, di coordinamento e orientamento delle Amministrazioni Centrali), volti a fornire supporto scientifico, tecnico e operativo alla Gestione Commissariale ex Agensud per ampliare e approfondire le conoscenze sull'agricoltura irrigua nelle regioni meridionali, allo scopo di ottimizzare l'uso delle risorse finanziarie disponibili con l'individuazione degli interventi strutturali a maggiore valenza economica.*

*Dal punto di vista operativo il progetto è rivolto principalmente al sostegno dell'attività degli Enti operanti nel settore irriguo – Consorzi di Bonifica ed altri soggetti pubblici – ed è articolato nelle seguenti quattro linee direttrici:*

- Linea A: studi a carattere territoriale sulle aree irrigue;*
- Linea B: studi ed indagini sull'utilizzo della risorsa idrica;*

- Linea C: elementi e linee guida per la progettazione di impianti irrigui;
- Linea D: supporto tecnico agli enti concessionari per l'accelerazione degli interventi e per le attività connesse alla gestione degli impianti.

Ciascuna Linea è articolata in diverse Azioni secondo lo schema seguente:



Nell'ambito delle diverse Linee del progetto sono state sviluppate le seguenti Azioni:

- Azione 1* Uso della risorsa idrica, strutture di distribuzione e tecniche irrigue nelle aree non servite da reti collettive dei Consorzi di Bonifica;
- Azione 2* Monitoraggio qualitativo dei corpi idrici utilizzati a scopo irriguo;
- Azione 4* Intrusione marina e possibilità di trattamento delle acque con elevato contenuto salino;
- Azione 5* Utilizzo delle acque delle reti di bonifica;
- Azione 6* Controllo delle perdite nelle reti in pressione;
- Azione 7* Utilizzazione a fini naturalistici degli invasi a prevalente uso irriguo;
- Azione 8* Linee guida sulla scelta e l'impiego delle apparecchiature idrauliche, sugli impianti di sollevamento, sugli impianti di filtraggio;
- Azione 11* Efficienza e sicurezza delle dighe e piccoli invasi;
- Azione 12* Supporto all'attività di rendicontazione;
- Azione 14* Supporto all'attività di progettazione;
- Azione 15* Analisi di rilevanti esperienze di progettazione a livello internazionale.

L'azione 4 ha dato luogo a questa ricerca, il cui obiettivo è stata la valutazione del fenomeno dell'intrusione salina nelle aree costiere e/o alluvionali, dal punto di vista idrogeologico tramite una raccolta di informazioni e dati tematici (rapporti). Inoltre si è valutato il rischio di salinizzazione dei suoli su base pluriennale con modellistica (SWAP) sulle varie combinazioni suolo-clima-coltura-tecnica provenienti da database creati nell'Azione 1 di questo progetto.

Tiziano Zigiotta  
Presidente INEA

Ing. Roberto Iodice  
Commissario Ad Acta  
ex AgenSud

# INDICE

<i>Introduzione</i>	1
---------------------	---

## CAPITOLO 1

### **RAPPORTI REGIONALI E VALUTAZIONE DELL'INTRUSIONE SALINA**

1.1 L'intrusione salina negli acquiferi costieri delle regioni Sardegna, Sicilia e Puglia	3
1.2 Cause e tipi di intrusione salina	3
1.2.1 <i>Le aree costiere interessate da intrusione in relazione all'uso del suolo irriguo non attrezzato</i>	6

## CAPITOLO 2

### **RAPPORTO SULLO STATO DELL'ARTE NELLO STUDIO DEL FENOMENO SALINIZZAZIONE DELLE FALDE NELLA REGIONE SARDEGNA**

2.1 Principali sistemi acquiferi della Sardegna in riferimento al fenomeno dell'intrusione salina	9
2.2 Individuazione aree di interesse per il fenomeno dell'intrusione salina	11
2.2.1 <i>Area della piana di Oristano</i>	13
2.2.2 <i>Area della piana di Quirra</i>	22
2.2.3 <i>Area della piana di Muravera</i>	32
2.2.4 <i>Area della piana alluvionale di Capoterra</i>	40
2.2.5 <i>Area della piana alluvionale costiera della Marina di Cardedu</i>	51
2.2.6 <i>Area della piana alluvionale costiera e dei rilievi dell'area della Nurra</i>	55
2.2.7 <i>Area della piana alluvionale e terrazzi di porto Torres</i>	64
2.2.8 <i>Area di Posada</i>	71
2.2.9 <i>Area di Orosei</i>	79

## CAPITOLO 3

### **RAPPORTO SULLO STATO DELL'ARTE NELLO STUDIO DEL FENOMENO SALINIZZAZIONE DELLE FALDE NELLA REGIONE PUGLIA**

3.1 Inquadramento e caratterizzazione del problema	85
3.1.1 <i>Inquadramento idrogeologico</i>	85
3.1.2 <i>Qualità delle acque sotterranee pugliesi</i>	87
3.2 Individuazione aree di interesse per il fenomeno dell'intrusione salina	93
3.3 Lo stato della contaminazione salina negli acquiferi costieri della Puglia	95
3.3.1 <i>Sistema di monitoraggio delle acque sotterranee</i>	97
3.3.2 <i>Acquifero del Gargano</i>	100

3.3.3 <i>Acquifero superficiale del Tavoliere</i>	100
3.3.4 <i>Acquifero della Murgia</i>	102
3.3.5 <i>Lo stato di contaminazione salina della falda profonda del Salento</i>	102

#### CAPITOLO 4

### **RAPPORTO SULLO STATO DELL'ARTE NELLO STUDIO DEL FENOMENO SALINIZZAZIONE DELLE FALDE NELLA REGIONE SICILIA**

4.1 Inquadramento e caratterizzazione del problema	113
4.1.1 <i>Le aree con fenomeni di salinizzazione superficiale dei suoli</i>	114
4.2 Inquadramento geologico sintetico della Sicilia	116
4.2.1 <i>Aspetti idrogeologici della Sicilia</i>	118
4.2.2 <i>Aspetti idrogeochimici della Sicilia</i>	122
4.3 I Corpi idrici significativi	124
4.3.1 <i>Criteri di individuazione dei corpi idrici significativi</i>	125
4.4 Descrizione generale delle caratteristiche dei bacini idrogeologici	127
4.5 Lo stato della contaminazione salina negli acquiferi costieri della Sicilia	129

#### CAPITOLO 5

### **POSSIBILITÀ DI INTERVENTI PER LA MITIGAZIONE DEI FENOMENI DI INTRUSIONE MARINA NELLE REGIONI MERIDIONALI**

5.1 Procedura di intervento	155
-----------------------------	-----

#### CAPITOLO 6

### **LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI SALINIZZAZIONE NEI SUOLI**

6.1 Finalità dello studio	159
6.2 I suoli salini e la loro gestione	160
6.2.1 <i>Presupposti teorici</i>	160
6.2.2 <i>I suoli salini</i>	160
6.2.3 <i>Suoli sodici</i>	162
6.2.4 <i>Suoli affetti da salinità secondaria a causa dell'irrigazione</i>	162
6.2.5 <i>La salinizzazione dei suoli in Italia</i>	167
6.3 Metodo di valutazione del rischio salinizzazione del sistema suolo-clima-coltura-tecnica	167
6.3.1 <i>Metodo di valutazione adottato</i>	167
6.3.2 <i>Il modello Soil Water Atmosphere Plant (SWAP)</i>	168
6.3.3 <i>Il modulo di trasporto/accumulo soluti SWAP</i>	169
6.4 Strumenti operativi	179
6.4.1 <i>Delimitazione delle aree soggette a rischio di salinizzazione su base Sottosistemi di Terre (pedopaesaggi)</i>	179

6.4.2 <i>Quantificazione del contenuto salino nelle acque di falda e spazializzazione del dato</i>	181
6.4.3 <i>Reperimento dati per introduzione del fattore di correzione su aree servite da acque dolci</i>	183
6.4.4 <i>Analisi risultati geografici</i>	183
6.4.5 <i>Applicazione del modello di calcolo e previsione dell'andamento dei Sali nel sistema suolo-clima-coltura-tecnica</i>	191
6.5 Risultati della modellizzazione del rischio di salinizzazione dei suoli	197
6.5.1 <i>Determinazione dell'area potenzialmente non idonea per superamento delle soglie di salinità dei suoli</i>	197
6.5.2 <i>Correzione dei risultati geografici con dati quantitativi di acqua servita da reti consortili</i>	198
6.6 Scenari geografici per raggruppamento di colture e tecniche	211
6.6.1 <i>La valutazione delle aree all'attitudine alla pianificazione di reti irrigue</i>	211
6.6.2 <i>Valutazione attitudinale: analisi dei risultati</i>	215
6.6.3 <i>Esempio su caso-studio</i>	217
<b><i>Bibliografia</i></b>	223





# INTRODUZIONE

L'attività svolta nell'ambito di questa linea ha riguardato lo sviluppo delle seguenti linee tematiche:

- Inquadramento del fenomeno dell'intrusione marina e definizione dei rapporti regionali per Sicilia, Puglia e Sardegna;
- Valutazione del rischio di salinizzazione dei suoli con modellistica su base pluriennale.

Nei capitoli inerenti la prima tematica, vengono riportati i risultati dell'indagine sul fenomeno dell'intrusione marina nelle Regioni meridionali interessate in maniera cospicua ed estensiva dal processo stesso (Puglia, Sicilia, Sardegna). Vengono quindi presentati i rapporti regionali sullo stato dell'arte nello studio della salinizzazione delle falde nelle regioni Puglia, Sicilia e Sardegna aventi come argomenti:

- Individuazione delle aree con problemi di intrusione del cuneo salino, di salinizzazione delle falde e di uso irriguo di acque salmastre, in base agli studi svolti o in corso di svolgimento;
- Aspetti geologici, idrogeologici delle aree interessate dal fenomeno;
- Le dinamiche e gli effetti dell'azione intrusiva sulle caratteristiche idrauliche degli acquiferi interessati dall'intrusione del cuneo salino;
- Altri meccanismi di salinizzazione delle falde;
- Utilizzo di acque salmastre;
- Individuazione di un'area con urgente esigenza di approfondimento e considerazioni conclusive.

Tale impostazione sarà nel corso del report seguita per quanto possibile, compatibilmente con i dati a disposizione recuperati sui vari punti dell'elenco sopracitato.

La valutazione del rischio di salinizzazione dei suoli è stata effettuata sulle regioni Sicilia, Puglia, Basilicata e Sardegna, dove è stato possibile recuperare i dati relativi alla salinità media delle acque da pozzi. Si è utilizzato il modello SWAP per il calcolo su base decennale dell'accumulo di sali nei suoli, avendo come presupposto il mantenimento dell'attuale gestione ed assetto delle colture irrigue, a partire da quanto monitorato e calcolato nell'ambito della linea A, azione 1 del progetto "Attività di assistenza tecnica e supporto agli Enti concessionari nel settore dell'uso irriguo delle risorse idriche" (Nino, 2009).



## **RAPPORTI REGIONALI E VALUTAZIONE DELL'INTRUSIONE SALINA**

### **1.1 L'intrusione salina negli acquiferi costieri delle regioni Sardegna, Sicilia e Puglia**

Le coste delle Regioni Sardegna, Sicilia e Puglia, come la maggior parte delle aree costiere italiane, sono in qualche modo interessate dall'intrusione salina, la cui causa è generalmente attribuita al sovrasfruttamento degli acquiferi. Per far fronte ai fabbisogni di una crescente popolazione particolarmente pressanti nei periodi estivi, quando ai ridotti afflussi meteorici corrispondono le richieste di punta per gli usi civili della popolazione residente e dei turisti, si ricorre alle eduzioni di acque sotterranee, creando depressioni della piezometrica che richiamano acque salate.

La proporzione della popolazione residente nelle aree costiere del sud, proiettato com'è sul mare, raggiunge il 45%, mentre nell'Italia settentrionale il dato è dell'11,5%, ma nel paragonare le due situazioni si deve considerare che nel settentrione le coste sono meno sviluppate e l'entroterra è più densamente popolato che nel meridione.

Lo sviluppo di nuove aree urbane e l'espansione degli insediamenti storici ha comportato la perdita di aree agricole di primario interesse e spesso l'insorgere di conflitti fra gli utenti per l'allocazione delle risorse idriche. In genere l'equilibrio naturale fra acque superficiali e sotterranee in rapporto con il mare è stato stravolto. A causa di una cattiva gestione la salinità delle acque costiere è aumentata e di ciò hanno risentito i suoli a contatto con esse per effetto dell'irrigazione o per risalita per capillarità da falde di acque salate.

Il problema è molto complesso, perché l'intrusione salina, come si dirà, non è tanto dovuta ad un flusso laterale dal mare attuale, ma è avvenuta anche per effetto delle variazioni eustatiche conseguenti ai cambiamenti climatici.

Localmente il deterioramento qualitativo delle acque ha prodotto anche salinazione dei suoli, il che ha costretto gli agricoltori a tralasciare colture pregiate e dedicarsi a quelle di prodotti più resistenti alla salinità o addirittura all'abbandono delle terre.

Il solo rimedio possibile nell'immediato per contrastare e controllare la salinazione delle acque costiere è la gestione integrata delle risorse superficiali e sotterranee per sopprimere ai fabbisogni delle diverse utenze con acque di diversa salinità in funzione delle loro effettive necessità per i diversi usi.

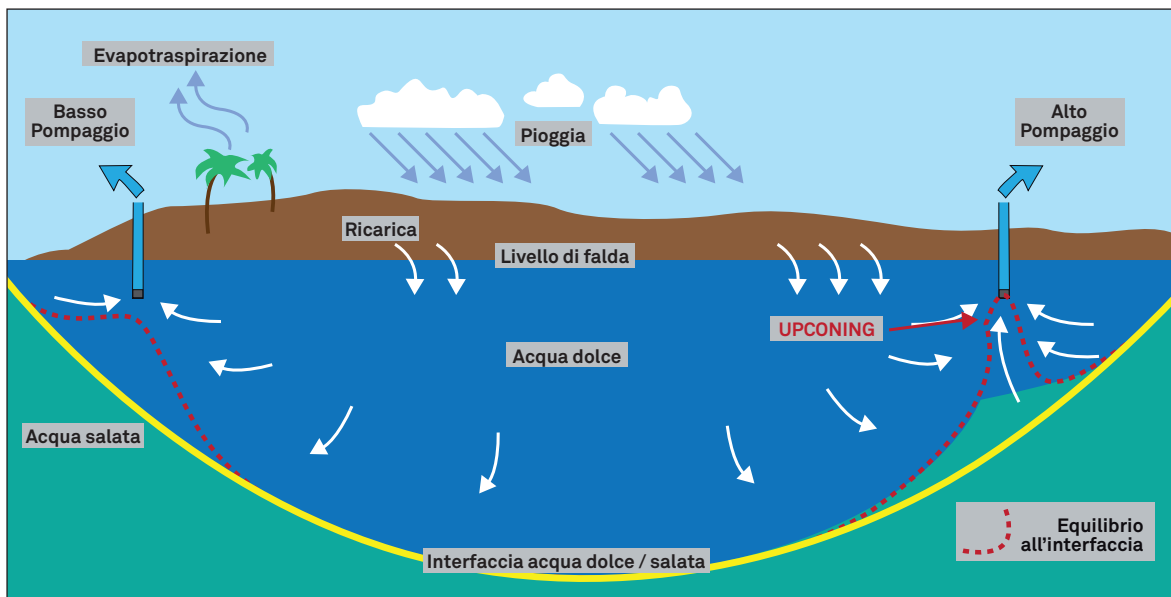
È certezza comune di tutti gli specialisti che non sia possibile contrastare efficacemente la salinazione delle acque sotterranee costiere senza far ricorso ad altre risorse.

### **1.2 Cause e tipi di intrusione salina**

Tutte le aree costiere delle tre regioni, come buona parte di quelle del Mediterraneo, sono in varia misura affette dall'intrusione salina. Il sovrasfruttamento delle falde, definito come l'eduzione di quantitativi d'acqua superiore agli apporti di acqua dolce, è in genere

considerata la causa principale dell'intrusione salina negli acquiferi, secondo meccanismi oramai consolidati e conosciuti (Figura 1).

**Figura 1. Schema semplificato dei meccanismi e fattori dell'intrusione salina costiera con risalita del cuneo salino (da Ghiglieri, 2006): livelli di pompaggio elevato di acque dolci da pozzi in prossimità della costa "richiamano" acque saline e/o salmastre in superficie attraverso il fenomeno dell'upconing (spostamento dell'interfaccia dolce/salata verso la superficie in forma conica)**



Le cause principali dell'intrusione sono le seguenti:

- Risalita dell'interfaccia acqua dolce/salata (upconing). L'acqua dolce, meno densa, flotta sull'acqua salata. Alla depressione della piezometrica dell'acqua dolce prodotta dai pozzi in eduzione, corrisponde una risalita della zona d'interfaccia fra le due acque, il livello della quale può risalire fino alle pompe dei pozzi, che così emungono acqua sempre più salata. Spesso l'intrusione, più che dall'esaurimento della risorsa di acqua dolce, come comunemente si ritiene, dipende:
  - dalle caratteristiche dell'acquifero, quali i parametri geometrici e idraulici, la composizione delle fasi liquida e solida, i meccanismi e i tempi di ricarica, naturale o artificiale;
  - dalle caratteristiche dei pozzi quali il diametro e la profondità rispetto alla zona di interfaccia;
  - dal raggio di influenza della depressione risultante prodotta dai pozzi in eduzione rispetto alla distanza dalla linea di costa. Se il raggio è superiore, per inversione del gradiente dalla depressione prodotta dai pozzi viene comunque richiamata acqua di mare, anche quando le risorse idriche sotterranee siano superiori alle portate edotte.
- Innalzamento del livello del mare dovuto ai cambiamenti climatici. Gli effetti a noi più evidenti sono quelli avvenuti per lo scioglimento dei ghiacci nell'ultimo post-glaciale, il post Würmiano (12 ka-Attuale), ma simili variazioni si verificarono anche in precedenza, nei periodi interglaciali del post-Günziano (455-620 kanni),

post-Rissiano (380-200 ka) e post-Mindeliano (110-130 ka), e anche precedenti. Localmente le variazioni di livello del mare sono avvenute anche per subsidenze positive e negative determinate da movimenti tettonici o attività vulcaniche. Così buona parte dei sedimenti di delta costieri si sono depositati in ambiente fluvio-lagunare-marino in acque con vario grado di salinità, anche in alternanza con depositi evaporitici che le acque continentali, risalito il livello del mare, non hanno potuto lisciviare. Gli orizzonti di varia permeabilità dovuti ai diversi modelli di drenaggio carsico che si ritrovano nelle formazioni calcaree di varia età sono testimonianza delle variazioni di livello marino avvenute dal Cambriano al Quaternario recente. Le acque intrappolate nei pori dei sedimenti più profondi, sui quali si sono nel tempo accumulati quelli dei sedimenti più recenti, sono in genere loro coeve e perciò dette connate. Esse testimoniano una salinità diversa da quella dei mari attuali e per questo sono considerate fossili. La datazione con metodi radioattivi di alcuni elementi in esse disciolti permette di definire le condizioni climatiche e paleogeografiche dell'ambiente di deposizione, ma anche di interpretare meglio le variazioni di equilibrio idrodinamico che avvengono per cause naturali o indotte dall'uomo nella zona di interfaccia fra le acque costiere di diversa salinità.

Le varie cause di salinazione di un sistema acquifero, di caratteristiche geometriche ed idrogeologiche note, possono essere definite solo analizzando nel dettaglio l'evoluzione:

- delle piezometrie dell'orizzonte freatico e degli eventuali orizzonti confinati sottostanti, considerando i rapporti fra i diversi orizzonti sovrapposti, in particolare per quanto concerne gli effetti delle interconnessioni causate dai pozzi profondi che li attraversano,
- idrochimica delle acque edotte, con un attento monitoraggio che consideri:
  - le variazioni di salinità (non solo come TDS e in cloruri), temperatura e pH. L'intrusione salina può determinare grandi cambiamenti di ambiente chimico-fisico con scambi ionici e variazioni di equilibrio redox, sviluppo di processi di dissoluzione-precipitazione e adsorbimento-desorbimento di minerali, e retoxificazione di sostanze tossiche, dei quali tener conto nell'uso dei suoli;
  - la datazione delle acque con indagini isotopiche su isotopi stabili (D e  $^{18}\text{O}$ ) che permettano di definire l'origine delle acque, attuali e fossili connate, di diversa salinità, conoscenza essenziale per una razionale gestione delle risorse.

La salinità delle acque varia nello spazio e nel tempo. Essa dipende da una parte dalle caratteristiche idrogeologiche degli acquiferi, dall'altra dal modo in cui avviene la loro ricarica, naturale o artificiale. Non è perciò possibile definire un valore medio di salinità caratteristico di un dato acquifero. Le aree di diversa salinità possono essere zonate con le isoaline, luoghi dei punti di uguale salinità, indispensabili per indicare le linee di flusso dell'ingressione ad esse perpendicolari, che in genere corrispondono bene a quelle dedotte dalle isoidropse.

Dovendo comunque fare delle previsioni sull'evolversi del processo di salinazione in un'area di intervento sulla base di una prima zonazione si può solo ipotizzare che la salinità possa variare fra i valori minimi e massimi rilevati di 500-2000 mg/l. Qualora il valore massimo di salinità risultasse più elevato di quello del mare, sia per i cloruri sia per i solfati, si dovrebbe ipotizzare che la salinità sia dovuta a risalita di acque fossili connate o di acque venute a contatto con depositi evaporitici.

### 1.2.1 Le aree costiere interessate da intrusione in relazione all'uso del suolo irriguo non attrezzato

Le aree deltizie maggiormente interessate da intrusione salina sono in Sardegna quelle del Flumendosa, dei golfi di Cagliari e Oristano e del Cedrino a Orosei e, in Sicilia, quelle di Augusta-Siracusa, Palermo, Marsala-Mazara del Vallo, Castelvetro, Piana di Catania, Palermo-Bagheria e Piana di Milazzo-Barcellona.

Le acque saline si sono poi intruse particolarmente negli acquiferi carsici costieri, in Puglia del Gargano, della Murgia, del Tavoliere e del Salento, in Sicilia degli Iblei e di Palermo, e in Sardegna di Alghero.

Sulla base dei dati raccolti e delle informazioni da bibliografia, sono stati evidenziati i paesaggi interessati dal fenomeno di intrusione e conseguente uso di acque parzialmente saline, e la relazione tra queste aree e le aree interessate da uso irriguo (Figure 2, 3 e 4).

**Figura 2. Aree di studio interessate dal fenomeno della intrusione marina e/o salinizzazione dei suoli in relazione all'uso irriguo attrezzato e non (fonte uso suolo INEA 2005) per la Regione Sardegna**

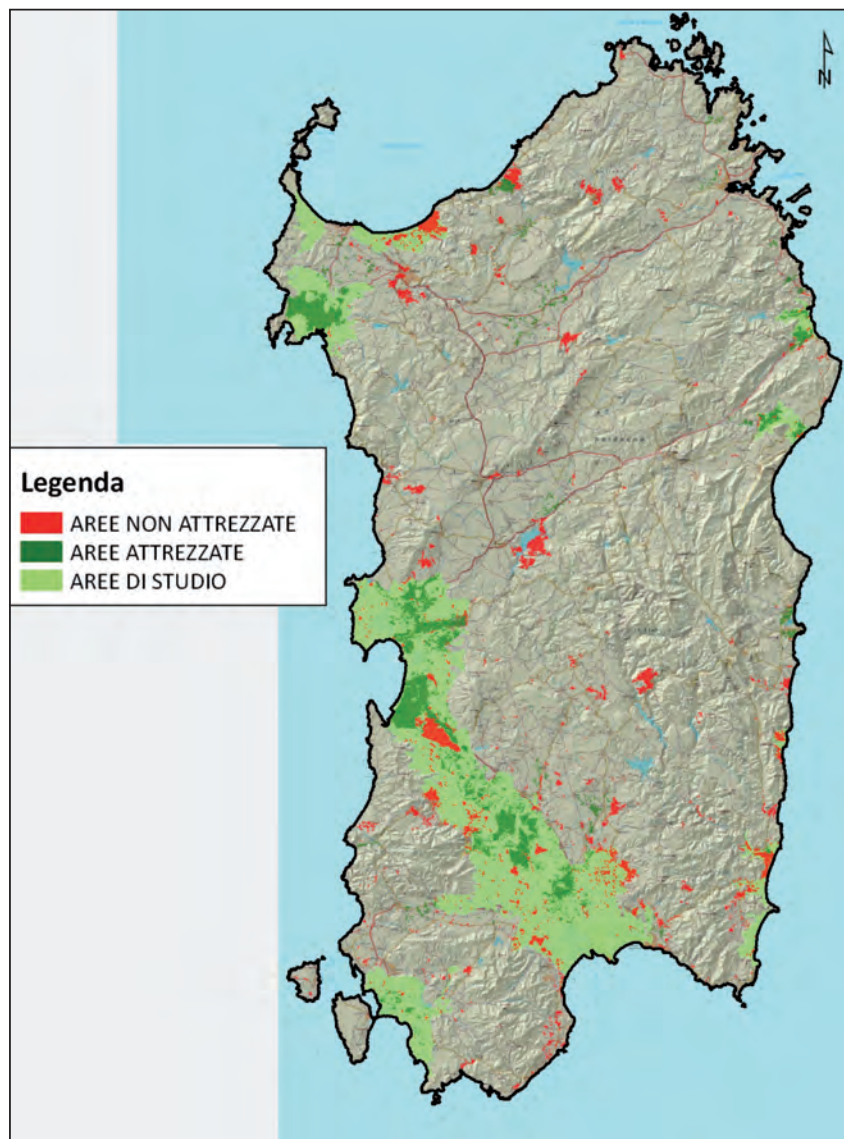


Figura 3. Aree di studio interessate dal fenomeno della intrusione marina e/o salinizzazione dei suoli in relazione all'uso irriguo attrezzato e non (fonte uso suolo INEA 2005) per la Regione Sicilia

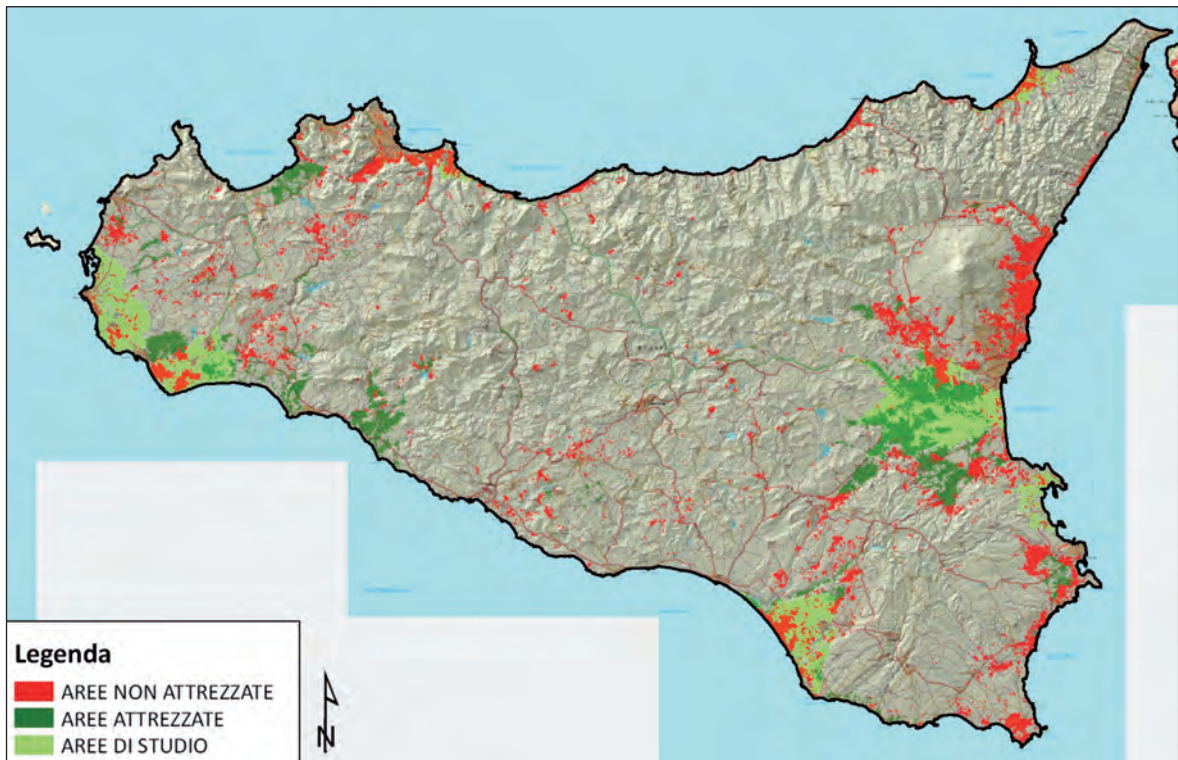
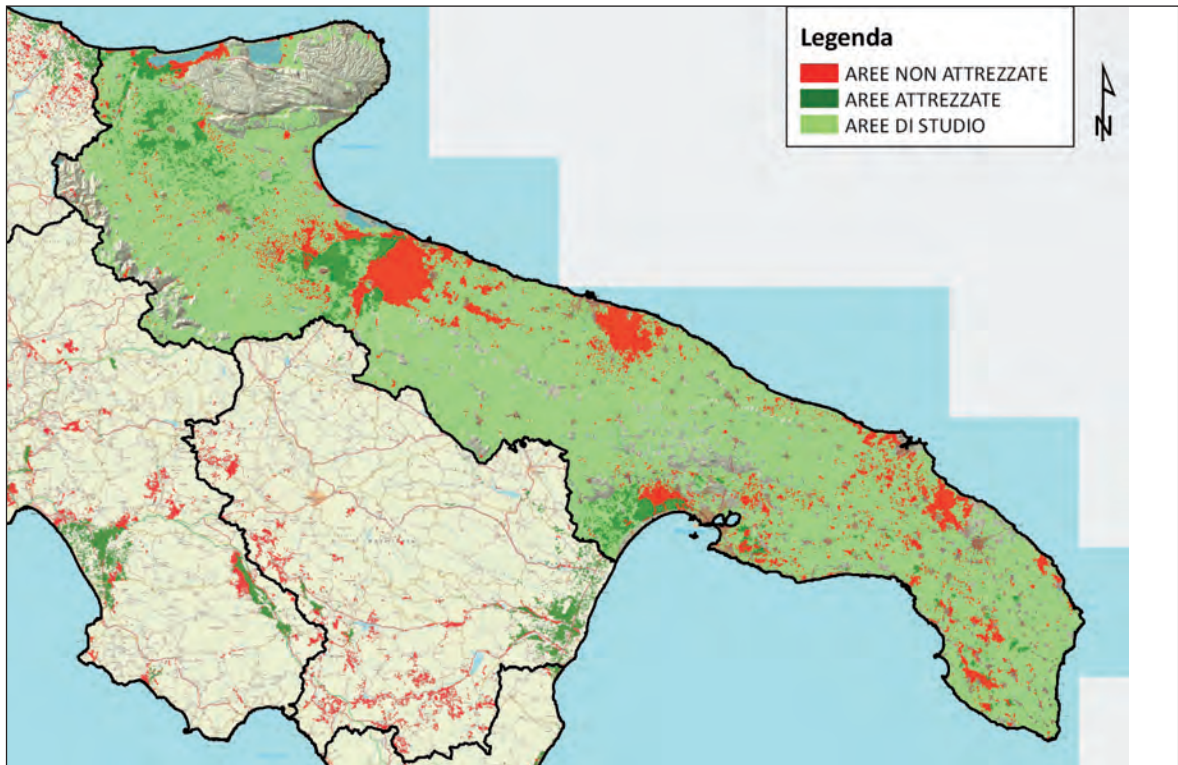


Figura 4. Aree di studio interessate dal fenomeno della intrusione marina e/o salinizzazione dei suoli in relazione all'uso irriguo attrezzato e non (fonte uso suolo INEA 2005) per le Regioni Puglia e Basilicata







# **RAPPORTO SULLO STATO DELL'ARTE NELLO STUDIO DEL FENOMENO SALINIZZAZIONE DELLE FALDE NELLA REGIONE SARDEGNA**

## **2.1 Principali sistemi acquiferi della Sardegna in riferimento al fenomeno dell'intrusione salina**

I più importanti acquiferi della Sardegna si ritrovano nelle formazioni dei calcari carsici del Golfo di Orosei e nella Nurra, rispettivamente nelle coste orientale e nordoccidentale e nei calcari carsici della serie cambriana dell'Iglesiente, sulla costa a SE dell'isola. Le coste sarde consistono, per la maggior parte, di imponenti scogliere di rocce metamorfiche, cristalline, vulcaniche, e sedimentarie, di età dal Paleozoico al Quaternario, nelle quali le acque sotterranee sono localizzate nelle grandi fratture e nelle zone di alterazione porose di copertura. Le scogliere sono interrotte da incisioni vallive e dalla depressione del Graben del Campidano, esteso dal Golfo di Oristano, ad ovest, a quello di Cagliari, a sud, sulle quali nel tempo si sono depositati, in ambiente lacustre-marino rivierasco, i sedimenti e le alluvioni recenti delle piane costiere attuali, orlate da stagni costieri.

Le aree deltizie maggiormente interessate da intrusione salina sono quelle del Flumendosa, dei golfi di Cagliari e Oristano e del Cedrino a Orosei.

La piana costiera di Muravera è costituita dai sedimenti alluvionali del Pleistocene-Olocene del delta del Flumendosa, potenti alcune centinaia di m, depositatisi sul substrato roccioso metamorfico e granitico del Paleozoico affiorante sui rilievi che delimitano il bacino idrografico. (Barbieri et al., 1983).

Si sono in essa identificati almeno due acquiferi freatici, un acquifero superficiale con profondità massima di 20 m, e un sottostante acquifero profondo, la cui conformazione non è stata ancora ben definita.

I due sistemi acquiferi sono separati da un orizzonte argilloso di potenza variabile da alcuni m a diverse decine. Vi sono poi degli acquiferi minori locali con sede nelle fratture che drenano il substrato roccioso (Barbieri et al., 1986).

Il naturale equilibrio idrodinamico fra il mare e le acque sotterranee e superficiali, che defluiscono nel corso d'acqua e in alcuni dei suoi vecchi canali, ora in parte interrati ed isolati dal principale, è stato profondamente modificato dall'uomo all'inizio degli anni '50 e successivamente, dopo che il fiume ed alcuni suoi tributari furono sbarrati a monte. Di conseguenza la ricarica naturale degli acquiferi costieri diminuì notevolmente e i canali di foce, che un tempo drenavano acque dolci, ora contengono acque salate d'ingressione diretta dal mare.

Peraltro le falde, superficiali e profonde, sono state esposte ad un crescente sfruttamento, effettuato con pozzi scavati e trinceroni approfonditi negli orizzonti acquiferi superficiali e pozzi trivellati in profondità, per soddisfare le richieste per gli usi agricoli e civili, specie d'estate. La situazione è stata particolarmente critica nei periodi siccitosi degli anni scorsi.

L'area è di grande interesse ambientale e la sua economia, che è strettamente legata alla agricoltura, al turismo e all'acquacoltura negli stagni costieri, è minacciata dall'intrusione salina.

Lo sviluppo dell'intrusione salina è stato studiato da più di 30 anni, in occasione di ripetute campagne di indagini idrogeologiche, idrogeochimiche e geofisiche sistematiche.

Le indagini geognostiche e idrogeologiche hanno permesso di definire i parametri geometrici e idrogeologici. Con le indagini geofisiche preliminari, con rilievi di resistività, polarizzazione indotta e sondaggi verticali, è stata riscontrata l'esistenza di strette relazioni fra la salinità, la resistività e la caricabilità e quindi è stata definita in dettaglio la profondità dell'acqua dolce, dell'acqua salmastra e dell'acqua salata (Barbieri et al., 1988; Ranieri et al., 1988).

La piana di Capoterra si estende nella parte sud-occidentale del Graben del Campidano, delimitata a ovest da colline granitiche e rilievi di rocce metamorfiche e a sud-est dalle saline e dallo stagno di Santa Gilla e dal Mare Mediterraneo. Le formazioni geologiche che la costituiscono sono, dal più recente, in alto, al più antico, in profondità, depositi di pedemonte, sedimenti fluviali e fluviolacustri, alluvioni recenti e antiche terrazze del Quaternario e Plio-Quaternario, e graniti e metamorfici del substrato roccioso del Paleozoico. Le alluvioni recenti, molto permeabili, sono sede di un acquifero freatico, che sovrasta un altro sistema acquifero multistrato, semiconfinato o localmente confinato (Barrocu et al., 1994).

Il monitoraggio delle piezometrie e della qualità delle acque sotterranee svolto periodicamente negli ultimi due decenni ha indicato lo sviluppo progressivo del processo di salinazione determinato da intrusione laterale, risalita dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata (upconing) salina, e spray. Come conseguenza, a causa della salinazione delle acque e dei suoli vaste aree attrezzate per la coltura degli agrumi sono state abbandonate.

Il modello idrogeologico dell'area è alquanto complesso a causa dei fattori naturali, quali la geologia, la vicinanza del mare e lo stagno con le saline di Santa Gilla, e per le azioni antropiche, quali l'espansione urbanistica, che ha interessato la fascia pedemontana e costiera e lo sviluppo industriale della piana adiacente allo stagno.

I due sistemi acquiferi sono alimentati lateralmente da ovest attraverso le grandi fratture del bedrock, dirette ENE-WSW e WNW-ESE. Le loro acque sono simili e strettamente affini a quelle del substrato cristallino dal quale provengono.

L'intrusione salina è causata da processi naturali quali lunghi periodi di siccità o è indotta dall'uomo con lo sfruttamento eccessivo dei pozzi. Le analisi idrochimiche hanno indicato che l'incremento di salinità è maggiore nell'acquifero freatico che nel confinato.

La salinità dell'acquifero confinato è dovuta ad intrusione salina nella zona dove vi è la maggiore estrazione di acqua sotterranea per gli usi agricoli e industriali. La salinità dell'acquifero superficiale è dovuta anche ad intrusione di acqua salmastra dallo stagno e dalle saline, e da infiltrazione diretta dei sali depositati sul suolo come spray che il vento solleva e trasporta dalle saline.

L'intrusione salina è causata da processi naturali quali lunghi periodi di siccità o è indotta dall'uomo con lo sfruttamento eccessivo dei pozzi. Le analisi idrochimiche hanno indicato che l'incremento di salinità è maggiore nell'acquifero freatico che nel confinato.

La salinità dell'acquifero confinato è dovuta ad intrusione salina nella zona dove vi è la maggiore estrazione di acqua sotterranea per gli usi agricoli e industriali. La salinità dell'acquifero superficiale è dovuta anche ad intrusione di acqua salmastra dallo stagno e

dalle saline, e da infiltrazione diretta dei sali depositati sul suolo come spray che il vento solleva e trasporta dalle saline.

Lo studio dell'intrusione in quest'area è stato realizzato tramite l'applicazione di un modello matematico per descrivere la conservazione di massa della soluzione acqua-suolo e la conservazione di massa del contaminante sale. Le equazioni di flusso e trasporto hanno consentito di mettere in relazione la densità della miscela acqua dolce-acqua salata con la sua concentrazione di Sali (Barrocu et al., 1997).

Le informazioni acquisite durante gli studi idrogeologici della piana alluvionale di Capoterra sono state organizzate in un GIS con l'obiettivo di modellare i diversi scenari dell'intrusione salina (Barrocu et al., 2001).

Dell'area di Orosei non si hanno informazioni certe più recenti di quelle indicate nel successivo paragrafo. Lo studio della piana costiera deltizia del Cedrino, con particolare riguardo al complesso equilibrio idrodinamico dell'interfaccia fra le acque continentali superficiali e sotterranee di diversa salinità e il mare, ed al problema della gestione delle risorse idriche integrate, è l'argomento di una tesi di dottorato in Ingegneria del Territorio dell'Università di Cagliari, attualmente in svolgimento ed ancora non conclusa.

## 2.2 Individuazione aree di interesse per il fenomeno dell'intrusione salina

Sulla base della ricognizione bibliografica e da una serie di interviste a esperti del settore, oltre che dai database nazionali presenti (CNCP dei suoli CRA-CRAP, Rapporto Progetto RIADE), sono state evidenziate le aree di studio oggetto della raccolta dati ed informazioni sui fenomeni in atto di intrusione salina e rischio di salinizzazione dei suoli.

Le aree evidenziate sono riportate di seguito in tabella 1 e in figura 5.

**Tabella 1. Aree di interesse per la Regione Sardegna**

ID_area	Descrizione	REGIONE	Ettari
16	Palmas-S.Giovanni Suergius	SARDEGNA	16507,014
17	San Priamo	SARDEGNA	7142,635
18	Piana S.Lucia Campidano di Cagliari	SARDEGNA	26592,479
19	Piana Muravera-Villaputzu	SARDEGNA	1185,799
20	Marina di Tertenia-Quirra	SARDEGNA	11201,485
23	Piana Oristano - Marefoghe-Arborea	SARDEGNA	51268,460
25	Golfo e piana Orosei	SARDEGNA	3707,072
26	Posada	SARDEGNA	3743,832
28	Piana e rilievi Nurra	SARDEGNA	28801,326
30	Piana Porto Torres	SARDEGNA	9490,458
31	Piane F.Astinni	SARDEGNA	8527,536

Figura 5. Ubicazione delle aree oggetto del Rapporto sullo stato del fenomeni della salinizzazione



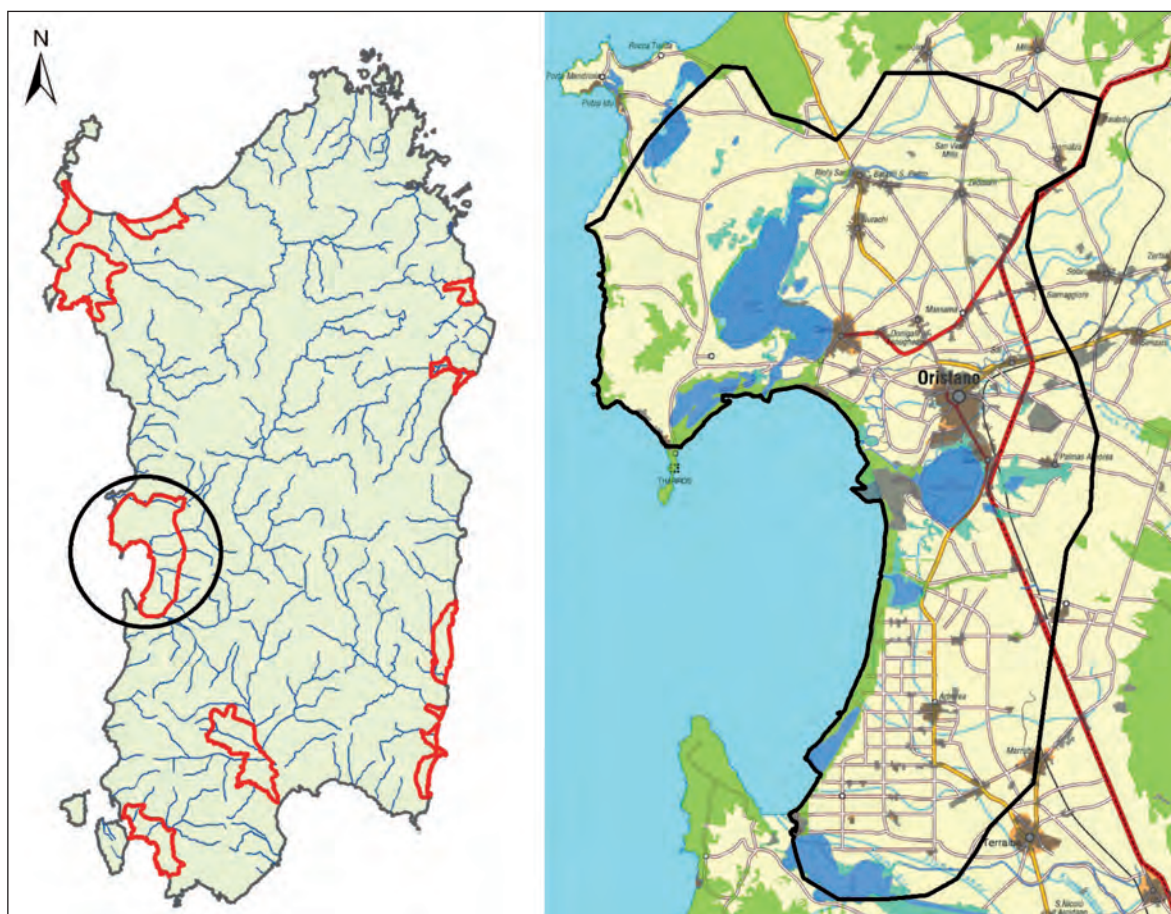
## 2.2.1 Area della piana di Oristano

### *Inquadramento e delimitazione delle aree interessate dal fenomeno*

La zona sulla quale si possiedono dati, della superficie di circa 470 km<sup>2</sup> (47.000 ha), è compresa tra le coordinate UTM 4.394.6549 N e 4.427.953 N di latitudine e 457.195 E e 474.852 E di longitudine, ovvero tra le coordinate Gauss Boaga 4.394.369 N e 4.427.773 N di latitudine e 1.457.142 E e 1.474.799 E di longitudine (Figura 6). Essa è pertanto riportata nei fogli 528, 529, 538, 539 della cartografia IGM 1:50.000 e nelle seguenti sezioni IGM 1:25.000: Foglio 528: sezioni I e II; Foglio 529: sezioni III e IV; Foglio 538: sezione I; Foglio 539: sezione VI.

Essa è inoltre rappresentata nelle seguenti sezioni della Carta Tecnica Regionale (CTR) all'1:10.000: Foglio 528: sezioni 30, 40, 70, 80, 100, 120, 150 e 160; Foglio 529: sezioni 10, 50, 90 e 130; Foglio 538: sezioni 30, 40, 70 e 80; Foglio 539: sezioni 10 e 50.

**Figura 6. Inquadramento dell'area "Piana di Oristano".**



### *Caratterizzazione del problema*

Nella Piana di Oristano, il consumo di acque sotterranee, emunte attraverso i numerosi pozzi e destinate prevalentemente ad usi agricoli, risulta eccessivo rispetto all'entità della ricarica degli acquiferi presenti (un acquifero superficiale e un acquifero multistrato profondo). Ciò ha prodotto nel tempo una serie di fenomeni legati al sovrasfruttamento,

che ha variato il regime di equilibrio tra acque dolci e salate. Si può affermare che l'acquifero superficiale risenta dell'intrusione marina solo nella fascia costiera, mentre nelle aree interne i picchi di salinità sono più verosimilmente attribuibili all'uso dei prodotti agricoli e alle interazioni con le falde sottostanti, in generale più contaminate. L'acquifero multistrato, soggetto a più intensi regimi di pompaggio, mostra invece segni evidenti di contaminazione salina per intrusione marina e upconing, ma non si esclude che l'esistenza di un certo grado di comunicazione, specie tra il primo ed il secondo acquifero, possa avere prodotto il passaggio di prodotti agricoli inquinanti dalla prima falda a quelle sottostanti, passaggio sempre più ridotto a mano a mano che si scende in profondità.

**Tabella 2. Stato e disponibilità dei dati raccolti.**

DATI	STATO	DISPONIBILITÀ	NOTE
Ubicazione pozzi	sufficiente	si	Il numero di pozzi facenti parte della rete di monitoraggio è insufficiente per la parte nord della piana, sufficiente per le altre aree.
Portata emunta dai pozzi	sufficiente	si	I dati di portata sono ricavabili dall'archivio del genio Civile, ma i pozzi ivi presenti sono inferiori a quelli realmente esistenti.
Livello piezometrico, conducibilità elettrica e ph misurati nei pozzi	buono	si	I tre parametri sono stati misurati per tutti i pozzi censiti, con qualche rara eccezione
Definizione dell'acquifero interessato da ogni pozzo	insufficiente	si	Le stratigrafie disponibili non permettono una definizione accurata
Utilizzo dei pozzi	insufficiente	si	L'utilizzo è agroozootecnico, ma non si sono distinti i pozzi utilizzati per l'agricoltura da quelli utilizzati per l'allevamento
Andamento temporale della piezometrica	buono	si	Si possiede una buona serie storica
Geometria degli acquiferi 2D	insufficiente	si	Per l'acquifero freatico, la geometria è ricavabile dalla geologia superficiale. Per gli acquiferi profondi, non si hanno dati sufficienti.
Geometria degli acquiferi 3D	insufficiente	si	La conoscenza della geometria degli acquiferi è più precisa nell'Area della Bonifica di Arborea. Mancano dati stratigrafici, che andrebbero integrati con l'esecuzione di sondaggi.
Qualità delle acque di falda: principali anioni e cationi	insufficiente	si	Nell'area della Bonifica di Arborea la conoscenza della qualità delle acque per il primo e secondo acquifero è buona. Bisognerebbe procedere ad una campagna di analisi chimiche.
Qualità delle acque di falda: determinazione inquinanti	insufficiente	si	Solo nell'area della Bonifica
Definizione delle aree contaminate da intrusione marina e posizione cuneo salino	sufficiente	si	Le aree interessate da contaminazione marina sono deducibili dall'analisi delle linee di isoconducibilità elettrica integrate dalle piezometriche e dalle analisi chimiche. Non si hanno dati sulla posizione del cuneo salino.
Produttività degli acquiferi = $R/A$ , dove R è la ricarica attiva (riserve regolatrici) e A è la superficie affiorante dell'acquifero (andamento nell'annata media)	insufficiente	no	Il dato è deducibile solo tramite ipotesi approssimative sui dati occorrenti

*Aspetti geologici, idrogeologici delle aree interessate dal fenomeno*

**Carta Geologica**

L'area in esame è compresa nei fogli 216-217 (Capo S. Marco – Oristano) della Carta Geologica d'Italia dell'IGM 1:100.000.

**Figura 7. Carta geologica dell'area in esame**



*Legenda: (s) - Sabbie attuali e recenti delle spiagge (s), passanti a dune litoranee; (a) - Alluvioni ciottoloso-sabbiose o argillose e depositi limo-argillosi palustri o salmastri, attuali e recenti; (qd) - Sabbie dunali più o meno cementate, in massima parte wurmiane, a resti di Cervidi; (qd1) - Depositi alluvionali ciottoloso-sabbiosi, in prevalenza ricoperti da resti di antiche dune probabilmente tirreniane; (q2) - Depositi alluvionali ciottolosi, con intercalazioni sabbiose bruno rossastre, a elementi di quarzo, granito e scisti paleozoici, terrazzati; (q1) - Depositi alluvionali ciottolosi dei terrazzi più alti, generalmente arrossati e spesso a incrostazioni calcaree e con intercalazioni argillose, a elementi di rocce paleozoiche.*

Secondo la Carta Geologica (figura 7), la serie delle formazioni affioranti è la seguente:

– OLOCENE:

- Sabbie attuali e recenti delle spiagge (s), passanti a dune litoranee; si trovano lungo la costa del Golfo di Oristano;
- Alluvioni ciottoloso-sabbiose o argillose e depositi limo-argillosi palustri o salmastri (a), attuali e recenti; occupano una zona molto vasta della Piana di Oristano e si trovano prevalentemente lungo il percorso del Tirso e dei corsi d'acqua principali e attorno agli stagni;

– PLEISTOCENE:

- Sabbie dunali più o meno cementate (qd), in massima parte wurmiane, a resti di Cervidi; si trovano attorno allo Stagno di Cabras, a Sud dello Stagno di Santa Giusta e nel territorio di Arborea;
- Depositi alluvionali ciottoloso – sabbiosi (qd1), in prevalenza ricoperti da resti di antiche
- Dune probabilmente tirreniane; si trovano in aree limitate nella zona di Santa Giusta e dalla zona a Sud-Est dello stagno si estendono fino alla zona di Terralba;

- Depositi alluvionali ciottolosi (q2), con intercalazioni sabbiose bruno – rossastre, a elementi di quarzo, granito e scisti paleozoici, terrazzati; occupano una fascia limitata compresa tra gli abitati di Zeddiani, Nurachi e Cabras;
- alluvionali ciottolosi (q1) dei terrazzi più alti, generalmente arrossati e spesso a incrostazioni calcaree e con intercalazioni argillose, a elementi di rocce paleozoiche nelle regioni del Tirso e di Santa Giusta; sono molto diffusi su tutta la piana e ne seguono il limite orientale.

I coefficienti di infiltrazione stimati per le varie formazioni sono di seguito riportati (Tabella 3).

**Tabella 3. Coefficienti di infiltrazione potenziale.**

Formazione	a	qd	s	qd <sup>1</sup>	q <sup>1</sup>	q <sup>2</sup>
Coefficiente	0,47	0,75	0,8	0,65	0,7	0,7

### Lineamenti geostrutturali e morfologici

Il settore occidentale del Campidano si affaccia ad ovest sul Mare di Sardegna con il Golfo di Oristano, esteso da nord a sud fra le propaggini meridionali a gradinata delle colate basaltiche del Montiferru e il promontorio di bancate basaltiche di Capo Frasca che si protendono dal complesso vulcanico del Monte Arcuentu, ed è dominato ad est dai versanti ripidi e scoscesi dell'imponente rilievo vulcanico del Monte Arci, allungato in direzione Nord-Sud. Il massiccio vulcanico del Monte Arci è essenzialmente costituito da bancate di colate e tufi riolitici e riodacitici contornate da tavolati basaltici, e quindi, tra l'Arborea e la Marmilla, dalle colline calcaree mioceniche, sulle quali si staglia l'altopiano basaltico della Giara di Gesturi.

Gli allineamenti tettonici che delimitano il Campidano occidentale sono dati a Sud-Est dalla soglia di Sardara (una frattura di origine tettonica, che dal piccolo horst di Monreale a Sud di Sardara giunge al massiccio dell'Iglesiente), ad Ovest da quella Sinis-Capo Frasca, e a Nord da una soglia che si svilupperebbe tra il Sinis e il Monte Ferru (si ipotizza l'esistenza di una soglia vulcanico-sedimentaria ad Is Arenas). Il bordo orientale del Campidano corrisponde ad una lunga scarpata di faglia, che ancora conserva molte delle forme originali.

Il passaggio tra il rilievo e la pianura è segnato da una fascia di detriti pedemontani estesa per 1,5 - 2 km, costituita da diversi conoidi giustapposti, la cui pendenza si attenua via via che si allargano all'unghia fino al limite dei tavolati basaltici che degradano sulla piana alluvionale. Oltre la piana basaltica di Uras, la pianura costituita dalle alluvioni delle tre idrografie succedutesi dal Pliocene ad oggi si estende fino allo Stagno di Santa Giusta con un paesaggio monotono, ma solo apparentemente uniforme, in quanto nel dettaglio mostra caratteri di rilevante complessità. L'area compresa tra la valle del Tirso, il litorale sabbioso di Arborea ed i contrafforti del Monte Arci è infatti essenzialmente costituita dalle formazioni delle "alluvioni antiche terrazzate" (AT) plio-pleistoceniche, prevalentemente ciottolose e cementate in una matrice sabbioso-argillosa ferrettizzata (q1), "alluvioni antiche terrazzate rimaneggiate" (ATR) pleistoceniche, derivate dal rimaneggiamento delle precedenti (q2), e dalle alluvioni recenti (AR) (qd1) e attuali (a) di varia granulometria, sciolte, del fiume Tirso e del Rio Mogoro. In prossimità della costa, soprattutto nella zona di Arborea e nell'area circostante lo stagno di Cabras, ai depositi alluvionali si sovrappongono le sabbie eoliche (s) e fossili del Quaternario antico (qd). Le spiagge Golfo di Oristano,



fra il promontorio calcareo tirreniano a Nord e lo stagno di Marceddi a Sud, si sviluppano complessivamente per oltre 26 km. Nel primo tratto, di circa 12 km, fra lo stagno di Mistras e il mare, affiorano localmente i basalti che costituiscono il substrato. La spiaggia prosegue poi dal canale di collegamento al mare dello Stagno di Cabras fino alla foce del Tirso. Gli arenili sono in gran parte costituiti dagli apporti sabbiosi del fiume Tirso, che in periodi di piena arrivava a portare 15.000-20.000 m<sup>3</sup> di sedimenti. Infatti, le sabbie sono composte da un'alta percentuale di quarzo e silicati prodotti dall'erosione dei terreni granitici del bacino del fiume. Più a Sud, le sabbie delle spiagge di Marceddi e Capo Frasca, separate dalla breve scogliera del promontorio, sono invece di colore scuro per l'elevato tenore di sedimenti vulcanici erosi dai bacini del Rio Mogoro e del Flumini Mannu di Pabillonis.

### **Lineamenti idrogeologici**

L'idrografia del Campidano occidentale (figura 8) è caratterizzata a Nord dal Rio Mannu di Santu Lussurgiu, più a Sud dal Tirso e quindi dal Rio di Mogoro e dal Flumini Mannu di Pabillonis. Il Rio Mannu di Santu Lussurgiu, che prende origine nel Monte Ferru, sviluppa un bacino di 232 km<sup>2</sup>, larga parte del quale nella pianura del Campidano Occidentale, dove sfocia nello Stagno di Cabras. Il suo spartiacque sale dal Campidano all'altopiano di Abbasanta fino alla cima del monte Sant'Antonio (808 m), ma il bacino comprende all'interno il complesso montuoso vulcanico del Monte Ferru con la quota del Monte Urtigu, di 1050 m.

Il Tirso, il fiume più importante della Sardegna, con un bacino idrografico di 3.376 km<sup>2</sup>, ha le sorgenti ad Est di Buddusò ad una altitudine di 800 m s.l.m. e sfocia nel Golfo di Oristano dopo un corso che segue prevalentemente la direzione Nord-Est/Sud-Ovest, con uno sviluppo di asta fluviale di 150 km. A monte, fino al lago Omodeo, scorre tortuoso e con forte pendenza, ma successivamente il suo andamento diviene più regolare fino ad inoltrarsi nella pianura di Oristano con una leggerissima pendenza.

L'area, che a Sud si estende per una superficie di 730 km<sup>2</sup>, tra i bacini del Tirso e del Flumini Mannu di Pabillonis è drenata da alcuni corsi d'acqua minori che sboccano tutti nel Golfo di Oristano. Fra essi il Rio Mogoro, a partire dalla confluenza del Rio Mannu con il Rio Flumineddu dalla quale si origina, si dirige verso la pianura del Campidano con direzione Sud-Est/Nord-Ovest, con percorso profondamente modificato negli ultimi chilometri. Nei pressi di Uras esso è stato infatti canalizzato e deviato verso lo stagno di San Giovanni, mentre un tempo, prima che fosse realizzata la sistemazione idraulica dell'area di Arborea, si gettava nell'ormai bonificato stagno di Sassu insieme a ruscelli provenienti dal versante occidentale del Monte Arci, che attualmente vengono drenati da canali. La superficie dell'intero bacino risulta di 398,8 km<sup>2</sup>.

L'area sud-occidentale è compresa nel bacino del Flumini Mannu di Pabillonis che nel Campidano centrale drena un'area di circa 582 km<sup>2</sup>. L'andamento del suo corso, che nasce nel complesso granitico a Sud di Arbus, è nella parte iniziale alquanto tortuoso, con direzione generale Sud-Ovest/Nord-Est. Entrato quindi nella pianura, dove riceve le acque del suo maggiore affluente, il Flumini Malu (o Flumini Belu), vira poi verso Nord-Ovest per sfociare infine nello stagno costiero di San Giovanni, prospiciente il Golfo di Oristano. Il corso d'acqua drena quindi anche una parte dell'Arburese, ed il suo spartiacque raggiunge la quota più elevata sul Monte Linas (1236 m). Le vaste zone depresse che contornavano gli stagni, in passato occupate da distese palustri, oggi appaiono quasi totalmente bonificate.

Figura 8. Idrografia dell'area



Le caratteristiche idrogeologiche dell'area costiera lungo il Golfo di Oristano sono determinate dai delicati equilibri di interfaccia fra il mare, i deflussi fluviali del Tirso, le acque sotterranee e gli stagni di Cabras, Mistras, Santa Giusta, s'Ena Arrubia e San Giovanni.

Gli orizzonti acquiferi sono principalmente costituiti dai termini più grossolani (sabbie, ghiaie e ciottoli) delle alluvioni sciolte attuali e recenti, intercalati dagli aquitardi dei livelli argillosi e limo-argillosi, di permeabilità molto bassa o pressoché nulla. Essi costituiscono un acquifero superficiale freatico e un sottostante sistema acquifero imprigionato, separati da un orizzonte argilloso impermeabile continuo della potenza di qualche metro.

L'acquifero freatico è stato fin dall'antichità sfruttato con pozzi e trinceroni scavati. L'acquifero era molto produttivo, ma col tempo le sue risorse, e localmente anche le riserve, si sono degradate per l'eccessivo emungimento che ha prodotto inquinamenti e contaminazione salina. In origine, il sottostante acquifero imprigionato, con vari livelli produttivi distinti da intercalazioni continue e lentiformi, aveva localmente, nelle depressioni, vario grado di artesianesimo, ma questo è pressoché scomparso per l'abbassamento della superficie piezometrica dovuto alle eccessive eduzioni dai pozzi trivellati profondi.

*Le dinamiche e gli effetti dell'azione intrusiva sulle caratteristiche idrauliche degli acquiferi interessati dall'intrusione del cuneo salino*

Le linee piezometriche, che risultano di semplice interpretazione, indicano, sia per l'acquifero superficiale sia per l'acquifero multistrato profondo, una direzione principale di flusso dall'interno verso la costa, con locali inversioni dovute principalmente alla presenza di pozzi in fase di pompaggio, caratterizzati dalle tipiche linee chiuse a valori decrescenti verso il pozzo. I gradienti idraulici diminuiscono dall'interno verso la costa, fatto che facilita il verificarsi dell'intrusione marina. Inoltre, i valori massimi delle piezometriche dell'acquifero superficiale sono meno elevati rispetto a quelli dell'acquifero profondo, ma le piezometriche si mantengono generalmente superiori al livello medio del mare, mentre nell'acquifero profondo si raggiungono punte di -9 m. Si ritiene che ciò sia dovuto al fatto che l'acquifero superficiale è nettamente meno produttivo del multistrato che è quindi interessato da un maggior numero di prelievi.

Per quanto riguarda la conducibilità elettrica, si nota come in tutta la piana ci si trovi ben al di sopra dei 400 mS/cm stabiliti dalla Normativa Italiana per le acque sotterranee di classe 1, e dei 1000 mS/cm consigliati per le acque da potabilizzare, ma in vaste aree vengono superati i 2500 mS/cm.

La configurazione delle linee di isoconducibilità nei due acquiferi è piuttosto irregolare, ma in generale si può affermare che i valori più elevati si riscontrano lungo le coste, con picchi in prossimità degli stagni. E' interessante notare anche alcune anomalie interne registrate all'altezza dello Stagno di S. Giusta e lungo una fascia pseudo-perpendicolare alla costa situata in corrispondenza della Peschiera Corru de s'Ittiri. Talvolta, si nota inoltre una buona corrispondenza tra le zone a maggiore conducibilità e quelle a piezometrica più bassa e tra le zone a maggiore conducibilità nei due acquiferi. I valori nell'acquifero superficiale risultano mediamente minori rispetto a quelli registrati per l'acquifero profondo, ma l'estensione dell'area interessata da conducibilità superiori a 2000 mS/cm è maggiore per il primo acquifero.

Le osservazioni esposte, unite alle analisi chimiche, hanno condotto all'ipotesi di un processo di salinazione degli acquiferi in atto, attribuibile all'ingressione marina lungo le coste e ad altri fenomeni (quali upconing, dissoluzione di sali presenti nelle formazioni acquifere non ancora liscivate...) nelle zone più interne.

Si ritiene che in futuro la situazione sia destinata a peggiorare.

Non si hanno a disposizione dati circa le variazioni delle caratteristiche proprie (temperatura, salinità, ossigeno disciolto, permeabilità) nella porzione di acquifero interessata dalla zona di transizione

*Altri meccanismi di salinizzazione delle falde (presenza di salinità "naturale" indotta da uso di pozzi in acquiferi profondi salini o parzialmente salini)*

Altri fenomeni di salinizzazione delle falde presenti si possono così sinteticamente riassumere:

- L'intrusione salina è limitata alla fascia costiera;
- Probabili fenomeni di upconing riscontrati nelle zone più interne, specie nell'area della Bonifica di Arborea;
- Fenomeni di lisciviazione di formazioni saline in prossimità delle aree bonificate;
- Salinità delle acque, specie superficiali, dovuta anche all'impiego di fertilizzanti agricoli;

- Molti pozzi nella piana sono cortocircuitati, di conseguenza le acque dell'acquifero profondo a più alta salinità si mescolano a quelle dell'acquifero superficiale, con innalzamento della conducibilità elettrica di quest'ultimo.

#### *Emungimento per uso irriguo*

Per quanto riguarda la determinazione dello spessore di acquifero impegnato nell'emungimento, dai dati in nostro possesso, risulta che la profondità massima dei pozzi è pari a 200 m, ma la maggior parte non superano gli 80 m.

Le risorse idriche, utilizzate a scopi irrigui sono provenienti da due fonti:

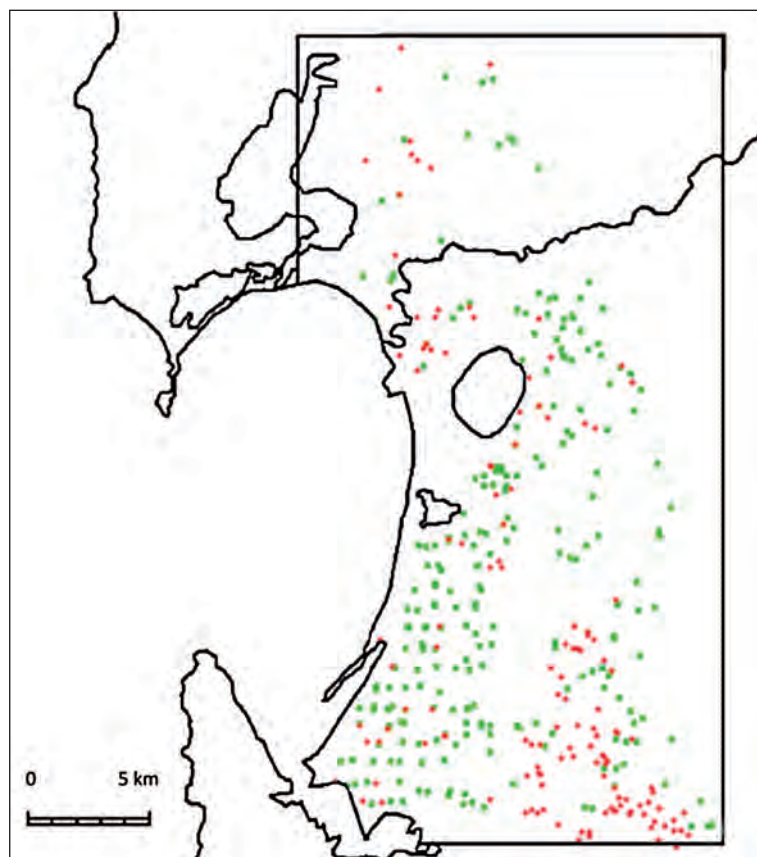
- Acque sotterranee, emunte specie dall'acquifero multistrato profondo;
- Acque fornite dal Consorzio di Bonifica dell'Oristanese e provenienti dalla diga sul Tirso, esterna all'area in studio.

Esiste un censimento dei pozzi effettuato nell'anno 2003 (tabella 4), ma non una rete di monitoraggio. L'ubicazione degli stessi è indicata in figura 9.

**Tabella 4. Censimento dei pozzi per l'anno 2003.**

Anno censimento	Acquifero	Area (km <sup>2</sup> )	N. pozzi
2003	Superficiale	470	138
2003	Profondo	470	246

**Figura 9. Mappatura dei pozzi censiti (insistenti su acquifero superficiale in rosso, su profondo in verde)**



Si stima che il numero totale di pozzi, considerando anche quelli non denunciati, si aggiri sui 2000-2500.

#### *Aree di maggior rischio dal punto di vista dell'intrusione marina*

Sulla base dell'assetto geologico, idrologico, idrogeologico e dell'utilizzo delle acque superficiali e sotterranee per usi irrigui sopramenzionati, si possono individuare le seguenti aree più a rischio per intrusione marina:

- Aree limitrofe degli stagni (intrusione acque ad alta salinità);
- Area della Bonifica di Arborea (area a più alta produttività agrozootecnica; problemi di intrusione marina, upconing, cortocircuitazione dei pozzi);
- Fascia costiera per una larghezza variabile fino a 3,5 km (intrusione marina).

#### *Riepilogo e dati disponibili*

Si riportano in sintesi i dati disponibili recuperati ai fini di possibili ulteriori valutazioni:

- Tipo di acquifero: un acquifero superficiale freatico + un acquifero multistrato profondo confinato.
- Conducibilità idraulica acquifero: questo dato è disponibile solo per la zona di Arborea limitatamente al primo e al secondo acquifero. La permeabilità ricavata da prove di pompaggio eseguite su 5 pozzi per l'acquifero superficiale è compresa tra  $7,96 \times 10^{-7}$  e  $3,19 \times 10^{-5}$  m/s. La permeabilità desunta da prove di pompaggio eseguite su 2 pozzi per il secondo acquifero ha fornito i valori  $9,58 \times 10^{-6}$  e  $1,39 \times 10^{-5}$  m/s (Barrocu and Soddu, 2006);
- Altezza del livello di falda rispetto al livello del mare: ricavabile dalle quote dei livelli statico e dinamico presenti nel data base pozzi;
- Spessore dell'acquifero: mediamente, l'acquifero superficiale è spesso 10 m, mentre non si hanno dati certi sull'acquifero multistrato. Maggiore precisione si è raggiunta nell'area della Bonifica.
- Definizione dei limiti dell'acquifero: non completa. Per l'acquifero superficiale è deducibile dalla carta geologica.
- Portate emunte globalmente in media annua (m<sup>3</sup>): i prelievi avvengono prevalentemente dall'acquifero profondo. Facendo la media dei consumi annui per i pozzi compresi nella base dati fornita dal Genio Civile (32.348 m<sup>3</sup>/pozzo), si è stimato che l'ammontare dei prelievi annui si attesta dai 65 agli 81 milioni di metri cubi, considerando il numero totale di pozzi nella piana pari a 2000 e 2500 rispettivamente;
- Pozzi assegnati ad ogni acquifero: si veda la tabella al paragrafo 5 e i dati allegati. È possibile solo distinguere tra acquifero superficiale e acquifero multistrato, ma non tra i vari livelli del multistrato. Nell'area della Bonifica, è stato possibile effettuare un'ulteriore suddivisione, rivisitando i dati precedentemente raccolti risalendo ai pozzi assegnati al primo e al secondo acquifero.

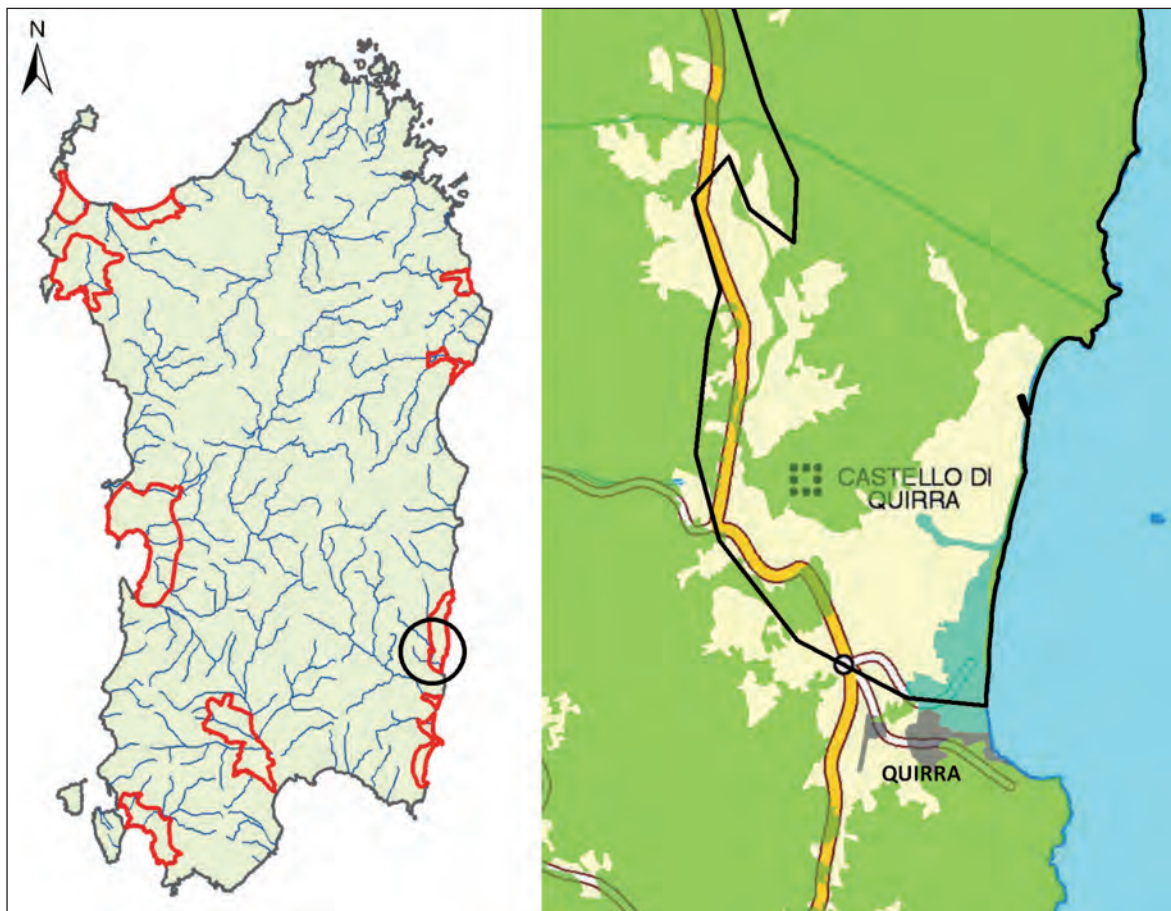
Tutti i dati sono disponibili su file in formato digitale.

## 2.2.2 Area della piana di Quirra

### *Delimitazione delle aree interessate dal fenomeno*

L'area di studio, localizzata a nord dell'abitato di Villaputzu, nella costa sud-orientale della Sardegna, è una piana alluvionale di circa 8 km<sup>2</sup>, costituita da due principali zone: l'area di Santa Barbara, situata a sud della confluenza dei fiumi Corr'e Cerbos e Quirra e delimitata a sud dalla S.S. 125, e l'area di Pranu Gialea, parte costiera della piana delimitata a nord e a sud rispettivamente dai fiumi Quirra e Flumini Pisale (figura 10).

**Figura 10. Inquadramento dell'area**



La piana rappresenta una importante risorsa per la popolazione locale per via della presenza di suoli a forte vocazione agricola. I depositi paludosi costieri che formano la zona retrostante della spiaggia di Murtas, sono stati parzialmente interessati da interventi di bonifica negli ultimi 30 anni (A. Pilia, 2005). Ciò nonostante, la parte della piana prossima al mare è incolta a causa della salinizzazione dei suoli e delle acque dovuta all'intrusione di acqua marina e all'accumulo dei sali nel terreno. L'acqua per le attività agricole e zootecniche, sviluppate nella parte interna della piana, è fornita da numerosi pozzi scavati. Le aree coltivate sono suddivise in piccoli appezzamenti di terreno, ben irrigate con sistemi a goccia, e sono in genere coltivate ad aranceti, colture ortive e foraggere.

I suoli e le acque superficiali e sotterranee sono caratterizzate da alti tenori in metalli pesanti, in particolare Arsenico, dovuti sia alla naturale presenza di metalli nelle formazioni geologiche costituenti il bacino del rio Baccu Locci, sia a causa della presenza,

lungo le sponde del fiume, ad una distanza di circa 6 km dalla piana, dell'impianto minerario omonimo, inizialmente destinato all'estrazione e al pretrattamento dell'arsenopirite e della galena e oggi in disuso. I tailings rimanenti dall'impianto di flottazione sono stati per decenni presi in carico dalle acque dal rio Baccu Locci che li ha trasportati a valle e distribuiti, durante gli eventi alluvionali, nella piana sottostante dove si sono mescolati ai sedimenti alluvionali (C. Dadea et al., 2005).

Attualmente l'uso delle acque del fiume, il pascolo e la mobilitazione e il trasporto di suolo sono proibiti lungo il corso d'acqua, per prevenire qualsiasi possibile rischio per la salute umana e degli animali. Un intervento di bonifica della zona mineraria, finanziato dalla regione Sardegna, è attualmente in corso di svolgimento.

### *Caratterizzazione del problema*

La piana alluvionale dei fiumi Quirra e Pisale ospita un principale sistema acquifero multistrato costituito da depositi palustri dell'Olocene (limi e argille ricche di materiale organico) per uno spessore di 50-70 m in prossimità della costa, e da depositi fluviali non omogenei dell'Olocene (argille in superficie e sabbie e ghiaie più o meno cementate in profondità, a volte con matrice limosa) con un probabile spessore di 35-40 m, nella parte interna della piana, sovrastanti il basamento metamorfico. Le acque sotterranee contenute nel sistema acquifero risultano fortemente saline per circa 1 km dalla linea di costa, il contenuto salino diminuisce spostandosi verso l'interno della piana, ma a circa 1,5 km dalla linea di costa è ancora possibile trovare acque di scarsa qualità con un forte contenuto salino, specialmente negli strati più profondi in prossimità del Flumini Pisale. Tutti i campioni di acqua sotterranea raccolti nella piana tra il 2003 e il 2006 (M. Sodde, 2007) hanno infatti mostrato valori di conducibilità elettrica e dei cloruri superiori ai limiti di legge per le acque potabili (i valori limite sono rispettivamente 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 25  $\text{mg}/\text{l}$ ), e in molti casi superiori anche ai valori limite per gli usi agricoli (California State Water Quality Control Board, 1963).

**Tabella 5. Stato e disponibilità dei dati raccolti**

DATI	STATO	DISPONIBILITÀ	NOTE
Ubicazione pozzi	sufficiente	si	La localizzazione dei pozzi costituenti la rete di monitoraggio condizionata dalla distribuzione dei pozzi utilizzati a scopo irriguo, alcune zone rimangono pertanto scoperte mentre in altre l'accesso ai pozzi è difficoltoso.
Portata emunta dai pozzi	insufficiente	no	I dati di portata non sono disponibili e andrebbero reperiti all'archivio del Genio Civile, nonostante i pozzi denunciati sono sicuramente in numero inferiore rispetto a quelli realmente esistenti.
Livello piezometrico, conducibilità elettrica, pH ed Eh misurati nei pozzi	buono	si	I tre parametri sono stati generalmente misurati per tutti i pozzi censiti. Le misure del livello idrico nei corsi d'acqua sono insufficienti.
Definizione dell'acquifero interessato da ogni pozzo	insufficiente	si	Si conosce la profondità dei pozzi ma le stratigrafie a disposizione non permettono una definizione accurata della geometria dell'acquifero.

> segue >>

> segue >>

DATI	STATO	DISPONIBILITÀ	NOTE
Utilizzo dei pozzi	insufficiente	si	L'utilizzo è generalmente agricolo e saltuariamente zootecnico, ma non si hanno informazioni certe.
Andamento temporale della piezometrica	sufficiente	si	I dati del 2004 e quelli del 2005-2006 si riferiscono a reti di monitoraggio differenti
Geometria degli acquiferi 2D	insufficiente	si	Si ipotizza che i limiti dell'acquifero corrispondano ai limiti delle formazioni alluvionali Oloceniche, ma non si hanno dati certi a riguardo.
Geometria degli acquiferi 3D	insufficiente	si	I dati stratigrafici disponibili non permettono una definizione accurata e andrebbero integrati con nuovi sondaggi e indagini geofisiche.
Qualità delle acque di falda: principali anioni e cationi	sufficiente	si	Bisognerebbe integrare i punti di campionamento ed effettuare un monitoraggio continuo nel tempo.
Qualità delle acque di falda: determinazione inquinanti	sufficiente	si	I dati a disposizione riguardano i metalli pesanti. Bisognerebbe integrare i punti di campionamento ed effettuare un monitoraggio continuo nel tempo.
Definizione delle aree contaminate da intrusione marina e posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata	sufficiente	si	Le aree interessate da contaminazione marina sono deducibili dall'analisi delle linee di isoconduttività elettrica e isocloro integrate dalle piezometriche e dalle analisi chimiche. Tali dati sono stati integrati con dei profili elettrici verticali, che hanno dato risultati insufficienti e poco attendibili e che andrebbero pertanto integrati con nuove indagini.
Produttività degli acquiferi = R/A, dove R è la ricarica attiva (riserve regolatrici) e A è la superficie affiorante dell'acquifero (andamento nell'annata media)	insufficiente	no	Il dato è deducibile solo tramite ipotesi approssimative sui dati occorrenti

### *Aspetti geologici, idrogeologici delle aree interessate dal fenomeno*

#### **Carta Geologica**

L'area in esame è compresa all'interno del Foglio 549, Sezione 1 – Castello di Quirra, della Carta Geologica della Regione Autonoma della Sardegna alla scala, alla scala 1:25.000 (Carmignani e altri, 2001). Le diverse unità geologiche presenti nell'area in esame (figura 11) sono le seguenti:

#### DEPOSITI QUATERNARI DELL'AREA EMERSA

- b** Depositi di alluvioni recenti (Olocene)
- a** Depositi colluviali e di versante (Olocene)
- bn<sub>2</sub>** Alluvioni terrazzate del II ordine (Olocene)
- bn<sub>1</sub>** Alluvioni terrazzate del I ordine e conoidi reincise (Pleistocene)



SERIE SEDIMENTARIA DELL'ERA TERZIARIA

**FMC** Formazione di Monte Cadriga (Eocene Inferiore)

BASAMENTO METAMORFICO ERCINICO

Unità Tettonica di Meana Sardo

**MSV** Formazione del Monte Santa Vittoria (Ordoviciano Medio)

Unità Tettonica del Gerrei

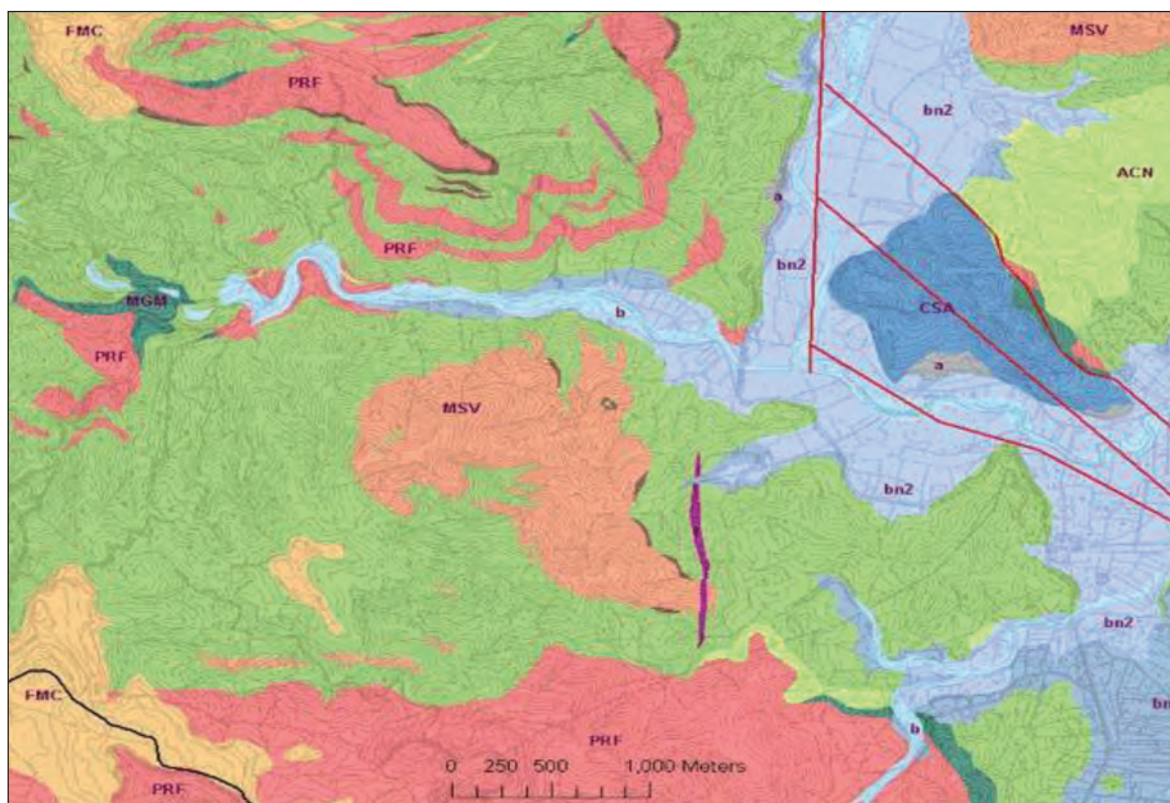
**MGM** Metarosse di Genna Mesa (Ordoviciano Superiore)

Unità Tettonica del Riu Gruppa

**CSA** Complesso di Sa Lilla (Siluriano – Carbonifero Inferiore)

La litologia del bacino idrologico del Fiume Quirra consiste in un basamento Paleozoico costituito da meta-arenarie, piegate dall'orogenesi Ercinica, e granitoidi associati con facies filoniane, talvolta mineralizzate. I sedimenti di copertura sono composti da conglomerati dell'Ordoviciano medio, dolomiti del Permo-Triassico e Giurassico, e da sedimenti arenaceo-calcarei eocenici. Al di sopra del basamento metamorfico, sono presenti formazioni dell'era Quaternaria, consistenti in due differenti depositi alluvionali terrazzati, rispettivamente le alluvioni terrazzate antiche del Plio-Pleistocene e le alluvioni terrazzate antiche rimaneggiare del Pleistocene. Il letto del fiume consiste invece in alluvioni oloceniche e tailings. Non sono presenti informazioni riguardo ai coefficienti di infiltrazione potenziale delle diverse formazioni.

**Figura 11. Carta geologica dell'area in esame.**



### **Lineamenti idrogeologici**

Una grande parte dell'area in studio è costituita da sedimenti del Quaternario, con spessori significativi specialmente lungo i corsi d'acqua principali. I principali depositi consistono in conglomerati olocenici e sabbie fluviali, nella parte interna della piana, e in depositi palustri (composti da limi, ricchi di depositi organici, e argille, che lasciano il passo lateralmente a sabbie eoliche e litorali) nella zona costiera. Lungo le sponde del fiume, i sedimenti sono costituiti da sabbie e ghiaie alluvionali recenti, soggette a costanti modifiche a causa dei processi di erosione fluviale. Depositi alluvionali terrazzati del Plio-Pleistocene, composti da conglomerati ben cementati e ossidati, affiorano a sud del Flumini Pisale e parzialmente a nord del Flumini Durci, formando una copertura di circa 12 m di spessore sovrastante il basamento metamorfico.

Entrambe le alluvioni attuali e recenti sembrano costituire dei buoni acquiferi, presentando una permeabilità medio-alta. La permeabilità delle alluvioni terrazzate antiche sembra invece essere molto bassa, con locali variazioni, e presentare quindi un insignificante flusso delle acque sotterranee al loro interno. Entrambe le formazioni sono caratterizzate dalla presenza di una significativa frazione argillosa.

### **Lineamenti geostrutturali e morfologici**

Le alluvioni terrazzate dell'Olocene e del Pleistocene ricoprono il basamento metamorfico che forma i rilievi ai lati della piana. I principali affioramenti si trovano a sud-ovest della piana e consistono nelle arenarie di San Vito del Cambriano-Ordoviciano, che costituiscono parte dell'unità tettonica di Meana Sardo. A sud, una faglia diretta est-ovest separa questa unità dall'unità tettonica del Gerrei, che comprende i porfiroidi dell'Ordoviciano Medio. Il lato NE della piana è segnato da leucograniti del complesso intrusivo Tardo Paleozoico (Carbonifero Superiore - Permiano). Un sistema di faglie dirette NO-SE separa questo complesso dall'unità tettonica del Gerrei, rappresentata dagli argillo-scisti del Rio Canoni e le arenarie di S.Vito, e dall'unità tettonica del Riu Gruppa, comprendente i marmi e i calco-scisti di Sa Lilla parzialmente fratturati.

Le caratteristiche tettoniche principali sono rappresentate dalle strutture erciniche, dirette E-O e NO-SE, e da quelle alpine, dirette N-S. Esse influenzano fortemente l'andamento della rete idrografica, condizionata anche dalle catture fluviali, specialmente nel bacino del Rio Quirra. Nell'area in studio, diverse nuove fasi tettoniche sono state riconosciute attraverso un significativo ringiovanimento dei rilievi, probabilmente avvenuto in un periodo successivo. Essa costituisce una tettonica distensiva caratterizzata da assi NO-SE generalmente sovrapposte alle strutture precedenti. Il complicato sistema di faglie, che caratterizza tutte le unità tettoniche, interessa parzialmente anche il basamento tettonico paleozoico, che rappresenta il substrato dei sedimenti alluvionali, influenzando così probabilmente la posizione e lo spessore delle formazioni alluvionali.

*Aree interessate da intrusione marina laterale e dal basso e dinamiche attuali e future*

### **Distribuzione dei carichi idraulici delle acque sotterranee**

La principale direzione di flusso è NO-SE. Il carico idraulico delle acque dolci sotterranee interseca il livello del mare a circa 1300 m a monte della linea di costa, segno

dell'estensione dell'intrusione di acqua di mare nell'area. Questa distanza cresce nella parte meridionale della piana, dove la salinità delle acque sotterranee è evidentemente influenzata anche dall'ingressione e dalla risalita dell'acqua di mare lungo la foce del Flumini Pisale a seguito delle fluttuazioni eustatiche. L'emungimento delle acque sotterranee per gli usi irrigui influenza fortemente l'andamento del livello dell'acqua sotterranea nella parte centrale della piana, dove la tavola d'acqua risulta depressa in diverse zone. Questo è particolarmente evidente nella stagione estiva, durante la quale l'andamento della piezometrica mostra la presenza di tre principali aree di emungimento: due di queste sono localizzate rispettivamente nella parte nord-est e sud-est dell'area Pranu Gialea, dove numerosi pozzi scavati vengono utilizzati per irrigare gli aranceti; la terza è situata nella parte sud-orientale dell'area di Santa Barbara, dove le acque sotterranee vengono utilizzate per irrigare delle colture orticole.

Le zone dove invece si riscontra un innalzamento della tavola d'acqua, sembrano indicare una ricarica laterale proveniente dalle fratture del basamento metamorfico. In particolare, nella parte centro-settentrionale della piana, l'afflusso laterale sembra provenire dalle formazioni del complesso de Sa Lilla, fortemente fratturate, e nella parte sud-occidentale della piana (area di Santa Barbara), dalle arenarie di San Vito. Nel periodo in cui il livello della falda è massimo, si osserva un andamento delle linee piezometriche più regolare, specialmente nell'area di Santa Barbara, probabilmente dovuta ad una diminuzione degli emungimenti nel periodo invernale. La zona di massimo emungimento è localizzata nella parte centro-settentrionale della piana, vicino al fiume Quirra. Il livello delle acque sotterranee, maggiore in inverno che in estate, in ogni caso limita gli effetti dell'intrusione salina ad una distanza massima di circa 1 km dalla battigia in entrambi i periodi.

Le relazioni tra le acque sotterranee e quelle superficiali dei due principali corsi d'acqua non sono invece state ancora chiarite, anche se, dai pochi dati disponibili sul livello delle acque nei fiumi, relative a Marzo e Ottobre 2004 (A. Pilia, 2005), si suppone che in inverno sia l'acquifero a ricaricare il Flumini Pisale e che vi sia un'alimentazione della falda da parte del fiume Quirra.

Confrontando i dati dei carichi idraulici della falda misurati nel 2006 con quelli misurati nel 2004 si è notato che, nel 2004, durante il periodo di massima ricarica della falda (Marzo), non solo nella parte centrale della piana, occupata dagli aranceti, ma anche nella parte meridionale prossima al Flumini Pisale, dove sono presenti allevamenti ovini e bovini, l'andamento della tavola d'acqua presentava delle anomalie dovute ai forti emungimenti. Non si evidenziano invece grandi differenze tra i due anni idrologici per il periodo in cui, a causa dei limitati afflussi del periodo estivo e di massimo emungimento a scopo irriguo, il livello della falda è minimo (Ottobre). Inoltre, confrontando la posizione delle linee isopiezometriche aventi lo stesso valore, è stato riscontrato che il livello delle acque sotterranee misurato nel 2005-2006 è generalmente più alto di quello misurato nel 2004. Ciò nonostante, la isolina relativa al carico idraulico nullo risultava più vicina alla linea di costa nel 2004 che nel 2005-2006, mostrando chiaramente una probabile progressione del processo di intrusione marina negli ultimi anni.

L'evidente decremento delle precipitazioni degli ultimi anni, ha certamente favorito i processi di intrusione marina nella piana, ma la crescita incontrollata degli emungimenti dai pozzi privati sembra aver contribuito fortemente al progredire del processo di salinizzazione delle falde. La conoscenza delle attuali dinamiche del sistema acquifero rispetto a questi fattori è evidentemente fondamentale per stabilire procedure e regole per una gestione integrata delle risorse idriche nella piana.

Altre indagini e, soprattutto, dati sulla estensione, la distribuzione temporale e la portata degli emungimenti, sono necessari per capire le dinamiche del flusso delle acque sotterranee rispetto all'intrusione marina.

### Variabilità spaziale di Cloro e Conducibilità Elettrica

Nella piana, i monitoraggi delle acque sotterranee effettuati, hanno mostrato concentrazioni di Cl e valori della Conducibilità Elettrica superiori ai limiti normativi per le acque potabili, su quasi tutti i campioni prelevati, e valori superiori ai limiti per gli usi agricoli stabili dalla California State Water Quality Control Board, in molti campioni, in genere prelevati nella parte costiera della piana e nella parte centrale, dove le acque sotterranee sono utilizzate per irrigare i campi, generalmente coltivati ad aranceti. Facendo riferimento ai dati relativi al 2004, in Marzo, quando il carico idraulico delle falde è massimo, la concentrazione di Cl varia da 38,90 mg/l (1,10 meq/l) a 15.883,00 mg/l (448,00 meq/l). Le acque sotterranee con un contenuto di Cl maggiore di 250 mg/l (a cui corrisponde un TDS maggiore di 1 g/l) si trovano nella parte della piana prossima alla costa, per una distanza di circa 1500 m dalla battigia. La distanza del fronte di intrusione è risultata maggiore nella parte settentrionale della piana, vicina al fiume Quirra, e nella parte meridionale, prossima al Flumini Pisale.

Valori della Conducibilità Elettrica variabili da 422  $\mu\text{S/cm}$  a 29.000  $\mu\text{S/cm}$  sono stati misurati nelle acque sotterranee della piana in Marzo. La variazione spaziale di questo parametro ricalca quella del cloro: tra i due parametri esiste una relazione lineare e il limite di 250 mg/l di Cl corrisponde ad una Conducibilità Elettrica di circa 1500  $\mu\text{S/cm}$ .

I dati di Ottobre mostrano un differente andamento della salinizzazione. Le concentrazioni di Cl misurate presentano un valore medio di 524 mg/l, inferiore a quello di Marzo (782 mg/l): esse variano da 53,72 mg/l (1,51 meq/l) a 4045,00 mg/l (114,09 meq/l). Concentrazioni di Cl superiori a 250 mg/l sono state misurate per una distanza di 1500 m a monte della linea di costa, nella parte centrale della piana. La distanza cresce nella parte meridionale, lungo il corso del Flumini Pisale, dove raggiunge circa i 2000 m, e nella parte settentrionale, probabilmente a causa dell'influenza del pompaggio delle acque sotterranee.

La Conducibilità Elettrica, in Ottobre, ha presentato lo stesso andamento spaziale del Cl, con valori variabili da 428  $\mu\text{S/cm}$  a 7990  $\mu\text{S/cm}$ . Il valore medio misurato in Ottobre, pari a 1900  $\mu\text{S/cm}$ , è risultato inferiore di quello misurato a Marzo.

Marzo ed Ottobre sono rispettivamente i periodi di massimo e minimo livello di falda: tuttavia, il confronto tra concentrazioni di Cl e valori di EC tra i due mesi mostra che la risalita del gradiente idraulico (Marzo) è accompagnata da una crescita del grado di salinizzazione in falda. Questo fatto si può spiegare da un contributo di ricarica di falda ricco in cloruri.

Non si hanno a disposizione dati sulla variazione delle caratteristiche proprie (temperatura, salinità, ossigeno disciolto, permeabilità) nella porzione di acquifero interessata dalla zona di transizione.

*Altri meccanismi di salinizzazione delle falde in presenza di salinità "naturale" indotta da uso di pozzi in acquiferi profondi salini o parzialmente salini*

Nell'area in studio, la principale causa di salinizzazione delle falde è imputabile all'intrusione di acqua marina, che presenta variazioni cicliche legate, sia alle variazioni stagio-

nali del carico idraulico delle falde, per via del regime pluviometrico e degli emungimenti per uso agricolo e zootecnico, sia alle naturali fluttuazioni eustatiche.

L'analisi della variazione spaziale di Cl e conducibilità elettrica, accompagnata agli studi idrogeochimici, hanno portato ad ipotizzare la presenza di altri processi che contribuiscono alla salinizzazione delle acque sotterranee nella piana, soprattutto nel periodo invernale: la lisciviazione del sale depositato nei suoli, per evaporazione durante la stagione estiva o attraverso lo spray marino, e la presenza di cloruri aerotrasportati, che producono un arricchimento delle acque meteoriche in Cl; la dissoluzione, durante il periodo di massimo flusso delle acque sotterranee, di evaporiti e salamoie probabilmente presenti nel sistema acquifero.

### *Emungimento per uso irriguo*

#### **Determinazione dello spessore di acquifero impegnato nell'emungimento**

Il sistema acquifero da cui vengono emunte le acque sotterranee, per gli usi irriguo e zootecnico, sembra essere un acquifero multistrato, delimitato a letto dal basamento metamorfico e costituito da depositi palustri dell'Olocene (limi e argille ricche di materiale organico) per uno spessore di 50-70 m in prossimità della costa, e da depositi fluviali non omogenei dell'Olocene (argille in superficie e sabbie e ghiaie più o meno cementate in profondità, a volte con matrice limosa) con un probabile spessore di 35-40 m, nella parte interna della piana. I pozzi presenti nell'area in studio, utilizzati a scopo irriguo, sono generalmente pozzi scavati e hanno una profondità variabile da 2,5 a 9 m. I piezometri realizzati per il monitoraggio hanno invece una profondità variabile da 10 a 20 m. Pochi sono invece i pozzi trivellati, che hanno una profondità di 20 m nell'area di Santa Barbara e di 40 m nella parte costiera della Piana (area di Pranu Gialea).

Le risorse idriche, utilizzate a scopi irrigui sono provenienti dall'utilizzo unicamente di acque sotterranee, emunte dal sistema acquifero multistrato soprattutto attraverso pozzi scavati, di profondità inferiore ai 9 m. Nella successiva tabella 6 è riportato il numero dei pozzi/piezometri censiti nell'area, secondo le differenti tipologie, costituenti la rete di monitoraggio al momento disponibile.

**Tabella 6. Pozzi e piezometri censiti facenti parte della rete di monitoraggio**

Anno censimento	Area (km <sup>2</sup> )	N. pozzi	Tipo di pozzo
2005	8	56	scavato
		3	trivellato
		11	piezometro

La localizzazione dei pozzi è mostrata allegato nella figura 12 per le diverse reti di monitoraggio installate dal 2004 al 2005. Nella figura 13 Sono anche indicati i punti di monitoraggio del livello delle acque nei corsi d'acqua principali. I pozzi presenti nella piana sono in numero notevolmente maggiore rispetto a quelli utilizzati per costruire la rete di monitoraggio. Altri dati, sui pozzi denunciati, potrebbero essere reperiti negli archivi del Genio Civile.

Figura 12. Rete di monitoraggio di pozzi e piezometri installati nel periodo dal 2004 al 2005

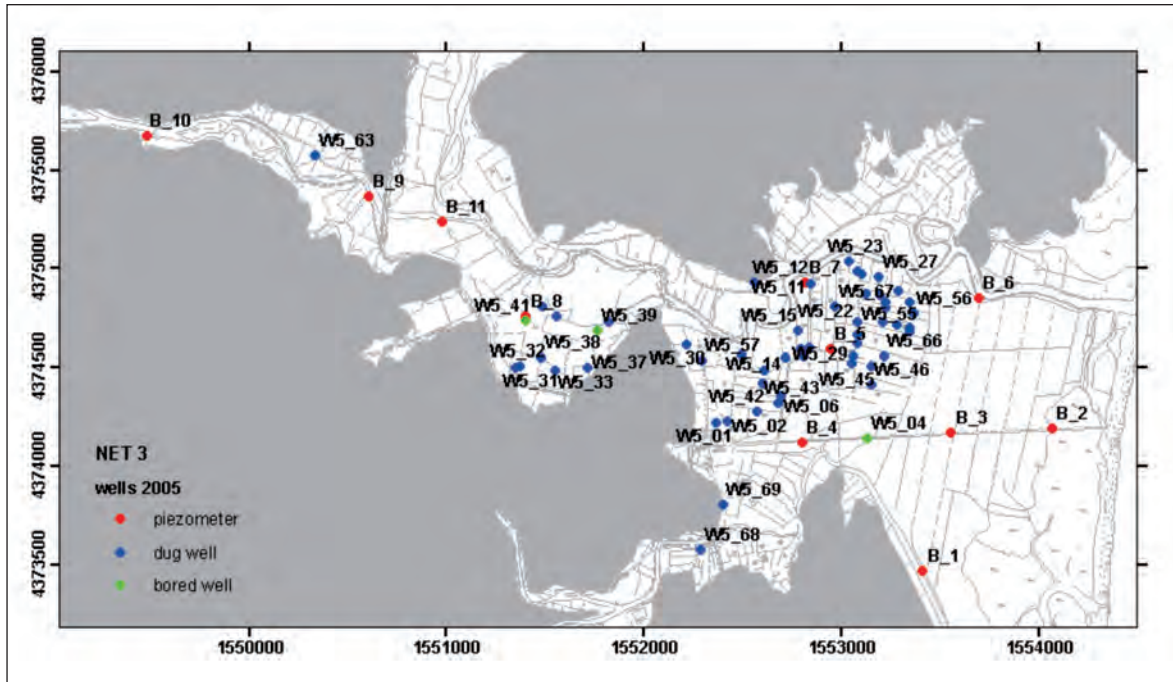
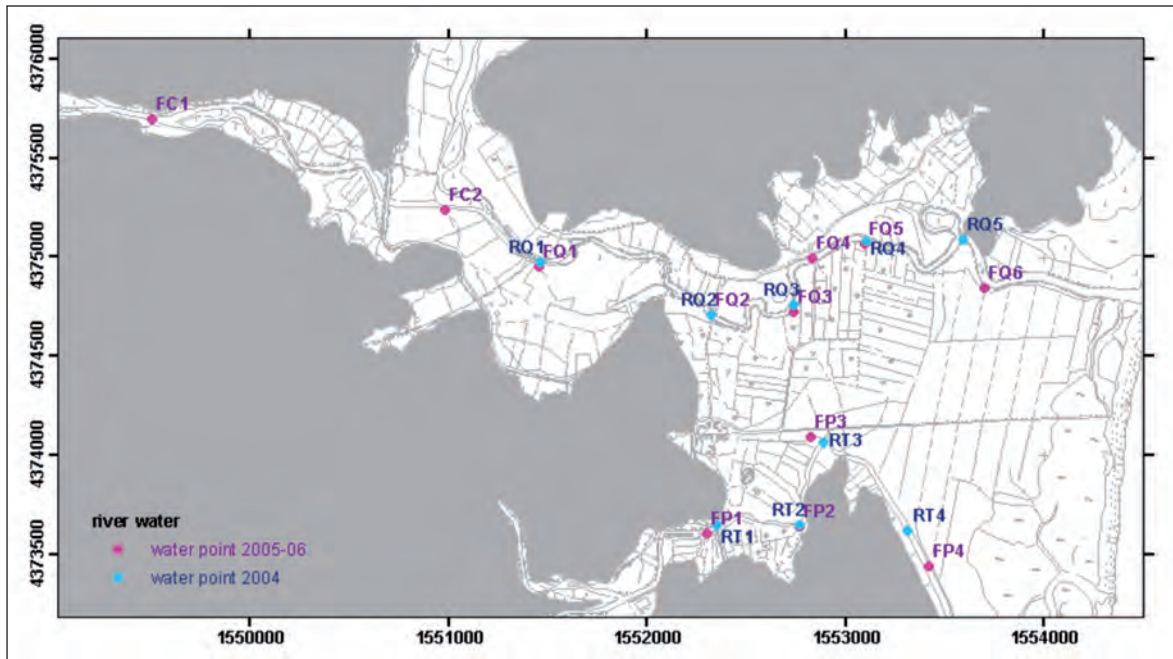


Figura 13. Rete di monitoraggio dei principali corsi d'acqua nel periodo 2004 e 2005-2006



*Aree di maggior rischio dal punto di vista dell'intrusione marina*

Sulla base dell'assetto geologico, idrologico, idrogeologico e dell'utilizzo delle acque superficiali e sotterranee per usi irrigui sopramenzionati, si possono individuare le seguenti aree più a rischio per intrusione marina:

- Parte costiera della piana, per via dell'intrusione diretta dell'acqua dal mare

- Parte settentrionale e meridionale della piana, lungo le foci dei fiumi Quirra e Flumini Pisale, per via della naturale risalita delle acque dal mare a seguito delle fluttuazioni eustatiche
- Parte centrale della piana, coltivata e quindi caratterizzata dalla presenza di un alto numero, dalla quale si emungono i maggiori quantitativi di acqua dalla falda sotterranea.

#### *Riepilogo e dati disponibili*

Si riportano in sintesi i dati disponibili recuperati ai fini di possibili ulteriori valutazioni:

- Tipo di acquifero: acquifero freatico multistrato
- Conducibilità idraulica acquifero: questo dato è disponibile solo per la parte costiera della piana e per l'area di Santa Barbara, ed è stato determinato, in entrambi i casi, attraverso una sola prova di pompaggio eseguita su un pozzo trivellato. La conducibilità idraulica determinata per la parte costiera della piana è pari a  $4,97 \cdot 10^{-5}$  m/s, mentre quella determinata per l'area di Santa Barbara è di  $2,7 \cdot 10^{-4}$  m/s.
- Altezza del livello di falda rispetto al livello del mare: ricavabile dal data base pozzi allegato.
- Spessore dell'acquifero: mediamente, il sistema acquifero presenta un probabile spessore di 50-70 m, in prossimità della costa, e di 35-40 m, nella parte interna della piana.
- Definizione dei limiti dell'acquifero: si ipotizza coincida con i limiti della formazione alluvionale Olocenica, ma richiede ulteriori approfondimenti.
- Portate emunte globalmente in media annua: le portate emunte sono state stimate per un anno idrologico, come differenza tra il fabbisogno idrico mensile delle diverse colture presenti nella piana, desunte dalla carta dell'uso del suolo, e le precipitazioni medie mensili. I risultati sono riportati nella tabella 7 seguente, espressi in mm/anno per una superficie coltivata di circa 6,8 km<sup>2</sup>:

**Tabella 7. Media annua delle portate emunte su base del deficit tra piogge e fabbisogno colturale**

	Precipitazioni cumulate mensili	Fabbisogno colturale stimato mensile	Deficit idrico	Prelievi da falda
	mm	mm	mm	mm
Gen	73.60	4.57	69.03	0.00
Feb	71.22	4.57	66.65	0.00
Mar	66.87	4.57	62.30	0.00
Apr	54.63	17.12	37.51	0.00
Mag	36.10	24.55	11.55	0.00
Giu	12.76	29.62	-16.86	16.86
Lug	5.50	34.83	-29.33	29.33
Ago	13.05	24.91	-11.86	11.86
Set	60.49	29.44	31.05	0.00
Ott	104.56	14.58	89.98	0.00
Nov	94.96	4.57	90.39	0.00
Dic	105.72	4.57	101.15	0.00
$\Sigma$ (mm/anno)				58.06

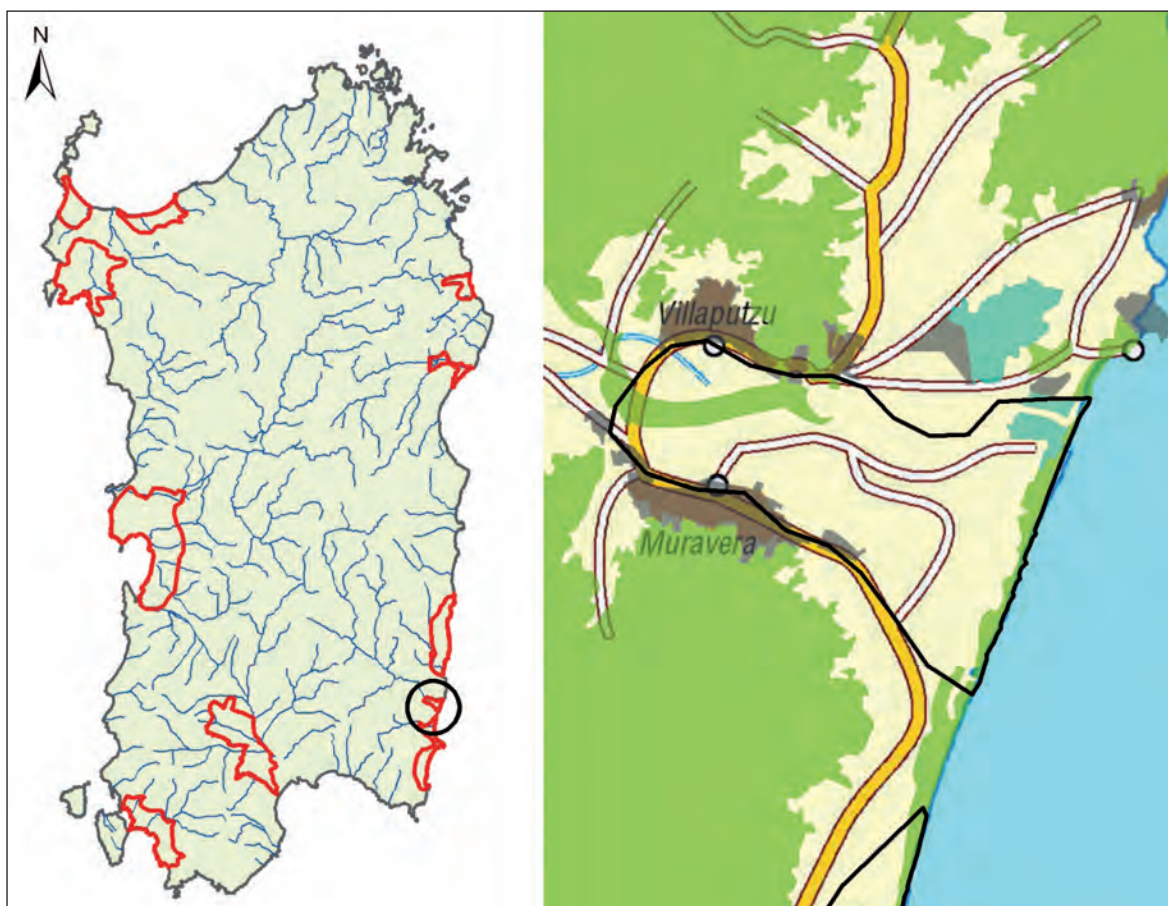
Per il calcolo del consumo d'acqua sotterranea per l'agricoltura nell'area in studio, relativamente ai pozzi assegnati ad ogni acquifero, è stato considerato un unico sistema acquifero multistrato, in quanto non è stato possibile fare una distinzione tra i vari livelli del multistrato.

### 2.2.3 Area della Piana di Muravera (CA)

#### *Inquadramento e delimitazione delle aree interessate dal fenomeno*

L'area sulla quale si possiedono dati, parte integrante del Sarrabus, ricade nella piana di foce del fiume Flumendosa (figura 14), ed è rappresentata nelle seguenti tavolette 1:25.000: Muravera Foglio 549 sez. II; San Priamo Foglio 558 sez. I; Villasalto Foglio 549 sez. III; Burcei Foglio 558 sez. IV; Castello di Quirra Foglio 549 sez. I.

**Figura 14. Inquadramento dell'area di Muravera**



#### *Caratterizzazione del problema*

Nella piana di Muravera sono stati individuati un acquifero superficiale generalmente freatico e un acquifero multistrato profondo in pressione, meglio descritti nel seguito.

Le grandi quantità d'acqua emunte a scopo irriguo, prevalentemente nei mesi meno piovosi, determinano, nelle aree più prossime alla costa, un abbassamento delle piezome-



triche al di sotto del livello del mare, determinando così fenomeni di ingressione marina. La salinità delle acque sotterranee, che le analisi chimiche confermano derivare dal mare, permane anche nei periodi piovosi, dimostrando caratteri di irreversibilità, e mostra una tendenza ad aumentare nel tempo.

Le misure (log elettrici) di conducibilità non segnalano variazioni di salinità nei pozzi superficiali, sia nei pozzi d'acqua dolce nell'entroterra che in quelli d'acqua salmastra più prossimi alla costa. Nei pozzi profondi, invece, solo i pozzi nell'entroterra (prevalentemente d'acqua dolce) hanno mostrato costanza di conducibilità, mentre quelli più prossimi alla costa mostrano una presenza di acque salmastre in superficie e un aumento netto di salinità in profondità.

**Tabella 8. Stato e disponibilità dei dati raccolti**

DATI	STATO	DISPONIBILITÀ	NOTE
Ubicazione pozzi	buono	si	Schede di rilevamento pozzi georeferenziate in formato numerico
Portata emunta dai pozzi	insufficiente	no	Nessun dato
Livello piezometrico, conducibilità elettrica e pH misurati nei pozzi	buono	si	Parte dei dati in cartaceo e parte in formato numerico
Definizione dell'acquifero interessato da ogni pozzo	buono	si	
Utilizzo dei pozzi	buono	si	I pozzi sono usati a fini irrigui
Andamento temporale della piezometrica	buono	si	Si possiede una buona serie storica, in alcuni periodi con rilevamenti mensili (Ardau, 1995). Dati in parte cartacei e in parte numerici.
Geometria degli acquiferi 2D	buono/insufficiente	si	Per l'acquifero freatico, la geometria è ricavabile dalla geologia superficiale e la conoscenza è dunque buona. Per gli acquiferi profondi, non si hanno dati sufficienti.
Geometria degli acquiferi 3D	buono/insufficiente	si	Sono state effettuate diverse campagne geofisiche che hanno permesso di avere informazioni buone sugli spessori; è insufficiente l'informazione per la ricostruzione 3D dell'acquifero multistrato
Qualità delle acque di falda: principali anioni e cationi	buono	si	Solo cartaceo
Qualità delle acque di falda: determinazione inquinanti	insufficiente	no	
Definizione delle aree contaminate da intrusione marina e posizione cuneo salino	buono	si	Le aree interessate da contaminazione marina sono deducibili dall'analisi delle linee di isoconducibilità elettrica integrate dalle piezometriche e dalle analisi chimiche. Non si hanno dati sulla posizione del cuneo salino.
Produttività degli acquiferi = $R/A$ , dove R è la ricarica attiva (riserve regolatrici) e A è la superficie affiorante dell'acquifero (andamento nell'annata media)	insufficiente	no	Il dato è deducibile solo tramite ipotesi approssimative sui dati occorrenti

## *Aspetti geologici, idrologici delle aree interessate dal fenomeno*

### **Geologia**

#### PALEOZOICO:

SVI – Formazione di San Vito (Cambiano medio e superiore-ordoviciano inferiore);

mro – Gruppo delle vulcaniti acide (Ordoviciano inferiore-medio);

PSR – Formazione di Punta Serpeddi (Caradoc);

TUVa – Formazione di Tuviois (Ashgill);

MSV – Formazione di Monte Santa Vittoria

SGA – Scisti a graptoliti

#### QUATERNARIO:

bn1 – Depositi alluvionali dei terrazzi del I ordine e conoidi reinceise (Olocene)

bn2 – Depositi alluvionali dei terrazzi del II ordine (Olocene)

e3 – Depositi palustri (Olocene)

b – Depositi alluvionali in evoluzione (Olocene- Attuale)

q2 – Depositi di spiaggia (Olocene-Attuale)

a – Depositi di versante (Olocene – Attuale)

g2 – Depositi di spiaggia (Olocene – Attuale)

La geologia della pianura deltizia è caratterizzata da un complesso Paleozoico metamorfico, affiorante ai bordi della piana, ricoperto da detriti ed alluvioni del Pleistocene e dell'Olocene, spessi fino a qualche centinaio di metri. I graniti (Carboniferi superiore – Permiano) affiorano a pochi chilometri a nord del villaggio di San Vito.

### *Caratteri geomorfologici e strutturali*

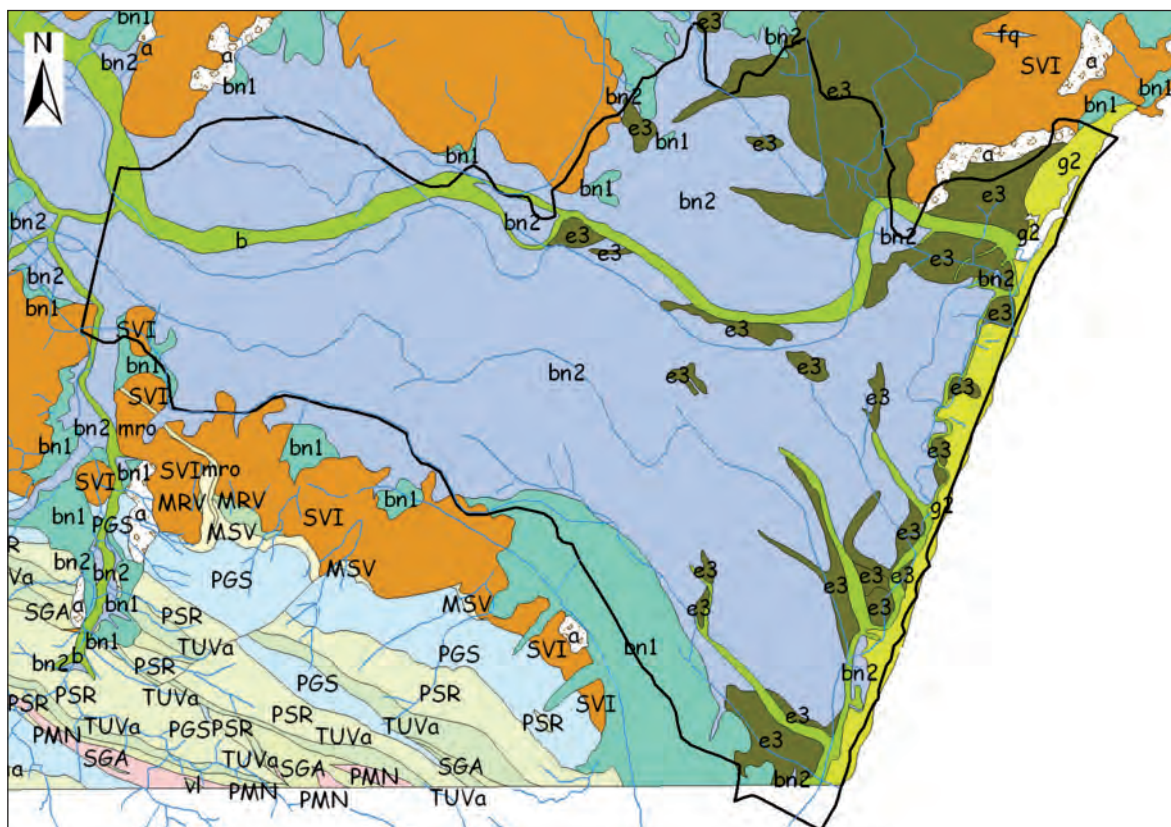
L'area in esame (figura 15) presenta una varietà di ambienti morfogenici, da quello continentale a quello marino, ma quello più rappresentativo è quello fluvio-deltizio, cui va attribuita la costruzione dell'ampia pianura costiera del Flumendosa, costituita da una potente coltre di alluvioni Quaternarie, depositate sul basamento scistoso Paleozoico precedentemente modellato. I depositi alluvionali presentano dei terrazzamenti, sormontati da depositi di pendio che raccordano i rilievi alla piana sottostante. Il Flumendosa scorre incassato nei suoi depositi più recenti, seguendo un percorso a meandri; numerose sono le foci e i rami abbandonati dell'antico delta, apparentemente prive di collegamento con il corso d'acqua principale. I rilievi collinari, localizzati nel settore NW, sono costituiti da formazioni scistose paleozoiche dalle forme poco accidentate e si presentano profondamente incisi da corsi d'acqua a carattere torrentizio. Il settore sud-ovest presenta una varietà litologica maggiore e gli agenti esogeni hanno potuto dar luogo a forme più aspre. La fascia costiera è quasi per intero occupata da depositi sabbiosi, interrotti a nord dal promontorio di Porto Corallo, di costruzione scistosa. I depositi di spiaggia sono separati dalla retrostante pianura da accumuli dunari.

La struttura della catena montuosa è rappresentata dai sedimenti Paleozoici che sono stati ammassati e piegati in una pila di grandi falde o unità tettoniche sovrapposte. Le

falde di ricoprimento hanno subito un movimento con una direzione da nord-est verso sud-ovest. Sembra si possa riferire un sistema di pieghe isoclinali, con assi di direzione E-W; le pieghe corrispondenti alla seconda fase presentano gli assi con direzione NW-SE. Le principali fratture sono faglie normali ed inverse, che spesso corrispondono a sollevamenti tardoercinici delle strutture plicative, ripresi anche dalla tettonica disgiuntiva alpina.

La formazione di San Vito è caratterizzata da un'ampia ondulazione. La successione trasgressiva presenta un evidente carattere di allungamento con direzione NW-SE e giaciture prevalentemente molto inclinate. Nel complesso i terreni paleozoici affioranti nell'area presentano un assetto monoclinatico.

Figura 15. Schema geologico dell'area in esame.



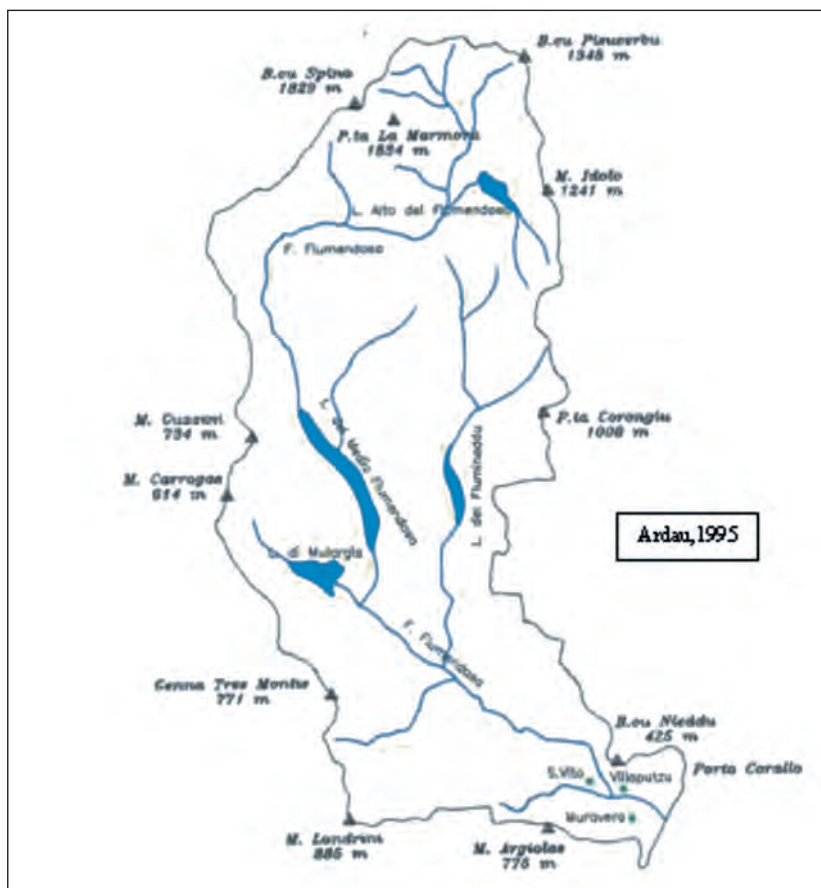
Legenda: SVI - Arenarie di S.Vito; vl - Calacri nodulari fossiliferi; TUVa - Calcari silicizzati; PMN - Complesso di Pala Manna; mro - Derivati metamorfici di rocce magmatiche acide in filoni; fq - Filoni idrotermali prevalentemente di quarzo; MSV - Formazione di Monte Santa Vittoria; PSR - Formazione di Punta Serpeddi; SGA - Scisti a graptoliti; bn1 - Depositi alluvionali dei terrazzi del I ordine e conoidi reinceise; bn2 - Depositi alluvionali dei terrazzi del II ordine; b - Depositi alluvionali in evoluzione; q2 - Depositi di spiaggia; a - Depositi di versante; e3 - Depositi palustri; g2 - Depositi di spiaggia.

### Lineamenti idrogeologici

Il bacino imbrifero del Flumendosa, avente superficie di circa 1.820 km<sup>2</sup>, si sviluppa tra le più alte vette della Sardegna (figura 16). Il fiume sfocia nel Mar Tirreno e i suoi deflussi sono parzialmente regolati da tre grandi serbatoi di ritenuta costruiti in parallelo. Il regime idrologico è fortemente influenzato dalla formazione geo-morfologica del bacino: l'assoluta impermeabilità degli scisti silurici cristallini garantisce il massimo deflusso delle acque meteoriche e limita le perdite quasi esclusivamente a quelle per evaporazione. Il bacino può quindi classificarsi come nettamente impermeabile; questa caratteristica, insie-

me alla configurazione orografica fortemente montuosa e alla elevata piovosità, determina nel Flumendosa i più forti contributi unitari e i valori più alti dei coefficienti di deflusso dei corsi d'acqua sardi, soprattutto in condizioni di piena. Poiché il bacino è, come si è detto, essenzialmente impermeabile, i deflussi seguono fortemente le vicende degli afflussi meteorici, essendo influenzati sia dalla loro entità che dalla loro distribuzione nell'arco dell'anno. I rami abbandonati dell'antico delta, denominati "foxi", le cui bocche a mare sono state recentemente aperte per regolare le attività di acquacoltura, sono in comunicazione idraulica con gli acquiferi.

**Figura 16. Idrografia del bacino imbrifero del Flumendosa (da Ardau, 1995)**



L'osservazione di una sistematica differenza di livello piezometrico tra i pozzi profondi e i pozzi superficiali ad essi prossimi ha indotto fin dal principio degli studi ad ipotizzare l'esistenza di almeno due acquiferi sovrapposti, caratterizzati da differenti carichi idraulici. Le indagini geofisiche hanno suffragato tale ipotesi.

L'acquifero superficiale, impostato nella formazione sabbiosa, generalmente freatico, è caratterizzato da una soggiacenza di 1-2 m, è fortemente produttivo e tradizionalmente sfruttato dagli agricoltori con pozzi a largo diametro di profondità max dal piano di campagna di 15,50 m, ma in genere sotto i 10 m. E' spesso da 4 a 20 m.

L'acquifero profondo, costituito da sabbie e ghiaie, artesiano, idraulicamente indipendente dall'acquifero sovrastante, è meno conosciuto e meno sfruttato.

I due acquiferi sono separati da un orizzonte argilloso a profondità variabili e con potenze anch'esse variabili da 10 a 30 m.

*Aree interessate da intrusione marina laterale e dal basso e dinamiche attuali e future*

Il fenomeno di salinazione dell'acquifero superficiale interessa tutto il settore sud-orientale dell'area di indagine, in particolare la zona compresa tra le Foxi Padrionnas e Bau Olbiu, che è anche la zona di massima depressione della piezometrica, specie nel periodo estivo.

Per l'acquifero profondo, dall'analisi dei dati EAF, 1999, l'area maggiormente interessata parrebbe la stessa, ma con valori di conducibilità inferiori rispetto all'acquifero superficiale (circa 12.000 contro circa 24.000 mS/cm). In Ardaù, 1995, si trova, al contrario, che la salinità dell'acquifero profondo è in genere superiore a quella dell'acquifero superficiale, con valori che giungono a 50.000 mS/cm.

Nella falda superficiale, le misure di conducibilità (log elettrici) non hanno evidenziato la presenza di una interfaccia acqua dolce-acqua salata (costanza della conducibilità elettrica). Nell'acquifero profondo, nei pozzi ubicati a valle, la salinità cresce con la profondità.

Per l'acquifero superficiale, i dati sui cloruri raccolti dal 1983 evidenziano uno spostamento del fronte salino verso l'interno, con un passaggio dalla parte terminale delle Foxi alla parte a monte dell'abitato di Muravera, interessando sempre più il centro della piana.

Per l'acquifero profondo, si hanno a disposizione meno osservazioni, che non consentono di definire un trend evolutivo del fenomeno.

Variazione delle caratteristiche proprie (temperatura, salinità, ossigeno disciolto, permeabilità) nella porzione di acquifero interessata dalla zona di transizione: si dispone alcune misure di conducibilità (log elettrici) e di temperatura, ma non del loro andamento del tempo.

*Altri meccanismi di salinizzazione delle falde (presenza di salinità "naturale" indotta da uso di pozzi in acquiferi profondi salini o parzialmente salini)*

Altri meccanismi di salinizzazione si possono ricondurre sinteticamente ai seguenti fattori:

L'intrusione salina per l'acquifero superficiale è fondamentalmente causata dall'abbassamento dei livelli piezometrici dovuto alle eduzioni incontrollate dalla falda per l'irrigazione (prevalentemente di agrumeti e risaie);

La sistemazione idraulica, l'arginatura e la costruzione di tre serbatoi di ritenuta nel Flumendosa, uniti al verificarsi di periodi siccitosi, hanno ridotto l'azione di ricarica naturale;

Le Foxi costituiscono dei canali preferenziali per l'intrusione marina;

Per l'acquifero profondo, meno sfruttato e per il quale sono state talvolta misurate alte salinità a notevole distanza dal mare, si ipotizza che la salinità sia il retaggio dell'ambiente marino che ha interessato la piana presumibilmente durante la trasgressione del Tirreniano e che ancora oggi sia in corso il naturale processo di miscelazione e sostituzione di tali acque per effetto del lento flusso delle acque dolci di ricarica. Ciò sembra trovare conferma nelle analisi chimiche (Ardaù et al., 2000).

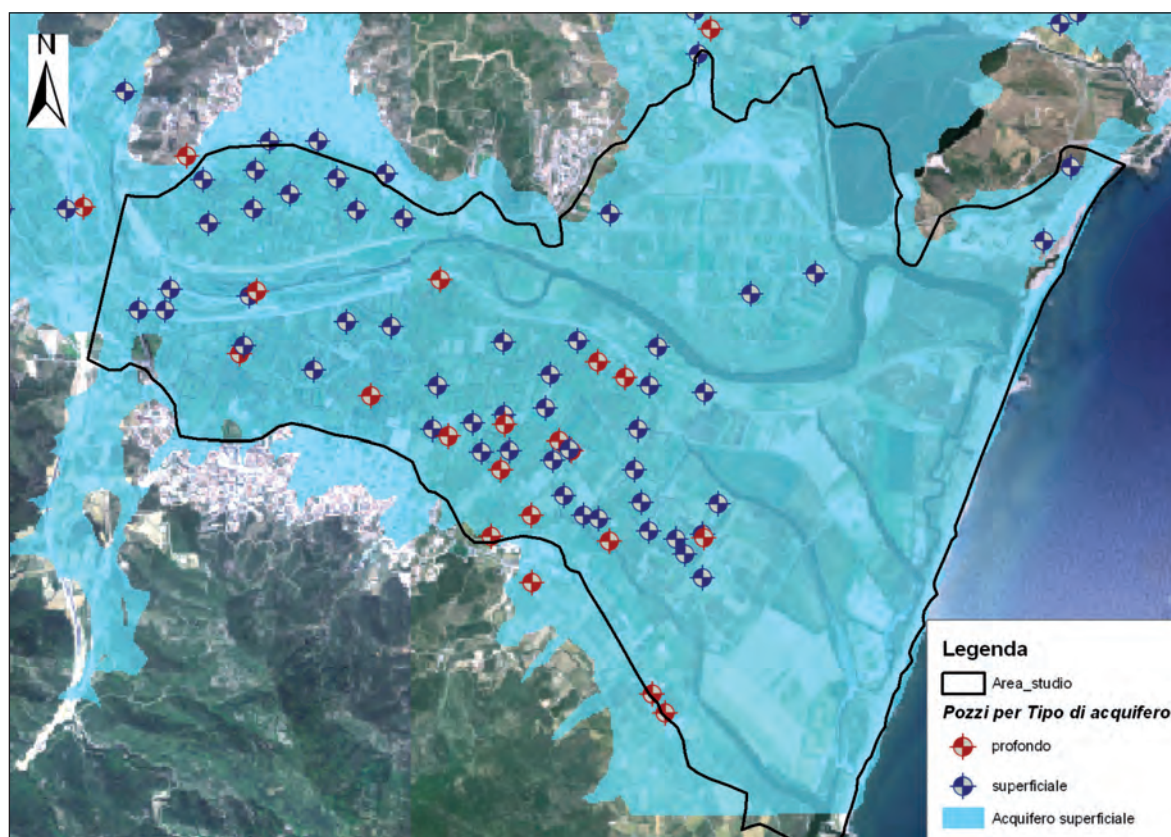
## Emungimento per uso irriguo

### Determinazione dello spessore di acquifero impegnato nell'emungimento

Dai dati in nostro possesso (EAF, 1999), risulta che la profondità massima dei pozzi è pari a 120 m, ma la maggior parte non superano i 50 m.

Le risorse idriche, utilizzate a scopi irrigui sono provenienti dall'utilizzo di pozzi, il cui ultimo censimento risale al 1999 (EAF, 1999), ma, dei 123 pozzi censiti, 29 appartengono ad una precedente rete di monitoraggio di 31 pozzi (Ardau, 1995).

**Figura 17. Mappatura dei pozzi afferenti agli acquiferi superficiale freatico (blu) e profondo confinato (rosso) costituenti la rete di monitoraggio (da EAF mod., 1999) sovrapposti alla estensione geografica dell'acquifero superficiale (in azzurro)**

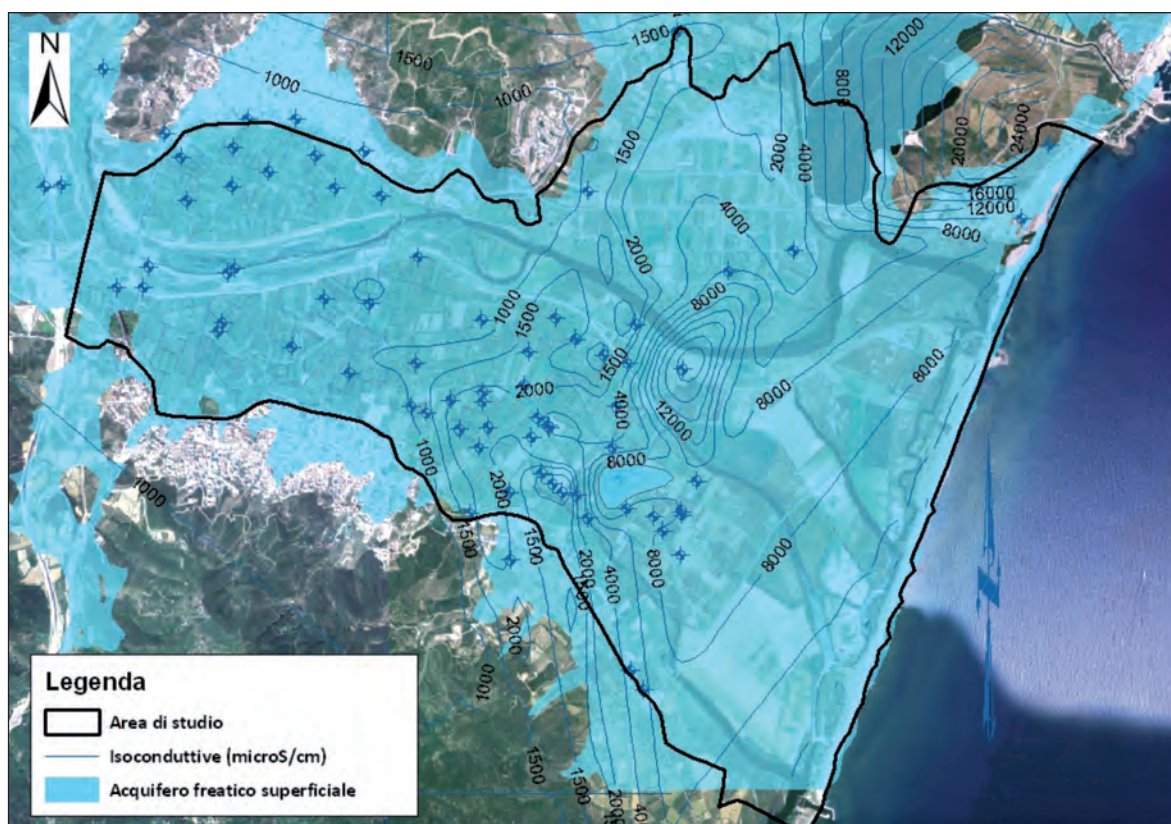


**Tabella 9. Censimento dei pozzi per l'anno 1999**

Anno ultimo censimento	Acquifero	N. pozzi
1999	Superficiale	85
1999	Profondo	38

Si stima che il numero totale di pozzi si aggiri sui 2000 (EAF, 1999). Le aree di maggior rischio dal punto di vista dell'intrusione marina sono quelle della immediata fascia retro-costiera, specie nelle zone delle Foxi e dei depositi palustri, con andamento sub parallelo alla stessa fascia costiera, come evidenziato dalla ricostruzione e spazializzazione dei valori di conducibilità delle acque di falda (figura 18).

Figura 18. Spazializzazione in isoconduttive dei valori di conducibilità delle acque di falda superficiale (da monitoraggio pozzi) nell'area di studio (da Ghiglieri e Barrocu, convenzione EAF inedita)



#### *Riepilogo e dati disponibili*

Si riportano in sintesi i dati disponibili recuperati ai fini di possibili ulteriori valutazioni:

1. Tipo di acquifero: un acquifero superficiale generalmente freatico ed un acquifero multistrato profondo confinato;
2. Conducibilità idraulica acquifero: Le prove di emungimento (Barbieri et al. 1983) hanno fornito i seguenti dati: per l'acquifero superficiale  $T=2.217 \cdot 10^{-3}$ , valore medio da attribuirsi probabilmente alla componente limo-argillosa dell'acquifero; per l'acquifero profondo  $T=1.3 \cdot 10^{-2}$  e  $S=4.8 \cdot 10^{-3}$ . In Arda, 1995, si sono ricavati per l'acquifero superficiale valori di permeabilità che vanno da  $1,8 \cdot 10^{-3}$  a  $4,6 \cdot 10^{-3}$ , mentre per l'acquifero profondo si è trovato  $1,7 \cdot 10^{-3}$ ;
3. Altezza del livello di falda rispetto al livello del mare: ricavabile dal data base pozzi (EAF, 1999).
4. Spessore dell'acquifero: mediamente, l'acquifero superficiale è spesso tra i 4 e i 20 m; gli spessori decrescono in prossimità del mare. L'acquifero profondo si rinviene tra i 12 e i 28 m, ma non si hanno dati certi sullo spessore. Si noti che le stratigrafie sono estremamente variabili;
5. Definizione dei limiti dell'acquifero: non completa. Per l'acquifero superficiale è deducibile dalla carta geologica;

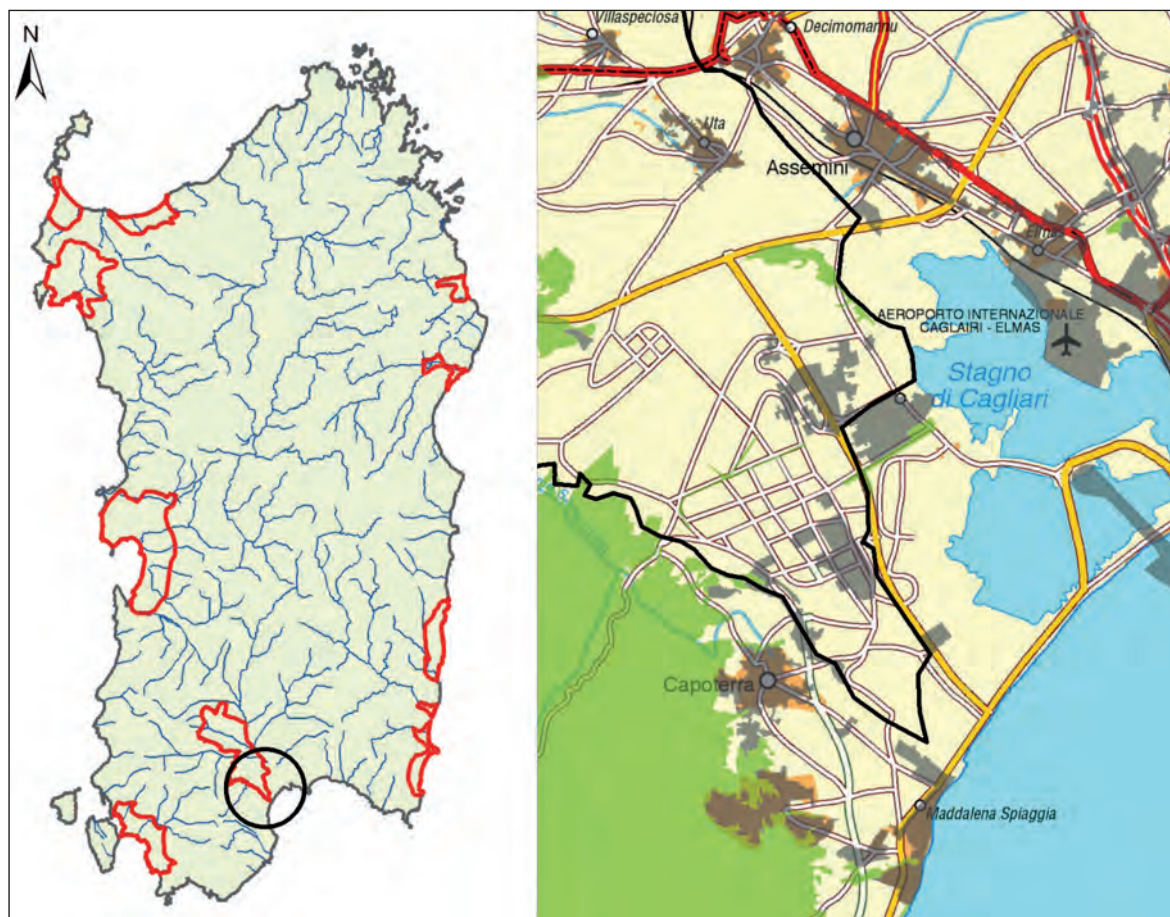
6. Portate emunte globalmente in media annua (mc): i prelievi avvengono prevalentemente dall'acquifero superficiale, ma ultimamente anche l'acquifero profondo è sempre più utilizzato. Non si hanno dati sui consumi idrici;
7. Pozzi assegnati ad ogni acquifero: si veda la tabella riportata con figura 17.
8. Informatizzazione: esistono i dati informatizzati, ma talvolta non se ne dispone. Si dispone dei dati in formato cartaceo. Si rimanda alla tabella iniziale per questa area sullo "stato e disponibilità dei dati raccolti".

## 2.2.4 Area della piana alluvionale di Capoterra (CA)

### *Inquadramento e delimitazione delle aree interessate dal fenomeno*

La piana alluvionale di Capoterra (figura 19), situata nella parte sud-occidentale della fossa tettonica del Campidano (Sardegna meridionale), è delimitata ad Est da una zona lagunare, attualmente occupata a SE dallo Stagno di Capoterra, nella parte centrale dai bacini di evaporazione delle Saline di Contivecchi e nella parte NE dalla Laguna di Santa Gilla; nella parte occidentale è invece delimitata da una serie di rilievi collinari granitici, che rappresentano le propaggini del pilastro tettonico interessato da due sistemi principali di fratture con orientamento NW-SE e NE-SW.

**Figura 19. Inquadramento dell'area**





Non sono disponibili dati sulla superficie dell'area in studio, a meno che non si faccia riferimento ai limiti del bacino idrografico del rio Santa Lucia (140 km<sup>2</sup>), né l'inquadramento dell'area nelle carte topografiche dell'IGM e nella Carta Tecnica Regionale (fogli IGM 1:50.000, sezioni IGM 1:25.000, sezioni CTR 1:10.000). Le rappresentazioni dell'area sono disponibili solo in formato cartaceo.

### *Caratterizzazione del problema*

Negli ultimi decenni, la piana di Capoterra ha subito profonde trasformazioni per via del crescente sviluppo agricolo e industriale, al quale è seguita una crescente domanda d'acqua. Le particolari condizioni climatiche dell'aria, caratterizzate da frequenti e prolungati periodi siccitosi, la presenza di numerose sorgenti di sale, sia di origine naturale che antropica (spray marino, acqua di mare, laguna, vasche di evaporazione delle saline e depositi di sale ad esse legati), e gli emungimenti incontrollati delle risorse d'acqua, hanno portato ad una diminuzione della potenzialità delle falde e ad una diffusa salinazione delle acque sotterranee, con conseguenze più gravi nella parte superficiale del sistema acquifero.

Il sistema è costituito da un acquifero superficiale, di tipo freatico, e da un acquifero profondo multistrato, localmente confinato o semiconfinato, ricaricato lateralmente attraverso le fratture degli ammassi granitici presenti ad Ovest della piana. Entrambi gli acquiferi sono interessati da fenomeni di intrusione salina. L'incremento degli emungimenti legato allo sviluppo urbano ed industriale della piana hanno portato all'impoverimento della falda freatica, un tempo molto potente, ed alla realizzazione di numerosi pozzi trivellati nell'acquifero profondo. Le numerose perforazioni, spesso non realizzate a regola d'arte, hanno causato la cortocircuitazione delle acque dei due acquiferi. Gli scarsi apporti meteorici e gli eccessivi emungimenti hanno inoltre alterato l'equilibrio naturale tra le acque dolci, sotterranee e superficiali, e l'acqua del mare. Forti depressioni del livello piezometrico sono state riscontrate lungo la fascia della piana immediatamente lambita dalle acque salmastre della laguna a dalle acque salate delle saline, dove si evidenziano i coni di emungimento dei numerosi pozzi presenti, in continuo pompaggio per via dell'alta domanda d'acqua per gli usi industriale, agricolo e zootecnico.

La prevalenza di ioni sodio e cloro, riscontrata sia nelle acque di falda che nelle sorgenti emergenti dalle formazioni granitiche situate nel limite Ovest della piana, ha inoltre indicato processi di dilavamento, da parte delle acque meteoriche, dei sali depositati nel suolo ad opera dello spray marino e presenti soprattutto nella parte della piana esposta ai venti regnanti dei quadranti NO (maestrale), E (levante) e SE (scirocco).

I processi di salinazione, maggiormente evidenti nella falda freatica, sono quindi da imputarsi a diversi fattori:

- la dissoluzione dei sali trasportati dallo spray marino, tipico delle piane costiere; l'intrusione delle acque salate e/o salmastre dalle saline di Contivecchi e dalla Laguna di Santa Gilla;
- il dilavamento dei sali depositati sulla superficie del suolo, a seguito dell'attività delle saline (es. stoccaggio dei sali nelle vasche di evaporazione);
- la dissoluzione dei sali depositati sul suolo nel periodo estivo ad opera delle piogge e delle acque di irrigazione;
- la dissoluzione dei sali naturalmente presenti nella matrice solida del sistema acquifero.

**Tabella 10. Stato e disponibilità dei dati raccolti**

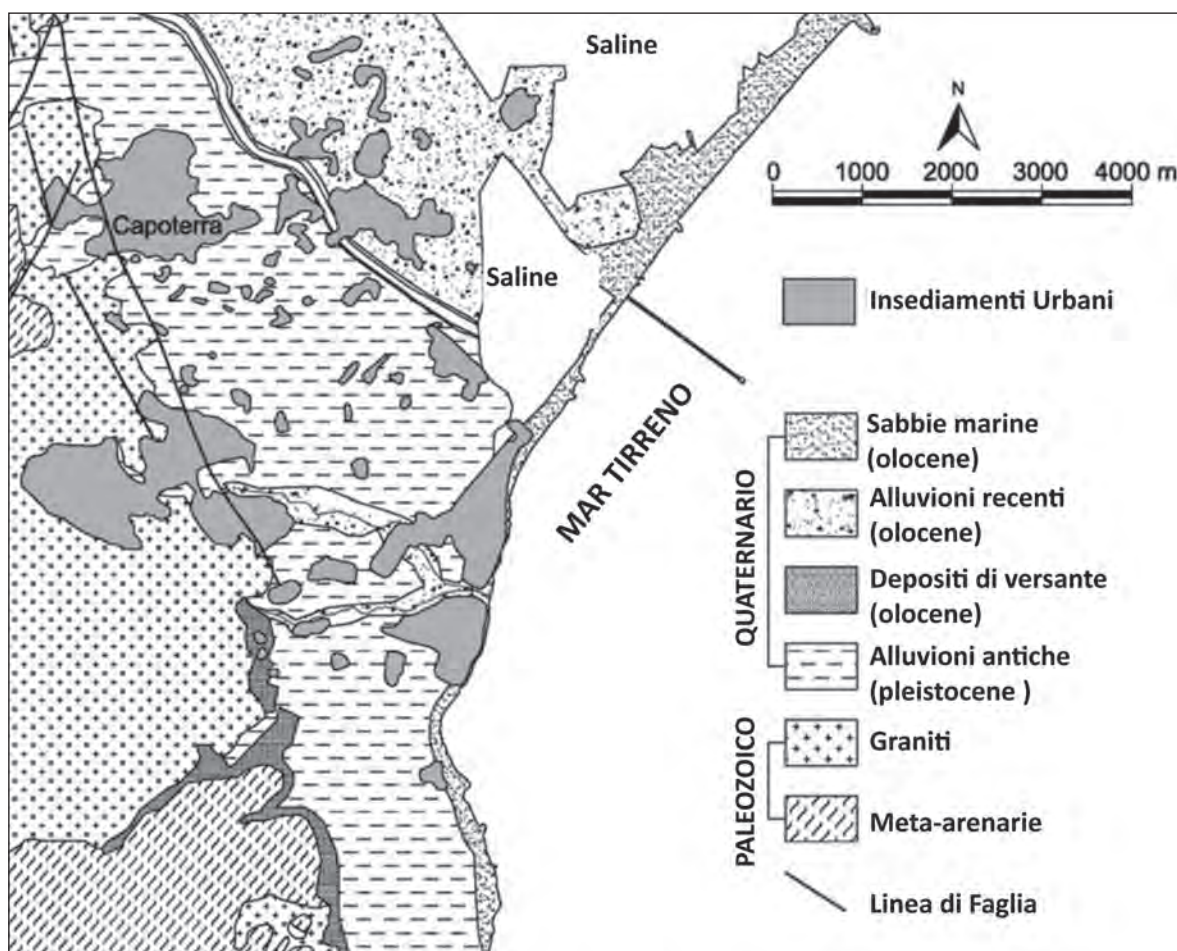
DATI	STATO	DISPONIBILITÀ	NOTE
Ubicazione pozzi	buona	si	Esistono due diverse reti di monitoraggio, la prima del 1992 (M.G. Sciabica, 1993), la seconda del 1998, che considera solo alcuni punti d'acqua della rete di monitoraggio precedente (E. Vernier, 1999)
Portata emunta dai pozzi	insufficiente	si	Esiste solo una stima delle portate emunte annualmente utilizzata per effettuare il bilancio idrologico (M.G. Sciabica, 1992)
Livello piezometrico, conducibilità elettrica e pH misurati nei pozzi	buono	si (formato digitale)	Sono a disposizione le misurazioni effettuate nel 1992 (M.G. Sciabica, 1993) e nel 1998 (E.Vernier, 1998)
Definizione dell'acquifero interessato da ogni pozzo	sufficiente	si	Sono a disposizione due profili geologici elaborati a partire dalle stratigrafie disponibili (E. Vernier, 1999)
Utilizzo dei pozzi	sufficiente	si	
Andamento temporale della piezometrica	buono	si (formato digitale)	Sono a disposizione le misurazioni effettuate nel 1992 (M.G. Sciabica, 1993) e nel 1998 (E.Vernier, 1998)
Geometria degli acquiferi 2D	insufficiente	si	Per l'acquifero freatico, la geometria è ricavabile dalla geologia superficiale. Per gli acquiferi profondi non si hanno dati sufficienti.
Geometria degli acquiferi 3D	sufficiente	si (formato cartaceo)	Sono state reperite 50 stratigrafie dagli Archivi del Genio Civile a partire dalle quali sono stati elaborati due profili geologici (E. Vernier, 1999)
Qualità delle acque di falda: principali anioni e cationi	buono	si (formato digitale)	Sono a disposizione le analisi effettuate nei monitoraggi del 1992 (M.G. Sciabica, 1993) e del 1998 (E.Vernier, 1998)
Qualità delle acque di falda: determinazione inquinanti	insufficiente	no	
Definizione delle aree contaminate da intrusione marina e posizione cuneo salino	sufficiente	si (formato cartaceo)	Le informazioni sono deducibili dalle prospezioni geofisiche effettuate e dalla mappe di distribuzione della salinità nelle acque sotterranee
Produttività degli acquiferi = $R/A$ , dove R è la ricarica attiva (riserve regolatrici) e A è la superficie affiorante dell'acquifero (andamento nell'annata media)	insufficiente	no	Il dato è deducibile solo tramite ipotesi approssimative sui dati occorrenti

*Aspetti geologici, idrogeologici delle aree interessate dal fenomeno*

**Carta Geologica**

La piana di Capoterra è costituita da depositi fluviali e fluvio-lacustri antichi (Pleistocene) e recenti/attuali (Olocene)(del Quaternario. La parte montuosa del bacino del Rio Santa Lucia, così come il substrato roccioso della piana, sono invece costituiti dal complesso cristallino Paleozoico (Carbonifero, Permiano). La morfologia attuale deriva dalla sovrapposizione di tre distinte idrografie sviluppatesi con intensità erosiva diversa a seguito delle variazioni climatiche.

Figura 20. Carta geologica schematica dell'area in esame



### *Lineamenti geostrutturali e morfologici*

Il pilastro tettonico presenta al margine sud-occidentale del graben del Campidano è scomposto da due insiemi principali di fratture, diretti mediamente uno NW-SE e l'altro NE-SW. Le fratture di direzione NW-SE sono considerate delle fratture di taglio con zone di intensa frammentazione (cataclasi) e laminazione (milonisi) della roccia. Entrambi i sistemi di frattura hanno guidato lo sviluppo delle incisioni vallive del sistema idrografico del Rio Santa Lucia e dei suoi affluenti.

La morfologia della parte montuosa del bacino del Rio Santa Lucia è molto accidentata, seppur con altezza dei rilievi modesta. L'approfondimento delle valli del Rio Gutturu Mannu e del Rio Gutturreddu, dalla cui confluenza ha origine il Rio Santa Lucia, avvenuto per erosione selettiva secondo le zone di frattura principali, per quanto sicuramente iniziati in precedenza, si sviluppò soprattutto nel Cenozoico con la formazione della fossa del Campidano, che determinò un forte abbassamento del livello di base dei corsi d'acqua che in esso defluiscono.

Le forme attuali sono però l'effetto dell'attività erosiva delle successive idrografie, in particolare della prima ed, in misura minore, della seconda, lo sviluppo delle quali è dimostrato dall'estensione e dalla potenza dei materiali alluvionali depositati a valle, nella zona pedemontana e nella piana.

I versanti sono ricoperti da vegetazione anche molto fitta, localmente interrotta, nelle parti alte, da radure di detrito pietroso naturale sterile, molto probabilmente formatosi per erosione del suolo e delle frazioni fini del terreno ad opera delle acque di dilavamento. Specie nella valle del Rio Gutturu Mannu, affiorano le discariche della passata attività mineraria (terminata negli anni '50), prevalentemente costituite da pietrame, in corrispondenza degli imbocchi delle vecchie gallerie, e da materiali fini, presso gli impianti di trattamento dimessi. I detriti di sterili non consentono alla vegetazione di attecchire e sono quindi soggetti all'erosione da parte del corso d'acqua di cui costituiscono la principale alimentazione in termini di trasporto solido.

La piana, costituita dai terrazzi alluvionali e dai depositi attuali del delta del Rio Santa Lucia, è delimitata a SO dai contrafforti dei monti di Capoterra, orlati dai depositi pedemontani, e a SE dalla Laguna di Santa Gilla. Il passaggio dai monti alla piana è segnato da una serie di rilievi collinari allineati, costituiti dalle propaggini del pilastro tettonico che ad occidente delimita il graben sardo.

L'area, originariamente palustre per via del mancato drenaggio delle acque superficiali e della falda freatica, ancora oggi localmente emergente, è stata interessata da lavori di bonifica, effettuati a più riprese a partire dal secolo scorso, e da numerosi altri interventi antropici degli ultimi decenni che hanno ridotto notevolmente le zone palustri. Ad oggi, risulta però ancora difficile il deflusso delle acque superficiali, come mostrato dai frequenti fenomeni di inondazione delle zone più depresse.

Nel corso degli anni, anche l'assetto originario della laguna è stato sensibilmente modificato dall'uomo, per cui attualmente essa lambisce la piana solo nel settore NE, mentre nella parte centrale sono state realizzate le saline, alle quali segue verso SO la parte residua dell'originario Stagno di Capoterra.

### **Lineamenti idrogeologici**

La struttura idrogeologica del bacino del Rio Santa Lucia è rappresentata dalla seguente serie stratigrafica (dall'alto verso il basso):

- QUATERNARIO: detriti di falda e depositi di versante costituiti da materiale roccioso eterogeneo;
- QUATERNARIO, Attuale: depositi fluviali e fluvio-lacustri, riferiti ad una III idrografia e relativo alluvionamento, rappresentati da sabbie, ghiaie e ciottoli, prevalentemente granitici, e sabbie sciolte fini, solo localmente argillose, con rari piccoli ciottoli provenienti dal disfacimento delle formazioni paleozoiche, talvolta, specie in pianura, ricche di resti vegetali. Potenza di 0,5-5,5 m. Permeabilità medio-alta.
- QUATERNARIO, Pleistocene-Wurmiano: alluvioni terrazzate rimaneggiare, riferite ad una II idrografia e relativo alluvionamento, prevalentemente costituite da ciottoli ben arrotondati provenienti dal disfacimento di rocce paleozoiche (abbondante quarzo, graniti più o meno arenizzati, apliti, micrograniti, porfiriti, scisti), localmente con sabbie compatte, grigiastre o rubefatte, talvolta annerite da resti torbosi e raramente con qualche strato o arnione di argilla. Potenza di 1-10 m. Permeabilità medio-alta.
- CENOZOICO-QUATERNARIO (Plio-Pleistocene): alluvioni antiche terrazzate, riferite ad una I idrografia e relativo alluvionamento, più o meno cementate, costituite da ciottoli ben arrotondati di varia granulometria, provenienti dal disfacimento di rocce paleozoiche, misti a sabbia ed argilla ferrettizzate, affioranti o ricoperte da

suolo vegetale o dai depositi delle idrografie successive. Potenza superiore ai 100 m. In genere, praticamente impermeabili ( $K = 10^{-5}$ ) o poco permeabili limitatamente a rare discontinuità per giunti, a lenti sabbiose di varia estensione e alla base della formazione, nella zona di discordanza.

- PALEOZOICO, Carbonifero-Permiano: graniti più o meno fratturati ed arenizzati. In genere, poco permeabili per i fenomeni di argillificazione intensi sviluppati nelle zone di frattura.
- PALEOZOICO, Carbonifero-Permiano: scisti più o meno metamorfosati per contatto con le intrusioni granitiche dell'orogenesi ercinica. Permeabili solo localmente, in corrispondenza delle zone di fatturazione.

Il sistema acquifero presente nella piana alluvionale di Capoterra è costituito da un acquifero freatico, impostato nelle alluvioni terrazzate rimaneggiate, sovrastante un acquifero profondo multistrato, semiconfinato o localmente confinato. Lo spartiacque sotterraneo sembra non corrispondere allo spartiacque delimitante il bacino idrografico del Rio Santa Lucia, in particolare per la piana costiera dove le acque sotterranee provenienti dal bacino di monte si mescolano con quelle del Campidano provenienti da NE. La circolazione delle acque sotterranee e superficiali, ed in particolare il processo di infiltrazione e filtrazione delle acque, non sembrano quindi rispettare completamente la morfologia.

La presenza della traversa E.A.F., realizzata sul Rio Santa Lucia con un diaframma incassato nella roccia compatta e nelle alluvioni antiche terrazzate, cementate e praticamente impermeabili, impedisce inoltre il deflusso di subalveo. La ricarica degli acquiferi, in particolare di quello superficiale, avviene quindi a monte e a valle dello sbarramento con dinamiche differenti. Si è infatti osservato che a monte della stretta, l'acqua di deflusso superficiale s'infiltra in buona parte nelle fratture del substrato roccioso affiorante e per esse defluisce direttamente negli acquiferi della piana alluvionale. A valle della stretta invece, l'infiltrazione diretta delle acque meteoriche e di deflusso superficiale, limitata agli affioramenti delle alluvioni sciolte permeabili, contribuisce alla ricarica dell'acquifero freatico mentre è trascurabile per i livelli acquiferi inferiori.

La falda freatica un tempo alimentava una fascia di frontali, localizzata nella zona della Tuerra lungo il corso del Rio Santa Lucia, rappresentante uno dei pochi casi in Sardegna di acque sotterranee sorgive affioranti naturalmente in pianura. In questa zona si rintracciavano ogni tanto dei botri con acqua perenne, chiamati baus, la cui presenza era marcata da un terrazzo morfologico formato dall'erosione dell'alveo nelle alluvioni terrazzate antiche impermeabili, alimentati dalla falda freatica impostata nelle alluvioni terrazzate rimaneggiate e nei depositi fluvio-lacustri. Da alcuni studi (Montaldo, 1966) risulta che a valle di tale terrazzo, la superficie freatica aveva una risalienza costante di 20-30 cm rispetto al livello della distesa d'acqua circostante.

A monte del terrazzo la falda veniva captata in quantità minime con pochi pozzi scavati per pochi metri, mentre a valle l'acqua, raccolta in pozze e distese d'acqua naturali costituenti dei veri e propri laghi di falda, essendo molto abbondante e di buona qualità, veniva impiegata, oltre che per l'irrigazione, anche per uso idropotabile locale.

I lavori di bonifica e di canalizzazione, eseguiti per favorire il deflusso naturale delle acque, l'incremento delle captazioni e degli emungimenti non regolamentati, legato al diffondersi degli impianti irrigui, e soprattutto i grandi scavi nell'alveo del rio Santa Lucia e in diversi punti della Tuerra per l'estrazione di inerti, furono causa di un abbassamento generalizzato della piezometrica e della conseguente scomparsa dei fontanili.

La falda freatica, ormai affiorante naturalmente solo negli scavi delle cave, dai quali si disperde in grande quantità per evaporazione, può essere oggi captata solamente con pozzi sempre più profondi. Molti pozzi superficiali scavati si sono esauriti, soprattutto nel periodo secco, quando gli emungimenti sono maggiori, e si è iniziato a sfruttare gli acquiferi profondi con numerosi pozzi trivellati, per soddisfare le sempre crescenti richieste d'acqua.

In origine le acque in pressione dell'acquifero confinato non si mescolavano con quelle dell'acquifero freatico, essendo separate da un orizzonte limo-argilloso praticamente impermeabile. Tale orizzonte è stato perforato con tecniche inappropriate con il risultato che i due acquiferi sono divenuti in più punti comunicanti. Le acque attinte dal sistema acquifero confinato attraverso i pozzi trivellati sono state impiegate per usi irrigui, industriali ed idropotabili.

Nel 1989-1990 il susseguirsi di due annate particolarmente siccitose comportò, da una parte, la riduzione degli apporti meteorici alle falde, dall'altra, l'aumento indiscriminato degli emungimenti. Localmente, sia nei pozzi scavati sia in quelli trivellati, si avvertirono incrementi progressivi di salinità, segno che i delicati rapporti fra le acque dolci, superficiali e sotterranee, e le acque del mare e della laguna erano stati compromessi.

*Aree interessate da intrusione marina laterale e dal basso e dinamiche attuali e future*

#### **Distribuzione dei carichi idraulici delle acque sotterranee**

L'andamento delle linee piezometriche, ottenute dall'elaborazione dei dati relativi alle misure dei livelli idrici effettuate nel Giugno e nell'Ottobre 1992 e nel Marzo 1993, indica la presenza di forti depressioni corrispondenti ai coni di emungimento dei pozzi addensati lungo la fascia della piana immediatamente lambita dalle distese di acqua salmastra della laguna e fortemente salata delle saline, coincidente con l'area ad alta domanda d'acqua per usi industriale, agricolo e zootecnico.

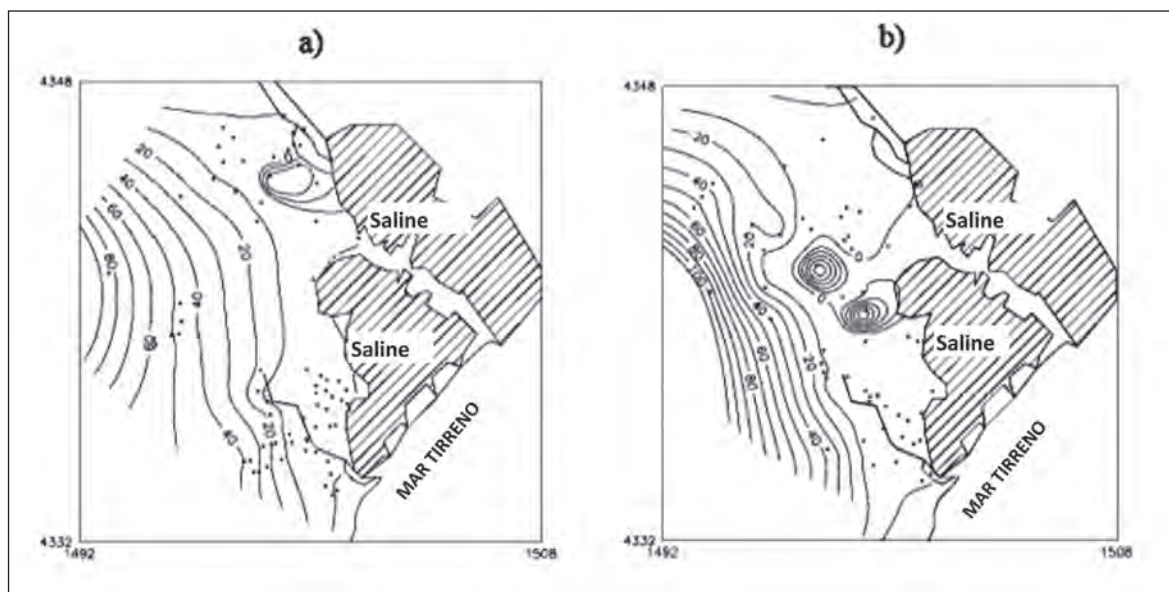
Nell'acquifero superficiale, nel periodo estivo, in cui cessano le precipitazioni, è notevole il ricorso agli emungimenti per uso irriguo. Le depressioni della piezometrica, presenti nella parte NE della piana, vicino alla laguna, e nella parte SE, in prossimità delle saline, corrispondono quindi ai coni di emungimento di due principali addensamenti di pozzi. Nel periodo invernale, invece, gli emungimenti vengono notevolmente ridotti e le depressioni si colmano per mezzo dell'infiltrazione diretta delle acque meteoriche e per gli altri apporti alimentanti.

Anche nell'acquifero profondo le aree depresse corrispondono ai coni di emungimento dei pozzi, la cui dimensione areale e distribuzione varia nei diversi mesi dell'anno a seconda dell'andamento delle eduzioni e degli apporti meteorici.

L'andamento delle isopieze relative ai pozzi trivellati mostrano delle depressioni nella parte centrale della piana, in corrispondenza degli addensamenti di pozzi realizzati a seguito della forte espansione industriale.

L'andamento delle linee isopiezometriche è attualmente disponibile solo in formato cartaceo. Nuove elaborazioni possono però essere fatte a partire dai dati sui carichi piezometrici in formato digitale allegati.

Figura 21. Distribuzione carichi piezometrici



#### Variabilità spaziale della salinità nelle acque sotterranee

Lo studio idrogeochimico delle acque sotterranee circolanti nel sistema acquifero della piana alluvionale di Capoterra, condotto allo scopo di definire i fattori influenzanti la salinazione delle acque sotterranee della piana, ha dimostrato che le acque, pur presentando in genere una salinità non superiore ad 1 g/l, con valori superiori ai 2 g/l solo in pochi casi, mostrano una grande variabilità della composizione chimica percentuale a causa del sovrapporsi di diversi processi.

La salinità delle falde, pur presentando forti variazioni spaziali e stagionali, risulta globalmente maggiore nella falda freatica rispetto alla falda profonda.

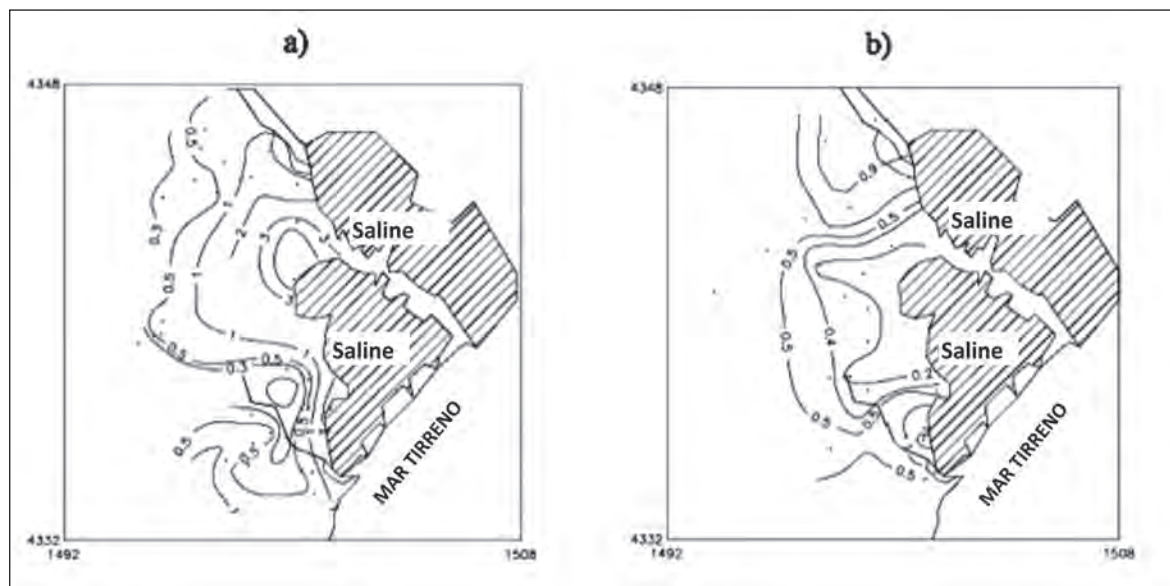
Processi di scambio ionico, che producono un eccesso di ioni  $\text{Na}^+$  a fronte di una perdita in  $\text{Ca}^{++}$  nelle acque, sono stati riscontrati in entrambe le falde, ad indicare la presenza di un processo attivo di intrusione marina negli acquiferi, precedentemente occupati da acque dolci. Tale dato è stato confermato dal ritrovamento di acque sotterranee con un rapporto di  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  superiore a quello dell'acqua di mare.

L'alto contenuto salino riscontrato nei pozzi scavati nell'acquifero superficiale, localizzati in prossimità dei bordi SE e NE delle saline è associato, come mostrato dai processi di scambio ionico  $\text{Ca}^{++}/\text{Na}^+$  in atto e dalla riduzione dei solfati, al miscelamento delle acque sotterranee con acque di origine marina che in questo caso sono però rappresentate dalle acque salate provenienti dalle saline. Lo stesso comportamento è visibile in modo apprezzabile nelle acque campionate in un pozzo trivellato vicino alla laguna. L'arricchimento in ioni rispetto al miscelamento teorico acqua dolce-acqua salata, mostrato dalla maggior parte dei campioni d'acqua prelevati sia dai pozzi scavati (falda freatica) che dai pozzi trivellati (falda profonda), è associato quindi al sovrapporsi di altri processi su quello attivo di intrusione marina (vedi paragrafo successivo circa gli "altri meccanismi di salinazione").

La ricostruzione delle isosaline, a partire dai valori di salinità misurati nelle acque durante i campionamenti del 1992-1993, ha mostrato che, nei mesi estivi, la salinità aumenta in prossimità della costa a seguito del sovraemungimento operato per l'irrigazione,

mentre rimane praticamente invariata a NE della piana, in prossimità delle saline e della laguna, nonostante gli emungimenti dovuti alla continua attività industriale.

**Figura 22. Distribuzione della salinità in isoaline (TDS g/l)**



L'andamento della salinità nell'acquifero confinato nel periodo piovoso ha mostrato che, nella parte centrale della piana la salinità rimane bassa, nonostante il sovraemungimento e le depressioni del livello idrodinamico da esso prodotte soprattutto per gli usi industriali, mentre aumenta nei bordi occidentali. Ciò è stato attribuito alla presenza nell'acquifero confinato multistrato, di due livelli acquiferi principali: il livello superiore, poco potente e di bassa permeabilità, verosimilmente alimentato dalle acque che defluiscono dal massiccio granitico-metamorfico, in cui, essendo il deflusso delle acque lento a causa della bassa permeabilità e del ridotto carico idraulico, risulta alto il tempo di residenza delle acque e quindi quello di contatto acqua-roccia, determinando un arricchimento delle acque in sali; il livello inferiore, più permeabile e, in quanto più produttivo, maggiormente utilizzato nella parte centrale, presenta invece un ricambio maggiore determinato dalle forti eduzioni per gli usi agricoli e industriali, e un'alimentazione tale da compensare facilmente le estrazioni.

L'andamento delle isosaline è disponibile solo in formato cartaceo. E' possibile però fare nuove elaborazioni a partire dai dati idrochimici in formato digitale allegati.

Non si hanno a disposizione dati sulla variazione delle caratteristiche proprie (temperatura, salinità, ossigeno disciolto, permeabilità) nella porzione di acquifero interessata dalla zona di transizione.

Altri meccanismi di salinizzazione delle falde (presenza di salinità "naturale" indotta da uso di pozzi in acquiferi profondi salini o parzialmente salini)

La salinazione delle falde nella piana di Capoterra è dovuta ad un processo attivo di intrusione di acqua di mare nei due acquiferi, superficiali e profondo, a cui si sovrappongono diversi altri processi.

Dagli studi idrogeochimici è risultato un arricchimento in ioni sodio e cloro nelle acque dolci della piana e nelle acque di provenienza granitica, che alimentano lateralmente



le falde idriche, dovuto al deposito di grandi quantitativi di sali, successivamente dilavati dalle acque meteoriche, da parte dello spray marino, trasportato dai forti venti regnanti nella regione, al quale si aggiunge il contributo dei sali direttamente provenienti dalle precipitazioni.

Un ulteriore contributo alla salinazione delle falde, in particolare di quella freatica, è dato dai processi di ridissoluzione dei sali depositati sulla superficie del suolo a causa dell'evaporazione delle piogge e delle acque di irrigazione nel periodo secco, e dai processi di dilavamento dei sali depositati sulla superficie del suolo, provenienti dalle lavorazioni svolte all'interno delle saline, e dei sali stoccati nei pressi delle vasche di evaporazione. Sono inoltre probabili processi di dissoluzione di sali naturalmente presenti nell'acquifero.

La ricostruzione delle isosaline, a partire dai valori di salinità misurati nelle acque durante i campionamenti del 1992-1993 ha mostrato che, nei mesi piovosi la salinità è più alta in prossimità delle saline e della laguna piuttosto che nei bordi occidentali della piana. Questo fatto è stato associato ad un importante effetto di trasporto dei sali dalle saline verso l'interno della piana da parte del vento, e all'infiltrazione di acque ricche di sali depositate per stoccaggio vicino alle saline stesse.

#### *Emungimento per uso irriguo*

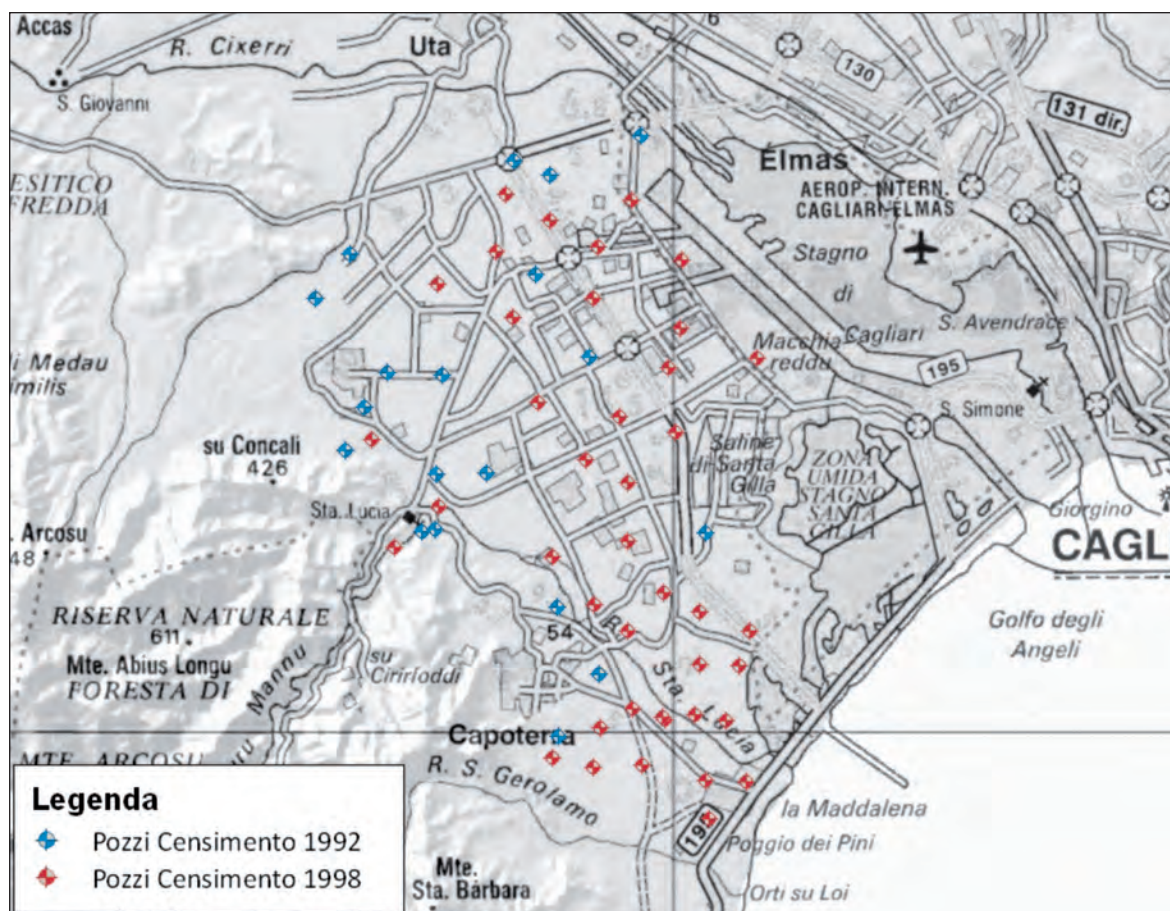
Dai dati in nostro possesso, relativamente alla determinazione dello spessore di acquifero impegnato nell'emungimento, risulta che la profondità dei pozzi trivellati varia da un minimo di 18 ad un massimo di 80 m, mentre quella dei pozzi scavati varia dai 3 ai 15 m. Sono disponibili due sezioni geologiche schematiche che, mettendo in relazione le informazioni dei sondaggi a disposizione, individuano i diversi strati acquiferi (E.Vernier, 1999).

Le risorse idriche, utilizzate a scopi irrigui sono provenienti dall'utilizzo di pozzi, di cui sono disponibili i dati provenienti da due censimenti, rispettivamente del 1992 e 1998 (tabella 6 e figura 23).

**Tabella 11. Numero pozzi ed acquifero di riferimento per i due censimenti effettuati del 1992 e 1998.**

Anno censimento	Acquifero	Area bacino idrografico Rio Santa Lucia (km <sup>2</sup> )	N. pozzi
1992	Superficiale	140	79
1992	Profondo	140	66
1998	Superficiale	140	25
1998	Profondo	140	17

Figura 23. Ubicazione dei pozzi insistenti su acquifero superficiale nell'area di Capoterra



Le aree di maggior rischio da un punto di vista idrogeologico sono quelle del settore Nord della piana, nella parte di maggior addensamento dei pozzi, in prossimità della Laguna di Santa Gilla, e del settore Est della piana, nella parte di maggior addensamento dei pozzi, limitrofa alle saline di Contivecchi; infine nella fascia costiera.

#### *Riepilogo e dati disponibili*

Si riportano in sintesi i dati disponibili recuperati ai fini di possibili ulteriori valutazioni:

1. Tipo di acquifero: un acquifero superficiale freatico più un acquifero profondo multistrato, localmente confinato o semiconfinato;
2. Conducibilità idraulica acquifero: è stata stimata, attraverso prove di portata, una conducibilità idraulica pari a  $2,11 \cdot 10^{-4}$  m/s per l'acquifero freatico e pari a  $6,79 \cdot 10^{-7}$  m/s per l'acquifero confinato;
3. Altezza del livello di falda rispetto al livello del mare: ricavabile dal data base pozzi recuperato;
4. Spessore dell'acquifero: ricavabile dalle sezioni geologiche allegate e dai dati stratigrafici deducibili dalle stratigrafie disponibili in formato cartaceo;
5. Definizione dei limiti dell'acquifero: per l'acquifero superficiale si può far riferi-

mento alla geologia disponibile in formato cartaceo, mentre per l'acquifero multi-falda non ci sono sufficienti dati a disposizione;

6. Portate emunte globalmente in media annua (dati al 1992):

Uso	Quantitativi (m3/a)
Uso irriguo <sup>1</sup>	663.000
Uso irriguo <sup>2</sup>	1.950.000
Uso industriale	1.103.000
Uso idropotabile	253.000

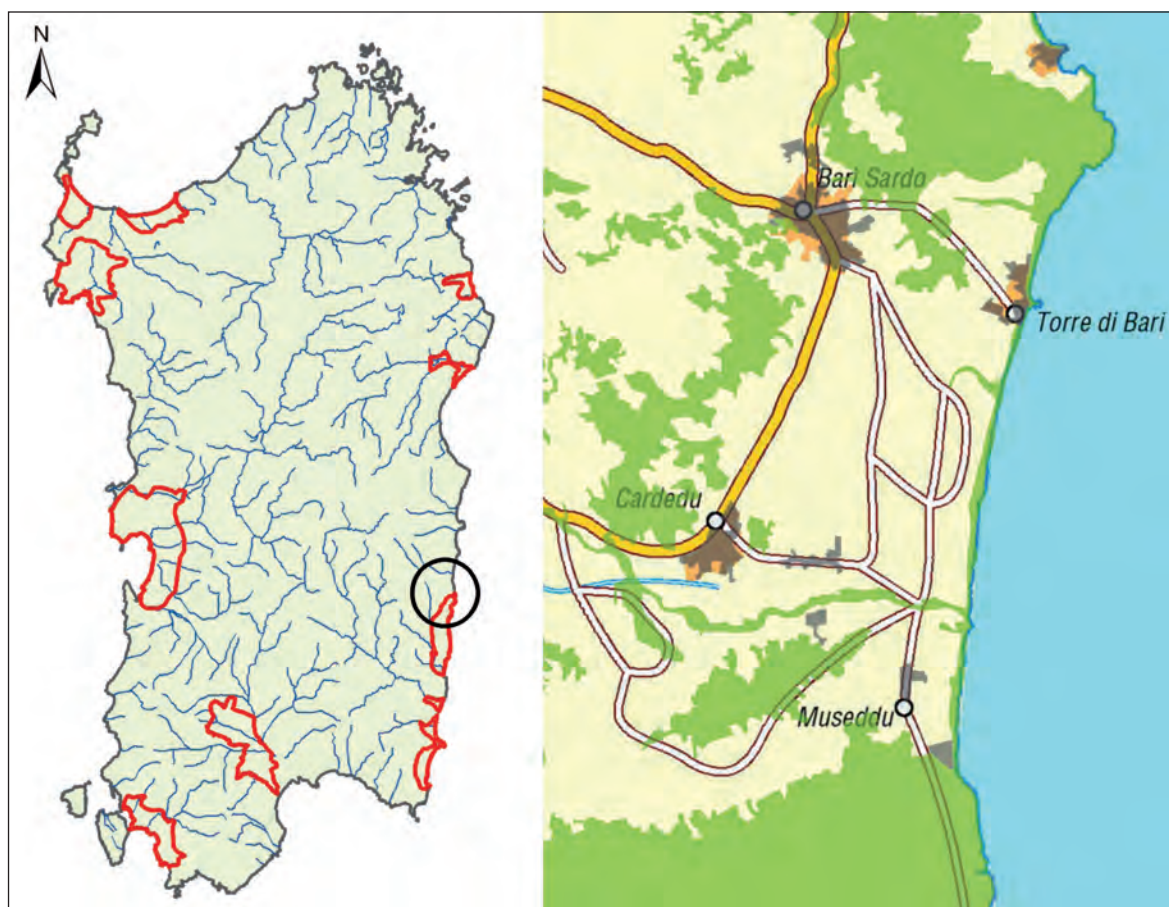
7. Pozzi assegnati ad ogni acquifero: ricavabile dal data base pozzi recuperato.

### 2.2.5 Area della piana alluvionale costiera della Marina di Cardedu

*Inquadramento e delimitazione delle aree interessate dal fenomeno*

La zona interessata dall'intrusione salina è la piana alluvionale costiera della Marina di Cardedu, situata nella costa centro-orientale della Sardegna (Ogliastra, figura 24).

**Figura 24. Inquadramento dell'area**



1 Quantitativo, al netto dell'evapotraspirazione potenziale, che ritorna in falda per infiltrazione

2 Quantitativo perso per evapotraspirazione

### Caratterizzazione del problema

La zona costiera del Comune di Cardedu, nonostante sia caratterizzata da una bassa densità abitativa, è stata sempre intensamente utilizzata a scopo agricolo e, negli ultimi tempi, è stata interessata da un notevole sviluppo turistico. Questo ha comportato un aumento della domanda d'acqua e, di conseguenza, un aumento degli emungimenti delle risorse idriche sotterranee (le uniche disponibili) e un conseguente aumento del rischio di intrusione marina, già favorito dalla riduzione della ricarica natura degli acquiferi a causa del persistere, negli ultimi anni, di un clima sempre più arido.

**Tabella 12. Stato e disponibilità dei dati raccolti**

DATI	STATO	DISPONIBILITÀ	NOTE
Ubicazione pozzi	sufficiente	no	39 pozzi disponibili
Portata emunta dai pozzi		no	
Livello piezometrico, conducibilità elettrica e ph misurati nei pozzi	sufficiente	Si (solo in formato cartaceo e non leggibile)	Sono disponibili le mappe del livello piezometrico e della conducibilità elettrica misurati nei pozzi
Definizione dell'acquifero interessato da ogni pozzo		no	
Utilizzo dei pozzi		no	
Andamento temporale della piezometrica		no	
Geometria degli acquiferi 2D		no	Ricavabile dalla geologia superficiale
Geometria degli acquiferi 3D		no	
Qualità delle acque di falda: principali anioni e cationi		no	
Qualità delle acque di falda: determinazione inquinanti		no	
Definizione delle aree contaminate da intrusione marina e posizione cuneo salino		no	
Produttività degli acquiferi = $R/A$ , dove R è la ricarica attiva (riserve regolatrici) e A è la superficie affiorante dell'acquifero (andamento nell'annata media)		no	

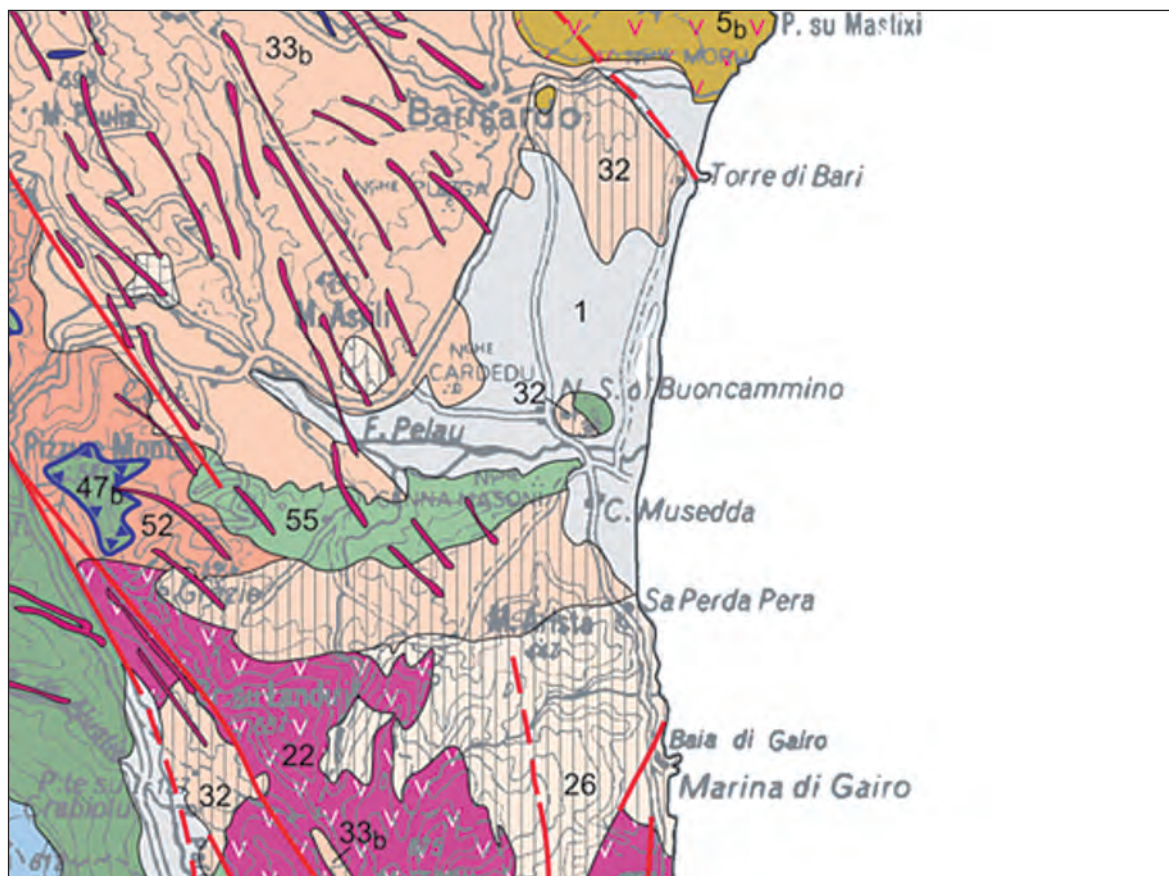
### *Aspetti geologici, idrogeologici delle aree interessate dal fenomeno.*

#### **Lineamenti geologici**

Dal punto di vista geologico, l'area in studio (figura 25) è caratterizzata da un basamento paleozoico, la cui profondità varia da qualche metro (in alcuni punti affiora costituendo degli "isolotti") fino presumibilmente a qualche decina di metri (e localmente fino a 100 m), ricoperto da sedimenti alluvionali di età quaternaria. Il basamento paleozoico è costituito per la maggior parte da metarenarie e metasiltiti (Formazione di San Vito), da metavulcaniti (Formazione di Serra Tonnai) e da formazioni granitiche che affiorano in maniera estesa nella parte meridionale dell'area e costituiscono in forma maggioritaria la vicina piattaforma continentale. La parte più superficiale del basamento (di circa 4-5 metri) è molto alterata e fratturata favorendo una buona circolazione del flusso sotterraneo. La copertura alluvionale è rappresentata da alluvioni terrazzate antiche, alluvioni recenti,

depositi detritici pedemontani e depositi di ambiente fluvio-lacustre. Le alluvioni terrazzate antiche (Pleistocene) sono composte da materiali eterogenei a varia granulometria con matrice limo-argillosa.

**Figura 25. Inquadramento geologico schematico dell'area** (da *Cartografia Geologica della Sardegna*, Carmignai et alii, 1996)



**LEGENDA:** 1 – Ghiaie, sabbie, limi ed argille sabbiose dei depositi alluvionali, colluviali, eolici e litorali; 22 – rioliti e riolodaciti in espandimenti ignimbrici e colate; 26 – Leucograniti equigranulari; 32 – Granodioriti tonalitiche; 33b – tonaliti; 47 – Metarenarie, quarziti e filliti; 52 – Metavulcaniti intermedie o raramente basiche, meta grovacche (Formazione di Serra Tonnai); 55 – Metarenarie micacee e quarziti alternate a metapeliti (Formazione di S.Vito)

### Lineamenti idrogeologici

Dal punto di vista idrogeologico, i depositi alluvionali terrazzati assieme ai depositi pedemontani costituiscono dei terreni a permeabilità medio-alta. Le alluvioni recenti (Olocene) sono costituiti da materiali in grani a tessitura medio-grossa (sabbie e ghiaie) di natura scistosa e granitica. Queste costituiscono i terreni ad alta permeabilità e rappresentano l'acquifero principale della zona. Le acque ospitate in questo acquifero vengono utilizzate per l'agricoltura e per l'approvvigionamento idrico delle piccole popolazioni rurali e degli insediamenti turistici.

A partire dalle misure effettuate nei 39 pozzi disponibili in un'area di circa 6 km<sup>2</sup>, la profondità dell'acqua sotterranea, varia approssimativamente da non più di 9 metri dalla superficie del terreno, nella zona centrale della pianura, fino a 2 metri, in prossimità della linea di costa.

### *Aree interessate da intrusione marina laterale e dal basso e dinamiche attuali e future*

La determinazione della forma e della estensione del cuneo di intrusione salina è stata effettuata attraverso 120 sondaggi elettromagnetici nel dominio di frequenze, regolarmente distribuiti su un'area di quasi 6 km<sup>2</sup>. Sono state quindi elaborate delle mappe che mostrano la conduttività elettrica apparente alle profondità di 7,5 m, 15 m, 30 m e 60 m.

Nella parte superficiale della pianura alluvionale (7,5 m) sono stati sostanzialmente misurati valori di conduttività bassi, segno della assenza di acque salate in tutta l'area, ad eccezione di un'area limitata legata ad un gruppo di abitazioni, della stessa fascia costiera, della piccola zona della laguna e in prossimità della spiaggia, dove i valori di conduttività sono risultati moderati. A maggior profondità (15 m) si riconosce una lingua di intrusione salina in corrispondenza dell'area dove è cospicuo l'emungimento di acqua sotterranea da diversi pozzi. La conduttività sotto la laguna tende a diminuire, segno della presenza di livelli argillosi che impediscono all'acqua salata di penetrare in profondità. La anomalia conduttiva tende a spostarsi verso nord-est. A maggior profondità (30 e 60 m) tutti i fenomeni descritti tendono ad accentuarsi. I massimi di conduttività sono tuttavia di maggiore intensità e ampiezza in corrispondenza del piccolo abitato dove si concentrano le captazioni di acqua sotterranea dell'acquifero alluvionale, segno della presenza di acque salate.

La direzione da cui proviene l'intrusione salina sembra essere la direzione NE, poiché verso tale direzione si riscontra un aumento di conduttività. Dalle mappe si riscontra inoltre la presenza di due diversi pennacchi di intrusione, chiaramente dovuti all'influenza di un sovraemungimento delle acque sotterranee. L'aumento di conduttività verso nord-est è considerato preoccupante a causa del pompaggio per l'approvvigionamento di acqua potabile nel pozzo ESAF (Società di gestione dell'acqua potabile).

Il confronto con i dati di conducibilità elettrica misurati nei pozzi conferma le conclusioni tratte dai risultati delle prospezioni geofisiche.

Non si hanno a disposizione dati sulla variazione delle caratteristiche proprie (temperatura, salinità, ossigeno disciolto, permeabilità) nella porzione di acquifero interessata dalla zona di transizione, né su altri meccanismi di salinizzazione delle falde (presenza di salinità "naturale" indotta da uso di pozzi in acquiferi profondi salini o parzialmente salini)

### *Emungimento per uso irriguo*

Le risorse idriche, utilizzate a scopi irrigui sono provenienti dall'utilizzo di pozzi; dalle informazioni raccolte si desume l'esistenza di una rete di monitoraggio di 39 pozzi in un'area di circa 6 km<sup>2</sup>, di cui però non si hanno dati circa la localizzazione, la profondità, ecc. Le aree di maggior rischio dal punto di vista dell'intrusione marina sono localizzate nella parte nord-orientale della piana.

### *Riepilogo e dati disponibili*

Si riportano in sintesi i dati disponibili recuperati ai fini di possibili ulteriori valutazioni:

1. Tipo di acquifero: un acquifero superficiale freatico.
2. Conducibilità idraulica acquifero: dato non disponibile. Esiste unicamente una mappa della conducibilità misurata nei pozzi.

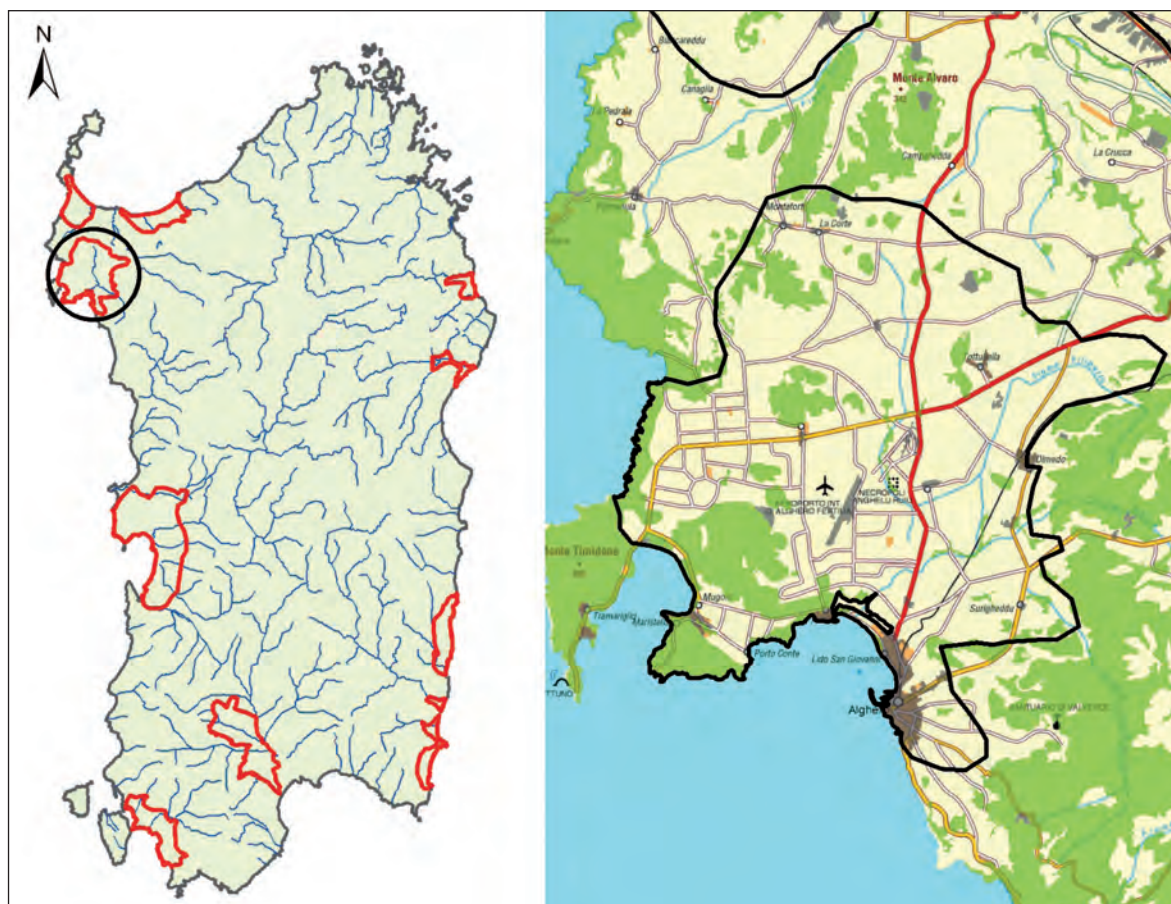
3. Altezza del livello di falda rispetto al livello del mare: dato non disponibile. Esiste solo una carta dei livelli piezometrici misurati nei pozzi.
  4. Spessore dell'acquifero: dato non disponibile.
  5. Definizione dei limiti dell'acquifero: non completa, in parte deducibile dalla carta geologica.
  6. Portate emunte globalmente in media annua (mc): dato non disponibile.
  7. Pozzi assegnati ad ogni acquifero: dato non disponibile.
- Informatizzazione: non sono disponibili dati su file.

### 2.2.6 Area della piana alluvionale costiera e dei rilievi dell'area della Nurra

#### *Inquadramento e delimitazione delle aree interessate dal fenomeno*

La zona di interesse, ubicata nella Sardegna Nord occidentale, nel territorio della provincia di Sassari, è compresa tra le coordinate UTM 4.452.964 N e 4.491.915 N di latitudine e 448.608 E e 492.792 E di longitudine (figura 26). Il bacino studiato ha un'estensione di circa 400 km<sup>2</sup> e ricade nei territori comunali di Alghero, Ittiri, Olmedo, Putifigari, Sassari, Uri e Villanova Monteleone. Esso è compreso nei Fogli IGM, in scala 1:50.000, n. 440, 441, 458, 459, 478 e 479. I dati riportati nella presente scheda sono stati estratti dagli studi compiuti per il progetto RIADE [Ghiglieri et Al., 2006] [www.riade.net].

**Figura 26. Inquadramento dell'area**



### Caratterizzazione del problema

Nell'area in esame sono stati individuate cinque unità idrogeologiche, meglio identificate nel seguito. Le quote piezometriche sono in generale decrescenti in direzione dello stagno e della costa, sia per gli acquiferi freatici sia per quelli in pressione. Sono stati rilevati picchi di conducibilità elettrica attribuibili in massima parte al chimismo dei litotipi di circolazione, con valori elevati in corrispondenza dei livelli gessosi del Triassico, delle marne del Cretaceo e delle vulcaniti alterate da circolazione idrotermale, alternati a repentini abbassamenti in corrispondenza del calcare dolomitico del Giurassico. In prossimità dello stagno del Calich si rileva un'area interessata da fenomeni di intrusione salina con piezometriche depresse e conducibilità elettriche elevate.

**Tabella 13. Stato e disponibilità dei dati raccolti**

DATI	STATO	DISPONIBILITÀ	NOTE
Ubicazione pozzi	buono	si	
Portata emunta dai pozzi	Insufficiente in generale. Sui pozzi gestiti dall'EAF ed utilizzati per usi civili si hanno dati attendibili sui prelievi medi	si	Il dato è stimabile con una certa approssimazione Sono state fatte stime indirette sulla base dell'uso del suolo (1:5000) e quindi sui fabbisogni idrici di ogni coltura. L'informazione è integrata dai dati sui consumi idrici rilevati dal Consorzio di bonifica della Nurra
Livello piezometrico, conducibilità elettrica e ph misurati nei pozzi	molto buono	si	Sono disponibili i dati del censimento e tre monitoraggi successivi
Definizione dell'acquifero interessato da ogni pozzo	molto buono	si	
Utilizzo dei pozzi	ottimo	si	L'utilizzo è stato rilevato durante il censimento
Andamento temporale della piezometrica	buono	si	Dal 2003 al 2005
Geometria degli acquiferi 2D	molto buono	si	
Geometria degli acquiferi 3D	sufficiente	si	
Qualità delle acque di falda: principali anioni e cationi	molto buono	si	.
Qualità delle acque di falda: determinazione inquinanti	molto buono	si	
Definizione delle aree contaminate da intrusione marina e posizione cuneo salino	sufficiente	si	Le aree interessate da contaminazione marina sono deducibili dall'analisi delle linee di isoconducibilità elettrica integrate dalle piezometriche e dalle analisi chimiche. Non si hanno dati sulla posizione del cuneo salino.
Produttività degli acquiferi = $R/A$ , dove R è la ricarica attiva (riserve regolatrici) e A è la superficie affiorante dell'acquifero (andamento nell'annata media)	molto buono	si	Il dato è stato calcolato



*Aspetti geologici, idrogeologici delle aree interessate dal fenomeno.*

### **Lineamenti tettonici e geologici generali**

All'interno del bacino idrografico si distinguono due grandi aree: la Nurra di Alghero, con paesaggi pianeggianti nella porzione centro settentrionale del bacino; l'altra, costituita da paesaggi collinari che da Alghero si spingono verso Villanova Monteleone, occupando la parte meridionale del bacino.

La Nurra costituisce un alto strutturale delimitato verso est da un semigraben miocenico (Bacino di Porto Torres). I depositi miocenici del semi-graben trasgrediscono, con rapporti di onlap, questo alto strutturale nel quale i terreni più antichi affiorano progressivamente verso ovest. La trasgressione si realizza al disopra di vulcaniti oligo-aquitane e talvolta direttamente sopra le coperture carbonatiche mesozoiche, ad ovest delle quali, sulla costa, affiora il basamento metamorfico varisico. Verso sud la regione confina con il Mejlògu: un'area caratterizzata da plateaux ignimbrici miocenici variamente incisi. Ad ovest la Nurra è delimitata dal Bacino Balearico ed a nord dal Golfo dell'Asinara.

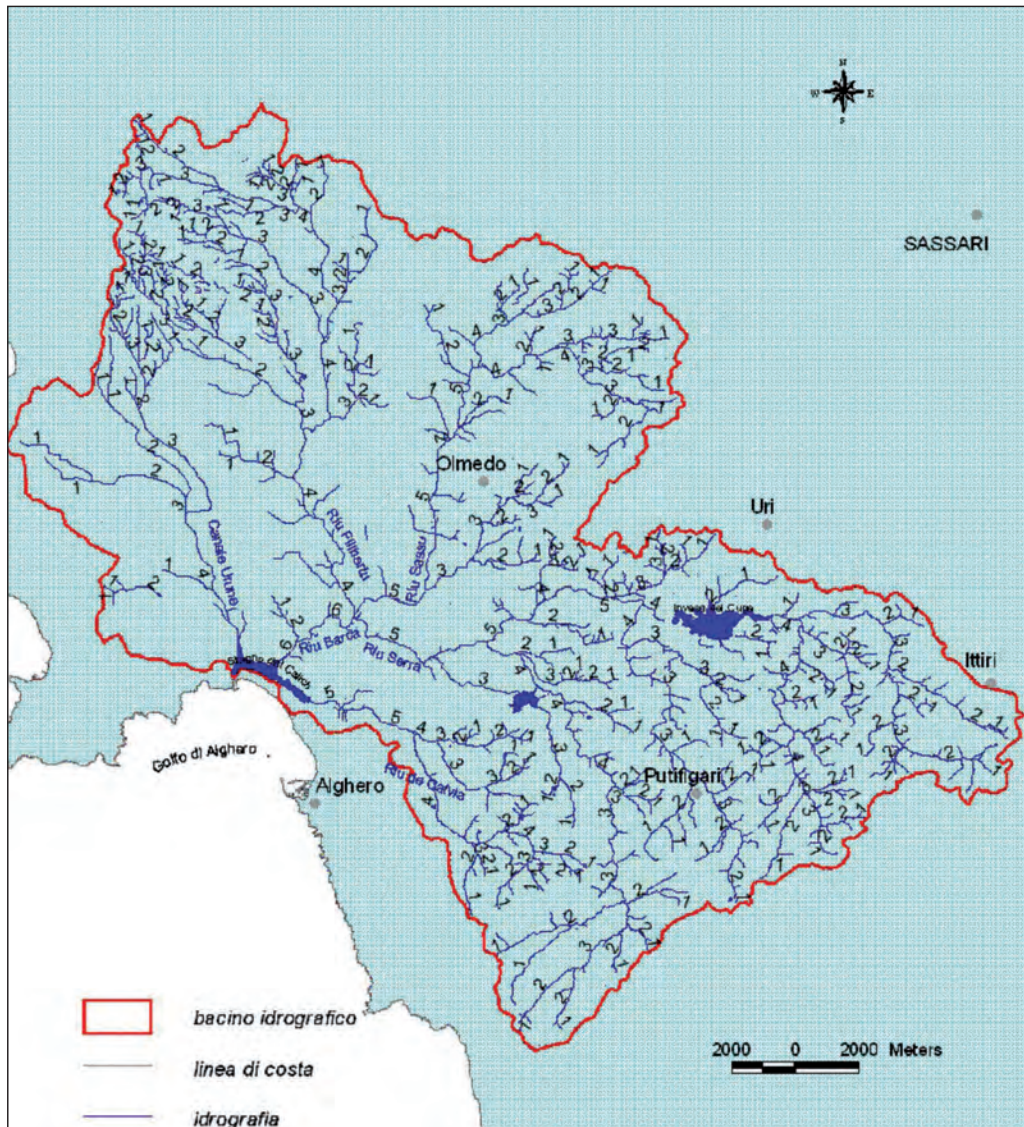
L'attuale assetto strutturale, che controlla la distribuzione e la giacitura dei terreni in affioramento, si è delineato con molta probabilità a partire dall'Oligocene-Miocene inferiore, anche se alcuni tratti strutturali, che interessano le coperture mesozoiche, possono essere riferiti a fasi tettoniche del Cenozoico inferiore o del Mesozoico. La grande varietà di litologie coinvolte, in una strutturazione solo apparentemente priva di complessità, rende problematica la ricostruzione della circolazione idrica sotterranea e le geometrie dei serbatoi. Perciò il lavoro, oltre ad un'analisi dei dati di letteratura editi ed inediti, si è basato su un'attenta lettura delle stratigrafie disponibili da sondaggi per scopi geognostici e sondaggi minerari [Progemisa S.p.A., Ersat, Genio Civile] e su rilievi originali di campagna integrati da indagini geofisiche.

### **Lineamenti idrologici e idrogeologici**

Nell'area in studio, la vicinanza dei rilievi alla costa non permette la formazione di corsi d'acqua di una certa importanza; le precipitazioni infatti si raccolgono in modesti compluvi e defluiscono direttamente a mare. In generale il reticolo idrografico del bacino è impostato con orientamento verso il Golfo di Fertilia. Le linee principali di deflusso sono a raggiera e solo in parte legate a direttrici tettoniche. L'area è percorsa dai seguenti fiumi principali: Il Rio Barca, con i suoi principali affluenti (Riu Filibertu, Riu Sassu e Riu Serra), il Riu De Calvia e il Canale Urune.

Questi, alimentati da una serie di torrenti, confluiscono nello stagno costiero del Calich. Sono tutti a carattere torrentizio stagionale, fatta eccezione del tratto finale del Rio Barca, il quale, avendo in questa zona il fondo dell'alveo ad una quota minore del livello medio del mare, risente, nei periodi estivi, dell'influenza della marea (figura 27).

Figura 27. Idrografia e classificazione gerarchica delle aste fluviali del Bacino del Rio Cuga – Nurra (da Ghiglieri et Al., 2006)



Le precipitazioni sono mediamente pari a 600 mm/a. All'interno del bacino sono presenti due invasi artificiali: corrispondenti alle dighe del Cuga e di Surigheddu.

Il territorio in esame presenta una serie stratigrafica quasi completa che va dal Paleozoico ai terreni più recenti del Quaternario. Mediante rilievi geologici, strutturali, prospezioni geofisiche ed uno studio idrogeochimico di dettaglio è stato realizzato il modello idrogeologico concettuale (Ghiglieri et al. 2006, Ghiglieri et al 2007).

Da un punto di vista idrogeologico, sono state identificate 5 Unità Idrogeologiche principali che a loro volta sono state suddivise in 7 Complessi Idrogeologici o Acquiferi, caratterizzati da livelli di produttività medio-alta:

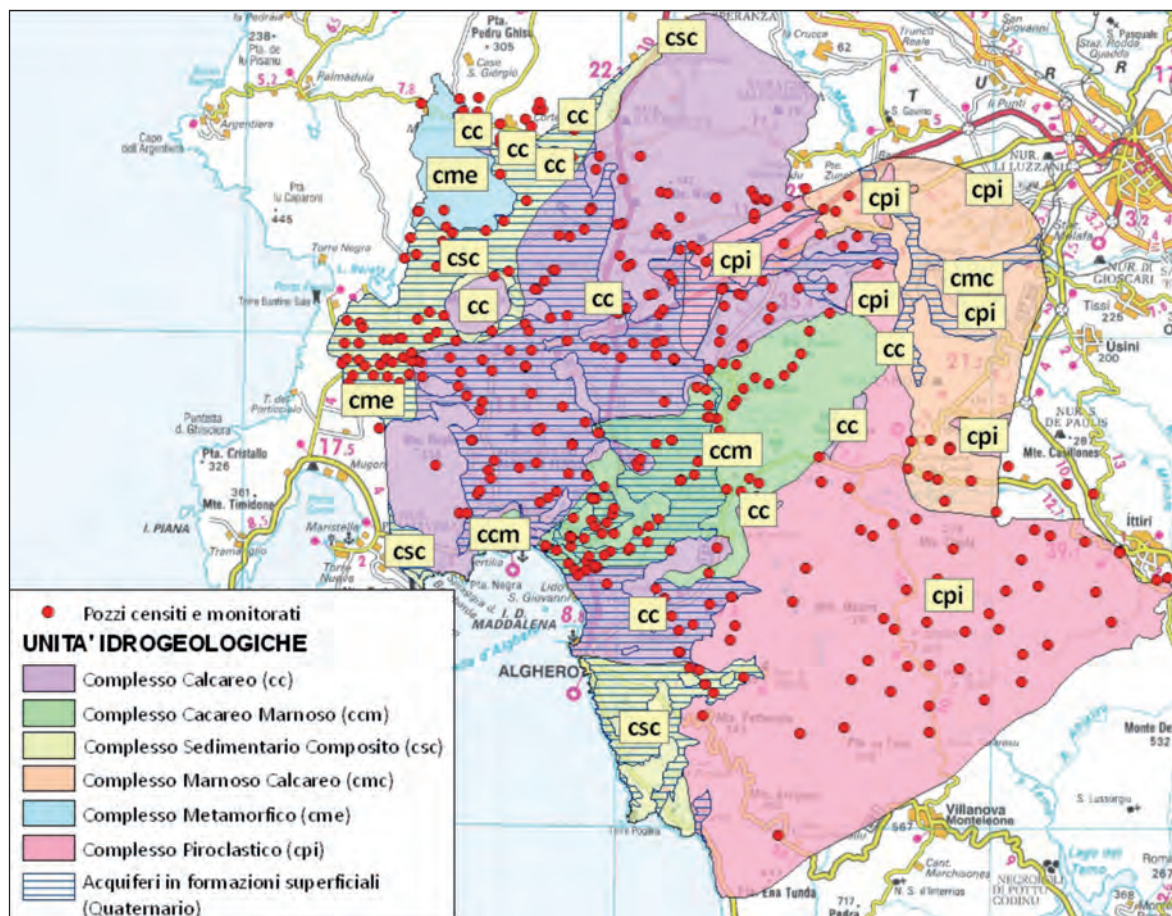
- acquifero ospitato nelle metamorfici del Paleozoico, (cme) – molto modesto con flussi sub-superficiali, non produttivo,  $K=1 \times 10^{-11}$ ;
- acquifero ospitato nelle formazioni del Trias (csc) – complesso sedimentario com-

posito (dolomie, marne, gessi, argille, calcari dolomitici etc.), scarsamente produttivo;  $K=1 \times 10^{-6}$ ;

- acquifero ospitato nelle formazioni del Giura (cc) – complesso calcareo (calcari, calcari dolomitici, marne, ecc.), molto produttivo;  $K=1 \times 10^{-4}$ ;
- acquifero ospitato nelle formazioni del Cretaceo (ccm) – complesso calcareo marnoso (calcari, calcari dolomitici, marne, ecc.), mediamente produttivo;  $K=1 \times 10^{-5}$ ;
- acquifero ospitato nel complesso piroclastico Oligo-miocenico (cpi) (rioliti, riodaciti, tufi, ecc.), mediamente produttivo;  $K=1 \times 10^{-8}$ ;
- acquifero ospitato nei depositi marini del Miocene (cme) (sequenza di marne e calcari), che affiorano marginalmente nell'area del bacino idrogeologico. Per il bacino idrogeologico in studio, tale acquifero non costituisce una falda importante, mentre è da considerarsi strategico per la zona del sassarese;  $K=1 \times 10^{-8}$
- acquifero ospitato nelle alluvioni del Quaternario – complesso sedimentario recente, scarsamente produttivo;  $1 \times 10^{-6} \leq K \leq 1 \times 10^{-4}$ .

Lo schema idrogeologico, riportato in figura 28, rappresenta anche l'ubicazione dei pozzi censiti rispetto ai complessi idrogeologici identificati (Ghiglieri et al. 2006; Ghiglieri et al. 2007).

**Figura 28. Carta idrogeologica dell'area della Nurra (modificata da Ghiglieri et Al., 2006)**



## Calcolo dei volume di ricarica di falda per i vari acquiferi

La ricarica media idrogeologica (AHR), detta anche riserva regolatrice, è stata calcolata per ogni unità idrogeologica, definita nella sua estensione geografica. Il valore di AHR rappresenta il volume medio anno che marca il limite delle riserve di acqua sotterranee oltre il quale si vanno ad intaccare le riserve permanenti (non ricaricabili) di falda, creando così effetti depressivi della superficie piezometrica che possono portare, specie nelle aree costiere, in notevoli fenomeni di intrusione marina: questi volumi rappresentano quindi il limite di sostenibilità per lo sfruttamento degli acquiferi

Nella seguente tabella 7 sono riportate le riserve regolatrici (mc/anno) per ciascuna unità idrogeologica, calcolate all'interno del bacino idrogeologico (da Ghiglieri, Progetto RIADE 2006, modificata).

**Tabella 14. Valori medi di ricarica di falda sotterranea per i vari acquiferi delle Unità Idrogeologiche calcolati per il periodo 1961-2005**

Unità Idrogeologica	Valori di ricarica (m3/anno)
<b>Complesso Metamorfico (cme)</b>	<b>228.839,1</b>
Complesso Sedimentario Composito (csc)	3.456.057,1
Complesso Calcareo (cc)	11.435.442,4
Complesso Calcareo Marnoso (ccm)	3.659.451,6
Complesso Piroclastico (cpi)	16.356.185,3
Complesso Marnoso Calcareo (cmc)	2.742.091,5
Totale	37.878.067,0

### *Aree interessate da intrusione marina laterale e dal basso e dinamiche attuali e future*

I fenomeni di intrusione marina sono stati riscontrati nell'unità idrogeologica del Quaternario, in prossimità dello stagno Calich, zona in cui le piezometriche sono depresse e le conducibilità elettriche elevate.

Non si hanno dati sulla variazione delle caratteristiche proprie (temperatura, salinità, ossigeno disciolto, permeabilità) nella porzione di acquifero interessata dalla zona di transizione.

### *Altri meccanismi di salinizzazione delle falde (presenza di salinità "naturale" indotta da uso di pozzi in acquiferi profondi salini o parzialmente salini)*

L'intrusione salina è limitata alla fascia costiera; le analisi chimiche confermano che la diffusa salinizzazione riscontrata negli acquiferi non è, nella maggior parte dei casi, ricollegabile all'azione dell'acqua di mare.

La salinizzazione è attribuibile a processi di interazione acqua-roccia, p.e. alla soluzione di rocce di origine evaporitica (Acquifero del Trias, presente nel settore nord-occidentale del bacino idrogeologico). Infatti, le acque sotterranee prelevate da questo acquifero, dunque a contatto con tali formazioni, contengono grandi quantità di sali e solfati. Le conducibilità appaiono piuttosto elevate in corrispondenza del settore sud-orientale del bacino, ovvero nord-occidentale dell'altopiano ignimbrico, ove si supera abbondantemente il valore di 4000 S/cm. Una simile anomalia trova spiegazione nel litotipo di circolazione

fortemente modificato da una diffusa idrotermalità che si caratterizza per intensi fenomeni di idrolisi dei silicati.

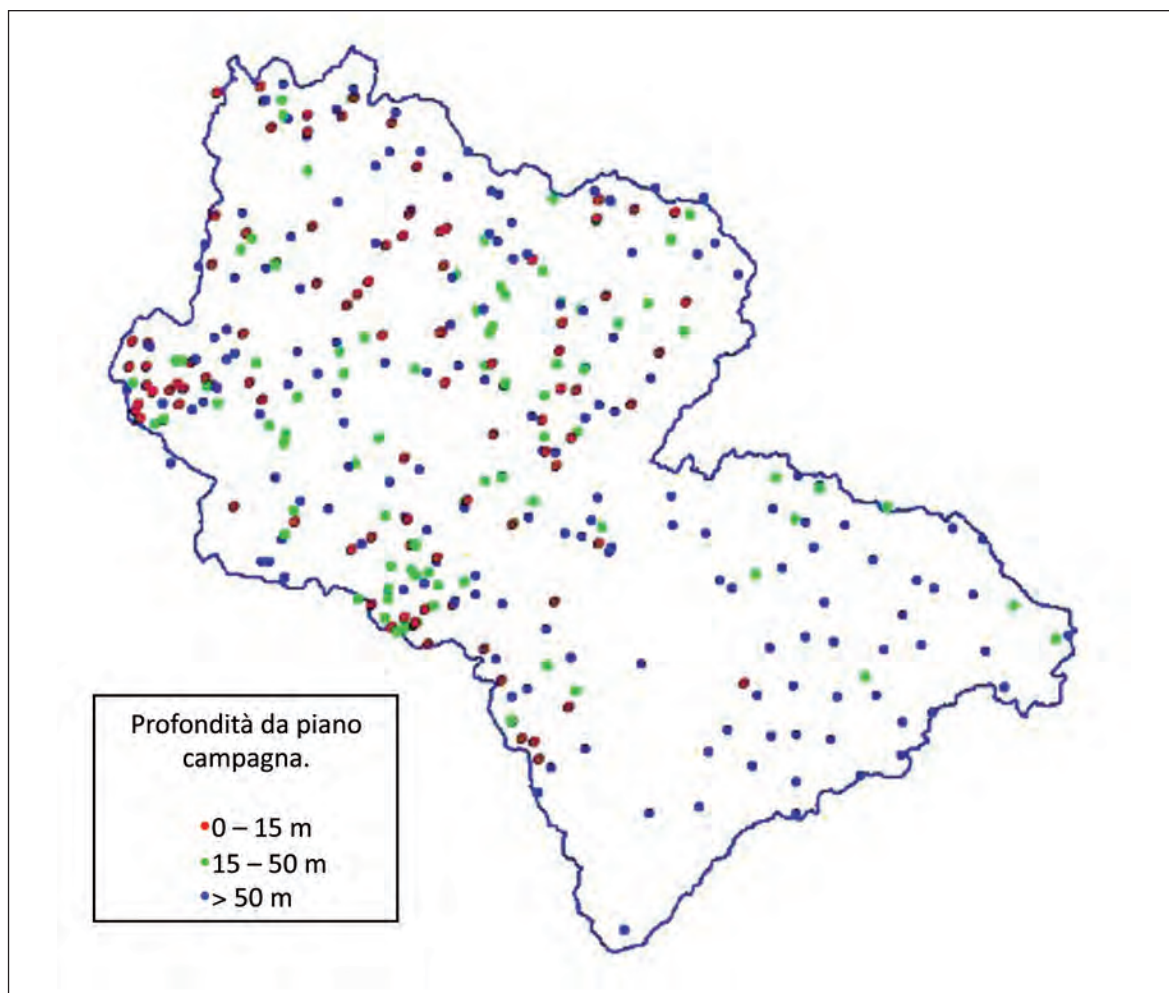
#### *Emungimento per uso irriguo*

Per quanto riguarda la determinazione dello spessore di acquifero impegnato nell'emungimento, dai dati elaborati risulta che la profondità massima dei pozzi, a seconda dell'acquifero, varia da 150 a 220 m.

Le acque sotterranee, in parte utilizzate a fini irrigui, sono emunte attraverso i pozzi, che sono stati censiti per un total di 365; tai pozzi insistono su diverse unità idrogeologiche, a seconda della loro profondità (figura 29). Le acque fornite dal Consorzio di Bonifica della Nurra interessano solo la parte pianeggiante dell'area ; l'invaso del Cuga, interno all'area in esame, è gestito dal Consorzio stesso.

All'interno dell'area di interesse è presente anche l'invaso Surigheddu, gestito dall'ER-SAT e attualmente non utilizzato.

**Figura 29. Mappatura dei pozzi censiti (Ghiglieri et Al., 2006)**



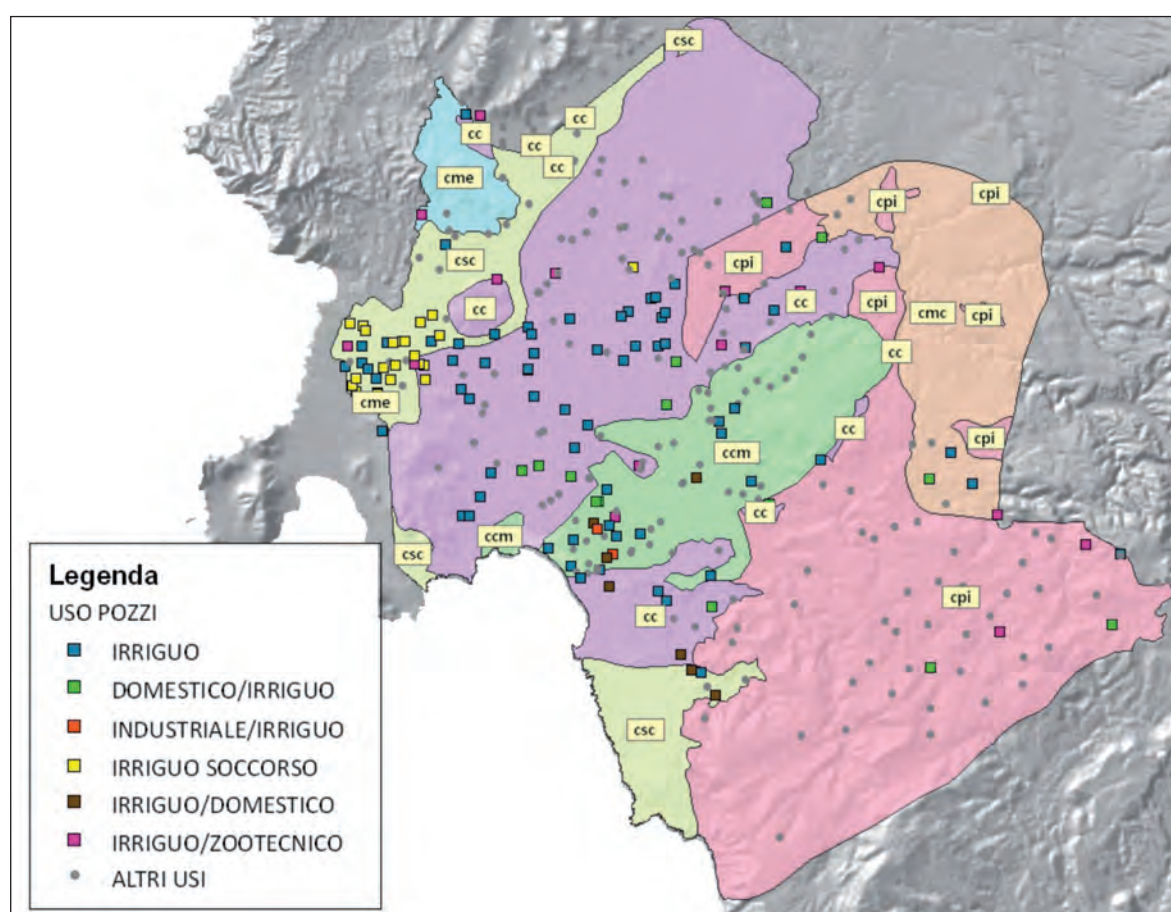
Tra quelli censiti, sono stati selezionati i seguenti pozzi (tabella 11) e sottoposti a monitoraggio

**Tabella 15. Numero pozzi per unità e formazione geologica scelti per il monitoraggio**

Formazione	Numero pozzi
Cretaceo	6
Giurassico	23
Trias	10
Complesso vulcanico oligo-miocenico	9
Quaternario	3

In base al censimento dei pozzi, è stato possibile inoltre identificare l'uso principale e/o prevalente, come riportato in figura 30.

**Figura 30. Uso principale e/o prevalente per fini riigui dei 365 pozzi censiti nell'area della Nurra.**



*Aree di maggior rischio dal punto di vista dell'intrusione marina*

L'area più a rischio è la fascia costiera, in corrispondenza dell'acquifero superficiale del Quaternario, in particolare l'area limitrofa dello stagno Calich che, come già detto, è l'unica parzialmente interessata dall'intrusione marina. Attualmente non sono segnalati fenomeni di contaminazione marina negli acquiferi carbonatici, ma le condizioni idrogeologiche di tali acquiferi sono tali che, in occasione di particolari stress climatici (siccità ecc.) che dovessero eventualmente verificarsi, possono essere facilmente innescati fenomeni di

intrusione marina, la cui propagazione sarebbe alquanto rapida. Per questa ragione, l'area è comunque da considerarsi a rischio.

### *Riepilogo e dati disponibili*

Si riportano in sintesi i dati disponibili recuperati ai fini di possibili ulteriori valutazioni:

#### Tipo di acquifero

- acquifero ospitato nelle formazioni del Trias: confinato;
- acquifero ospitato nelle formazioni del Giura: confinato;
- acquifero ospitato nelle formazioni del Cretaceo: confinato;
- acquifero ospitato nel complesso piroclastico Oligo-miocenico: confinato;
- questi acquiferi possono essere considerati freatici nelle aree di alimentazione;
- acquifero ospitato nelle alluvioni del Quaternario: freatico.

Conducibilità idraulica acquifero: come specificato nel paragrafo “lineamenti idrologici ed idrogeologici”

- Altezza del livello di falda rispetto al livello del mare: ricavabile dal data base pozzi del progetto RIADE.
- Spessore dell'acquifero: non si hanno dati certi sugli spessori dei vari acquiferi, ma possono essere ricavati dalle sezioni e dalle stratigrafie.
- Definizione dei limiti dell'acquifero: in caso di sovrapposizione di due acquiferi si è considerato quello di maggiore importanza dal punto di vista idrogeologico
- Portate emunte globalmente in media annua (mc): il dato è stimabile con una certa approssimazione. Sono state fatte stime indirette sulla base dell'uso del suolo (1:5000) e quindi sui fabbisogni idrici di ogni colture. L'informazione è integrata dai dati sui consumi idrici rilevati dal Consorzio di bonifica della Nurra. Sui pozzi gestiti dall'EAF ed utilizzati per usi civili si hanno dati attendibili sui prelievi medi
- Pozzi assegnati ad ogni acquifero: si veda il paragrafo relativo alla ubicazione pozzi e reti di monitoraggio.
- Informatizzazione: Tutti i dati sono disponibili su file

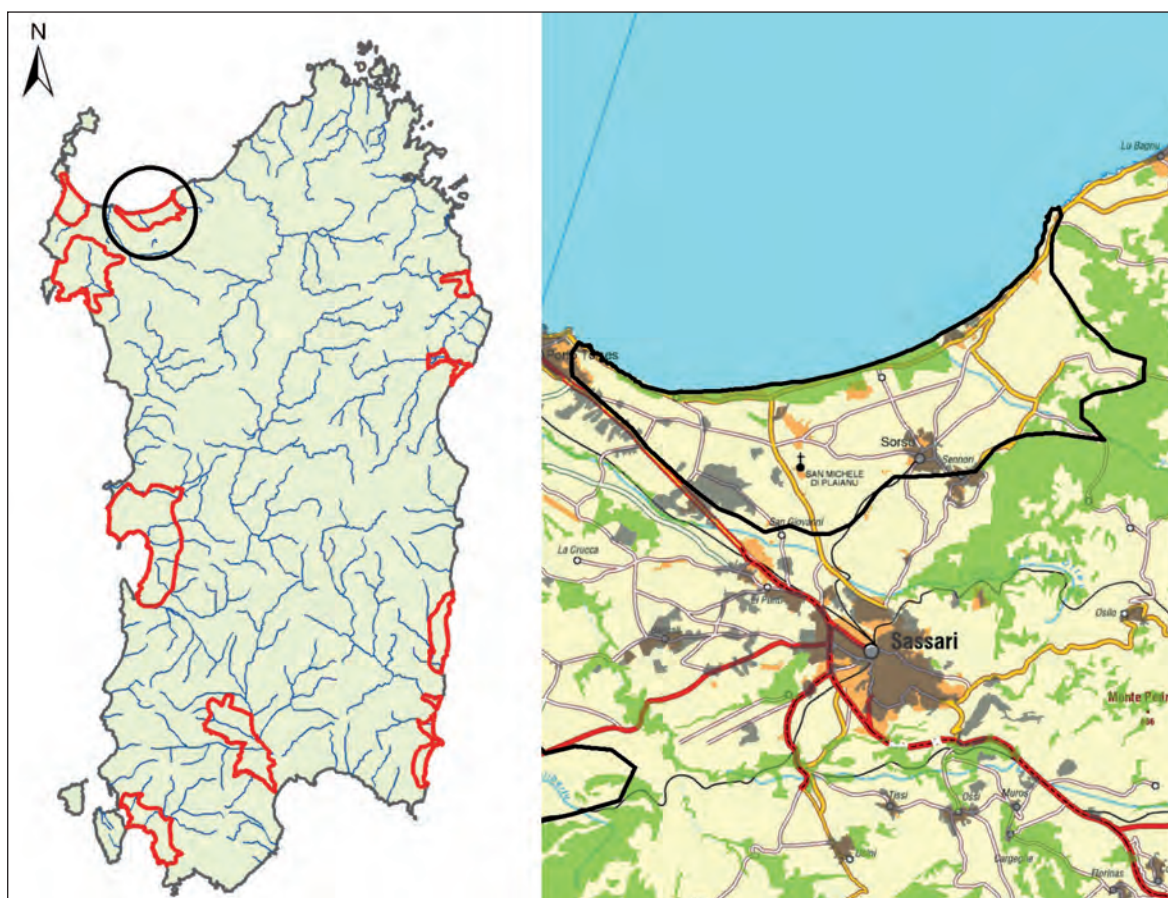
## 2.2.7 Area della piana alluvionale e terrazzi di Porto Torres (SS)

### *Inquadramento e delimitazione delle aree interessate dal fenomeno*

L'area in studio (figura 31), situata in prevalenza nel Comune di Sorso, si estende per circa 100 km<sup>2</sup> nella piana Turritana, sita nella Sardegna nord-occidentale. Essa si estende parallelamente alla costa per circa 20 km ed è larga circa 4-5 km. Si affaccia nel Golfo dell'Asinara tra i promontori di Abbacurrente e Punta Tramontana.

Nella nuova carta topografica I.G.M. in scala 1:25.000 è compresa, per la maggior parte, nel foglio 441 sez. "Marina di Sorso", ma alcune zone ricadono all'interno dei fogli 441 sez. "Porto Torres", 459 sez. "Sassari", e 459 sez. "La Crucca".

**Figura 31. Inquadramento dell'area**





### *Caratterizzazione del problema*

La crisi industriale ha portato nell'area ad un ritorno all'agricoltura. Si è inoltre avuta una rapida urbanizzazione, dovuta anche al crescente uso turistico della fascia costiera, specialmente nella zona orientale, al di là del fiume Silis.

Le acque per uso irriguo sono emunte dai pozzi, in quanto non esiste un collegamento ad una rete.

Condizioni favorevoli dal punto di vista geomorfologico e idrogeologico, unite ad una corretta pianificazione dell'uso del territorio, hanno evitato che la salinazione progredisse nel tempo (Ardau et al., 1994).

**Tabella 16. Stato e disponibilità dei dati raccolti**

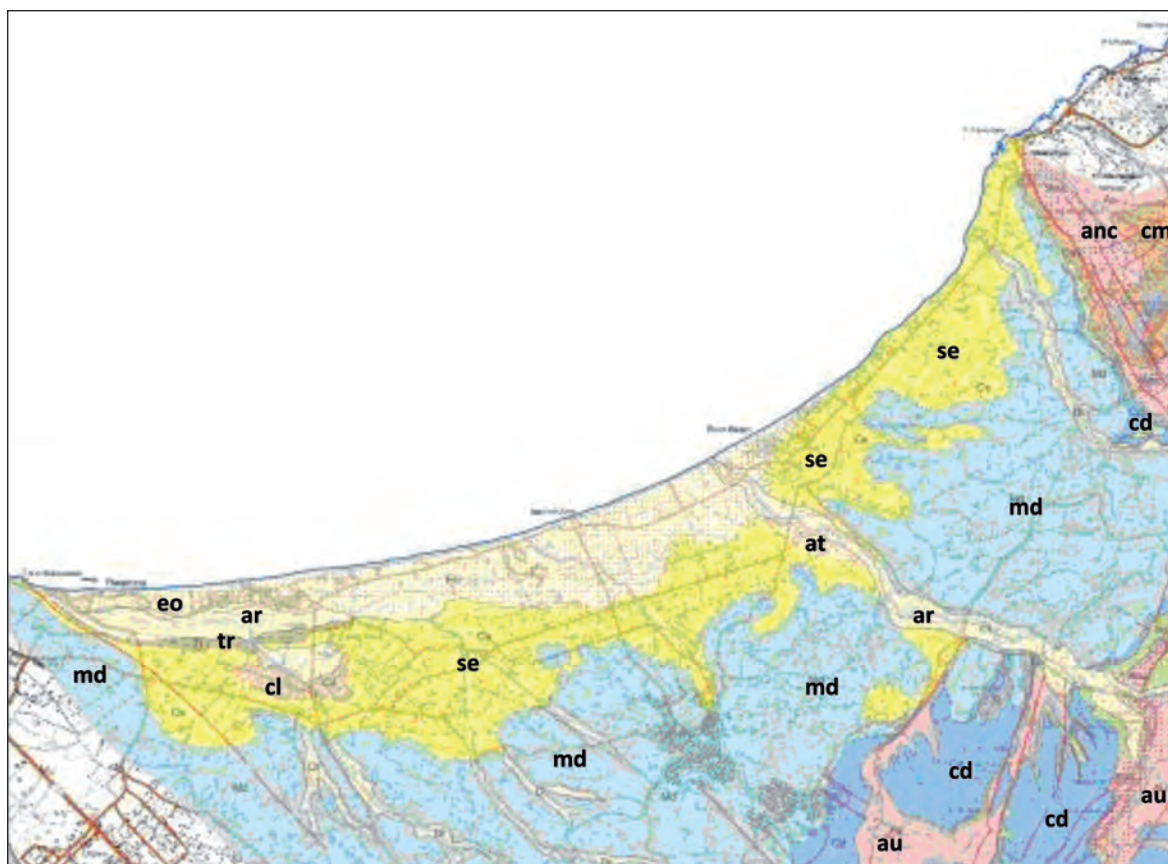
DATI	STATO	DISPONIBILITÀ	NOTE
Ubicazione pozzi	buono	si	Due diversi censimenti (Ardau et al., 1994) (Cordoni, 2007)
Portata emunta dai pozzi	insufficiente	no	
Livello piezometrico, conducibilità elettrica e ph misurati nei pozzi	buono	si	
Definizione dell'acquifero interessato da ogni pozzo	buono	si	
Utilizzo dei pozzi	buono	si	
Andamento temporale della piezometrica	buono	si	Si possiede una buona serie storica dal 1993 al 2007
Geometria degli acquiferi 2D	buono	si	Sono state individuate le unità idrogeologiche
Geometria degli acquiferi 3D	sufficiente	si	Gli spessori sono solo stimabili
Qualità delle acque di falda: principali anioni e cationi	buono	si	Su 14 pozzi della rete di monitoraggio (9 superficiali e 5 profondi) (Cordoni, 2007)
Qualità delle acque di falda: determinazione inquinanti	buono	si	Su 14 pozzi della rete di monitoraggio (9 superficiali e 5 profondi) (Cordoni, 2007)
Definizione delle aree contaminate da intrusione marina e posizione cuneo salino	buono	si	Non si hanno dati sulla posizione del cuneo salino.
Produttività degli acquiferi = $R/A$ , dove R è la ricarica attiva (riserve regolatrici) e A è la superficie affiorante dell'acquifero (andamento nell'annata media)	insufficiente	no	Non è stato effettuato il calcolo, ne' sono disponibili i dati per poterlo svolgere.

*Aspetti geologici, idrogeologici delle aree interessate dal fenomeno.*

### **Carta Geologica**

L'area in studio è costituita da una lunga striscia di pianura parallela alla linea di costa e da una superficie con leggera immersione NO delimita ad est e sud da una serie di rilievi terrazzati che non superano i 400 m s.l.m. Le principali formazioni affioranti, sono visibili nella carta geologica di seguito riportata in figura 32.

Figura 32. Carta geologica dell'area in esame.



*LEGENDA: eo – dune recenti parzialmente stabilizzate; ar – detriti di pendio ed alluvioni recenti; at – alluvioni terrazzate; tr – cordone litorale tirreni ano; cl – calcari lacustri; se – sabbie eoliche risedimentate del Riss e Würm indistinte; md – marne e marne arenacee bioturbate alternate a calcari bioclastici; cd – calcareniti e calciruditi rimaneggiate; cm – arenarie e marne arenacee con livelli ligniferi; anc – breccie e conglomerati andesitici; au – andesiti massicci ipersodico-aplitiche.*

La parte collinosa dell'area è prevalentemente occupata da depositi sedimentari del Neogene. Una sequenza trasgressiva consistente in conglomerati, sabbie e calcari bioclastici del Burdigaliano superiore, ricoperta da una spessa sequenza di marne con interposti sottili strati di argilla del Serravalliano, giace in discordanza sopra un complesso pre-Burdigaliano, costituito da vulcaniti calco-alcaline e depositi marini e lacustri. La superficie leggermente inclinata e la pianura presso la costa sono occupate da depositi quaternari, principalmente composti da sabbie eoliche del Riss, del Würm e dell'Olocene (dune non ancora livellate di tipo parabolico, longitudinale e ad uncino). Incassata tra le sabbie eoliche del Riss e del Würm si trova la Panchina Tirreniana. Depositi meno estesi sono rappresentati da calcari di ambiente lacustre e salmastro che giacciono dietro la barriera costiera tirreniana. Depositi alluvionali quaternari si trovano anche lungo i letti dei fiumi principali, mentre nella parte interna dell'area si trovano depositi detritici.

#### **Lineamenti geostrutturali e morfologici**

In generale, i legami fra la morfologia del territorio turritano con i fenomeni geologici e strutturali sono molto evidenti. Si può riscontrare, infatti, un graben asimmetrico con direzione preferenziale NNW, generato da movimenti di distensione e contemporaneo alla

trasgressione Burdigaliana. Tale graben si trova all'interno di un altro più ampio di età oligocenica, allungato NS. La morfologia del territorio è caratterizzata quasi interamente da superfici insistenti sulle formazioni mioceniche debolmente inclinate verso NW ed erose da un sistema drenante di tipo cataclinale (i corsi d'acqua hanno la stessa pendenza degli strati geologici). Nell'entroterra, il limite della piana è caratterizzato da forme del paesaggio che derivano da motivi strutturali. Infatti nei pressi dell'abitato di Sorso, zona in cui si riscontrano le quote maggiori, si nota un improvvisa rottura di pendio, in coincidenza con il passaggio dalle marne ai calcari.

In sintesi, dal punto di vista geomorfologico sono state riconosciute le principali unità fisiografiche, che caratterizzano il territorio di Sorso. Tali sono state distinte in base a fattori sia geolitologici che geomorfologici, all'interno dei quali si identificano specifici processi e dinamiche evolutive responsabili dell'attuale configurazione. Queste unità rappresentano un quadro fisico-geografico con alcune zone principali costituite: dalle piane degradanti verso la costa, dalle fasce pedemontane di raccordo e dai rilievi collinari. Per una descrizione dettagliata, si rimanda a Cordoni, 2007.

### **Lineamenti idrogeologici**

A causa della sua geomorfologia, la piana Turritana è caratterizzata da un'idrografia poco sviluppata, che da origine a corsi d'acqua a regime torrentizio, con l'eccezione del fiume Silis che, con un bacino di 120 km<sup>2</sup>, scorre anche nei periodi più secchi dell'anno. Vale la pena menzionare, inoltre, il Rio Pedras de Fogu, il Rio Padrongianu e il Rio Buddi Buddi che alimenta lo stagno di Platamona. In generale, i corsi d'acqua tendono ad esaurirsi approssimandosi alla linea di costa, infiltrandosi nelle sabbie e alimentando così gli acquiferi. In occasione di eventi piovosi eccezionali, si formano caratteristiche aree paludose (Ardau et al., 1994).

Per quanto riguarda i rapporti tra l'acquifero ed i fiumi si può notare che il fiume Riu Silis alimenta l'acquifero; mentre il fiume a ovest di Sorso drena le acque sotterranee (Cordoni, 2007).

Sono stati individuati numerosi acquiferi:

- Un acquifero freatico ubicato nelle permeabili sabbie eoliche quaternarie e nelle alluvioni lungo i maggiori corsi d'acqua. Questo acquifero, ubicato in zone prevalentemente pianeggianti, è alimentato dalle piogge e dalle acque di infiltrazione dei corsi d'acqua. La portata in regime stazionario, misurata attraverso i numerosi pozzi presenti, è di 2-3 l/s.
- Un acquifero multistrato confinato o semi confinato ubicato nei livelli più bassi degli stessi depositi eolici, caratterizzato da una differente permeabilità. Esso è prevalentemente alimentato dall'infiltrazione delle acque sotterranee circolanti nei detriti di versante dei pendii più ripidi al di sotto dei terrazzi miocenici. La portata in regime stazionario, misurata attraverso un numero ridotto di pozzi ed estremamente variabile con la profondità, è di 0,5-5 l/s.
- Un acquifero multistrato freatico, confinato o semi confinato ubicato negli orizzonti più permeabili della sequenza trasgressiva miocenica. Questo acquifero, che si incontra a profondità differenti nelle zone più alte dell'area in studio è fondamentalmente alimentato dalle acque piovane che si infiltrano nelle fratture dei termini più coesivi della sequenza, come le marne e i calcari bioclastici. La portata in regime stazionario, misurata attraverso i pochi di pozzi che attingono a

questo acquifero, è abbastanza bassa (0,2-1 l/s).

- Un acquifero molto profondo confinato ubicato negli strati conglomeratici trasgressivi che ricoprono il basamento vulcanico pre-Burdigalliano. Questo acquifero, presente solo localmente nella parte più orientale dell'area, è alimentato attraverso l'infiltrazione nelle aree collinari a monte, dove questo basamento affiora. Anche se poco sfruttato, questo acquifero è il più produttivo dell'area, con portate di 10-20 l/s.

#### *Aree interessate da intrusione marina laterale e dal basso e dinamiche attuali e future*

Le linee isopiezometriche (anni '93-'94 (Ardau et al., 1994)) sembrano seguire la morfologia locale e mostrano un certo grado di comunicazione tra il primo e il terzo acquifero (si veda il paragrafo precedente per la numerazione degli acquiferi), il che potrebbe spiegare le basse salinità dell'acquifero freatico, che comunque non sembra dovuta ad intrusione marina. Gli studi successivi (Cordoni, 2007) evidenziano che gli assi di drenaggio delle acque sotterranee sono mediamente orientati verso Nord, ovvero dalle aree di alimentazione, costituite dai rilievi presenti a Sud ed a Sud-Est, verso la piana costiera.

Per quanto riguarda gli acquiferi profondi (Cordoni, 2007), le piezometriche elaborate sono da considerarsi fortemente indicative. Questo in ragione dei pochi punti di osservazione, che risultano, oltretutto, non omogeneamente distribuiti. Le piezometriche individuano delle direzioni di flusso mediamente orientate verso Nord.

Sia negli studi compiuti nel '93-'94 che in quelli del '05-'07, per l'acquifero superficiale, non si nota una variazione di salinità in funzione delle variazioni stagionali delle piezometriche. Per gli altri acquiferi non si sono eseguite mappature perché il numero di pozzi è esiguo.

Vicino alla linea di costa, la salinità tende a crescere nella zona più orientale, passando da circa 1 a circa 1,5 g/l (Ardau et al., 1994), zona in cui non si rinvergono le dune, ma una collina formata da più antichi depositi eolici. Nella parte centrale della piana, verso l'interno, la salinità tende a crescere raggiungendo un massimo (4 g/l, Ardau et al., 1994) nel bordo della piana, dove lo spessore dell'orizzonte marnoso aumenta considerevolmente. In tale area si è misurata anche negli anni '05-'07 una conducibilità elettrica di 3,2 mS/cm (Cordoni, 2007). La salinazione è in questa zona da attribuire proprio alla presenza delle marne. Salinità più elevate sono state osservate anche nei pressi dello stagno di Platamona, nella porzione occidentale dell'area in studio, a causa della connessione idraulica con il mare (Ardau et al., 1994).

Per quanto riguarda gli acquiferi in pressione, l'intrusione salina è stata osservata in particolare vicino alla costa, ma solo nei pozzi profondi che, con ogni probabilità, intercettano l'interfaccia acqua dolce-acqua salata. La salinità degli acquiferi profondi dell'entroterra è, al contrario, estremamente bassa (0,5 mg/l).

Non si possiedono dati in proposito alla variazione delle caratteristiche proprie (temperatura, salinità, ossigeno disciolto, permeabilità) nella porzione di acquifero interessata dalla zona di transizione.

Altri meccanismi di salinazione delle falde (presenza di salinità "naturale" indotta da uso di pozzi in acquiferi profondi salini o parzialmente salini), si rilevano in presenza di formazioni marnose, descritte nel paragrafo dell'inquadramento geologico e stratigrafico.

### *Emungimento per uso irriguo*

Dalla determinazione dello spessore di acquifero impegnato nell'emungimento, si è visto che l'acquifero superficiale è sfruttato fino a 25 m, mentre gli acquiferi profondi fino a 190 m (Cordoni, 2007).

Le risorse idriche, utilizzate a scopi irrigui sono provenienti dall'utilizzo di pozzi; dalle informazioni raccolte si riporta che il 50% dei pozzi censiti nel 2005 sono usati a fini irrigui (Cordoni, 2007). La tabella 13 seguente riporta il numero di pozzi e l'acquifero di riferimento per gli anni censiti. Le figure 33, 34 e 35 riportano l'ubicazione dei pozzi censiti e monitorati rispettivamente nel periodo 1993-94 e 2005-7.

**Tabella 17. Anni di censimento, acquiferi interessati e numero di pozzi ad uso irriguo nell'aea.**

Anno censimento	Acquifero	N. pozzi
93-94	Superficiale	63
93-94	Altri acquiferi (profondi)	16
05-07	Superficiale	53
05-07	Altri acquiferi (profondi)	27

**Figura 33. Distribuzione dei pozzi superficiali costituenti la rete di monitoraggio (93-94)**

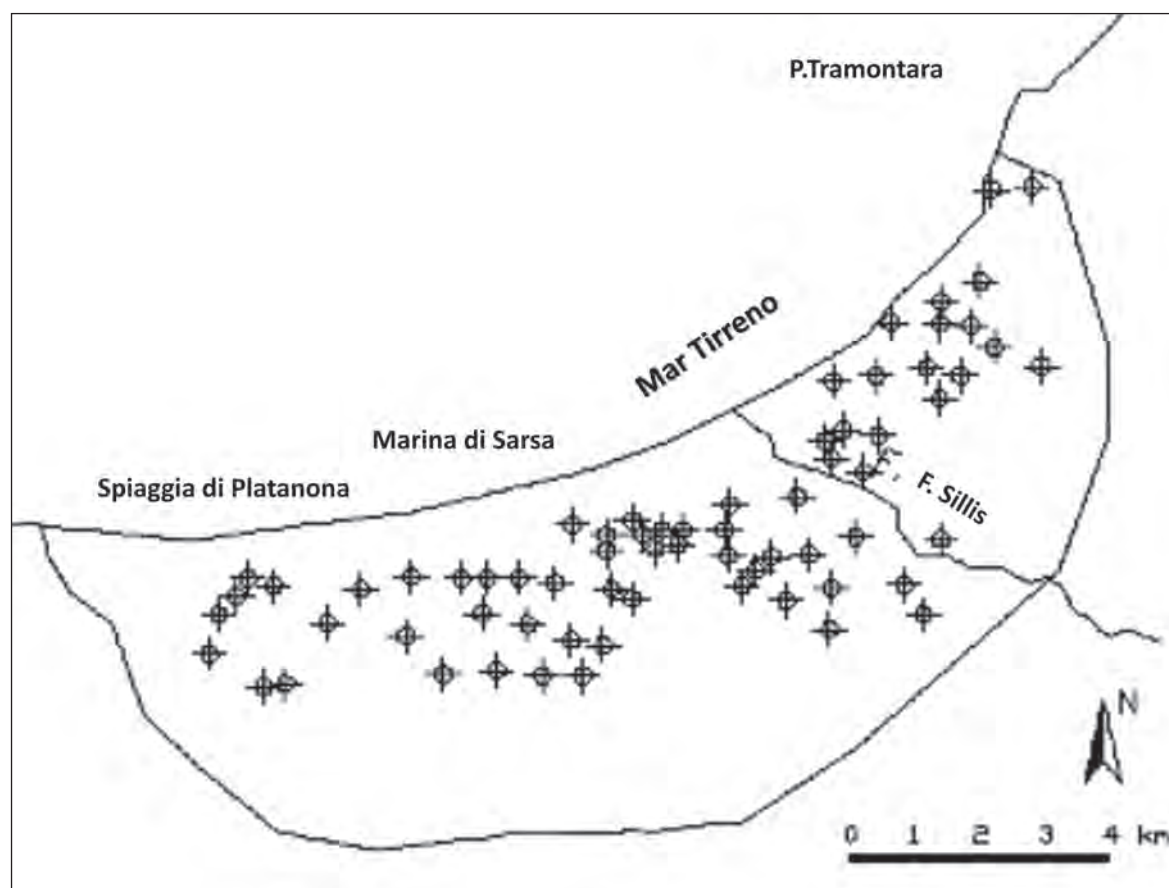


Figura 34. Distribuzione dei pozzi superficiali e profondi censiti nel periodo 2005

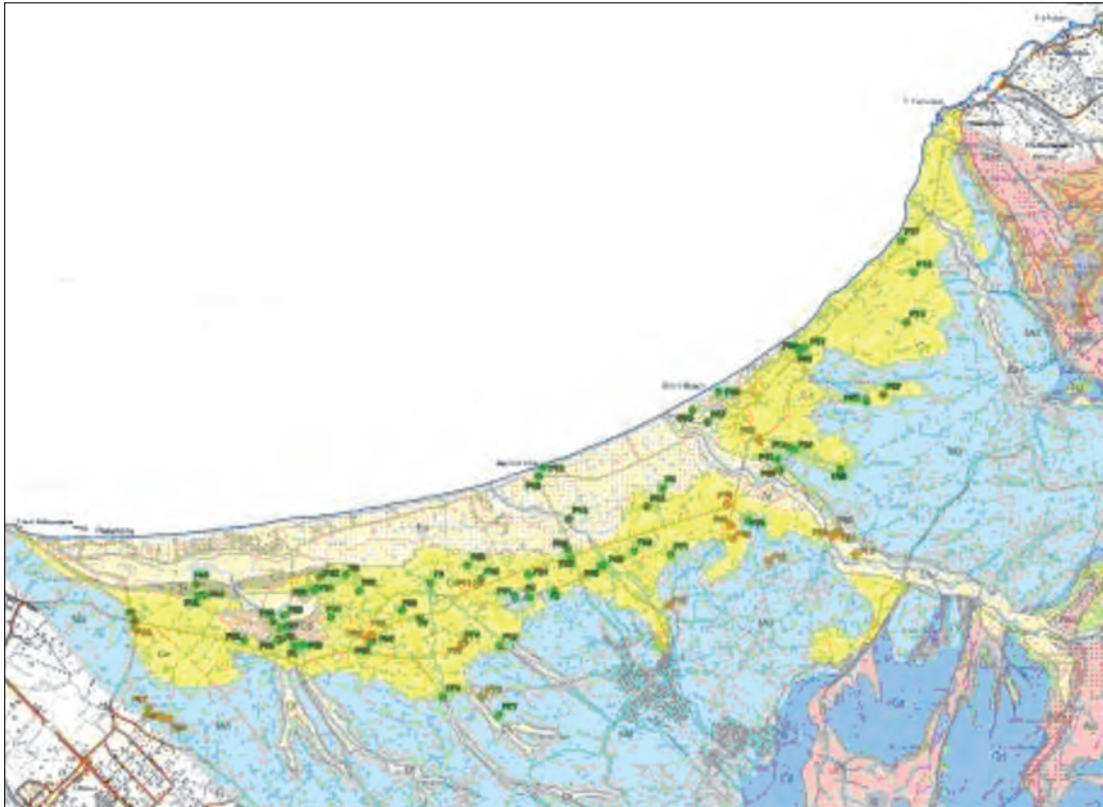
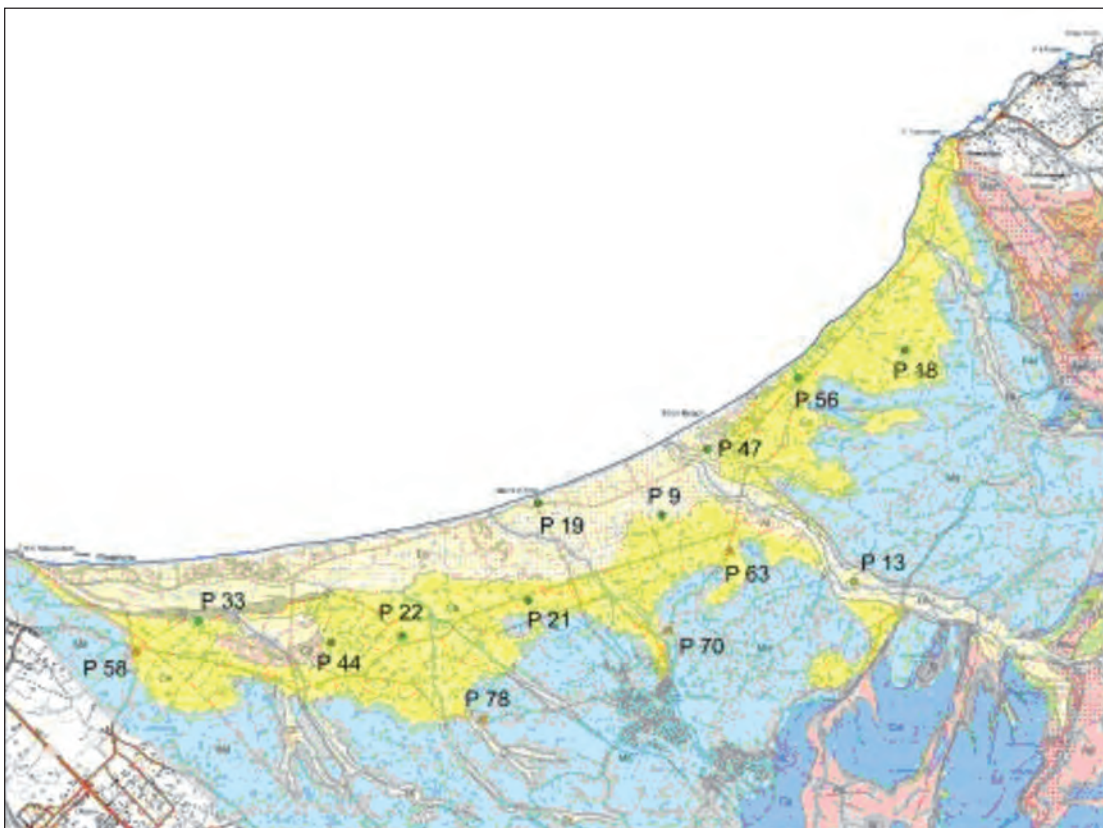


Figura 35. distribuzione dei pozzi di monitoraggio (Cordoni, 2007)



### *Aree di maggior rischio dal punto di vista dell'intrusione marina*

Le caratteristiche geomorfologiche, geostutturali e idrogeologiche della piana Turritana la rendono potenzialmente molto vulnerabile all'intrusione marina, ma il corretto uso del territorio fa sì che solo aree limitate siano interessate dal fenomeno. La conservazione dei cordoni dunari paralleli alla costa e della copertura vegetale favorisce l'infiltrazione che si traduce in ricarica per i più vulnerabili acquiferi costieri. Questa protezione naturale consente, nelle aree interne, l'estrazione delle acque sotterranee necessarie all'irrigazione (Ardau et al., 1994).

Le aree a maggior rischio, come già accennato, sono ubicate ad est del Fiume Silis e in corrispondenza dello Stagno di Platamona.

### *Riepilogo e dati disponibili*

Si riportano in sintesi i dati disponibili recuperati ai fini di possibili ulteriori valutazioni:

- Tipo di acquifero: sono stati individuati quattro acquiferi (vedi paragrafo "Lineamenti idrogeologici").
- Conducibilità idraulica acquifero: Stimabile per via indiretta in funzione delle formazioni.
- Spessore dell'acquifero: stimabile.
- Definizione dei limiti dell'acquifero: deducibili dalla geologia.
- Portate emunte globalmente in media annua (m<sup>3</sup>): non si hanno dati.
- Pozzi assegnati ad ogni acquifero: Si veda il paragrafo "emungimento per uso irriguo".
- Informatizzazione: i dati sono informatizzati.

## **2.2.8 Area di Posada (NU)**

### *Delimitazione delle aree interessate dal fenomeno*

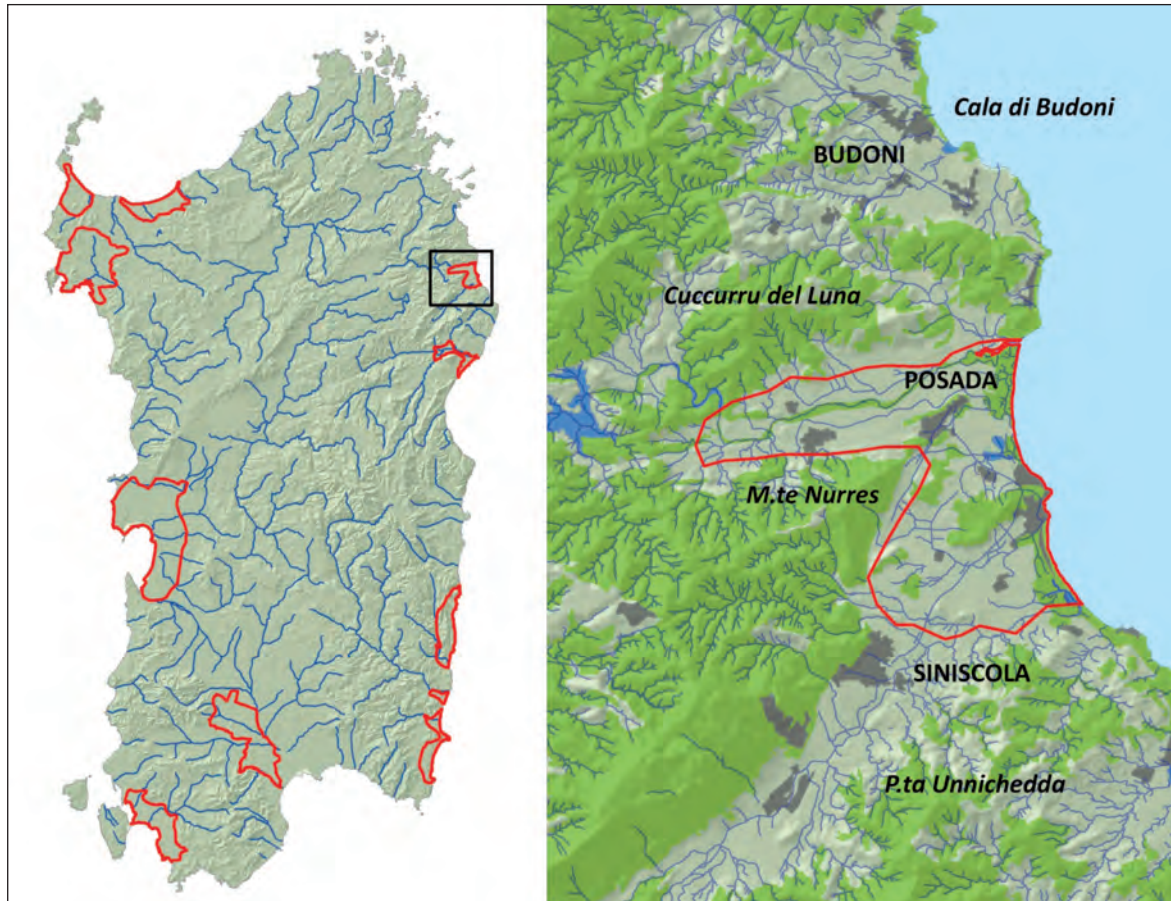
L'area in studio, situata nella costa nord-orientale della Sardegna (Baronia), ricade nei territori comunali di Posada e Torpè (provincia di Nuoro), si estende per circa 4 km lungo la costa compresa tra Punta Ovili e Torre di San Giovanni ed è larga da 3 a 5 km.

La piana alluvionale di Posada, costituita dai depositi del sistema fluviale del Rio Santa Caterina e del Rio Posada, si apre tra i promontori di P.ta Orvili e Monte Longu, sormontata da alcuni rilievi nei quali furono localizzati i primi villaggi. I due fiumi, che prendono origine dalle montagne dell'interno e sono alimentati da un bacino di circa 700 km<sup>2</sup>, hanno dato origine ad una serie di stagni estesi e profondi in prossimità della costa. Queste aree umide costituiscono una risorsa naturale di grande interesse per l'area in studio, le cui peculiarità ambientali e territoriali la rendono particolarmente attrattiva dal punto di vista turistico.

I naturali equilibri idrodinamici dell'area, in particolare in riferimento alle zone umide, sono però stati alterati per una grande estensione dalla costruzione, nel 1960, della diga Maccheronis nel territorio di Torpè. La diga è stata costruita ad una distanza di circa 11

km dalla costa con il duplice scopo di regolare le acque di piena del Rio Posada e di creare una riserva d'acqua con una capacità massima di 29 Mm<sup>3</sup> per l'approvvigionamento domestico e irriguo. Il bacino di alimentazione a valle della diga copre ora un'area di soli 85 km<sup>2</sup>.

**Figura 36. Inquadramento dell'area**



### *Caratterizzazione del problema*

Nell'area in studio è presente un importante acquifero freatico costiero, impostato nelle formazioni alluvionali e detritiche e caratterizzato da un'elevata permeabilità, che costituisce un sistema idrodinamico molto complesso con continui scambi tra acque dolci e salate, che rendono molto difficile l'individuazione di una precisa interfaccia, ma premette solo di riconoscere aree di miscelazione variabili sia spazialmente che temporalmente. Nell'area in studio è inoltre presente, a breve distanza dal mare, un'ampia zona umida costituita da una rete di bacini e stagni che coinvolge un esteso settore di costa. Questi corpi idrici sono strettamente connessi al mare, che rappresenta la loro principale fonte di approvvigionamento periodico, ma sono anche alimentati dai fiumi e dal flusso idrico sotterraneo.

Tale situazione rende inevitabilmente l'acquifero molto vulnerabile all'intrusione salina, ancor più in presenza dello sbarramento del corso fluviale a monte della zona costiera. Il controllo artificiale delle acque porta infatti ad una drastica diminuzione dei flussi d'acqua superficiali e sotterranei verso l'area costiera.



La costruzione dell'invaso artificiale e della rete di irrigazione per l'approvvigionamento delle colture nella piana rappresenta comunque, in questo particolare caso, da un punto di vista idrogeologico, una corretta scelta di gestione delle risorse idriche che ha aiutato a prevenire (o a limite a minimizzare) l'intrusione delle acque del mare nell'acquifero costiero.

I relativamente alti valori di salinità delle acque sotterranee dell'acquifero costiero di Posada (oltre 2000 mg/l) osservati in molti pozzi, nonostante la loro posizione interna e il fatto che non sono soggetti all'ingressione stagionale di acque del mare lungo il Rio Posada, fanno ipotizzare che nei depositi alluvionali siano presenti acque marine fossili, intrappolate durante l'ingressione del rias Pleistocenico. E' comunque possibile che fenomeni di intrusione di acqua marina di minor estensione siano avvenuti negli anni precedenti alla costruzione della diga Maccheronis a causa del forte emungimento dai pozzi per gli usi agricoli.

**Tabella 18. Stato e disponibilità dei dati raccolti**

DATI	STATO	DISPONIBILITÀ	NOTE
Ubicazione pozzi	sufficiente	si (formato cartaceo)	
Portata emunta dai pozzi	insufficiente	no	
Livello piezometrico, conducibilità elettrica e ph misurati nei pozzi	insufficiente	solo conducibilità elettrica (formato cartaceo)	
Definizione dell'acquifero interessato da ogni pozzo	sufficiente	si (formato cartaceo)	Vedi carta dei profili schematici dell'acquifero
Utilizzo dei pozzi	insufficiente	no	
Andamento temporale della piezometrica	insufficiente	no	
Geometria degli acquiferi 2D	sufficiente	si (formato cartaceo)	deducibile dalla geologia dell'area
Geometria degli acquiferi 3D	insufficiente	no	
Qualità delle acque di falda: principali anioni e cationi	insufficiente	no	
Qualità delle acque di falda: determinazione inquinanti	insufficiente	no	
Definizione delle aree contaminate da intrusione marina e posizione cuneo salino	insufficiente	no	
produttività degli acquiferi = R/A, dove R è la ricarica attiva (riserve regolatrici) e A è la superficie affiorante dell'acquifero (andamento nell'annata media)	insufficiente	no	

### *Aspetti geologici, idrogeologici delle aree interessate dal fenomeno*

#### **Lineamenti geologici**

Dal punto di vista geologico, l'area in studio giace su un basamento Paleozoico che consiste in un complesso di scisti e graniti ercinici che hanno dato origine ai maggiori alti strutturali della zona.

Attorno all'agglomerato urbano di Posada un complesso calcareo-dolomitico affiora formando un altopiano allungato con ripidi pendii, in direzione media NE-SO. L'altopiano

divide la piana alluvionale in due parti: una parte più grande che include il Rio Posada e il Rio Santa Caterina, una parte più piccola che costeggia lo Stagno Longu.

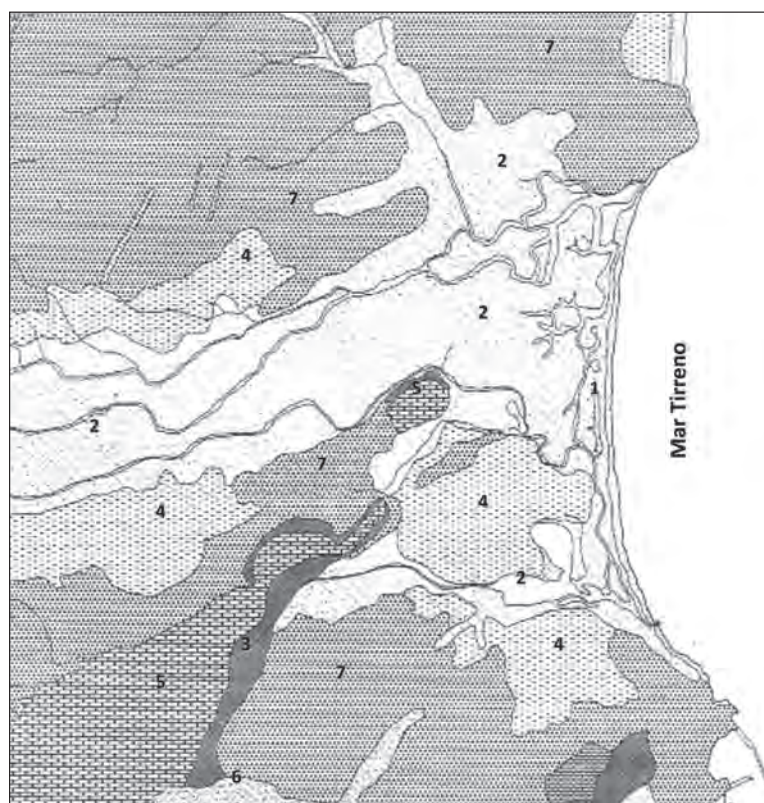
Una formazione alluvionale Pleistocenica affiora lungo i terrazzi alluvionali antichi, composta da sabbie e ciottoli ben cementati, spesso argillificati e ferrettizzati, con intercalazioni debolmente cementate.

Oltre ai depositi di falda alla base del complesso carbonatico, la piana è anche costituita da una formazione di conoidi di deiezione e alluvioni recenti, composte principalmente da sedimenti sabbiosi di varia granulometria, depositati dall'attuale sistema fluviale. Un sistema di dune e barre sabbiose di forma allungata si è formato in prossimità della costa, a seguito degli eventi morfogenetici che hanno interessato l'intera costa NE della Sardegna.

### Lineamenti geostrutturali e morfologici

Morfologicamente, fin dal Pliocene, la piana alluvionale di Rio Posada/Rio S.Caterina ha sempre costituito un basso strutturale e la sua origine è sempre stata riferita ad una struttura tettonica maggiore, ovvero una faglia diretta E-O. Successivamente alla sua emersione, nel Pliocene, la piana ha iniziato ad approfondirsi a seguito dell'erosione da parte del sistema fluviale durante il Pleistocene, giusto fino all'ultimo periodo inter-glaciale quando la piana fu sommersa dal mare durante un'ingressione che spostò la linea di riva di circa 7-8 km verso l'interno e che determinò la formazione di un rias profondo diverse decine di metri. Quando vi fu l'ingressione marina, durante l'ultima glaciazione, la linea di costa era solo pochi chilometri più distante dal mare rispetto ad oggi. Successivamente, durante la trasgressione Olocenica, fu creata la linea di costa attuale formando in questo modo la barra litoranea e le zone paludose.

Figura 37. Carta geologica dell'area in esame.



Legenda: 1 – dune sabbiose e barre litorali (Olocene); 2 – alluvioni recenti e conoidi alluvionali sepolte (Olocene); 3 – fasce detritiche (Olocene); 4 – alluvioni antiche sabbiose e ciottolose, talvolta terrazzate e cementate da matrice argillosa e fortemente pedogenizzate (Pleistocene); 5 – Dolomie brune e calcari stratificati bruno chiari (Giurassico); 6 – Dicchi porfirici (Tardo Ercinico); 7 – Scisti e complesso migmatitico (Ercinico)

La complessa situazione geomorfologica dell'area in studio ha sempre condizionato l'uso del suolo e lo sviluppo urbano: mentre le zone costruite sono confinate principalmente nelle aree montuose che intersecano le valli, dominando l'intero territorio, i terreni agricoli si localizzano nelle aree basse, ovvero sui terrazzi alluvionali antichi o in prossimità delle attuali sponde del fiume. Qui si coltivano specie irrigue, come alberi da frutto e colture ortive, così come specie che non necessitano di irrigazione come i vigneti.

Le aree salmastre prossime alla costa così come le zone paludose sono inadatte alla coltivazione. Esse sono comunque aree di grande interesse naturalistico per via della presenza diffusa di tamerici e altre specie alofite e di colonie di uccelli di diverse specie tipiche di queste zone. Il resto del territorio è utilizzato per l'allevamento ovino e bovino.

### **Lineamenti idrogeologici**

Oltre agli acquiferi profondi confinati, ospitati nelle formazioni scistose e granitiche, in conformità con le principali strutture tettoniche dell'area, è presente un acquifero freatico ospitato in un mezzo poroso di varia granulometria, costituito dagli orizzonti alluvionali sottostanti il sistema fluviale attuale e i sedimenti dei terrazzi più recenti. La geometria di questi depositi alluvionali è molto simile a quella descritta per il rias Pleistocenico.

A parte pochi pozzi profondi, trivellati nel basamento cristallino e scistoso, nell'area in studio sono presenti decine di pozzi freatici, per la maggior parte profondi da 6 a 10 metri. Questi pozzi in passato emungevano acqua dall'acquifero freatico e garantivano il fabbisogno idrico per il sistema irriguo dell'intera area. Con lo sviluppo del sistema di irrigazione alimentato dalla diga Maccheronis, alla fine degli anni Sessanta, molti di questi pozzi sono caduti in disuso.

Misure piezometriche effettuate negli ultimi anni nell'area hanno confermato l'esistenza di un solo acquifero, la cui tavola d'acqua segue la morfologia locale mostrando un gradiente verso la zona costiera. Questo gradiente si è però ridotto sempre di più nel tempo, come conseguenza della costruzione della diga e della diminuzione del flusso d'acqua.

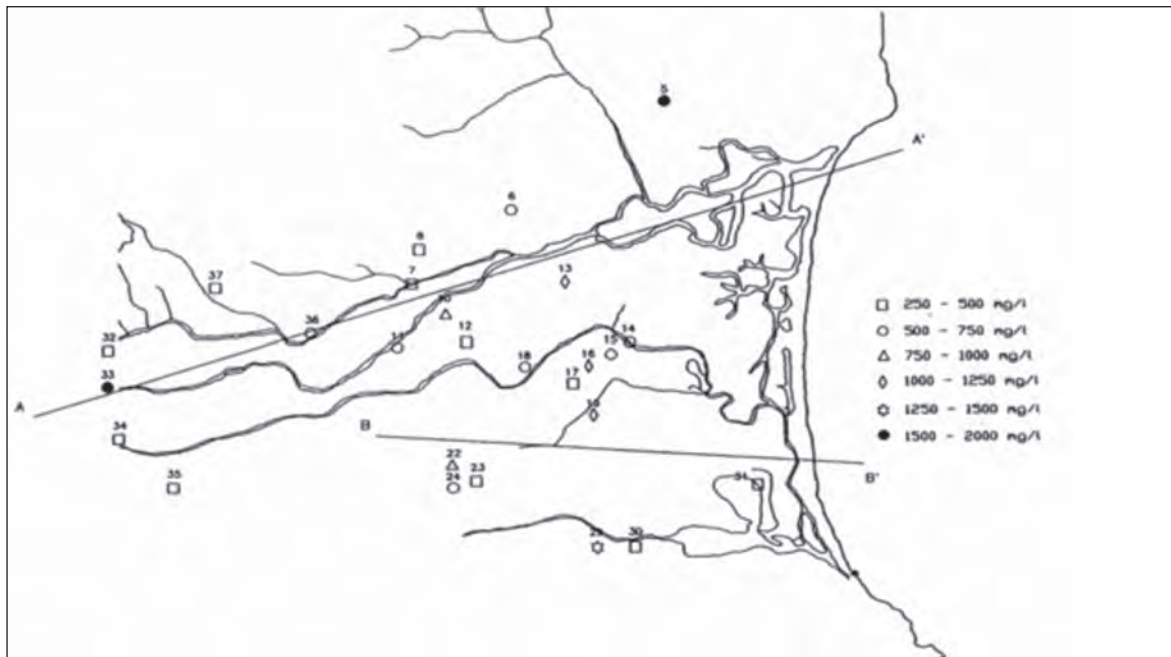
Un'indagine effettuata prima della costruzione della diga, ha mostrato che già allora molti pozzi freatici, al di sotto di una certa profondità, emungevano acque salate e pertanto, i pozzi esistenti, in genere non venivano approfonditi ulteriormente e venivano a volte abbandonati. La presenza di acque salmastre portò quindi gli allevatori locali a ricorrere ad una più affidabile fonte di approvvigionamento idrico, la riserva creata dalla diga Maccheronis, e ad una conseguente drastica riduzione della estrazione d'acqua dai pozzi freatici.

Poiché i pozzi sono oggi poco utilizzati, la tavola d'acqua rimane sempre al di sopra del livello del mare, con piccole fluttuazioni stagionali legate alla ricarica dovuta alle precipitazioni, al deflusso idrico dalla diga durante l'inverno e alle acque di irrigazione del periodo primaverile-estivo. Queste fluttuazioni erano sicuramente molto maggiori prima della costruzione della diga, quando il fiume con i suoi grandi deflussi stagionali alimentava direttamente l'acquifero freatico.

*Aree interessate da intrusione marina laterale e da intrusione marina laterale e dal basso e dinamiche attuali e future*

Le misure effettuate nei pozzi hanno mostrato una distribuzione fortemente irregolare della salinità nella piana, con valori variabili da meno di 500 mg/l, a poche centinaia di metri dal mare, fino a oltre 2.000 mg/l, a diversi chilometri dal mare (figura 38).

**Figura 38. Carta della salinità dei pozzi relativi alle acque sotterranee dell'acquifero costiero di Posada (TDS, mg/l)**



Mentre alcuni pozzi, generalmente superficiali, mostrano una salinità quasi nulla durante tutto l'anno, altri pozzi più profondi sono costantemente salmastri con variazioni stagionali superiori al 50%.

Queste variazioni possono essere imputate a differenti relazioni esistenti tra le acque sotterranee, le acque del mare che risalgono lungo la foce dei fiumi, il deflusso della diga, l'infiltrazione naturale e l'infiltrazione delle acque di irrigazione.

L'analisi dell'andamento annuale della salinità in un pozzo localizzato al centro della piana, mostra una riduzione del contenuto di sale nel periodo Luglio-Ottobre che può essere attribuito all'irrigazione intensiva di frutteti e orti. In un pozzo situato invece in corrispondenza del punto di alimentazione della falda freatica dal Rio Posada, a più di 4 km dalla costa, nei terreni non irrigati, la significativa diminuzione della salinità in primavera e estate può essere ascritta all'effetto di diluizione del grande quantitativo d'acqua che defluisce dalla diga in autunno e in inverno. Misure sistematiche della salinità sono state eseguite anche lungo il Rio Posada e negli acquitrini salmastri lungo la costa. Alti valori di salinità, in alcuni posti pari a oltre 20 g/l, sono stati misurati nel fiume durante i periodi di magra ad una distanza superiore a 2-3 km dalla bocca del fiume. Viceversa, le paludi sono sempre salate, con valori a volte superiori a 30 g/l, chiaro segno della loro diretta comunicazione con le acque del mare.

Sulla base della profondità alla quale le acque salmastre sono state trovate nei diversi pozzi della rete di monitoraggio, si è tentato di ricostruire l'interfaccia tra acqua dolce e acqua salmastra lungo le due sezioni dell'acquifero, corrispondenti ai due principali bracci del rias Pleistocenico, riportate nei paragrafi successivi. Non si hanno a disposizione dati sulla variazione delle caratteristiche proprie (temperatura, salinità, ossigeno disciolto, permeabilità) nella porzione di acquifero interessata dalla zona di transizione.

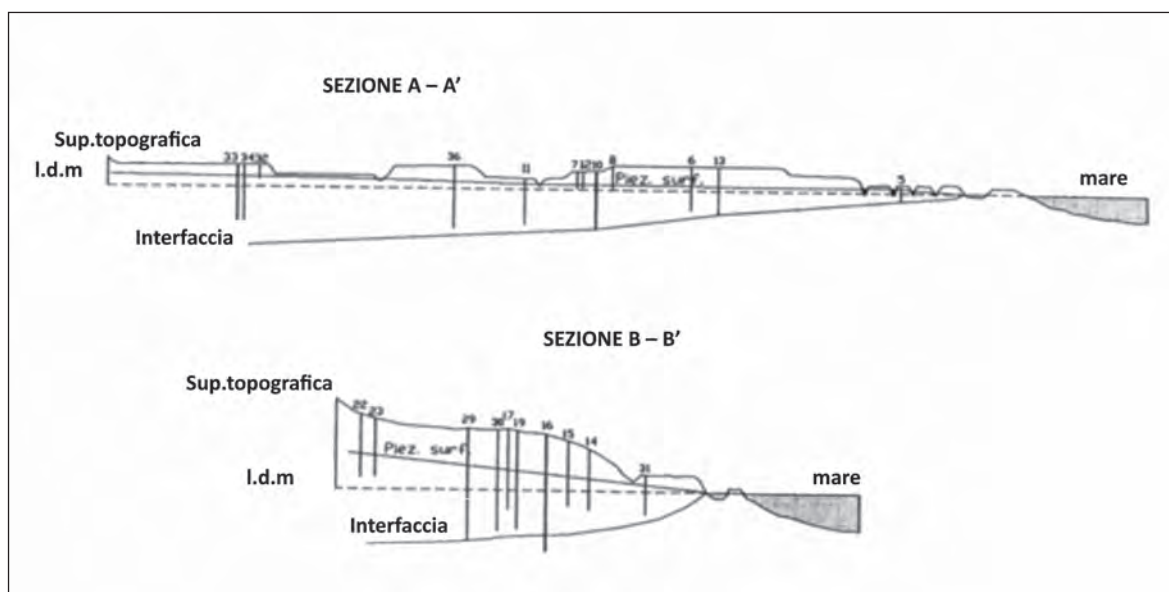
*Altri meccanismi di salinizzazione delle falde (presenza di salinità “naturale” indotta da uso di pozzi in acquiferi profondi salini o parzialmente salini)*

I relativamente alti valori di salinità delle acque sotterranee dell'acquifero costiero di Posada (oltre 2000 mg/l) osservati in molti pozzi, nonostante la loro posizione interna e il fatto che non sono soggetti all'ingressione stagionale di acque del mare lungo il Rio Posada, fanno ipotizzare che nei depositi alluvionali siano presenti acque marine fossili, intrappolate durante l'ingressione del rias Pleistocenico. E' comunque possibile che fenomeni di intrusione di acqua marina di minor estensione siano avvenuti negli anni precedenti alla costruzione della diga Maccheronis a causa del forte emungimento dai pozzi per gli usi agricoli. L'ipotesi dell'intrappolamento di acque fossili necessita di ulteriori approfondimenti. Dovrebbero essere in particolare indagate le differenze di composizione chimica delle acque prelevate dai pozzi della zona e la loro possibile differente datazione.

#### *Emungimento per uso irriguo*

Dalla determinazione dello spessore di acquifero impegnato nell'emungimento si deduce che i pozzi che intercettano l'acquifero freatico presentano una profondità variabile da 6 a 10 m.

**Figura 39. Sezioni schematiche dell'acquifero riferite all'ubicazione in figura 38.**

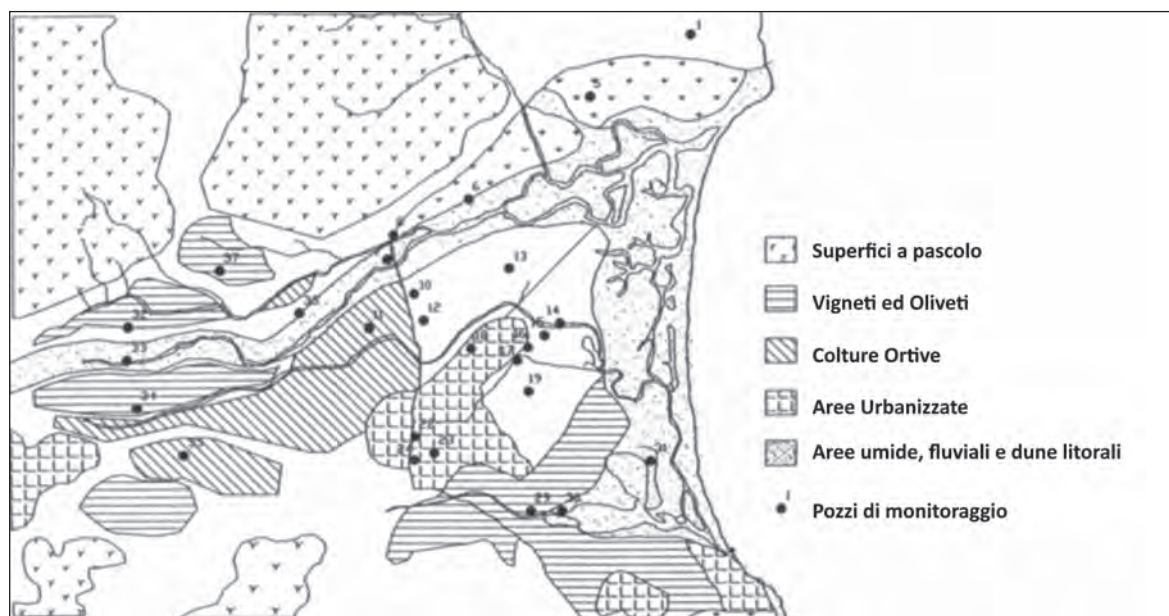


Dei numerosi pozzi freatici esistenti nella piana di Posada, tra questi 26 sono stati scelti per costituire una rete di monitoraggio con una distribuzione il più regolare possibile. Diverse campagne di monitoraggio sono state realizzate per raccogliere le misure idrogeologiche e idrochimiche ogni mese tra il 1993 e il 1994 (Contena, 1994), tra il 1996 e il 1997 (Tola, 1997) e più recentemente per lo studio “*Salination phenomena in the Posada coastal aquifer (North-East Sardinia)*” (Ardau et al., 1994). In particolare, sono stati monitorati periodicamente il livello della falda e la salinità dell'acqua, attraverso delle misure di conducibilità elettrica (figura 40).

**Tabella 19. Dati su censimento, numero pozzi ed acquifero di riferimento.**

Anno censimento	Acquifero	Area (km2)	N. pozzi
1993-94	freatico	16	26
1996-97	freatico	16	26
	freatico	16	26

**Figura 40. Carta dell'uso del suolo e rete di monitoraggio delle acque sotterranee**



Le aree di maggior rischio dal punto di vista dell'intrusione marina sono da ubicare nell'area costiera, anche se la costruzione dell'invaso artificiale Maccheronis e della rete di irrigazione per l'approvvigionamento delle colture nella piana ha aiutato a prevenire, o comunque a minimizzare, il fenomeno di intrusione marina nell'acquifero costiero.

#### *Riepilogo e dati disponibili*

Si riportano in sintesi i dati disponibili recuperati ai fini di possibili ulteriori valutazioni:

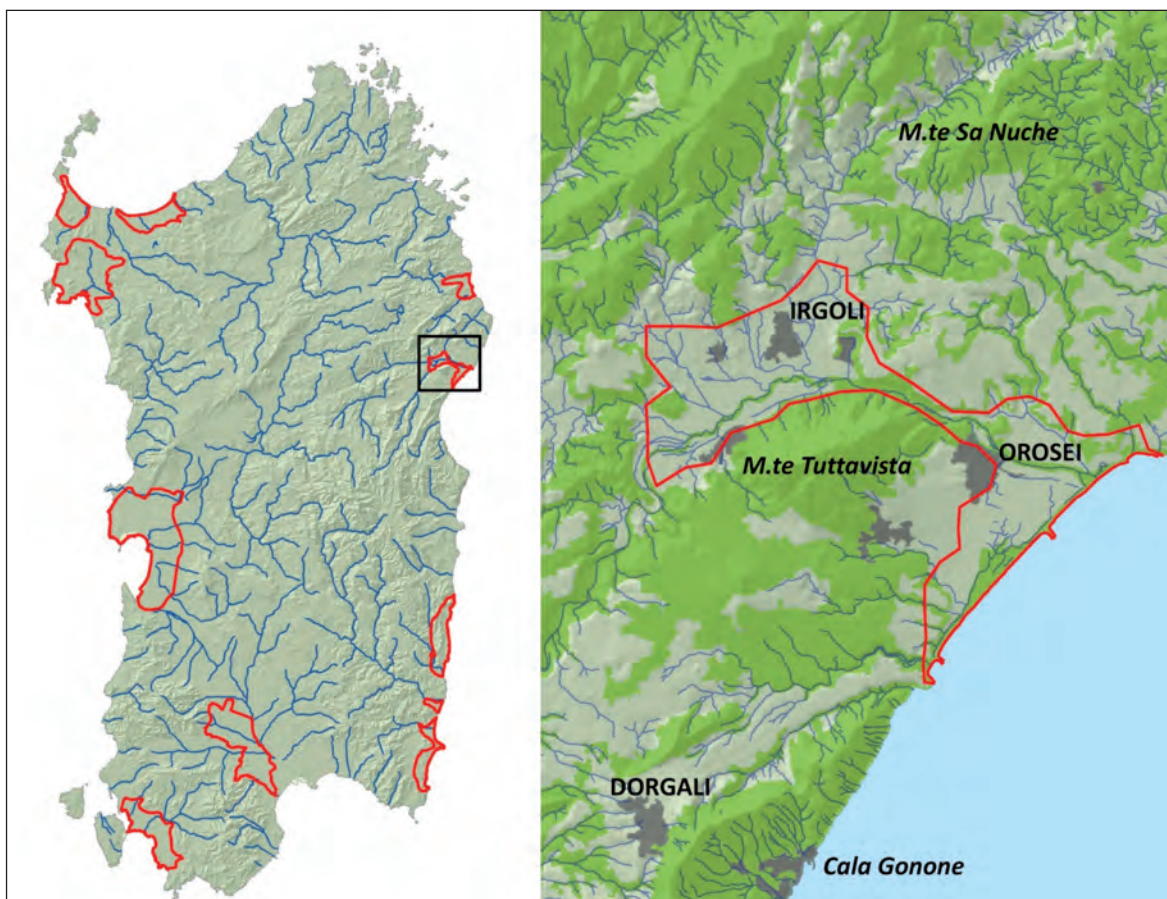
- Tipo di acquifero: un acquifero freatico ed acquiferi profondi confinati;
- Spessore dell'acquifero: anche se immediatamente non disponibile, eventualmente può essere dedotto dalla profondità dei pozzi, variabile da 6 a 10 m;
- Definizione dei limiti dell'acquifero deducibile dalla carta geologica;
- Pozzi assegnati ad ogni acquifero: i pozzi di cui conosciamo la localizzazione (vedi carta della rete di monitoraggio) sono stati tutti associati all'acquifero freatico.
- Informatizzazione: non sono disponibili dati in formato digitale, solo le informazioni in formato cartaceo di cui alla pubblicazione di Arda et alii, 1994.

## 2.2.9 Area di Orosei (NU)

### *Inquadramento e delimitazione delle aree interessate dal fenomeno*

I dati riportati fanno riferimento unicamente al lavoro di Aru et al., 1987 e riguardano l'area dello stagno Avalè su Petrosu, per il quale è stata eseguita l'apertura di bocche a mare per la regolazione stagionale della salinità dello stagno. Nell'area in studio (figura 41) è ubicata la foce del fiume Cedrino, sul quale è stato posto in opera uno sbarramento. L'area si estende per circa 6 km<sup>2</sup> nella formazione delle sabbie e ghiaie che verosimilmente si estendono sotto i depositi dunari e palustri. Il clima della zona è tipicamente mediterraneo, caratterizzato da piogge concentrate nei mesi autunno-invernali e da lunghi periodi di siccità. Il periodo arido può talvolta iniziare ad Aprile e terminare ad Ottobre-Novembre. Nell'area si svolgono attività agricole e ittiche.

**Figura 41. Inquadramento dell'area**



### *Caratterizzazione del problema*

L'apertura di bocche a mare dello stagno ha alterato i delicati rapporti tra le acque (superficiali e sotterranee) della fascia costiera e il mare. Inoltre, lo sbarramento del Cedrino ha ridotto gli apporti d'acqua dolce agli acquiferi costieri. Sono stati altresì osservati fenomeni di lisciviazione dei depositi evaporatici.

Per queste ragioni, nell'area sono stati rilevati alti contenuti di sali sia nelle acque di falda che nei suoli.

**Tabella 20. Stato e disponibilità dei dati raccolti**

DATI	STATO	DISPONIBILITÀ	NOTE
Ubicazione pozzi	insufficiente	si	Si possiede uno schema grafico dell'ubicazione dei pozzi appositamente scavati per il monitoraggio nel 1987
Portata emunta dai pozzi	insufficiente	no	
Livello piezometrico, conducibilità elettrica e ph misurati nei pozzi	insufficiente	si	Solo pH e conducibilità
Definizione dell'acquifero interessato da ogni pozzo	insufficiente	no	
Utilizzo dei pozzi	insufficiente	no	Si suppone che l'utilizzo dei pozzi sia fundamentalmente agricolo
Andamento temporale della piezometrica	insufficiente	no	
Geometria degli acquiferi 2D	insufficiente	si	Pochi cenni
Geometria degli acquiferi 3D	insufficiente	si	Pochi cenni
Qualità delle acque di falda: principali anioni e cationi	sufficiente	si	Analisi del 1987
Qualità delle acque di falda: determinazione inquinanti	insufficiente	no	
Definizione delle aree contaminate da intrusione marina e posizione cuneo salino	sufficiente	si	
produttività degli acquiferi = $R/A$ , dove R è la ricarica attiva (riserve regolatrici) e A è la superficie affiorante dell'acquifero (andamento nell'annata media)	insufficiente	no	

### *Aspetti geologici, idrogeologici delle aree interessate dal fenomeno*

#### **Cenni geologici e morfologici**

Lo stagno di Avalè su Petrosu si è formato sul delta alluvionale del fiume Cedrino, del quale rappresenta un antico ramo, rimasto isolato. Il delta è costituito da alluvioni miste, per lo più riferite all'Olocene, prevalentemente sabbioso-limose, ed è separato dal mare da un cordone litorale. L'intera piana risulta formata in buona parte dalle alluvioni recenti e, in minor misura, dalle alluvioni antiche. A Osalla affiorano i basalti pliocenico-quadernari, che delimitano con un'antica falesia la stretta fascia costiera. In tale zona si riconoscono antichi terrazzi marini. Le alluvioni recenti rappresentano la formazione più importante. Esse sono più o meno sabbiose con contenuto variabile di argilla, tanto che localmente sono franche o franco-sabbioso-argillose. Sono riscontrabili diverse fasi di sedimentazione, riconoscibili da chiare discontinuità litologiche. Fra i diversi livelli terrigeni si notano orizzonti di sostanze organiche, spesso poco decomposte, riferibili a periodi di impaludamento della zona costiera con sviluppo di vegetazione palustre. La morfologia



delle alluvioni è quasi piatta: la zona centrale della piana si deprime in bassure, ricoperte da materiale argilloso impermeabile, che trattiene acque di ristagno non comunicanti con le falde. La piana è delimitata a ovest dal rilievo calcareo giurassico del Monte Tuttavista e a Nord-Ovest dalle colate tabulari dei basalti quaternari.

### Lineamenti idrogeologici

Le indagini idrogeologiche sono consistite principalmente nella definizione delle diverse formazioni acquifere della piana circostante lo stagno con misure piezometriche ripetute con frequenza settimanale in una rete di pozzi di osservazione opportunamente scavati, in prove di pompaggio per la determinazione dei parametri idraulici degli acquiferi e in analisi idrochimiche periodiche per il controllo delle variazioni di salinità nelle falde. I rilievi eseguiti hanno permesso di accertare che l'infiltrazione delle acque meteoriche nelle alluvioni della fascia costiera è ostacolata da una presenza a letto di un orizzonte limo-argilloso poco permeabile, che costituisce il tetto delle sottostanti falde acquifere, mediamente profondo fino a 2-3 m dal piano di campagna. Si tratta pertanto di falde imprigionate molto prossime alla superficie, caratterizzate da valori di risalienza variabili di 50 a 150 cm, alimentate principalmente dalle acque di infiltrazione dei rilievi calcarei di Monte Tuttavista e dei basalti quaternari e dalla acque di subalveo del tratto di foce del Cedrino.

Le prove di portata hanno consentito di accertare che la produttività delle falde è generalmente modesta, con portate critiche da 0,09 a valori superiori a 7 l/s. La potenzialità delle falde decresce da Nord a Sud: ciò è dovuto all'alimentazione di subalveo del Cedrino.

Si stima però che tale apporto sia stato ridotto in seguito allo sbarramento artificiale a monte del corso d'acqua.

**Figura 42. Carta geologica dell'area in esame.**



*Legenda: QUATERNARIO: 1) dune costiere e depositi palustri; 2) detrito di falda e coni detritici; 3) ghiaie e sabbie; 4) alluvioni terrazzate e conie di deiezione; 5) basalti; TERZIARIO: 6) sabbie plioceniche; 7) Conglomerati oligo-miocenici; MESOZOICO: 8) calcari e marne cretaci; 9) calcari e dolomie giurassici; PALEOZOICO: 10) ignimbriti permiane; 11) graniti ercinici con filoni quarzosi e lamprofirici.*

### *Aree interessate da intrusione marina laterale e dal basso e dinamiche attuali e future*

L'esame dei dati freaticometrici raccolti nel corso dell'anno ideologico 1986-87 ha messo in evidenza una singolare depressione della falda, allungata parallelamente alla costa e caratterizzata da controtendenza dal mare verso l'interno. Questo fatto può essere attribuito a diverse cause concomitanti.:

- presenza di zone di massima permeabilità costituita da paleoalvei sepolti del Cedrino, che, per quanto interrati, sono ancora riconoscibili dalla morfologia attuale;
- irregolarità degli orizzonti acquiferi intercalati tra i letti impermeabili e semipermeabili;
- oscillazioni di marea attraverso la barra di sabbie costiere.

Si sono eseguiti diversi prelievi di acque dai pozzi della rete per le analisi chimiche di laboratorio: i campionamenti riguardano esclusivamente la zona satura degli acquiferi, non influenzata dalle acque vadose del suolo. Sono state anche campionate le acque dello stagno Avalè su Petrosu.

La salinità dello stagno risulta molto variabile, da un massimo di 18,18 g/l a Nord a un minimo di 3,36 g/l a Sud. L'elevato contenuto salino è da mettersi in relazione al collegamento, a Nord, tra lo stagno e la foce del Cedrino che, anche a causa dello sbarramento a monte, risulta pervasa da acque marine. La variabilità della salinità deve essere evidentemente attribuita al regime stagnante che caratterizza la distesa d'acqua.

Il contenuto delle acque saline è risultato ovunque molto elevato, sempre al di sopra di 1,5 g/l, generalmente superiore a 10 g/l e con punte superiori a 30 g/l. Si tratta di valori di salinità comparabili alle acque dello stagno e del mare.

Non si possiedono dati sulla variazione delle caratteristiche proprie (temperatura, salinità, ossigeno disciolto, permeabilità) nella porzione di acquifero interessata dalla zona di transizione.

### **ALTRI MECCANISMI DI SALINAZIONE DELLE FALDE (PRESENZA DI SALINITÀ "NATURALE" INDOTTA DA USO DI POZZI IN ACQUIFERI PROFONDI SALINI O PARZIALMENTE SALINI).**

Si ritiene che l'elevata salinità delle acque di falda sia dovuta non soltanto ai sicuri apporti diretti dal mare e dallo stagno, ma anche dalla lisciviazione dei depositi evaporatici intercalati alle alluvioni sabbiose e ghiaiose e agli orizzonti organici di ambiente palustre. L'effetto di lisciviazione dei depositi evaporatici è chiaramente segnalato dal sensibile e rapido aumento di salinità riscontrato nelle acque dei pozzi con il procedere delle prove di eduazione eseguite.

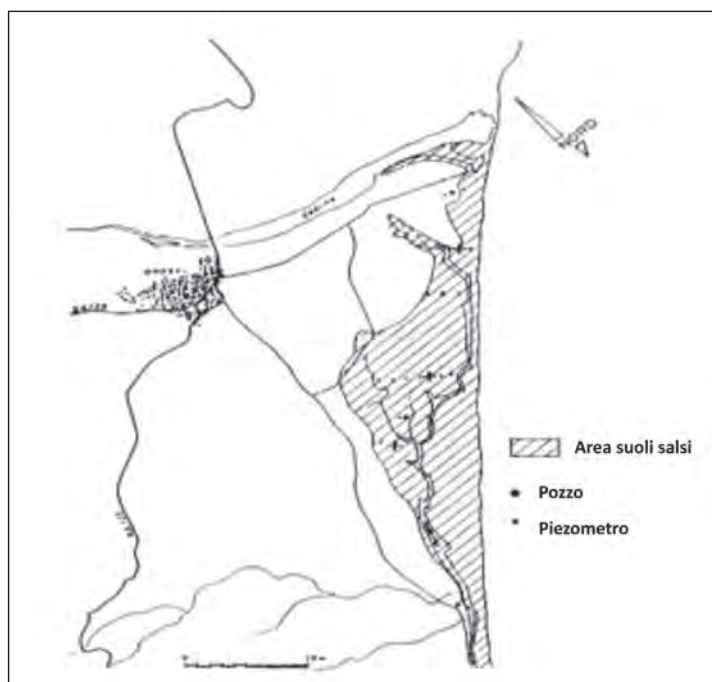
#### *Emungimento per uso irriguo*

Dalla determinazione dello spessore di acquifero impegnato nell'emungimento si rileva che i pozzi scavati nell'area hanno profondità max di 4-5 m. E' stato qui studiato solo l'acquifero superficiale.

Il sistema di irrigazione viene alimentato dalle acque di invaso del Cedrino, mentre i pozzi, utilizzati per l'irrigazione servono alcuni pascoli e talvolta di orti; sono contem-

poraneamente utilizzati anche a scopo idropotabile e zootecnico. I pozzi di osservazione (figura 43) ed i piezometri sono stati scavati e posizionati appositamente per una attività di monitoraggio, che è stata effettuata per un anno (1985); non essendovi un committente interessato, non fu più ripetuta.

**Figura 43. Mappatura dei pozzi e piezometri costituenti la rete di monitoraggio ed area con suoli salsi**



Le aree di maggiore rischio sono da identificare in tutta la fascia costiera (si veda la figura 43 in cui è indicata la fascia dei suoli salsi, per i quali non è stato effettuato alcun intervento di sistemazione).

#### *Riepilogo e dati disponibili*

Si riportano in sintesi i dati disponibili recuperati ai fini di possibili ulteriori valutazioni:

- Tipo di acquifero: prevalentemente confinato;
- Conducibilità idraulica acquifero: la trasmissività dell'acquifero è pari a  $7,53 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  e il coefficiente di immagazzinamento è pari a  $1,19 \cdot 10^{-4}$ ;
- Spessore dell'acquifero: incerto;
- Definizione dei limiti dell'acquifero: incerta;
- Pozzi assegnati ad ogni acquifero: si è studiato solo l'acquifero superficiale e solo attraverso pozzi appositamente scavati.
- Informatizzazione: si possiedono solo dati in formato cartaceo.



# **RAPPORTO SULLO STATO DELL'ARTE NELLO STUDIO DEL FENOMENO SALINIZZAZIONE DELLE FALDE NELLA REGIONE PUGLIA**

Il rapporto sullo stato dell'arte nella Regione Puglia si basa sostanzialmente su quanto estratto e sintetizzato, con delle integrazioni aggiuntive, dal Piano Acque della Regione. Altri studi locali sono stati utilizzati per il Tavoliere e Gargano (Di Pace e Baldassarre, 2005), e anche per l'intera regione (Polemio et alii, 2006).

## **3.1 Inquadramento e caratterizzazione del problema (Polemio et alii, 2006)**

La regione Puglia è caratterizzata da una modesta disponibilità di risorse idriche superficiali per la natura prevalentemente carsica del suo territorio. Notevoli risorse idriche sotterranee sono invece localizzate negli acquiferi costieri carbonatici. L'acqua sotterranea, per utilizzi domestici, irrigui ed industriali, è stata emunta in notevole e crescente quantità nel corso degli anni, permettendo la crescita civile ed economica della popolazione locale. L'entità del flusso di acque sotterranee e la qualità di queste può avere effetti così riassumibili:

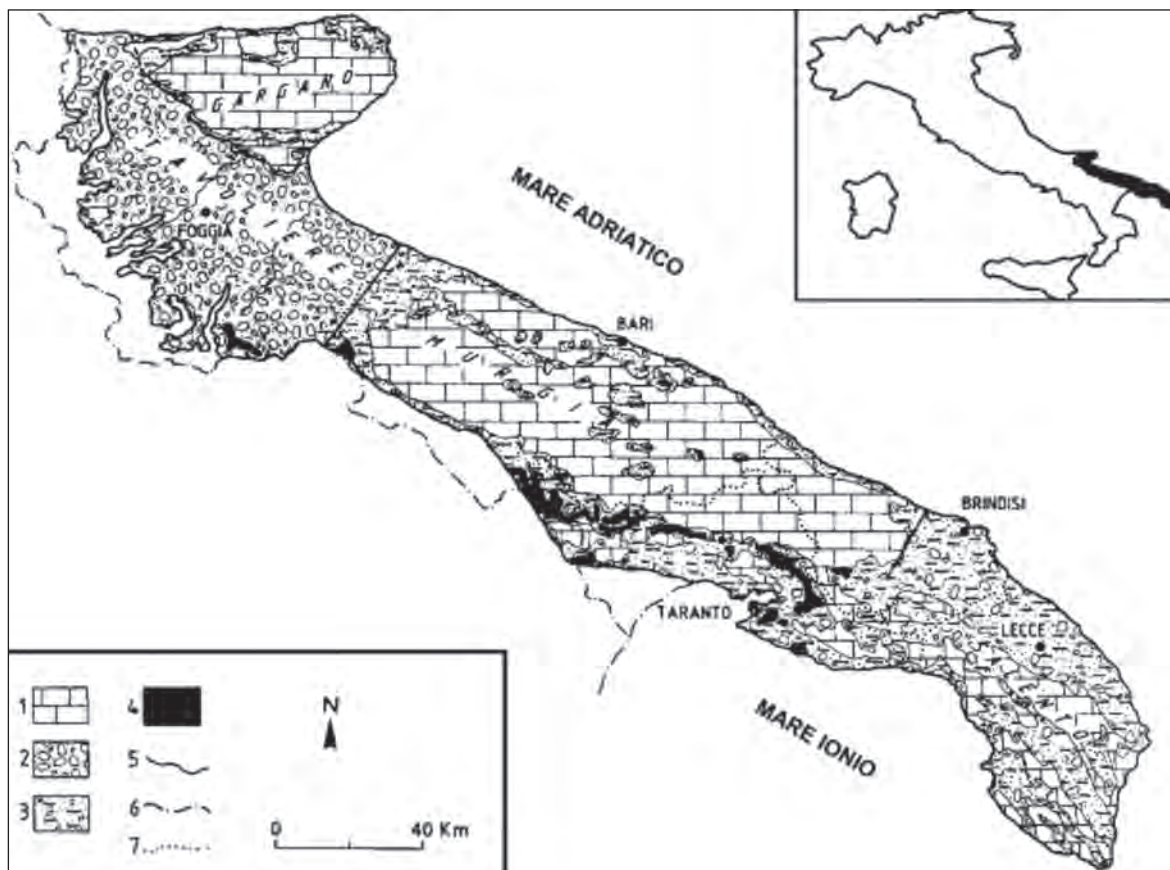
- in termini quantitativi, condiziona l'intrusione marina, che arretra al crescere della portata di acque sotterranee fluenti a mare;
- il precedente punto condiziona la salinità delle acque sorgive effluenti lungo costa e, quindi, quella dei corpi idrici costieri;
- il variare della portata e del residuo fisso si associa a modificazioni della facies chimica delle acque, con effetti geochimici ed ecologici complessi;
- le acque sotterranee possono idroveicolare inquinanti dall'interno del territorio, in particolare sostanze nutrienti, modificando il bilancio del carbonio, azoto e fosforo, con macroscopici effetti di eutrofizzazione di lagune e canali o con effetti sugli equilibri delle specie bentoniche.

In tale contesto il rapporto si inverte, essendo stato stimato che la portata delle acque sotterranee è pari o maggiore di due volte quella fluente nel reticolo idrografico (De Girolamo, Limoni, Portoghese, Vurro, 2001; De Girolamo, Limoni, Portoghese, Vurro, 2002), stime in cui si è tenuto conto del notevole effetto del prelievo da pozzi.

### **3.1.1 Inquadramento idrogeologico**

Nel territorio regionale, eccetto il Tavoliere, le restanti strutture idrogeologiche, il Gargano, la Murgia, e il Salento, hanno in comune alcuni aspetti. Sono caratterizzate da ampi e potenti acquiferi con sede nelle rocce calcaree e/o calcareo-dolomitiche del Mesozoico (Figura 44).

Figura 44. Unità e strutture idrogeologiche della Puglia (da Cotecchia & Polemio, 1999).\*



\* *Legenda: 1) Rocce carbonatiche, 2) conglomerati e sabbie, 3) acquiferi superficiali e litotipi permeabili, calcareniti, sabbie argillose, sabbie, ghiaie o conglomerati, 4) litotipi poco permeabili, argille e argille marnose, 5) limite idrogeologico, incerto dove tratteggiato, 6) confine regionale, 7) confine provinciale.*

Gli acquiferi, interessati da fenomeni carsici, hanno un grado di fratturazione variabile nelle tre dimensioni, e mostrano, a luoghi, un'elevata permeabilità. Nella Murgia e nel Gargano la circolazione idrica sotterranea è in pressione, eccetto lungo una ristretta fascia costiera. Le quote piezometriche massime, rispetto al livello del mare, si elevano in entrambi i casi per diverse decine di metri.

Nel Salento la circolazione idrica sotterranea è più diffusamente freatica. L'estesa falda idrica sotterranea è denominata profonda per distinguerla da altre numerose falde idriche rinvenibili in acquiferi poco potenti ed estesi, generalmente affioranti. La falda idrica profonda del Salento raggiunge quote piezometriche di pochi metri al di sopra del livello del mare (al massimo 4÷5 m s.l.m.).

L'unità idrogeologica del Tavoliere è caratterizzata da un acquifero poroso superficiale, in cui la circolazione idrica sotterranea, a letto limitata da una formazione argillosa potente alcune centinaia di metri, avviene in condizioni freatiche nella parte più interna del territorio e in pressione più a valle, fino alla costa. Tutte le unità idrogeologiche, con effetti molto diversi, sono interessate dal fenomeno dell'intrusione marina. Una più dettagliata caratterizzazione delle unità idrogeologiche, che esula dalle finalità di questa nota, è descritta in: Cotecchia, Grassi, Polemio, (2004), Maggiore e Pagliarulo (2004), e dalla relativa bibliografia.

### 3.1.2 Qualità delle acque sotterranee pugliesi

Le acque sotterranee nell'area di studio sono attualmente soggette a due principali fonti d'inquinamento, riconducibili alle attività antropiche: il progressivo inquinamento salino delle acque sotterranee e l'inquinamento chimico-fisico che riducono la disponibilità di acqua di buona qualità (Cotecchia, 1981; Fidelibus, Tulipano, 1996; Cotecchia, Polemio, 1997).

Diverse campagne d'indagini hanno caratterizzato la qualità delle acque sotterranee in esame. Tra le altre, si citano quelle inerenti le principali sorgenti costiere (Cotecchia, Tulipano, 1993) e quelle relative alla gran parte dei pozzi costituenti l'attuale rete di monitoraggio della Regione Puglia (Cotecchia, Polemio, 1998, 1999), gestita fino a pochi anni or sono, dall'Ente per lo Sviluppo dell'Irrigazione. Operando su molti dei pozzi e delle sorgenti utilizzati in questi studi, il CNR-IRPI ha proseguito i propri studi, effettuando determinazioni fino al 2003.

Le ricerche svolte hanno avuto il fine di caratterizzare le modificazioni qualitative delle acque sotterranee lungo percorsi che portano dalle zone di alimentazione alle zone di efflusso, siano esse piccole lagune, il reticolo idrografico in prossimità della costa o il mare, zone ubicate comunque lungo la costa ionica ed adriatica.

In Figura 45 si riportano le ubicazioni delle sorgenti e dei pozzi campionati, che riportano il degrado qualitativo rappresentativo dell'area in cui il pozzo stesso è posto.

Figura 45. Ubicazione dei punti di campionamento, pozzi e sorgenti



Sono state determinate la conducibilità elettrica specifica, le concentrazioni delle specie azotate (ammoniacale, nitriti e nitrati), dei cloruri, del ferro, dei fluoruri, di alcuni metalli pesanti (As, Cd, Hg, Pb, Zn).

Con riferimento al D.L. 152/1999 e al D.Lgs. 258/2000, ispirati e coerenti con precedenti direttive europee, è possibile individuare lo stato qualitativo delle acque sotterranee e classificarle, utilizzando dei parametri di base ed altri addizionali. Si può così percepire, in modo sinottico e semplice, la variazione della qualità delle acque sotterranee, nel loro percorso sotterraneo dalle zone di alimentazione al mare.

Le cosiddette classi chimiche (1-4) (come da Decreti precedentemente citati) dei corpi idrici sotterranei sono definite secondo il seguente schema: -classe 1, impatto antropico nullo o trascurabile, con pregiate caratteristiche idrochimiche; -classe 2, impatto antropico ridotto, sostenibile sul lungo periodo e con buone caratteristiche idrochimiche; -classe 3, impatto antropico significativo e con caratteristiche idrochimiche generalmente buone, ma con alcuni segnali di degrado; -classe 4, impatto antropico rilevante con caratteristiche idrochimiche scadenti.

Ai fini della classificazione chimica di ciascun pozzo o punto di misura si è utilizzato il valore medio, rilevato per ogni parametro di base o addizionale nel periodo di riferimento, inteso in genere come anno. Le diverse classi qualitative vengono attribuite secondo gli intervalli di Tabella 1, tenendo anche conto dei parametri e dei valori riportati nella Tabella 21. La classificazione complessiva del campione idrico è determinata dalla classe peggiore (più alta) riscontrata per ognuno dei diversi parametri di base o addizionali.

**Tabella 21. Parametri di base per la classificazione secondo la normativa**

Parametro	Unità di Misura	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Cond. Elett. sp.	µS/cm (20°C)	≤ 400		≤ 2500	> 2500
Cl	mg/l	≤ 25		≤ 250	> 250
Fe	µg/l	≤ 50		≤ 200	> 200
NO3	mg/l	≤ 5	≤ 25	≤ 50	> 50
SO4	mg/l	≤ 25		≤ 250	> 250
NH4	mg/l	≤ 0,05		≤ 0,5	> 0,5

Se la presenza di alcuni parametri di base e di tutti quelli addizionali in concentrazioni superiori a quelle di Tabella 11. è di origine naturale è attribuita la classe 0, per la quale, di norma, non sono previsti interventi di risanamento.

La presenza di inquinanti con concentrazione maggiore di quella di cui alla Tabella 22 determina la classificazione in classe 4. Se gli inquinanti di Tabella 12 non sono presenti, sono al di sotto della soglia di rilevabilità o riportata nella tabella medesima, il corpo idrico è classificato secondo i risultati relativi ai parametri di tabella 21.

Tranne il caso della presenza naturale, il ritrovamento degli inquinanti di Tabella 22 in concentrazioni significative, vicine alla soglia indicata, è comunque un segnale molto negativo per le qualità delle acque sotterranee. In tal caso, dovrebbero essere adottate misure atte a prevenire un ulteriore peggioramento e a rimuovere le cause del degrado. Si dovrebbero altresì considerare gli effetti dell'eventuale interconnessione delle acque sotterranee con corpi idrici superficiali di particolare pregio, per cui giustamente la normativa prevede obiettivi ambientali, a causa della persistenza e dei processi di bioaccumulo di alcuni inquinanti, più cautelativi.



**Tabella 22. Parametri aggiuntivi selezionati tra quelli prescritti dalla normativa**

Parametro	µg/l
Fluoruri	≤ 1500
Arsenico	≤ 10
Cadmio	≤ 5
Nitriti	≤ 500
Mercurio	≤ 1
Piombo	≤ 10
Zinco	≤ 3000

Nelle elaborazioni descritte nel seguito sono state considerate un complesso di 279 determinazioni della qualità in punti di campionamento costituiti da pozzi e sorgenti, considerando dati relativi al 1995 e al 2003. Con determinazioni si intende una stringa di valori, uno per ciascun parametro considerato ed effettivamente determinato, relativo al singolo periodo annuo. Nel caso di più misure in ciascun punto e/o periodo, si è assunto il valore medio nella relativa determinazione.

In Tabella 23 è riportato un quadro riassuntivo della qualità delle acque sotterranee pugliesi classificate secondo la normativa. Non essendo disponibili tutti i parametri per ciascuna determinazione, si riportano le percentuali delle classi (da 1% a 4%) riferite al numero effettivo di determinazioni disponibili per ciascun parametro (Tabella 23).

Riferendoci ai parametri di base, il maggior numero di determinazioni ricade nelle classi peggiori, la 3 e la 4 per i parametri la cui concentrazione è fortemente influenzata dal fenomeno dell'intrusione marina (conducibilità elettrica, cloruri e solfati). Il criterio normativo di classificazione in classe è alquanto severo nelle condizioni idrogeologiche in esame, anche considerando la sola conducibilità elettrica specifica. Solo un 5% di campioni, per gli elementi legati al ciclo dell'azoto, presenta qualità delle acque scadenti (classe 4); tale fenomenologia è imputabile ad attività antropiche poste in corrispondenza delle aree antropizzate e alle attività agricole.

Per quanto attiene i parametri aggiuntivi selezionati, il 3% dei casi, riferito al 93% delle determinazioni totali, finisce nella classe peggiore per il parametro nitrati. Da rilevare come per il Pb il 50% di determinazioni (sul 70% del data set totale) ricade in classe 4; per i fluoruri (3% su 21% del totale) ed il mercurio (1% su 66% del totale) il numero e l'ubicazione delle determinazioni che ricadono nella classe peggiore è basso ed è tale che si possa mettere in relazione ad episodi d'inquinamento locali, in aree ristrette in cui ulteriori approfondimenti richiedono rilievi a scala di dettaglio.

**Tabella 23. Sintesi dei risultati della classificazione.\***

PARAMETRO DI BASE	C.E.	Cl	Fe	NO3	SO4	NH4	
PD (%)	100	92	66	93	92	93	
1 (%)	4	10	99	45	35	80	
2 (%)	0	0	0	40	0	0	
3 (%)	64	47	1	13	50	18	
4 (%)	32	44	0	3	16	2	
PARAMETRO ADDIZIONALE	F	NO2	Pb	As	Cd	Zn	Hg
PD (%)	21	93	70	4	4	4	66
4 (%)	3	3	50	0	0	0	1

\* Legenda:

PD = rapporto percentuale tra numero di specifiche determinazioni di ciascun parametro e numero totale delle determinazioni disponibili per pozzi e sorgenti (279). Da 1 a 4 (%) = rapporto percentuale tra determinazioni rispettivamente in classe da 1 a 4 e numero totale delle determinazioni disponibili per ciascun parametro

In figura 46 si riporta la distribuzione territoriale della qualità delle acque sotterranee pugliesi, ottenuta considerando tutti i parametri selezionati e considerati, determinati nel corso del 1995. Le acque sotterranee di maggior pregio sono rinvenibili in aree interne, porzioni sempre più ristrette delle aree di alimentazione; queste ultime ricadono generalmente nella classe 2 e più raramente nella classe 3. Ampiamente diffusa, lungo l'intero sviluppo costiero e per diversi chilometri allontanandosi dalla costa, è la classe 3, che in aree localizzate, quali per esempio Taranto, passa anche a 4.

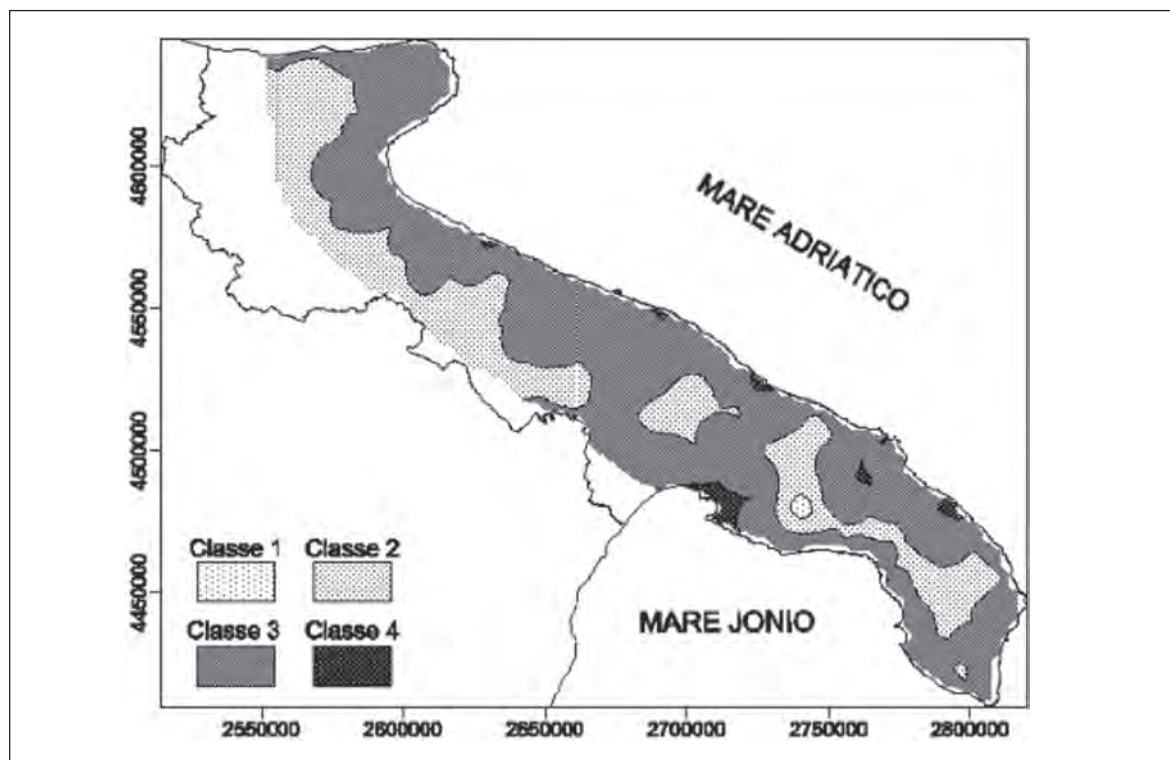


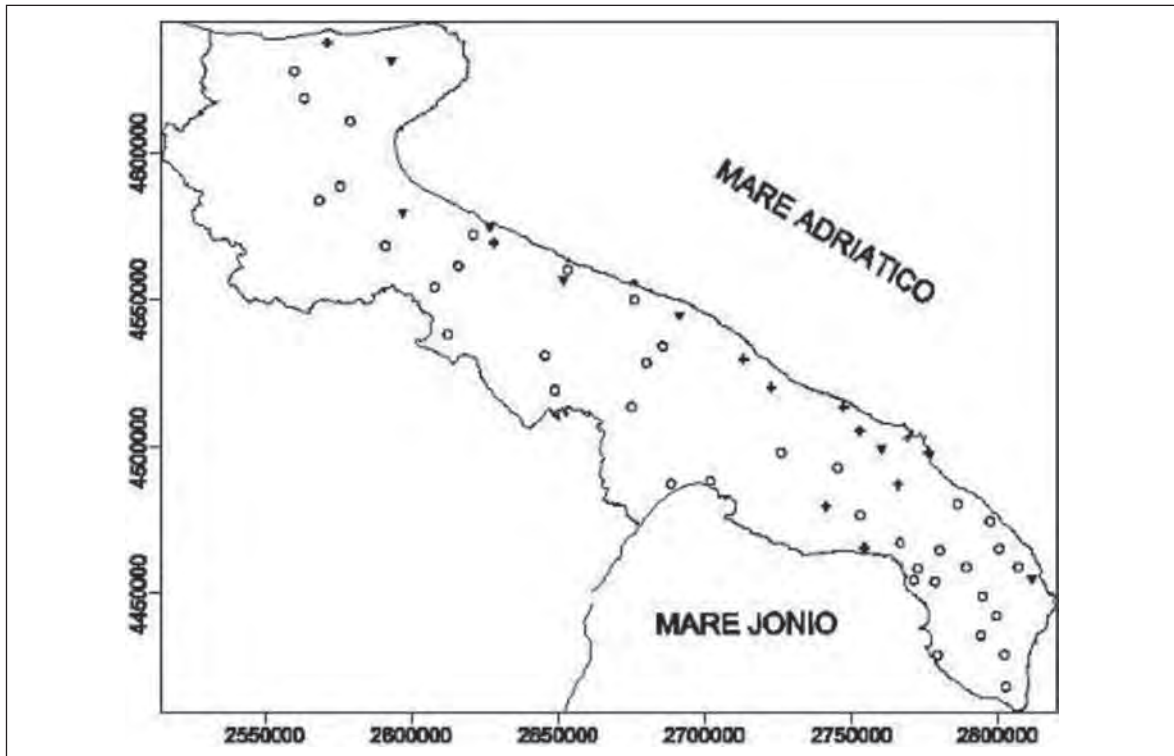
Figura 46. Carta delle classi di qualità nel 1995.

Per caratterizzare le tendenze in atto degli attributi qualitativi delle acque sotterranee, sono stati determinati per ciascun parametro i cambiamenti di classe, in termini di variazione del 2003 rispetto al 1995, come riportato dagli esempi delle Figure 47 e 48.

La classe qualitativa inerente la conducibilità elettrica specifica (figura 47) è invariata in una vasta porzione del territorio regionale, fatta eccezione per alcune aree localizzate lungo la fascia costiera. Evidente è il peggioramento nell'area costiera compresa fra Bari e Brindisi.

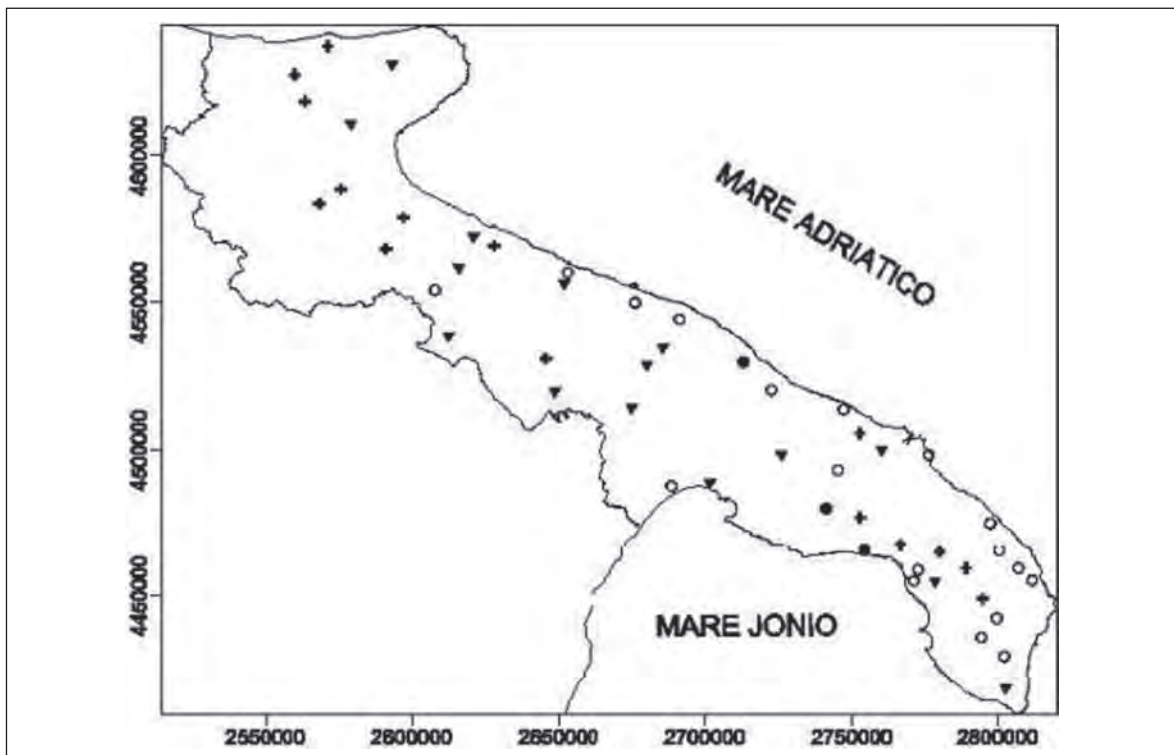
La classe dei solfati (figura 48) invece, mostra una maggiore variabilità spaziale. Si osserva un diffuso miglioramento (diminuzione di classe) nelle aree interne murgiane e garganiche; un sempre più evidente peggioramento nel Tavoliere e nelle aree interne del Salento, quest'ultime in passato di buona qualità.

Figura 47. Carta della variazione della classe di qualità del 2003 rispetto al 1995 per la conducibilità elettrica specifica.



Classe: +) incrementata, O) invariata, ▼) diminuita.

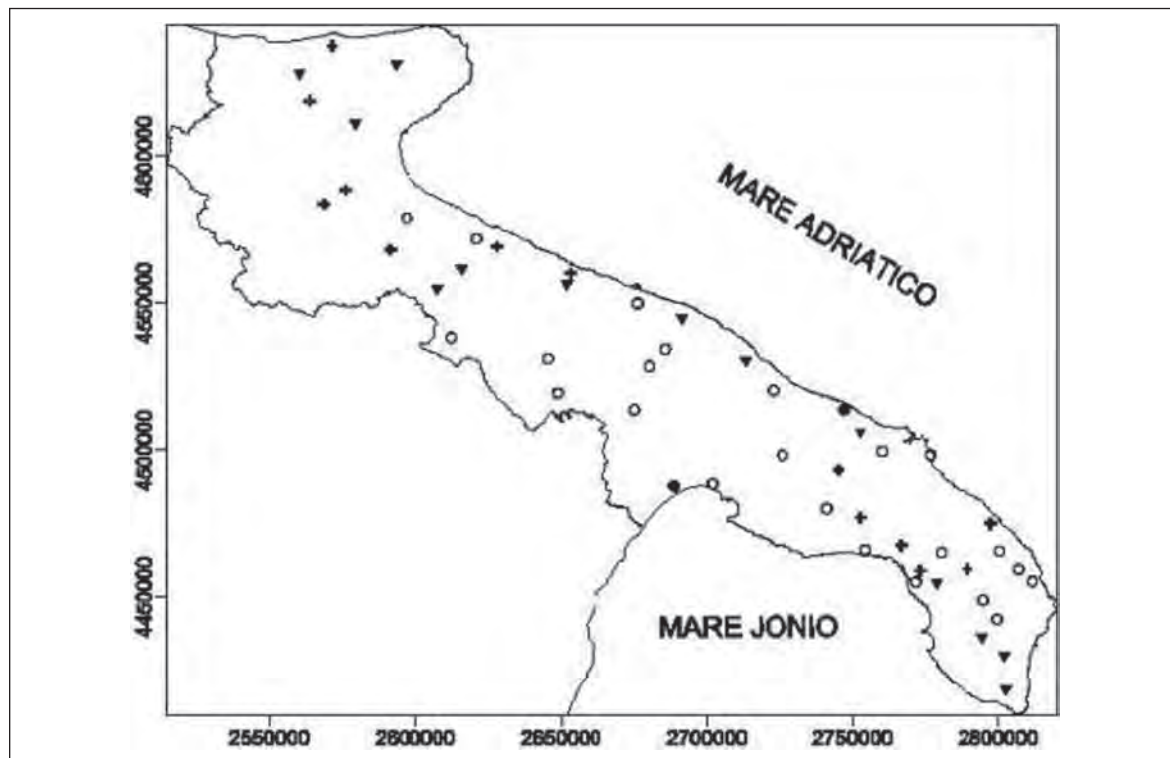
Figura 48. Carta della variazione della classe di qualità del 2003 rispetto al 1995 per i solfati.



Classe: +) incrementata, O) invariata, ▼) diminuita.

La classe relativa ai nitrati (figura 49) è costante o diminuisce nella Murgia mentre nel Salento e nel Tavoliere si osserva una maggiore variabilità spaziale, con il prevalere dell'incremento di classe nelle aree il cui territorio è destinato principalmente a pratiche agricole.

**Figura 49. Carta della variazione della classe di qualità del 2003 rispetto al 1995 per i nitrati.**



Classe: +) incrementata, O) invariata, ▼) diminuita.

In generale, lungo i percorsi che portano dalle zone di alimentazione alle zone di efflusso nei corpi idrici superficiali, siano essi piccole lagune, o le aree di reticolo idrografico in prossimità della costa, o il mare, o zone ubicate comunque lungo la costa, la qualità delle acque peggiora. Tale andamento non è sempre continuo ed omogeneo, in quanto appare “disturbato” da diversi fattori idrogeologici e, principalmente, antropici, correlabili all’ubicazione dei principali centri urbani. La situazione a maggiore variabilità è quella che si osserva nel Salento. Tale circostanza è dovuta, per la notevole vulnerabilità dell’acquifero salentino, sia all’inquinamento salino per intrusione marina sia all’inquinamento antropico vero e proprio, proveniente dai numerosi centri urbani diffusi sul territorio nonché dalle attività agricole. Particolarmente grave è il degrado che si osserva nel Tavoliere, che mostra un peggioramento, nel periodo considerato, di tutti i parametri rilevati.

Una conferma della rilevanza del degrado che le acque sotterranee accumulano a partire dalle zone di alimentazione, si nota osservando la qualità delle acque sorgive costiere. Di fatto le acque sorgive devono oggi considerarsi un non trascurabile vettore di carichi inquinanti prodotti nell’entroterra, immessi nel sottosuolo, raccolti e trasportati lungo le principali linee di flusso idrico sotterraneo. Si consideri che le acque analizzate alle scaturigini ricadono nella quasi totalità dei casi, per ciascun parametro, nella classe peggiore segnalata dalle determinazioni, relative al medesimo parametro. In altre parole, le acque

sorgive sono generalmente più scadenti di quelle campionabili dai pozzi posti idrogeologicamente a monte.

L'esame dei dati raccolti nel tempo sembra peraltro mostrare che il degrado qualitativo delle risorse idriche sotterranee, pur non considerando i gravi effetti dell'intrusione marina, interessa con progressione nel tempo tutta l'area salentina, il Tavoliere e, in parte, quella murgiana. Da ciò consegue il rischio concreto che anche laddove il degrado appaia oggi non particolarmente marcato, la situazione sia destinata a deteriorarsi nel tempo, con conseguenze gravi ai fini degli usi cui la falda acquifera è destinata e degli ambienti costieri, in cui queste acque si sversano in assenza di utilizzo.

Lo stato qualitativo delle acque di falda della Murgia e del Salento, già afflitte da una progressiva contaminazione salina (Polemio, Limoni, 2001), destano particolare preoccupazione per l'inquinamento riconducibile ai rilasci sul suolo e nel sottosuolo di acque reflue urbane, non o insufficientemente depurate, e di rifiuti di varia natura, spesso malamente smaltiti sulle superfici agrarie. La presenza diffusa di parametri indicatori di inquinamento antropico, quali l'ammoniaca, i nitrati, e i nitriti nelle acque sotterranee campionate dai pozzi e dalle sorgenti, delinea un quadro conoscitivo a luoghi allarmante.

### **3.2 Individuazione aree di interesse per il fenomeno della intrusione salina**

In Puglia la piezometrica nei depositi sabbiosi del Tavoliere, dove sono in esercizio diverse migliaia di pozzi, indica un flusso verso il mare con un gradiente dello 0,5% (Cotecchia et al., 1981). I più importanti acquiferi della regione sono costituiti dai sistemi dei calcari carsici del promontorio del Gargano, dei rilievi della Murgia e della penisola Salentina.

#### **Gargano e Tavoliere Foggiano**

Il promontorio del Gargano è sede di un acquifero dal quale sgorga un gran numero di sorgenti periferiche che defluiscono a mare, 27 delle quali con portata  $Q > 30$  l/s, 14 con  $Q = 100-300$  l/s e 5 con  $Q = 300-1000$  l/s. Si stima che la portata complessiva aggregata sia dell'ordine di 4 m<sup>3</sup>/s.

#### **Murgia**

Il sistema carsico della Murgia, abbondantemente ricaricato a vari livelli, contiene significative risorse che sgorgano direttamente in mare da numerose sorgenti costiere. La superficie piezometrica ha un gradiente dello 0,1-0,3% verso l'Adriatico e un gradiente meno marcato verso il Golfo di Taranto. Le sorgenti sono poche ma alcune hanno notevole portata; la loro portata aggregata è dell'ordine di 7 m<sup>3</sup>/s.

#### **Salento**

Nel grande serbatoio della penisola salentina, costituita da calcari stratificati, molto fratturati e incassati, si sono censite 80 sorgenti, la cui portata aggregata è di 10,4 m<sup>3</sup>/s. Il gradiente della superficie piezometrica è dello 0,02%. Le cause principali dell'intrusione sono da attribuirsi all'eccessivo sfruttamento delle falde prodotto dalle grandi industrie e dall'agricoltura alla quale sono da attribuirsi anche forme di inquinamento diffuso. A

causa dell'eterogeneità della sequenza dei carbonati e delle discontinuità dovute all'intensa fratturazione e al carsismo, le caratteristiche idrogeologiche sono molto complesse e diversificate.

La penisola del Gargano si comporta come un'isola, data la lunghezza della costa rispetto al suo limite con l'entroterra. La maggior parte dei terreni in prossimità della tavola d'acqua sono altamente permeabili, cosicché l'acqua dolce defluisce rapidamente a mare con basso gradiente e la potenza della lente che essa forma sulla sottostante acqua salata è limitata. Il notevole sviluppo del carsismo favorisce la mescolanza di acque di diversa salinità. I calcari cretacei carsici fra Foggia e il Gargano sono quasi tutti invasi da acqua salata, che si ritrova ovunque a poca profondità dato il limitato carico della soprastante lente di acqua dolce.

Nella Murgia l'intrusione marina è avvenuta a diverse centinaia di m sotto il livello del mare e nel Salento l'acquifero lentiforme degrada verso l'Adriatico e lo Ionio. Le linee di flusso preferenziali sono a diversi livelli in funzione del carsismo (Tulipano, 1976). In realtà, dal punto di vista idrogeologico la Murgia e il Salento formano sostanzialmente un sistema simile di rocce carbonatiche mesozoiche, ma la permeabilità della Murgia è bassa, cosicché si sono distinte due diverse unità acquifere. Di fatto le acque dolci della Puglia flottano sull'acqua salata e defluiscono verso il mare lungo orizzonti sorgentiferi subaerei e subacquei.

Fin dai primi anni '70 le condizioni di equilibrio fra acque dolci e salate sono cambiate nel tempo al variare con l'aumentare delle eduzioni di acque sotterranee, al punto che in pozzi perforati attraverso livelli con diversa salinità si è rilevato un flusso verticale a diverse profondità. Le variazioni misurate nel tempo ai diversi livelli di carichi, temperatura e salinità in numerosi pozzi trivellati per ricerca e per scopi irrigui hanno permesso di identificare le principali origini della contaminazione salina, fra le quali l'alto grado di anisotropia verticale. La temperatura è risultata essere un eccellente tracciante per riconoscere i principali percorsi e le loro interconnessioni e per identificare i fattori che fortemente influenzano l'evoluzione dei processi di contaminazione salina. (Cotecchia et al., 1981, Tulipano & Fidelibus, 1986).

La saturazione raggiunta dalle acque sotterranee come conseguenza dei processi carsici e di mescolanza di acque dolci e saline è stata valutata con determinazioni idrochimiche. Si è trovato che i limiti che segnano le condizioni di sovra e sottosaturazione sono marcati dai rapporti caratteristici  $rCa/rMg$ ,  $rMg/rNa$ , e  $rCa/rNa$ , e sono altresì determinati da un dato valore della concentrazione di  $Sr^{++}$ , almeno per le acque della zona considerata (Tadolini et al., 1982).

Le caratteristiche chimiche e isotopiche delle acque drenate dalle sorgenti costiere attraverso le quali le acque sotterranee defluiscono dagli acquiferi carsici della Puglia al mare sono interessate da processi di miscelazione di acque dolci e d'intrusione marina. Analizzando certi parametri idrochimici, è stato possibile differenziare l'acqua d'intrusione salina innanzi tutto come una funzione dei diversi tempi di residenza dell'acqua marina nell'acquifero. Paragonando le caratteristiche isotopiche delle acque miscelate con la composizione isotopica delle acque sotterranee di origine marina è stato possibile tracciare la composizione isotopica originale delle acque di alimentazione (Fidelibus, & Tulipano, 1986).

### 3.3 Lo stato della contaminazione salina negli acquiferi costieri della Puglia

Si definisce di tipo costiero un acquifero parzialmente o totalmente bordato dal mare, con affioramento lungo la costa di rocce permeabili; le acque dolci circolanti in tale tipo di acquifero galleggiano, per minore densità, su acque salate di origine marina. L'acquifero ha come livello base il livello marino.

Le acque circolanti in un acquifero carsico costiero defluiscono a mare attraverso sorgenti di tipo diffuso (prevalente permeabilità per fessurazione delle rocce affioranti lungo la costa) e concentrato (prevalente permeabilità per carsismo); in quest'ultimo caso le sorgenti, che possono essere anche subacquee (scaturigini ubicate sul fondo marino), rappresentano lo sbocco a mare di condotti carsici. Le bocche di queste sorgenti di tipo concentrato diventano vie di facile e veloce penetrazione entroterra delle acque marine quando l'acquifero viene depressurizzato per effetto di eccessivi prelievi.

Uno stato di sovrasfruttamento delle acque sotterranee circolanti in acquiferi costieri genera fenomeni di salinizzazione di esse, determinati dal miscelamento con acque salate di origine marina richiamate nell'acquifero o dal basso o lateralmente dalla costa.

A condizioni costiere rispondono gli acquiferi presenti nelle Unità idrogeologiche del Gargano, Murgia e Salento, per i quali di seguito si descrivono le fenomenologie in atto legate al processo di intrusione marina e di salinizzazione indotta da un regime di sovrasfruttamento.

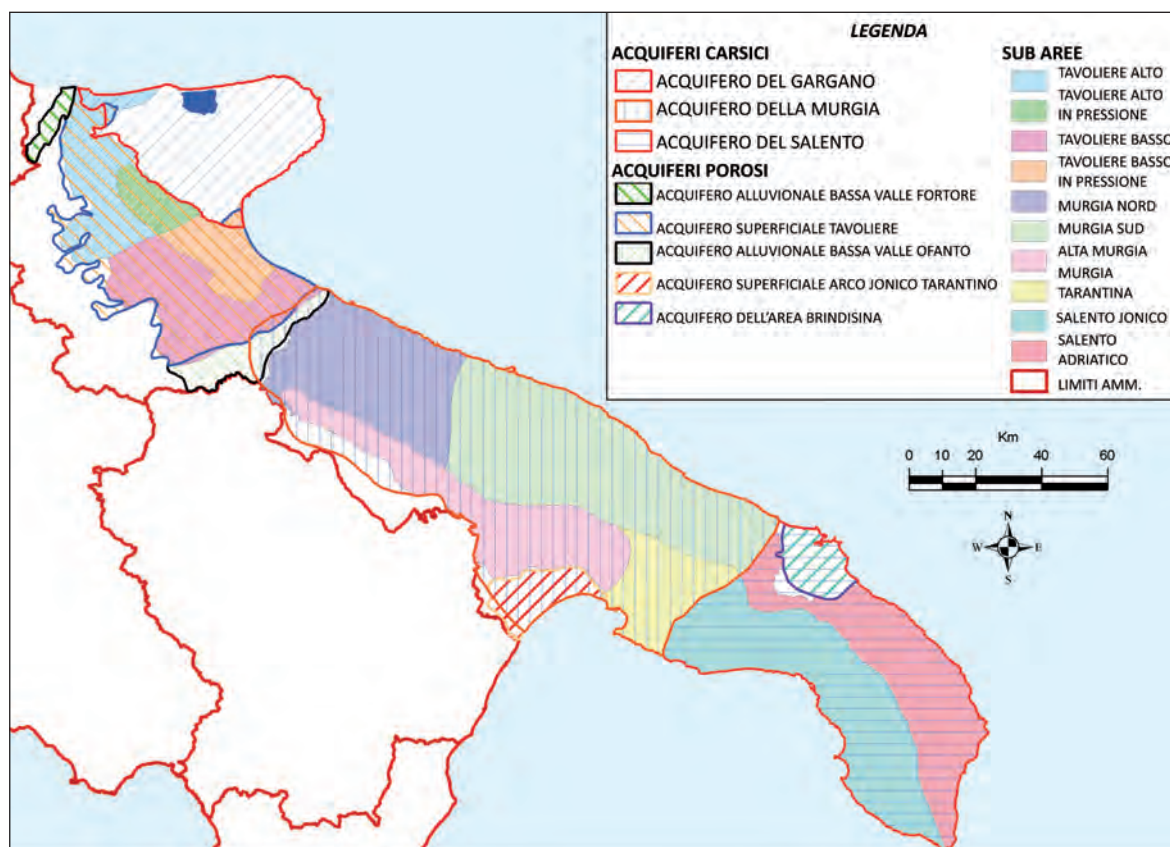
Sulla base della elaborazione dei dati disponibili, è stato possibile ricostruire una distribuzione media del contenuto salino delle acque della falda estratte dagli acquiferi carsici cretacei della Murgia e del Salento (falde profonde). Tale distribuzione, riportata nella tavola 9.1.1, non può ovviamente considerarsi rappresentativa delle situazioni attuali, avendo a base i valori rilevati nel periodo 1999-2002. Va inoltre considerato che nelle fasce costiere il contenuto salino delle acque estratte è strettamente correlato con la penetrazione del pozzo in seno all'acquifero e con la portata estratta. Infatti, nell'analisi dei dati utilizzati per l'elaborazione è emersa, talora, la presenza di opere di captazione drenanti acque a contenuto salino superiore ai pozzi presenti nell'intorno. Tali situazioni sono state a volte ricondotte alla maggiore profondità dell'opera di captazione, ma la causa potrebbe essere attribuita anche ad una elevata portata emunta.

Tale rappresentazione fornisce, comunque, a scala regionale, un quadro della qualità delle acque di falda in relazione allo stato di contaminazione salina degli acquiferi della Murgia e del Salento. Al fine di poter operare un raffronto sulla evoluzione del fenomeno in argomento, nella medesima cartografia è stata riportata anche la ricostruzione operata nell'ambito degli "Studi per la Variante al Piano Regolatore Generale degli Acquedotti della regione Puglia", riferita a dati rilevati nel 1989. Le modificazioni che si evidenziano forniscono utili indicazioni sull'evoluzione del fenomeno, sia pure nel limite di approssimazione, accettabile per una rappresentazione a scala regionale, derivante dall'aver operato con dati rilevati su pozzi diversi nei due periodi e non omogenei per fonte di informazione e orizzonte temporale. Si ritiene inoltre opportuno evidenziare che sulla base delle ricostruzioni effettuate si rileva come il fenomeno di contaminazione abbia talora determinato un aumento del tenore salino delle acque lungo le fasce costiere; in altri casi tale fenomeno sembra interessare aree più interne, con arretramento della isoalina 0,5 g/l. Non sono peraltro infrequenti situazioni che localmente lasciano ipotizzare un miglioramento della situazione evidenziato dallo spostamento verso la costa della stessa isoalina 0,5 g/l. Queste situazioni potranno trovare chiarimento solo attraverso un rilievo sistematico su una rete

di punti acqua allo scopo destinata, come già esposto nel precedente paragrafo sulla “qualità delle acque sotterranee pugliesi”.

Con riferimento agli acquiferi carsici costieri un fattore di fondamentale importanza per la limitazione del fenomeno di contaminazione salina è rappresentato dalla quota di attestazione dei pozzi al di sotto del livello medio mare. Le moderne tecnologie di perforazione consentono oggi di conseguire, a costi più convenienti che in passato, profondità notevoli e questo ha determinato la realizzazione di opere di captazione spinte sempre a maggiori profondità per aumentare la portata emungibile. Esemplificativo al riguardo risulta l'esame della TAV. 9.6, che riporta le profondità di attestazione dei pozzi che interessano gli acquiferi carsici murgiani e salentini, unitamente alla distribuzione del contenuto salino delle acque di falda estratte. Da tale rappresentazione è possibile osservare come, lungo la fascia costiera murgiana adriatica, il contenuto salino delle acque estratte sia in relazione con le profondità di attestazione dei pozzi al disotto del livello mare.

**Figura 50. Corpi idrici sotterranei interessati con lo studio**





### **3.3.1 Sistema di monitoraggio delle acque sotterranee**

Il D. Lgs n° 152/99 riporta nell'Allegato 1, le indicazioni relative alla classificazione delle acque in funzione degli obiettivi di qualità ambientale e le modalità con cui condurre il monitoraggio.

Nella regione Puglia la prima rete organica di monitoraggio delle acque sotterranee, estesa all'intero territorio regionale, fu realizzata dall'Ente Irrigazione, Ente delegato a gestire le risorse idriche sotterranee ai fini irrigui, che a partire dal 1959, ha provveduto ad attrezzare con strumentazioni di registrazione meccanica una rete di pozzi per effettuare registrazioni idrometrografiche. Tra il 1995 ed il 1997, sempre a cura dell'Ente Irrigazione, nell'ambito dei programmi POP 1989-91, si provvide all'ampliamento della rete attraverso la individuazione e la realizzazione di nuovi punti acqua e all'ammodernamento delle stazioni preesistenti, attrezzandole con apparecchiature di acquisizione e di trasmissione dei dati ad un centro di controllo.

In particolare la rete di monitoraggio era costituita da n. 110 pozzi idrometrici (finalizzati a misure delle escursioni dei livelli piezometrici) di cui n.19 pozzi spia (penetranti nelle acque marine che invadono il continente alla base della falda dolce, per le misure relative allo stato di equilibrio tra acque dolci e salate) e n. 30 pozzi di controllo qualitativo (per le misure relative allo stato di inquinamento delle acque sotterranee indotto dalle attività antropiche).

I punti acqua costituenti la rete furono interessati da rilievi di carattere idrogeologico ed idrochimico nel periodo 1995-1997. Nello stesso progetto furono interessati da analisi chimico-fisiche-batterologiche, analizzando anche la presenza di fitofarmaci, una serie di pozzi del Consorzio di Bonifica Ugento Li Foggi ricadenti nella Penisola Salentina e di alcune sorgenti costiere. Altre reti di controllo sono state costituite nell'ambito di diversi studi finalizzati, che però hanno interessato aree limitate e comunque sono state interessate da cicli di rilievi occasionali o limitati nel tempo.

La definizione del piano di tutela richiede la preventiva elaborazione e realizzazione di programmi mirati alla conoscenza dello stato qualitativo e quantitativo dei corpi idrici e all'acquisizione delle necessarie informazioni sulle caratteristiche fisiche, naturali e socio-economiche dei bacini per valutare le pressioni e gli impatti da essi subiti. In questa ottica il Commissario Delegato per l'emergenza ambientale nella regione Puglia ha predisposto il progetto per la realizzazione del "Sistema di monitoraggio dei corpi idrici sotterranei della regione Puglia" con il quale si è provveduto a fornire indicazioni in ordine alla definizione delle attività di monitoraggio della qualità ambientale, dei corpi idrici sotterranei. In particolare è stata definita l'ubicazione e la codifica delle stazioni di monitoraggio, la frequenza dei campionamenti, i profili analitici, le modalità di archiviazione, presentazione e trasferimento dei dati, in armonia con le indicazioni contenute nell'All. 1 al D. Lgs. 152/99 e al D.M del 18/9/02.

Il progetto si inquadra nella visione della gestione dell'emergenza all'interno del processo di pianificazione dell'uso della risorsa idrica. In tale ottica gli aspetti antropici di uso plurimo delle risorse idriche e quelli di salvaguardia e tutela delle risorse stesse, vanno visti non in maniera conflittuale, ma in maniera integrata e sinergica, attraverso l'espletamento di funzioni di controllo e di supporto decisionale alle azioni di gestione razionale ed ottimizzata delle risorse idriche. Il tema specifico della definizione del "Sistema di monitoraggio qualitativo e quantitativo dei corpi idrici sotterranei della regione Puglia" deve quindi essere inquadrato nella logica più ampia che coinvolge il "flusso informativo" e le

“esigenze” di tipo programmatico, per rispondere ai requisiti fondamentali di funzionalità di un servizio permanente di controllo della risorsa idrica sotterranea. Tale attività potrà consentire di sviluppare le procedure di classificazione previste dal D.Lgs. 152/99 per i corpi idrici indagati, onde evidenziare le zone di criticità dal punto di vista della qualità delle acque, classificare i corpi idrici in funzione degli obiettivi di qualità ambientale, verificare, successivamente, sul lungo periodo, le politiche di gestione della risorsa e l'efficacia degli interventi posti in essere in termini di riduzione dei carichi inquinanti, indicare le zone a maggior impatto antropico, acquisire ulteriori informazioni per il monitoraggio del bilancio idrico, evidenziare la presenza di situazioni anomale di contaminazione.

La rete di monitoraggio da realizzare, nell'ambito della fase conoscitiva, è stata definita, partendo dalla citata rete esistente realizzata, nell'ambito dei Programmi POP 89-91, a cura dell'Ente per l'Irrigazione di Puglia, Lucania ed Irpinia (Progetto per l'ampliamento e l'ammodernamento della rete per il controllo idrometrografico e qualitativo delle falde idriche della regione Puglia) e analizzando i principali fattori di carattere idrogeologico e antropico del territorio in considerazione delle peculiari problematiche connesse alla tutela delle risorse idriche sotterranee. La individuazione dei punti acqua di integrazione della rete di controllo strumentale esistente è stata preceduta da una fase ricognitiva delle opere di captazione esistenti di proprietà pubblica (talora non utilizzate), ciò con la finalità di evitare la realizzazione di nuovi pozzi/piezometri e di conseguenza ottimizzare l'impegno delle risorse economiche. Sono stati individuati alcuni dei nuovi punti acqua da inserire nella costituenda rete di monitoraggio di prima fase, al fine di ottenere una prima distribuzione dei punti di controllo abbastanza rappresentativa per gli obiettivi della fase conoscitiva. Nella individuazione dei nuovi punti acqua sono stati utilizzati alcuni dei pozzi esistenti a titolarità pubblica, ciò non è stato possibile per l'area del Tavoliere, ove si è fatto riferimento alla rete freaticometrica costituita nell'ambito degli “Studi per la definizione del modello matematico del sistema acquifero compreso tra i bacini dei fiumi Ofanto e Fortore”. Sono state individuate in prima istanza e indicate le aree, caratterizzate da particolari problematiche, in cui sarà necessario approfondire le indagini.

La rete di monitoraggio di prima fase comprende due tipologie di punti di controllo: stazioni di base e stazioni ausiliarie.

Le stazioni di base hanno il compito di classificare le risorse idriche, raccogliere dati di fondo e determinare lo stato di qualità dell'acqua. Queste stazioni sono distribuite sull'intero territorio regionale.

Complessivamente la rete di monitoraggio di prima fase definita è costituita da 372 punti acqua (la cui ubicazione è riportata nella Fig. 4.1), di cui 104 pozzi da attrezzare con strumentazione di rilevamento, acquisizione e trasmissione dati (idrologici e di qualità delle acque di falda), 1 mareografo strumentato, 247 pozzi di controllo idrologico e/o qualitativo, 20 sorgenti costiere.

Le stazioni ausiliarie, da posizionare all'interno delle aree critiche individuate, saranno invece utilizzate nello studio di dettaglio degli effetti prodotti sui corpi idrici da fattori naturali o antropici. Tuttavia, questa tipologia di stazione è strettamente correlata con le stazioni di base. Dette stazioni ausiliarie potranno variare in numero, in seno all'area di interesse, in relazione ai risultati acquisiti con l'attività di monitoraggio.

Nello schema che segue (figura 51) si riporta l'articolazione della rete in relazione al tipo di stazione (strumentate e non strumentate) ed alle finalità di monitoraggio (qualitativo e quantitativo).

Figura 51. Rete di monitoraggio dei corpi idrici sotterranei

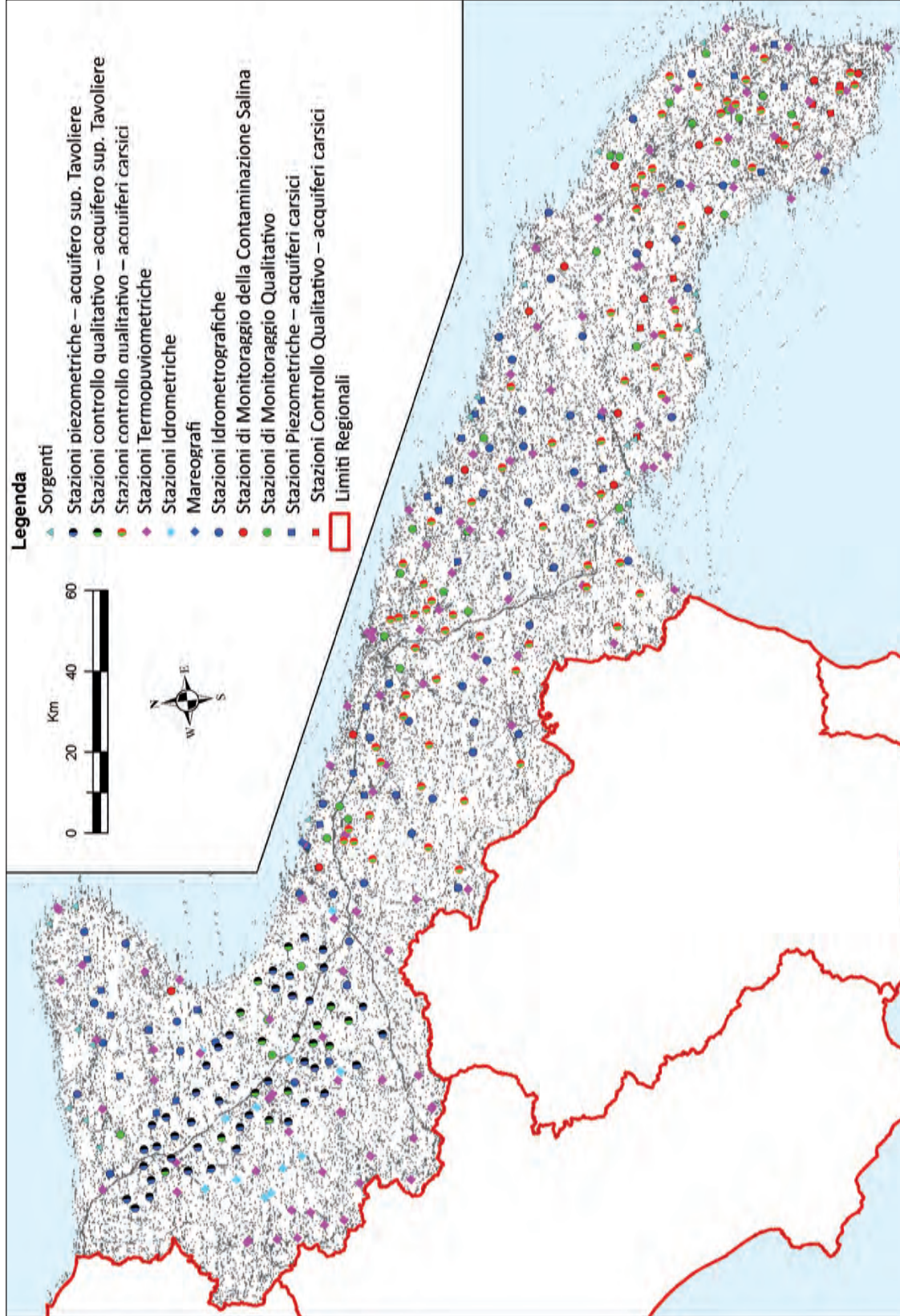
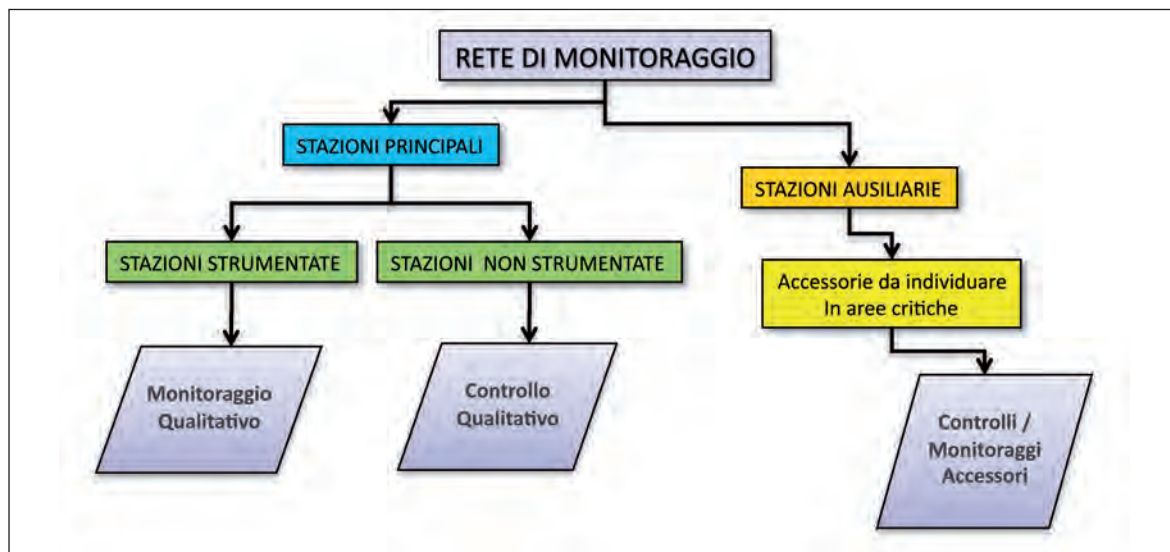


Figura 52. Schema concettuale della articolazione della rete di monitoraggio



È doveroso, infine, far presente che le attività di monitoraggio anzidette avranno durata limitata, congruente con gli obiettivi della fase conoscitiva per la quale ne è stata prevista l'implementazione. Al termine di questo periodo, la fase di monitoraggio verrà inevitabilmente sospesa disperdendo le risorse economiche impiegate per la sua costruzione e rendendola improduttiva ai fini della conoscenza dell'evoluzione dei fenomeni.

### 3.3.2 Acquifero del Gargano

Le limitate informazioni disponibili, peraltro non riferite a periodi recenti, indicano che ad essere compromesse da fenomeni di contaminazione salina risultano le aree costiere settentrionali del promontorio, a ridosso dei laghi di Lesina e di Varano, con estensioni verso la porzione nord occidentale (zona di Apricena). Porzioni di acquifero contaminate si rinvergono, inoltre, nell'area sud occidentale (Zona di Manfredonia). Tali situazioni sono dovute in parte a fattori naturali che facilitano la penetrazione entroterra delle acque marine di invasione continentale (assetto tettonico e grado di fratturazione delle formazioni acquifere), ciò non esclude comunque che un incremento dei prelievi dalla falda possano determinare un ulteriore degrado dello stato qualitativo della risorsa.

### 3.3.3 Acquifero superficiale del Tavoliere

Per tale acquifero, sottoposto, già a partire dagli anni 50, a sfruttamento crescente i problemi di contaminazione salina sono presenti fondamentalmente nella porzione costiera del Golfo di Manfredonia, ove peraltro la circolazione idrica si esplica in condizioni confinate a notevole profondità dal piano campagna e dove si osservano sensibili riduzioni dei carichi piezometrici.

Dall'esame dell'indagine effettuata da Di Pace e Baldassarre (2005), inerente alla valutazione della sensibilità alla desertificazione del Tavoliere di Puglia adattando la meto-

dologia MEDALUS alle condizioni ambientali e socio-economiche tipiche del territorio con l'introduzione nella stessa di specifici parametri, sono stati estratti alcuni dati ricavati da una campagna di monitoraggio di qualità delle acque di alcuni pozzi del Tavoliere.

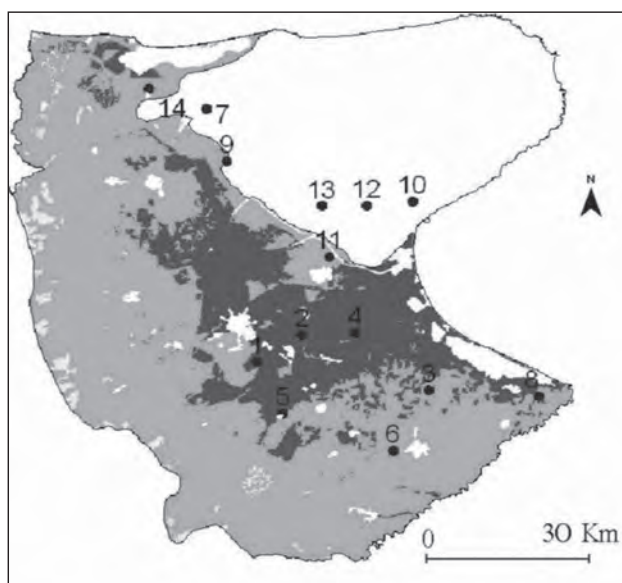
I principali processi responsabili del rischio di desertificazione nel Tavoliere di Puglia sono infatti costituiti dal sovrasfruttamento e il degrado qualitativo delle acque sotterranee. Al fine di quantificare questi processi e di verificare la corrispondenza tra le aree in cui essi sono più accentuati e le aree per le quali è maggiore la sensibilità alla desertificazione, è stato effettuato il monitoraggio dei livelli piezometrici e della conducibilità elettrica in n. 14 pozzi (figura 53, Tabella 24).

**Tabella 24. Caratteristiche dei pozzi di monitoraggio**

Pozzo	Quota bocca pozzo (m.s.l.m.)	Profondità (m)	Livelli idrici (m.s.l.m.)				Conducibilità elettrica $\mu\text{S}/\text{cm}$ (a 25° C)				Variazione livelli idrici (2003-1996)	Conducibilità elettrica 2003-1996 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (a 25° C)	A*
			2003	2002	2001	1996	2003	2002	2001	1996			
1	76,9	51	44,6	43,4	45,9	53,0	985	1004	46	960	-8,5	25,0	PS
2	44,0	67	32,3	26,6	27,0	26,7	1150	1003	27	886	5,6	264	PS
3	40,9	67	16,2	17,9	16,4	21,0	872	833	858	834	-4,8	38,0	PS
4	22,1	67	-18,8	-19,7	-18,5	-18,4	7720	7780	8060	8180	-0,4	-460,0	PS
5	96,0	400	93,2	96,0	-	137,0	-	-	-	-	-43,8	-	PP
6	124,9	59	90,4	91,8	91,8	95,9	936	910	1048	979	-5,6	-43,0	PS
7	122,8	140	8,2	7,2	6,6	8,8	909	950	873	912	-0,6	-3,0	CP
8	8,3	178	9,1	7,6	5,3	7,8	5880	5900	5940	5520	1,3	360,0	CP
9	48,5	201,2	12,0	11,4	10,9	15,6	1012	10,63	1047	1028	-3,6	-16,0	PS
10	111,0	200	0,3	0,5	0,5	0,7	45420	45319	45854	45121	-0,5	299,0	CP
11	28,0	280	0,8	0,8	0,4	1,0	50200	49800	49600	49000	-0,2	1200,0	CP
12	182,3	200	0,5	0,9	0,3	2,3	23500	20800	21200	15410	-1,8	8090,0	CP
13	142,7	220,7	4,1	4,0	5,7	4,7	572	548	598	576	-0,6	-4,0	CP
14	36,46	354	6,8	6,9	7,3	9,5	601	555	589	-	-2,7	-	CP

A\* Tipo di Acquifero - PS: poroso superficiale; PP: poroso profondo; CP: carsico profondo.

**Figura 53. Carta della ubicazione dei pozzi oggetto di campagna di monitoraggio**



I rilievi sono stati condotti nel mese di luglio degli anni 1996, 2001, 2002 e 2003. Un incremento di oltre il 10 % nei valori della conducibilità elettrica, è stato misurato nei pozzi costieri (n. 8, 11 e 12). Nel pozzo n. 11, ubicato a 14 km dalla linea di costa nell'acquifero profondo, valori tipici di acqua di mare sono stati registrati perfino nei livelli più alti della falda. Nel pozzo n.4 il contenuto salino è così elevato da pregiudicare l'impianto di colture orticole. Differenti condizioni si riscontrano nelle parte interne del Tavoliere di Puglia, laddove non si registrano rilevanti cambiamenti nella conducibilità elettrica ma si misurano notevoli abbassamenti della superficie piezometrica. Nel pozzo n.1 gli abbassamenti piezometrici sono mediamente di 8 metri rispetto al valore misurato nel 1996. Nei pozzi n. 3 e 4 gli abbassamenti sono di 3÷4 m. Nel pozzo n. 5 è stato misurato un abbassamento di 40 m. Nei pozzi localizzati nelle aree a minore suscettibilità di desertificazione gli abbassamenti piezometrici risultano di 1÷2 m (pozzo n. 14).

### **3.3.4 Acquifero della Murgia**

Processi di salinizzazione sono osservabili nelle zone costiere della Murgia; acque con contenuto salino superiore a 0,5 g/l già a partire dal livello statico sono presenti, più o meno lungo l'intero sviluppo costiero, a distanze dalla linea di costa in qualche caso di una decina di chilometri. Nella zona tra Andria, Trani e Barletta, sulla base delle ricostruzioni effettuate, il fenomeno in argomento, peraltro già noto, sembra aver subito evoluzioni. Inoltre, si osserva un aumento del tenore salino anche verso il versante della valle dell'Ofanto, che potrebbe essere dovuto al richiamo, attraverso gli emungimenti, delle acque a maggior contenuto salino sottostanti il limitrofo Tavoliere, ove l'acquifero carsico si trova dislocato a profondità, sotto il livello mare, crescenti procedendo verso nord.

Nella zona più a sud avanzamenti del fronte di contaminazione si evidenziano a nord ed a sud di Bisceglie e a SE di Bari e di Polignano a Mare ed a nord di Brindisi.

Altra zona compromessa risulta essere l'area tarantina dove il fenomeno, naturalmente legato alle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero, trova negli attingimenti in atto una esaltazione.

Una valutazione dell'evoluzione nel tempo del fenomeno di contaminazione salina può trarsi dalla analisi dei risultati del Piano Acque della Regione Puglia (TAV. 9.1.2) che riporta l'andamento nel tempo della concentrazione del cloroio nelle acque estratte dai pozzi utilizzati a scopo potabile dall'AQP. Tali pozzi sono generalmente ubicati in aree interne, ma per taluni è possibile comunque osservare significative modificazioni.

### **3.3.5 Lo stato di contaminazione salina della falda profonda del Salento**

La salinizzazione delle acque della falda profonda del Salento è un fenomeno molto più preoccupante rispetto alle altre forme di inquinamento prodotte dalle attività antropiche. I vistosi processi di salinizzazione in atto nella penisola sono causati da uno stato di forte sovrasfruttamento in atto. Sovrasfruttamento delle risorse idriche sotterranee significa il superamento di una data soglia (safe yield) della estrazione globale; questa andrebbe valutata sulla base delle risultanze del bilancio idrologico. In un acquifero continentale il superamento di questa soglia comporta una progressiva diminuzione della riserva di-

namica, regolatrice e geologica, diminuzione immediatamente segnalata dal progressivo abbassamento della superficie piezometrica. In un acquifero costiero il sovrasfruttamento produce una progressiva salinizzazione delle acque di falda causata dal richiamo in falda di acque salate di origine marina (intrusioni laterali e risalite dal basso), senza che segnali vengano registrati da apprezzabili variazioni della superficie piezometrica.

Già all'epoca della stesura del Piano di Risanamento delle Acque della Regione Puglia (primi anni '80) era stato segnalato il pericolo di una forte progressione del fenomeno, a rimedio del quale erano suggerite drastiche riduzioni degli attingimenti da conseguire fondamentalmente con una incisiva lotta all'abusivismo ed una gestione unitaria ed integrata del patrimonio idrico disponibile: obiettivo di tali azioni avrebbe dovuto essere il raggiungimento di una soglia di sicurezza (safe yield) nelle portate mediamente estratte, valutata in 6 m<sup>3</sup>/s.

Il fenomeno dell'intrusione marina nel Salento, causa del processo di salinizzazione delle acque sotterranee era noto sin dagli anni '60; all'epoca erano molto scarse nel mondo le conoscenze sul fenomeno, così il Consiglio Nazionale delle Ricerche affidò all'allora Istituto di Geologia Applicata e Geotecnica della Facoltà di Ingegneria di Bari, sotto la direzione del suo Direttore (Prof. Vincenzo Cotecchia), un programma quinquennale di ricerca sull'argomento. In tale ambito, con la partecipazione dell'Ente Irrigazione, vennero trivellati nel territorio salentino alcuni pozzi spia (penetranti nelle acque salate presenti al letto delle acque dolci), che avrebbero dovuto costituire un primo nucleo per la auspicata realizzazione di una rete di monitoraggio. Altri pozzi spia venivano realizzati dal Consorzio Speciale per la bonifica di Arneo, per il monitoraggio degli effetti sulla falda dell'emungimento da campi pozzi.

Le misure periodiche effettuate in tali pozzi, nel contesto degli studi a carattere regionale che si conducevano nel territorio salentino, permisero di acclarare alcuni importanti aspetti del fenomeno dell'intrusione marina e di elaborare nuove teorie sui meccanismi di salinizzazione innescati da un regime di sovrasfruttamento; teorie validate in ambito internazionale che, in buona parte, dimostravano la non validità di quelle tradizionalmente accettate, specialmente nel caso degli acquiferi carsici costieri.

Nonostante i risultati più che incoraggianti di tali ricerche, la cessazione dei finanziamenti comportò l'arresto ufficiale della acquisizione dati in tale embrione di rete di monitoraggio, che proseguì in maniera assolutamente sporadica per iniziativa personale di ricercatori afferenti al predetto Istituto.

Le osservazioni condotte nei pozzi spia (misure del livello piezometrico, carotaggi termo-salinometrici, carotaggi della radioattività naturale, misure con traccianti artificiali e determinazioni della composizione chimica ed isotopica delle acque dolci, salmastre e salate) ha portato alla definizione dei parametri rilevanti ai fini della evidenziazione e della quantificazione dello stato di disequilibrio tra acque dolci ed acque salate come riportato nel paragrafo successivo ove viene descritto il meccanismo del processo di salinizzazione indotto da sovrasfruttamento.

#### *Evoluzione degli equilibri acqua dolce – acqua salata nel Salento*

Dai dati ottenuti dalle misure effettuate nel passato nei pozzi spia e dall'andamento nel tempo dei parametri calcolati si può descrivere un affidabile quadro del processo di salinizzazione delle acque sotterranee circolanti nell'acquifero profondo del Salento.

Per analizzare, a scala regionale, lo stato qualitativo delle acque sotterranee per quel

che riguarda il processo di salinizzazione, occorrerebbe procedere alla ricostruzione areale della distribuzione del loro contenuto salino. Disponendo di una serie di carotaggi salini in pozzi trivellati è possibile stabilire la profondità alla quale, in condizioni statiche, sono presenti le acque a diversa salinità e quindi lo spessore, zona per zona, del corpo di acqua dolce. Dati di salinità relativi ad acque emunte da pozzi in pompaggio portano alla ricostruzione della distribuzione del contenuto salino delle acque circolanti nei livelli più produttivi (più permeabili) dell'acquifero, riferendo sulla qualità delle acque che effettivamente sono richiamate dal pompaggio.

La serie di dati storici ed attuali, riguardanti il contenuto salino delle acque estratte dalla falda profonda da pozzi in pompaggio, hanno permesso le ricostruzioni di TAV. 9.1.1 (figura 54), riferite al 1989 (Studi per la Variante al PRGA della regione Puglia – Provveditorato Regionale alle OO.PP della Puglia) e al periodo 1999-2002, già forniscono utili indicazioni sull'evoluzione del fenomeno, sia pure nel limite di approssimazione, accettabile per una rappresentazione a scala regionale, derivante dall'aver operato con dati rilevati su pozzi diversi nei due periodi e non omogenei per fonte di informazione e orizzonte temporale.

L'elaborazione dei dati relativi agli anni 1995 e 1996, riguardanti la stratificazione termica e salina rilevata nei pozzi in quiete, trivellati in falda profonda (nell'ambito del "Progetto per l'ampliamento e l'ammodernamento della rete per il controllo idrometrografico e qualitativo delle falde idriche della regione Puglia", realizzata, nell'ambito dei Programmi POP 89-91, a cura dell'Ente per l'Irrigazione di Puglia, Lucania ed Irpinia), hanno consentito la ricostruzione, a scala regionale, della temperatura e del contenuto salino delle acque di falda su sezioni orizzontali a diversa quota sotto il livello medio mare, riportate nelle figure 55-60, che seguono. Le sezioni ricostruite alle quote -5 e -50 m sono state elaborate utilizzando un numero maggiore di punti acqua rispetto a quelle relative alla quota -100 m. Inoltre tali rappresentazioni risentono della distribuzione eterogenea dei punti sul territorio, specialmente nel Salento sud orientale.



Figura 54. Andamento delle isoaline (TDS) per gli acquiferi carsici della Puglia (Tavola 9.1.1.1.da Piano Acque Regione Puglia)

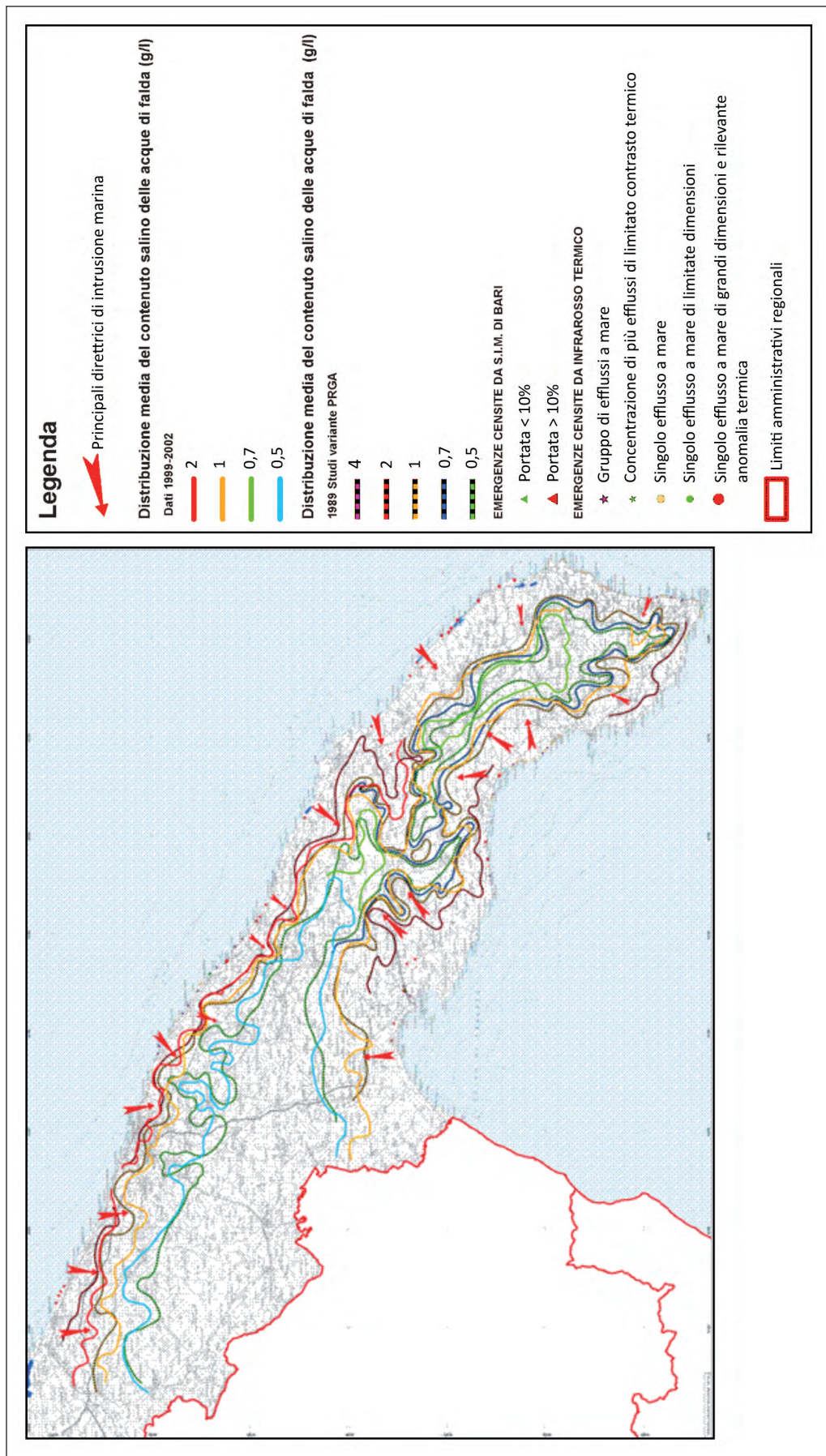


Figura 55. Distribuzione della temperatura delle acque circolanti negli acquiferi carsici alla quota di 5 m sotto il livello del mare.

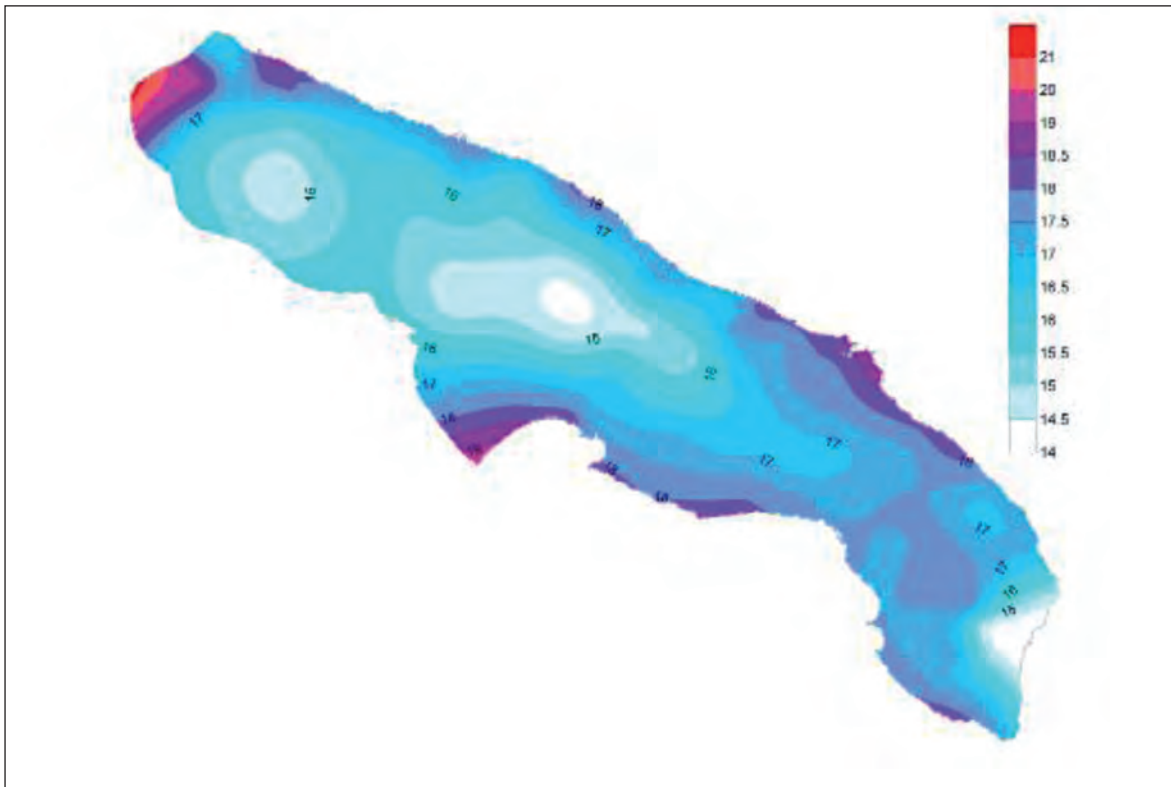


Figura 56. Distribuzione della temperatura delle acque circolanti negli acquiferi carsici alla quota di 50 m sotto il livello del mare.

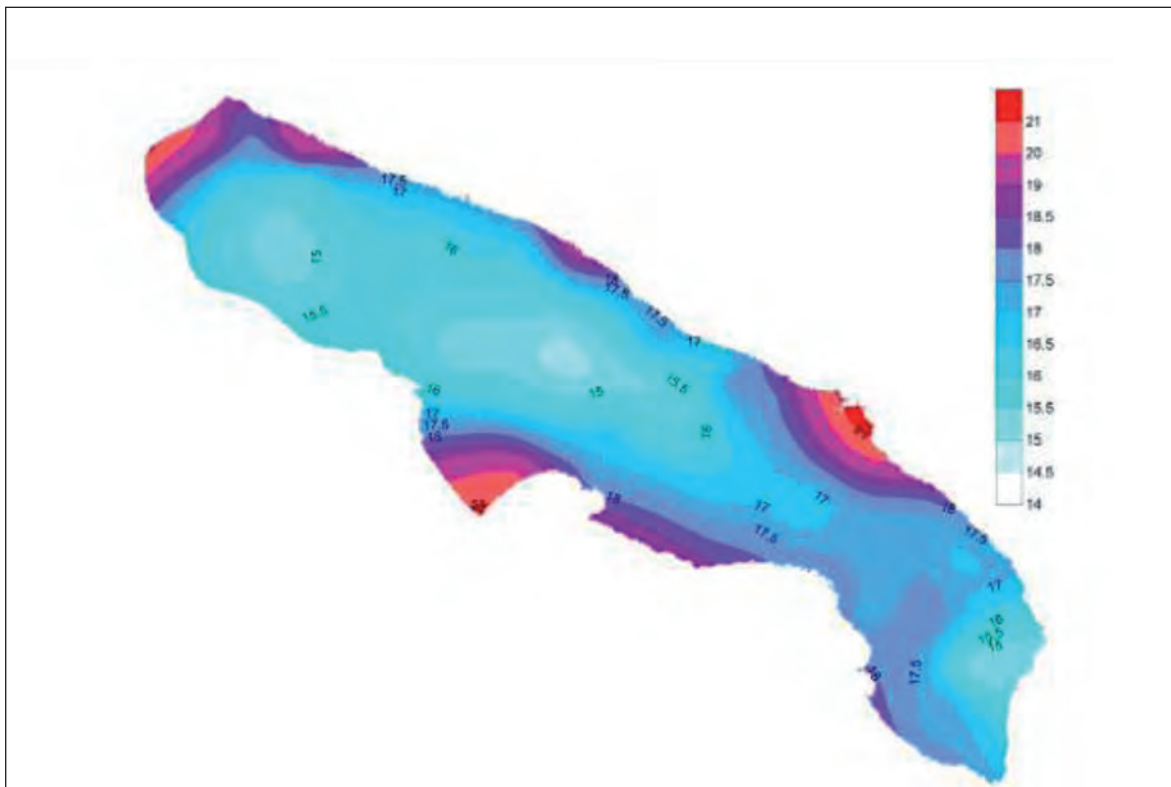


Figura 57. Distribuzione della temperatura delle acque circolanti negli acquiferi carsici alla quota di 100 m sotto il livello del mare.

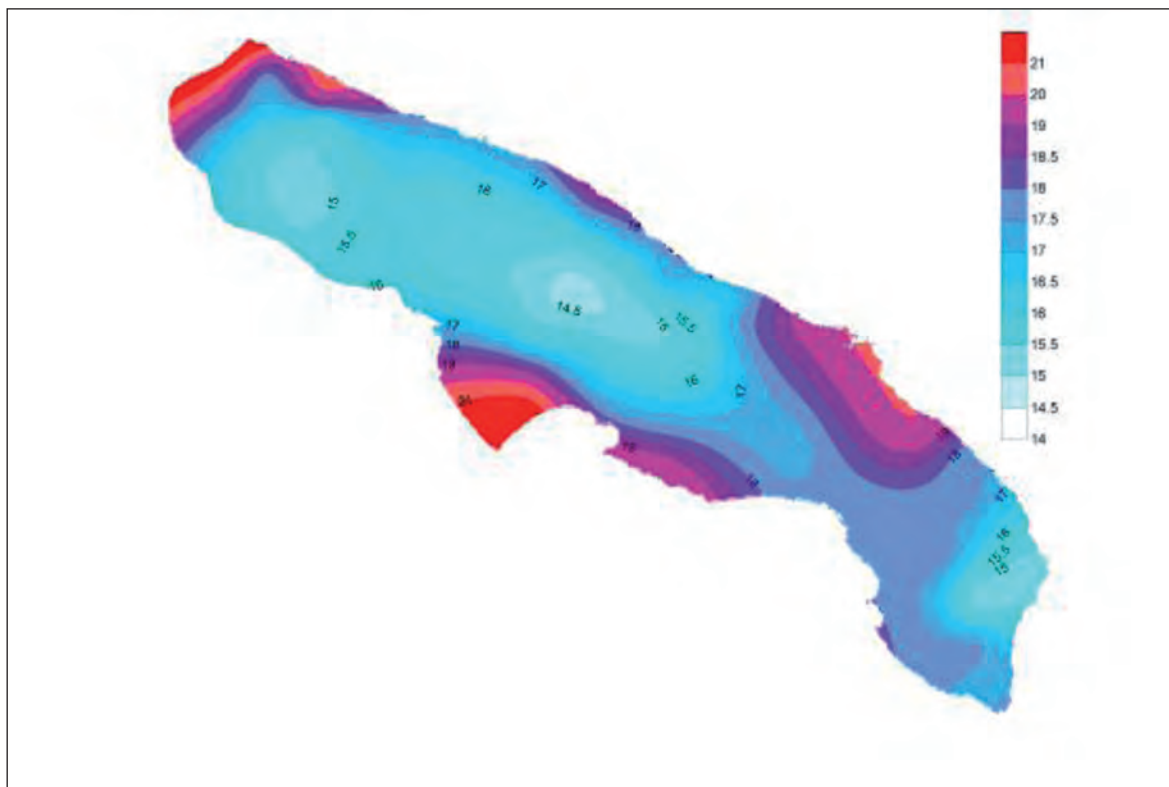


Figura 58. Distribuzione del contenuto salino delle acque circolanti negli acquiferi carsici alla quota di 5 m sotto il l.m.m.

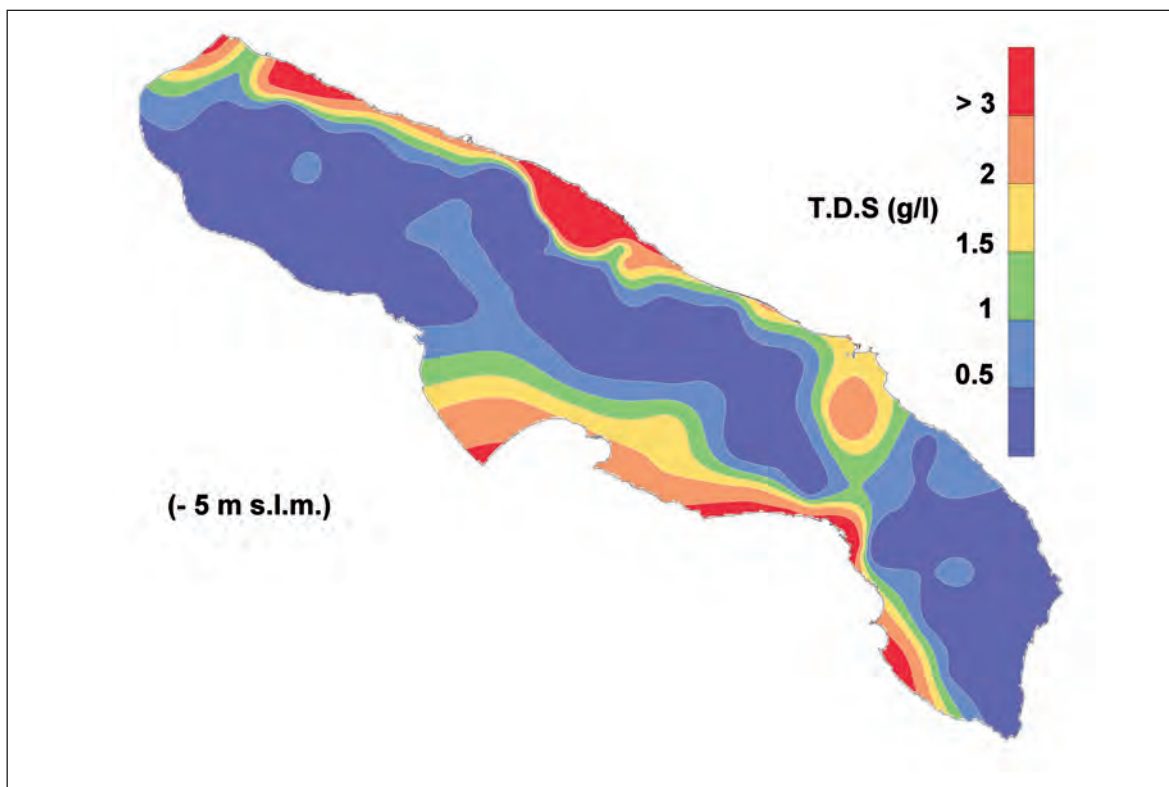


Figura 59. Distribuzione del contenuto salino delle acque circolanti negli acquiferi carsici alla quota di 50 m sotto il l.m.m.

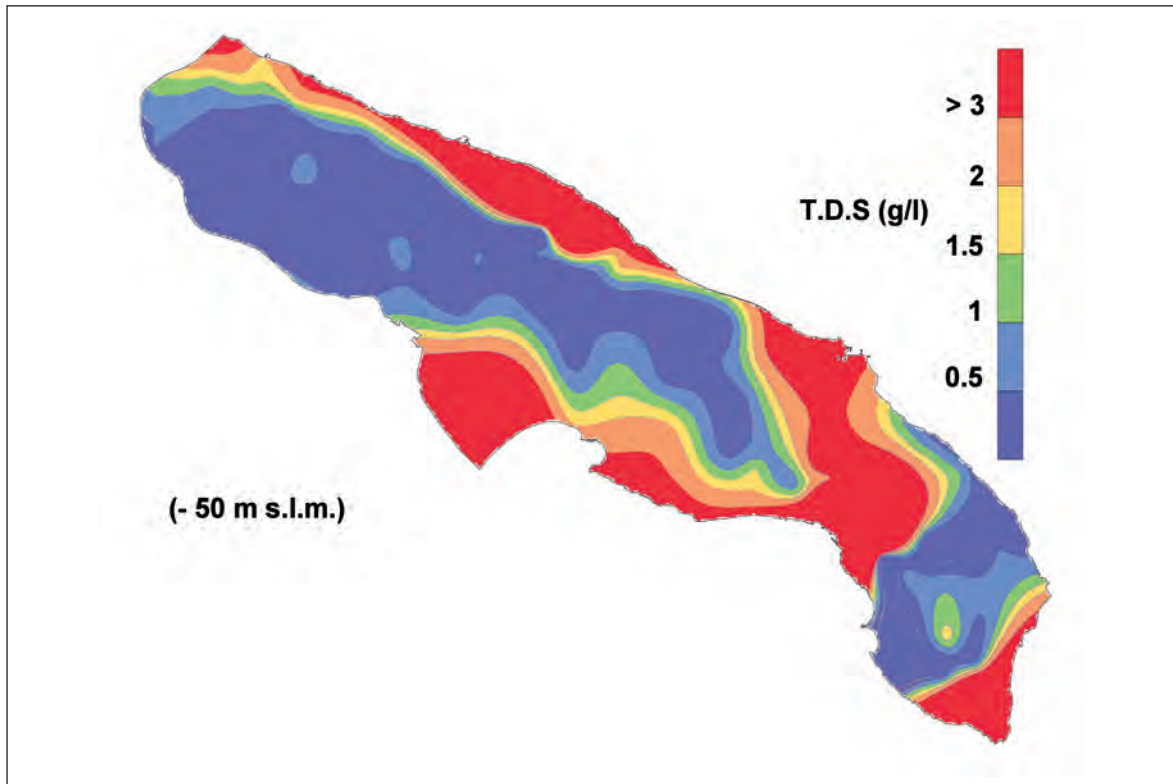
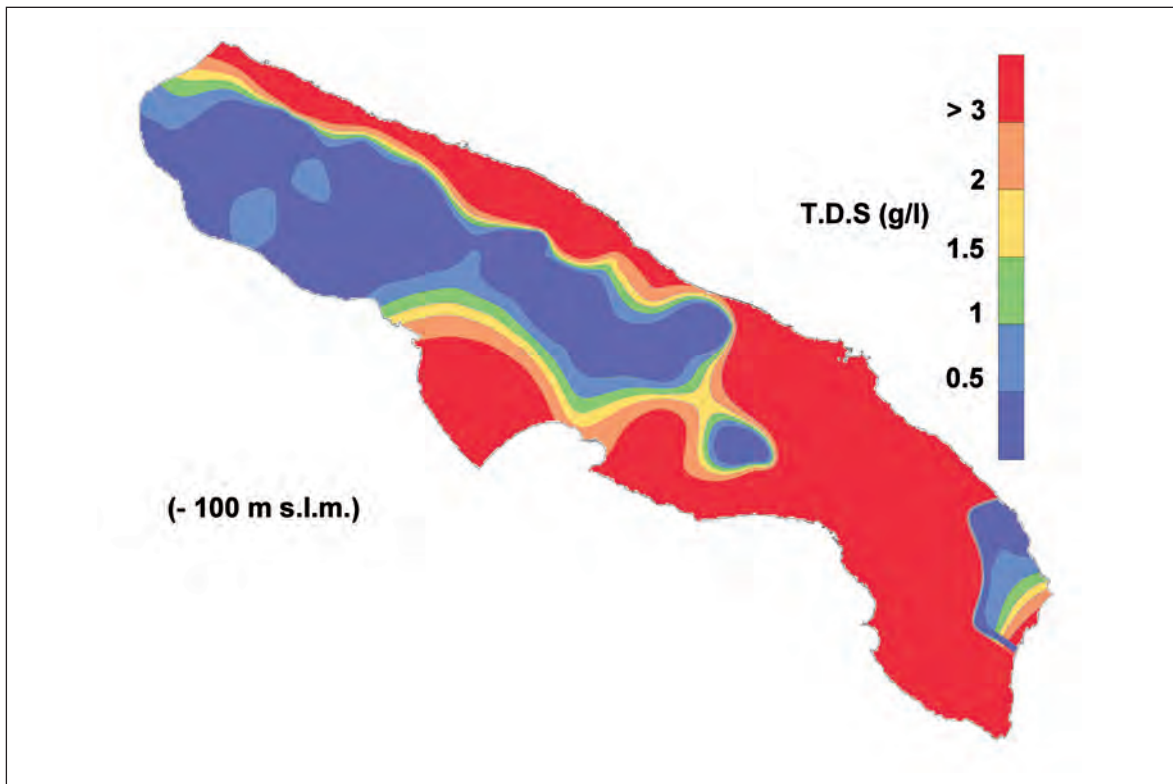


Figura 60. Distribuzione del contenuto salino delle acque circolanti negli acquiferi carsici alla quota di 100 m sotto il l.m.m.



L'analisi delle sezioni termiche, in particolare, evidenzia l'apporto idrico sotterraneo di acque dolci provenienti dalla zona sud orientale della Murgia. Gli effetti di tale flusso, che ha origine da una importante area di alimentazione ubicata grosso modo tra Gioia del Colle e Martina Franca, si manifestano sino all'area centrale del Salento ed in particolare dalla sezione a – 100 m s.l.m. si evidenzia il flusso idrico profondo che arriva ad alimentare la sorgente del Chidro. Questo travaso giustifica la presenza di acque ancora dolci nelle aree nord occidentali del Salento.

L'analisi delle sezioni relative alla distribuzione del contenuto salino evidenziano come gli spessori delle porzioni di acquifero in cui circolano acque dolci siano molto ridotti: già ad una profondità di m 50 sotto il livello mare tutta l'area centrale della penisola sono permeate da acque a salinità superiore a 1 g/l. Alla profondità di m 100 sotto il livello mare le uniche zone, di estensione molto limitata, con acque a salinità inferiore al grammo per litro si riconoscono solo a ridosso della Murgia e nell'entroterra di Otranto.

L'analisi della attuale distribuzione del contenuto salino misurato in acque drenate per pompaggio da pozzi trivellati, anche se risente della disomogeneità delle fonti di informazione e, spesso, della scarsa affidabilità del dato, consente comunque di trarre qualche considerazione sulla evoluzione del fenomeno della contaminazione salina, specialmente se paragonata alla più attendibile ricostruzione riferita al 1989. Le acque drenate da pozzi in pompaggio hanno contenuto salino inferiore ad 1 g/l solo in poche e limitate aree, mentre al 1989 la situazione generale era decisamente migliore (in termini relativi, poiché preoccupanti segnali di allarme di salinizzazione erano comunque già ben evidenti).

L'esame della TAV. 9.1.2 consente di evidenziare, talora, i fenomeni in atto nell'acquifero carsico salentino. Si ritiene richiamare l'attenzione sui pozzi denominati Melendugno, Vernole, Borgagne, Muro e Carpignano 199, che attingono agli acquiferi miocenici; questi mostrano risentire poco del fenomeno in argomento, anche se la contaminazione salina sembra cominci ad interessare il pozzo di Carpignano.

#### *Definizione dello stato di sovrasfruttamento dell'acquifero carsico del Salento*

Lo stato di sofferenza del sistema idrogeologico salentino nei confronti del processo di salinizzazione indotto dallo stato di sovrasfruttamento è più che evidente da quanto sino ad ora descritto. Un modo per quantificare gli effetti di tale regime d'uso dell'acquifero profondo deriva dalle osservazioni svolte nel passato nei pozzi spia ove conclusioni in tal senso erano possibili per disponibilità dei dati temporali necessari.

Nelle figure 61÷64, insieme all'andamento delle precipitazioni del periodo di alimentazione, misurate in stazioni prossime ai pozzi spia esaminati (LR, SR, MS, ed NC3), è rappresentata la progressiva diminuzione della componente d'acqua dolce presente nell'acquifero. Tale componente è stata misurata come spessore della colonna d'acqua (considerata ad una salinità di 0,5 g/l, ossia non miscelata con acqua salata) sovrastante l'interfaccia netta teorica calcolata.

Figura 61. Modificazioni dello spessore dell'acquifero calcolate per il pozzo LR in agro di San Donato di Lecce

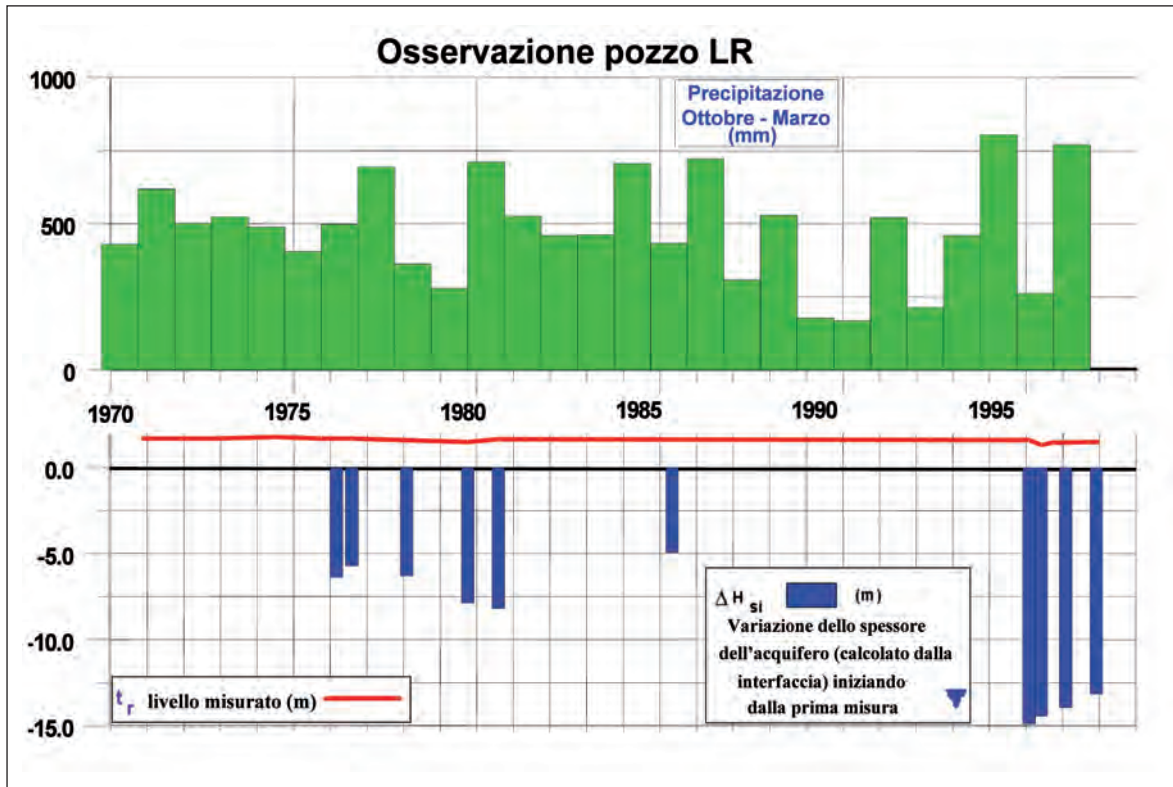


Figura 62. Modificazioni dello spessore dell'acquifero calcolate per il pozzo SR in agro di Surbo (LE).

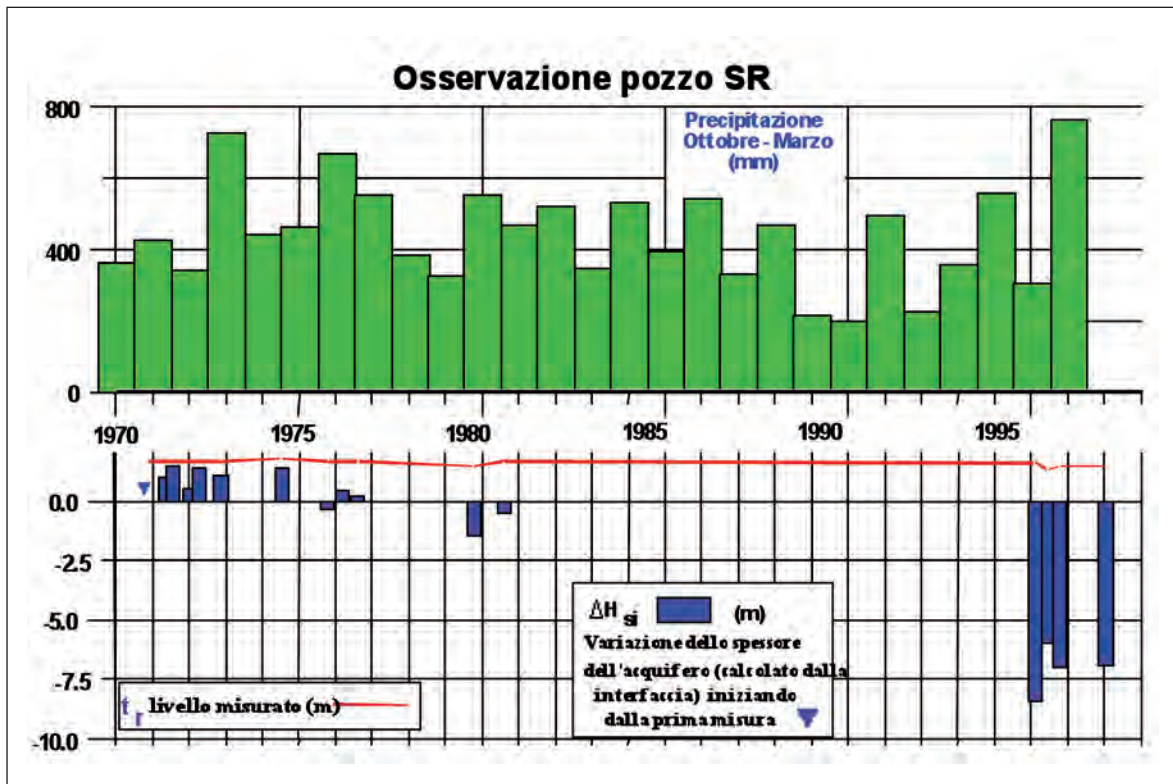


Figura 63. Modificazioni dello spessore dell'acquifero calcolate per il pozzo MS in agro di Mesagne (BR)

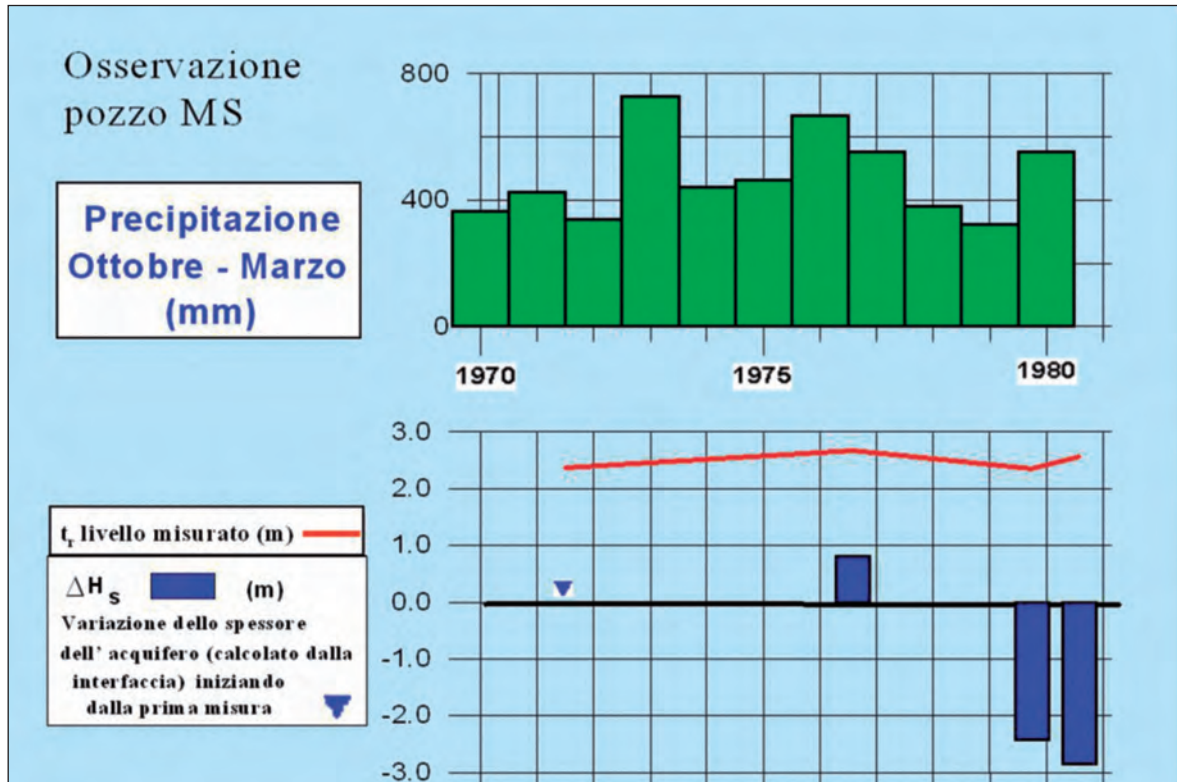
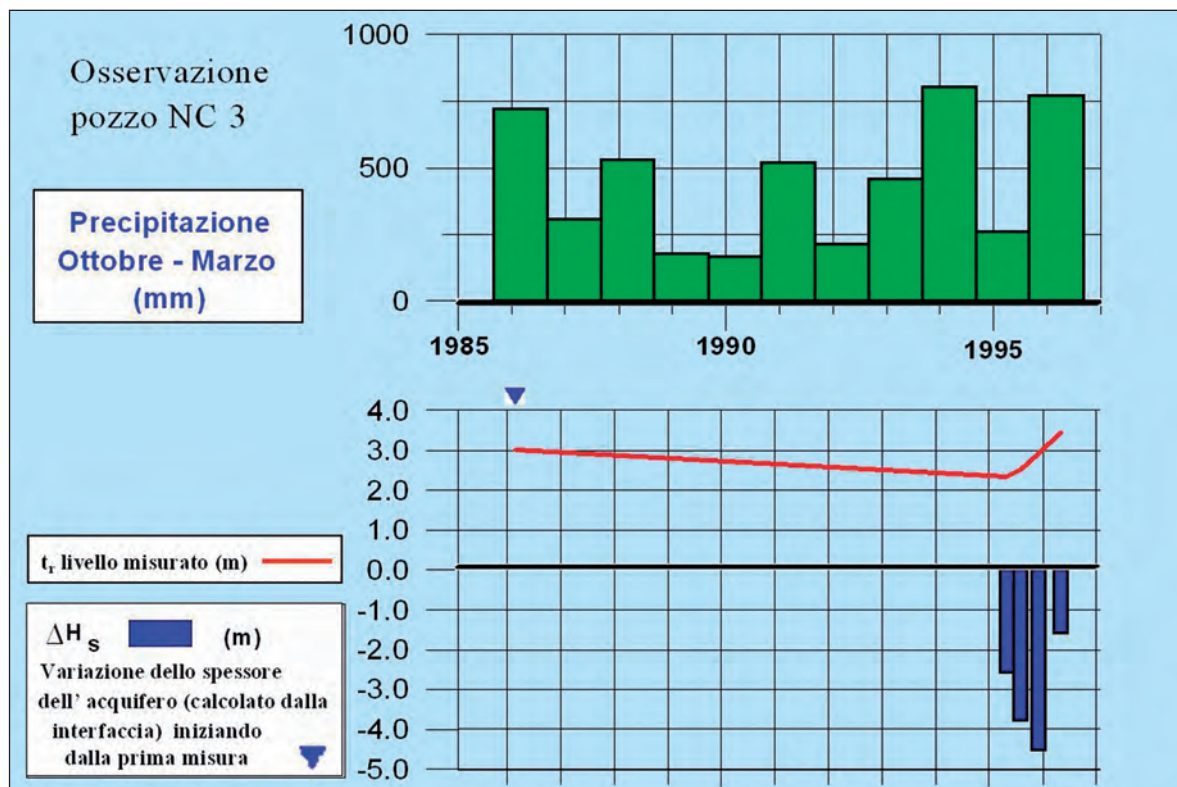


Figura 64. Modificazioni dello spessore dell'acquifero calcolate per il pozzo NC3 in agro di Galatone (LE).



Le diminuzioni dello spessore della colonna d'acqua dolce variano da un massimo di circa 15 m al pozzo LR ad un minimo di 3 m al pozzo MS. Questi dati consentono una valutazione sul depauperamento in atto della risorsa idrica sotterranea nel Salento, valutazione evidentemente molto grossolana sia per il numero esiguo dei punti di osservazione in rapporto alla estensione del territorio sia per la arbitraria attribuzione del valore di porosità media caratterizzante l'acquifero. Osservazioni visive su carote estratte nel corso di numerose perforazioni, portano ad una stima della porosità media della formazione carbonatica salentina intorno al 5%, dovuta sia allo stato di fatturazione che di incarsimento. Rimane comunque inoppugnabile la constatazione che è in atto una progressiva diminuzione dei volumi d'acqua dolce disponibili nel sottosuolo salentino.

Se si registra una continua diminuzione della colonna d'acqua dolce, si deve ammettere che i prelievi superino, nella media, la portata di alimentazione, o quantomeno si è in forte eccesso di prelievi rispetto ad una portata globale estraibile in sicurezza.

Dalla tendenza temporale della riduzione dell'altezza della componente di acqua dolce, si ricava un valore annuo mediato per i quattro pozzi considerati pari a 0,37 m/a (MS 0,33 m/a, SR 0,33 m/a, LR 0,47 m/a e NC3 0,37 m/a). Questo valore, moltiplicato per il valore della porosità dell'acquifero, fornisce il volume per unità di superficie sottratta annualmente dalla riserva idrogeologica dell'acquifero. Considerando tale valore, peraltro in accordo con dati riportati nella letteratura scientifica per formazioni simili, il volume per unità di superficie sottratta progressivamente sarebbe pari a 18,5 mm corrispondenti ad un volume di circa 70 milioni di metri cubi per anno; tale valore corrisponderebbe a circa il 10% del volume medio annuo stimato dovuto alla ricarica (770 Mm<sup>3</sup>). Se la sola diminuzione annua dell'altezza della colonna d'acqua dolce si considerasse omogeneamente distribuita nella Penisola (per una area di 3.800 km<sup>2</sup>) essa corrisponderebbe ad una portata continua di circa 2 m<sup>3</sup>/s, da considerare prelevata in eccesso rispetto alla portata alimentante il sistema. Si deve tenere presente che già all'epoca della stesura del Piano di Risanamento delle Acque della Regione Puglia, sulla base delle peculiarità dell'acquifero carsico costiero salentino, la portata massima estraibile era valutata pari al 25% della portata di alimentazione; al valore della alimentazione calcolata all'attualità questa portata di sicurezza corrisponde ad un prelievo globale massimo ammissibile di poco più di 6 m<sup>3</sup>/s, contro un valore stimato di 14 m<sup>3</sup>/s che sicuramente eccede la ricarica annua.

Pur nelle forti approssimazioni adottate, questi dati devono far riflettere sulla gravità della situazione e sulle conseguenze prevedibili per l'immediato futuro. Al 1996 l'altezza della componente d'acqua dolce sottratta all'acquifero era già pari, nella media, al 10% del valore iniziale (0,4% all'anno). Seguendo l'attuale tendenza, tutta la componente d'acqua dolce potrebbe essere destinata a sparire entro i prossimi 250 anni e l'acquifero verrebbe permeato solo da acqua salata: tuttavia molto prima la salinità delle acque sotterranee raggiungerebbe valori intollerabili per qualsiasi uso.

Le considerazioni sopra svolte forniscono un quadro molto preoccupante sulle future prospettive della utilizzabilità dell'acquifero del Salento. A parziale compenso di tale situazione, dalle elaborazioni condotte è comunque possibile osservare che afflussi meteorici abbondanti, come verificatosi negli anni 1995 e 1996, con conseguente minor ricorso alle acque di falda, hanno comportato un modesto miglioramento della situazione. Tale circostanza, ancorché mostri chiaramente la reversibilità di tendenza, non deve indurre a sottovalutare il fenomeno, sia perché il verificarsi di annate siccitose, purtroppo non infrequenti per la Puglia, potrebbe peggiorare la situazione, ma soprattutto in considerazione dei tempi necessari per determinare una significativa inversione del fenomeno.



## **RAPPORTO SULLO STATO DELL'ARTE NELLO STUDIO DEL FENOMENO SALINIZZAZIONE DELLE FALDE NELLA REGIONE SICILIA**

Il rapporto sullo stato dell'arte nella Regione Sicilia si basa sostanzialmente su quanto estratto e sintetizzato, con delle integrazioni aggiuntive, dal Piano Acque della Regione. Altri studi locali sono stati utilizzati per l'area di Palermo e di Bagheria.

In particolare il Piano Acque redatto dalla SOGESID per conto della Regione Sicilia, raccoglie la seguente serie di informazioni e/o studi pregressi:

Acquisizione di studi e ricerche sulle risorse idriche della Sicilia (Piano Acque Sicilia, Piano Regolatore Generale Acquedotti, Piano Regionale di Risanamento delle Acque, Studi idrogeologici, Prospezioni geofisiche ecc..)

Raccolta di dati e informazioni presso le strutture che operano istituzionalmente nella gestione delle acque (EAS, Genio Civile, ESA, Enti Bonifiche, Municipalizzate, comuni, province, A.T.O., A.R.P.A. Sicilia, A.R.T.A. Sicilia, Ass. LL.PP. Servizio Idrografico Regione Sicilia, Ass. Agricoltura e Foreste, S.I.A.R).

Raccolta dei dati inediti acquisiti durante studi di idrogeochimica e idrogeologia effettuati dall'Istituto di Geochimica dei Fluidi del Consiglio Nazionale delle Ricerche (dal 10/1/2001 Sezione di Palermo dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), dal Dipartimento CFTA, dal Dipartimento di Geologia e Geodesia dell'Università di Palermo e dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Catania.

### **4.1 Inquadramento e caratterizzazione del problema**

In Sicilia si annoverano i piccoli acquiferi localizzati della Provincia di Messina nelle zone di frattura del flysch cenozoico e nelle metamorfite paleozoiche, nonché nelle alluvioni di fondovalle. Lungo la costa da Palermo a Trapani vi sono gli importanti acquiferi dei calcari carsici della serie mesozoico-cenozoica delle alte terre (Madonie, Imerese, Panormidi, Trapanesi). Ad ovest, nella zona di Marsala, vi sono gli importanti acquiferi sabbioso calcarenitici dell'Oliocene-Pleistocene.

Il plateau Ibleo costituito dalla formazione calcarea Cretaceo Miocenica, contiene grandi e ben alimentate risorse idriche sotterranee. Ad est le alluvioni sabbioso-limose del Quaternario della piana di Catania ospitano un modesto acquifero dove in molti posti l'acqua sotterranea flotta sull'acqua salata. Fra la Piana di Catania e i monti Nebrodi l'Etna, il più alto vulcano d'Europa (3340 m) affiorante per oltre 1300 km<sup>2</sup>, ospita i più grandi acquiferi della Sicilia. Al largo della costa siciliana le vulcaniti delle Isole Eolie, di Pantelleria ed Ustica, ed i calcari delle isole essenzialmente vulcaniche delle isole Egadi e Lampedusa rappresentano acquiferi poveri, non in grado di fornire acqua sufficiente per far fronte ai fabbisogni locali (Aureli, 1991).

La cronica scarsità d'acqua ha sempre rappresentato un limite insormontabile per lo svi-

luppo di vaste aree dell'isola. Il sovrasfruttamento delle risorse idriche ha determinato l'intrusione salina in molte aree, costringendo gli agricoltori ad irrigare vaste fasce costiere con acque salmastre. L'acquifero costiero di Siracusa-Avola, alimentato lateralmente dai Monti Iblei, sulla costa occidentale, rappresenta bene questa situazione (Aureli, 1991). Lo sfruttamento delle acque sotterranee ai livelli inferiori dei rilievi ha determinato la scomparsa di molte sorgenti subaeree e sottomarine sgorganti dall'acquifero carsico e di altre ha affievolito le portate. L'acquifero ha perso le sue caratteristiche di artesianesimo quasi ovunque e mostra segni evidenti di una significativa intrusione marina determinata dall'inversione dei gradienti naturali. Nelle sorgenti sottomarine identificate, in un periodo di 20 anni la piezometrica è scesa di 100 e più m, specialmente nell'area di Priolo-Augusta, a nord di Siracusa, dove attualmente la tavola d'acqua si estende fra 50 e 100 m sotto il livello del mare. Lungo la costa di 37 km un blocco dei calcari oligocenici-miocenici degli Iblei, dislocato per faglie, è ricoperto da una formazione di sedimenti marini e continentali pliocenici e pleistocenici con intercalate vulcaniti.

Nell'area di Priolo-Augusta, le precipitazioni medie variano fra 413 e 949 mm in funzione delle altitudini, comprese fra 15 e 390 m s.l.m. L'acqua sotterranea sgorga, localmente anche in pressione per artesianesimo, da sorgenti costiere emergendo dalla formazione plio-pleistocenica che ospita un acquifero secondario alimentato lateralmente dal più importante acquifero carsico sottostante.

La portata complessiva delle 108 sorgenti censite nell'area era di 906,08 l/s, ma di recente si è constatato che essa è diminuita sensibilmente a causa della forte depressione determinata dai pompaggi di 339 pozzi trivellati nell'entroterra per usi idropotabili ed irrigui, il che ha portato anche all'estinguersi di numerose sorgenti. Quando la piezometrica dell'acquifero carsico si deprime per l'energica eduazione dai pozzi, le sorgenti sottomarine scompaiono e per i loro ampi condotti entra l'acqua marina.

Si è stimato che la ricarica annuale dell'acquifero sia dell'ordine di 143 Mm<sup>3</sup> e i deflussi perduti a mare di 34 Mm<sup>3</sup>, per una portata di 1,080 l/s.

#### **4.1.1 Le aree con fenomeni di salinizzazione superficiale dei suoli**

Probabilmente è in Sicilia che il problema della salinizzazione secondaria dei suoli per irrigazione è maggiormente acuto e ciò è da mettere in relazione non solo alla natura dei suoli presenti ma anche alla qualità delle acque disponibili per l'irrigazione. Uno studio condotto già da più di un decennio, allo scopo di monitorare la qualità delle acque di 16 serbatoi artificiali (7 dislocati nella Sicilia occidentale, 5 nella Sicilia centro-meridionale e 4 nella Sicilia orientale), ha permesso di accertare come queste evidenzino valori più o meno elevati di salinità, anche in un periodo insolitamente piovoso quale quello durante il quale è stata condotta la ricerca (giugno 1995 - giugno 1996). Nella Sicilia occidentale, destano preoccupazione le acque dei serbatoi Rubino, Zafferana e Trinità, (in provincia di Trapani), a causa degli elevati valori della conducibilità elettrica (EC) e di sodio (Na<sup>+</sup>) e del rapporto di assorbimento corretto (adjRNa). Nella Sicilia centromeridionale ed orientale, sono le acque dei serbatoi Gorgo e Furore (in provincia di Agrigento) e quelle del Don Sturzo (in provincia di Catania) che destano serie apprensioni per il divenire della qualità dei suoli, soprattutto se posti in relazione agli effetti deleteri del sodio di scambio sulle caratteristiche fisiche del suolo che, in queste aree, presentano tessitura argillosa e struttura poliedrica o prismatica. Ove predominano le argille smectitiche, infatti, la struttura del suolo mostra gravi problemi di deterioramento già con acque che mostrano valori di adjRNa superiori a 9; laddove prevalgono le illiti e le vermiculiti la struttura si

degrada con valori di  $\text{adjRNa}$  superiori a 16 mentre i suoli caolinitici o ricchi in sesquiossidi cominciano a mostrare un deterioramento della struttura per valori di  $\text{adjRNa}$  superiori a 26. Ne consegue che il processo della sodicizzazione, anche in questi ambienti, è più grave di quello della salinizzazione. Spesso, tuttavia, le due forme di salinità coesistono.

Nei suoli irrigui della Sicilia a tessitura franca o tendenzialmente tale, dove la circolazione e il libero drenaggio dell'acqua è più o meno buono, il pericolo di salinizzazione è ridotto e, molto spesso, sono sufficienti le poche piogge invernali per assicurare una buona lisciviazione dei sali in eccesso. Diverso è il caso dei Vertic Xerofluvents e dei Typic Haploxererts, suoli argillosi e con drenaggio molto lento, che sono di più difficile governo per l'acqua. Questi suoli, frequenti in tutte le aree irrigue della Sicilia, dovrebbero essere esclusi dall'irrigazione, a maggior ragione se le acque sono di bassa qualità. Tuttavia, in determinati ambienti, come il siciliano, dove buona parte dei suoli delle pianure e della bassa collina interna sono costituiti proprio da questi pedotipi, la loro destinazione all'irrigazione è quasi un fatto inevitabile. Per essi, più che per altri suoli, è necessario tenere conto dei limiti posti dalla bassa permeabilità, dall'elevata capacità di ritenzione idrica, dalla degradabilità della struttura, dal tipo di profilo del suolo, tutti fattori che, singolarmente o in sinergia, creano un ambiente poco idoneo al normale sviluppo delle piante.

Attualmente in Sicilia, circa il 10% della superficie totale, cioè grossomodo 250.000 ettari, è interessata da suoli affetti da salinità. La loro distribuzione (figura 65), è dovuta in parte alla presenza della Serie Gessoso-Solfifera, in parte è indotta dall'irrigazione; i primi sono particolarmente presenti nelle province di Caltanissetta e di Agrigento, cioè nella zona centrale e meridionale dell'isola, gli altri si rinvencono prevalentemente nella fascia costiera meridionale dell'isola, ove la pratica irrigua continuata nel tempo ha determinato e determina, accumulo di sali solubili nel suolo. Sono da segnalare anche suoli affetti da salinità per cause naturali, legate alla presenza di substrati argillosi di origine marina.

**Figura 65. Distribuzione dei suoli salini in Sicilia. In nero su substrati gessosi; in grigio su altri substrati o con salinità secondaria per irrigazione (Dazzi, 2005).**



## 4.2 Inquadramento geologico sintetico della Sicilia

Lo stato attuale delle conoscenze geologiche sulla Sicilia consente di formulare un modello schematico, applicabile anche a situazioni locali, in cui sono essenzialmente riconoscibili (figura 66):

- una catena montuosa, costituita da una serie di corpi rocciosi più o meno “potenti”, “svincolati” dal loro substrato originario e sovrapposti gli uni su gli altri;
- una avanfossa, posta sul fronte della catena montuosa e che costituisce un’ampia depressione nella quale si riversano i prodotti derivanti dallo smantellamento della catena in progressivo sollevamento;
- un avampaese, regione “stabile” rispetto alle precedenti, nel senso che non è interessato da alcuna deformazione e verso la quale si muovono i vari corpi rocciosi costituenti la catena.

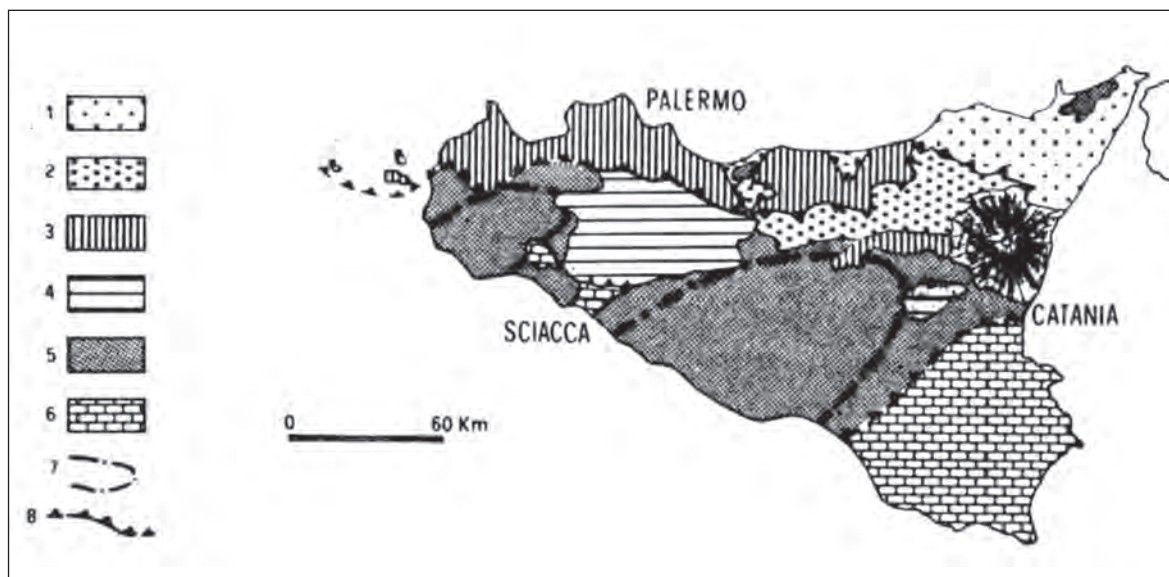
Tale modello è applicabile convenientemente al territorio della regione, che per le sue caratteristiche geologiche e geodinamiche, può essere suddiviso in tre settori principali, giustapposti da Sud verso Nord:

- settore sud-orientale: coincidente con i Monti Iblei, dal punto di vista strutturale, costituisce l’avampaese stabile dell’orogene siciliano, non essendovi indicazioni di movimenti deformativi né nel basamento sepolto, né sulla sovrastante copertura sedimentaria. Il basamento sepolto è di probabile affinità crostale africana. La sua copertura è formata da una spessa sequenza di rocce carbonatiche di piattaforma instabile nel Trias, di bacino attivo nel Giura-Eocene ed infine di piattaforma aperta nell’Oligo-Miocene;
- settore intermedio: orientato da ovest ad est, è suddivisibile in due bacini: di Castelvetro-Sciacca affiorante e di Caltanissetta–Gela parzialmente sepolto da depositi geologicamente recenti. Tale settore è costituito da sequenze carbonatiche (Trias-Miocene), debolmente deformate e ricoperte stratigraficamente da sedimenti di bacini residuali di una avanfossa plio-pleistocenica. In Sicilia occidentale affiora nella zona di Sciacca con caratteri strutturali di tipico avampaese deformato, mentre in Sicilia centrale ed orientale è costituito da terreni mio-quadernari;
- settore settentrionale: dal trapanese al messinese, rappresentato da corpi geologici con caratteri e litologia differenti, sovrapposti a formare una complessa pila di scaglie tettoniche accavallate, spesso sino a più di 15 km, costituenti la “Catena Siciliana”, la cui vergenza si sviluppa verso Sud e verso Sud-Est e la cui entità del raccorciamento diminuisce spostandosi verso Ovest. Le varie unità tettoniche hanno raggiunto i loro rapporti reciproci, attualmente visibili, negli ultimi 20 milioni di anni, a seguito di una compressione legata alla collisione tra l’Africa e l’Europa e che, con tutta probabilità, è ancora oggi attiva. In detta catena si riconoscono tre gruppi di falde che sono il risultato della collisione della zolla nord-africana con la zolla sud-europea. Il primo gruppo di falde (più alto geometricamente) affiora nel settore peloritano e nell’Arco Calabro ed è il risultato della deformazione del margine continentale meridionale della Tetide (secondo alcuni autori, in parte anche di quello settentrionale).

Si distinguono unità tettoniche di basamento ercinico (graniti e rocce metamorfiche di alto e basso grado) ricoperte tettonicamente, a loro volta, durante l’alto Paleogene da unità di basamento ercinico con sottile copertura sedimentaria carbonatica e clastica (Trias-Oligocene).

Il secondo gruppo, occupante livelli intermedi nell'edificio strutturale, è costituito da falde di scollamento, note come "Argille Variegate" e derivanti da domini paleogeografici interni (Sicilidi). I loro terreni carbonatici e terrigeni (Giura sup.-Miocene inf.) sono stati messi in posto tra il Miocene inferiore e medio sui terreni delle unità più esterne.

**Figura 66. Schema geologico della Sicilia (Catalano et alii, 1978).\***



\*LEGENDA: 1) Unità dell'arco Calabro-Peloritano; 2) Unità Sicilidi (sedimenti prevalentemente terrigeni); 3) Unità derivanti dai domini Panormidi (prevalentemente sedimenti di piattaforma carbonatica), Imerese (sedimenti di bacino) e Trapanese (sedimenti di piattaforma e pelagici) deformati tra inizio Miocene e Tortoniano inf.; 4) Unità derivanti dai domini Trapanesi (sedimenti di piattaforma e pelagici), Sicano (sedimenti di bacino) e Saccense (sedimenti di piattaforma e pelagici), deformati dopo il Tortoniano inf.; 5) Sedimenti terrigeni di tipo "molassico"; 6) Avampaese Ibleo (sedimenti pelagici, vulcaniti e sedimenti di piattaforma non affioranti); 7) Strutture profonde nelle aree di avampaese (avanfosse); 8) Fronti di accavallamento affioranti e sepolti.

Il terzo gruppo è rappresentato da unità tettoniche costituite da sedimenti carbonatici, silico-carbonatici e silico-clastici (Trias-Miocene). Anche questa sequenza si è strapata dall'originario substrato sedimentario o con esso, e tettonicamente appilata durante le fasi compressive post-mioceniche.

Le analisi palinopastica e delle facies permettono di ricostruire la morfologia pre-neogenica dell'originario margine continentale siciliano, caratterizzato da differenti domini paleogeografici. I terreni che li caratterizzavano sono riconducibili a depositi di piattaforma carbonatica e di bacini interposti ad essa.

I domini paleogeografici sviluppatasi da Nord a Sud, nel tardo Trias erano rappresentati da piattaforma carbonatica pre-Panormide e Panormide, bacino Imerese, piattaforma carbonatica Trapanese, bacino Sicano, piattaforma carbonatica Saccense ed Iblea, e successivamente, con caratteri più di bacino fino all'Oligocene, ad eccezione della piattaforma panormide. L'assetto paleogeografico si modifica nel Neogene, in corrispondenza dell'inizio della deformazione interessante il margine continentale africano. Nel tardo Oligocene-Miocene inferiore si depositarono sedimenti terrigeni (Flysch di Capo d'Orlando, Reitano, Numidico, ecc.) in una grande avanfossa progressivamente deformata. Le fasi tettoniche collegate all'orogenesi sono quelle che hanno dato luogo alle strutture di ricoprimento con una tettonica di tipo traslativo e plicativo.

#### **4.2.1 Aspetti idrogeologici della Sicilia**

Tenendo conto della complessità del quadro strutturale esistente nel territorio siciliano, caratterizzato dalla sovrapposizione di corpi geologici, talora sradicati dal loro substrato, è possibile in funzione delle caratteristiche di permeabilità delle rocce, indipendentemente dal complesso stratigrafico-strutturale di appartenenza, identificare diversi complessi idrogeologici.

##### *Complesso granitico-metamorfico (Paleozoico)*

Occupava l'estremità nord-orientale dell'isola (M. Peloritani), venendo a contatto con i flysch dei Monti Nebrodi lungo la linea San Fratello-Taormina, mentre non sono visibili i rapporti con le unità più esterne della Catena siciliana. Trattasi di unità cristalline del Complesso Calabride, costituite da diverse falde di terreni metamorfici talora con resti dell'originaria copertura sedimentaria mesozoica-terziaria. La posizione strutturale delle falde è tale che i termini più alti sono anche quelli di grado metamorfico più elevato.

Dal punto di vista idrogeologico in questo complesso sono state accorpate:

- l'unità dell'Aspromonte, costituita da gneiss, paragneiss, micascisti, migmatiti, marmi e anfiboliti, con permeabilità bassa, localmente elevata per fessurazione;
- l'unità di Mandanici ed il basamento metamorfico delle Unità di Capo S. Andrea, di Taormina e di S. Marco, costituiti da filladi, semiscisti e quarziti con bassa permeabilità per fessurazione.

Nel complesso queste formazioni costituiscono un insieme prevalentemente impermeabile salvo le zone più fratturate che possono essere sedi di acquiferi discontinui e limitati.

##### *Complesso argillitico siliceo-calcareo (Lias medio - Miocene inferiore)*

Le rocce appartenenti a questo complesso affiorano con andamento E-W, nella parte occidentale-settentrionale dell'isola tra la struttura carbonatica Panormide di M. Sparacio-M. Monaco a Nord, le unità terrigeno evaporitiche-carbonatiche neogeniche a Sud e gli "horst" affioranti delle unità Trapanesi ad Est.

I litotipi che lo compongono sono rappresentati da argilliti silicee con intercalazioni di "biocalcareni risedimentate", calcilutiti e marne, calcareniti organogene e glauconitiche.

Questo complesso, tettonicamente sovrapposto su formazioni dolomitiche e calcaree appartenenti all'Unità trapanese, come comprovato dalla successione incontrata dal pozzo minerario Trapani, è caratterizzato da pieghe e pieghe faglie con asse SW-NE.

Dal punto di vista idrogeologico, nel loro insieme queste rocce costituiscono un complesso impermeabile, formando la "copertura" delle sottostanti unità carbonatiche trapanesi.

##### *Complessi carbonatici (Trias sup. - Miocene inferiore)*

Affiorano nella parte occidentale, in nuclei discontinui prevalentemente costituiti da rocce dolomitiche e calcaree appartenenti ad unità stratigrafico-strutturali diverse, tra loro tettonicamente sovrapposte, e nella estrema parte sud-orientale dell'isola. Da Nord a Sud si distinguono:

1. Dominio delle unità Panormidi (Trias sup. - Miocene). Le rocce di questo dominio affiorano interamente nella parte Nord-Occidentale dell'Isola. Si tratta di calcari, calcari dolomitici, calcareniti, calcilutiti e brecce calcaree che formano un corpo geologico (spesso, a luoghi, un migliaio di metri) tettonicamente sovrapposto alle sottostanti e più estese unità Imeresi e Trapanesi. Queste rocce molto permeabili per fessurazione e carsismo costituiscono un acquifero di notevole consistenza. Il drenaggio sotterraneo delle acque di infiltrazione si esplica in particolare verso NW e NE, dando luogo a numerose sorgenti sottomarine. L'infiltrazione efficace media annua è di 185 mm per valori di piovosità media annua dell'ordine dei 600 mm.
2. Dominio delle unità Trapanesi (Trias sup. - Miocene). E' presente anch'esso nel settore Nord - occidentale, lungo una fascia a decorso N-NE con i rilievi di Monte Inici, Monte Barbaro, Montagna Grande e Monte Bonifato e, più ad occidente, con il rilievo di Monte Erice. La sua porzione sepolta è stata raggiunta ed attraversata da alcuni pozzi per ricerche di idrocarburi (Pozzo Trapani, Pozzo Segesta, Pozzo Alcamo, Pozzo Poggioreale) che hanno messo in evidenza uno spessore di 3.000 m circa. La successione stratigrafica è data da calcari e dolomie triassico-liassiche (potenti circa 2.000 m) cui seguono calcari pelagici (Rosso Ammonitico e "Scaglia") dell'intervallo Giura-Eocene, biocalcareni e calcareniti glauconitiche dell'intervallo Oligo-Burdigaliano (che nell'insieme costituiscono il serbatoio carbonatico), ed infine le marne argillose di età Serravalliano-Tortoniano inf., che rappresentano, insieme alle unità Imeresi, la copertura impermeabile. Dal punto di vista strutturale l'unità Trapanese appare come un grosso corpo geologico, in gran parte sepolto, parzialmente sovrascorso verso Sud (dove i suoi spessori complessivi si riducono) ed interessato, dopo le fasi compressive, da una tettonica tensile responsabile dei sollevamenti differenziali che gli conferiscono una struttura ad "Horst" e "Graben". I depositi carbonatici di questo dominio sono molto permeabili per fessurazione e carsismo; l'infiltrazione efficace media annua è valutata in 160 mm per precipitazioni medie annue ammontanti a 700 mm. I numerosi pozzi profondi che raggiungono questo serbatoio carbonatico testimoniano della presenza di acquiferi con salinità elevata (ad eccezione del pozzo Segesta).
3. Dominio Saccense: costituisce tutto il settore meridionale della Sicilia occidentale e si rinviene per lo più nel sottosuolo a varie profondità (vedi numerosi pozzi nel settore Lippone-Mazara). Affiora nelle zone di Monte Magaggiaro e Sciacca per una estensione di 78 km. La successione stratigrafica è data da almeno 3.000 m di calcari e dolomie triassico-liassiche, calcari pelagici di tipo Rosso Ammonitico e Scaglia con potenti intercalazioni di megabrecce calcaree cretacee, del Giura-Eocene, calcari e nummuliti, calcari a briozoi ed alghe rosse dell'Eocene-Miocene. Questi depositi costituiscono nel loro insieme un grande corpo geologico generalmente radicato, fortemente interessato dalla tettonica tensile post medio-pliocenica che ne ha determinato l'attuale andamento ad "Horst" e "Graben". Nei suoi depositi, molto permeabili per fessurazione e carsismo (l'infiltrazione efficace media annua è valutata in 110 mm per precipitazioni medie annue di 600 mm) si sviluppano circuiti idrotermali che danno luogo ad importanti emergenze (oltre 400 l/s).
4. Dominio Ibleo: il settore sud-orientale della Sicilia è occupato dall'avampaese ibleo che, ribassato per faglia verso N-W (avanfossa Gela-Catania), si immerge al di sotto della Catena Siciliana. Le successioni che lo costituiscono sono prevalentemente carbonatiche ed i livelli triassico-giruassici, in parte cretacei, sono noti dai

dati del sottosuolo. I calcari e le dolomie (Trias sup.), potenti oltre 4800 m, sono seguiti verso l'alto da argilliti nere della Fm. Streppenosa nel dominio ragusano, mentre in quello siracusano si hanno nel Giura medio-Miocene sup. successioni carbonatiche di piattaforma. Ancora nel dominio siracusano si hanno nel Giura medio-Miocene sup. successioni carbonatiche ed in quello ragusano, calcari marnosi. Intercalazioni di vulcaniti si riscontrano nei livelli del Trias, Dogger, Cretaceo superiore e Miocene superiore.

Dal punto di vista idrogeologico i calcari e le dolomie del Trias superiore, nonché il complesso delle calcareniti organogene, breccie e calcari con selce del Giura medio al Miocene superiore sono caratterizzati da una buona permeabilità per fessurazione e porosità. Le argilliti liassiche della Formazione Streppenosa costituiscono un importantissimo livello impermeabile all'interno delle formazioni carbonatiche, che separa due acquiferi molto estesi, tra loro indipendenti, di cui quello più profondo è certamente il più interessante dal punto di vista geotermico. Da tener conto inoltre che le vulcaniti intercalate nei calcari mesozoici, talora profondamente alterate e argillificate, costituiscono anch'esse setti impermeabili discontinui a livelli di diverse profondità che possono dare luogo ad acquiferi localmente separati.

#### *Complessi flyscioidi argillo-silico-marnosi di età Permo-triassica-oligomiocenica*

I loro affioramenti sono per lo più localizzati nella parte settentrionale dell'isola dove in particolare formano i M. Nebrodi, venendo, verso W, in contatto con le formazioni metamorfiche dei Peloritani. Verso Sud questi complessi perdono la loro unitarietà risultando smembrati in diverse "lame" tettoniche che si inseriscono nel bacino neogenico di Caltanissetta.

Fanno parte di questi complessi il Flysch di M. Soro (Tironico-Cretaceo sup.) costituito da litotipi argillosi-calcarei-arenacei e quarzareniti in grossi banchi con interstrati argillosi; "Argille Varicolori" silicidi con intercalazioni di calcari marnosi (Cretaceo-Eocene) passanti verso l'alto ad alternanze argillose e marnoso-arenacee oligoceniche (Flysch di Troina-Tusa); argille marne siltose, arenarie quarzose con interstrati argillosi e quarzareniti Oligo-mioceniche (Flysch Numidico); grovacche, siltiti, argille con livelli conglomeratici ed arenacei Oligo-mioceniche (Flysch di Reitano e Flysch di Capo d'Orlando).

In questi complessi sono stati accorpati anche i piccoli affioramenti di argille, argille marnose e marne con intercalazioni di arenarie di età Permo-triassica.

Dal punto di vista idrogeologico tutte queste formazioni hanno un comportamento simile. Infatti i terreni che le costituiscono sono caratterizzati dal prevalere di termini poco permeabili o impermeabili a cui sono intercalati livelli prevalentemente arenacei dotati di permeabilità da media a bassa, talora per fessurazione.

Pertanto nel loro insieme queste formazioni costituiscono un "complesso di copertura". Al di sotto di questo possono comunque esistere condizioni favorevoli all'esistenza di potenziali serbatoi geotermici, che potrebbero essere rappresentati dalle serie porose e permeabili delle scaglie delle unità imeresi e panormidi riscontrate dai sondaggi per ricerca di idrocarburi a profondità variabili dal 1000 ai 2000 m nella zona di Mistretta.

#### *Complesso argilloso-sabbioso e conglomeratico (Miocene medio-sup.)*

Presente nel settore centro-meridionale della Sicilia, con notevoli spessori (fino a 1000 m) in affioramento e nel sottosuolo (area di Lippone-Mazara). E' costituito, dal basso



verso l'alto, da argille marnose, arenarie, sabbie e conglomerati (Fm. Terravecchia) sui quali si rinvencono calcari di scogliera (complesso della scogliera messiniana, Fm. Baucina) passanti lateralmente a marne ed argille marnose.

L'idrogeologia di questo dominio è abbastanza complessa data l'esistenza di livelli argillosi impermeabili interposti a quelli permeabili, arenacei conglomeratici e carbonatici.

#### *Complessi dei depositi evaporitici e marnoso-calcarei (Messiniano-Pliocene inf.)*

Presente principalmente nel settore centro meridionale dell'isola formano i bacini di Castelvetrano e Caltanissetta in complicati rapporti geometrici con le unità calcaree dei domini sicani e saccensi. I litotipi che li compongono, appartenenti a diversi cicli sedimentari (depositi terrigeni e carbonatici tardorogeni del Miocene superiore e depositi evaporitici e carbonatici-marnosi messiniani e pliocenici costituiscono una sequenza di complessi idrologici di scarsa o bassissima permeabilità.

Gli unici litotipi, permeabili in grande per fratturazione e carsismo, sono costituiti da calcari vacuolari o gessi della "serie solfifera siciliana" intercalati però in sedimenti permeabili che fungono da copertura. Nell'insieme tutte le formazioni appartenenti a questi complessi sono smembrati tettonicamente e ciò giustifica la grande distribuzione spaziale delle manifestazioni sorgentizie di modestissima entità, quasi sempre con acque mineralizzate. Lo spessore massimo di questi depositi raggiunge i 400 m ma mediamente sono misurabili spessori dell'ordine del centinaio di metri.

#### *Complesso dei depositi terrigeni e clastico-carbonatici (Pliocene medio-Pleistocene)*

E' presente principalmente nel settore occidentale dell'Isola ed in particolare lungo le fasce costiere. In questo dominio si rinvencono depositi detritico-organogeni e terrigeni (calcareniti, conglomerati, sabbie con intercalazioni argillose). Lo spessore massimo è a luoghi di circa 700 m e tende ad assottigliarsi nelle zone costiere sud-occidentali. I livelli detritici più grossolani possono contenere acquiferi di modesto spessore che non sembrano interferire con gli acquiferi carbonatici profondi mesozoici sottostanti. Nell'insieme questo complesso non presenta interesse ai fini idrogeologici.

#### *Complesso delle vulcaniti basiche etnee (Miocene sup.-Olocene)*

I prodotti vulcanici che costituiscono l'apparato dell'Etna ed il margine settentrionale degli Iblei sono in genere lave e piroclastiti caratterizzati da elevata permeabilità per fessurazione e porosità, mentre i prodotti vulcanoclastici autocementati (lahars) presentano bassa permeabilità.

Lave e vulcanoclastiti, poggiando su un basamento sedimentario scarsamente permeabile, costituiscono un grande acquifero "sospeso" e freddo, in genere non in comunicazione con gli acquiferi profondi. L'interazione con la circolazione profonda può verificarsi attraverso tutte quelle strutture vulcaniche o vulcano-tettoniche (camini, crateri, duomi, grossi sistemi di fratture ecc.) che collegano la superficie con strutture profonde.

#### *Vulcaniti acide delle isole minori (Pleistocene-Oligocene)*

Si tratta anche in questo caso di prodotti vulcanici caratterizzati in genere da buona

permeabilità (lave, depositi ignimbrici, ecc.) a quali si intercalano orizzonti più o meno spessi di materiali vulcanoclastici cementati e argillificati a bassa permeabilità. Gli orizzonti permeabili possono costituire acquiferi, caratterizzati talvolta da alte temperature (Eolie, Pantelleria) e le vulcanoclastiti formano setti impermeabili più o meno continui che determinano la sovrapposizione di acquiferi con caratteristiche chimico-fisiche diverse.

#### *Depositi recenti (Pleistocene)*

Sono rappresentati in prevalenza dai depositi alluvionali recenti, con potenze massime dell'ordine del centinaio di metri. Data l'estrema variabilità granulometrica, rappresentano degli acquiferi multifalda, separati da livelli semipermeabili o impermeabili di interesse assai scarso per la ricerca idrogeologica.

### **4.2.2 Aspetti idrogeochimici della Sicilia**

Il territorio siciliano presenta una diversità geologica che condiziona in maniera determinante la geochemica delle acque circolanti.

La prevalenza degli acquiferi strategici, per l'utilizzo idropotabile, presenti sull'isola sono di tipo carsico e quindi sono impostati su rocce carbonatiche. L'edificio vulcanico etneo ospita un altro acquifero strategico, di potenzialità rilevante rispetto al fabbisogno dell'isola. Tale acquifero, andrebbe meglio valutato dal punto di vista della potenzialità idrica annua, in quanto per ciò che riguarda gli apporti nivometrici, che nella fascia superiore ai 2000 metri di quota sono certamente preponderanti rispetto alle piogge, non si hanno sufficienti informazioni.

Esistono poi tutta una serie di piccoli e medi acquiferi che non hanno certo rilevanza strategica, ma che, in molti casi, riescono a risolvere i problemi di approvvigionamento di piccoli centri. Tali acquiferi trovano sede in prevalenza in rocce serbatoio di tipo arenaceo o su affioramenti carbonatici di minore rilevanza. Per la restante parte, le acque sotterranee, sono praticamente inutilizzabili perché di qualità scadente; queste acque circolano generalmente in formazioni appartenenti alla serie gessosa-solfifera. Questi sedimenti affiorano prevalentemente nella fascia centro-meridionale dell'isola.

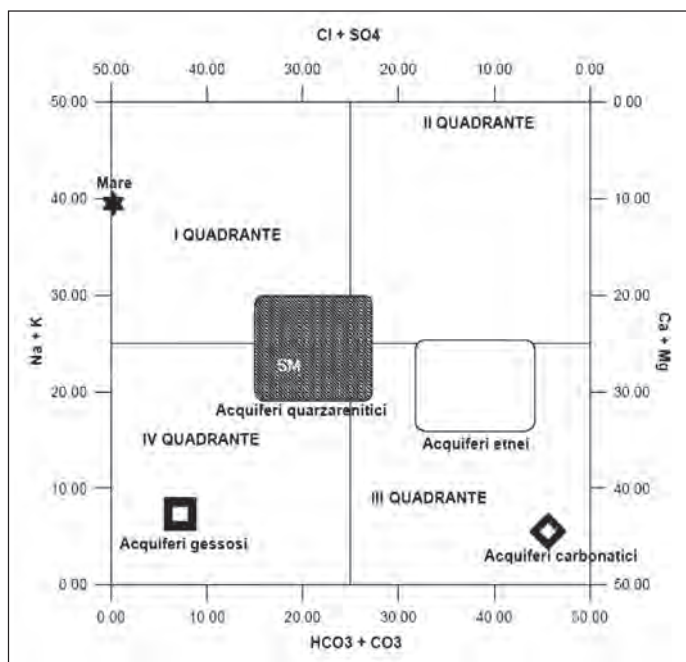
Per una caratterizzazione geochemica generale uno dei metodi più utilizzati nell'ambito geochemica è il diagramma di Langelier-Ludwig. Tale diagramma, in funzione del contenuto in soluzione dei costituenti maggiori (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>) distingue le acque in quattro settori che sono distinti in funzione di coppie anioniche e cationiche (figura 67).

Certamente, gli acquiferi carbonatici sono quelli strategicamente più importanti dal punto di vista dell'approvvigionamento idropotabile. Le caratteristiche idrogeologiche delle rocce carbonatiche e dei calcari in particolare, consentono l'infiltrazione in profondità della maggior parte delle precipitazioni meteoriche che si verificano in aree carsiche permettendo così l'alimentazione di acquiferi di grande potenzialità che hanno la capacità di fornire acque di ottima qualità dal punto di vista dell'utilizzo idropotabile.

La loro connotazione chimica è di tipo bicarbonato calcico, dovuto alla composizione chimica del calcare CaCO<sub>3</sub> e della dolomia CaMg(HCO<sub>3</sub>), e ricadono nel quadrante III del diagramma Langelier-Ludwig, dove sono ubicate le acque che hanno Ca e Mg come coppia

cationica prevalente e carbonati e bicarbonato come coppia anionica prevalente. In quantità minore sono presenti anche gli altri costituenti maggiori. La conducibilità elettrica di queste acque è generalmente compresa tra i 300 e gli 800 mS/cm.

**Figura 67. Diagramma di Langelier-Ludwig sulla caratterizzazione qualitativa idrochimica degli acquiferi siciliani.**



La localizzazione prevalente di questi acquiferi è nel settore occidentale dell'isola in corrispondenza della “catena appennino-maghrebide siciliana”. Esiste poi l'altipiano ibleo nella parte sud-orientale della Sicilia. Si trovano, inoltre, affioramenti carbonatici minori sia sulla dorsale dei Nebrodi che sui Peloritani.

Nell'edificio etneo ha sede un altro grande acquifero strategico in grado di produrre quantità di acqua rilevanti rispetto al problema idrico siciliano. La caratterizzazione chimica di queste acque è condizionata dalla presenza, in tutta l'area, di un diffuso degassamento di anidride carbonica che si discioglie negli acquiferi sotto forma di bicarbonato: questo infatti, è la specie anionica prevalente nella maggioranza degli acquiferi etnei. I cationi invece sono un po' più bilanciati con una leggera prevalenza di Mg e Ca. Nel diagramma Langelier-Ludwig le acque dell'Etna ricadono prevalentemente nel III quadrante delle bicarbonato alcaline.

In porzioni rilevanti della superficie della Sicilia affiorano sedimenti di tipo flischyoide costituiti prevalentemente da successioni alternate di argille e quarzareniti. Queste ultime, che non hanno certo permeabilità comparabile a quella delle rocce carbonatiche, sono però sede di acquiferi che hanno rilevanza locale. La variabilità composizionale di queste quarzareniti insieme con la profondità di circolazione dell'acquifero, influenzano la caratterizzazione geochimica di queste acque, che come conseguenza, nel diagramma Langelier-Ludwig, sono individuate in un campo più esteso rispetto agli altri acquiferi. Anche il loro carico salino è estremamente variabile da decine di  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (gli acquiferi di Monte Catarineci nei pressi di Geraci Siculo) a migliaia di  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (gli acquiferi della zona costiera di Finale di Pollina). La composizione chimica di queste acque è caratterizzata

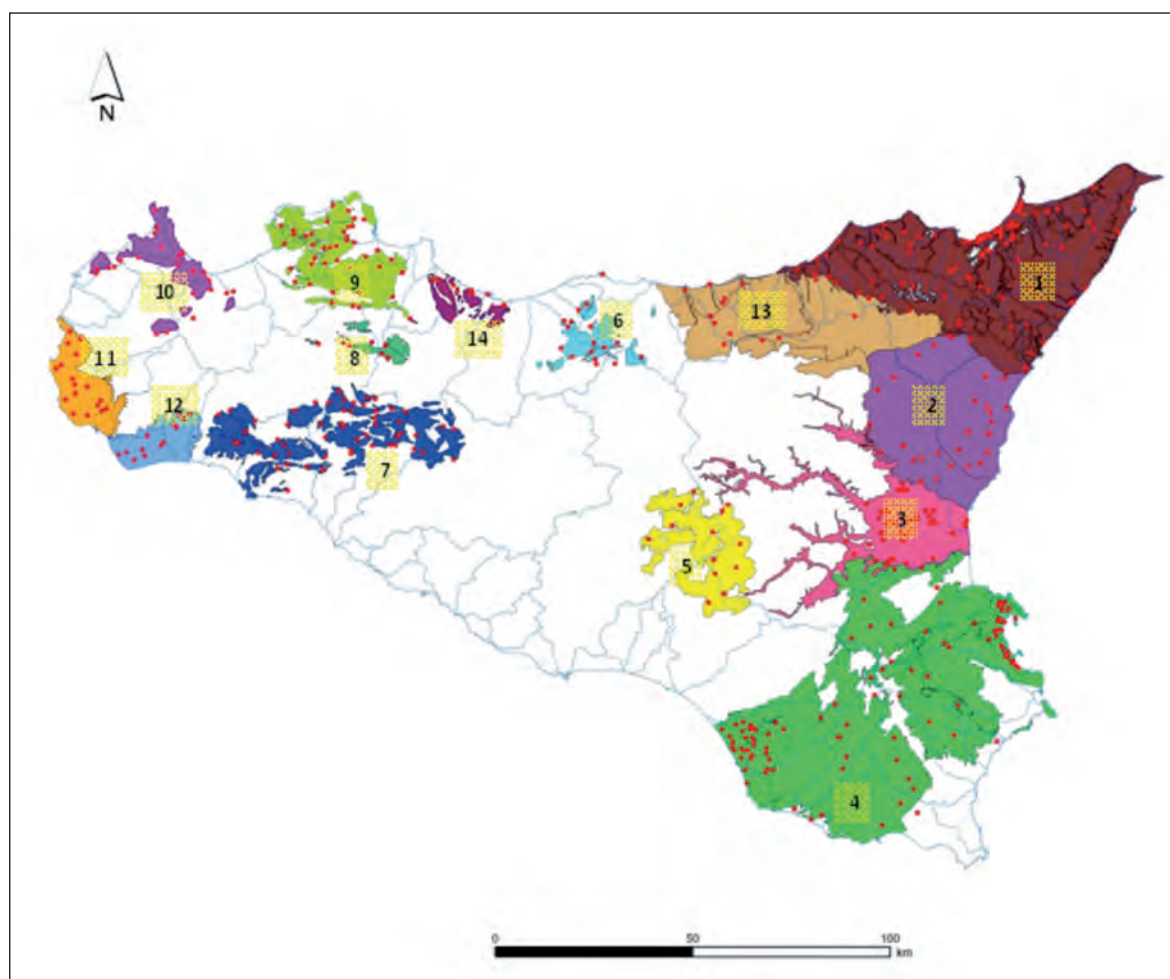
dalla prevalenza della coppia Cl-SO<sub>4</sub> su quella HCO<sub>3</sub>-CO<sub>3</sub>, inoltre hanno anche quantità maggiori di Na e K rispetto al Ca e Mg. Queste acque, nel Langelier-Ludwig di figura 67, ricadono al centro del diagramma in un'area che comprende porzioni dei quattro quadranti.

Nelle aree dove affiorano sedimenti di tipo evaporitico gli acquiferi sono fortemente condizionati dall'elevata solubilità delle rocce serbatoio. Negli acquiferi impostati sui gessi, ricadenti nel IV quadrante del Langelier-Ludwig, circolano acque selenitiche a componente solfato calcica. Queste acque sono di qualità scadente in quanto oltre ad avere contenuti elevati di Ca e SO<sub>4</sub> hanno una salinità elevata che in alcuni casi compromette anche l'uso irriguo o industriale.

### 4.3 I Corpi idrici significativi

Sulla base della descrizione e dello schema idrogeologico della Sicilia è stato elaborato lo schema dei bacini idrogeologici significativi siciliani (figura 68).

**Figura 68. Carta dei bacini idrogeologici significativi con sovrapposti i punti di campionamento (rosso).\***



\*LEGENDA: 1- Monti Peloritani; 2 - Etna; 3 - Piana di Catania; 4 - Monti Iblei; 5 - Piazza Armerina; 6 - Monti Madonie; 7 - Monti Sicani; 8 - Roccabusambra; 9 - Monti di Palermo; 10 - Monti di Trapani; 11 - Piana di Marsala-Mazara del Vallo; 12 - Piana di Castelvetro-Campobello di Mazara; 13 - Monti Nebrodi; 14 - Monti di Trabia-Termini Imerese.

### **4.3.1 Criteri di individuazione dei corpi idrici significativi**

Col termine “corpo idrico” si intende una struttura idrogeologica, costituita da uno o più acquiferi, talora con comportamento autonomo, o in comunicazione idraulica con altre idrostrutture contigue, con cui possono realizzare scambi idrici. L'analisi congiunta dei dati di geologia strutturale e idrogeologici permette di riconoscere i contatti tettonici che assolvono un ruolo idrogeologico mettendo a contatto reciproco i complessi permeabili e/o impermeabili. Le caratteristiche strutturali dei mezzi rocciosi, attraverso i reticoli di fratture, controllano il flusso idrico sotterraneo, sia in termini di aumento della permeabilità per fessurazione, che di diminuzione o sbarramento, quando entro le fratture si sviluppano processi di argillificazione, oppure quando le dislocazioni per faglia sono rappresentate da bande cataclastiche con fratturazione comminuta. La presenza di sistemi di faglie di ampia estensione areale ed a notevole rigetto complessivo può rappresentare un criterio per l'individuazione dei limiti dei corpi idrici, soprattutto quando vengono messi a contatto idraulico formazioni geologiche a diverso grado di permeabilità. Così, i limiti dei corpi idrici carbonatici e cristallini, molto spesso coincidono con bande di dislocazione lungo le quali si realizza una significativa variazione delle caratteristiche idrauliche. Queste bande possono variare la loro inclinazione, da sub-verticali a sub-orizzontali, condizionando così il flusso idrico sotterraneo generale, soprattutto quando al tetto o al letto dei blocchi fagliati è presente un complesso a permeabilità molto più ridotta rispetto a quello adiacente o sottostante/sovrastante; questo meccanismo determina tamponamenti laterali, soglie, confinamenti, ecc. Notevole importanza hanno le superfici di sovrascorrimento attraverso le quali si è realizzata la sovrapposizione di successioni carbonatiche meso-cenozoiche (corpi idrici ad elevata potenzialità) al di sopra di coperture terrigene prevalentemente impermeabili o semi-permeabili.

Le caratteristiche geometriche dei reticoli di fratture, associate alle varie tipologie di contatti tettonici concorrono, in modo determinante, alla circolazione idrica sotterranea entro ciascun corpo idrico, pregiudicando o incrementando il flusso nel sottosuolo. Le caratteristiche intrinseche della maglia di fratturazione (densità, spaziatura, continuità laterale, presenza o assenza di occlusioni etc.) condizionano le traiettorie sotterranee seguite dalle acque di infiltrazione. Nei corpi idrici presenti nella catena siciliana svolgono quindi un ruolo precipuo, sia le superfici di sovrascorrimento (che in modo preponderante condizionano la geometria dei corpi idrici ed hanno prodotto la formazione di un cuneo di scaglie tettoniche, ad elevata potenzialità idrica, con embrii di coperture terrigene prevalentemente impermeabili), sia i sistemi di faglie ad alto angolo, dirette e/o trascorrenti, che condizionano spesso il flusso idrico sotterraneo.

#### *Natura dei corpi idrici siciliani*

I corpi idrici del territorio siciliano possono essere classificati in quattro principali tipologie:

- Corpi idrici in rocce carbonatiche
- Corpi idrici in rocce vulcaniche
- Corpi idrici in rocce elastiche
- Corpi idrici in rocce metamorfiche e plutoniche

La scelta dei corpi idrici significativi è stata effettuata sia in base ai criteri sopra descritti, sia considerando i volumi d'acqua ricavati dal corpo idrico per scopo idropotabile

e/o irriguo e tenendo anche in debito conto anche la qualità del corpo idrico. In ultima analisi, per corpo idrico significativo si intende un'idrostruttura che permette l'accumulo di quantità relativamente cospicue di risorsa idrica di buona qualità.

#### *Corpi idrici in rocce carbonatiche*

Si tratta di corpi idrici con notevole estensione delle aree d'affioramento (Madonie, Monti di Trabia-Termini Imerese, di Bagheria, di Palermo, di Trapani, Sicani, Iblei) e nei quali è predominante il flusso in rete carsica e/o in fratture. Insieme al complesso etneo sono i maggiori corpi idrici della Sicilia e sono, inoltre, di importanza strategica per l'approvvigionamento idrico di molti centri urbani dell'isola. In molti casi questi corpi idrici proseguono nel sottosuolo come acquiferi confinati o semi-confinati al di sotto di coperture terrigene. Tali corpi idrici ospitano acquiferi prevalentemente calcarei e calcareo-dolomitici caratterizzati da grande capacità di immagazzinamento e ricarica (valori d'infiltrazione efficace compresi tra il 60% e 80% della quantità di precipitazione), ma con vulnerabilità molto elevata.

#### *Corpi idrici in rocce vulcaniche*

Si rinvencono principalmente nel sistema vulcanico dell'Etna e nella parte nord dell'area iblea (M.Lauro). La caratteristica principale di questi corpi idrici è di ospitare nel loro seno acquiferi multifalda sovrapposti, ubicati in corrispondenza delle colate di lava, separati da materiali piroclastici fini a permeabilità bassa o nulla. In questi corpi idrici il flusso idrico è condizionato dalla porosità primaria degli acquiferi, che può essere localmente molto elevata, per le reti di fratture a media scala. La loro capacità di ricarica è molto variabile (si infila dal 30% al 70% della precipitazione al netto dell'evapotraspirazione, secondo le caratteristiche litologiche), la capacità di immagazzinamento è ridotta, legata direttamente alla morfologia ed estensione areale e laterale delle colate laviche che ospitano le falde idriche, e la loro vulnerabilità è molto elevata.

#### *Corpi idrici in rocce clastiche*

Sono distinguibili due tipologie principali: la prima è rappresentata da corpi idrici affioranti, sia lungo la costa che nell'entroterra, ed allocati in calcareniti, sabbie e conglomerati pliocenici, plio-pleistocenici e pleistocenici, (Piana di Bagheria, Palermo, Carini, Marsala, Gela, depositi pliocenici dell'Ennese, ecc.); la seconda è data dai corpi idrici ospitati negli orizzonti arenaceo-conglomeratici più permeabili del Flysch Numidico o della Fm. Terravecchia (porzioni periferiche dei Monti Sicani, delle Madonie, dei Monti di Trabia-Termini Imerese, del Bacino di Ciminna, ecc.). Nei corpi idrici di natura calcarenitica il flusso idrico è condizionato in maniera dominante dalla porosità primaria e subordinatamente dalla rete di fratture. Tali corpi idrici sono molto produttivi ed intensamente sfruttati (molti sono anche sovrasfruttati e/o contaminati). La loro alimentazione è essenzialmente passiva in quanto dovuta allo sversamento di altri corpi idrici adiacenti. Nei corpi idrici distribuiti lungo le fasce costiere, da anni si manifestano fenomeni di salinizzazione delle acque sotterranee ospitate. Nei corpi idrici arenaceo-conglomeratici prevale nettamente la circolazione in rete di fratture, la permeabilità è da media a bassa e la vulnerabilità è media. Sono acquiferi modesti, ma in quelli di grandi dimensioni sono in gioco volumi di acqua non trascurabili.

### *Corpi idrici in rocce metamorfiche*

Si localizzano esclusivamente nei Peloritani e la permeabilità è controllata generalmente dai piani di scistosità e dai piani di fratturazione e, a grande scala, da discontinuità tettoniche che hanno prodotto estese fasce di tettonizzazione. La permeabilità è da medio-bassa ad alta nelle suddette fasce. L'infiltrazione e la circolazione si concentrano in queste zone a maggiore permeabilità che agiscono da vere e proprie linee drenanti. In genere la vulnerabilità è di grado medio.

#### **4.4 Descrizione generale delle caratteristiche dei bacini idrogeologici**

L'individuazione dei punti di campionamento, significativi ai fini del monitoraggio, è il risultato di un lavoro di ricerca ed integrazione di dati storici esistenti, riportati principalmente su studi e ricerche scientifiche pubblicate in rapporti tecnici e pubblicazioni di vari Enti. Si precisa comunque che si tratta di una individuazione preliminare e che l'ulteriore acquisizione di informazioni ed elaborazione dei dati acquisiti nonché dei risultati derivanti dal monitoraggio chimico in corso, comporterà l'implementazione del quadro conoscitivo di riferimento con la conseguente integrazione della rete di monitoraggio. Condizione necessaria per la scelta dei punti di monitoraggio è la conoscenza della struttura idrogeologica e delle caratteristiche qualitative e quantitative dei diversi corpi idrici sotterranei.

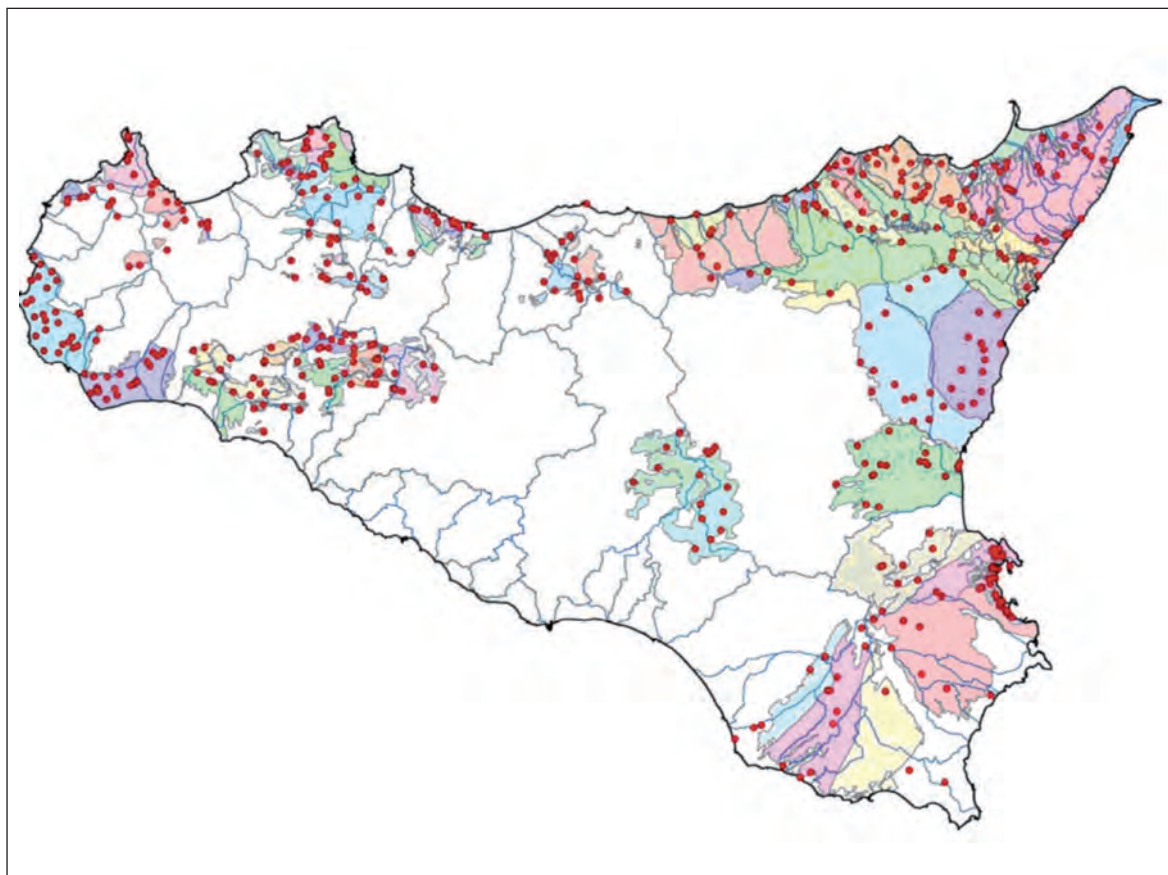
Altro aspetto di particolare significato è l'individuazione di una rete di monitoraggio che, attraverso i controlli periodici previsti, sia in grado di evidenziare eventuali modificazioni delle caratteristiche qualitative delle acque controllate. Questo principio definisce la significatività del punto di campionamento rispetto al corpo idrico di appartenenza.

I dati compresi nella presente relazione sono relativi ai bacini idrogeologici che, in fase di caratterizzazione preliminare, sono stati definiti significativi sia per potenzialità idrica che per qualità delle acque. Rispetto a questi bacini e basandosi su censimenti di punti d'acqua presenti in queste aree si è proceduto all'individuazione dei siti di monitoraggio significativi. Per la realizzazione della rete preliminare di monitoraggio, è stato necessario un oneroso lavoro sul campo, considerati anche i tempi brevi di realizzazione della prima fase della convenzione, di verifica di esistenza e di accessibilità del sito preso in considerazione. A titolo esplicativo, a fronte di 374 siti campionati ne sono stati controllati, ai fini della compatibilità dell'inserimento nella rete di monitoraggio, circa 1100. Per la scelta dei punti di monitoraggio è stato anche tenuto conto dei punti d'acqua che facevano parte della rete di monitoraggio dell'ARPA-Sicilia e del Servizio Idrografico Regionale. In sede di tavolo tecnico, è stato deciso di eseguire le analisi dei parametri aggiuntivi previste in convenzione nelle aree sottoposte a particolare pressione antropica dovuta essenzialmente a insediamenti di tipo industriale o di agricoltura intensiva. La decisione è stata presa in considerazione della preliminare individuazione delle aree di ricarica dei corpi idrici significativi. Infatti nella regione Sicilia la grande maggioranza dei bacini idrogeologici significativi è connessa a grossi complessi montuosi (Madonie, Etna, Sicani, ecc..) le cui zone di quota più elevate sono sottoposte a regimi di salvaguardia (ZPS) (parchi, riserve, zone del demanio delle foreste, ecc..). Comunque, in ogni caso, in queste zone non si trovano insediamenti industriali o zone di coltura intensiva che possono originare contaminazioni dei corpi idrici sotterranei. I corpi idrici sottoposti a maggiore impatto antropico sono quelli costieri, ma più in generale, sono quelli che hanno interazioni con

centri urbanizzati. Un esempio è quello della falda etnea dove i segni più evidenti di contaminazione antropica delle falde (es. nitrati) si sono riscontrati a quote basse al di sotto della fascia antropizzata, mentre i punti d'acqua in quota sono pressoché esenti da contaminanti antropiche. Altra situazione particolarmente degradata è stata riscontrata nelle piane costiere. Un esempio su tutte è costituito dalla piana di Palermo dove la falda risulta vulnerata per il sovrasfruttamento della stessa, che ha permesso l'ingresso di acqua di mare in quasi tutto il settore occidentale della piana. Inoltre, è presente una consistente contaminazione biologica degli acquiferi. Il recupero del corpo idrico, stante il permanere delle attuali condizioni, sarà estremamente problematico. Esistono poi casi estremamente localizzati di grossi insediamenti industriali combinati con la presenza di grossi centri urbanizzati (piana di Gela, Piana di Milazzo e zona di Priolo), che necessitano di studi ed osservazioni di estremo dettaglio che dovranno essere necessariamente basate su monitoraggi pluriennali.

E' stata definita una rete preliminare di monitoraggio dei corpi idrici sotterranei significativi della regione Sicilia (figura 69). I risultati di tale monitoraggio, consentono di caratterizzare in via preliminare, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo, i corpi idrici sotterranei della Sicilia, così come previsto dal D.lgs 152/99 e successive modifiche ed integrazioni. La caratterizzazione dei corpi idrici sotterranei insieme a quella dei corpi idrici superficiali, assume una notevole importanza ai fini della redazione del Piano di Tutela delle acque. Tale strumento di gestione e pianificazione è indispensabile al fine di garantire la salvaguardia e tutela delle risorse idriche.

**Figura 69. Rete di monitoraggio preliminare delle acque sotterranee della Sicilia con 450 punti d'acqua: sorgenti, pozzi, gallerie drenanti (da Piano di Tutela delle Acque Regionale).**





Per il raggiungimento della finalità sopra indicata sono state previste e svolte le seguenti attività:

- Individuazione dei contesti geologici capaci di ospitare corpi idrici sotterranei;
- Caratterizzazione geologica, idrogeologica e idrogeochimica dei corpi idrici in base alla letteratura esistente e ai dati inediti in nostro possesso;
- Definizione e individuazione dei corpi idrici sotterranei significativi (Allegato 1, punto 1.2 del D.Lgs 11 maggio 1999, n. 152);
- Individuazione dei punti d’acqua rappresentativi di ciascun corpo idrico sotterraneo sulla base di punti noti censiti nelle attività di monitoraggio dell’INGV, del CFTA, del DGG, dell’ARPA, dello STIR, dell’EAS e degli ATO, Geni Civili e altri gestori;
- Campionamento dei punti d’acqua rappresentativi di ciascun corpo idrico sotterraneo;
- Analisi di laboratorio dei “parametri di base” (vedi tabella 19 e del D.lgs 152/99) delle acque campionate;
- Analisi di laboratorio dei “parametri addizionali” (tabella 21 del D.lgs 152/99) comprendenti elementi in tracce, composti organici e fitofarmaci;
- Analisi ed interpretazione dei dati qualitativi per la definizione dello “stato ambientale” dei corpi idrici sotterranei;
- Codifica dei bacini idrogeologici, dei corpi idrici significativi e dei punti di campionamento secondo le indicazioni previste dalla normativa vigente;
- Compilazione delle schede di censimento e caratterizzazione dei corpi idrici sotterranei previsti dal D.M. 19/08/2003 e redazione di un database relazionale programmato con Access.
- Georeferenziazione, vettorializzazione e mappatura su piattaforma GIS dei bacini idrogeologici, dei corpi idrici significativi e dei punti di campionamento.

#### **4.5 Lo stato della contaminazione salina negli acquiferi costieri della Sicilia**

Sulla base del monitoraggio effettuato nell’ambito del Piano di Tutela delle Acque della Regione, sono state evidenziate una serie di aree costiere che attualmente sono interessate da fenomeni più o meno gravi di intrusione marina. Grazie alla mappatura e spazializzazione dell’andamento dei Cloruri in falda su base media annuale (con classi di variazione annuale) dal Piano Acque, più altri studi aggiuntivi nell’area di Palermo e di Bagheria, è stato possibile riportare e mappare tale andamento nelle aree di:

- Piana di Palermo e aree limitrofe;
- Piana di Bagheria (PA);
- Piana costiera di Marsala – Mazara del Vallo;
- Area di Castelvetro;
- Piana di Augusta-Priolo;
- Piana di Catania;
- Piana di Milazzo – Barcellona Pozzo di Gotto.

## *Piana di Palermo*

### **Localizzazione geografica**

La Piana di Palermo ha una estensione di circa 130 km<sup>2</sup> ed ha andamento NW-SE con uno sviluppo costiero di circa 30 km. E' delimitata dai cosiddetti "Monti di Palermo", a SE dal Fiume Eleuterio, che la separa dalla attigua Piana di Bagheria, ed a N-E dal Mar Tirreno. I circostanti "Monti di Palermo" raggiungono un'altezza media di circa 900 m, presentando versanti molto ripidi, incisi da valli abbastanza profonde, strette ed incassate, a fondo molto declive, il cui orientamento coincide frequentemente con la direzione predominante dei venti umidi (Libeccio). (figura 70)

**Figura 70. Area della Piana di Palermo.**



Per quel che riguarda il sistema di drenaggio superficiale, il corpo idrico è drenato a SE dal Fiume Oreto, ad E dal Fiume Eleuterio, ed a ENE da alcuni corsi d'acqua minori (ricadenti nei bacini minori tra F. Oreto e Punta Raisi), tra i quali il maggiore è il Passo di Rigano, oggi interamente canalizzato.

I depositi pleistocenici (argille di Ficarazzi e/o calcareniti biancastre o giallastre) della Piana di Palermo poggiano sulle coperture terrigene numidiche o riposano direttamente sulla prosecuzione sepolta dei corpi idrici di Monte Gallo, Monte Castellaccio, Pizzo Vuturo - Monte Pellegrino, Monte Cuccio - Monte Gibilmese e Belmonte-Pizzo Mirabella. Una aliquota idrica sotterranea, non indifferente, proveniente dai precitati corpi idrici carbonatici, alimenta i sovrastanti acquiferi calcarenitici.

Il corpo idrico ricade nel foglio I.G.M.I. n. 249 "Palermo" (scala 1:100.000) e nei territori comunali di Palermo, Villabate, Ficarazzi e Monreale.

I principali corsi della rete idrografica sono il Fiume Oreto ed il canale Passo di Rigano

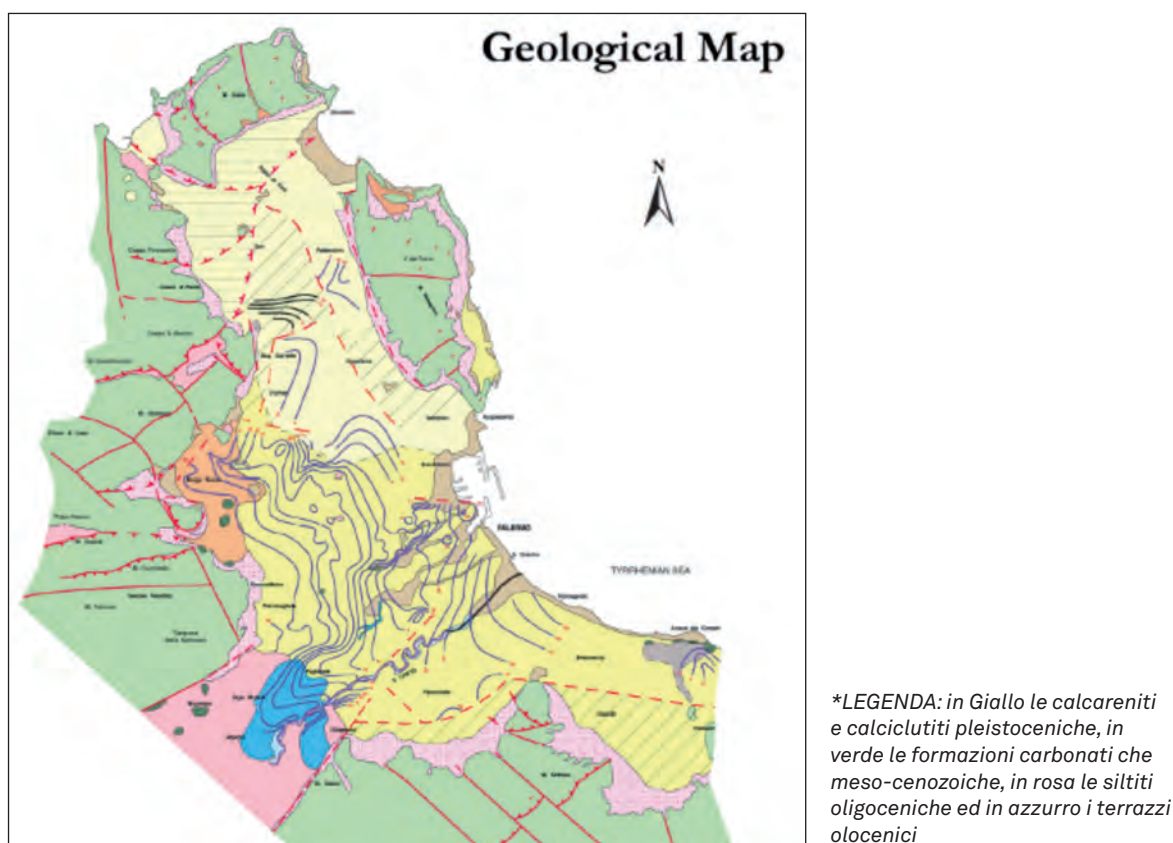
(Cusimano et al.,1981). Il Fiume Oreto nasce dalle pendici della dorsale compresa tra M. Matarassaro Renna (1151 m s.l.m.) e le Punte di Cuti (1074 m s.l.m.). Nel suo tratto mediano è molto incassato, con andamento meandriforme e nella sua parte terminale, prima di sfociare nel Tirreno, risulta rettificato e canalizzato. Il Canale Passo di Rigano raccoglie le acque di alcuni torrenti che si sviluppano dai rilievi posti ad occidente della città. Tali corsi, oggi canalizzati in sotterraneo (Luparello, Borsellino, Celona e Mortillaro), dopo avere attraversato la porzione centrale della Piana scaricano nel tratto di costa della località Acquasanta.

La configurazione della rete drenante è il risultato di numerosi interventi realizzati tra il XVI ed il XX secolo, in funzione di difesa dal pericolo di alluvionamento.

### Sintesi lineamenti geologici

In base agli studi precedenti (Gignoux, 1913; Ruggieri, 1967; Ruggieri & Sprovieri, 1975), alcuni dei quali basati sull'analisi delle informazioni litostratigrafiche, derivanti da indagini geognostiche (Cusimano et al., 1997; Giammarinaro et al., 1999) ed alle più recenti ricerche (Calvi et al., 1998 e 2000, Contino et. al., 2003), si è ricostruita la successione dei sedimenti marini pleistocenici della Piana di Palermo. Tali terreni risultano databili all'Emiliano sup. – Pleistocene medio, al Pleistocene superiore (Buccheri, 1966) ed all'Olocene (Di Stefano, 1998). La Piana di Palermo è costituita da depositi pleistocenici marini, con spessori variabili, che talora possono raggiungere i 100 m, di calcareniti e/o argille sabbiose e silt, discordanti sui carbonati meso – cenozoici del settore di catena dei Monti di Palermo (Caflich, 1966; Abate et al., 1978; Catalano et al., 1979) o sulle loro coperture numidiche (figura 71).

**Figura 71. Carta del tetto del substrato della Piana e dei Monti di Palermo (Calvi et al.1998).\***



## Acquiferi della piana di Palermo

Nella Piana di Palermo è possibile riconoscere, la seguente successione verticale degli acquiferi:

- uno superficiale, costituito di calcareniti organogene biancastre o giallastre, con intercalazioni sabbiose e/o sabbioso siltose, talora con livelli conglomeratici alla base e con occasionali o ripetuti livelli prevalentemente siltoso argillosi che determinano condizioni di semiconfinamento della falda idrica ospitata e a luoghi più livelli acquiferi. La permeabilità media si stima dell'ordine di  $10^{-4} - 10^{-2}$  m/s;
- uno profondo, di natura prevalentemente carbonatica (calcari e dolomie mesozoiche), intercettato a diversa profondità (oltre i 100 m dal p.c.), con permeabilità media stimata tra  $10^{-2}$  e  $10^{-4}$  m/s.

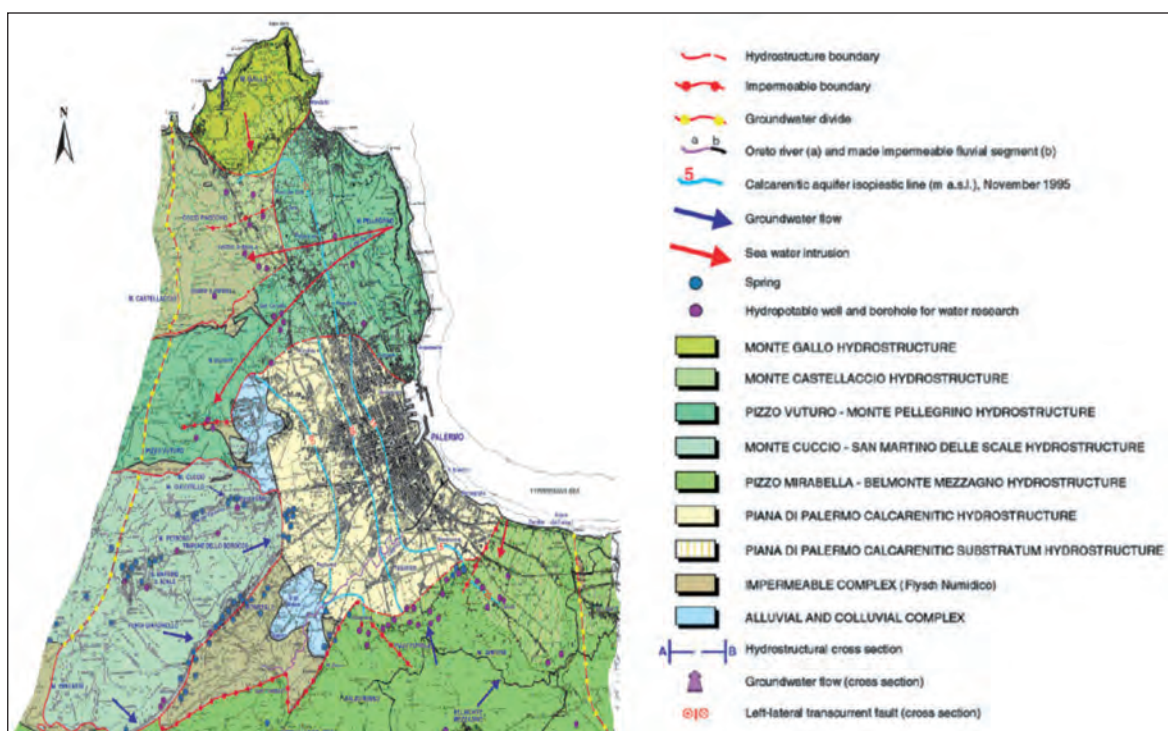
In alcuni settori della Piana, tra i due acquiferi, si intercalano, con spessori variabili, terreni impermeabili del Flysch Numidico ( $k = 10^{-10}$  m/s) o delle successioni argilloso sabbioso siltose pleistoceniche ( $k = 10^{-6}$  m/s).

Si sottolinea che per corpo idrico della Piana di Palermo si intende solamente l'acquifero multifalda impostato nei depositi arenacei, calcarenitico-sabbioso e sabbiosolimose con intercalazioni siltoso-argillosi disposte a diverse altezze stratigrafiche.

## Corpi idrici alimentanti gli acquiferi della Piana

L'analisi geologico-strutturale, corredata da informazioni dedotte dalla stratigrafia di pozzi di una certa profondità e da rilievi piezometrici e idrogeochimici, ha consentito l'individuazione di corpi idrici carbonatici con comportamento autonomo, responsabili dell'alimentazione sotterranea degli acquiferi localizzati nella Piana di Palermo (Calvi et al., 1998) (Figura 72).

Figura 72. Mappa idrostrutturale della Piana e dei Monti di Palermo (Calvi et al.1998)



Per l'inquadramento di tali corpi idrici nel modello idrostrutturale dei Monti di Palermo, si rimanda a Contino et al., (1998). Procedendo da nord verso sud, si riscontrano:

- il corpo idrico di Monte Gallo, sepolto sotto le calcareniti del settore W della Piana dei Colli è localmente separato da esse da spessore variabili dai materiali impermeabili del Flysch Numidico;
- il corpo idrico di Monte Castellaccio, presente nel sottosuolo del settore di Cardillo direttamente al di sotto delle calcareniti; infatti, dalle colonne litostratigrafiche dei pozzi si evidenzia che solo molto localmente si intercalano tra entrambi gli acquiferi ridotti spessori di depositi terrigeni impermeabili del Flysch Numidico. Le condizioni strutturali, idrogeologiche e geomorfologiche autorizzano a considerare in continuità idraulica l'acquifero calcarenitico della Piana dei Colli con l'idrostruttura carbonatica sottostante;
- il corpo idrico di Pizzo Vuturo-Monte Pellegrino si riscontra sepolto tra la Piana dei Colli e quella di Palermo propriamente detta (settore E di Piana dei Colli, Palavicino, Resuttana e Petrazzi). Tutti i dati litostratigrafici ricavati dall'analisi delle stratigrafie dei pozzi idrici e geognostici indicano l'assenza dei depositi pelitici impermeabili del Flysch Numidico incuneati tra le calcareniti ed i calcari del corpo idrico P. Vuturo – M. Pellegrino il che induce a ritenere che i due acquiferi siano in continuità idraulica. Inoltre, nel corpo idrico P. Vuturo – M. Pellegrino, che è a contatto diretto col mare, si osserva un cuneo d'intrusione marina che procede dalla Valle del Porco (Monte Pellegrino) verso il Pizzo Vuturo. La concentrazione di Cl- riscontrata nell'acquifero calcarenitico, costituisce un elemento probante a favore dell'ipotesi di un collegamento idraulico tra le calcareniti ed i calcari sottostanti.
- il corpo idrico di Monte Cuccio – Monte Gibilmese, in base ai dati litostratigrafici (ricavati sia dall'analisi delle stratigrafie dei sondaggi idrici e geognostici, sia dai rilievi geologici effettuati sul terreno), strutturali, idrogeologici e geomorfologici, sembra avere una ridotta prosecuzione nel sottosuolo della Piana di Palermo. Le acque che si infiltrano nelle rocce carbonatiche di questa idrostruttura vengono a giorno nelle sorgenti e nei cunicoli drenanti del Vallone Paradiso – Boccadifalco, di Monreale e soprattutto del gruppo del Gabriele. In condizioni naturali, queste acque si sverserebbero nella Piana di Palermo sotto forma di acque di deflusso superficiale, mentre allo stato attuale molte risultano o non produttive o captate per uso idropotabile-irriguo.
- il corpo idrico di Belmonte Mezzagno-Pizzo Mirabella, il cui settore settentrionale ha la sua diretta prosecuzione al di sotto delle calcareniti della Piana di Palermo (Falsomiele – Ciaculli) ed è in parte responsabile della loro alimentazione.

### **Andamento piezometrico delle falde idriche della Piana**

Due campagne di rilevamento a cadenza semestrale, condotte nell'ottobre 1995 e nel giugno 1996, hanno permesso di evidenziare l'andamento dei livelli piezometrici nei due periodi. Nel settore della Piana dei Colli, le calcareniti biancastre poggiano direttamente su idrostrutture carbonatiche sepolte, quindi i valori di livello piezometrico relativi ai pozzi attestati in calcari o in calcareniti sono paragonabili tra loro. Nella zona centrale (Fondo Verde/Fondo Bacchi) si riscontra in perforazione un potente pacco di sedimenti prevalentemente pelitici (oltre 100 m), in grado di isolare idraulicamente i due acquiferi.

Nell'area centrale della Piana di Palermo, le informazioni idrogeologiche disponibili

si riferiscono alla falda libera o semiconfinata ospitata nelle calcareniti giallastre. A partire dall'assetto idrogeologico della Piana è possibile distinguere almeno tre acquiferi: uno a nord del Fiume Oreto, un secondo a sud dello stesso, mentre un terzo è compreso tra Ciaculli e Acqua dei Corsari. Una revisione dei dati geochemici storici, ha infine fornito indicazioni sul rapporto tra il Fiume Oreto e l'acquifero calcarenitico della Piana (Cusimano et al., 1996).

Nel settore compreso tra Ciaculli e Acqua dei Corsari (Calvi et al., 1998, Contino et al., 2002) si distinguono due aree, una pedemontana nella quale le calcareniti poggiano direttamente sulle dolomie (Fm. Fanusi) e/o sulle intercalazioni carbonatiche in seno alle radiolariti ed argilliti silicee (Fm. Crisanti) appartenenti al corpo idrico di Belmonte Mezzagno-Pizzo Mirabella. Nella fascia costiera invece le calcareniti poggiano direttamente su un corpo di sedimenti pelitici, noti in letteratura geologica col nome di Argille di Ficarazzi (Emiliano sup.-Siciliano), a loro volta riposanti sul Flysch Numidico.

### **Caratterizzazione idrogeochemica degli acquiferi**

La caratterizzazione dei corpi idrici carbonatici circostanti la Piana di Palermo trova conferma anche da un punto di vista geochemico. Le acque, che nello schema classificativo di Langelier & Ludwig (1942), variano da bicarbonato alcalino terrose a clorurato solfato alcaline, mostrano un chimismo fortemente correlato sia al processo d'interazione acqua-roccia, sia ad altri processi (mescolamento, scambio ionico etc.), già messi in evidenza in letteratura (Alaimo et al., 1984; Cimino et al., 1986; Cusimano et al., 1996), che in parte obliterano l'informazione primaria.

La predominanza di  $Ca^{++}$  nelle acque circolanti nelle idrostrutture site a nord del sovrascorrimento di Monte Cuccio, ben si accorda alla prevalenza di rocce calcaree. La maggiore presenza di  $Mg^{++}$  nel settore meridionale, riflette invece la composizione dolomitica delle rocce dei corpi idrici alimentatori di Monte Cuccio-Monte Gibilmese e di Belmonte Mezzagno-Pizzo Mirabella.

Negli acquiferi relativi alla Piana di Palermo, inoltre, si possono distinguere un settore nord (Piana dei Colli) caratterizzato dalla netta prevalenza di  $Cl^-$  e  $Na^+$  rispetto ad un settore sud dove  $HCO_3^-$  ed in subordine  $Ca^{++}$ , sono predominanti (Cusimano et al. 1996). Esiste una zona intermedia (area di Cruillas/Resuttana) che pur appartenendo, da un punto di vista geochemico, al settore sud manifesta variazioni probabilmente legate alla stagionalità (Calvi et al. 1998).

### **Distribuzione di $Cl^-$**

Il cloruro, ione conservativo delle acque, ben si presta alla definizione di contorni d'isoconcentrazione e dei conseguenti processi che li hanno determinati. In accordo con quanto detto in precedenza è possibile differenziare, nella Piana di Palermo, un settore nord con concentrazioni superiori a 5 meq/l, da un settore sud con valori inferiori. Nel settore nord è stato individuato un processo d'intrusione marina che, a partire dal corpo idrico di Pizzo Vuturo-Monte Pellegrino, arriva ad interessare anche quella di M. Castellaccio (area del Vallone Guggino). L'intrusione marina sembra procedere, secondo due cunei, dal sistema carsico della Valle del Porco (M. Pellegrino) verso il Vallone Guggino e Pizzo Vuturo (Cusimano et al., 1996; Calvi et al., 1998). E' stato anche definito un processo di salinizzazione dell'acquifero calcarenitico, causato da due diversi fattori (Cusimano et al., 1996):

- dilavamento di  $Cl^-$  e scambio ionico, laddove tra le calcareniti e l'acquifero carbo-

- natico s'intercalano argille le quali trattengono  $Ca^{++}$  liberando  $Na^+$ ,  $Mg^{++}$  e  $Cl^-$ ;
- apporto d'acqua di mescolamento proveniente dal cuneo salino, presente nell'acquifero carbonatico, laddove acquifero calcarenitico e acquifero carbonatico siano in continuità idraulica.

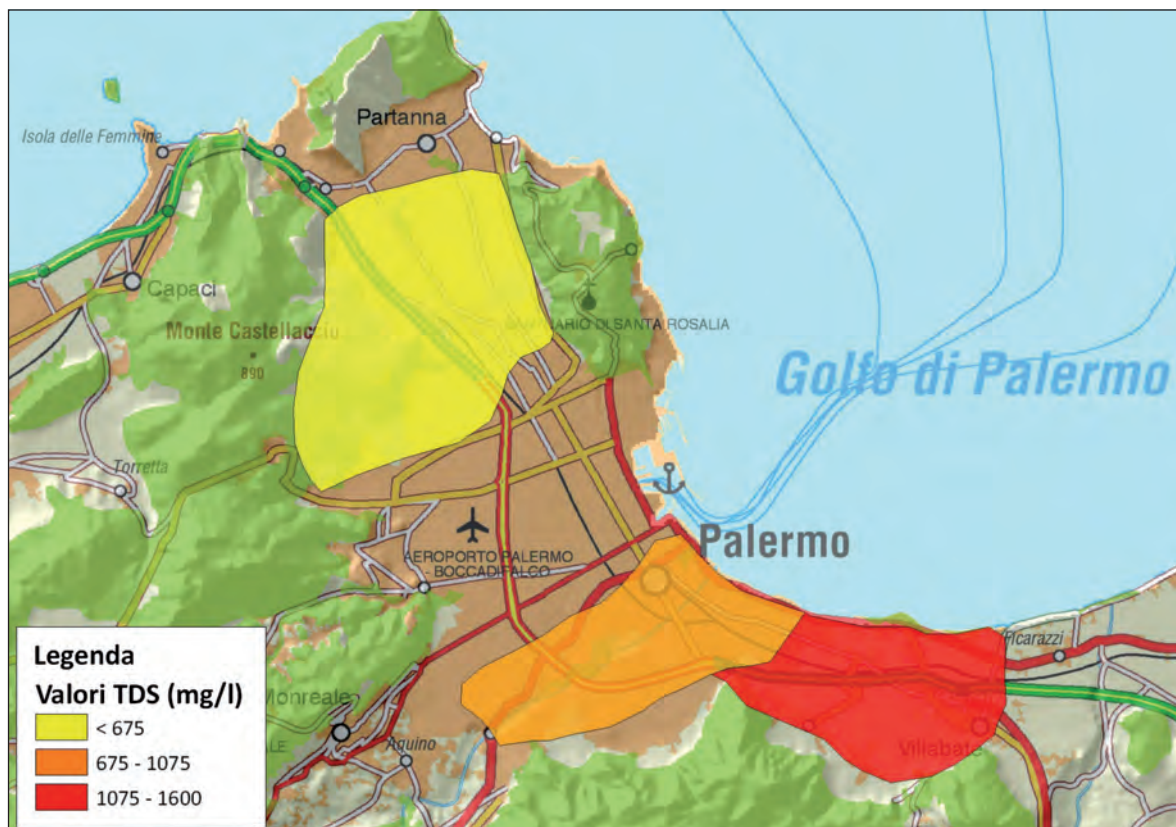
Nell'area di piana costiera, in prossimità della foce del Fiume Oreto (Romagnolo), sono stati rilevati valori di  $Cl^-$  maggiori di 10 meq/l nel periodo tardo autunnale ed inferiori a 5 meq/l nel periodo tardo primaverile.

Per quanto riguarda l'acquifero calcarenitico del settore Acqua dei Corsari, sono stati rilevati, nel periodo tardo primaverile, valori di  $Cl^-$  maggiori di 15 meq/l. Nel settore meridionale della Piana, alle propaggini settentrionali del corpo idrico di Belmonte Mezzagno-Pizzo Mirabella, sono stati rilevati valori di  $Cl^-$ , inferiori a 0,5 meq/l nel periodo tardo autunnale e maggiori di 1 meq/l nel periodo tardo primaverile. Queste variazioni stagionali di  $Cl^-$  potrebbero essere legate alle diverse attività agricole effettuate in tale settore.

### Interpretazione e mappatura dell'andamento del TDS

Sulla base delle cartografie e informazioni sull'andamento degli acquiferi e dell'intrusione salina, relativamente ai già citati valori di  $Cl^-$ , sono state evidenziate ed interpretate le zone di interesse dei fenomeni di intrusione marina. I valori di Cloruri sono stati trasformati in valori di Tenore totale di Sali Disciolti (TDS), avendo come riferimento un fattore medio di trasformazione di 0.4 ( $TDS = Cl \text{ (mg/l)} / 0.4$ ). In figura 73 sono riportate le aree individuate utilizzate per la valutazione successiva dei modelli di rischio.

**Figura 73. Aree individuate come interessate dall'intrusione e corrispondenti livelli di TDS ricavati dai livelli di Cloruri.**



## *Piana di Bagheria (PA)*

### **Localizzazione geografica**

La Piana di Bagheria. è delimitata dai Monti di Bagheria ed in parte da quelli di Trabia, ad SW dal Fiume Eleuterio, che la separa dalla attigua Piana di Palermo, ed a N-E dal Mar Tirreno. I circostanti “Monti di Bagheria” raggiungono un’altezza media di circa 200 m, mentre le propaggini nord-occidentali dei Monti di Trabia, superano i 500 m.

Questi rilievi presentano, specie sul fianco settentrionale, versanti molto ripidi, incisi da valli strette ed incassate, a fondo molto declive.

I depositi pleistocenici della Piana di Bagheria poggiano sulle coperture terrigene numidiche o riposano direttamente sulla prosecuzione sepolta dei corpi idrici dei Monti di Bagheria e subordinatamente di Trabia. Questi corpi idrici carbonatici alimentano parzialmente, in alcuni settori, gli acquiferi calcarenitici.

Per quel che riguarda il sistema di drenaggio superficiale, il corpo idrico è drenato a SE dal Fiume Eleuterio, ad E dal Fiume Milicia e dal Torrente S. Michele. I bacini idrografici di afferenza sono: Fiume Eleuterio e bacini minori tra Eleuterio e Milicia ed il Torrente S. Michele. Il corpo idrico ricade nel foglio I.G.M. n. 249 “Palermo” (scala 1:100.000) e nei territori comunali di Bagheria, S. Flavia, Altavilla Milicia e Casteldaccia.

### **Acquiferi della piana di Bagheria**

Nella Piana di Bagheria è possibile riconoscere, la seguente successione verticale degli acquiferi:

- uno superficiale, costituito di calcareniti organogene giallastre, con intercalazioni sabbiose e/o sabbioso siltose, talora con livelli conglomeratici alla base e con occasionali o ripetuti livelli prevalentemente siltoso argillosi che determinano condizioni di semiconfinamento della falda idrica ospitata e a luoghi più livelli acquiferi. La permeabilità media si stima dell’ordine di  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$  m/s;
- uno profondo, di natura carbonatica (calcari e dolomie mesozoiche), intercettato a diversa profondità sino ad essere sub-affiorante o affiorante in vicinanza ed in corrispondenza delle montagnole, con permeabilità media stimata tra  $10^{-2}$  e  $10^{-4}$  m/s. In alcuni settori della Piana, tra i due acquiferi, si intercalano, con spessori variabili, terreni impermeabili del Flysch Numidico ( $k = 10^{-10}$  m/s) o delle successioni argilloso sabbioso siltose pleistoceniche ( $k = 10^{-6}$  m/s).

Si sottolinea che per corpo idrico della Piana di Bagheria si intende solamente l’acquifero multifalda impostato nei depositi arenacei, calcarenitico-sabbioso e sabbioso-limose con intercalazioni siltoso-argillosi disposte a diverse altezze stratigrafiche.

### **Corpi idrici alimentanti gli acquiferi della Piana**

L’analisi geologico-strutturale, corredata da informazioni dedotte dalla stratigrafia di pozzi di una certa profondità e da rilievi piezometrici e idrogeochimici, ha consentito l’individuazione di unico corpo idrico carbonatico (Monti di Bagheria) con comportamento autonomo, responsabile dell’alimentazione sotterranea degli acquiferi localizzati nella Piana di Bagheria. Tale corpo idrico risulta sepolto al di sotto delle coperture terrigene di Flysch Numidico, come avviene specialmente nel settore di NW e SE, dove sono ridotte le emergenze del substrato meso-cenozoico. In corrispondenza dell’abitato di Bagheria sono

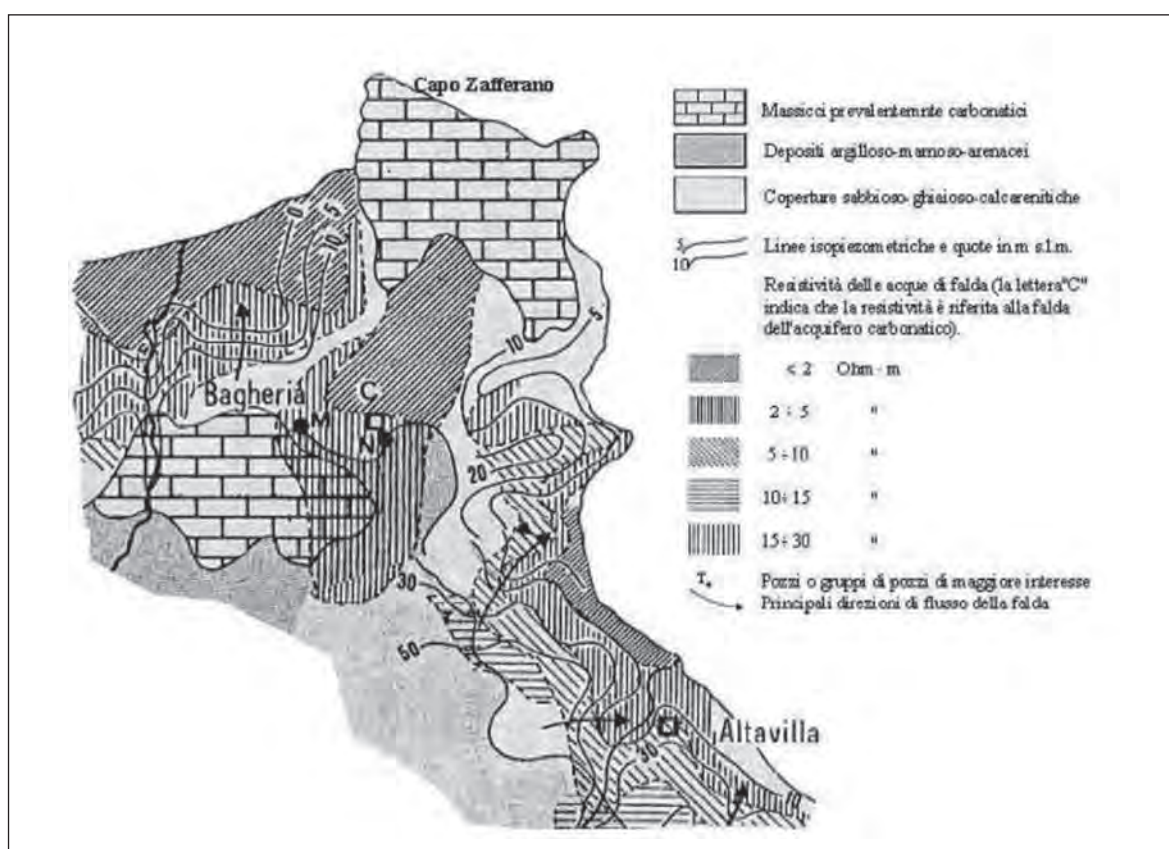


maggiormente concentrate le montagnole che, come già accennato costituiscono porzioni emergenti del substrato meso-cenozoico. In tale settore, si riscontrano i depositi pleistocenici in discordanza direttamente sul substrato meso-cenozoico, con il quale risultano quindi in comunicazione.

### Andamento piezometrico delle falde idriche della Piana

Bartolomei et al. 1983 hanno realizzato uno schema di circolazione idrica sotterranea della Piana di Bagheria, inserito in un contesto più vasto da loro designato con il nome di Unità idrogeologica della Piana di Palermo-Altavilla Milicia (figura 74).

**Figura 74. Schema idrogeologico della Piana costiera di Bagheria (da Bartolomei et al, 1983).**



L'andamento delle curve isopiezometriche mette in evidenza una mancanza di continuità tra le isopieze localizzate a N dell'abitato di Bagheria e quelle in prossimità della Piana di S. Flavia, identificando tra le due porzioni una netta separazione idrostrutturale. Si può, inoltre, osservare come le quote piezometriche maggiori (50 m s.l.m.) sono concentrate nella parte orientale del territorio, mentre quelle a N di Bagheria presentano quote più basse (10 m s.l.m.).

Le direzioni ed i versi di deflusso idrico sotterraneo indicano che la principale area di alimentazione si colloca nella zona centrale del territorio. Infatti, gli assi principali di drenaggio sono diretti verso il mare e verso i maggiori corsi d'acqua che drenano la Piana, quali il Milicia e l'Eleuterio.

Lo sfruttamento intenso operato nella Piana di Bagheria, come nelle fasce costiere prossime a Casteldaccia, per le pratiche irrigue avrebbe prodotto, secondo Bartolomei et al., 1983, fenomeni accentuati di intrusione marina. In particolare, l'andamento delle isopiezometriche e la distribuzione della resistività delle acque denuncerebbero l'esistenza di diffusi fenomeni di ingressione marina lungo tutta la fascia costiera ed in particolare nella zona di Bagheria dove il fenomeno interesserebbe direttamente anche la falda dei complessi calcarei e calcareo dolomitici.

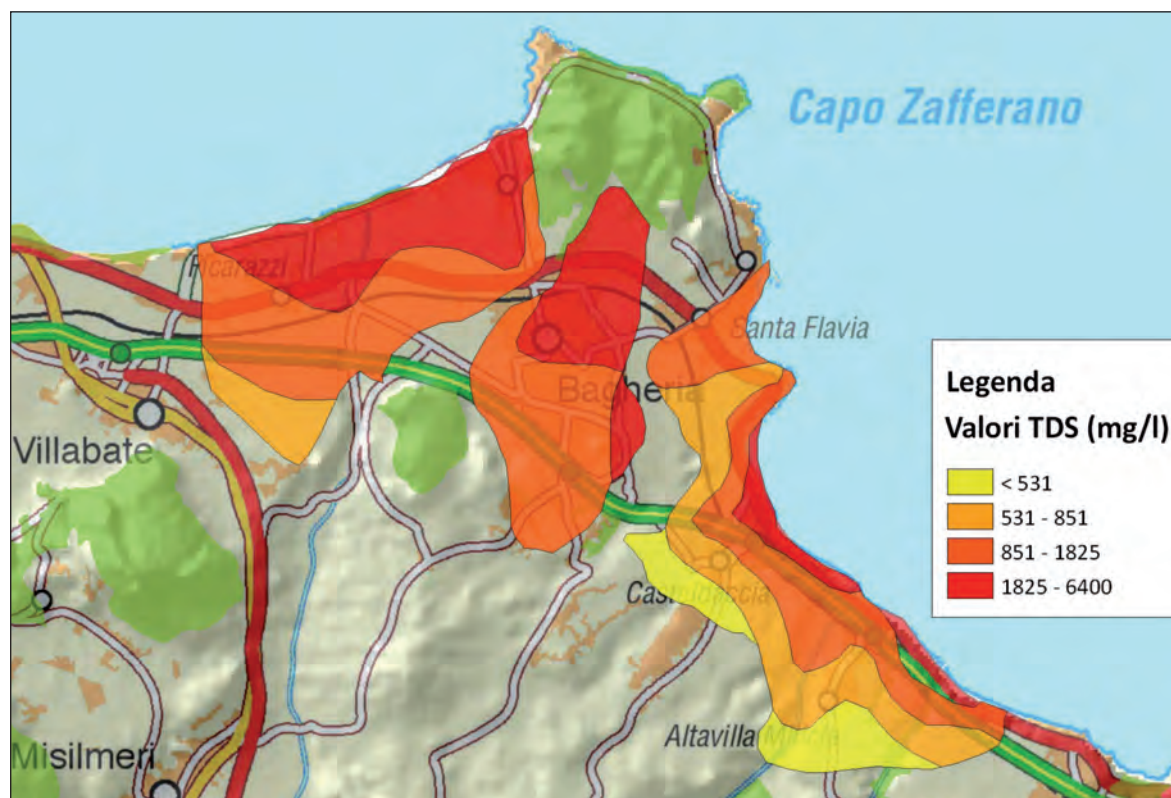
Secondo gli autori precedenti, ad ovest di Bagheria, fino al fiume di Ficarazzi l'acquifero superficiale, costituito prevalentemente da sabbie e da calcareniti plio-pleistoceniche, ha nel suo complesso uno spessore che può raggiungere i 70 m circa. In detti depositi i pozzi erogano portate dell'ordine di 50 ÷ 60 l/s. Inoltre, la produttività dei singoli pozzi raggiunge spesso anche i 30 l/s.

### Determinazione delle aree interessate dal fenomeno intrusivo

Sulla base delle informazioni e delle cartografie disponibili sopra riportate, sono state individuate le aree di interesse del fenomeno di intrusione per questa zona. Dallo schema idrogeologico sono state acquisite in formato digitale le aree ad isoresistività (ohm/m). Successivamente sono stati trasformati i valori nella conducibilità in Siemens/m e poi in mS/cm. Dai valori di conducibilità dell'acqua di falda ottenuti (ECw in mS/cm) si è proceduto alla trasformazione in TDS utilizzando il fattore di conversione 640 (FAO, 1985).

Si riporta di seguito la figura relativa alla perimetrazione delle aree e corrispondenti valori di TDS (figura 75).

**Figura 75. Aree individuate come interessate dall'intrusione e corrispondenti livelli di TDS ricavati dalla resistività/conducibilità delle acque di falda**



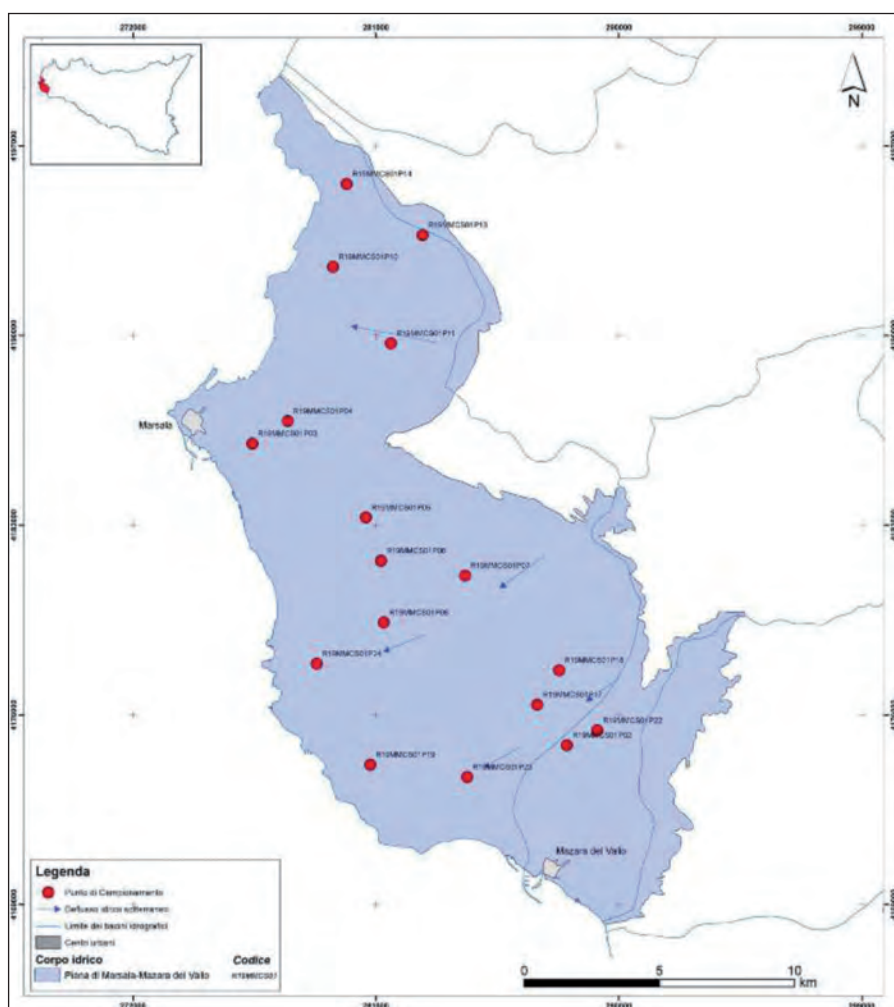
### *Piana costiera di Marsala – Mazara del Vallo*

La Piana di Marsala–Mazara del Vallo costituisce un unico corpo idrico significativo, caratterizzato dalla presenza di un acquifero multifalda impostato nelle arenarie e sabbie con intercalati livelli argilloso-limosi.

Il corpo idrico individuato nella Piana di Marsala–Mazara del Vallo (figura 76) è significativo per i seguenti fattori:

- estensione dei corpi idrici, il cui ammontare complessivo, in termini di risorsa media annua rinnovabile, è stimato in circa 88.548.720 m<sup>3</sup> (circa 22.910 l/s), risorsa rilevante per la Sicilia;
- elevato grado di permeabilità per porosità e secondariamente per fratturazione;
- presenza di una falda libera con elevato grado di vulnerabilità intrinseca;
- la risorsa idrica è utilizzata per l’approvvigionamento idropotabile di alcuni comuni della provincia di Trapani;
- la presenza di Zone di Protezione Speciale (ZPS) in corrispondenza dei margi di Capo Feto e Spanò e delle Sciare di Marsala e Mazara del Vallo.

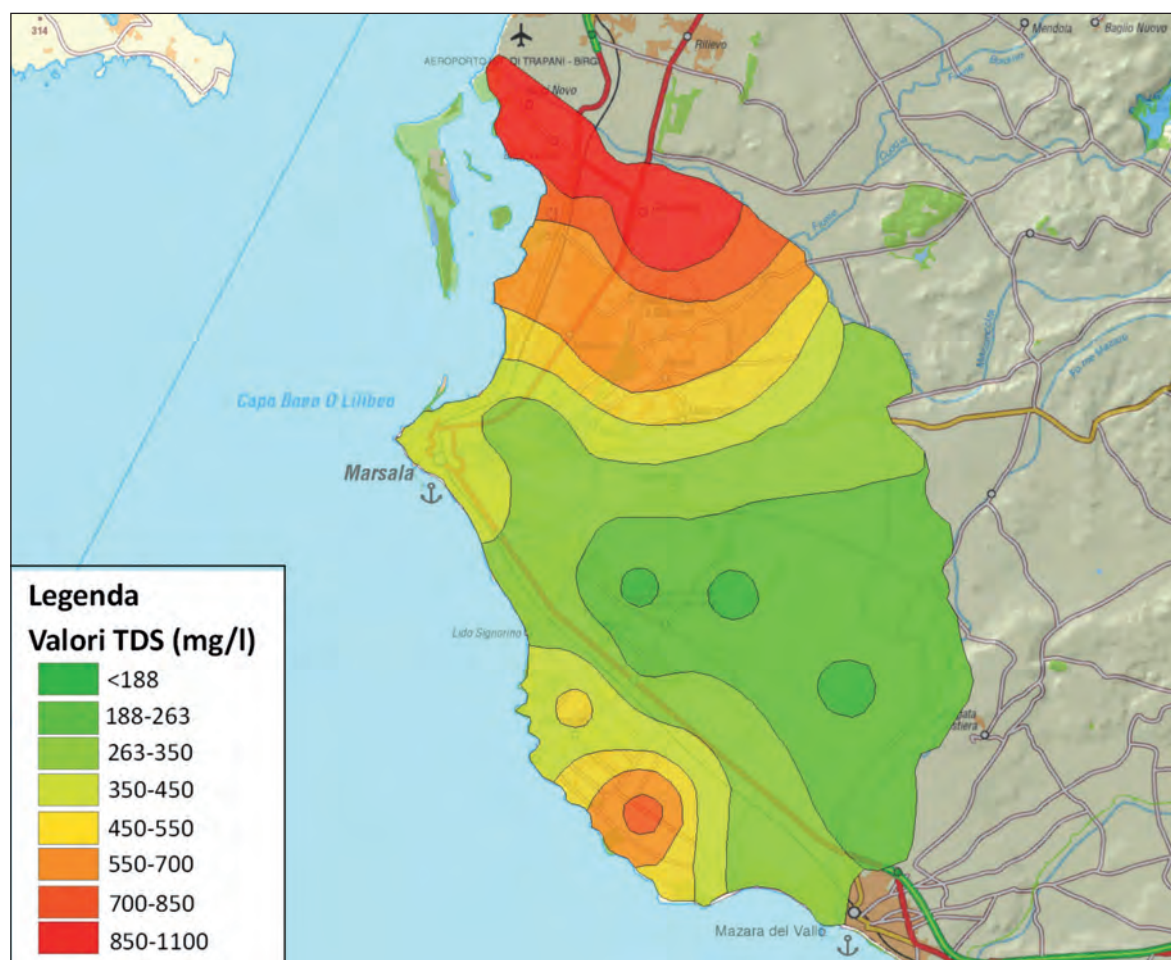
**Figura 76. Bacino idrogeologico della Piana di Marsala–Mazara del Vallo. In rosso i punti di monitoraggio acque sotterranee e con frecce blu le direttrici di flusso della falda (da Piano Tutela Acque Regionale).**



Quanto sopra esposto favorisce l'immagazzinamento di un'ingente risorsa idrica con buone caratteristiche qualitative; tuttavia, negli ultimi anni, l'elevato grado di antropizzazione dell'area, l'intensa attività agricola e il conseguente uso di pesticidi e fertilizzanti hanno reso maggiormente vulnerabile l'acquifero e alterato le caratteristiche chimico-fisiche delle acque della falda superficiale che talora è in comunicazione con la falda profonda in maniera naturale o artificiale tramite pozzi profondi. La realizzazione di una miriade di pozzi privati abusivi e pubblici ha intaccato non solo la ricarica, ma anche la riserva idrica sotterranea accumulata negli anni con il conseguente sovrasfruttamento dell'acquifero. Inoltre, nell'area dei margi Spanò e Capo Feto, a causa del loro parziale prosciugamento, e dell'intenso sovrasfruttamento della risorsa si verificano fenomeni di intrusione marina. Tutti i 27 punti campionati nella Piana di Marsala–Mazara del Vallo sono sufficienti a ben rappresentare il corpo idrico. Questi campioni sono stati analizzati per i parametri di base e gli elementi in tracce.

Sulla base dei punti di campionamento del monitoraggio derivante dal Piano di Tutela Acque Regionale, è stata redatta una cartografia inerente la spazializzazione dei livelli di Cloruri in falda (classi in mg/l con variazione annuale). Tale Spazializzazione è stata acquisita in formato vettoriale e trasformata in valori di TDS, tenendo conto del fattore di conversione medio di 0.4 ( $TDS = Cl(mg/l)/0.40$ ). I risultati sono visualizzati nella figura 77.

**Figura 77. Aree individuate come interessate dall'intrusione e corrispondenti livelli di TDS ricavati dai livelli di Cloruri.**



## *Area di Castelvetro*

### **Localizzazione geografica**

La piana costiera di Castelvetro-Campobello di Mazara, che si estende per circa 227 km<sup>2</sup> è limitata ad ovest dal F. Delia, ad est dal F. Modione, a nord dall'altopiano gessoso di Santa Ninfa e a Sud dal Canale di Sicilia. All'interno dell'area investigata i centri urbani più importanti sono: Castelvetro e Campobello di Mazara.

La piana costiera di Castelvetro-Campobello di Mazara ricade nei Fogli 265 e 257 e nelle seguenti tavolette a scala 1:25.000 della Carta d'Italia edite dall'I.G.M.I.: 265 I NE Valle Belice, 265 I NO Campobello di Mazara, 265 I SE Porto Palo, 265 I SO Selinunte, 265 IV NE Mazara del Vallo, 265 IV SE Torretta Granitola, 257 II SE Partanna, 257 IISO Castelvetro.

### **Aspetti geologici**

L'area in studio è caratterizzata da depositi marini quaternari (Calcareni di Marsala Auct.), costituiti da sabbie e ghiaie calcaree bioclastiche passanti lateralmente e verticalmente a calcareniti e calciruditi (Ruggieri et al., 1977, D'Angelo & Vernuccio, 1992,1994). I terreni su descritti ricoprono in discordanza la Fm. Marnoso-arenacea della Valle del Belice (Ruggieri et al., 1973, Vitale, 1990), costituita di una sequenza terrigena plio-quaternaria (arenarie e calcareniti con intercalazioni argillose). In profondità seguono, dopo i depositi pelagici calcilutitici marnosi del Pliocene inf. ("Trubi"), i terreni della successione evaporitica messiniana (calcarei evaporitici e gessi), poggiati in discordanza sui depositi conglomeratici e/o sabbiosi e argilloso-marnosi della Fm. Cozzo Terravecchia Auct. (Flores, 1959, Schmidt di Friedberg, 1962). I terreni sopra descritti sono ritagliati da spianate terrazzate marine quaternarie, talora con deposito (sabbie, ghiaie e calcareniti, spessore max.10 m), disposte in vari ordini fino a quote di circa 170 m s.l.m. (D'Angelo & Vernuccio, 1996, D'Angelo et al., 2001). Lungo le fasce costiere si rinvencono depositi palustri, dunari e, in prossimità dei principali corsi d'acqua, alluvioni talora terrazzate.

A seguito della tettonica messiniana e medio-pliocenica, i terreni depositatisi in precedenza sono stati piegati, generando nella Piana di Castelvetro-Campobello di Mazara una struttura sinclinalica con asse NE-SW ed immergente a SW. Infine, nei depositi calcarenitici quaternari, con giacitura suborizzontale, sono osservabili le evidenze tettoniche relative ad una fase, prevalentemente distensiva, che ha interessato i depositi post-tirreniani.

### **Morfologia del corpo idrico**

In funzione delle caratteristiche geologico-strutturali ed idrogeologiche nell'area investigata è stata riconosciuta un'unica idrostruttura denominata Unità idrogeologica della Piana di Castelvetro-Campobello di Mazara. Tale idrostruttura è limitata lateralmente da depositi argilloso-sabbiosi del Tortoniano, affioranti ad ovest lungo il F. Delia e ad Est dalle argille del Siciliano e dalla litofacies argillosa della Fm. Marnoso-arenacea. L'analisi delle stratigrafie di alcuni pozzi ESA e dei pozzi idropotabili (Pozzi Staglio e Bresciana) ha consentito di identificare un acquifero multifalda ospitato nelle sequenze calcarenitico argillose plio-pleistoceniche, il cui substrato coincide con il complesso idrogeologico argilloso-marnoso del Tortoniano.

L'acquifero multifalda è costituito da:

- una falda superficiale di tipo libero, impostata nella porzione calcarenitica superiore, la cui potenzialità ridotta è funzione dell'esiguo spessore del saturo (da 1m a circa 10-20 m).
- una falda profonda semiconfinata impostata nel complesso idrogeologico calcarenitico-marnoso.

Le sue potenzialità sono notevoli e nelle porzioni di maggiore spessore (150 m) presenta una elevata trasmissività media ( $5 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ .)

A sud del centro abitato di Campobello di Mazara, l'acquifero multifalda passa ad un acquifero a falda libera per l'assottigliamento degli acquitardi intercalati.

### **Regime della falda e flussi sotterranei**

Dall'indagine idrogeologica eseguita nel mese di novembre 1999 (Bonanno et al., 2000) della falda profonda è stato possibile ricostruire l'andamento della superficie piezometrica relativa alla falda semiconfinata profonda del complesso calcarenitico marnoso, che si raccorda, nella porzione meridionale della Piana, con quella relativa alla falda idrica di tipo libero. Dalla ricostruzione della piezometrica si evince che lo scarico idrico generale presenta, nella porzione settentrionale della piana, una direzione principale NE-SW verso Contrada Staglio dove è localizzato un campo pozzi gestito dall'Ente Acquedotti Siciliani.

Nella porzione meridionale della piana, il drenaggio avviene da nord verso sud, con due direzioni di flusso preferenziale dell'acquifero convergenti verso le zone di maggiore prelievo ubicate in Contrada Bresciana (campo pozzi Bresciana, gestito dal Comune di Campobello di Mazara). Perdite idriche sottomarine sono state osservate lungo il tratto di costa tra Torre Granitola e Tre Fontane.

Dal bilancio idrogeologico (Bonanno et al., 2000) si evince che anche l'acquifero, impostato nella Piana di Castelvetro-Campobello di Mazara, è soggetto ad un'intenso sovrasfruttamento poichè la ricarica media annua è inferiore ai prelievi del 15% con un deficit medio annuo pari a  $2.7 \times 10^6 \text{m}^3/\text{a}$ . Questa situazione è responsabile del graduale depauperamento delle riserve, che ha provocato un vistoso abbassamento del livello piezometrico e in alcuni casi ridotto la capacità produttiva dei pozzi. L'allarmante situazione di sovrasfruttamento in cui versa l'acquifero è stata confermata dal confronto tra la piezometria dell'autunno 1999 (Bonanno et al., 2000) e quella risultante dal rilevamento piezometrico effettuato nel 1981 (Casmèz, 1981), da cui si evince che in 19 anni il livello piezometrico della falda semiconfinata della Piana si è abbassato in media di circa 20 m.

Le zone in cui si registra un maggiore abbassamento sono quelle in corrispondenza del campo pozzi di Staglio e le aree site a NE rispetto all'abitato di Campobello di Mazara, probabilmente dovute alla presenza di forti prelievi e ad una minore trasmissività dell'acquifero. In corrispondenza del campo pozzi di C.da Bresciana, l'abbassamento della falda varia tra i 5 e i 10 m, in quanto la trasmissività e la ricarica della falda profonda sono tali da ridurre l'effetto dell'impatto dei forti prelievi per uso idropotabile sull'equilibrio idrodinamico del sistema di flusso sotterraneo. Nel settore costiero della piana, si osserva un abbassamento del livello piezometrico variabile da 5 a 25 m probabilmente dovuto alla presenza a nord del campo pozzi di C.da Bresciana, che intercettano a monte la falda (Bonanno et al., 2000).

La condizione di sovrasfruttamento dell'acquifero è stata confermata anche dai risultati di un modello di simulazione calibrato in regime transitorio, implementato con il

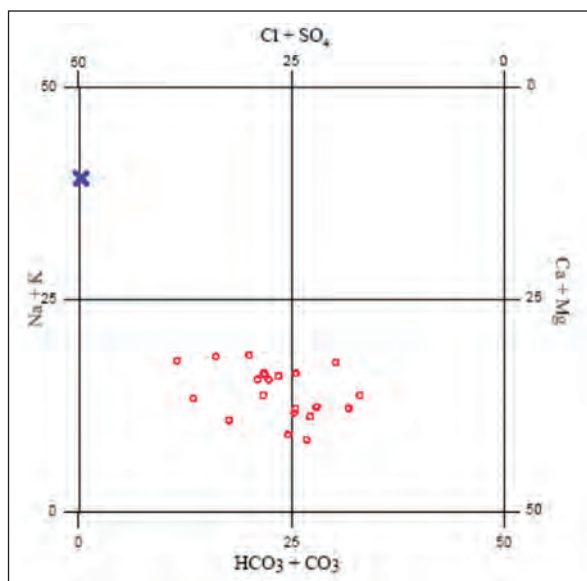
programma Processing Modflow (Ciabatti & Provenzano, 2003), da cui si evince che il sistema idrogeologico investigato, non essendo sensibile a variazioni di ricarica verticale e laterale, è ricaricato essenzialmente dalle acque di precipitazione meteorica che si infiltrano dall'alto. Dal modello di simulazione si evince che per sopperire al deficit idrico medio annuo pari a  $2.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  vengono intaccate le riserve idriche della falda profonda con conseguente depauperamento delle stesse.

Altri effetti connessi allo sfruttamento irrazionale della risorsa idrica sono il parziale prosciugamento di alcune aree umide site a Sud del F. Delia note come “Gorghetti Tondi e Lago di Preola” e l'avanzamento del cuneo di intrusione marina in alcune aree costiere. Dal punto di vista idrogeologico le aree umide, localmente note come “gorghetti”, rappresentano o hanno rappresentato zone di affioramento della superficie piezometrica. Questa condizione in passato ha avuto un ruolo fondamentale nel contenere e contrastare l'infiltrazione d'acqua salata in falda. Infatti, in tali aree l'abbassamento del livello piezometrico produce una riduzione del carico idraulico delle acque dolci con il conseguente parziale prosciugamento delle aree umide che non assolvono più l'importante funzione di ostacolare l'intrusione marina. Fenomeni di ingressione marina sono stati rilevati nelle zone limitrofe ai “Gorghetti Tondi e Lago di Preola” in uno studio idrogeologico e idrogeochimico di Hauser et al. 2002. Gli autori, dall'interpretazione del diagramma di Langelier-Ludwig, in cui è riportato il punto rappresentativo dell'acqua di mare, osservano un'evoluzione delle acque da clorurato-solfato alcalino terrose a clorurato-solfato alcaline. Un notevole allineamento fra il punto rappresentativo dell'acqua di mare e i punti dell'acqua di pozzi disposti fra i gorghetti e la costa si nota nel diagramma Na-Cl. Inoltre, anche l'andamento delle isopiezometriche mostra un cuneo di ingressione marina fra il Lago Preola e la costa, in cui si registrano valori di livelli piezometrici al disotto del livello del mare.

### Caratterizzazione idrogeochimica

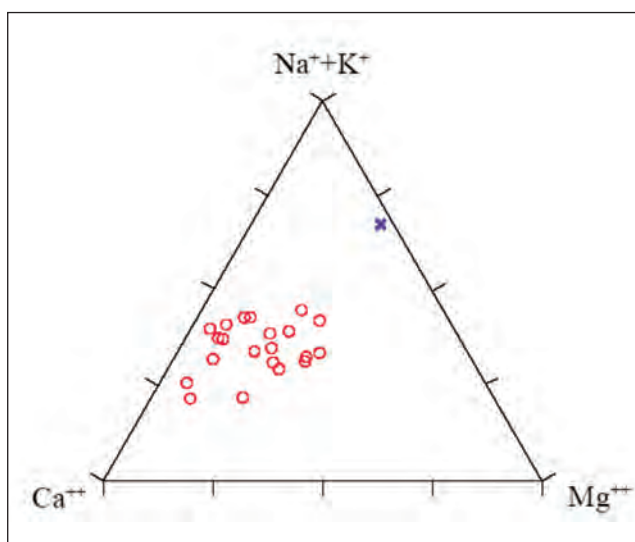
Nel diagramma classificativo di Langelier-Ludwig, i campioni ricadono tra le acque bicarbonato-alcalino terrose e quelle clorurato-solfato-alcalino terrose (figura 78).

**Figura 78. Diagramma classificativo Langelier-Ludwig del corpo idrico Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara.**

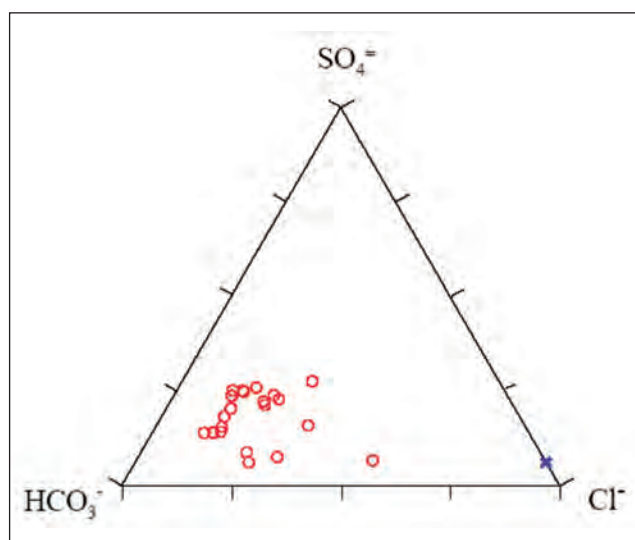


Tra i cationi le specie dominanti sono calcio e magnesio, come si evince dal diagramma ternario cationico (figura 79); nello stesso è possibile osservare che numerosi campioni hanno pari contenuto in calcio e magnesio. Tra gli anioni prevale lo ione bicarbonato, sebbene alcuni punti presentino un contenuto in cloro superiore al bicarbonato che deriva probabilmente dalla interazione con sali solubili della serie evaporitica (figura 80).

**Figura 79. Diagramma ternario Na+K – Ca – Mg del corpo idrico Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara.**



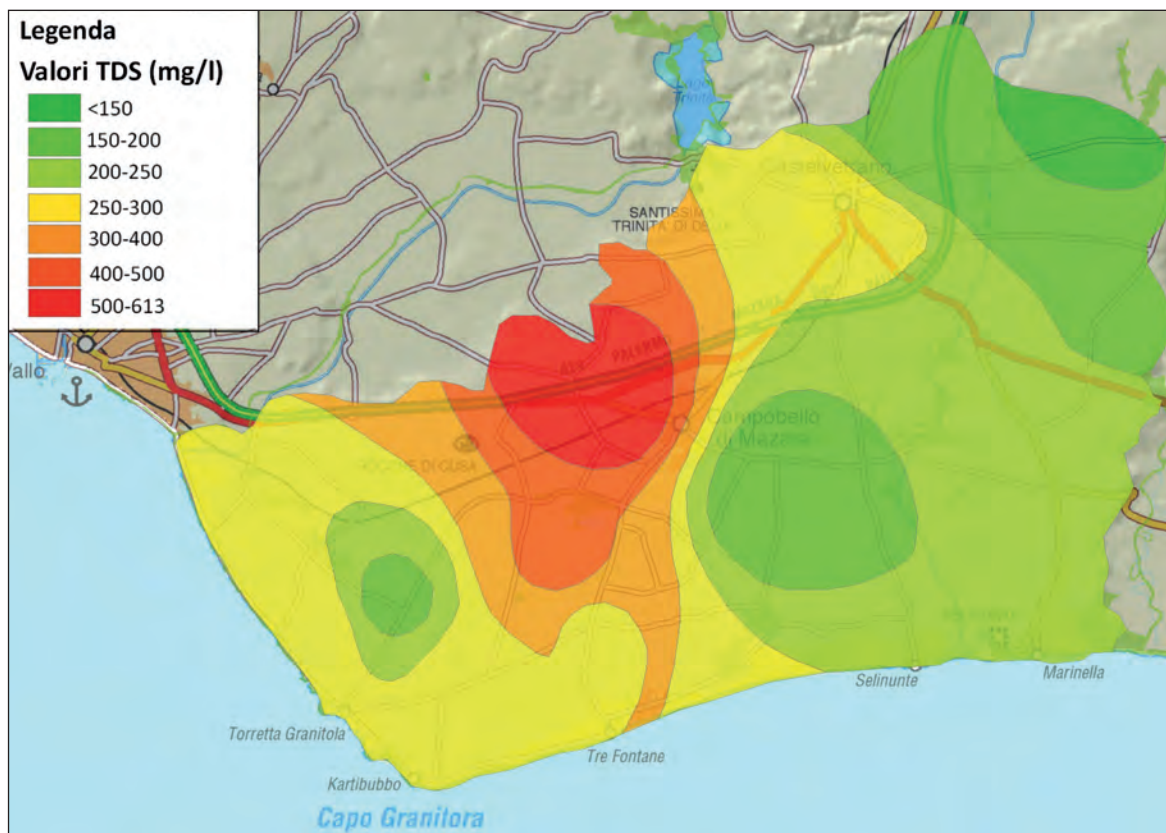
**Figura 80. Diagramma ternario SO4-HCO3-Cl del corpo idrico Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara.**



Sulla base dei punti di campionamento del monitoraggio derivante dal Piano di Tutela Acque Regionale, è stata redatta una cartografia inerente alla spazializzazione dei livelli di Cloruri in falda (classi in mg/l con variazione annuale). Tale Spazializzazione è stata acquisita in formato vettoriale e trasformata in valori di TDS, tenendo conto del fattore di conversione medio di 0.4 ( $TDS = Cl(mg/l)/0.40$ ). I risultati sono visualizzati nella figura 81.



Figura 81. Aree individuate come interessate dalla salinizzazione degli acquiferi e corrispondenti livelli di TDS ricavati dai livelli di Cloruri.



### *Piana di Augusta-Priolo*

La Piana di Priolo, nonostante faccia parte del bacino idrogeologico dei M.Iblei, ha una caratterizzazione molto particolare, in quanto, in quest'area è ubicato uno dei più grossi insediamenti petroliferi italiani; ciò comporta una serie di rischi per gli acquiferi che necessitano di un monitoraggio adeguato.

Nella Piana sono presenti più acquiferi che, per il loro assetto geologico, possono essere sovrapposti e a volte direttamente affioranti. Essi presentano una serie di problemi legati al sovrasfruttamento, infatti le sorgenti presenti nella zona hanno subito in questi ultimi anni drastiche riduzioni di portata e molte si sono prosciugate, molti pozzi superficiali sono stati abbandonati per abbassamento della piezometrica o per un aumento del contenuto salino delle acque.

La falda libera localizzata nei fondovalle alluvionali è alimentata dai corsi d'acqua o dagli acquiferi contigui ed è sfruttata da numerosi pozzi che in molti casi la mettono in comunicazione con quella sottostante (figura 82).

Figura 82. Particolare dell'acquifero alluvionale della Piana e dei punti di monitoraggio qualitativo (in rosso), in relazione con gli acquiferi circostanti (in blu le frecce di direzione di flusso di falda).



Le acque di questa falda, versano attualmente in un grave stato di inquinamento a causa della pressione antropica (industria, agricoltura, urbanizzazione). L'ingressione marina interessa l'acquifero con un ampio fronte di penetrazione. L'altro acquifero a falda libera, è costituito da calcareniti e sabbie ed è probabilmente alimentato per infiltrazione primaria. Risulta sfruttato da numerosi pozzi che, anche in questo caso, lo mettono in comunicazione diretta con l'acquifero sottostante. Fino ad una trentina di anni fa i prelievi dalla falda avvenivano per mezzo di un gran numero di pozzi scavati a mano ed utilizzati a scopo irriguo e/o domestico. Con l'instaurarsi del polo industriale di Priolo-Augusta molti terreni agricoli sono stati convertiti ad uso industriale, soprattutto nella zona di Priolo, dove sono state realizzate perforazioni profonde, che pur prelevando dall'acquifero carbonatico profondo, originariamente in pressione, hanno drenato anche la falda più superficiale, per la mancanza di un adeguato condizionamento dei pozzi. Analoga situazione si è determinata nel settore di Siracusa sia per l'estendersi delle colture irrigue, che per gli aumentati fabbisogni idropotabili. L'acquifero più importante è quello profondo che può essere, a seconda dei luoghi a falda libera o

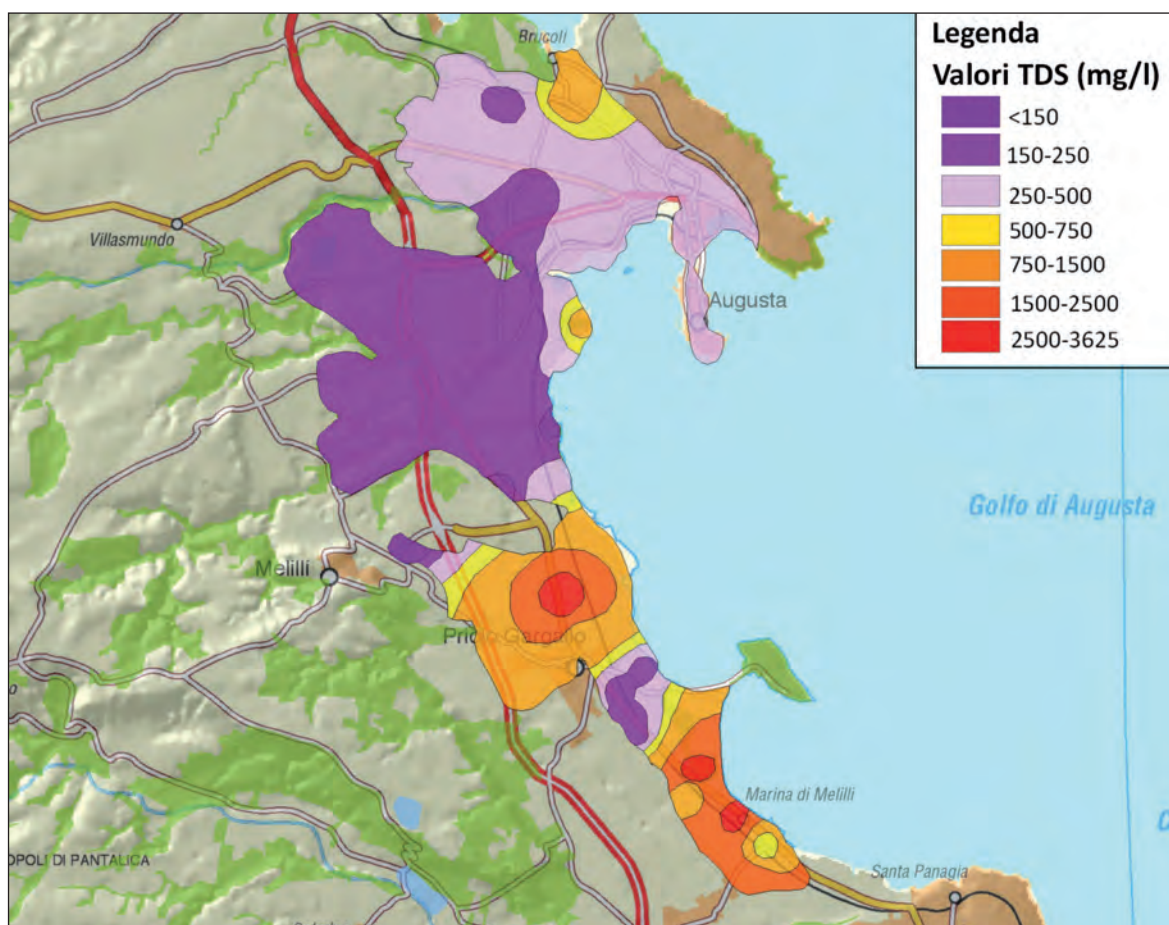
in pressione; esso è costituito da rocce carbonatiche e/o calcareo-calcarenitiche ed è alimentato dall'infiltrazione locale. Questo corpo idrico è stato considerato significativo per i seguenti motivi:

- elevato grado di vulnerabilità per la presenza di una falda libera impostata in terreni molto permeabili per porosità; -possibilità di contaminazione della falda profonda attraverso i pozzi;
- presenza di numerosi centri di pericolo (insediamenti petroliferi) che alterano la qualità delle acque;
- presenza di Zone di Protezione Speciale (ZPS), in corrispondenza delle Saline di Priolo.

Dato l'elevato grado di antropizzazione essenzialmente legato alla presenza di raffinerie petrolifere in questa area sono stati campionati 31 punti d'acqua in cui sono state eseguite le analisi sia dei parametri di base, sia di quelli addizionali completi.

Sulla base dei punti di campionamento del monitoraggio, derivante dal Piano di Tutela Acque Regionale, è stata redatta una cartografia inerente alla spazializzazione dei livelli di Cloruri in falda (classi in mg/l con variazione annuale). Tale spazializzazione è stata acquisita in formato vettoriale e trasformata in valori di TDS, tenendo conto del fattore di conversione medio di 0.4 ( $TDS = Cl(mg/l)/0.40$ ). I risultati sono visualizzati nella figura 83.

**Figura 83. Aree individuate come interessate dalla salinizzazione degli acquiferi e corrispondenti livelli di TDS ricavati dai livelli di Cloruri**



## Piana di Catania

### Caratteristiche idrogeologiche e idrochimiche

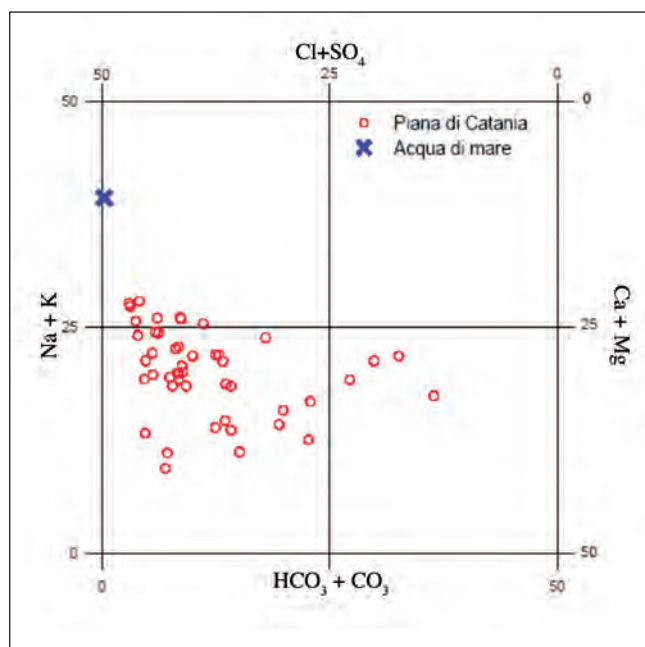
L'acquifero principale è costituito sia dalle alluvioni e sabbie dunari recenti, sia dalle sabbie e ghiaie del Siciliano. Le perforazioni eseguite mostrano in particolare che questi livelli sono molto permeabili e che contengono una falda artesianiana. La loro alimentazione, oltre alle precipitazioni locali, proviene dai fiumi che incidono la Piana e dai torrenti recenti o antichi (letti fossili) che discendono dalle colline limitrofe.

Dai dati stratigrafici di numerosi pozzi, parte dei quali raggiungono il substrato argilloso impermeabile, e da quelli derivanti da indagini geofisiche (Breusse & Huot, 1954; CMP, 1982) si evidenzia una morfologia del tetto del substrato impermeabile caratterizzata da diverse depressioni orientate grosso modo Ovest-Est, che condizionano la circolazione idrica sotterranea. Situazioni più favorevoli relativamente a spessore, permeabilità e trasmissività dell'acquifero si hanno nella zona Nord-orientale della pianura, dove si concentrano infatti i pozzi con maggiore produttività.

### Caratterizzazione idrogeochimica

Le acque del bacino sono classificabili nella quasi totalità come clorurato-solfatoalcalino terrose. Alcuni campioni ricadono nel campo delle acque bicarbonatoalcalino terrose e clorurato-solfato-alcaline (figura 84). La loro caratterizzazione riflette i litotipi che le acque di falda attraversano nel loro percorso.

Figura 84. Diagramma classificativo di Langelier-Ludwig per il corpo idrico Piana di Catania



I diagrammi triangolari anionico e cationico (figure 85 e 86) mettono in risalto la predominanza rispettivamente di cloro ed alcali, ma, appare probabile che il miscelamento delle acque di falda con acqua di mare per fenomeni di ingressione marina non sia l'unico meccanismo di mineralizzazione delle acque della zona.

Figura 85. Diagramma ternario Ca-Mg-Na+K per il corpo idrico Piana di Catania

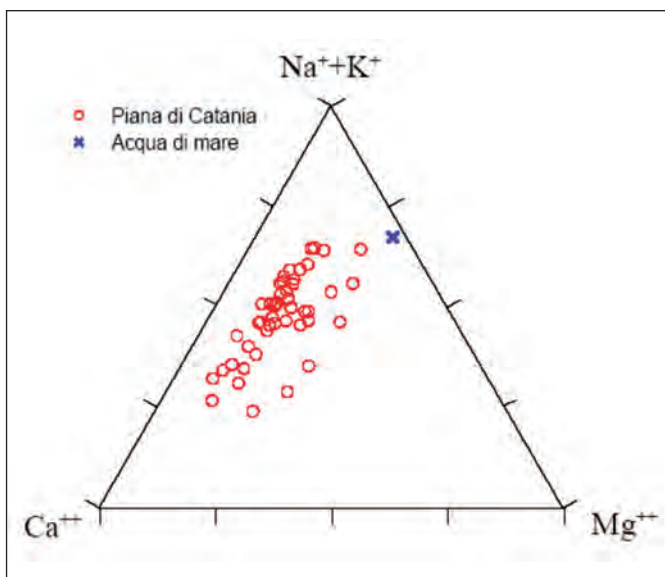
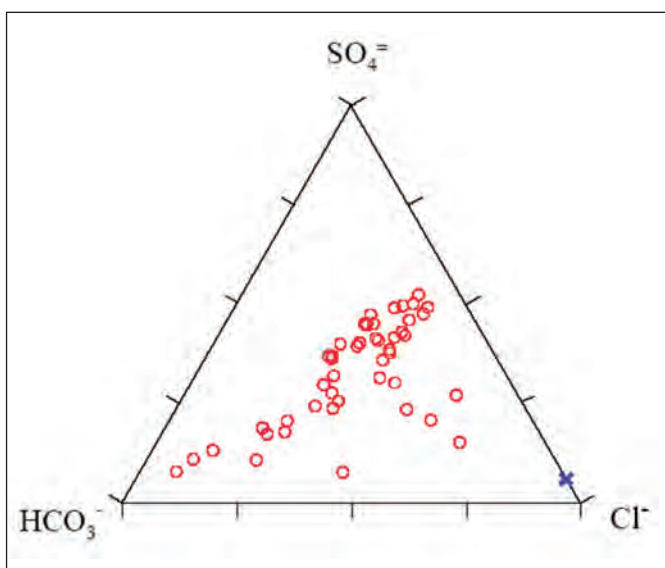


Figura 86. Diagramma ternario Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> per il corpo idrico Piana di Catania



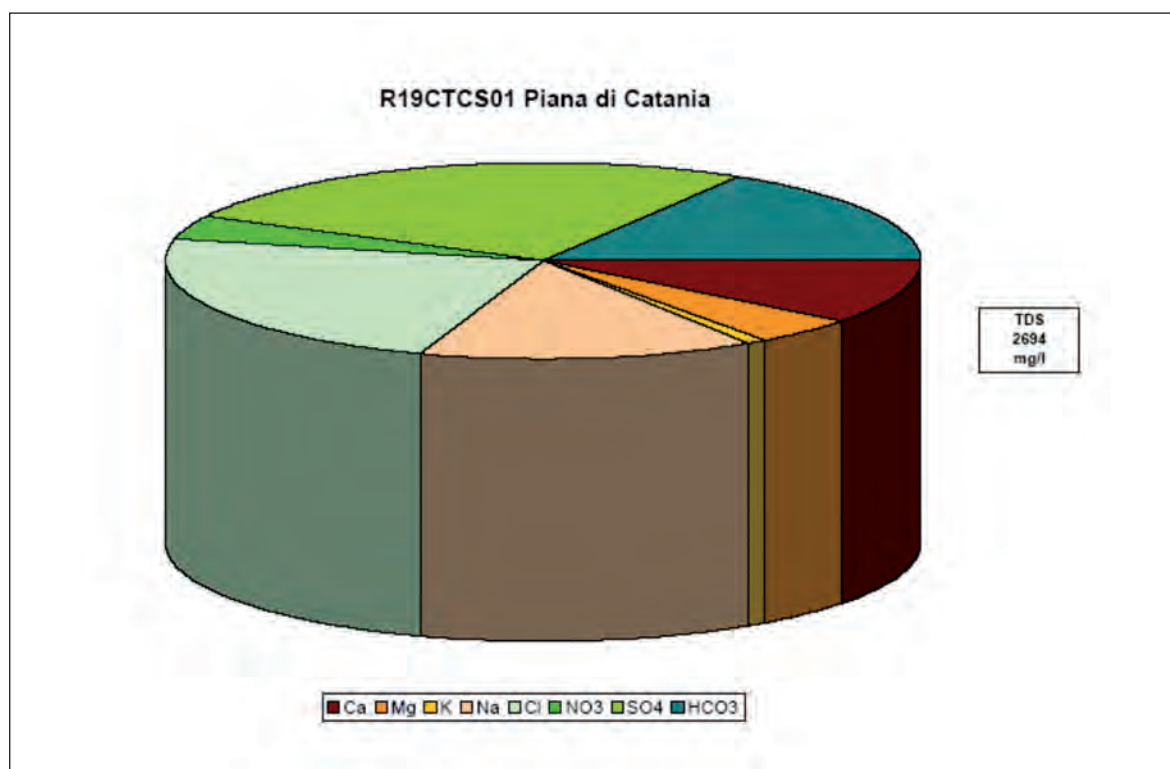
I grafici, infatti, mostrano che quasi tutti i punti tendono verso rapporti che non sono specifici dell'acqua di mare ma che potrebbero essere legati sia all'uso di concimi chimici ricchi in solfati e potassio che a fenomeni di scambio ionico con le rocce dell'acquifero.

In alcuni punti di campionamento si segnala la presenza di concentrazioni elevate di inquinanti inorganici (al di sopra dei limiti fissati dal D.Lgs 152/99). Si registrano, infatti, valori superiori al limite del boro, nichel, nitriti e selenio nel campione D'Agati; del fluoro nel campione Sferro, del nichel nel campione Messina 2, del boro e nitriti del campione Gelso, del boro e del nichel nel campione Bernardello e del boro nel campione Zoo (campioni riferiti al monitoraggio effettuato nell'ambito del Piano di Tutela Acque Regionale).

## Qualità delle acque del corpo idrico

Il diagramma a torta riportato in figura 87. è relativo alla composizione chimica media del corpo idrico. Esso mostra un valore di salinità abbastanza elevato ed una preponderanza di cloruro e solfato rispetto al bicarbonato e di sodio rispetto a calcio e magnesio. La composizione media del corpo idrico risulta per quasi tutti i parametri al di sopra dei valori massimi ammissibili secondo il D. Lgs. n. 31/2001 All.1. , sottolineando la cattiva qualità delle acque della falda.

**Figura 87. Diagramma a torta mostrante le composizioni percentuali delle specie ioniche dei costituenti maggiori presenti nel corpo idrico.\***



\* È stata aggiunta la percentuale dei nitrati allo scopo di avere una relazione visibile tra specie inorganiche e specie più direttamente correlabili alla qualità del corpo idrico. Lo spessore del diagramma è proporzionale alla salinità dell'acqua (da Piano di Tutela Acque Regionale).

## Qualità delle acque a scopo irriguo

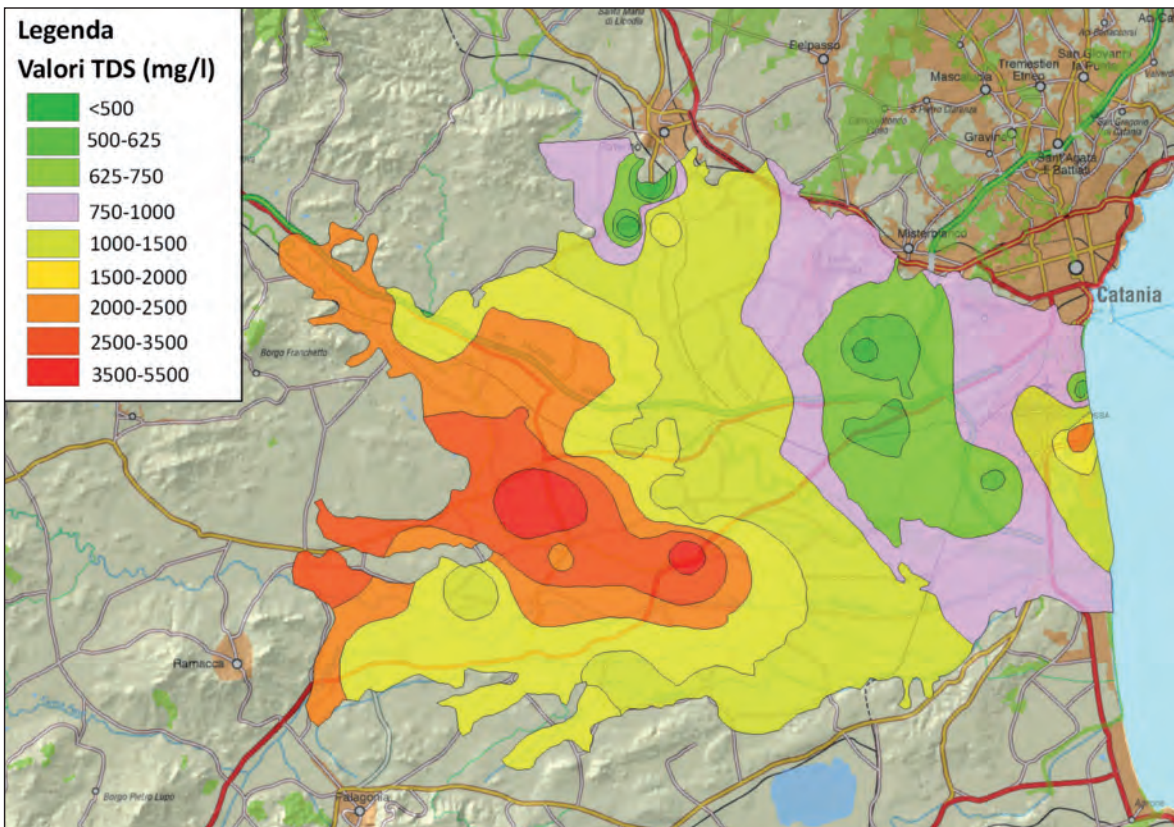
Le acque del corpo idrico della Piana di Catania, secondo il diagramma di Wilcox ricadono nel quadrante C4-S2, cioè sono classificabili come acque a medio contenuto in sodio utilizzabili per l'irrigazione in suoli con una buona permeabilità ed acque a salinità molto alta che non possono essere utilizzate come tali a scopo irriguo.

Sulla base dei punti di campionamento del monitoraggio (figura 88) derivante dal Piano di Tutela Acque Regionale, è stata redatta una cartografia inerente alla spazializzazione dei livelli di Cloruri in falda (classi in mg/l con variazione annuale). Tale Spazializzazione è stata acquisita in formato vettoriale e trasformata in valori di TDS, tenendo conto del fattore di conversione medio di 0.4 ( $TDS = Cl(mg/l)/0.40$ ). I risultati sono visualizzati nella figura 89.

Figura 88. Estratto della Cartografia dei punti di monitoraggio qualitativo (in rosso) degli acquiferi alluvionali della Piana di Catania; in blu le linee di flusso dell'aquifero (da Piano di Tutela Acque Regionale).



Figura 89. Aree individuate come interessate dalla salinizzazione degli acquiferi e corrispondenti livelli di TDS ricavati dai livelli di Cloruri.

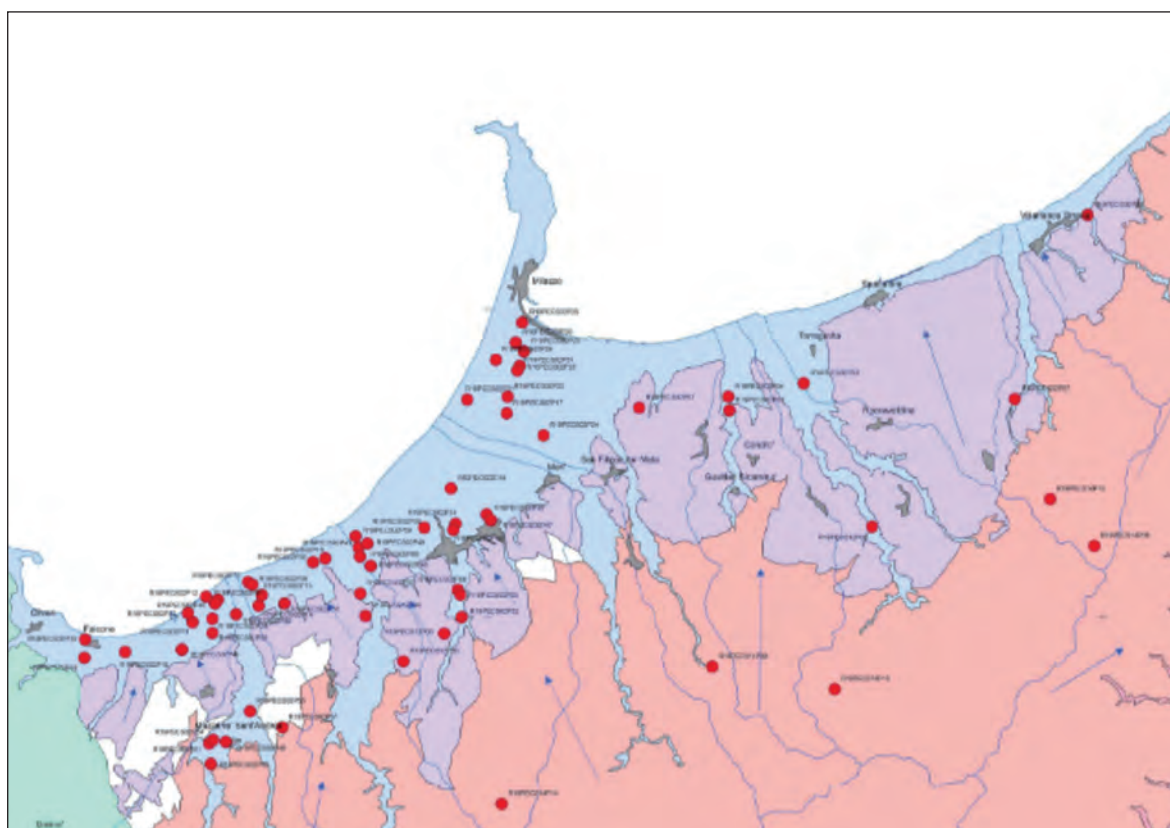


### *Piana di Milazzo – Barcellona di Sicilia*

La Piana di Barcellona Pozzo di Gotto-Milazzo è un corpo idrico del bacino idrogeologico dei Peloritani ma necessita di una trattazione a parte in quanto oltre ad essere un corpo idrico di grande potenzialità, è sede di una serie di pressioni antropiche che vanno dagli insediamenti industriali, all'agricoltura intensiva, alla presenza di centri urbani, per cui necessita un'attenzione particolare.

Nella Piana di Milazzo sono stati eseguiti con il Piano di Tutela Acque Regionale i campionamenti del 2° monitoraggio come riportato in figura 90.

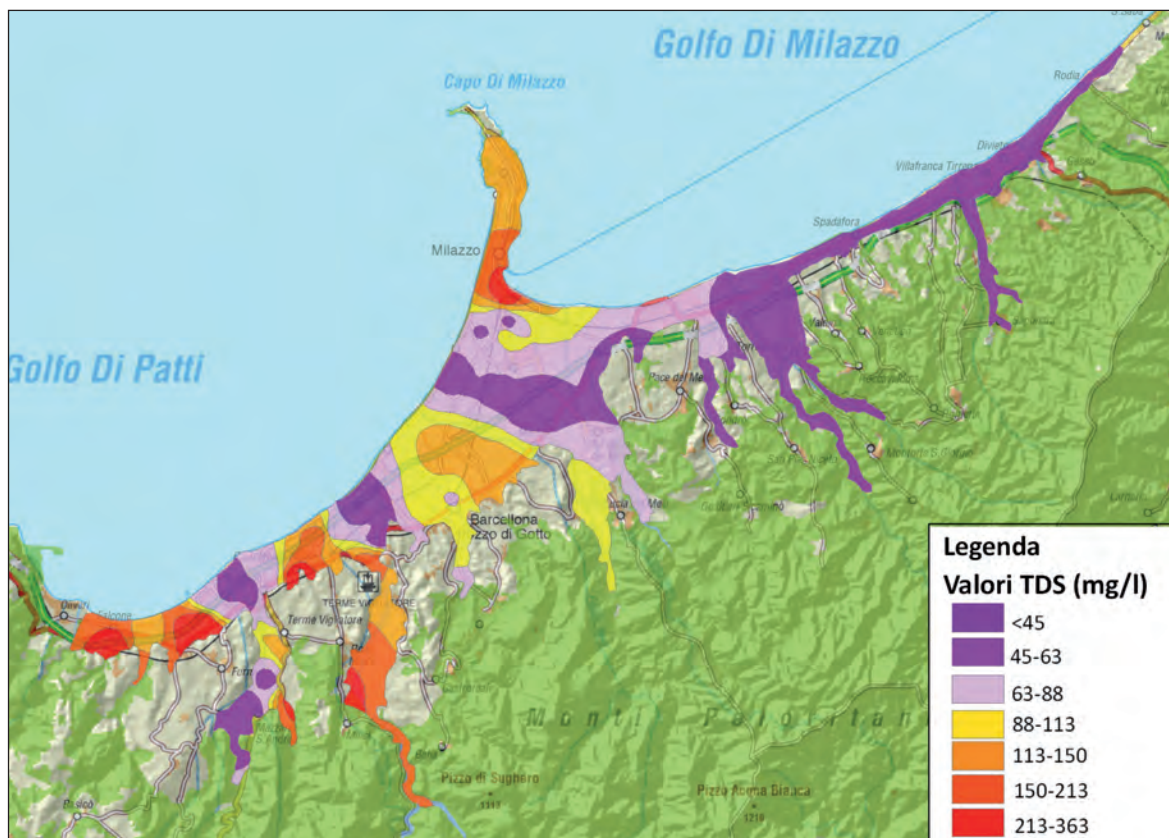
**Figura 90. Estratto da Piano di tutela Acque Regionale della Cartografia del Bacino Idrogeologico dei Peloritani con punti di monitoraggio (in rosso) e linee di flusso degli acquiferi principali (in blu).**



Sulla base dei risultati analitici derivanti dal monitoraggio effettuato dal Piano di Tutela Acque Regionale, è stata redatta una cartografia inerente la spazializzazione dei livelli di Cloruri in falda (classi in mg/l con variazione annuale). Tale Spazializzazione è stata acquisita in formato vettoriale e trasformata in valori di TDS, tenendo conto del fattore di conversione medio di 0.4 ( $TDS = Cl(mg/l)/0.40$ ). I risultati sono visualizzati nella figura 91.



Figura 91. Aree individuate come interessate dalla salinizzazione degli acquiferi e corrispondenti livelli di TDS ricavati dai livelli di Cloruri.





## **POSSIBILITÀ DI INTERVENTI PER LA MITIGAZIONE DEI FENOMENI DI INTRUSIONE MARINA NELLE REGIONI MERIDIONALI**

Diverse sono le soluzioni adottate per controllare il fragile equilibrio fra le acque dolci, le salmastre e quelle del mare, che si introducono attualmente nei mezzi porosi, fratturati e carsici, richiamate dalla depressione della piezometrica prodotta dai pompaggi, o rimastevi intrappolate in varia epoca per il variare del livello del mare dovuto ai cambiamenti climatici o a subsidenza. I limiti della zona di interfaccia sono variabili e strettamente dipendenti dai processi in atto nell'ecosistema, cosicché essi non possono essere semplicemente definiti solo sulla base delle caratteristiche del paesaggio e degli impatti visivi.

E' fondamentale che le cause e i differenti meccanismi di salinazione siano ben chiariti per una razionale gestione degli acquiferi costieri, per quanto attiene sia le modalità di captazione e uso delle risorse sia gli interventi di ripristino degli acquiferi degradati.

Il problema è particolarmente serio nelle aree fragili con limitate risorse come le isole e le regioni transfrontaliere, per le quali non si devono considerare solo i limiti amministrativi ma anzitutto quelli del bacino idrogeologico e dei bacini di utenza della risorsa, spesso esterni al bacino idrogeologico. Esso è spesso sottovalutato se non trascurato, e ciò diviene causa ineluttabile di costi economici e infine di compromissione e perdita di risorse ambientali.

L'eccessiva urbanizzazione, gli insediamenti turistici e industriali e le pratiche di agricoltura intensiva possono produrre nelle aree costiere degrado delle acque e dei suoli per salinazione e inquinamento. La limitata disponibilità delle risorse idriche si manifesta soprattutto nei periodi di punta dei mesi estivi, quando maggiore è la domanda mentre gli afflussi meteorici sono nulli o del tutto trascurabili.

### **5.1 Procedura d'intervento**

Secondo la procedura italiana diffusa in ambito accademico idrogeologico, di recente adottata anche dall'UNESCO per il progetto MED-PLAN che riguarda le acque costiere dei paesi mediterranei extra UE, sono previste le seguenti fasi:

- definizione delle caratteristiche geologiche, strutturali, morfologiche, pedologiche, idrologiche e microclimatiche dell'area d'interesse del bacino idrogeologico;
- identificazione degli *stakeholders* e dei vincoli esistenti;
- rilievo idrogeologico per la determinazione dei parametri geometrici, idraulici e idrochimici del sistema acquifero, con costituzione di una rete di osservazione di pozzi censiti indispensabile per il monitoraggio automatico continuo o manuale periodico dei dati piezometrici, con i quali costruire le isoidropse, e di salinità, temperatura e pH, rappresentabili con le relative isolinee. I primi rilievi permet-

teranno di definire le aree d'interesse prioritario per condurvi indagini più approfondite, con logging geoelettrici, di t°, pH, e radioattivi, campionamenti per indagini idrochimiche ed isotopiche, e prove di portata. Tutti i dati devono essere georeferenziati e raccolti in banche dati relazionali;

- elaborazione delle carte di vulnerabilità intrinseca alla contaminazione salina ed all'inquinamento diffuso e puntuale, processi che spesso coesistono e possono modificare le caratteristiche idrauliche dei terreni acquiferi e dei suoli. Si sono sperimentati i metodi di rappresentazione e valutazione della vulnerabilità SINTAX-5 e GALDIT e si sta mettendo a punto un metodo integrato che permetta di considerare gli effetti di entrambi i processi e quindi di valutare la vulnerabilità integrata, per la quale si tenga conto della vulnerabilità intrinseca e di tutte le fonti possibili di intrusione salina e di inquinamento. La vulnerabilità intrinseca e l'integrata devono essere rappresentate su GIS, cosicché ne è possibile il continuo aggiornamento con i dati del monitoraggio;
- valutazione del rischio, fatta sulla base della vulnerabilità integrata, considerando i danni possibili, in termini di degrado alle risorse idriche e alle colture e alla perdita di valore dei terreni contaminati e delle relative infrastrutture di impianti non ammortizzati;
- modellazione e rappresentazione dei diversi scenari che permettano di prevedere e rappresentare in scala opportuna i possibili scenari di evoluzione dei processi di contaminazione e di inquinamento. I modelli dovranno essere validati e tarati perché le loro previsioni siano per quanto possibile realistiche.
- gli scenari dei modelli di gestione saranno utilizzati per la pianificazione degli interventi a breve e medio termine, tenendo conto delle esigenze di tutti gli *stakeholders* e dei vari vincoli.

È evidente che, stabilita la disponibilità della risorsa di acque sotterranee di una certa qualità, se ne deve pianificare l'uso in funzione delle effettive necessità presenti e future. Se i fabbisogni sono maggiori delle risorse effettivamente disponibili, queste devono essere integrate facendo ricorso a risorse alternative, superficiali o sotterranee di altra origine, così da disporre di una qualità standard adeguata alla richiesta. Considerati gli andamenti dei costi energetici, il ricorso alla dissalazione per usi irrigui comporta oneri elevati ed imprevedibili per il futuro anche immediato. In un contesto di mercato globale, gli impianti di dissalazione, e l'attrezzamento di aree agricole per le colture irrigue che da essi dovrebbero essere approvvigionate, comportano investimenti ad alto rischio, difficilmente sostenibili per gli operatori agricoli. Oltretutto in Italia gli impianti di dissalazione sono osteggiati anche per ragioni ambientali, come l'impatto che le acque di scarico, di cresciuta salinità, avrebbero sugli ecosistemi marini.

Considerato il frazionamento delle proprietà, i criteri di gestione e gli interventi strutturali ed infrastrutturali delle aree di interesse suscettive di miglioramento per uno sviluppo sostenibile devono essere adottati a livello consortile. Se la gestione delle acque superficiali per gli usi irrigui sembra agevole, anche se con le dovute eccezioni, più complessa è la gestione delle acque sotterranee. Queste, come le superficiali, appartengono al demanio che le dà in concessione ad enti pubblici e a privati per limiti di portate edotte in genere poco rispettati; sfuggono al controllo le migliaia di pozzi non censiti, scavati e trivellati anche a grandi profondità da privati senza autorizzazione. Ne deriva che lo sfruttamento delle acque sotterranee è stato selvaggio e smodato e le forti depressioni delle piezometriche sono state le cause scatenanti dei processi di intrusione salina di vario tipo.

È evidente che nessun tentativo di razionalizzazione del comparto può avere successo se non attraverso il coinvolgimento di tutti gli interessati.

Come primo passo, definite le caratteristiche attuali dell'area di interesse e quantificate le risorse e le riserve idriche disponibili in termini di qualità per i diversi possibili usi, si devono incentivare le colture che al momento risultino più adatte, considerando non solo i costi di produzione ma anche il loro possibile mercato.

Ipotizzato quindi un piano di utilizzo delle risorse idriche integrate, superficiali e sotterranee, si tratta di decidere a quali fare ricorso. E' evidente che il problema dell'intrusione salina non sussisterebbe se vi fosse piena disponibilità di acque superficiali per soddisfare i fabbisogni. Oltretutto l'irrigazione rappresenta un intervento di ricarica artificiale diffusa, che, accompagnata da sistemi di drenaggio opportunamente realizzati, garantisce per quanto possibile la lisciviazione dei terreni salsi.

Nelle aree vulnerabili dove l'irrigazione è soprattutto, o in parte, effettuata ricorrendo alle acque sotterranee, è necessario iniziare a disciplinare le eduzioni informando bene gli interessati dei pericoli e dei rischi che può comportare il mancato rispetto delle prescrizioni. Si deve poi attivare da subito il monitoraggio delle acque e dei suoli per definire l'evolversi di eventuali processi di degrado. E' possibile che il monitoraggio metta in evidenza che nei periodi di ricarica vi è un esubero di risorse idriche sotterranee. Si deve allora stabilire se le acque in esubero, al momento non necessarie per l'irrigazione, anziché essere lasciate defluire a mare inutilizzate, non possano essere pompate e stoccate per l'uso futuro in serbatoi (grandi laghi e laghi collinari) esistenti o da costruire.

Si devono poi studiare le possibilità d'impiego per l'irrigazione di acque reflue rilasciate da impianti di trattamento di vicini insediamenti civili e industriali.

Stabilito sperimentalmente, in condizioni di esercizio, il modo di evolversi dei processi di salinazione, si può decidere se ricorrere ad altri interventi che modifichino i rapporti di interfaccia fra le acque di diversa salinità.

Si ritiene che sia decisamente da escludere la creazione di barriere fisiche come diaframmi e veli di cementazione. Si è visto che esse, quando siano efficaci, interrompendo in modo irreversibile il deflusso naturale a mare delle acque sotterranee, determinano a monte l'accumulo crescente di sostanze inquinanti delle acque e del suolo, che così subiscono un definitivo degrado. Oltretutto le barriere fisiche sono molto costose.

Alla fine degli anni '80 il Dipartimento di Ingegneria del Territorio dell'Università di Cagliari fece nella piana di Muravera degli esperimenti di barriera geoelettrica per contrastare l'intrusione salina e proteggere la qualità delle risorse idriche sotterranee. Questa barriera, prima sperimentata con successo su modello fisico in laboratorio, fu costituita nel terreno disponendo una serie di elettrodi energizzati con corrente alternata secondo un allineamento parallelo ad una delle derivazioni del delta per il quale entra acqua di mare per mancanza di deflusso di acqua dolce. Tutti gli esperimenti, eseguiti mentre si pompava in continuazione in condizioni di equilibrio stabile, indicarono un sensibile decremento del TDS in tutta l'area in osservazione fino ad un massimo del 22,2% misurato a valle della barriera nel pozzo più vicino (Barbieri et al., 1990). Gli esperimenti non ebbero seguito per disinteresse degli organismi preposti.

Perché sia efficace nel tempo, la barriera geoelettrica deve essere mantenuta con continuo funzionamento delle apparecchiature e quindi, pur essendo di grande interesse scientifico, è di limitato interesse pratico.

Il metodo classico e ben collaudato per il controllo dell'intrusione salina negli ac-

quiferi costieri e per gli interventi di risanamento è la ricarica artificiale, non tanto per rimpinguare un serbatoio dove i prelievi superino gli afflussi, come avviene lontano dal mare, ma per costituire una barriera idrodinamica di ricarica, eventualmente accoppiata con una barriera di depressione, così da modificare l'equilibrio idrodinamico dell'interfaccia. In tal modo si possono estrarre le acque sotterranee salate, si impedisce il richiamo d'acqua dal mare o dai livelli profondi dell'acquifero, e si favorisce a monte l'accumulo di acque dolci defluenti dal sottosuolo dell'entroterra, così da stabilizzare la qualità della risorsa disponibile.

La possibilità di realizzare una barriera idrodinamica è stata verificata con prove di pompaggio e di ricarica artificiale nel sistema acquifero di Capoterra. Le prove di ricarica sull'acquifero freatico sono state eseguite in un trincerone appositamente scavato, quelle sull'acquifero confinato sottostante con dei pozzi trivellati. Le variazioni di livello idrodinamico di entrambi gli acquiferi sono state registrate in pozzi di osservazione. Non essendo disponibili di altre acque, per la ricarica si sono usate le acque trattate rilasciate a mare dall'impianto di trattamento dei reflui industriali del Consorzio per l'Area di Sviluppo Industriale di Cagliari (CASIC). È stato così possibile valutare gli effetti degli interventi di ricarica, risultati efficaci, e validare il modello matematico sviluppato per i processi di flusso e trasporto.

Si è constatato che la qualità delle acque reflue trattate era adatta e non ha determinato deterioramento delle acque sotterranee. Esperimenti positivi di ricarica artificiale sono stati effettuati sotto la guida del Prof. A. Aureli anche in Sicilia, nell'acquifero di Priolo Augusta, per ostacolare l'intrusione marina nell'area prodotta dai forti emungimenti effettuati con pozzi profondi nell'area industriale. In Puglia, infine, si è sperimentata con successo la captazione di copiose sorgenti sottomarine. Le acque salmastre così captate sono state dolcificate miscelandole con acque superficiali. Le opere di captazione sottomarine, esposte ad usura, comportano continui controlli e manutenzioni onerose eseguite da sommozzatori specializzati, ed infatti sono state lasciate decadere.

## LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI SALINIZZAZIONE NEI SUOLI

### 6.1 Finalità dello studio

Il fenomeno della salinizzazione in aree costiere dovuto a utilizzo di acque saline o parzialmente saline derivanti da intrusione salina marina è sicuramente un fenomeno importante dal punto di vista della sua entità ed estensione geografica nelle Regioni Meridionali. In particolare le regioni Puglia, Sicilia e Sardegna (e subordinatamente Basilicata) sono affette da questo problema in maniera estensiva e sicuramente di grande impatto sulla gestione della agricoltura irrigua di grandi porzioni del loro territorio. In questo contesto il problema non è stato valutato nelle regioni Campania e Calabria sia per mancanza di dati sufficienti, sia per la ridotta estensione del fenomeno in relazione alle scale di riconoscimento e di riferimento di questo studio. Le Regioni Abruzzo e Molise non sono state considerate a causa della totale assenza del problema.

È stato, quindi, ritenuto opportuno di avviare una indagine in queste aree finalizzata alla comprensione di scenari di evoluzione del fenomeno in un arco temporale medio-lungo, compatibile con i meccanismi di accumulo dei sali nei suoli utilizzati dall'agricoltura irrigua, dove vengono utilizzate attualmente acque considerate "saline". Le metodologie di valutazione territoriale adottate hanno cercato di determinare, quindi, non solo lo stato attuale, ma anche gli effetti che il "rischio" di salinizzazione del territorio a lungo termine potrebbe apportare in termini di perdita di aree coltivabili con colture irrigue, continuando a mantenere una gestione irrigua ed un assetto colturale come l'attuale.

Per fare ciò sono state utilizzate le basi dati già realizzate e messe a punto per il calcolo dei fabbisogni irrigui di tipo pedologico, colturale e di tecniche irrigue prevalenti, i dati climatici, in aree in cui si utilizzano acque irrigue saline o parzialmente saline. Il metodo di valutazione per "scenario" è stato gestito con un modello puntuale di calcolo dinamico su base giornaliera che ha fornito dati di "previsione" di accumulo di Sali nel suolo, opportunamente rapportato alla geografia delle aree interessate dal problema; tale valutazione ha preso in considerazione tutta la casistica di variabilità suolo-clima-coltura-tecnica irrigua presente nelle aree oggetto di studio.

La finalità dello studio è quella di fornire uno strumento conoscitivo su base geografica, utile alla conoscenza della evoluzione di questo fenomeno in relazione a possibili scenari di degradazione del territorio e perdita di aree potenzialmente irrigue per le varie colture. Tali risultati possono essere fondamentali per orientare in maniera corretta una pianificazione di un eventuale potenziamento e/o espansione delle aree irrigue, distinguendo i territori a rischio e valutando anche gli effetti di modifiche di gestione sul medio-lungo termine.

Lo studio si è basato solo sulla valutazione territoriale del rischio di salinizzazione; si rimanda a studi successivi anche il maggiore impatto economico in termini di gestione delle reti di distribuzione, in caso di utilizzo di acque salmastre o saline, per i conseguenti effetti di corrosione e degradazione a carico delle strutture. È noto che già attualmente in molte aree meridionali (es. Puglia e Sicilia) l'utilizzo di acque ad alto tenore di Sali com-

porta un costo economico notevole di rinnovo degli impianti (tubazioni, raccordi, valvole, pompe, etc.) a causa dei tempi di degradazione molto rapidi (pochi anni), che spesso va ad incidere pesantemente sulla economia agricola aziendale.

## 6.2 I suoli salini e la loro gestione

### 6.2.1 Presupposti teorici

L'utilizzo di acque irrigue contenenti sali in quantità eccedente i 480 mg/l (corrispondenti a una EC<sub>w</sub> di 0,7dS/m) (FAO UNESCO, 1985) è considerato potenzialmente pericoloso per la crescita delle colture in quanto può dare luogo ad accumuli di sali nella zona radicale sino a ridurre la resa delle colture. L'eccesso di sali solubili nel suolo inibisce, infatti, l'assorbimento di acqua da parte delle radici. L'utilizzo più o meno continuativo nel tempo di acque irrigue contenenti sali in eccesso può dunque condurre alla salinizzazione dei suoli e al restringimento della gamma delle colture praticabili, attraverso una drastica riduzione della produttività.

Il rischio di salinizzazione dipende, oltre che dalla qualità delle acque, dal contenuto iniziale di sali nel suolo e dalle sue proprietà idrologiche, in particolare dalla facilità con cui le acque in eccesso percolano verso il basso, e cioè dalla permeabilità degli orizzonti e dal drenaggio.

#### 6.2.2 I suoli salini

Tutti i suoli contengono naturalmente una miscela di sali più o meno solubili in acqua e alcuni di questi sono essenziali per lo sviluppo vegetale. Quando i sali si accumulano nel suolo fino ad un livello tale da compromettere la germinazione dei semi e/o lo sviluppo vegetale e da determinare anche effetti indesiderati sull'ambiente, i suoli vengono definiti "salini" o "affetti da salinità". Storicamente i suoli affetti da salinità sono stati distinti in suoli salini, suoli sodici e suoli salino-sodici. Questa distinzione è stata realizzata principalmente in base alla concentrazione totale di Sali (misura della conducibilità elettrica) e alla percentuale di sodio sul complesso di scambio (Tabella 25), ma non si è considerato il fatto che gli effetti della salinità dipendono anche da altre condizioni, quali la dinamica dell'acqua e la fisiologia vegetale.

In questo studio, partendo da tale schema di classificazione, si è cercato di approfondire la valutazione sulla salinità, con l'utilizzo di un modello di accumulo di Sali dinamico che prende in considerazione sia il clima, che l'uso irriguo (coltura) e la sua gestione (tecnica e scheduling) per ogni tipo di suolo.

**Tabella 25. Principali parametri di distinzione dei suoli affetti da salinità secondo la classica suddivisione in suoli "salini", "sodici" e "salino-sodici"**

Tipo di suolo	CE (dS m <sup>-1</sup> )	ESP	SAR	pH
Suoli salini	> 4	< 15	< 13	8,0 - 8,5
Suoli sodici	< 4	> 15	> 13	> 8,5
Suoli salino-sodici	> 4	> 15	> 13	> 8,5



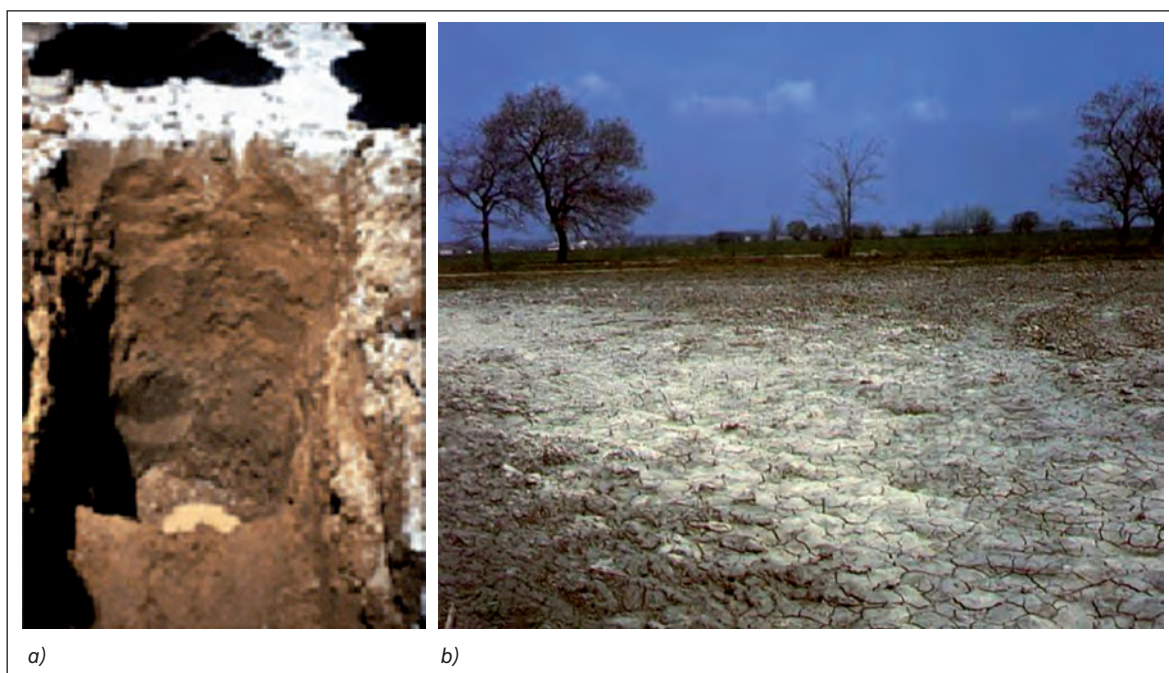
Facendo riferimento ai più recenti lavori presenti in letteratura ma principalmente sulla base della Legenda della Carta dei Suoli del Mondo della FAO (FAO-UNESCO, 1974), così come ampliata nella Revised Legend (FAO-UNESCO, 1988) e, successivamente, nel World Reference Base (IUSS-ISRIC, 1998), nel novero dei suoli salini sono da considerare e vengono distinti i Solonchaks, i Solonetz e i Gypsisols (WRB, 2006), rispettivamente dominati da sali solubili (generico), prevelenti Sali di sodio, e prevalente Solfato di calcio (gesso). Va da se, che i diversi gruppi di suoli salini hanno un'unica proprietà in comune, cioè un elevato contenuto di elettrolita, ma presentano parametri della qualità fisica, chimica, idrologica e biologica sostanzialmente diversi.

I suoli salini sono quindi quelli che hanno un accumulo di Sali solubili (figura 92). La conducibilità dell'estratto saturo è  $>$  di 4 mmhos/cm, la percentuale di sodio scambiabile è  $<$  15 ed il pH è generalmente  $<$  di 8.5. Questi suoli hanno sufficienti Sali solubili da condizionare la crescita delle piante, soprattutto per l'incremento della pressione osmotica della soluzione circolante nel suolo, che restringe fortemente la possibilità di assunzione di acqua da parte delle radici delle piante. Dal pH del suolo e dal contenuto in sali si può dedurre la disponibilità di elementi nutrienti per le piante .

Le acque di irrigazione possono anche essere la causa di aumento dei sali nel suolo. Quando vengono utilizzati dei sistemi ad aspersione (pioggia), i sali si muovono verso il bordo delle parti inumidite del suolo, e quando l'acqua evapora, deposita degli anelli circolari salini.

La limitazione della produttività può essere anche causata dall'aggiunta di fertilizzanti nel suolo che solubili in acqua, producono a loro volta sali. I sintomi di accumulo dannoso per le piante sono in generale la clorosi o la comparsa di foglie "bruciate" ai bordi.

**Figura 92. a) Esempio di suolo salino (classificato come solonchak con il sistema Soil World Reference Base 2006) e b) del paesaggio associato. Pianure del Danubio, Repubblica Ceca.**

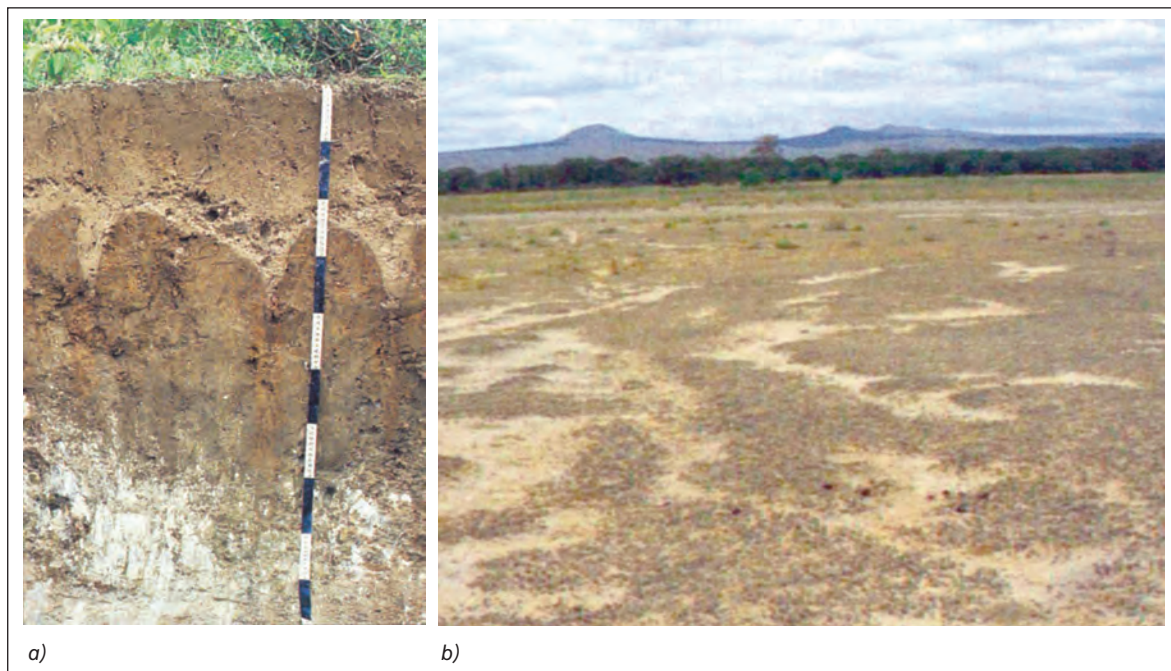


### 6.2.3 Suoli sodici

Nelle aree nelle quali il sodio è il componente principale delle rocce e dei minerali presenti, esso può diventare il componente principale nel complesso di scambio cationico.

Dove questo accade, e il sodio scambiabile (ESP) è > 15%, si è in presenza di un suolo sodico o alcalino. Il pH può variare da 8,5 a 10. Ciò può rappresentare condizioni di tossicità per la maggior parte delle piante. Il sodio scambiabile produce, inoltre, la deflocculazione dei colloidali e la rottura della struttura degli aggregati. Queste condizioni impediscono la penetrazione delle acque di irrigazione e piovane, e ciò limita la possibilità di utilizzare queste aree a fini agricoli. Le pianure alcaline, con suoli sodici, sono, nelle zone aride, completamente o parzialmente prive di vegetazione (figura 93).

**Figura 93.** a) struttura sub-superficiale colonnare tipica di un solonetz sodico e b) paesaggio associato.



### 6.2.4 Suoli affetti da salinità secondaria a causa dell'irrigazione

I processi di salinizzazione secondaria dei suoli indotti dall'irrigazione non sono nuovi nella storia del mondo. Il declino della civiltà mesopotamica (4-5.000 a.C.) viene attribuito dagli storici anche alla salinizzazione dei suoli conseguente allo sviluppo della pratica irrigua. Il declino di civiltà più recenti, come quella india della bassa valle del Viru in Perù, o della civiltà Harappa delle pianure dell'Indo, in India e Pakistan, o degli Indiani Hohokam della valle del Salt River in Arizona, sono da attribuire anche a processi di salinizzazione secondaria del suolo (fig. 94).

Nonostante le esperienze negative, la salinizzazione delle aree irrigue, e talora anche di quelle circostanti, non diminuisce ma, al contrario, aumenta. Secondo stime della FAO non recentissime (1971), ogni anno 10 milioni di ettari di territori irrigui vengono abban-

donati a causa degli effetti negativi causati da processi di salinizzazione e/o alcalizzazione secondaria dovuti alla pratica irrigua.

Almeno in 75 Paesi del mondo vi sono gravi problemi di salinizzazione secondaria dei suoli e nulla fa presagire che nel futuro la situazione migliori. Stime proiettate al 2020 sullo sviluppo dell'irrigazione e della conseguente salinizzazione secondaria indicano non solo che gli andamenti nell'incremento delle aree irrigue e delle aree salinizzate sono quasi paralleli, ma anche che i territori con salinizzazione secondaria sono più estesi dei territori irrigui. Ciò avviene sia perché nei primi sono compresi pure i territori affetti da vecchi processi di salinizzazione, sia perché la salinizzazione secondaria influenza, in genere, una superficie maggiore rispetto a quella irrigua. Particolarmente soggetti ai problemi della salinizzazione secondaria sono i suoli dei Paesi che si affacciano sul bacino del Mediterraneo, in particolare laddove il clima è tendenzialmente caldo-arido. In questi ambienti, infatti, il ricorso all'irrigazione consente di ridurre i rischi legati ai deficit di umidità, di stabilizzare le produzioni e, fatto oltremodo positivo, di ampliare la gamma di scelta delle coltivazioni.

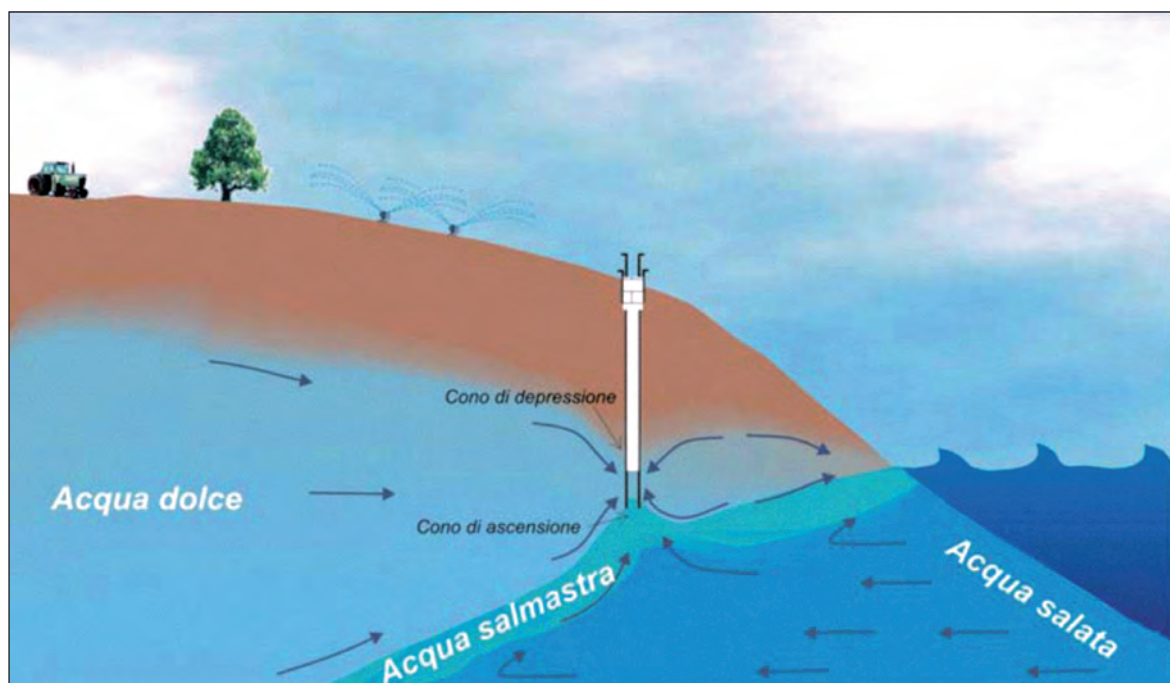
Negli ultimi 25 anni le aree irrigue nei Paesi del bacino del Mediterraneo hanno subito un incremento stimato intorno al 20 %. Esse sono di solito localizzate in prossimità di zone ad alta concentrazione urbana ed industriale, ove si consuma per gran parte acqua di buona qualità. Ne consegue che, per scopi irrigui, si ricorre ad acque di scarsa qualità (principalmente saline), di reflui urbani o di effluenti industriali. A ciò si aggiunge il sovra sfruttamento delle falde lungo le pianure costiere, che conduce frequentemente ad intrusione nell'acquifero di acque marine, ed anche l'eccessivo ricorso a fertilizzanti e pesticidi che, usati in grande quantità nell'agricoltura irrigua, possono contaminare le acque superficiali o di falda impiegate per scopi agricoli (e anche civili). Questi problemi sono destinati ad aggravarsi per effetto dei cambiamenti climatici globali previsti per il prossimo futuro (Barrow, 1993). Si ritiene che nell'Europa mediterranea tali cambiamenti dovrebbero condurre ad un incremento dell'indice di aridità che, influenzando il regime di umidità ed il bilancio salino dei suoli, finirebbero col determinare una minore lisciviazione ed una maggiore salinizzazione, fino a raddoppiare, nei prossimi 40 anni, le aree affette da salinità.

**Figura 94. Area costiera affetta da salinizzazione (da USDA, 2007)**



La salinizzazione indotta dall'irrigazione è il processo antropico che maggiormente interessa i contesti esaminati dal presente progetto. Le aree costiere, condizionate dalla presenza del mare, possono subire l'infiltrazione di acqua marina (contenente dallo 0,05 al 3% in peso di sali) nelle falde. L'emungimento dai pozzi impostati su queste falde provoca il richiamo di acqua nelle direzioni radiali rispetto al loro asse. Se il volume d'acqua emunto supera quello della ricarica di acqua dolce proveniente dalle zone interne, la superficie freatica (o la superficie piezometrica in caso di acquifero confinato) si abbassa in vicinanza della costa, fino al punto che il carico piezometrico nella porzione di acqua dolce diviene inferiore a quello della porzione contigua di acqua salata. Questo fa sì che l'interfaccia tra acqua dolce e acqua salmastra (cuneo salino) si sposti progressivamente verso l'interno della costa (intrusione salina, figura 95), fino a raggiungere, nei casi più critici, i pozzi stessi (Celico, 2004), secondo il cosiddetto fenomeno di *upconing* (Civica, 2005). Oltre ad una conseguenza diretta dovuta dalla risalita capillare di acque altamente saline verso la superficie dei suoli, si verifica anche che l'acqua prelevata dai pozzi, usata nell'irrigazione, sia già salmastra, innescando quindi un circolo vizioso che alimenta l'accumulo dei sali nei terreni irrigati. (Rivelli et al., 1999).

**Figura 95. Intrusione del cuneo salino e upconing (da Lenntech Inc.)**



Questo fenomeno è la principale causa di salinità secondaria nei suoli italiani, e ciò è reso evidente dalla distribuzione dei suoli salini, presenti soprattutto in aree costiere, dov'è registrato anche un processo avanzato d'intrusione marina.

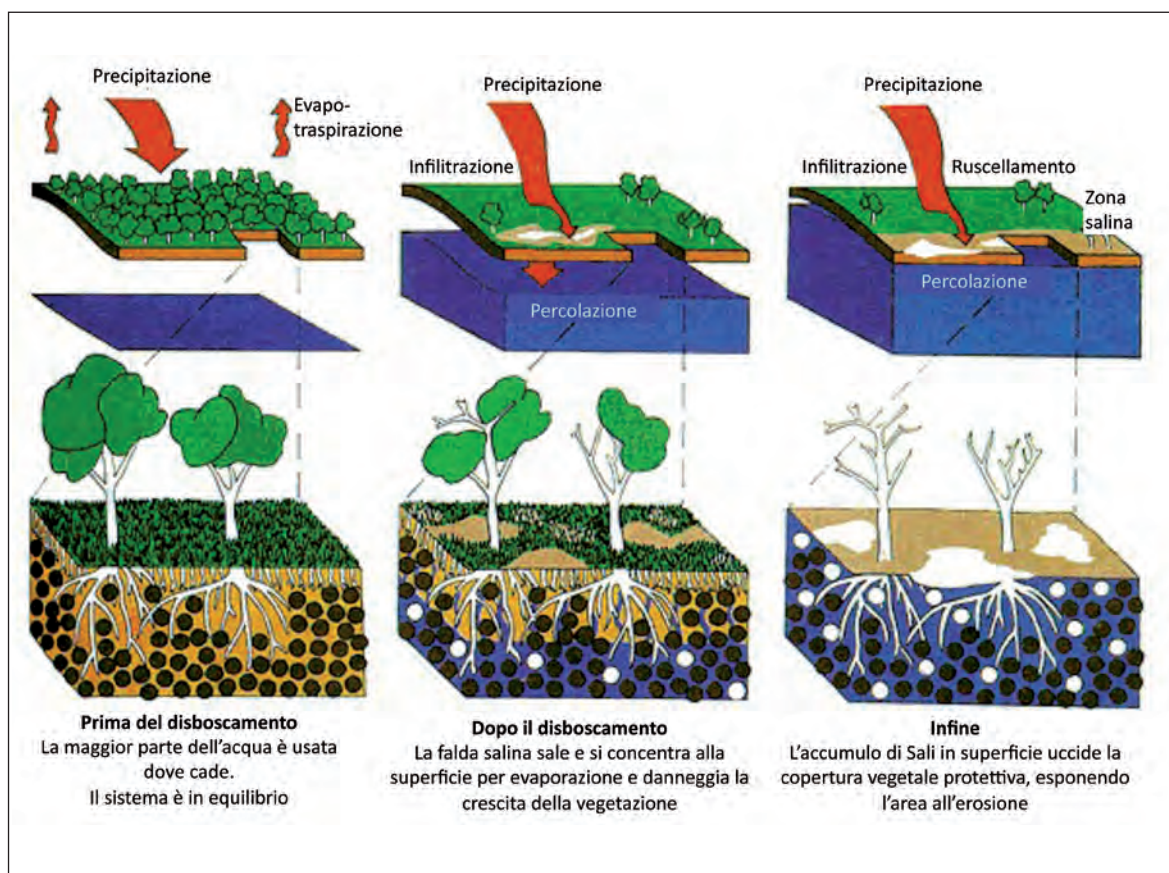
È importante notare che si può avere accumulo di sali anche utilizzando acqua qualitativamente "dolce" contenente una quantità di sali ottimale per l'irrigazione. Irrigando anche con un'acqua allo 0,05% in peso in sali disciolti, e considerando dei volumi irrigui di  $5000 \div 6000 \text{ m}^3/\text{ha}$  all'anno (ad es. per il pomodoro), si apportano al suolo ogni anno da 2,5 a 3 tonnellate ad ettaro di sali. Anche in questo caso, se le precipitazioni nelle stagioni più piovose non sono sufficienti a lisciviarli, o non vengono rimossi con metodi artificiali,

essi andranno a costituire una grave anomalia per gli equilibri chimico-fisici e biologici del terreno (Rose, 2003).

Esiste anche un altro tipo di salinità secondaria caratteristico delle terre non irrigue, la cosiddetta “dryland salinity”. Essa è dovuta all’eradiazione della vegetazione spontanea (specie poliennali e soprattutto arboree) ed alla sua sostituzione con colture agrarie (annuali ed esclusivamente erbacee), contraddistinte da apparati radicali meno profondi rispetto alla vegetazione preesistente e, in genere, assai superficiali (figura 96). Gli apparati radicali ridotti delle nuove specie vegetali richiedendo minori quantità d’acqua delle piante originarie ad alto fusto, provocano l’innalzamento della tavola d’acqua e della frangia capillare, con le stesse conseguenze indicate precedentemente.

In rapporto alle condizioni morfologiche del suolo ed alla orografia del paesaggio, particolarmente in presenza di pendici o versanti, lo squilibrio arrecato al bilancio idrologico, che si è detto consistere in una maggiore ricarica della falda, può dare origine a movimenti di infiltrazione e di flusso idrico laterale sempre accompagnati da una conseguente mobilitazione dei sali. Questi ultimi, quindi, possono essere trasportati dai luoghi dove l’acqua si infiltra e permea il suolo (ricarica) verso i luoghi dove quest’acqua evapora o viene utilizzata dalla vegetazione naturale o dalle coltivazioni a seguito dell’evapotraspirazione (discharge).

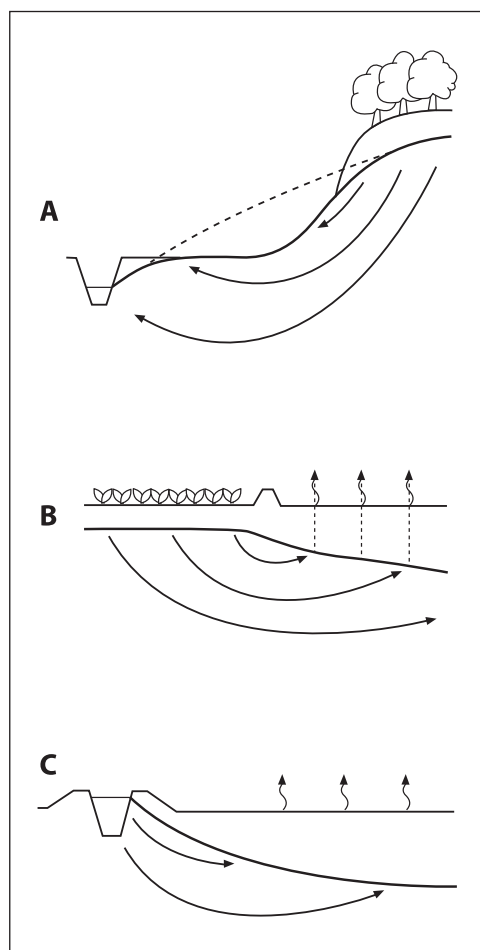
**Figura 96. Fenomeno della salinizzazione dei suoli nelle aree aride e semi-aride** (da Dept. of Conservation, Forest and Lands, Melbourne, 1987, modificato)



Questo fenomeno di flusso idrico laterale o trasversale, attraverso il profilo del paesaggio, prende il nome di “seepage” e la salinità a cui esso dà origine è detta seepage salinity (figura 97 A, Monteleone, 2006). L'origine può essere sia naturale che indotta dall'attività antropica.

Per esempio, nelle aree irrigue la presenza di canali non impermeabilizzati può originare delle infiltrazioni idriche nel suolo che, a lungo andare, determinano lungo una fascia che segue l'andamento del canale medesimo, un fenomeno di risalita idrica con conseguente evaporazione dell'acqua e progressiva concentrazione dei sali (figura 97 C). Un altro esempio è quello che si realizza fra aree agrarie soggette ad irrigazione ed aree limitrofe che possono essere coltivate o meno ma che non vengono irrigate. Nei terreni sottoposti ad irrigazione l'acqua tende a spostarsi verso il basso e vi è pertanto un rischio assai limitato di salinizzazione (a condizione che il drenaggio non sia in qualche modo ostacolato); nei campi adiacenti, quelli non irrigati, il movimento prevalente dell'acqua è invece verso l'alto; l'acqua, evaporando, concentrerà i suoi sali in prossimità della superficie (figura 97 B). A seguito del verificarsi di tale fenomeno, spesso si osserva una bordura, più o meno ampia, attorno ai margini di aree irrigue. Un altro aspetto, minoritario, è quello derivante dallo spargimento sulla rete viaria di sali in funzione antigelo. Col passare del tempo si ha la tendenza all'accumulo cronico nei suoli circostanti, in orizzonti posti sempre alla stessa profondità, le cui concentrazioni di sali possono arrivare ad essere anche 2-3 ordini di grandezza superiori rispetto a quelle presenti in origine nel suolo.

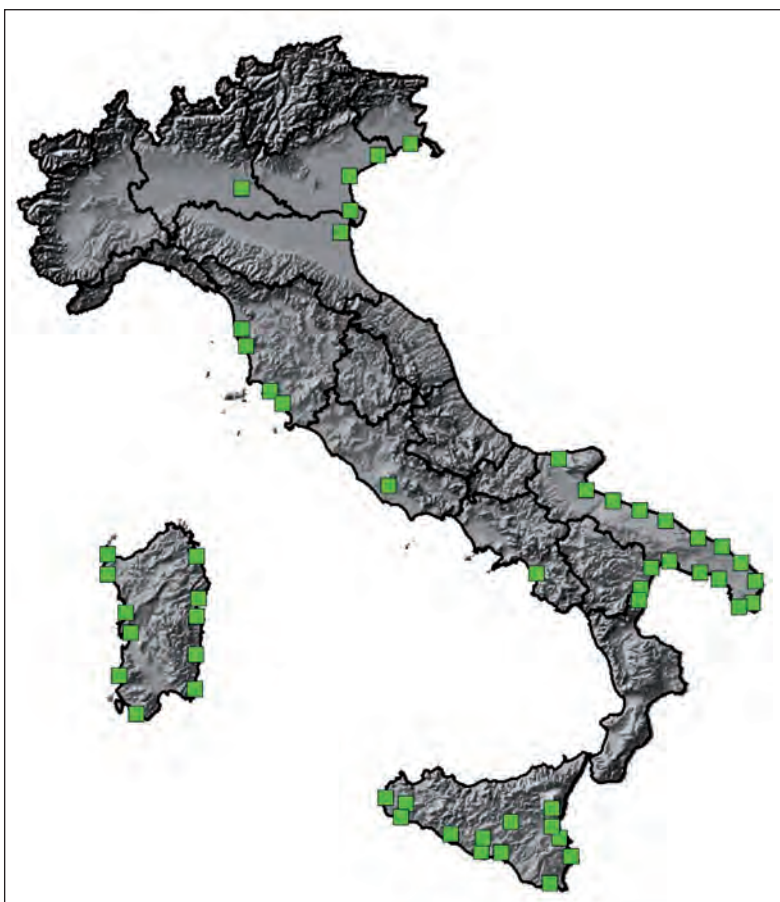
**Figura 97. Fenomeni di seepage** (da Monteleone, 2006)



### 6.2.5 La salinizzazione dei suoli in Italia

In Italia la situazione non si presenta rosea e ciò è particolarmente vero nelle aree centro-meridionali ed insulari. Anche se nel nostro Paese, ancora oggi non è disponibile una cartografia di dettaglio che dia conto delle caratteristiche e della distribuzione dei suoli salini, una recente indagine conoscitiva ha messo in evidenza come questi risultino prevalentemente distribuiti nella bassa padana, in lunghi tratti del litorale tirrenico e adriatico, nella fascia costiera della Puglia, della Basilicata e della Sardegna e in ampi tratti della Sicilia (figura 98).

**Figura 98. Ubicazione delle aree con problemi di salinità dei suoli, causata sia da substrati naturali sia indotta da attività antropica**



## 6.3 Metodo di valutazione del rischio di salinizzazione del sistema suolo-clima-coltura-tecnica

### 6.3.1 Metodo di valutazione adottato

Nonostante l'ampia letteratura disponibile sull'argomento, non sono stati rinvenuti schemi di valutazione o modelli di calcolo utili allo scopo. In particolare, gli schemi di valutazione presenti in letteratura prendono in considerazione alcuni parametri idro-

pedologici, ma non considerano la salinità dell'acqua irrigua. Viceversa, esistono alcune formule, come ad esempio quelle proposte da J.D. Rhoades in "Salinization of soil and water: a review of causes, issues and control-principles" (1997), che considerano unicamente le relazioni tra salinità dell'acqua, leaching fraction (rapporto tra acqua che percola in profondità e evapotraspirazione complessiva, valori che variano nel range tra 0.05 a 0.5) e presumibile salinità del suolo all'equilibrio nel lungo periodo.

### **6.3.2 Il modello Soil Water Atmosphere Plant (SWAP)**

Si è dunque voluto mettere a punto un sistema di valutazione che si basa sulla determinazione del grado di accumulazione dei sali nei vari tipi di suolo, mantenendo costante l'assetto di gestione irrigua attualmente in corso (tipi di colture irrigue, tecniche, scheduling, salinità delle acque di irrigazione). Tale valutazione si basa sulla applicazione, all'interno dei Sottosistemi di Terre individuati come potenzialmente soggetti a questo fenomeno, del modello di simulazione Soil, Water, Plant and Atmosphere (SWAP, Van Dam, 2000).

SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) è il successore del modello agro-idrologico SWATR (Feddes et al., 1978) e di alcuni suoi derivati. Le prime versioni sono state pubblicate come SWATR(E) da Feddes et al. (1978), Belmans et al. (1983) e Wesseling et al. (1991), come SWACROP da Kabat et al. (1992) e come SWAP93 da Van den Broek et al. (1994). Le ultime versioni sono state pubblicate come SWAP2.0 da Van Dam et al. (1997) e Kroes et al. (2001). I riferimenti generali al modello SWAP sono in Van Dam (2000).

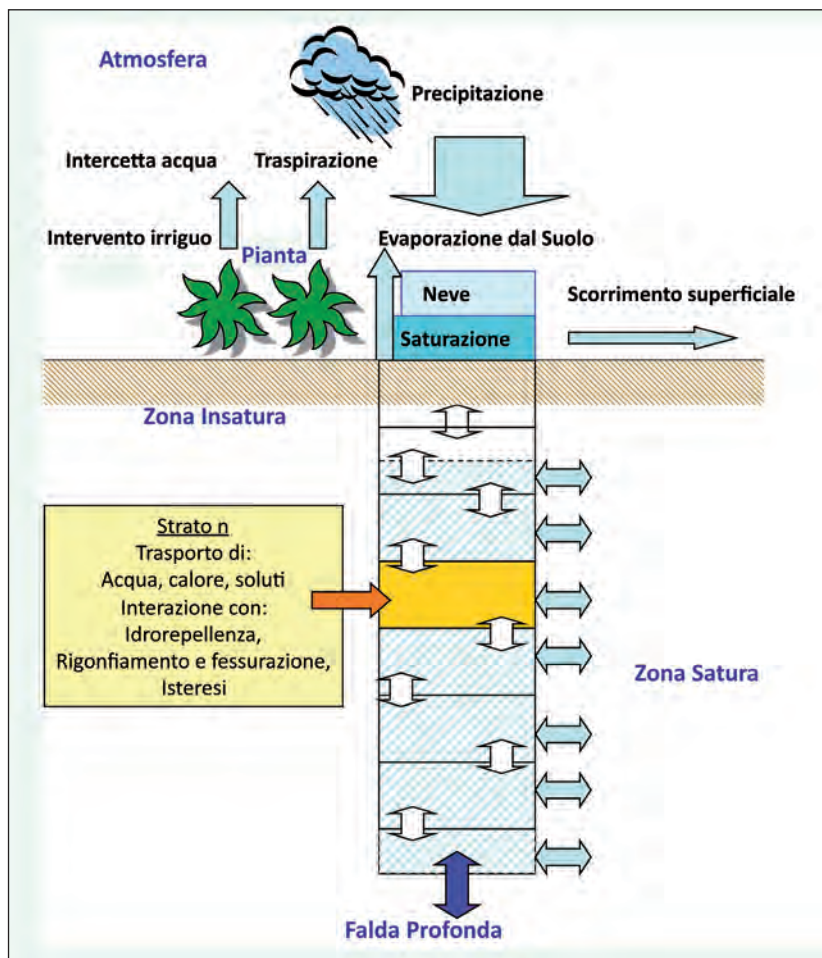
Si tratta di un modello previsionale di calcolo che simula in maniera dinamica il flusso di acqua nel suolo attraverso l'utilizzo di una discretizzazione matematica di equazioni di flusso generali. SWAP utilizza l'equazione di Richards, che consente l'uso di database delle proprietà idrauliche dei suoli. La forte base fisica dell'equazione di Richards è importante per la generalizzazione di esperimenti in campo e per l'analisi di diversi tipi di scenario.

Una soluzione versatile dell'equazione non-lineare di Richards è descritta nel modello, insieme ad una procedura automatica per la gestione dei rapidi cambiamenti in campo nei contenuti di acqua, relativamente all'infiltrazione nell'interfaccia superiore suolo-atmosfera. Sono considerati, inoltre, metodi fisici ed empirici per la determinazione della evaporazione attuale del suolo. Le funzioni idrauliche sono descritte dalle espressioni analitiche di Van Genuchten (1980) and Mualem.

Il cuore del modello SWAP consiste nella implementazione di una descrizione matematica del flusso d'acqua nel suolo, del conseguente trasporto di soluti e dell'andamento della temperatura (sottoforma di flussi di calore), con speciale riferimento alla eterogeneità del suolo. Una schematizzazione generale del sistema modellizzato è data in figura 99.



Figura 99. Schema della modellizzazione del sistema suolo-acqua-atmosfera-pianta (da Reference Manual SWAP Version 3.0.3, 1993, modificato)



### 6.3.3 Il modulo di trasporto/accumulo soluti SWAP

Molti soluti entrano nel sistema naturale suolo dalla sua superficie. Il tempo di permanenza dei soluti nella zona insatura è importante per la gestione dell'inquinamento/degradazione del suolo e della falda. Per esempio i composti organici sono prevalentemente decomposti nella zona insatura, dove è concentrata l'attività biologica. La maggior parte delle piante è capace di estrarre acqua e nutrienti dal suolo solo nella zona insatura.

Nelle aree irrigue, la salinità di lungo termine nella zona radicale dipenderà, quindi, dalla quantità di percolazione dalla zona insatura. Mentre il processo di trasporto dei soluti nella zona insatura è prevalentemente verticale, in falda può divergere in ogni direzione, minacciando le acque superficiali a uso potabile. Usando un modello analitico, Beltman et al. (1995) hanno mostrato l'importanza dei processi di trasporto nella zona insatura rispetto a quelli nella satura. E' chiaro che è necessaria una totale comprensione dei processi che governano il trasporto, l'assorbimento, il prelievo radicale e la decomposizione dei soluti nella zona insatura, in modo da analizzare e gestire il suolo, le acque e i problemi ambientali connessi.

SWAP è costruito in modo da simulare i processi di trasporto a scala di campo parcellare. Sebbene per scopi gestionali la maggior parte degli agricoltori affermino di avere le medesime condizioni di suolo e drenaggio nella propria parcella, basta l'eterogeneità spaziale di suolo a livello parcellare per causare grandi variazioni nei flussi di soluti (Biggar and Nielsen, 1976; Van de Pol et al., 1977; Van der Zee and Van Riemsdijk, 1987).

Gran parte delle variazioni è causata dalla variazione spaziale dei parametri idraulici del suolo, dal flusso preferenziale dovuto ai macropori nei suoli strutturati, o da fronti di inumidimento instabili in suoli non strutturati. In molti casi non è possibile determinare la variazione (incluse le correlazioni) di tutti i parametri fisici. Un approccio è quello di misurare per un certo periodo di tempo le concentrazioni di soluti nel profilo di suolo e le quantità di acque drenate, e applicare la calibrazione o modelli inversi per determinare gli "effettivi" parametri di trasporto (Groen, 1997). Un altro approccio è quello di usare le simulazioni con il metodo Monte Carlo, dove la variazione dei parametri di trasporto è derivata da campi comparabili (Boesten and Van der Linden, 1991). Jury (1982) ha proposto l'utilizzo di funzioni di trasferimento, che non descrivono esplicitamente i processi di trasporto nel suolo, ma solamente le relazioni tra soluti che entrano e che vengono rimossi dal profilo di suolo. Alcune limitazioni di questo approccio sono dovute alla necessità di avere dati sperimentali per la calibrazione e l'estrapolazione ad altre situazioni è molto rischiosa perché fonda su basi stocastiche piuttosto che fisiche.

SWAP si limita ai processi fisici per essere flessibile nella parametrizzazione di input e permettere la simulazione di tutti i tipi di scenari di variabilità biofisica e gestionale. La variabilità spaziale può essere presa in considerazione con calibrazione, modelli inversi e simulazioni di tipo Monte Carlo.

SWAP si focalizza sul trasporto dei Sali, pesticidi e altri soluti che possono essere descritti con una cinetica relativamente semplice. I processi che non sono considerati in SWAP sono:

- Volatilizzazione e trasporto gassoso;
- Trasporto di fluidi non miscelati o immiscibili (es. olio e acqua);
- Equilibrio chimico tra i vari soluti (es. tra  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ );
- Reazioni a catena di tipo chimico e biologico (es. Mineralizzazione e nitrificazione);

In caso di trasporto di pesticidi in modalità complesse avanzate (inclusi volatilizzazione e adsorbimento cinetico) SWAP può essere utilizzato in combinazione con altri modelli (PESTLA - Van den Berg and Boesten, 1998, e PEARL - Leistra et al., 2000; Tiktak et al., 2000). Per il trasporto dei nutrienti (fosforo e azoto) SWAP può essere utilizzato con il modello ANIMO (Rijtema et al., 1997; Kroes and Roelsma, 1998).

Nel paragrafo successivo si riporta sinteticamente l'approccio concettuale e descrittivo dei processi di trasporto fisico così come modellizzati nel modulo SWAP utilizzato.

### **Equazioni di base del trasporto dei soluti nel suolo**

I tre meccanismi principali di trasporto dei soluti nell'acqua presente nel suolo sono la Diffusione, la Convezione e la Dispersione.

La Diffusione è il trasporto di soluti che causa la presenza di un gradiente di soluzione. Il movimento termico delle molecole di soluto nella soluzione del suolo causa un trasporto netto di molecole dalle zone ad alta concentrazione verso quelle di bassa. Il flusso

di soluti  $J_{dif}$  ( $g\ cm^{-2}\ d^{-1}$ ) lungo la direzione  $z$  è generalmente descritto dalla prima legge di Fick:

$$J_{dif} = -D_{dif} \frac{\partial c}{\partial z}$$

dove:  $D_{dif}$ : diffusività o coefficiente di diffusione ( $cm^2\ d^{-1}$ );  
 $\partial c$ : concentrazione di soluti nell'acqua del suolo ( $g\ cm^{-3}$ );  
 $\partial z$ : direzione

$D_{dif}$  è molto sensibile al contenuto di acqua reale, così come condiziona fortemente le direzioni di trasporto e la effettiva area relativa alla sezione di trasporto. Per determinarlo, in SWAP è stata utilizzata la seguente relazione proposta da Millington and Quirk (1961):

$$D_{dif} = D_w \frac{\theta^7}{\phi_{por}^2}$$

dove  $D_{dif}$ : diffusività  
 $D_w$ : coefficiente di diffusione in acqua libera ( $cm^2\ d^{-1}$ )  
 $\theta$ : contenuto volumetrico d'acqua  
 $\phi$ : porosità del suolo.

Il trasporto di massa dei soluti avviene quando essi sono trasportati dai movimenti dell'acqua. Il flusso principale relativo a questo tipo di trasporto è chiamato flusso convettivo  $J_{con}$  ( $g\ cm^{-2}\ d^{-1}$ ), e può essere calcolato con il flusso medio di acqua nel suolo:

$$J_{con} = qc$$

Nella descrizione dei flussi d'acqua ci si riferisce alla equazione di flusso di Darcy, che individua il valore di flusso medio in una certa sezione trasversale.

$$q = K \frac{\partial H}{\partial z}$$

dove  $q$ : valore di flusso medio in una certa sezione trasversale;  
 $H$ : perdita di carico;  
 $K$ : coefficiente di conducibilità;  
 $z$ : distanza infinitesimale percorsa nella direzione del moto.

In caso di trasporto di soluti, è necessario considerare la variazione di velocità dell'acqua tra i pori di differente diametro e geometria e anche la variazione di velocità all'interno dei pori stessi. La varietà delle velocità dell'acqua causa una differente quantità di movimento maggiore per alcuni soluti all'interno dell'avanzamento del fronte medio, e per altri minore. L'effetto globale sarà quindi che il fronte di avanzamento complessivo sarà sfumato o disperso. I soluti comunque andranno a fluire da zone ad alta a zone a bassa concentrazione. Se il tempo richiesto per i soluti di miscelarsi nella direzione trasversale è piccolo, relativamente a quello richiesto per muoversi nella direzione principale del flusso

convettivo, il coefficiente di dispersione di flusso  $J_{dis}$  ( $\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) risulta proporzionale al gradiente di soluzione (Bear, 1972):

$$J = -\theta D_{dis} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

indicando con  $D_{dis}$  il coefficiente di dispersione ( $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$ ). In condizioni di flusso laminare lo stesso  $D_{dis}$  è proporzionale alla velocità dell'acqua nei pori  $v = q/\theta$  (Bolt, 1979):

$$D_{dis} = L_{dis} |v|$$

indicando con  $L_{dis}$  la lunghezza della dispersione (cm). Questa dipende dalla scala sulla quale i flussi idrici e la convenzione dei soluti sono pesati. Valori tipici di  $L_{dis}$  sono 0.5 – 2.0 cm in colonne di suolo precostituite artificialmente in laboratorio e di 5 – 20 cm in situazioni naturali in campo, nonostante possano essere considerevolmente più grandi in situazioni di trasporto in falda su scala regionale (Jury et al., 1991). Anche se l'acqua fluisce molto lentamente attraverso suoli ricostituiti artificialmente, il flusso disperdente è generalmente molto più grande di quello di diffusione. Il flusso totale  $J$  ( $\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) è comunque descritto dalla seguente funzione:

$$J = J_{dif} + J_{con} + J_{dis} = qc - \theta (D_{dif} + D_{dis}) \frac{\partial c}{\partial z}$$

Il modello ha di default questi input, che possono essere modificati dall'utente a seconda delle situazioni:

Variabile (Codice)	Descrizione	Valore di default in SWAP
Dw (DDIF)	Coefficiente di Diffusione in acqua libera ( $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$ )	0.0
( $L_{dis}$ )	Lunghezza di dispersione del soluto (cm)	5.0

### Tipologia dati di input

Il modello SWAP simula con passo giornaliero lo sviluppo della coltura, l'evapotraspirazione, i flussi idrici nel suolo, i flussi di soluti, utilizzando come input una serie di parametri riguardanti:

- la suddivisione del suolo in orizzonti (strati) omogenei, caratterizzati dal punto di vista idrologico e dal punto di vista del contenuto salino all'inizio del periodo di simulazione;
- i dati termopluviometrici giornalieri;
- la coltura (caratterizzata attraverso una serie di parametri che descrivono lo sviluppo fogliare, l'approfondimento radicale, la traspirazione, ecc.);
- gli apporti irrigui, descritti in termini di tecnica, quantità di acqua e suo contenuto in sali;
- le condizioni al contorno (tipo di drenaggio profondo e laterale, falda, ecc).

## **Sali di riferimento e Coefficienti di diffusione e dispersione**

Il sale (soluti) preso come riferimento per la modellazione effettuata è stato il Cloruro di Sodio (NaCl). Tale scelta è stata dettata da:

- a) necessità di individuare un'unica tipologia di soluto prevalente, vista la grande quantità di casi dal modellizzare a causa della grande casistica presente della matrice suolo-clima-coltura-tecnica (circa 60.000 casi presenti nell'area di studio per le regioni considerate);
- b) scarsi o assenti dati circa altre tipologie di Sali (es. solfati di calcio e cloruro di potassio) nelle aree considerate, nei suoli e nelle acque di irrigazione;
- c) il cloruro di sodio rappresenta comunque il caso peggiore (worst case) e quindi risponde al principio più cautelativo; comunque le aree si riferiscono a salinizzazione da intrusione marina, con % di NaCl superiore al 70-80%.

La parametrizzazione dei coefficienti di dispersione e diffusione per l'NaCl utilizzata nel presente studio, diversa da quella di default del modello, è stata la seguente:

Coefficiente di diffusione molecolare  $D_{dif} = 1.0$ ; Lunghezza di dispersione del soluto  $L_{dis} = 10.0$

## **Periodo di simulazione**

Il processo di salinizzazione dei suoli causato dall'utilizzo ripetuto di acque irrigue con elevato contenuto salino è osservabile in un arco temporale di medio-lungo periodo (non meno di 10 anni), in quanto l'andamento stagionale del deficit e del surplus idrico (che causano accumulo e dilavamento ciclico dei sali) e la variabilità climatica di breve periodo possono occultare il processo di salinizzazione. Per tale motivo, si è optato per il periodo di simulazione più lungo possibile in base ai dati meteorologici disponibili per le stazioni di riferimento: sono stati quindi presi in considerazione i dati per il periodo 1996-2007 (11 anni), con dati provenienti dalla attività già effettuata dal gruppo di lavoro (CRA-RPS e CRA-ABP) di elaborazioni e costruzione del data base climatico delle aree omogenee effettuata nell'ambito della Linea A, Azione 1 del progetto "Attività di assistenza tecnica e supporto agli Enti concessionari nel settore dell'uso delle risorse idriche".

## **Soglie di salinità nel suolo per le varie colture adottate nella valutazione**

Per determinare le soglie di salinità nella interazione suolo-tipo di coltura è stato preso come riferimento lo studio fatto dal Perniola nell'ambito del progetto POM-OTRIS INEA (Perniola et alii, 1999). Generalmente la tolleranza alla salinità nel suolo e nelle acque di irrigazione viene espressa con diversi criteri, a seconda dello stadio della pianta: infatti, durante la fase di emergenza è basata sulla sopravvivenza della pianta, mentre dopo l'emergenza è basata sulla diminuzione di produzione. Tale diminuzione può essere valutata sia in termini assoluti che relativi. La valutazione in senso assoluto, pur consentendo la stima diretta del reddito in termini economici, è influenzata da diversi parametri produttivi e non consente di valutare il comportamento delle diverse specie rispetto alla salinità, in quanto le loro produzioni sono di natura diversa e talvolta espresse anche con unità diverse. Si procede allora ad una valutazione in termini relativi, cioè come riduzione relativa (%) di produzione rispetto alle condizioni non saline.

Numerosi sono i tentativi volti alla determinazione della produzione relativa, ma il

più accreditato è quello proposto da Maas e Hoffman (1977; 1984), i quali hanno valutato il comportamento produttivo in funzione della salinità della maggior parte delle specie di interesse economico, fornendo una classifica del loro grado di tolleranza, da cui scaturiscono le possibili limitazioni d'uso di un'acqua irrigua.

La relazione tra la salinità dell'acqua irrigua, espressa con la sua conducibilità elettrica (ECw), del terreno, espressa come conducibilità elettrica dell'estratto di pasta satura (ECe), e la produzione relativa viene espressa con l'uso di due parametri (Barbieri e De Pascale, 1992) (Fig. 2.1):

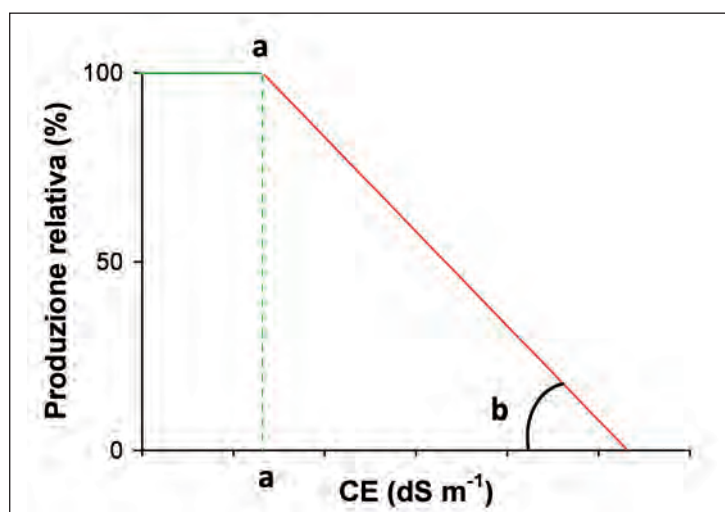
1. *Soglia critica* di salinità che rappresenta il livello massimo di salinità tollerato senza perdita di produzione, al di sotto del quale, quindi, la produzione relativa è del 100%;
2. *Pendenza* che rappresenta un fattore che lega linearmente le riduzioni produttive con gli incrementi di salinità al di sopra del valore soglia (pendenza della linea che rappresenta la relazione del decremento di produzione relativa in funzione della ECw o ECe, come da figura 100).

L'equazione di Maas e Hoffman (1977) utilizzata definisce la funzione della relazione tra produzione e salinità  $y = 100 - b(CE - a)$ , dove  $a$  = soglia di tolleranza alla salinità, corrispondente al valore di salinità dell'estratto di pasta satura del terreno o dell'acqua irrigua oltre il quale comincia a verificarsi una riduzione produttiva rispetto alle condizioni non saline;  $b$  = pendenza, ovvero riduzione della produzione relativa per ogni incremento unitario di salinità;  $CE$  = conducibilità elettrica dell'acqua irrigua o dell'estratto di pasta satura del terreno (figura 100).

Attraverso tali parametri è possibile definire il grado di tolleranza delle diverse specie e formulare, così, una loro classificazione (Tabelle 26a, b, c, d). Dalla tabella 26a si può notare, per esempio, come fagiolino dall'occhio, carciofo, zucchino, asparago e bietola da orto manifestano il valore soglia più elevato rispetto a finocchio, lattuga, ravanello, cipolla, melanzana, carota, fagiolo, melone e fragola, che mostrano i valori più bassi.

Tuttavia, la classificazione delle diverse specie in base al loro grado di tolleranza alla salinità non è univoca rispetto ai due parametri menzionati. Infatti, ad alti valori soglia, indice di buona tolleranza, non sempre corrispondono bassi valori della pendenza.

**Figura 100. Relazione generale della produzione relativa in funzione della salinità secondo l'equazione di Maas e Hoffman (1977).**



Pertanto, per valutare il grado di tolleranza con un unico parametro che combini i valori della soglia e della pendenza, si può prendere in considerazione il valore della CE in corrispondenza del quale si verifica una riduzione produttiva del 50% (Botrini et al., 1996).

Nel presente studio tale valore è stato giudicato eccessivo, in termini di percentuale di riduzione della produttività; si è preferito attestarsi su un valore-soglia corrispondente ad una riduzione di produttività colturale del 40% nella verifica e valutazione dei risultati del rischio di salinizzazione effettuato con il modello di accumulo di sali SWAP. Ciò vuole dire che ogni combinazione suolo-coltura-tecnica è stata valutata in relazione a questa soglia per definire le percentuali di aree che a fine simulazione risulteranno inadatte all'uso per le colture irrigue prese in considerazione (erbacee ed arboree).

In base a ciò, rispetto alla ECe, si ottiene una classificazione delle colture come riportato nella figura 100, in funzione della ECe in estratto saturo del suolo e produttività %.

**Tabella 26a. Parametri indicanti la tolleranza alla salinità di alcune specie orticole secondo il modello di Maas e Hoffman (1977). La conducibilità elettrica dell'estratto di pasta satura del terreno è stimata sulla base di un fabbisogno di lisciviazione pari al 15-20% (ECe = 1,5 ECw)**

Coltura	Estratto saturo del terreno			Acqua irrigua			Grado di tolleranza
	Valore CE alla Soglia (a) (dS m <sup>-1</sup> )	Pendenza (b) (%/dS m <sup>-1</sup> )	Valore CE per Produzione 0% (dS m <sup>-1</sup> )	Valore CE alla Soglia (a) (dS m <sup>-1</sup> )	Pendenza (b) (%/dS m <sup>-1</sup> )	Valore CE per Produzione 0% (dS m <sup>-1</sup> )	
Aglione (Allium sativum L.)	1,7	10	11,7	1,1	14,9	7,8	MS
Asparago (Asparagus officinalis L.)	4,1	2	54,1	2,7	3,0	36	T
Bietola da orto (Beta vulgaris L. var. conditiva Alef.)	4	9	15,1	2,7	13,5	10,1	MT
Carciofo (Cynara scolymus L.)	4,8	10,9	14	2,7	14,4	9,6	MT
Carota (Daucus carota L.)	1	14	8,14	0,7	21,0	5,5	S
Cavolfiore (Brassica oleracea L. var. botrytis L.)	-*	-	-	-	-	-	MS
Cavolo broccolo (Brassica oleracea var. italica Plenck)	2,8	9,2	13,7	1,9	13,8	9,2	MS
Cavolo cappuccio (Brassica oleracea var. capitata L.)	1,8	9,7	12,1	1,2	14,6	8,1	MS
Cavolo di Bruxelles (Brassica oleracea var. gemmifera DC.)	-	-	-	-	-	-	MS
Cetriolo (Cucumis sativus L.)	2,5	13	10,2	1,7	19,5	6,8	MS
Cipolla (Allium cepa L.)	1,2	16	7,5	0,8	24,0	5	S
Cocomero (Citrullus lanatus [Thunberg] Matsumura et Nakai)	-	-	-	-	-	-	MS
Fagiolino dall'occhio (Vigna unguiculata [L.] Walpers subsp. unguiculata)	4,9	12	13,2	3,3	18,2	8,8	MT
Fagiolo (Phaseolus vulgaris L.)	1	19	6,3	0,7	28,5	4,2	S
Fava (Vicia faba L.)	1,6	9,6	12	1,1	14,5	8	MS
Finocchio (Foeniculum vulgare Miller var. azoricum [Mill.] Theell.)	1,5	15	8,2	1,1	18,0	6,7	MS
Fragola (Fragaria x ananassa Duch.)	1	33	4,0	0,7	49,5	2,7	S
Lattuga (Lactuca sativa L.)	1,3	13	9	0,9	19,5	6	MS
Mais dolce (Zea mays L. var. saccharata Körn)	1,7	12	10	1,1	18,0	6,7	MS
Melanzana (Solanum melongena L.)	1,1	6,9	15,6	0,7	10,3	10,4	MS
Melone (Cucumis melo L.)	1	8,4	12,9	0,7	12,7	8,6	MS
Patata (Solanum tuberosum L.)	1,7	12	10	1,1	18,0	6,7	MS
Peperone (Capsicum annuum L.)	1,5	14	8,6	1,0	21,0	5,8	MS
Pisello (Pisum sativum L.)	-	-	-	-	-	-	S
Pomodoro (Lycopersicon esculentum Mill.)	2,5	9,9	12,6	1,7	15,0	8,4	MS
Cima di Rapa (Brassica rapa L. var. rapa)	0,9	9	12	0,7	13,5	8,1	MS
Ravanello (Raphanus sativus L.)	1,2	13	8,9	0,8	19,5	5,9	MS
Sedano (Apium graveolens L. var. dulce [Mill.] Pers.)	1,8	6,2	17,9	1,2	9,3	12	MS
Spinacio (Spinacia oleracea L.)	2	7,6	15,2	1,3	11,4	10,1	MS
Zucchini (Cucurbita pepo L.)	4,7	9,4	15,3	3,1	14,1	10,2	MT

S = sensibile; MS = moderatamente sensibile; MT = moderatamente tollerante; T = tollerante.

\*Nei casi in cui non vengono riportati i valori soglia di EC, il grado di tolleranza è stato stabilito in base a delle stime.



**Tabella 26b. Parametri indicanti la tolleranza alla salinità di alcune specie da fibra e granella secondo il modello di Maas e Hoffman (1977). La conducibilità elettrica dell'estratto di pasta satura del terreno è stimata sulla base di un fabbisogno di lisciviazione pari al 15-20% (ECe = 1,5 ECw)**

Coltura	Estratto saturo del terreno			Acqua irrigua			Grado di tolleranza*
	Valore CE alla Soglia (a) (dS m <sup>-1</sup> )	Pendenza (b) (%/dS m <sup>-1</sup> )	Valore CE per Produzione 0% (dS m <sup>-1</sup> )	Valore CE alla Soglia (a) (dS m <sup>-1</sup> )	Pendenza (b) (%/dS m <sup>-1</sup> )	Valore CE per Produzione 0% (dS m <sup>-1</sup> )	
Avena ( <i>Avena sativa</i> L.)	-	-	-	-	-	-	MT
Barbabetola ( <i>Beta vulgaris</i> L.)	7	5,9	23,9	4,7	8,9	16	T
Cartamo ( <i>Carthamus tinctorius</i> L.)	-	-	-	-	-	-	MT
Cotone ( <i>Gossypium hirsutum</i> L.)	7,7	5,2	26,9	5,1	7,8	18	T
Fruento duro ( <i>Triticum turgidum</i> L.)	5,9	3,8	32,2	3,9	5,7	21,5	T
Fruento tenero ( <i>Triticum aestivum</i> L.)	6	7,1	20,1	4	10,7	13,4	MT
Girasole ( <i>Helianthus annuus</i> L.)	-	-	-	-	-	-	MS
Lino ( <i>Linum usitatissimum</i> L.)	1,7	12	10	1,1	18	6,7	MS
Mais ( <i>Zea Mays</i> L.)	1,7	12	10	1,1	18	6,7	MS
Orzo ( <i>Hordeum vulgare</i> L.)	8	5	28	5,3	7,5	18,7	T
Riso ( <i>Oryza sativa</i> L.)	3	12	11,3	2	18	7,6	MS
Soia ( <i>Glycine max</i> L.)	5	20	10	3,3	30	6,7	MT
Sorgo ( <i>Sorghum bicolor</i> L.)	6,8	16	13,1	4,5	24	8,7	MT
Triticale ( <i>Triticum secale</i> Witt.)	6,1	2,5	46,1	4,1	3,8	30,7	T

**Tabella 26c. Parametri indicanti la tolleranza alla salinità di alcune specie foraggere secondo il modello di Maas e Hoffman (1977). La conducibilità elettrica dell'estratto di pasta satura del terreno è stimata sulla base di un fabbisogno di lisciviazione pari al 15-20% (ECe = 1,5 ECw)**

Coltura	Estratto saturo del terreno			Acqua irrigua			Grado di tolleranza*
	Valore CE alla Soglia (a) (dS m <sup>-1</sup> )	Pendenza (b) (%/dS m <sup>-1</sup> )	Valore CE per Produzione 0% (dS m <sup>-1</sup> )	Valore CE alla Soglia (a) (dS m <sup>-1</sup> )	Pendenza (b) (%/dS m <sup>-1</sup> )	Valore CE per Produzione 0% (dS m <sup>-1</sup> )	
Avena ( <i>Avena sativa</i> L.)	-	-	-	-	-	-	MS
Erba medica ( <i>Medicago sativa</i> L.)	2	7,3	15,7	1,3	11	10,5	MS
Loglio perenne ( <i>Lolium perenne</i> L.)	5,6	7,6	18,8	3,7	11,4	12,5	MT
Loiessa ( <i>Lolium italicum multiflorum</i> Lam.)	-	-	-	-	-	-	MT
Mais ( <i>Zea mays</i> L.)	1,8	7,4	15,3	1,2	11,1	10,2	MS
Orzo ( <i>Hordeum vulgare</i> L.)	6	7,1	20,1	4	10,7	13,4	MT
Trif. alessandrino ( <i>Trif. alexandrinum</i> L.)	1,5	5,7	19	1	8,6	12,7	MS
Trifoglio pratense ( <i>Trifolium pratense</i> L.)	1,5	12	9,8	1	18	6,6	MS
Trifoglio strisciante ( <i>Trifolium repens</i> L.)	1,5	12	9,8	1	18	6,6	MS
Veccia ( <i>Vicia sativa</i> L.)	3	11	12,1	2	16,5	8,1	MS
Vigna ( <i>Vigna unguiculata</i> L. Walpers)	2,5	11	11,6	1,7	16,5	7,7	MS

\* S = sensibile; MS = moderatamente sensibile; MT = moderatamente tollerante; T = tollerante

**Tabella 26d. Parametri indicanti la tolleranza alla salinità di alcune specie arboree secondo il modello di Maas e Hoffman (1977). La conducibilità elettrica dell'estratto di pasta satura del terreno è stimata sulla base di un fabbisogno di lisciviazione pari al 15-20% (ECE = 1,5 ECw)**

Coltura	Estratto saturo del terreno			Acqua irrigua			Grado di tolleranza *
	Valore CE alla Soglia (a) (dS m <sup>-1</sup> )	Pendenza (b) (%/dS m <sup>-1</sup> )	Valore CE per Produzione 0% (dS m <sup>-1</sup> )	Valore CE alla Soglia (a) (dS m <sup>-1</sup> )	Pendenza (b) (%/dS m <sup>-1</sup> )	Valore CE per Produzione 0% (dS m <sup>-1</sup> )	
Albicocco ( <i>Prunus armeniaca</i> L.)	1,6	24	5,8	1,1	36	3,8	S
Arancio ( <i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck)	1,7	16	8	1,1	24	5,3	S
Ciliegio ( <i>Prunus avium</i> L.)	-	-	-	-	-	-	S
Fico ( <i>Ficus carica</i> L.)	-	-	-	-	-	-	MT
Limone ( <i>Citrus limon</i> (L.) Burm.)	-	-	-	-	-	-	S
Mandorlo ( <i>Amigdalus communis</i> L.)	1,5	19	6,8	1	28,5	4,5	S
Melo ( <i>Malus sylvestris</i> Miller)	-	-	-	-	-	-	S
Olivo ( <i>Olea europea</i> L.)	-	-	-	-	-	-	MT
Pero ( <i>Pyrus communis</i> L.)	-	-	-	-	-	-	S
Pesco ( <i>Prunus persica</i> L.)	1,7	21	6,5	1,1	31,5	4,3	S
Pompelmo ( <i>Citrus paradisi</i> Mcfayden)	1,8	16	8,1	1,2	24	5,4	S
Susino ( <i>Prunus domestica</i> L.)	1,5	18	7,1	1	27	4,7	S
Vite ( <i>Vitis vinifera</i> L.)	1,5	9,6	11,9	1	14,4	7,9	MS

\* S = *sensibile*; MS = *moderatamente sensibile*; MT = *moderatamente tollerante*; T = *tollerante*

## 6.4 Strumenti operativi

Le fasi operative in cui si articola l'implementazione del modello SWAP all'interno dell'applicativo MODELLO\_REL si possono sinteticamente così riassumere:

1. Delimitazione delle aree soggette a rischio di salinizzazione su base Sottosistemi di Terre (pedopaesaggi);
2. Quantificazione del contenuto salino nelle acque di falda e spazializzazione del dato;
3. Individuazione della matrice dei casi da input simulare e preparazione dei dati di input per il modello;
4. Esecuzione in batch delle simulazioni;
5. Importazione dei risultati di swap nel database MODELLO\_REL;
6. Analisi dei risultati (geografici ed alfanumerici) e valutazione sulla base delle soglie proposte del rapporto salinità suolo e produttività (%).

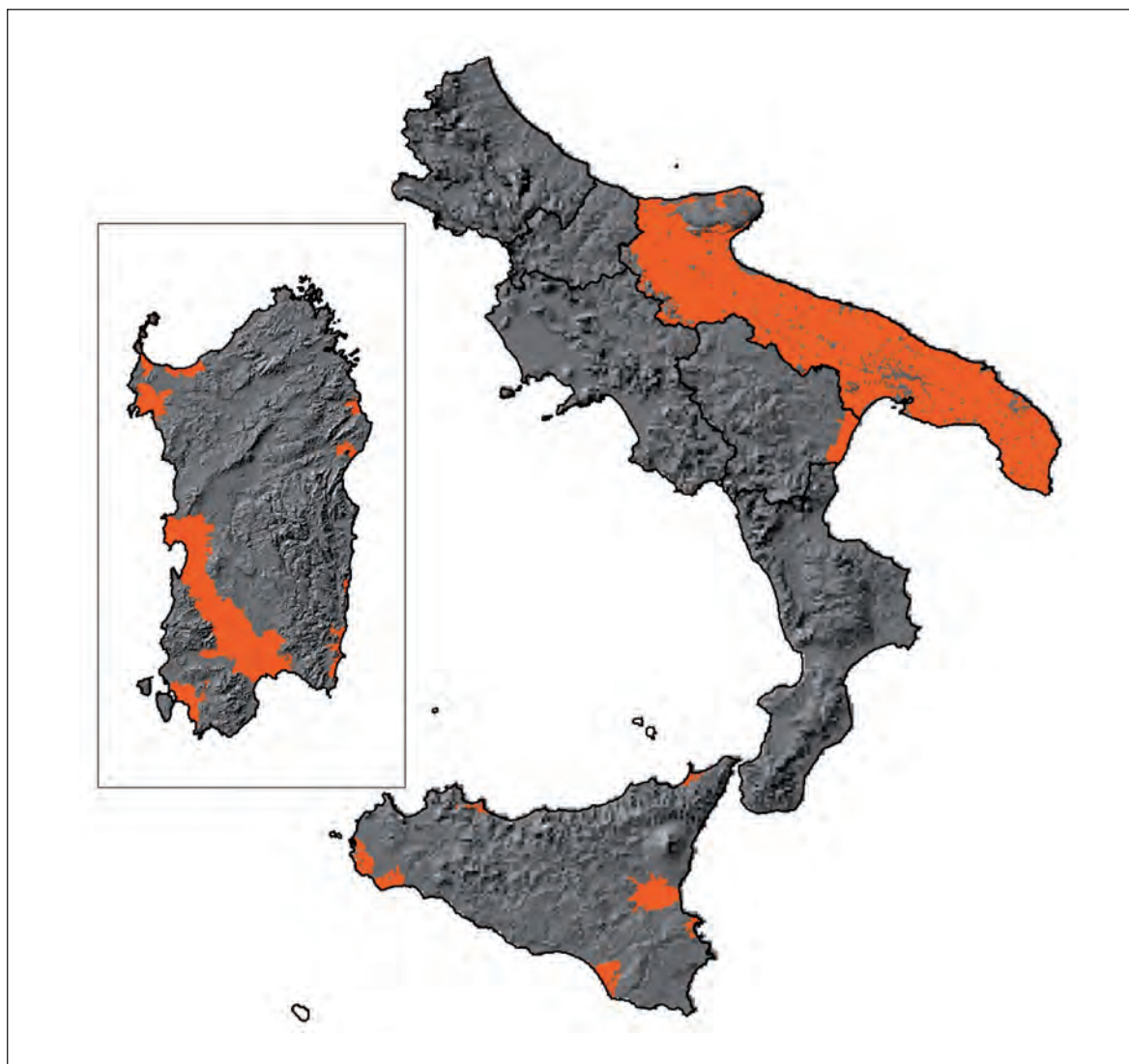
### **6.4.1 Delimitazione delle aree soggette a rischio di salinizzazione su base Sottosistemi di Terre (pedopaesaggi)**

Per l'applicazione del modello di rischio di salinizzazione è stato necessario, come primo passo, effettuare una prima analisi geografica necessaria all'individuazione delle aree "potenzialmente" a rischio per fenomeni di salinizzazione dei suoli.

Tale indagine è stata effettuata incrociando i risultati dei rapporti relativi a individuazione e monitoraggio di fenomeni di intrusione salina con le aree con suoli particolarmente sensibili e/o già interessati da fenomeni di salinizzazione, sia antropici che naturali, interrogando la base dati pedologica nazionale in possesso al CRA. Sono stati quindi selezionati una serie di "pedopaesaggi" a livello di Sottosistemi di Terre, estratti dalla base dati già preparata per la linea di studio Azione 1 – "fabbisogni irrigui". Sono state escluse, al momento, le aree collinari con fenomeni di salinizzazione dovuti a materiale parentale naturalmente salini (es. colline della Sicilia interna con suoli su formazione gessoso-solfifera o colline lucane su sedimenti argillosi pliocenici ricchi in sodio).

In figura 101 e tabella 27 vengono rispettivamente riportate le aree di studio (SST di terre identificati e selezionati) nelle regioni meridionali e le principali statistiche delle aree per Regione.

**Figura 101. Aree di studio rimodulate sulla base dei Sottosistemi di Terre selezionati per le 6 Regioni meridionali considerate (da database progetto REL)**



**Tabella 27. Numero di delimitazioni (poligoni) di Sottosistemi valutati e loro estensione complessiva in ha per Regione**

Regione	Numero Poligoni SST	Area (ha)
Basilicata	107	38.051
*Campania	197	119.440
*Calabria	232	101.381
Puglia	1795	1.573.792
Sicilia	251	141.960
Sardegna	575	314.113

*(\*) aree non elaborate per dati insufficienti su acque di irrigazione e su salinità suoli*

#### **6.4.2 Quantificazione del contenuto salino nelle acque di falda e spazializzazione del dato**

La modellizzazione del trasporto dei soluti in SWAP, applicato nel caso del presente studio al contenuto salino d'interesse per il fenomeno della salinizzazione dei suoli, richiede tra i valori di input del modello la salinità delle acque in ingresso nel suolo in termini di concentrazione di sali disciolti in acqua ( $\text{g cm}^{-3}$ ). Il dato che essenzialmente caratterizza tale parametro è quello della salinità dell'acqua impiegata nell'irrigazione che, in molti dei comprensori analizzati, risulta essere sensibilmente influenzata dai fenomeni di salinizzazione delle falde idriche costiere.

Dato il metodo generale di applicazione del modello SWAP alle SST considerate, ovvero al profilo di riferimento individuato per ognuna di esse, si è resa necessaria l'elaborazione di un valore di riferimento di salinità per ogni singola SST che meglio rappresentasse le condizioni di qualità delle acque irrigue impiegate in quella data area. La metodologia adottata per arrivare a questo risultato ha previsto, in generale, il calcolo di un valore medio rappresentativo basato sulla distribuzione spaziale continua del dato di salinità dell'acqua. Data la mancanza di misure analitiche dirette delle acque effettivamente impiegate nelle pratiche irrigue, si è optato per l'acquisizione dei dati relativi delle acque di falda, captate dai pozzi monitorati nelle diverse aree d'interesse.

La raccolta e l'armonizzazione dei dati chimico-fisici delle acque dei pozzi, alla scala di analisi del progetto, è risultato particolarmente difficoltoso per i seguenti motivi:

- Assenza di metadati relativi ai metodi di misura e di elaborazione dei dati forniti;
- Disomogeneità dei formati con cui ci sono stati trasmessi (fogli di lavoro, pdf, shapefile), che in alcuni casi hanno comportato l'introduzione di inesattezze nella localizzazione dei pozzi monitorati o delle aree di riferimento (es. immagini delle isoconduttive degli acquiferi);
- Difficoltà o impossibilità nel ricavare con esattezza le date o il periodo temporale delle misurazioni.

Nonostante le difficoltà incontrate, è stato deciso di accettare eventuali errori ed inesattezze perché si è ritenuto che i dati a disposizione fossero comunque sufficientemente indicativi delle condizioni regionali per l'analisi globale del presente progetto.

È stato, tuttavia, necessario elaborare separatamente i dati di ogni area d'interesse per ovviare alle forti disomogeneità suddette, valutando l'affidabilità e la rappresentatività di ogni singolo dataset, escludendo talvolta dalle analisi campioni di dati affetti da eccessive incertezze.

Le regioni per le quali è stato possibile ottenere dati sufficienti ai fini di questa analisi sono state Sardegna, Puglia, Basilicata e Sicilia.

#### **Spazializzazione dei dati puntuali**

Nei casi in cui si è potuto disporre di dati di monitoraggio dei singoli pozzi e della relativa localizzazione geografica, si è proceduto con la spazializzazione dei campioni dati, ovvero elaborando la distribuzione continua dei valori d'interesse per l'area d'attinenza del dataset. Data l'impossibilità di effettuare indagini e studi dettagliati per ogni singolo dataset, è stata derivata una distribuzione spaziale dei valori che fosse rappresentativa soltanto del range di valori assunti dal campione in esame e della loro distribuzione geografica,

escludendo l'analisi di processi e relazioni spaziali e l'elaborazione di eventuali modelli di distribuzione geostatistica. Questo tipo di elaborazioni avrebbe richiesto informazioni, dati e misure dei caratteri e delle strutture idrogeologiche delle diverse aree. Non disponendo di questo materiale si è optato per un'analisi semplificata che fosse coerente anche con l'assunzione, necessaria e plausibile nel presente studio, di una relazione diretta tra salinità nei pozzi di una data area e qualità dell'acqua irrigua nella stessa. Dato tutto ciò si è ritenuto sufficiente, in generale, impiegare un metodo semplificato di analisi statistica e spaziale, quale la spazializzazione dei valori puntuali tramite Inverse Distance Weighting (IDW), con esponente di primo o secondo grado. Di per sé l'interpolazione IDW presuppone la presenza di un modello spaziale del processo, che tuttavia i dati in nostro possesso non hanno evidenziato (apparente casualità della distribuzione spaziale). In questo caso lo si è comunque impiegato come "stimatore" di valori plausibili di salinità delle acque, tenendo conto del range di valori dei campioni disponibili e della distribuzione dei singoli valori.

Derivazione di un singolo valore di conducibilità all'interno delle singole SST, come media ponderata dei dati spazializzati.

### **Relazione tra conducibilità elettrica e contenuto salino**

Tutti i dati raccolti, nelle loro diverse forme, si riferiscono alle misure di conducibilità elettrica delle acque. SWAP tuttavia richiede il dato in forma di contenuto salino. Per eseguire la conversione abbiamo adottato la relazione empirica:

$$\text{TDS}(\text{mg/L}) = 640 * \text{ECw}(\text{dS/m})$$

TDS: Total Dissolved Solids

ECw: Electrical Conductivity of Water

comunemente indicata in molti testi di riferimento e pubblicazioni.

Dal momento che si stanno analizzando in particolare i sali disciolti derivanti nella maggior parte dei casi da processi di intrusione di acqua marina, sono state ricercate delle relazioni più dirette tra conducibilità e sali disciolti, assunti nell'unica forma di NaCl.

Dai grafici presenti nel manuale di riferimento del Soil Salinity Laboratory dell'USDA (USDA, 1954), sono state ricavate, tramite interpolazione polinomiale delle singole coppie di valori conducibilità/concentrazione, le relazioni tra conducibilità elettrica in acqua e contenuto salino. Applicando le opportune trasformazioni dimensionali si è ottenuta la seguente relazione:

CONT=

$$(-0,3381042 + ((\text{COND} * 10^{-3}) * 8,1934012) + ((\text{COND} * 10^{-3})^2 * 0,1341386)) * 58,49 / 1000$$

CONT = contenuto di NaCl in g/l

COND = conducibilità elettrica in  $\mu\text{S/cm}$

L'equazione è stata adottata per tutti i set di dati elaborati.

### **6.4.3 Reperimento dati per introduzione del fattore di correzione su aree servite da acque dolci**

Contemporaneamente alla attività di spazializzazione del dato di acque saline, è stato necessario introdurre e calcolare per ogni poligono di area omogenea (Sottosistemi di Terre) la percentuale di territorio servita da acque non saline perché ricadente in aree servite da reti consortili (comprensori attrezzati). Tale dato è stato recuperato attraverso una attività di raccolta informativa dalle fonti disponibili, e configurato per l'utilizzo finale in funzione di una correzione dei risultati della simulazione, sottoforma di percentuale di area esclusa dall'utilizzo di acque salmastre/saline. Nel paragrafo 6.5.2 "Correzione dei risultati geografici con dati quantitativi di acqua servita da reti consortili" viene spiegata in dettaglio la metodologia utilizzata per ricavare il dato di correzione da introdurre nei risultati finali.

### **6.4.4 Analisi risultati geografici**

#### **REGIONE SARDEGNA**

Dai dati di monitoraggio quali-quantitativi dei pozzi, forniti dagli enti di competenza delle diverse aree territoriali sotto varie forme elettroniche e cartacee (fogli di lavoro, immagini georiferite o pdf con figure delle localizzazioni dei pozzi, shapefile), sono stati ricavati i valori misurati di conducibilità elettrica.

La forte eterogeneità temporale e spaziale dei dati, e l'impossibilità di verificare nel dettaglio la qualità e la modalità di acquisizione delle misure, impone di assumere le stime derivate dall'analisi dei dati come "valori plausibili di scenario".

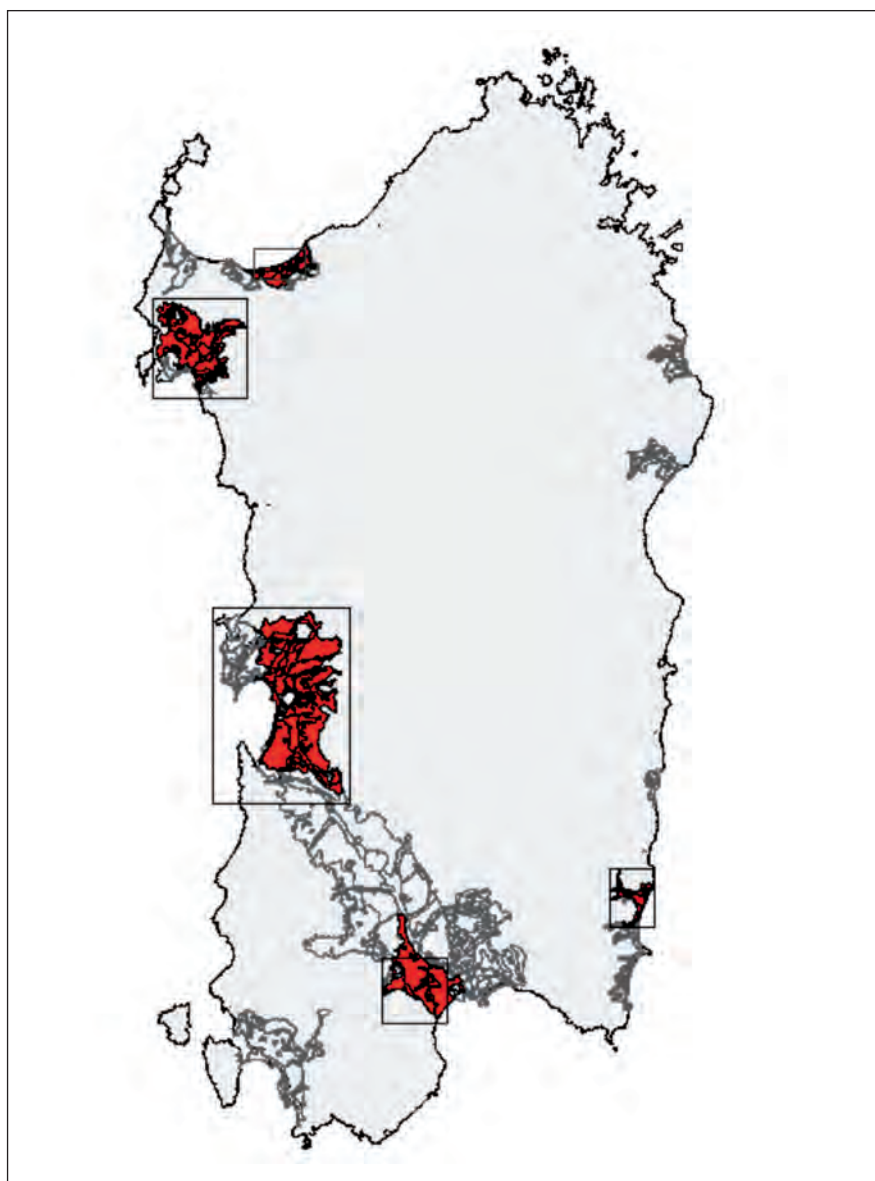
Dall'analisi della popolazione complessiva dei dati non sono risultati evidenze di trend temporali e anche la distribuzione geografica dei valori non mostra espliciti processi spaziali. Inoltre, i caratteri idrogeologici degli acquiferi interessati non sono risultati sufficienti per la valutazione del loro effetto sui valori misurati. Si è scelto quindi di suddividere la popolazione esclusivamente sulla base delle geografie degli SST, senza distinzioni temporali o di altra natura.

Dal momento che in molti SST non sono presenti misure è stato necessario per essi ovviare con un metodo approssimato di stima, che fornisse risultati allo stesso tempo plausibili e confrontabili coi dati misurati.

Nelle cinque aree (rettangoli in figura 102) dove erano presenti SST (evidenziati in rosso) contenenti pozzi monitorati, è stata eseguita un'interpolazione lineare IDW di primo grado, per ovviare alla disomogeneità nella distribuzione spaziale delle misure. Per ogni SST dove erano presenti valori misurati sono stati calcolati mediana e valore massimo sia dei valori interpolati che di quelli reali. Si è quindi calcolata la media delle mediane e la media dei massimi.

Per gli SST ricadenti nelle aree interpolate sono stati calcolati mediana e valore massimo dei valori interpolati. Per tutti gli altri SST si sono considerati i valori mediani e massimi dei valori stimati per gli altri SST.

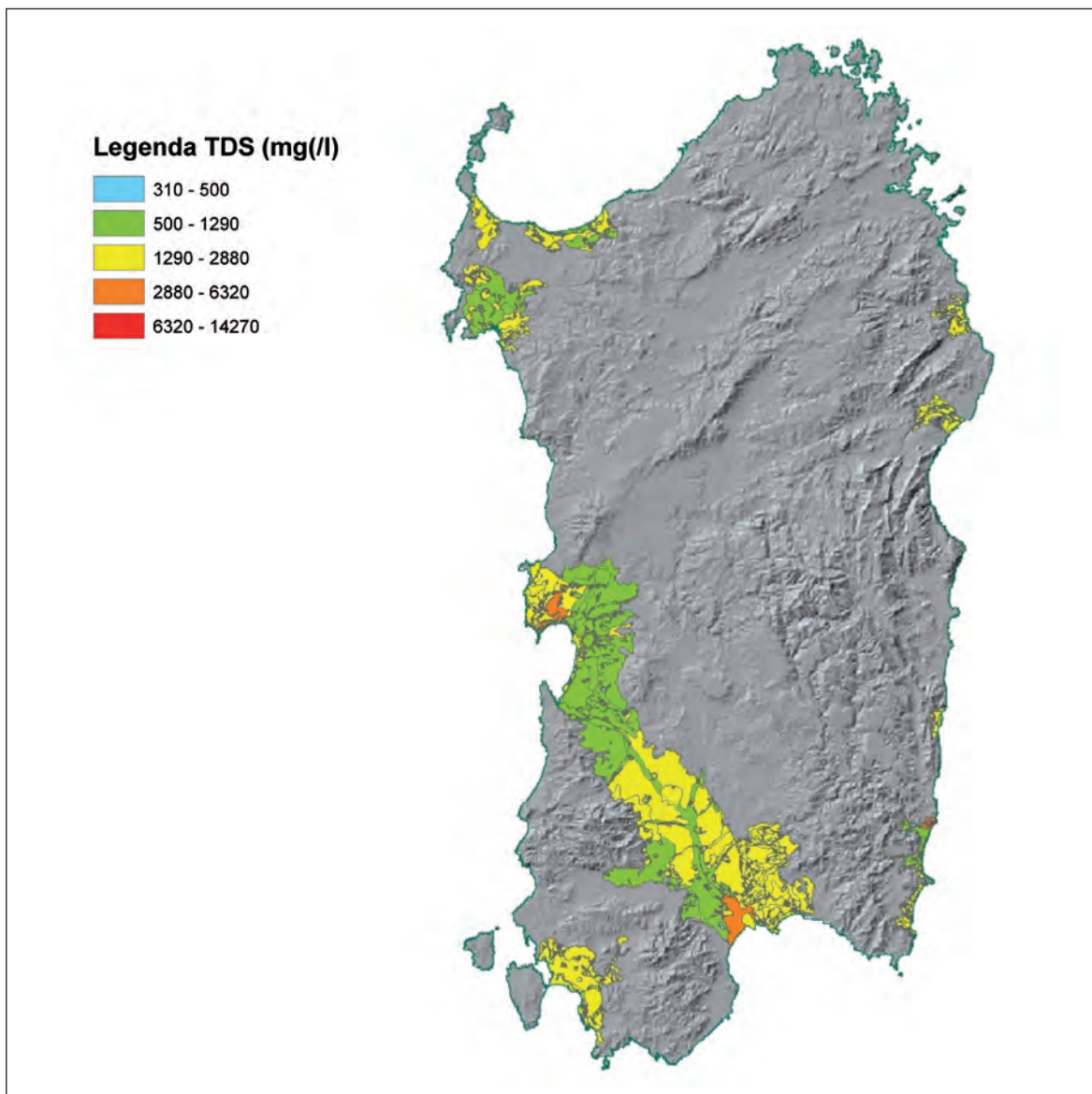
Figura 102. Aree dei SST (riquadri con poligoni in rosso) con i dati di qualità delle acque da pozzi utilizzati per l'analisi e la spazializzazione del dato di salinità delle acque per la Regione Sardegna



I due valori (mediano e massimo) sono stati assunti come valori di scenario, rispettivamente, in condizioni medie e di worst-case. Il risultato finale, adottato come input per il modello SWAP, è rappresentato nella seguente figura 103. I valori di scenario assunti come input ipotizzano, così come per le altre Regioni oggetto di studio, una costanza di tale parametro per tutto il periodo di simulazione considerato (dieci anni).



Figura 103. Spazializzazione delle acque di pozzo (TDS in mg/l) riportata su base dei Sottosistemi di Terre nelle aree di studio della Regione Sardegna



Le statistiche finali per l'elaborazione effettuata sono:

- Numero poligoni (SST): 575
- Conducibilità media ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ): 2.319,5
- Conducibilità minima ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ): 485
- Conducibilità massima ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ): 22.290,7
- Deviazione Standard: 1.327,6

## REGIONE BASILICATA

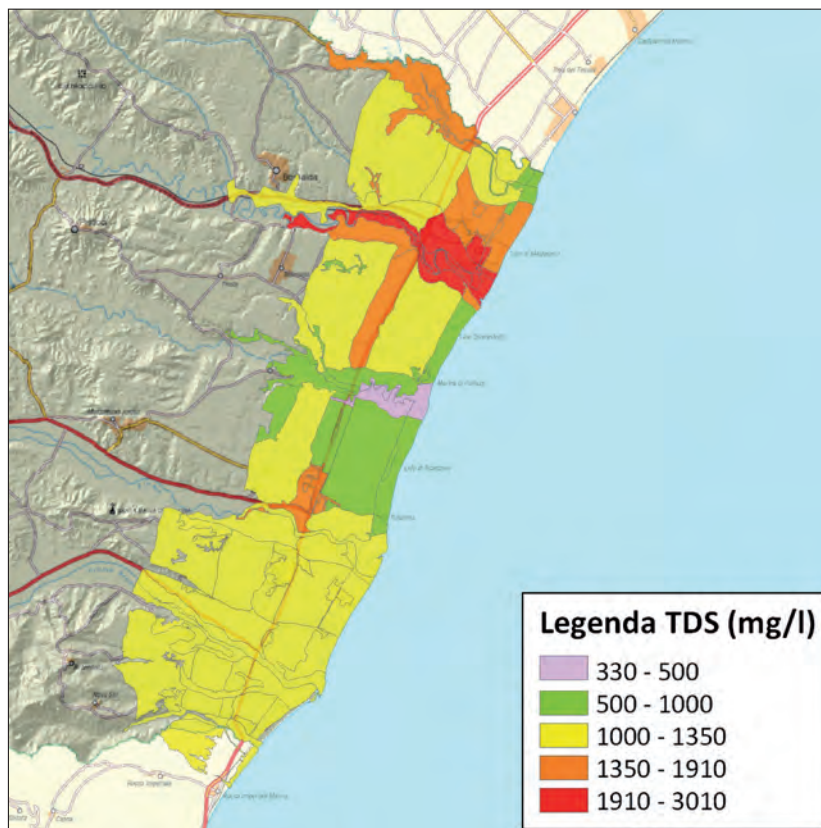
I dati disponibili si componevano della localizzazione (come immagine raster) di 44 pozzi. Tuttavia soltanto per 19 di essi (indicati in figura 104) erano disponibili i valori delle analisi.

**Figura 104. Ubicazione dei pozzi in relazione ai SST utilizzati per l'analisi e la spazializzazione del dato di salinità delle acque per la Regione Basilicata**



Come per la Sardegna, anche in quest'area si è proceduto spazializzando i valori di conducibilità tramite IDW, all'interno del poligono convesso definito dai pozzi campionati. Infine, per le aree dove non erano presenti dati, è stato adottato il valore medio delle altre aree, anche in questo caso inteso come stima plausibile di scenario medio. Il risultato è riportato nella seguente figura 105.

Figura 105. Spazializzazione delle acque di pozzo (TDS in mg/l) riportata su base dei Sottosistemi di Terre nelle aree di studio della Piana Metapontina della Regione Basilicata



Le statistiche finali per l'elaborazione effettuata sono:

- Numero poligoni (SST): 107
- Conducibilità media ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ): 1.927,8
- Conducibilità minima ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ): 517
- Conducibilità massima ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ): 4.707,6
- Deviazione Standard: 689,3

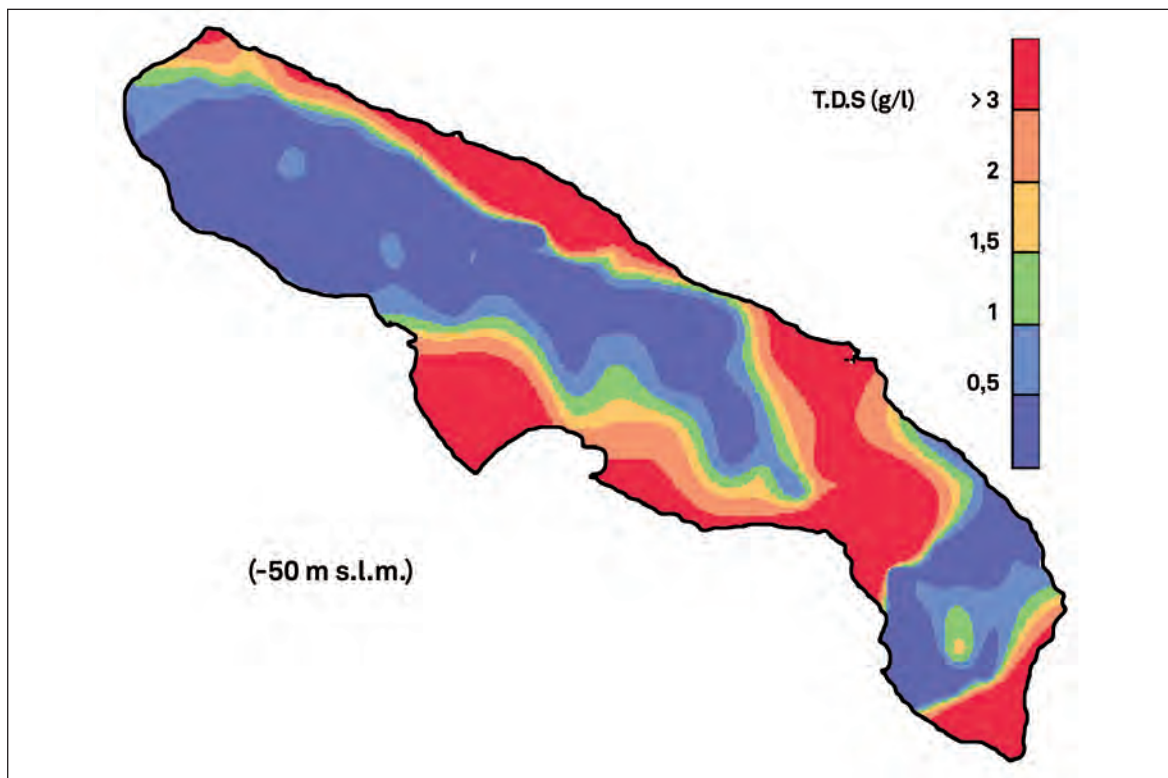
## REGIONE PUGLIA

Per la Regione Puglia non è stato possibile disporre dei dati di monitoraggio dei pozzi della penisola Salentina perché, pur essendo pubblicati come file pdf in forma tabellare, statica e protetta (Piano di Tutela Acque della Regione Puglia – Sogesid S.p.A.), non si è potuto ricavarne la posizione geografica, a causa della lunghezza temporale delle procedure per riacquisire il dato in formato digitale.

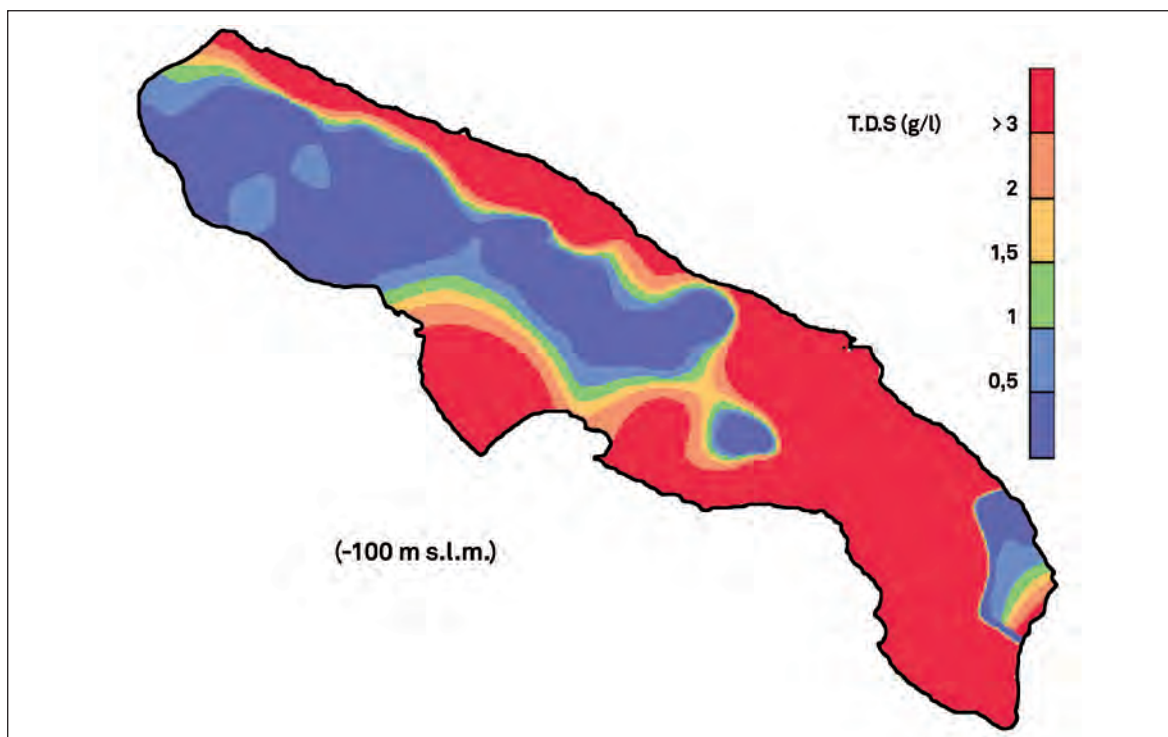
Si è quindi optato per utilizzare le informazioni, quantomeno rappresentative delle condizioni generali dell'area, provenienti dalle immagini statiche della distribuzione dei Solidi Disciolti (TDS) nelle falde a 50 e 100 m di profondità, disponibili per il territorio centro-meridionale della Puglia e pubblicate nello stesso volume citato.

Le immagini originali sono le seguenti:

**Figura 106. Spazializzazione dei valori di TDS (g/l) ad una profondità di -50 m s.l.m. per la Penisola Salentina (da Piano di Tutela Acque della Regione Puglia, SOGESID 2005)**

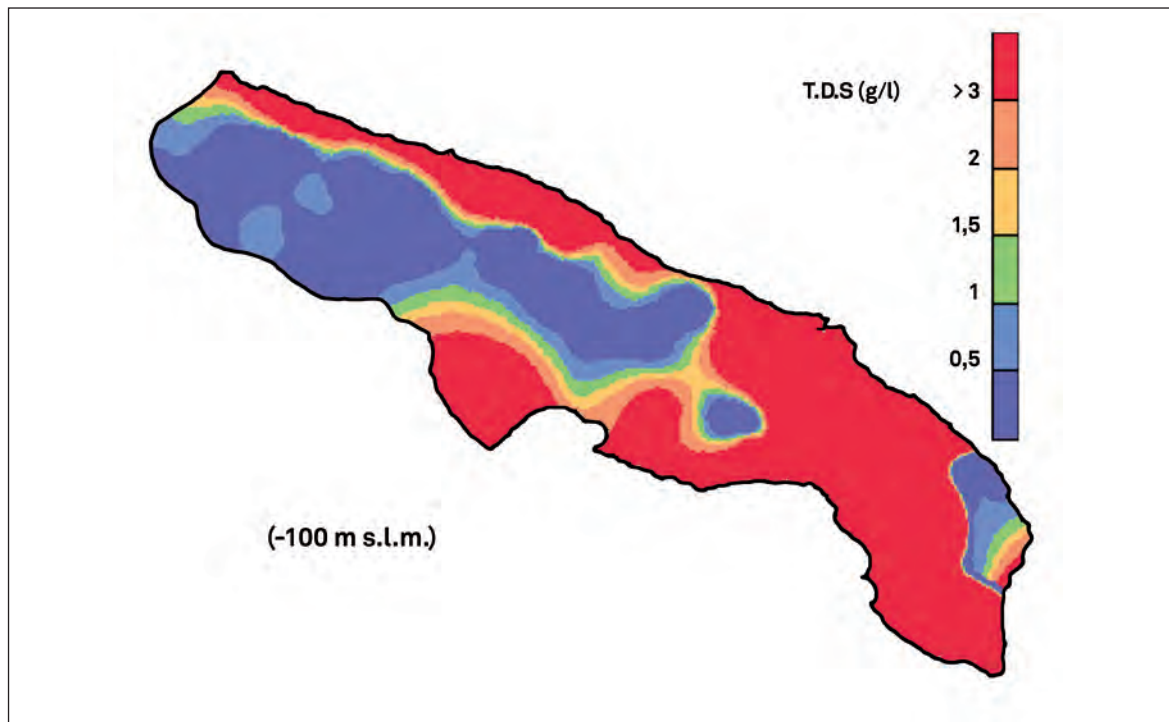


**Figura 107. Spazializzazione dei valori di TDS (g/l) ad una profondità di -100 m s.l.m. per la Penisola Salentina (da Piano di Tutela Acque della Regione Puglia, SOGESID 2005)**



Le immagini, estratte dal file pdf, sono state georeferenziate, col software GRASS, sulla base dei confini regionali, disponibili in proiezione UTM 32N/WGS84 (figura 108).

**Figura 108. Esempio di georeferenziazione della immagine di figura 107 e riporto su confini regionali per l'utilizzazione successiva del dato nei SST.**



I successivi step di elaborazione sono stati:

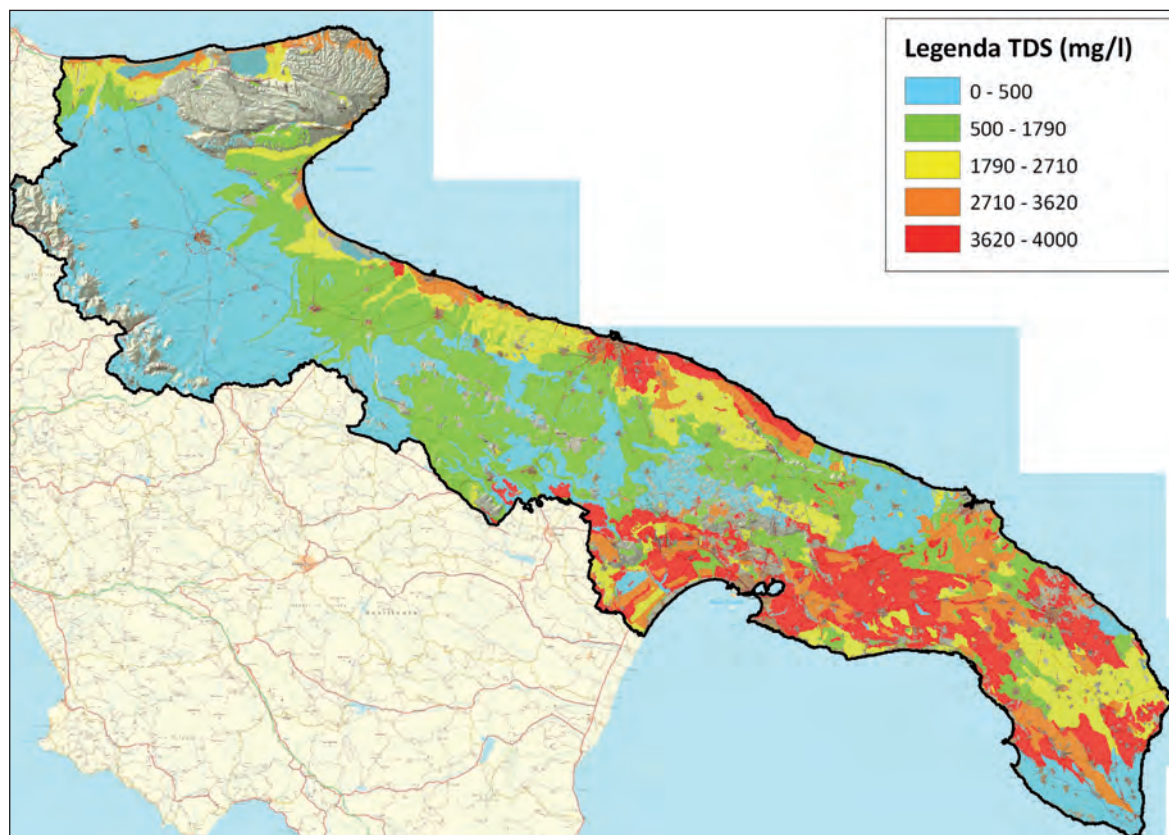
Riclassificazione delle immagini da colore RGB a classi di TDS (derivate dalla legenda). Dovendo ricavare un valore univoco di TDS, è stato adottato il seguente schema di mappatura dei valori:

Limite di classe in legenda	Valore medio adottato per l'utilizzo in formato GRID
< 0,5	0,5
0,5-1	0,75
1-1,5	1,25
1,5-2	1,75
2-3	2,5
>3	3,5

- Calcolo della media dei valori delle due immagini tramite raster-algebra. È stato considerato il valore medio compreso tra le due profondità poiché, dai dati tabellari, risulta che la maggior parte dei pozzi si attestano all'interno di questo range di quote;
- Calcolo dei valori medio (ponderato) e massimo di TDS per ogni SST, come statistiche del raster all'interno di ogni poligono.

Per l'area del Tavoliere e Gargano sono stati invece utilizzati i dati del monitoraggio pozzi provenienti dal lavoro di Di Pace e Baldassarre (2005, figura 53 e tabella 14 in capitolo "lo stato della contaminazione salina negli acquiferi costieri della Puglia"), in quanto il Piano Acque non aveva provveduto a spazializzare i dati per queste aree. Il risultato su base territoriale dei Sottosistemi di terre è riportato in figura 109.

**Figura 109. Spazializzazione delle acque di pozzo (TDS in mg/l) riportata su base dei Sottosistemi di Terre nelle aree di studio della Regione Puglia**



Le statistiche finali per l'elaborazione effettuata sono:

- Numero poligoni (SST): 1.795
- TDS medi (mg/l): 1.635,5
- TDS minimi (mg/l): 500
- TDS massimi (mg/l): 4.000
- Deviazione Standard: 1.406,9

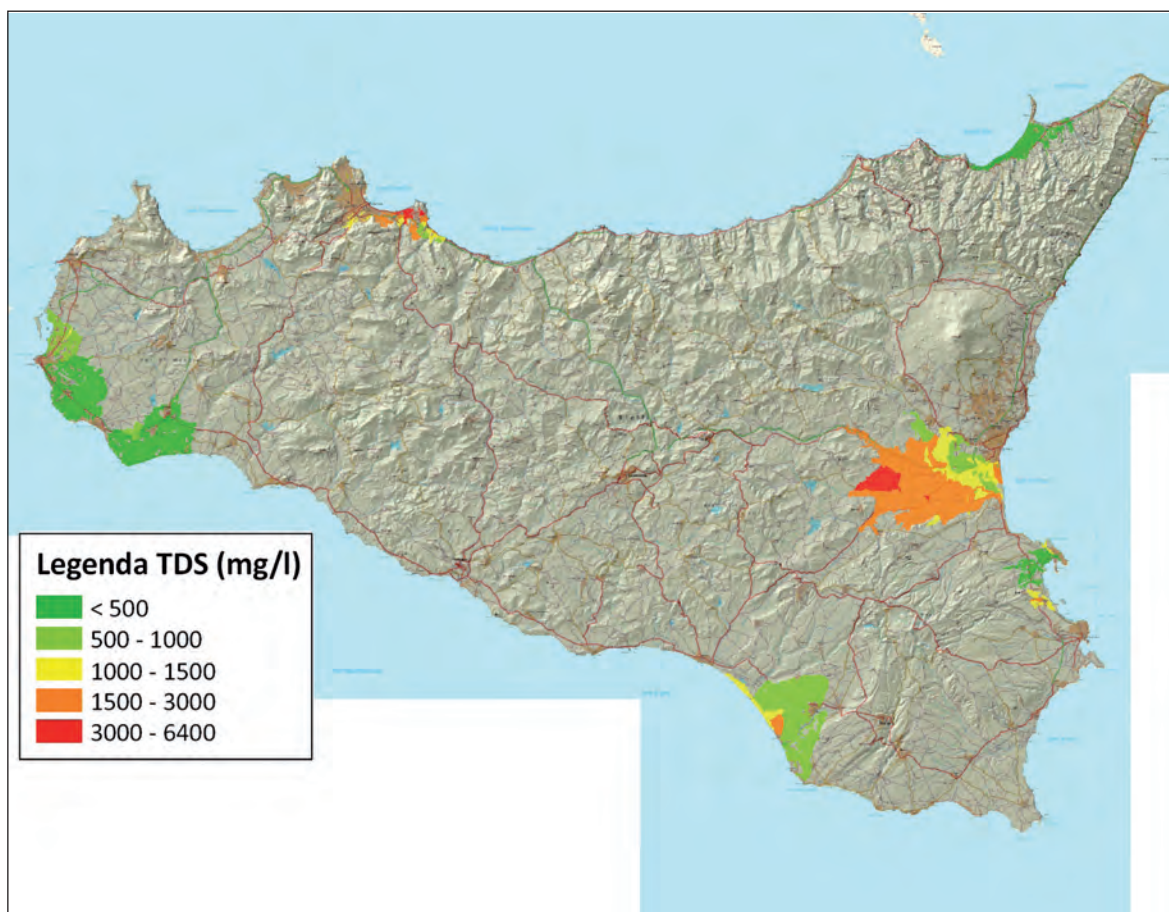
## REGIONE SICILIA

Per la Regione Sicilia sono stati utilizzati i dati provenienti dalle mappe di distribuzione dei cloruri in falda (Piano Tutela Acque Regione Sicilia, SOGESID 2005), georeferenziate, acquisite sottoforma vettoriale, trasformate in raster e riportate su base dei Sottosistemi di Terre (vedi capitolo precedente sullo “stato della contaminazione salina negli acquiferi costieri della sicilia”).

La trasformazione da mappe di contenuto in cloruri a mappe di TDS (contenuto totale in Sali disciolti) è stata effettuata, come in precedenza citato, avendo come riferimento un fattore medio di trasformazione di 0.4 ( $TDS = Cl (mg/l) / 0.4$ ).

Il risultato su base territoriale dei Sottosistemi di terre è riportato nella seguente figura 110.

Figura 110. Spazializzazione delle acque di pozzo (TDS in mg/l) riportata su base dei Sottosistemi di Terre nelle aree di studio della Regione Sicilia



Le statistiche finali per l'elaborazione effettuata sono:

- Numero poligoni (SST): 251
- TDS medi (mg/l): 935,9
- TDS minimi (mg/l): 60,5
- TDS massimi (mg/l): 6.400
- Deviazione Standard: 1.011,5

#### **6.4.5 Applicazione del modello di calcolo e previsione dell'andamento dei sali nel sistema suolo-clima-coltura-tecnica**

**Individuazione dei casi da simulare e preparazione dei file di input per il modello nel database**

La matrice dei casi da simulare deriva dalla combinazione di suoli, colture e climi presenti nelle aree di ogni regione individuate nel paragrafo precedente. Vale a dire quei Sottosistemi di Terre che hanno acque irrigue utilizzate con valore medio superiore alla soglia di salinità corrispondenti a  $EC_e > 0,7$  dS ( $> 480$  TDS mg/l); ognuna di queste combinazioni è stata riprodotta per 12 anni (dal 1996 al 2007), per i 2 livelli di salinità delle

acque irrigue (medio e massimo) e per i 2 scenari di strategia irrigua. I risultati della simulazione di ogni anno vengono utilizzati come input dell'anno successivo. In questo modo, il contenuto salino nel suolo nell'ultimo anno della serie simulata rappresenta il presumibile risultato di medio-lungo periodo, in termini di rischio di salinizzazione, della combinazione di suolo, coltura, clima, strategia irrigua e contenuto salino dell'acqua irrigua. Durante la simulazione, applicata quindi per i 365 giorni di ognuno degli anni del periodo considerato (1996-2007), i dati di input relativi ai parametri colturali e allo scenario di gestione irrigua (tipo di sistema irriguo, numero degli interventi e loro disposizione temporale, intensità e durata dell'evento), nonché la qualità di acqua irrigua (contenuto in sale NaCl ottenuto da spazializzazione del dato medio su Sottosistema di terre, come da precedente capitolo), sono stati considerati costanti. L'andamento climatico del decennio preso in considerazione si riferisce al passato: si è considerato preferibile utilizzare l'ultimo decennio di dati misurati, piuttosto che applicare uno scenario futuro da ottenere con modellistica (weather generator), che a nostro giudizio avrebbe potuto avere una affidabilità minore. Si considera quindi il trend dell'ultimo decennio come affidabile e rappresentativo di un possibile scenario per questo tipo di valutazione territoriale. Il database MODELLO REL ha fornito i dati di input per il riaggancio ai Sottosistemi di terre considerati oggetto dello studio, vale a dire quelli in cui è stato assegnato un valore di acque irrigue da pozzi "saline" ( $EC_e > 0,7$  dS/m). Dal codice di Sottosistema sono stati recuperati i dati di suoli (STS), colture, tecniche, e tipi di clima afferenti. E' stata quindi costruita la matrice di casi-studio da simulare.

### Tipologia dati di input per modello SWAP

Il modello SWAP richiede i seguenti file di input in formato testo:

1. file principale (\*.SWP), suddiviso nelle seguenti sezioni maggiormente significative:
  - SEZIONE GENERALE: ambiente, periodo di simulazione, date in cui generare gli output
  - SEZIONE METEOROLOGIA: nome del file contenente i dati meteorologici (senza .YYY)
  - SEZIONE COLTURA: schema di rotazione colturale durante il periodo di simulazione, apporti irrigui (data, quantità, concentrazione di sali, tecnica)
  - SEZIONE SUOLO: discretizzazione verticale del profilo di suolo, contenuto idrico iniziale, caratteristiche idrologiche, profondità massima di radicazione, flusso preferenziale attraverso i macropori, criteri per la soluzione numerica dell'equazione di Richards
  - SEZIONE DRENAGGIO LATERALE
  - SEZIONE CONDIZIONI AL CONTORNO INFERIORE
  - SEZIONE FLUSSO DI CALORE
  - SEZIONE SOLUTI: concentrazione iniziale di soluto nel suolo in funzione della profondità, caratteristiche di diffusione, dispersione, e uptake da parte delle radici, adsorbimento, decomposizione
2. file meteo annuale (\*.YYY, dove YYY corrisponde alle ultime 3 cifre dell'anno)
3. file relativo alla coltura (\*.CRP):
  - durata del ciclo, LAI e profondità radicale in funzione dello stadio di sviluppo, valori soglia dei potenziali idrici nel suolo, valore soglia per lo stress da Sali, ge-



ometria dell'apparato radicale

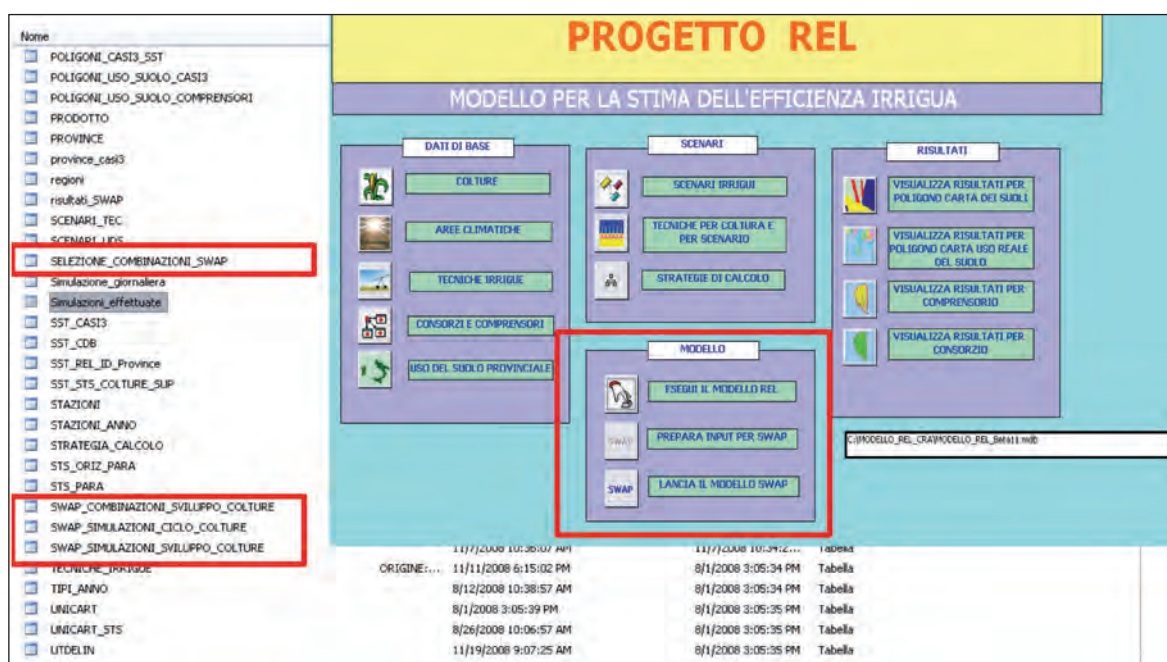
4. file relativo al drenaggio (\*.DRA):

- non usato in quanto le situazioni reali sono estremamente variabili e non tipizzabili (adottati valori di default)

È stata realizzata una procedura in Visual Basic che produce tutti i file di input necessari direttamente dall'interfaccia del database MODELLO REL (figura xxx), nel formato richiesto, e per tutte le combinazioni da simulare. I dati necessari a compilare i file di input sono reperiti a seconda dei casi da:

1. Tabelle già descritte in quanto utilizzate in altri punti del modello complessivo (ad esempio dalla tabella contenente i dati meteorologici giornalieri per le stazioni di riferimento, la tabella STS\_ORIZZ\_PARA, contenente le caratteristiche idrologiche degli orizzonti di suolo, ecc.);
2. Risultati delle elaborazioni prodotte per il calcolo dei fabbisogni irrigui (ad esempio ciclo e durata della coltura, caratteristiche degli interventi irrigui);
3. Tabelle o campi di tabelle appositamente predisposti e compilati (ad esempio la tabella PARAMETRI\_SWAP contenente i parametri colturali specifici per il modello SWAP, i campi SALIN\_MED e SALIN\_MAX della tabella UTDELIN).

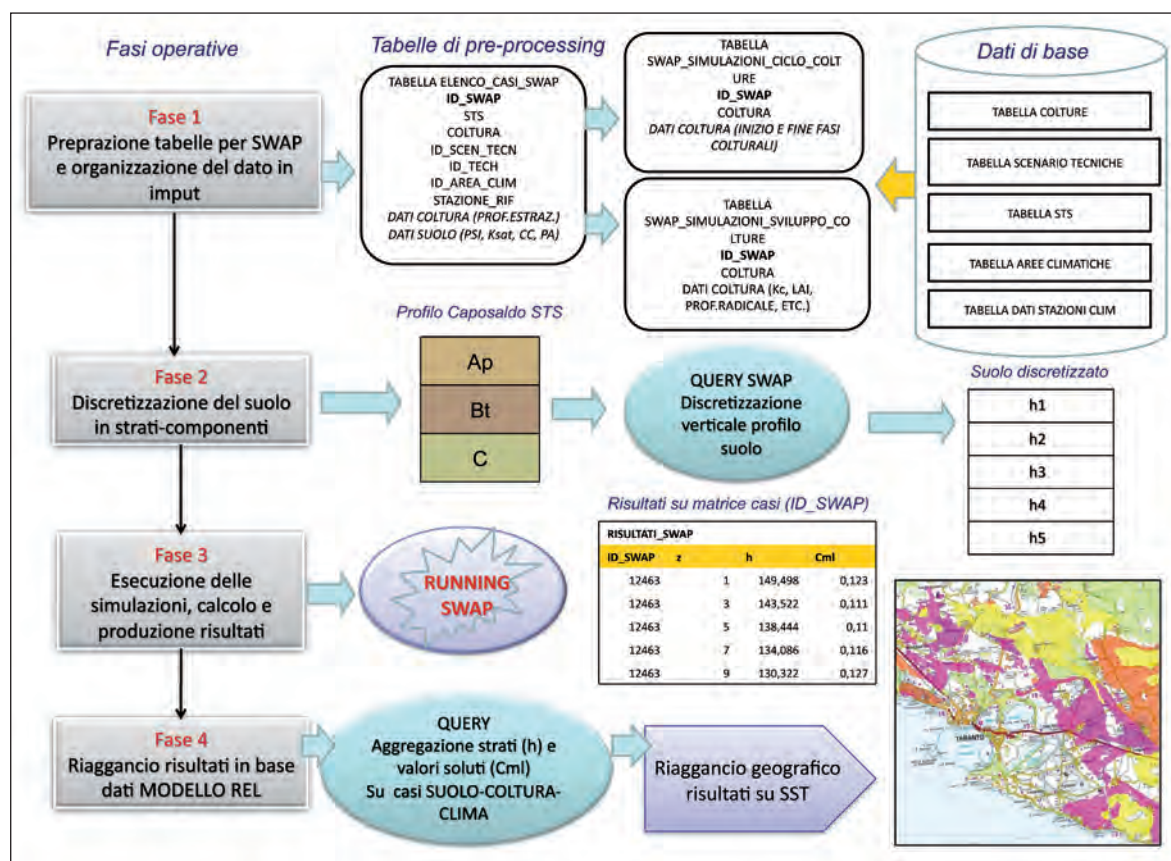
Figura 111. Interfaccia di gestione e tabelle del database MODELLO REL utilizzate e popolate con procedura Visual basic



## Pre-processing dei dati per il lancio del modello di accumulo soluti

Il diagramma di flusso delle operazioni di pre-processing dei dati nella base dati MODELLO REL è schematizzata nella figura 112 seguente.

Figura 112. Diagramma di flusso delle varie fasi operative di pre-processing dei dati, esecuzione delle simulazioni e riaggancio geografico dei risultati.



### Fase 1. Preparazione tabelle per SWAP e organizzazione del dato in input

Nella tabella generata ELENCO\_CASI\_SWAP compare la matrice di tutti i casi per regione di suolo (STS), codice coltura (COLTURA), scenario di tecnica irrigua (ID\_SCEN\_TECN) e i corrispondenti tipi di tecnica (ID\_TECN), intensità, durata e soglia di intervento irriguo, area climatica (ID\_AREA\_CLIM), stazione di riferimento (STAZIONE\_RIF), la profondità di estrazione radicale (profondità\_estrax) e del suolo (profondità\_suolo), ed alcuni parametri idrologici del suolo stesso (PSI, Ksat, Sat\_sup, FC\_sup e WP\_sup). Tali dati sono ripresi dalle elaborazioni effettuate dallo studio del calcolo dei fabbisogni irrigui per la linea A1 dello stesso progetto REL.

Nella stessa tabella è stata identificata una chiave di sviluppo, come codice composto delle principali tipologie di dati (regione, suolo, area climatica, coltura, scenario di tecnica gestionale), che ha consentito di numerare la casistica con un campo identificativo numerico univoco (ID\_SWAP): tale passaggio si è reso necessario per potere avere un codice-chiave a cui legare l'elaborazione in esterno del modello SWAP.

Sono state preparate anche le due tabelle contenenti dati di tipo colturale, SWAP\_SIMULAZIONI\_CICLO\_COLTURE, con dati sul giorno di inizio e fine delle fasi colturali e

SWAP\_SIMULAZIONI\_SVILUPPO\_COLTURE, contenente i dati di variazione di parametri colturali Kc, LAI e Profondità radicale (Prof\_rad) e le date corrispondenti comprese nel periodo di inizio e fine ciclo; in entrambe le tabelle tali dati sono riferiti ad ogni combinazione dei casi previsti (chiave di sviluppo).

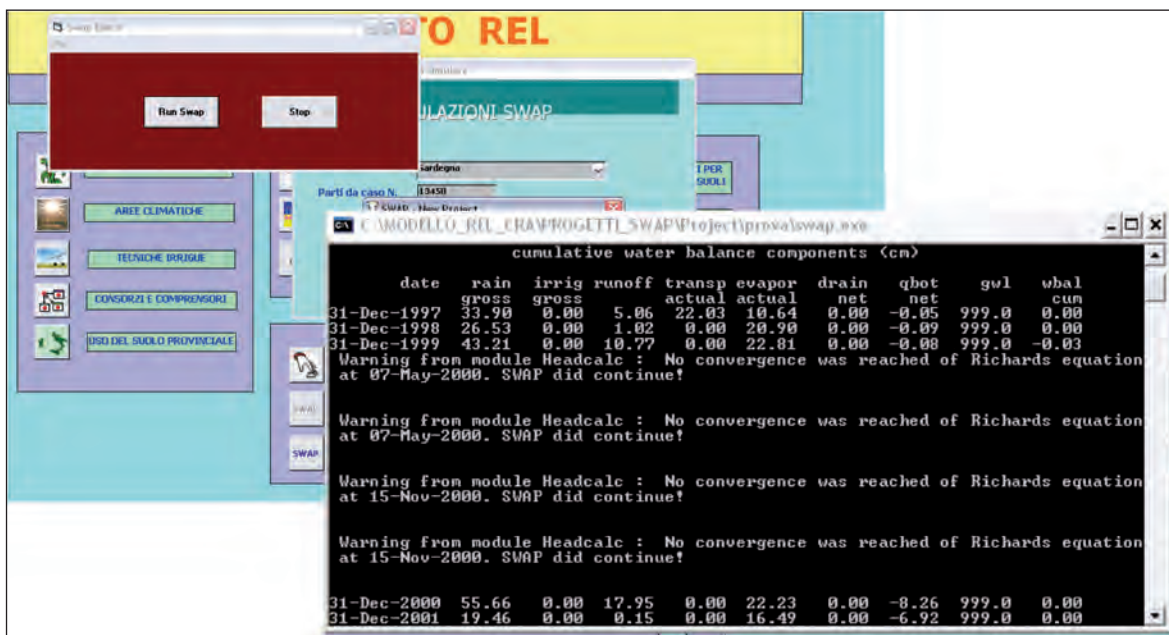
### Fase 2. Discretizzazione del suolo in strati-componenti

In questa fase è stato necessario suddividere gli orizzonti di ogni suolo di riferimento della tipologia (STS) che compare nella matrice di elenco dei casi, con una apposita procedura (query SWAP\_Vertical discretization of soil profile), in modo da strutturare il dato del suolo in maniera confacente al modello, per strati di pochi centimetri per tutta la sua profondità.

### Fase 3. Esecuzione delle simulazioni, calcolo e produzione risultati

La stessa procedura in Visual Basic che produce i file di input fa eseguire direttamente dalla maschera di Modello REL al programma SWAP (SWAP.EXE) tutte le combinazioni da simulare, ognuna delle quali è rappresentata da un univoco file \*.SWP, nel quale sono indicati tutti gli altri file di input necessari per la combinazione (figura 113).

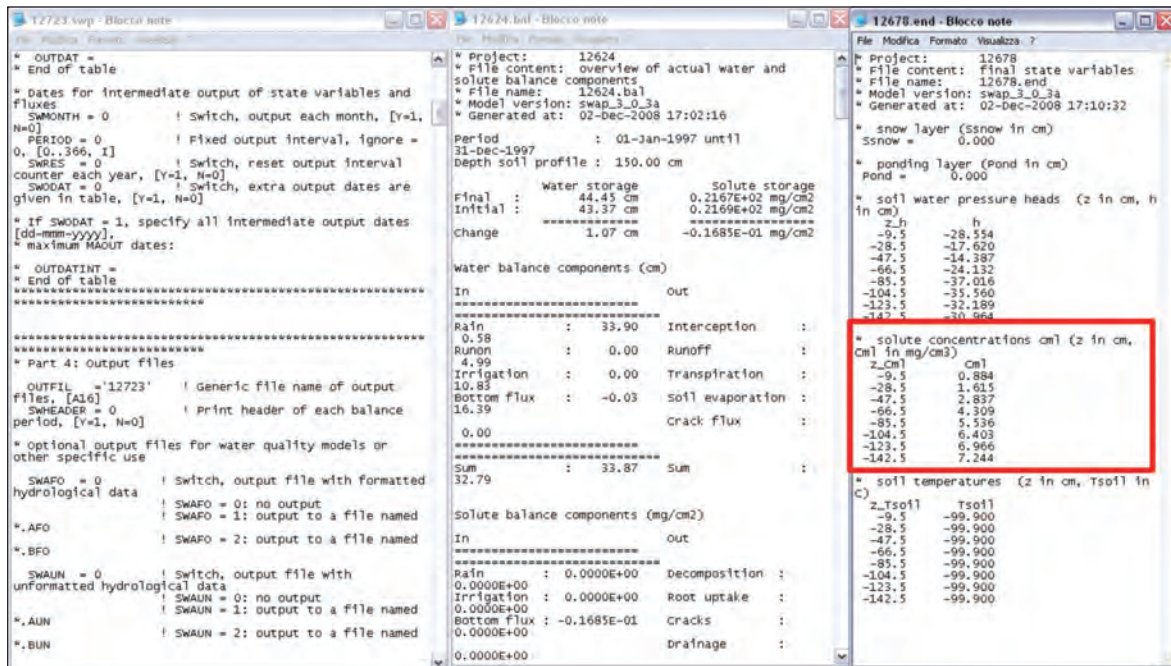
Figura 113. Esempio di finestra di lancio del programma swap DALL'INTERFACCIA Modello REL e finestra di dos per le simulazioni in catena (batch)



### Fase 4. Riaggancio risultati in base dati MODELLO REL

Sulla base della parametrizzazione di input generata per ogni caso collegato alla matrice, il modello di simulazione SWAP restituisce come risultati una serie di files di testo \*.end, secondo una numerazione legata alla matrice di variabilità stessa. E' possibile quindi, per ogni caso suolo-clima-coltura-tecnica, leggere sia le parametrizzazioni in ingresso relative al bilancio idrico (water balance), che all'accumulo finale di soluti, sottoforma di concentrazione di soluto (mg/cm<sup>3</sup>) per i vari strati predisposti (z, in cm) (figura 114).

Figura 114. Esempio di risultati in file testo per il caso di matrice con ID\_SWAP = 12723. In riquadro rosso il bilancio finale dell'accumulo di sale negli strati considerati (solute concentration).



Una procedura, scritta in Open Source (Python), accede ai file di output di SWAP \*.end (scritti anch'essi in formato testo), legge i valori finali di contenuto in sali nei vari orizzonti del suolo e li trascrive in una tabella \*.dbf che è poi stata reimportata nel db MODELLO\_REL, con nome di RISULTATI\_SWAP. In questa tabella i dati di accumulo a fine simulazione sono riportati con il riferimento al codice ID\_SWAP numerico univoco e sono espressi per ogni strato discretizzato in:

- **z** – spessore in cm dello strato
- **h** – contenuto in acqua % a fine simulazione
- **Cml** – contenuto in soluti in mg/cm<sup>3</sup> di suolo

Per procedere al “riaggancio” di questi risultati alla casistica suolo-clima-coltura-tecnica e poterli così utilizzare per la valutazione finale, sono state effettuate varie trasformazioni:

- innanzitutto il valore di contenuto di Sali è stato riportato alla condizione di saturazione (pasta satura) della matrice di suolo;
- successivamente si è trasformato il valore da mg/cm<sup>3</sup> a ECe (dS/cm);
- infine è stato riagganciato il dato tramite il legame ID\_SWAP con la chiave di sviluppo alla singola combinazione di suolo (STS), area climatica, coltura e scenario (tabella ELENCO\_CASI\_SWAP). I dati così “normalizzati” sono stati utilizzati per il ricollegamento geografico ai Sottosistemi di Terre per la valutazione finale.

Nella valutazione di superamento della soglia critica di valori di ECe nel suolo per ogni situazione di coltura e di gestione data, i criteri utilizzati per l'aggregazione del dato dei singoli strati discretizzati sono stati interrogati tenendo conto del superamento della soglia fino ad un massimo di 50 cm di profondità del suolo per le colture di tipo “Erbacee” e fino a 80 cm per le colture di tipo “Arboree”.

## 6.5 Risultati della modellizzazione del rischio di salinizzazione dei suoli

### 6.5.1 Determinazione dell'area potenzialmente non idonea per superamento delle soglie di salinità dei suoli

Sulla base della analisi delle basi dati pedologiche e del rapporto tra Tipologia di Suolo (STS) e percentuale media provinciale di distribuzione delle colture secondo l'ISTAT (dati INEA), tratti dal database Colture e Pedologia del Modello REL, è stato possibile definire l'ubicazione e l'estensione delle aree "potenzialmente" non idonee per livelli di salinità del suolo eccessivi per le varie colture, secondo le percentuali di distribuzione ISTAT provinciali riprese dal database Modello REL (tabella 27). Ci si è inoltre riferiti, per l'introduzione di diversi scenari di tecniche irrigue, alla suddivisione proposta nella pubblicazione riguardante la *Stima dei fabbisogni irrigui nelle aree non servite da reti collettive dei Consorzi di Bonifica nelle Regioni Meridionali* (Nino, 2009), nella quale si riportano i risultati di un'altra linea di studio effettuata all'interno del medesimo Progetto. In tale studio si sono "costruiti" i seguenti scenari di tecniche irrigue:

- Scenario a basso input tecnologico aziendale, caratterizzato dall'utilizzo diffuso di tecniche irrigue più estensive e meno efficienti;
- Scenario ad alto input tecnologico aziendale, caratterizzato dall'utilizzo diffuso di tecniche irrigue più intensive ed efficienti.

Per ogni coltura e per ogni scenario irriguo si sono definite, in termini di tipo, durata e intensità, le caratteristiche degli interventi irrigui standard. Le caratteristiche irrigue non variano in funzione dell'ambito territoriale, in quanto non erano disponibili informazioni sufficienti a differenziare le caratteristiche ad un maggiore livello di dettaglio. Per ogni ulteriore e dettagliato approfondimento, si rimanda allo studio sopracitato (Nino, 2009).

La non idoneità è stata rapportata, a tre casi di riferimento:

- 1) **Caso attuale:** superficie potenzialmente non idonea a causa di suoli già salini ed irrigati con acque saline. Vale a dire quanta superficie è già non idonea in una data Provincia per una data coltura a causa del livello attuale di salinità dei suoli;
- 2) **Caso di simulazione con scenario a basso input tecnologico aziendale (scenario 1):** superficie potenzialmente non idonea per una determinata coltura nella Provincia considerata, mantenendo quello scenario di tecnica irrigua costante per tutto l'arco temporale della simulazione (medio-lungo periodo);
- 3) **Caso di simulazione con scenario ad alto input tecnologico aziendale (scenario 2):** superficie potenzialmente non idonea per una determinata coltura nella Provincia considerata, mantenendo quello scenario di tecnica irrigua costante per tutto l'arco temporale della simulazione (medio-lungo periodo).

L'idoneità potenziale non fa riferimento alla percentuale reale (nel nostro caso dell'anno di riferimento 2005) di estensione in ettari delle colture irrigue in ogni provincia considerata, ma si riferisce ad una ipotesi di scenario previsionale su tutto il territorio provinciale per ogni singola coltura. Quindi il valore determinato in ettari fa riferimento alla perdita di area provinciale su ogni singolo caso specifico, considerando l'ipotesi di possibile espansione di quella coltura su tutta l'area provinciale potenzialmente irrigabile. Gli scenari previsti sono tre, come sopra riportato per i casi di riferimento.

Per esempio la superficie in ha della Provincia di Bari non è idonea per l'olivo irriguo

attualmente (caso 1, per suoli già salini e irrigati con acque saline con tecnica attuale) per 5.529,6 ha, vale a dire questa superficie ha una casistica di salinità dei suoli e/o delle acque irrigue per i quali si ritiene attualmente già superata la soglia di perdita di produttività del 40%, secondo il modello di Maas e Hoffman (1977, tabelle 26a-b-c), precedentemente citato, con una riduzione tale da rendere anti-economica la messa in atto di questa coltura irrigua.

Nella Tabella 27 gli ettari potenzialmente non idonei vengono riportati anche in percentuale sulla superficie totale irrigabile della Provincia; per completezza del raffronto e di valutazione sono inoltre riportate le superfici provinciali attualmente irrigue (INEA 2005) e quelle oggetto di simulazione irrigate con acque considerate saline (con valore soglia di 480 mg/l in TDS, corrispondenti a 0,7 dS/m di ECe).

### **6.5.2 Correzione dei risultati geografici con dati quantitativi di acqua servita da reti consortili**

Dopo avere configurato e riagganciato alle geografie delle aree omogenee (SST) i casi studio oggetto di simulazione, è stato necessario procedere ad una ulteriore correzione dei dati, tenendo presente che, nelle aree attrezzate irrigue (aree consortili), delle Regioni esaminate, molta parte dei comprensori stessi è comunque servita da acqua di rete. Tale risorsa può provenire da invasi e/o traverse, e/o da prese in alveo di corsi d'acqua e/o canali, che nella quasi totalità dei casi hanno acque di qualità controllata, inferiore ai limiti di salinità utilizzati nelle simulazioni. Ciò sta a significare che non era concettualmente corretto applicare i risultati di rischio di salinizzazione da acque di pozzo anche in queste aree, ma bisognava effettuare una operazione di correzione/modifica del dato.

Si è deciso quindi di operare in tal senso, attraverso le seguenti fasi:

1. Sono stati recuperati i dati inerenti le aree servite (sia in estensione che in quantità di acqua distribuita in relazione alle varie fonti), con trasformazione del dato in m<sup>3</sup>/ha;
2. Sulla base di tale dato, confrontandolo con i fabbisogni medi (m<sup>3</sup>/ha) di un determinato comprensorio, è stata ricavata la percentuale di superficie comprensoriale servita;
3. Tali dati sono stati armonizzati e trasformati in tabelle di database in modo da potere essere riagganciati alle aree dello stato geografico "Comprensori";
4. È stata fatta una intersezione geografica tra lo strato comprensori e le aree omogenee di studio (Sottosistemi di Terre), per valutare la percentuale di area (ha) dei SST servita da acque;
5. La percentuale comprensoriale servita da acqua di rete è stata ripercentralizzata sulla base della parte di area di SST di cui al punto precedente;
6. Il risultato finale è stato sottratto, per quota parte, al singolo poligono di Sottosistema di terre, come fattore di riduzione.

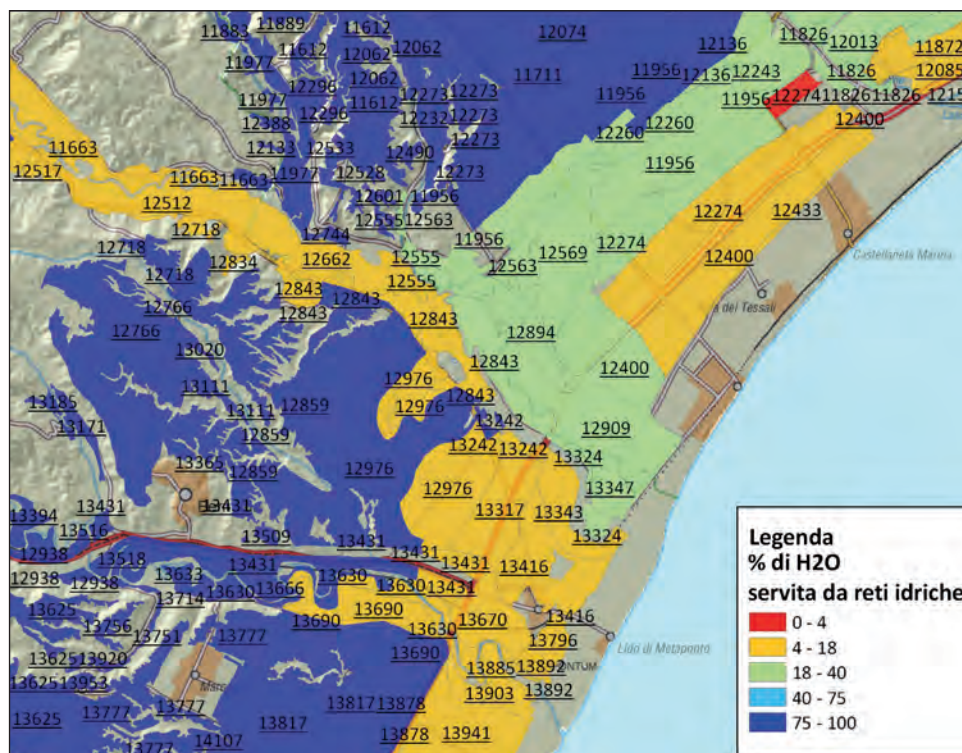
Si riporta a titolo di esempio la trasformazione dati relativamente ai passaggi tra area del Comprensorio e Sottosistemi di Terre, nella seguente tabella 27 ( Legenda campi finali: %\_tot\_sst = percentuale di area di SST ricadente nel Consorzio; h<sub>2</sub>o\_%\_tot = ripercentralizzazione sulla base del valore precedente di acque servite da rete consortile).

**Tabella 27. Estratto della tabella di database utilizzata per il calcolo della percentuale di correzione sulla base di aree consortili servite da acque di rete di alta qualità (non saline).**

SST_REL_ID	Comprensorio	Consortio	Percentuale H <sub>2</sub> O su sup. comprensoriale (a)	Somma ha servizi dell'intersezione tra SST e Comprensorio (b)	Area totali SST-ha (c)	%_tot_sst (d=b/c)	H2O_%_tot (e=a*d)
2325	Fortore	Capitanata	72,3	291,73	2.535,97	11,50	8,32
2444	Fortore	Capitanata	72,3	2.890,81	3.419,32	84,54	61,13
2456	Fortore	Capitanata	72,3	470,99	584,19	80,62	58,29
2480	Fortore	Capitanata	72,3	4,37	244,55	1,79	1,29
2485	Fortore	Capitanata	72,3	0,08	55,06	0,15	0,11
2496	Fortore	Capitanata	72,3	116,85	248,05	47,11	34,06
2497	Fortore	Capitanata	72,3	144,33	176,18	81,93	59,23
2512	Fortore	Capitanata	72,3	201,10	234,42	85,79	62,02

Come si può vedere la trasformazione ha portato al risultato finale di una determinata percentuale su base geografica di ogni poligono di SST servita da acque di qualità controllata (figura 115). Su questa base si è introdotto il risultato come correttivo, in termini di area, a quanto risultante dalle simulazioni sui poligoni dei Sottosistemi di terre con stesso codice identificativo. Questa correzione ha di fatto tolto quella percentuale dalle percentuali di rischio calcolate per ogni coltura ed ogni scenario all'interno delle aree consortili. Anche se questa procedura di correzione appare concettualmente corretta, è evidente che affinché si ottengano risultati veritieri è necessario presupporre che tutta la risorsa idrica stimata come annualmente disponibile per l'agricoltura sia effettivamente utilizzata in maniera efficiente, vale a dire non ci siano riduzioni dovute a cattiva o impropria gestione e/o perdite di rete, e che venga distribuita in maniera uniforme percentualmente all'ampiezza delle aree Consortili.

**Figura 115. Esempio di riaggancio del dato correttivo introdotto su ogni parte dei SST ricadente nelle aree consorziali - Consortio Bradano Metaponto**



**Tabella 28. Superfici potenzialmente non idonee a causa di superamento di soglia di salinità nel suolo, per provincia e coltura, per i tre casi di scenario (attuale, e simulato con tecniche di basso e di alto input su medio-lungo periodo)**

**Regione Puglia**

Provincia	Superficie Irrigua (ha)	Aree potenzialmente irrigabile (ha)	Superficie potenzialmente irrigua (ha) interessata da utilizzo di acque saline	Coltura	Superficie non idonea caso (1) con condizioni di salinità suoli attuali (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (2) simulato su lungo periodo con scenario tecnica basso input (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (3) simulato su lungo periodo con scenario tecnica alto input (ha)	% su totale interessata da acque saline
Bari				Brassicacee	-	-	-	-	-	-
				Ciliegio	11.415,00	3,36	52.442,30	11,16	48.871,80	10,40
				Erbai a semina primaverile estiva	-	-	-	-	-	-
				Fagiolo	23.004,50	6,77	51.840,70	11,03	51.392,70	10,94
				Insalate	5.605,40	1,65	15.484,50	3,29	10.650,50	2,27
				Mandorlo	9.483,80	2,79	129.615,60	27,58	126.015,70	26,81
				Melo	9.483,80	2,79	86.364,10	18,38	93.205,10	19,83
		72.355,3	469.954,9	339.851,2	Olivo irriguo	5.529,50	1,63	-	-	-
				Patata	-	-	18.917,70	4,03	20.495,50	4,36
				Pomodoro	-	-	8.964,50	1,91	6.295,40	1,34
				Sedano	-	-	8.270,30	1,76	462,40	0,10
				Tabacco	-	-	-	-	-	-
				Vite	5.529,50	1,63	41.422,80	8,81	38.619,70	8,22
	Brindisi				Zucchina	-	-	3.278,50	0,70	2.173,60
				Barbabietola da zucchero	-	-	-	-	-	-
				Brassicacee	-	-	-	-	-	-
				Carciofo	-	-	-	-	-	-
				Cocomero	-	-	1.550,80	0,97	3.689,70	2,31
				Erbai a semina primav. est.	-	-	-	-	-	-
				Finocchio	5.527,10	4,29	3.600,50	2,26	3.600,50	2,26
				Mandorlo	5.527,10	4,29	56.884,40	35,64	58.409,30	36,59
		21.115,4	159.613,2	128.791,3	Olivo irriguo	320,30	0,25	-	-	-
				Pero	5.527,10	4,29	23.475,70	14,71	26.390,80	16,53
				Pesco	5.527,10	4,29	46.004,50	28,82	48.037,50	30,10
				Pisello	12.549,70	9,74	17.764,90	11,13	17.764,90	11,13
				Pomodoro	320,30	0,25	5.142,40	3,22	3.632,60	2,28
				Sedano	-	-	-	-	-	-
			Vite	1.060,50	0,82	27.718,40	17,37	29.325,00	18,37	

segue >>



Regione Puglia > segue >>

Provincia	Superficie Irrigua (ha)	Aree potenzialmente irrigabile (ha)	Superficie potenzialmente irrigua (ha) interessata da utilizzo di acque saline	Coltura	Superficie non idonea caso (1) con condizioni di salinità suoli attuali (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (2) simulato su lungo periodo con scenario tecnico basso input (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (3) simulato su lungo periodo con scenario tecnico alto input (ha)	% su totale interessata da acque saline	
Foggia				Arancio	18.395,30	12,13	5.864,20	1,15	5.526,90	1,08	
				Asparago	3.411,80	2,25	-	-	-	-	
				Barbabetola da zucchero	3.411,80	2,25	5.441,20	1,06	5.441,20	1,06	
				Brassicacee	3.411,80	2,25	793,60	0,16	912,60	0,18	
				Carciofo	3.411,80	2,25	4.867,80	0,95	4.805,50	0,94	
				Fagiolo	26.509,90	17,48	68.927,60	13,47	51.650,60	10,09	
				Finocchio	10.996,20	7,25	8.193,10	1,60	5.707,40	1,11	
		98.193,7	511.895,4	151.667,6	Mandorlo	20.556,30	13,55	102.282,40	19,98	106.458,80	20,80
				Melone	3.411,80	2,25	14.407,20	2,81	14.095,90	2,75	
				Olivo irriguo	4.412,30	2,91	62,30	0,01	84,40	0,02	
				Pesco	20.556,30	13,55	108.715,70	21,24	103.760,00	20,27	
				Pomodoro	3.411,80	2,25	11.821,40	2,31	10.053,40	1,96	
				Prati di leguminose	3.411,80	2,25	1.435,70	0,28	1.435,70	0,28	
				Vite	8.546,10	5,63	78.029,70	15,24	71.334,60	13,94	
	Lecce				Arancio	8.611,80	4,37	25.482,70	9,86	26.446,90	10,23
				Barbabetola da orto	-	-	-	-	-	-	
				Brassicacee	-	-	-	-	-	-	
				Cocomero	-	-	12.820,50	4,96	17.812,60	6,89	
				Fagiolo	9.579,90	4,87	60.432,30	23,37	43.094,50	16,67	
				Insalate	5.006,90	2,54	23.098,80	8,93	21.900,30	8,47	
				Mais	-	-	82,70	0,03	82,70	0,03	
		33.143,9	258.573,3	196.867,7	Mandorlo	8.999,00	4,57	148.596,70	57,47	151.978,00	58,78
				Olivo irriguo	21,80	0,01	-	-	-	-	
				Patata	21,80	0,01	31.649,10	12,24	37.377,70	14,46	
				Pesco	8.999,00	4,57	119.351,80	46,16	134.411,60	51,98	
				Pomodoro	21,80	0,01	23.072,80	8,92	26.630,50	10,30	
				Tabacco	-	-	-	-	-	-	
				Vite	21,80	0,01	85.443,10	33,04	74.530,90	28,82	

segue >>

Provincia	Superficie irrigua (ha)	Aree potenzialmente irrigabili (ha)	Superficie potenzialmente irrigua (ha) interessata da utilizzo di acque saline	Coltura	Superficie non idonea caso (1) con condizioni di salinità suoli attuali (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (2) simulato su lungo periodo con scenario tecnica basso input (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (3) simulato su lungo periodo con scenario tecnica alto input (ha)	% su totale interessata da acque saline
				Albicocco	24.490,70	14,64	125.674,00	72,90	124.286,10	72,10
				Arancio	20.407,80	12,20	46.700,50	27,09	42.774,90	24,81
				Barbabetola da zucchero	1.348,30	0,81	3.442,30	2,00	3.442,30	2,00
				Brassicacee	1.384,80	0,83	-	-	-	-
				Cocomero	1.348,30	0,81	4.626,70	2,68	22.845,10	13,25
				Fagiolo	24.185,20	14,46	94.217,00	54,66	79.209,80	45,95
				Finocchio	12.341,20	7,38	25.750,10	14,94	30.852,00	17,90
				Insalate	10.017,00	5,99	33.388,20	19,37	37.499,80	21,75
				Mandorlo	20.407,80	12,20	129.921,20	75,37	133.366,20	77,37
				Olivo irriguo	1.348,30	0,81	1.245,10	0,72	1.245,10	0,72
				Pomodoro	1.384,80	0,83	4.797,30	27,83	44.046,60	25,55
				Prati di leguminose	1.348,30	0,81	4.700,80	2,73	4.700,80	2,73
				Spinacio	1.384,80	0,83	-	-	-	-
				Vite	11.819,60	7,07	96.611,50	56,05	91.137,40	52,87
Taranto	38.631,9	172.381,4	167.245,5							

## Regione Basilicata

Provincia	Superficie irrigua (ha)	Aree potenzialmente irrigabile (ha)	Superficie potenzialmente irrigua (ha) interessata da utilizzo di acque saline	Coltura	Superficie non idonea caso (1) con condizioni di salinità suoli attuali (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (2) simulato su lungo periodo con scenario tecnica basso input (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (3) simulato su lungo periodo con scenario tecnica alto input (ha)	% su totale interessata da acque saline
				Albicocco	13,40	0,04	16.826,70	10,48	20.296,90	12,64
				Arancio	11,60	0,04	96,40	0,06	80,30	0,05
				Asparago	-	-	2.703,60	1,68	2.703,60	1,68
				Barbabietola da zucchero	-	-	-	-	-	-
				Brassicacee	-	-	-	-	-	-
				Finocchio	-	-	271,20	0,17	78,30	0,05
				Fragola	46,30	0,15	12.005,00	7,47	30.435,60	18,95
				Insalate	-	-	4.224,20	2,63	178,40	0,11
				Mandorlo	11,60	0,04	20.369,20	12,68	21.572,30	13,43
				Melone	-	-	3.817,20	2,38	3.884,40	2,42
				Olivo irriguo	11,60	0,04	-	-	-	-
				Pisello	11,60	0,04	4.918,90	3,06	4.918,90	3,06
				Pomodoro	-	-	4.149,60	2,58	255,10	0,16
				Prati di leguminose	-	-	192,20	0,12	192,20	0,12
				Prati polifiti	-	-	-	-	-	-
				Vite	11,60	0,04	11.491,00	7,15	8.823,90	5,49
Matera	22.636,5	160.621,6	30.707,8							

## Regione Calabria

Provincia	Superficie irrigua (ha)	Aree potenzialmente irrigabile (ha)	Superficie potenzialmente irrigua (ha) interessata da utilizzo di acque saline	Cultura	Superficie non idonea caso (1) con condizioni di salinità suoli attuale (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (2) simulato su lungo periodo con scenario tecnica basso input (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (3) simulato su lungo periodo con scenario tecnica alto input (ha)	% su totale interessata da acque saline
				Asparago	-	-	0,40	0,00	0,40	0,00
				Barbabietola da zucchero	-	-	-	-	-	-
				Brassicacee	-	-	-	-	-	-
				Clementina	-	-	-	-	-	-
				Insalate	-	-	-	-	-	-
				Mandorlo	-	-	77,20	0,06	24,20	0,02
				Melone	-	-	53,10	0,04	53,10	0,04
				Olivo irriguo	-	-	-	-	-	-
				Patata	-	-	-	-	-	-
				Pesco	-	-	53,10	0,04	53,10	0,04
				Pisello	-	-	-	-	-	-
				Pomodoro	-	-	53,10	0,04	53,10	0,04
				Prati di leguminose	-	-	-	-	-	-
				Riso	-	-	-	-	-	-
				Vite	-	-	1,00	0,00	53,60	0,04
Cosenza	27.467,9	138.505,5	521,4							

## Regione Sardegna

Provincia	Superficie irrigua (ha)	Aree potenzialmente irrigabile (ha)	Superficie potenzialmente irrigua (ha) interessata da utilizzo di acque saline	Coltura	Superficie non idonea caso (1) con condizioni di salinità suoli attuali (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (2) simulato su lungo periodo con scenario tecnico basso input (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (3) simulato su lungo periodo con scenario tecnico alto input (ha)	% su totale interessata da acque saline	
Cagliari				Arancio	-	-	3.377,10	1,27	83,80	0,03	
				Barbabietola da zucchero	-	-	83,80	0,03	83,80	0,03	
				Brassicacee	-	-	555,20	0,21	555,20	0,21	
				Carciofo	-	-	-	-	-	-	
				Mandorlo	1,30	0,00	142.089,30	53,41	142.089,30	53,41	
				Olivo irriguo	-	-	83,80	0,03	83,80	0,03	
				Patata	-	-	555,20	0,21	9.285,60	3,49	
		46.514,1	266.043,1	142.089,4	Pesco	1,30	0,00	116.354,20	43,74	136.724,00	51,39
					Pisello	-	-	3.377,10	1,27	3.377,10	1,27
					Pomodoro	-	-	19.952,80	7,50	592,50	0,22
					Prati di leguminose	-	-	83,80	0,03	83,80	0,03
					Riso	-	-	-	-	-	-
					Sedano	-	-	83,80	0,03	83,80	0,03
					Vite	-	-	109.480,30	41,15	117.174,00	44,04
					Zucchina	-	-	555,20	0,21	4.825,30	1,81
	Nuoro				Arancio	-	-	2.849,80	2,18	2.849,80	2,18
					Brassicacee	-	-	-	-	2.610,30	2,00
				Carciofo	-	-	675,80	0,52	737,40	0,56	
				Fagiolo	-	-	3.101,10	2,37	4.577,00	3,50	
				Mandorlo	-	-	4.825,00	3,69	4.825,00	3,69	
				Melone	-	-	2.788,20	2,13	2.816,70	2,15	
		14.516,8	130.794,9	8.970,0	Olivo irriguo	-	-	-	-	-	
					Patata	-	-	61,60	0,05	61,60	0,05
					Pesco	-	-	5.064,50	3,87	5.064,50	3,87
					Pomodoro	-	-	-	-	61,60	0,05
					Prati di leguminose	-	-	-	-	-	-
					Prati polifiti	-	-	-	-	-	-
					Vite	-	-	4.503,10	3,44	4.531,60	3,46

segue >>

Provincia	Superficie irrigua (ha)	Aree potenzialmente irrigabile (ha)	Superficie potenzialmente irrigua (ha) interessata da utilizzo di acque saline	Coltura	Superficie non idonea caso (1) con condizioni di salinità suoli attuali (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (2) simulato su lungo periodo con scenario tecnica basso input (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (3) simulato su lungo periodo con scenario tecnica alto input (ha)	% su totale interessata da acque saline
Oristano				Arancio	1.574,10	2,39	1.319,60	0,86	1.319,60	0,86
				Barbabietola da zucchero	-	-	2.057,70	1,34	2.057,70	1,34
				Brassicacee	-	-	415,30	0,27	2.317,60	1,51
				Carciofo	-	-	242,70	0,16	242,70	0,16
				Cocomero	-	-	1.288,90	0,84	5.253,80	3,43
				Fagiolo	1.574,10	2,39	12.038,50	7,86	21.777,60	14,21
				Mandorlo	5.033,00	7,66	63.723,40	41,59	63.443,90	41,41
			65.726,6	Olivo irriguo	-	-	30,70	0,02	30,70	0,02
		32.021,8	153.220,8	Patata	1.574,10	2,39	1.288,90	0,84	11.326,70	7,39
				Pesco	5.033,00	7,66	58.400,30	38,12	65.726,70	42,90
				Pomodoro	-	-	1.288,90	0,84	6.238,10	4,07
				Prati di leguminose	-	-	242,70	0,16	242,70	0,16
				Riso	-	-	-	-	-	-
				Sedano	-	-	-	-	273,40	0,18
				Silomais	-	-	475,10	0,31	415,30	0,27
				Vite	1.574,10	2,39	58.935,70	38,46	47.247,20	30,84
	Sassari				Arancio	-	-	20.671,60	8,17	21.143,30
				Barbabietola da zucchero	-	-	3.038,00	1,20	3.038,00	1,20
				Brassicacee	-	-	3.374,00	1,33	952,20	0,38
				Carciofo	-	-	-	-	843,50	0,33
				Mandorlo	-	-	743,80	0,29	1.346,00	0,53
				Meione	-	-	17.331,00	6,85	18.049,00	7,14
				Olivo irriguo	-	-	9.795,80	3,87	10.020,10	3,96
		25.054,8	252.906,3	Patata	-	-	843,50	0,33	6.630,40	2,62
				Pesco	-	-	9.969,30	3,94	6.066,40	2,40
				Pisello	-	-	17.757,70	7,02	17.757,70	7,02
			31.594,1	Pomodoro	-	-	-	-	843,50	0,33
				Prati di leguminose	-	-	843,50	0,33	843,50	0,33
				Sedano	-	-	843,50	0,33	4.728,60	1,87
				Vite	-	-	262,70	0,10	262,70	0,10

## Regione Sicilia

Provincia	Superficie Irrigua (ha)	Area potenzialmente irrigabile (ha)	Superficie potenzialmente irrigua (ha) interessata da utilizzo di acque saline	Coltura	Superficie non idonea caso (1) con condizioni di salinità suoli attuative (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (2) simulato su lungo periodo con scenario tecnica basso input (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (3) simulato su lungo periodo con scenario tecnica alto input (ha)	% su totale interessata da acque saline
Caltanissetta				Arancio	-	-	-	-	-	-
				Brassicacee	-	-	-	-	-	-
				Carciofo	-	-	-	-	-	-
				Mandorlo	-	-	682,70	0,55	682,70	0,55
				Melone	-	-	-	-	-	-
				Olivo irriguo	-	-	-	-	-	-
			682,7	Patata	-	-	-	-	-	-
				Pesco	-	-	682,70	0,55	682,70	0,55
				Pisello	-	-	-	-	-	-
				Pomodoro	-	-	-	-	-	-
				Prati polifiti	-	-	-	-	-	-
				Spinacio	-	-	-	-	-	-
				Vite	-	-	-	-	682,70	0,55
	Catania				Arancio	20.465,50	44,42	5.055,50	2,84	4.663,90
				Barbabietola da orto	-	-	1.904,30	1,07	1.904,30	1,07
				Brassicacee	-	-	-	-	127,60	0,07
				Carciofo	-	-	-	-	-	-
				Cocomero	-	-	6.480,40	3,64	6.434,40	3,61
				Fragola	20.465,50	44,42	24.461,50	13,73	35.117,60	19,70
				Girasole	-	-	8.285,20	4,65	8.285,20	4,65
				Mandorlo	20.465,50	44,42	35.062,90	19,67	35.110,50	19,70
			46.068,4	Olivo irriguo	-	-	1.099,30	0,62	455,50	0,26
				Patata	-	-	10.423,10	5,85	16.721,00	9,38
				Peperone	13.569,60	29,46	11.825,30	6,64	11.150,60	6,26
				Pisello	20.465,50	44,42	24.346,60	13,66	24.346,60	13,66
				Pomodoro	-	-	10.017,50	5,62	13.929,40	7,82
				Prati di leguminose	-	-	2.252,20	1,26	2.252,20	1,26
			Vite	6.895,90	14,97	27.714,80	15,55	27.513,70	15,44	

segue >>

Provincia	Superficie Irrigua (ha)	Aree potenzialmente irrigabile (ha)	Superficie potenzialmente irrigua (ha) interessata da utilizzo di acque saline	Coltura	Superficie non idonea caso (1) con condizioni di salinità suoli attuale (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (2) simulato su lungo periodo con scenario tecnica basso input (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (3) simulato su lungo periodo con scenario tecnica alto input (ha)	% su totale interessata da acque saline
Enna				Arancio	210,60	17,39	461,90	0,37	461,90	0,37
				Carciofo	-	-	-	-	-	-
				Cipolla	169,60	14,01	461,90	0,37	461,90	0,37
				Erbai a semina primaverile estiva	-	-	-	-	-	-
		1.210,7		Mandorlo	210,60	17,39	471,70	0,38	471,70	0,38
				Olivo irriguo	-	-	184,80	0,15	-	-
				Pesco	210,60	17,39	446,20	0,36	446,20	0,36
				Pomodoro	-	-	278,30	0,22	405,20	0,33
				Vite	117,20	9,68	446,20	0,36	446,20	0,36
				Brassicacee	-	-	280,80	0,12	162,20	0,07
	Palermo				Carciofo	-	-	162,20	0,07	-
				Fagiolo	-	-	1.119,70	0,49	792,80	0,35
				Finocchio	-	-	653,80	0,29	623,20	0,27
				Limone	-	-	1.075,00	0,47	1.490,90	0,65
				Mandorlo	-	-	335,60	0,15	311,40	0,14
		5.450,0		Melone	-	-	1.051,60	0,46	1.308,50	0,57
				Olivo irriguo	-	-	412,90	0,18	645,30	0,28
				Pesco	-	-	459,80	0,20	311,40	0,14
				Pomodoro	-	-	401,00	0,18	435,60	0,19
				Prati di leguminose	-	-	220,20	0,10	220,20	0,10
				Vite	-	-	192,80	0,08	-	-

segue &gt;&gt;



Regione Sicilia > segue >>

Provincia	Superficie Irrigua (ha)	Aree potenzialmente irrigabile (ha)	Superficie potenzialmente irrigua (ha) interessata da utilizzo di acque saline	Coltura	Superficie non idonea caso (1) con condizioni di salinità suoli attuale (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (2) simulato su lungo periodo con scenario tecnica basso input (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (3) simulato su lungo periodo con scenario tecnica alto input (ha)	% su totale interessata da acque saline
				Arancio	-	-	-	-	-	-
				Brassicacee	-	-	-	-	-	-
				Carciofo	-	-	-	-	-	-
				Carota	-	-	-	-	-	-
				Fagiolo	-	-	131,80	0,10	131,80	0,10
				Mandorlo	-	-	23.847,20	18,82	23.847,20	18,82
Ragusa	17.219,6	126.682,4	24.824,0	Olivo irriguo	-	-	-	-	-	-
				Pesco	-	-	12.717,90	10,04	21.795,30	17,20
				Pomodoro	-	-	2.669,40	2,11	773,40	0,61
				Prati polifiti	-	-	-	-	-	-
				Spinacio	-	-	-	-	-	-
				Vite	-	-	880,70	0,70	2.419,20	1,91
				Zucchina	-	-	990,80	0,78	990,80	0,78
				Arancio	2.980,10	37,26	-	-	-	-
				Brassicacee	-	-	-	-	-	-
				Cocomero	-	-	-	-	-	-
				Fagiolo	2.980,10	37,26	3.944,50	3,03	3.944,50	3,03
				Fragola	2.980,10	37,26	5.092,60	3,91	7.679,70	5,89
				Insalate	2.980,10	37,26	868,90	0,67	-	-
				Mandorlo	2.980,10	37,26	6.842,90	5,25	7.679,70	5,89
				Olivo irriguo	-	-	-	-	-	-
				Patata	-	-	868,90	0,67	-	-
				Pomodoro	-	-	-	-	-	-
				Prati di leguminose	-	-	-	-	-	-
				Sorgo	-	-	-	-	-	-
				Spinacio	-	-	-	-	-	-
				Vite	-	-	5.881,30	4,51	5.206,20	3,99

segue >>

Provincia	Superficie Irrigua (ha)	Aree potenzialmente irrigabile (ha)	Superficie potenzialmente irrigua (ha) interessata da utilizzo di acque saline	Coltura	Superficie non idonea caso (1) con condizioni di salinità suoli attuali (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (2) simulato su lungo periodo con scenario tecnica basso input (ha)	% su totale interessata da acque saline	Superficie non idonea caso (3) simulato su lungo periodo con scenario tecnica alto input (ha)	% su totale interessata da acque saline
				Brassicacee	-	-	-	-	-	-
				Carciofo	-	-	-	-	-	-
				Fragola	-	-	1.288,50	0,72	5.702,10	3,18
				Limone	-	-	-	-	-	-
				Mandorlo	-	-	5.334,70	2,97	5.280,30	2,94
				Melone	-	-	-	-	-	-
				Olivo irriguo	-	-	-	-	-	-
				Patata	-	-	-	-	-	-
				Pesco	-	-	4.449,10	2,48	4.982,20	2,78
				Pisello	-	-	-	-	-	-
				Pomodoro	-	-	-	-	-	-
				Prati di leguminose	-	-	-	-	-	-
				Sedano	-	-	-	-	-	-
				Vite	-	-	796,70	0,44	107,90	0,06
Trapani	27.809,4	179.484,1	5.931,0							

## 6.6 Scenari geografici per raggruppamento di colture e tecniche

Sono stati infine collegati i risultati delle simulazioni ai diversi sistemi suolo-clima-coltura presenti nei Sottosistemi di Terre dell'area di studio, secondo i due scenari di tecniche a basso ed alto input, sempre considerando la distribuzione percentuale delle colture per Provincia secondo i dati ISTAT forniti dall'INEA e archiviati nel database Modello REL. Si sono potuti così visualizzare sottoforma geografica i risultati della percentuale di area di ogni SST che andrebbe perduta a causa di superamento della soglia di idoneità (perdita di produttività per salinizzazione maggiore del 40%), laddove questo fenomeno si manifesta. Poiché la matrice dei casi suolo-coltura presente nella matrice di valutazione del modello SWAP a livello di legenda Corine Land Cover livello 4 avrebbe prodotto una quantità di dati di difficile sintesi geografica, si è proceduto a raggruppare le colture nei gruppi "erbacee" ed "arboree", che hanno sintetizzato in maniera pesata secondo la relazione con i Gruppi di Aggregazione Colture utilizzati nel database Modello REL così come riportati nella seguente tabella 29.

**Tabella 29. Relazione di aggregazione tra la tabella Gruppi di Aggregazione Colture e le due classi sintetiche utilizzate per la visualizzazione geografica dei risultati**

ID_	Descrizione gruppo_colturale	Classe per Valutazione geografica
1	Erbacee in pieno campo	
2	Ortive a ciclo primaverile-estivo	Colture Erbacee
3	Ortive a ciclo autunno-vernino	
4	Foraggiere	
5	Riso	Esclusa dalla valutazione
6	Fruttiferi caducifoglie	
7	Vite	Colture Arboree
8	Olivo	
9	Agrumi	

### 6.6.1 La valutazione delle aree all'attitudine alla pianificazione di reti irrigue

Sulla base dell'aggregazione dei dati colturali nei gruppi come soprariportato, è stato possibile calcolare un dato cumulato di percentuale di perdita di area per il superamento della soglia di salinità per i due gruppi colturali (erbacee ed arboree), a seconda dei tipi di suolo presenti in ogni area omogenea (SST). In tal modo è stato possibile "agganciare" un dato univoco aggregato quantitativo (percentuale di area non idonea). Tuttavia, per fornire una informazione specifica e di più immediato utilizzo, adatta alla valutazione del territorio in chiave di pianificazione di nuove reti irrigue, è stata elaborata una tabella di valutazione attitudinale di tipo qualitativo, raggruppando il dato in classi e dando un significato interpretativo ben preciso e finalizzato all'utilizzo specifico.

**Tabella 30. Tabella di valutazione per classi di attitudine alla pianificazione di reti irrigue**

Classe	Descrizione	Percentuale di perdita di area a causa del superamento di soglia di salinità per gruppo di colture	Interpretazione
1	Adatti	0%	Aree dove il rischio di salinizzazione a lungo termine è nullo, alle condizioni di scenario e per i gruppi di colture considerati
2	Moderatamente adatti	0-25%	Aree dove il rischio di salinizzazione a lungo termine è geograficamente abbastanza rilevante, alle condizioni di scenario e per i gruppi di colture considerati. Tuttavia tale rischio può essere ridotto introducendo tecniche adatte limitatamente ad alcuni suoli.
3	Attualmente non adatti	25-50%	Aree dove il rischio di salinizzazione a lungo termine è geograficamente eccessivamente rilevante, alle condizioni di scenario e per i gruppi di colture considerati. Tuttavia tale rischio può essere ridotto introducendo tecniche adatte relativamente alla maggior parte dei suoli, previa verifica delle condizioni di economicità di tale riconversione su vasta scala.
4	Permanentemente non adatti	50-75%	Aree dove il rischio di salinizzazione a lungo termine è geograficamente preponderante, alle condizioni di scenario e per i gruppi di colture considerati. Tale rischio non può essere ridotto introducendo tecniche adatte relativamente alla maggior parte dei suoli, poiché le loro caratteristiche comparate con la qualità di acque utilizzate sono talmente sfavorevoli che sconsigliano l'uso irriguo.

Si riportano di seguito alcuni esempi di risultati cartografici secondo la divisione in classi di valutazione rispetto alle aree omogenee (Sottosistemi di Terre) dell'area di studio, per gli scenari di tecniche basso (1) ed alto (2) input e per colture Erbacee ed arboree (figure 116-119)

Figura 116. Classi di valutazione attitudinale delle Aree Omogenee (Sottosistemi di terre) per le Colture Erbacee, in relazione al rischio del superamento della soglia di salinità dei suoli da modello SWAP su decennio 1996-2007, con scenario di tecnica irrigua a basso input – Regione Puglia e Basilicata.

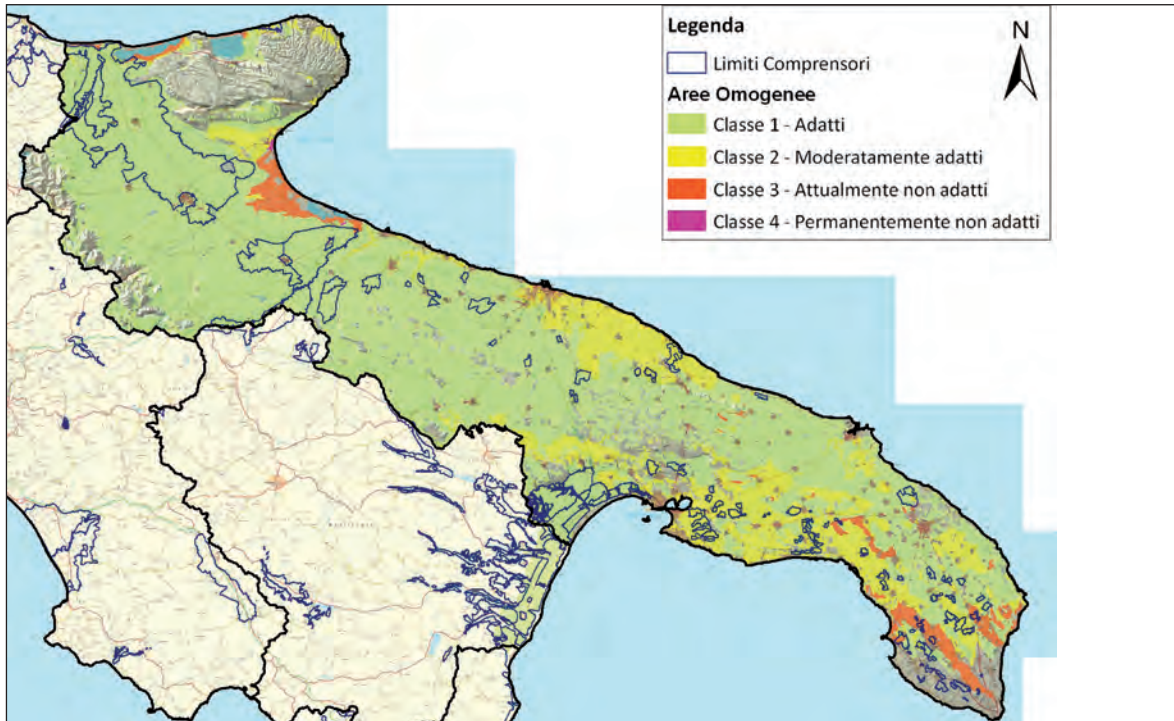


Figura 117. Classi di valutazione attitudinale delle Aree Omogenee (Sottosistemi di terre) per le Colture Erbacee, in relazione al rischio del superamento della soglia di salinità dei suoli da modello SWAP su decennio 1996-2007, con scenario di tecnica irrigua a alto input – Regione Puglia e Basilicata.

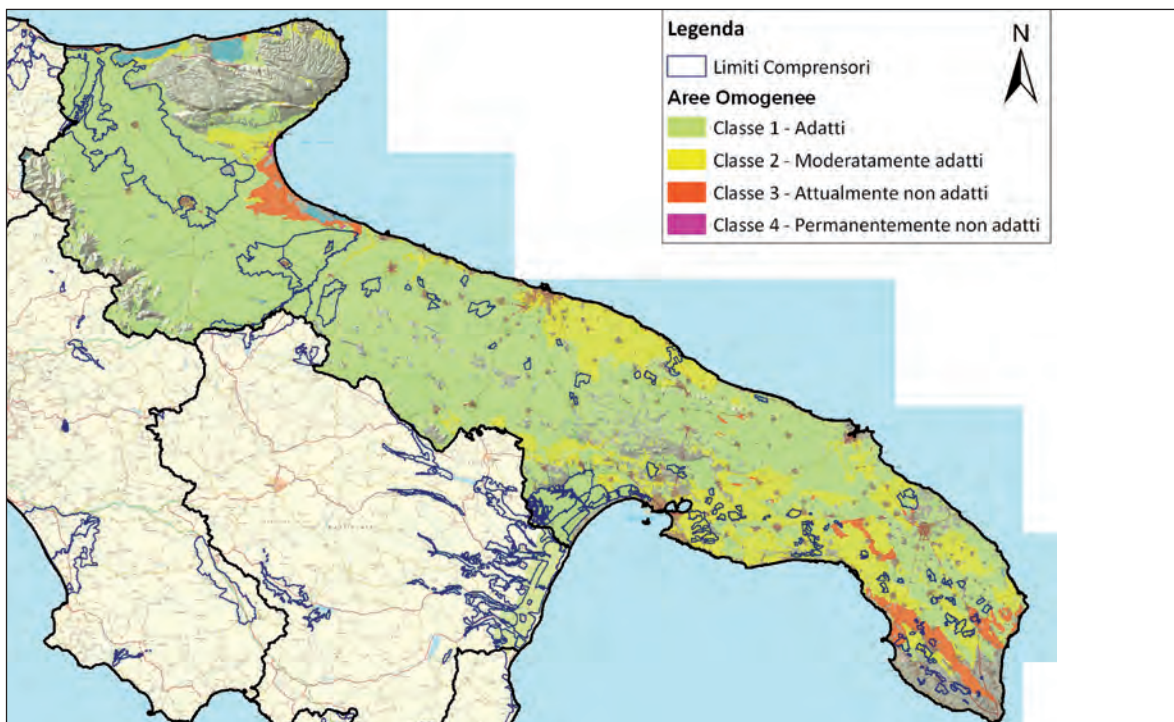


Figura 118. Classi di valutazione attitudinale delle Aree Omogenee (Sottosistemi di terre) per le Colture Arboree, in relazione al rischio del superamento della soglia di salinità dei suoli da modello SWAP su decennio 1996-2007, con scenario di tecnica irrigua a basso input – Regione Puglia e Basilicata

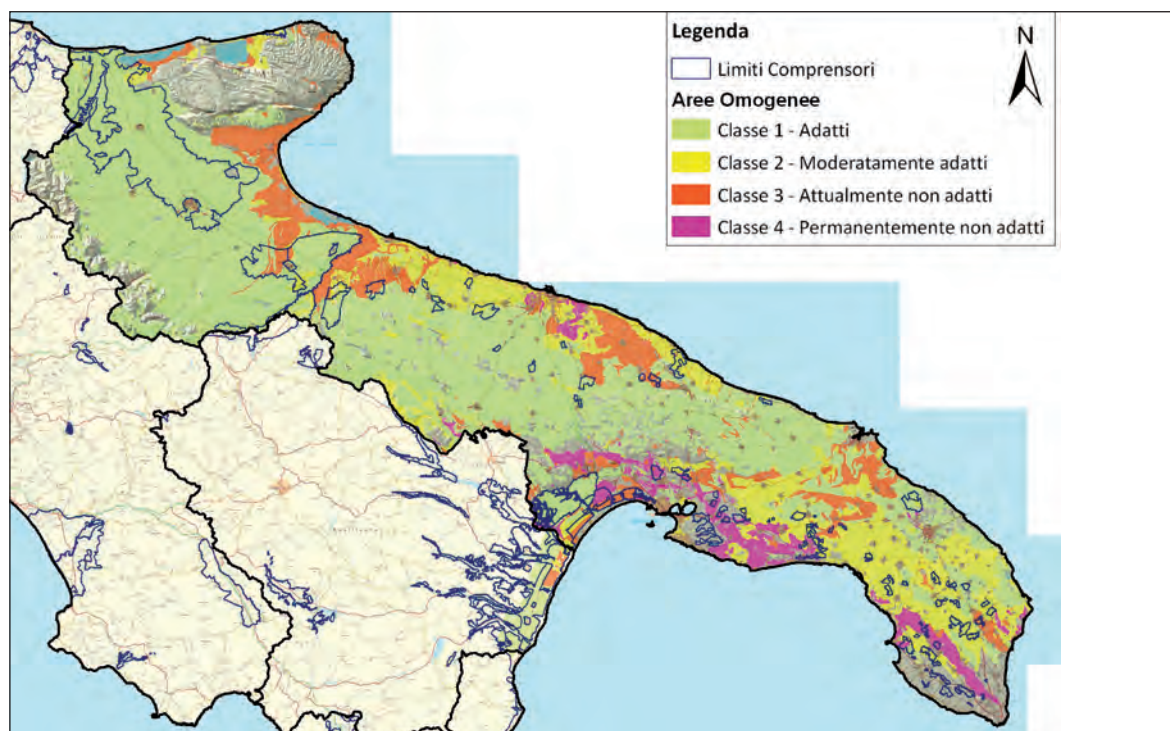
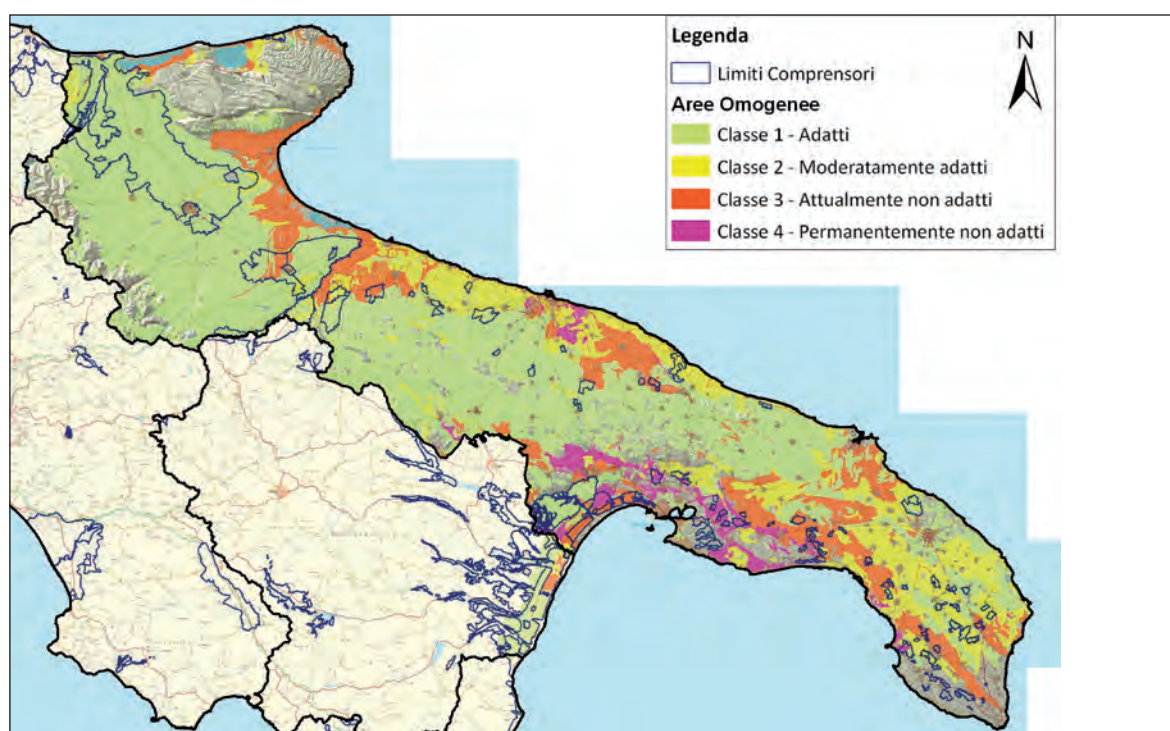


Figura 119. Classi di valutazione attitudinale delle Aree Omogenee (Sottosistemi di terre) per le Colture Arboree, in relazione al rischio del superamento della soglia di salinità dei suoli da modello SWAP su decennio 1996-2007, con scenario di tecnica irrigua a alto input – Regione Puglia e Basilicata



## 6.6.2 Valutazione attitudinale: analisi dei risultati

I risultati ottenuti in termini di superfici con uso di acque saline, suoli salini, e perdita potenziale di aree per colture erbacee e arboree, si possono riportare in estrema sintesi nelle tabelle 31 e 32 seguenti.

**Tabella 31. Superfici per regione interessate da utilizzo acque saline**

Regione	Superficie potenzialmente irrigua (ha) interessata da utilizzo di acque saline (> 0,7 dS/m)	% rispetto al totale della superficie regionale potenzialmente irrigua
Puglia	984.423,3	62,60%
Basilicata	521,4	0,13%
Calabria	30.707,8	8,82%
Sicilia	248.380,0	19,40%
Sardegna	92.164,0	11,48%

**Tabella 32. Perdita percentuale potenziale di area irrigabile per regione e gruppi di colture (erbacee ed arboree) con scenario di tecniche irrigue a basso input (1) tecnologico nel medio-lungo termine, a causa di uso di acque saline (i valori si riferiscono al totale dell'area attualmente irrigata con acque saline oggetto della simulazione)**

Regione	Superficie irrigata con acque saline (ha)	Superficie totale non idonea a colture erbacee (ha)	Superficie totale non idonea a colture arboree (ha)	% perdita superficie erbacee	% perdita superficie arboree
Puglia	984.423,35	70.561,97	334.858,35	7,2	34,0
Calabria	521,37	4,04	0	0,8	0,0
Basilicata	30.707,79	522,5	0	1,7	0,0
Sicilia	248.380,00	30.669,32	2.977,21	12,3	1,2
Sardegna	92.163,98	23.296,71	92.163,98	25,3	100,0

**Tabella 33. Perdita percentuale potenziale di area irrigabile per regione e gruppi di colture (erbacee ed arboree) con scenario di tecniche irrigue ad alto input (2) tecnologico nel medio-lungo termine, a causa di uso di acque saline (i valori si riferiscono al totale dell'area potenzialmente irrigabile)**

Regione	Superficie irrigata con acque saline (ha)	Superficie totale non idonea a colture erbacee (ha)	Superficie totale non idonea a colture arboree (ha)	% perdita superficie erbacee	% perdita superficie arboree
Puglia	984.423,35	67.727,79	326.160,15	6,9	33,1
Calabria	521,37	4,04	0	0,8	0,0
Basilicata	30.707,79	522,5	0	1,7	0,0
Sicilia	248.380,00	36.884,66	2.915,67	14,9	1,2
Sardegna	92.163,98	15.890,54	92.163,98	17,2	100,0

La valutazione attitudinale su base geografica mette in evidenza alcuni risultati significativi che è possibile commentare analizzando il dato disaggregato su base provin-

ciale, per ogni regione. Tale analisi dettagliata evidenzia una differente distribuzione dei risultati della simulazione rispetto alle tabelle generali per i due scenari di tecniche 1 = basso input tecnologico-aziendale e 2 = alto input tecnologico-aziendale (tabelle 32 e 33) riportate qui sopra.

Per capire come poter utilizzare la valutazione su base della analisi previsionale modellistica collegata via GIS alle Aree Omogenee di studio (Sottosistemi di Terre), si presentano alcuni risultati specifici estratti su base geografica dalle tabelle informative dello strato poligonale GIS da cui sono state prodotte le cartografie precedentemente riportate nelle figure 116-119.

Nel grafico di figura 120 seguente si sono rappresentati i valori massimi percentuali di area non adatta per le quattro combinazioni gruppi di colture/scenari, per ogni poligono di Area Omogenea valutata (SST) all'interno delle province oggetto della valutazione stessa. Quindi un livello di disaggregazione specifica del dato su base geografica provinciale, che mostra come i risultati medi regionali possano non rappresentare in maniera adeguata le risposte dei diversi territori.

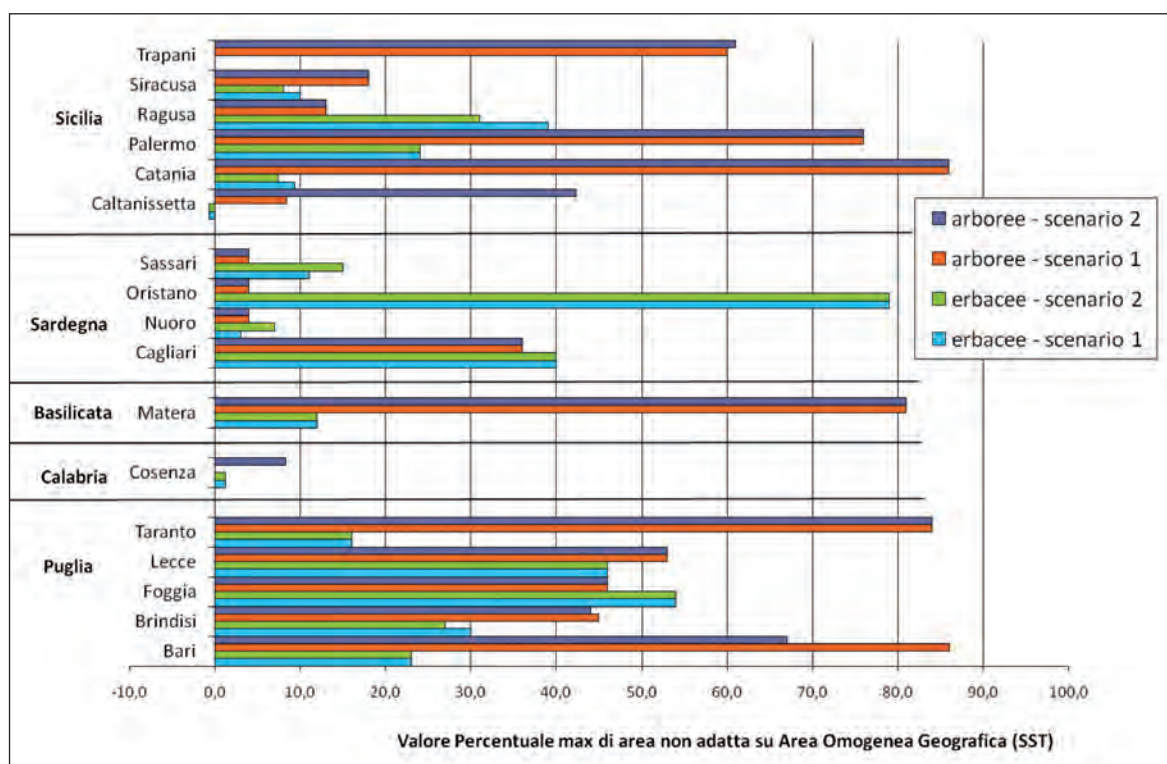
Nella valutazione dei risultati bisogna infine tenere conto di un presupposto importante utilizzato in fase di simulazione, vale a dire la costanza del dato di tenore in sali delle acque irrigue, come descritto nelle analisi e spazializzazioni territoriali effettuate nel capitolo "Quantificazione del contenuto salino nelle acque di falda e spazializzazione del dato". Tale presupposto può essere valido nel breve periodo (pochi anni), ma è difficile ipotizzare che si mantenga tale nel medio-lungo periodo, a causa dell'accertato e generale aumento del fenomeno di intrusione marina in molti studi sperimentali di monitoraggio in aree test costiere. Se si ipotizza quindi un andamento dinamico anche di questo fenomeno (cosa che non è stato possibile fare per insufficienza di dati di monitoraggio geograficamente estesi a tutta l'area di studio), è possibile pensare a un ulteriore incremento delle aree a rischio di salinizzazione dei suoli e conseguente perdita di superficie produttiva.

In generale si può notare in tutte le regioni, che anche su base di differenti percentuali relative, esiste un aumento della potenziale non idoneità passando dalle colture erbacee a quelle arboree, spesso di uno o varie volte maggiori (esempio di Brindisi: scenario 1 da 7,2 a 23,5 e scenario 2 da 6,8 a 23,4; Palermo: scenario 1, da 7,3 a 27,3 e scenario 2 da 7,2 a 27,1). Si possono raggiungere in alcuni territori picchi del 70-80% di perdita di superficie potenzialmente irrigabile (Bari, Taranto, Matera, Catania, Palermo). Tale risultato si può spiegare anche in considerazione del fatto che le tecniche per le arboree sono a irrigazione concentrata (es. goccia e/o manichetta forata) con rapporto basso volume/tempo e adacquamenti di poche ore; tali tecniche, che possono considerarsi teoricamente le più efficienti per quel tipo di coltura, calati nel contesto pedologico e climatico di suoli a tessitura fine poco permeabili con forte evapotraspirazione e di acque irrigue più o meno saline, creano una condizione, nel medio-lungo termine, non sufficiente per lisciviare ed asportare definitivamente i sali dal suolo. Tale condizione si potrebbe probabilmente raggiungere, nel dato contesto climatico-territoriale, utilizzando maggiori volumi orari per più ore con tecniche a irrigazione diffusa.

Anche nel caso delle colture erbacee e dei sistemi irrigui ad esse connessi si possono raggiungere valori delle aree potenzialmente perdute massimi per ogni area omogenea variabili tra 1-2% e 10-12%, il che sta a significare che il problema esposto precedentemente della carenza di sufficiente lisciviazione dei Sali (a causa di limitazioni pedologiche, climatiche e di uso di acque irrigue saline) esiste, seppure in maniera minore, anche per queste situazioni.



Figura 120. Risultati della valutazione geografica sulle aree omogenee (SST) delle varie Province, in termini di valore massimo di area percentuale non adatta su simulazioni di lungo periodo, per i due scenari di tecniche adottati e per i due gruppi di colture erbacee ed arboree



### 6.6.3 Esempio su caso-studio

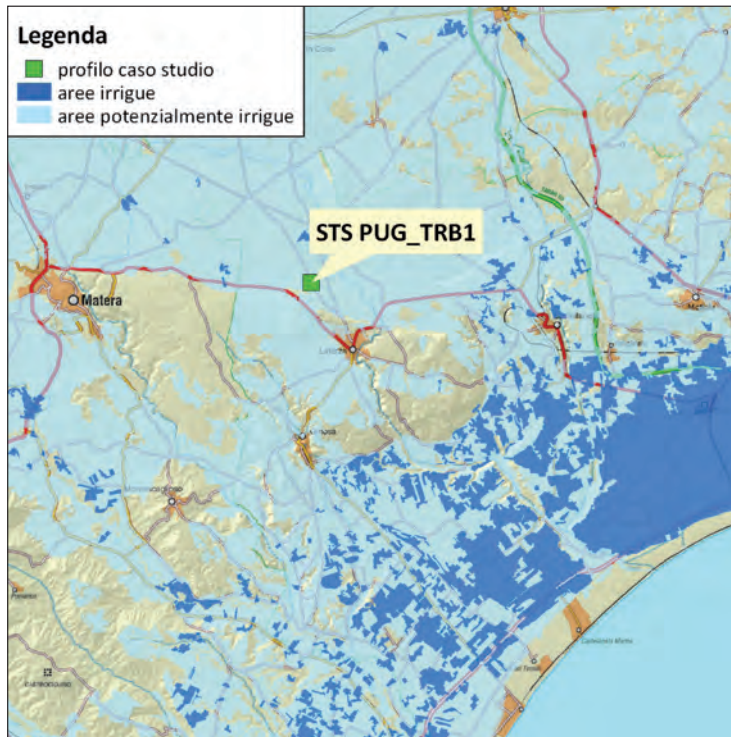
Per comprendere al meglio il livello di dettaglio della simulazione effettuata su una casistica di ben 31.938 casi, distribuiti secondo le regioni oggetto di studio come riportato in tabella 34, si riportano di seguito i risultati in dettaglio per un singolo caso di matrice (suolo-clima-coltura-scenari di tecnica), utile per la comprensione dei meccanismi di simulazione e anche per la disponibilità del livello di disaggregazione del dato.

Tabella 34. Casi studio (suolo-clima-coltura-tecnica) simulati per Regione

Regione di studio	Casi di matrice simulati con SWAP
Basilicata	928
Calabria	84
Puglia	19.092
Sicilia	8.048
Sardegna	3.786

Nell'esame del singolo caso-studio è infatti possibile valutare l'andamento dell'accumulo di soluti (sali) durante i dieci anni di simulazione considerati, mese per mese (ma è possibile eventualmente estrarre il dato giornaliero), fermo restando i dati costanti di input, quali qualità delle acque irrigue e tecniche di gestione (scheduling).

Figura 121. Ubicazione del caso-studio (profilo caposaldo e tipologia di suolo STS)



Il caso-studio presentato, la cui ubicazione è riportata in figura 129, è costituito da aree potenzialmente irrigue pianeggianti a quote collinari (350 m s.l.m.) con tipologie di suoli argillosi ad alta dinamicità (vertisuoli) presente sulle superfici di spianamento con depositi fluvio-lacustri di rimaneggiamento alluvionale delle argille subappenniniche plioceniche, con accumulo di carbonati negli orizzonti profondi (figura 130)

Figura 122. Profilo e stazione riferito al tipo di suolo (STS) utilizzato per la simulazione



La simulazione di questo caso è riferita, per la parte colturale e di scenario di tecnica, ai dati di input riportati in tabella 35, relativi a due differenti situazioni a diverso input di qualità di acque saline (1000 e 4000 mg/l).

**Tabella 35. Dati sintetici del caso studio simulato con due condizioni di acqua irrigua a diverso grado di salinità**

Regione	Puglia	Puglia
ID_SWAP (codice caso studio univoco)	66991	66993
Chiave di sviluppo	PUG_PUG_TRB1_42_212312_1	PUG_PUG_TRB1_42_212312_1
Tipologia suolo (STS)	PUG_TRB1	PUG_TRB1
ID_coltura	212312	212312
Coltura	Pomodoro	Pomodoro
Area climatica	Salento, medio tavoliere, basse colline ioniche calabre (42)	Salento, medio tavoliere, basse colline ioniche calabre (42)
Salinità acqua irrigua (mg/l)	1000	4000
Tipo di irrigazione	Aspersione con ali mobili	Aspersione con ali mobili
Intensità (mm/h)	12,12	12,12
Scenario di tecnica	1	1
Profondità estrazione (cm)	70	70
Profondità suolo (cm)	150	150

**Tabella 36. Dati sintetici descrittivi della tipologia di suolo relativa al caso-studio**

Tipologia di suolo	PUG_TRB1		
Classificazione USDA (1998)	Vertic Calcixeroll fine misto termico		
Classificazione WRB (1998)	Calcic Vertisol		
Codice orizzonte	Apss	Bkss	Ck
Limite superiore (cm)	0	58	110
Limite_inferiore (cm)	58	110	170
pH (H2O 1:2.5)	7,89	8,37	nd
Carbonio org. (%)	1,0	0,7	0,5
Carbonati_totali	10,5	16,5	nd
Scheletro (% in vol.)	1	0	0
Sabbia totale (%)	8,5	8,2	8,2
Limo totale (%)	51,0	54,7	54,7
Argilla (%)	40,5	37,1	37,1
Cap. Scambio Cat. (meq/100g)	43,4	40,6	nd
Sodio scambiabile (ESP)	2	13	nd
Conducibilità el.(Ece, dS/m)	0,84	2,76	nd
Conducibilità idraulica sat.(Ksat, cm/h)	0,12	0,18	0,18
Capacità di Campo (% H2O)	35,1	38,3	37,9
Punto di appassimento (% H2O)	21,5	25,0	24,9

Figura 123. Grafico di andamento mensile per 10 anni del bilancio idrico (precipitazione, runoff, traspirazione, evaporazione, irrigazione), per il caso con salinità acqua irrigua = 1000 mg/l

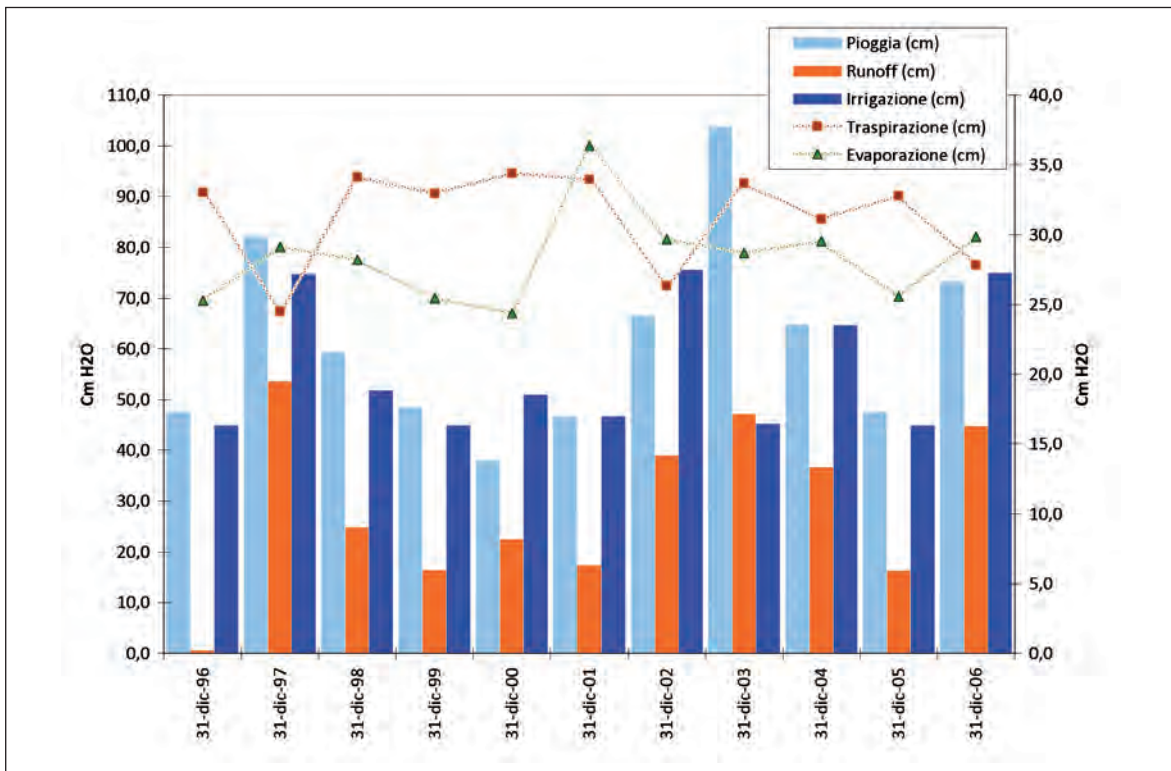


Figura 124. Grafico di andamento mensile per 10 anni del bilancio dell'acqua nel suolo e della concentrazione di soluti (sali), per il caso con salinità acqua irrigua = 1000 mg/l

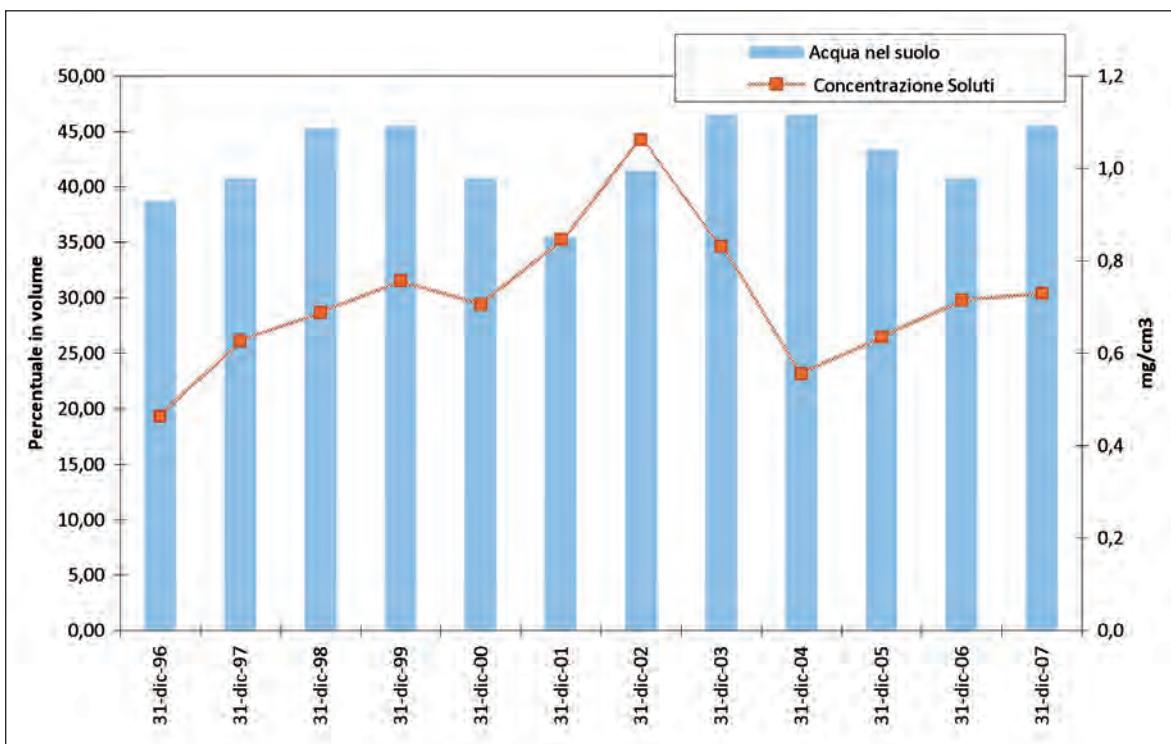


Figura 125. Grafico di andamento mensile per 10 anni del bilancio idrico (precipitazione, run-off, traspirazione, evaporazione, irrigazione), per il caso con salinità acqua irrigua = 4000 mg/l

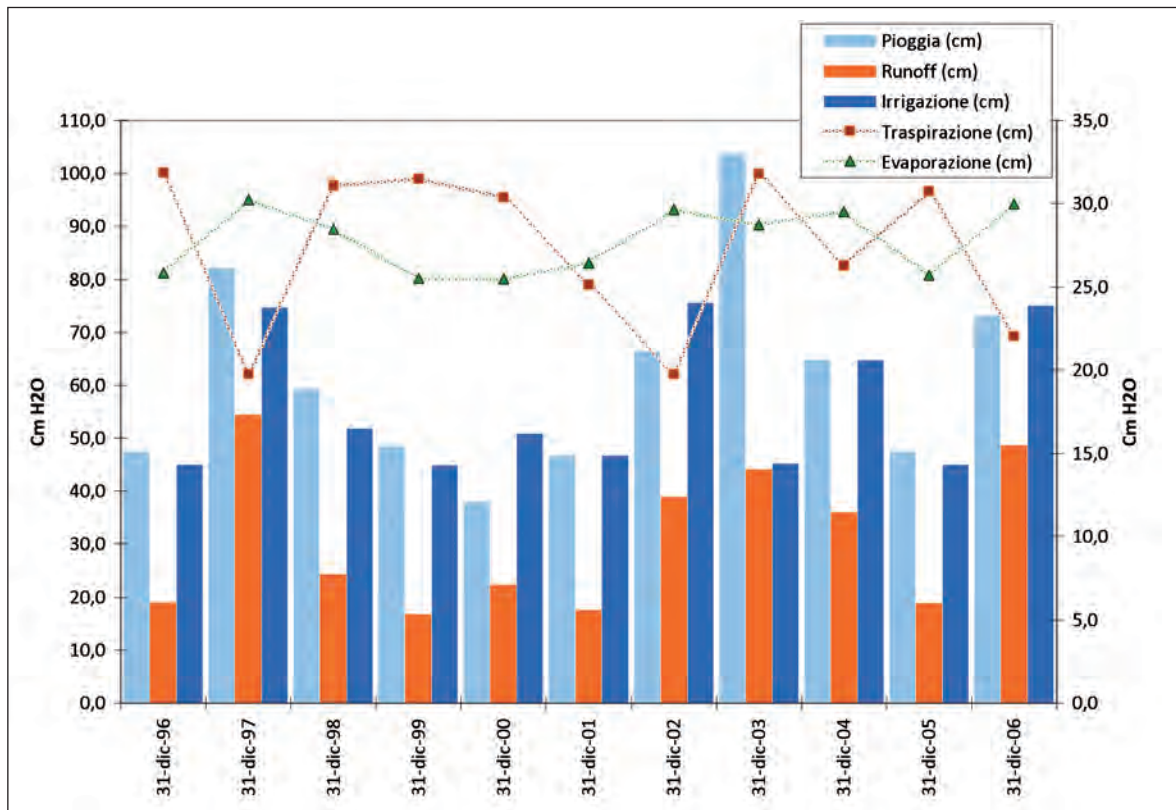
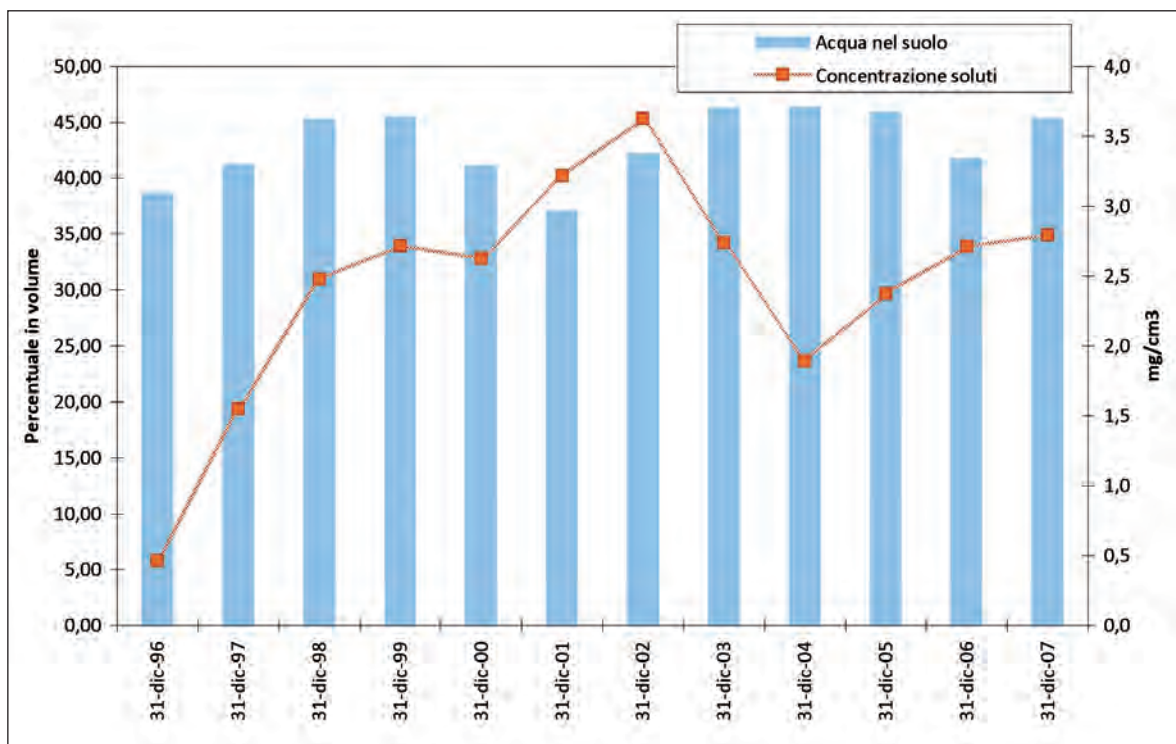


Figura 126. Grafico di andamento mensile per 10 anni del bilancio dell'acqua nel suolo e della concentrazione di soluti (sali), per il caso con salinità acqua irrigua = 4000 mg/l



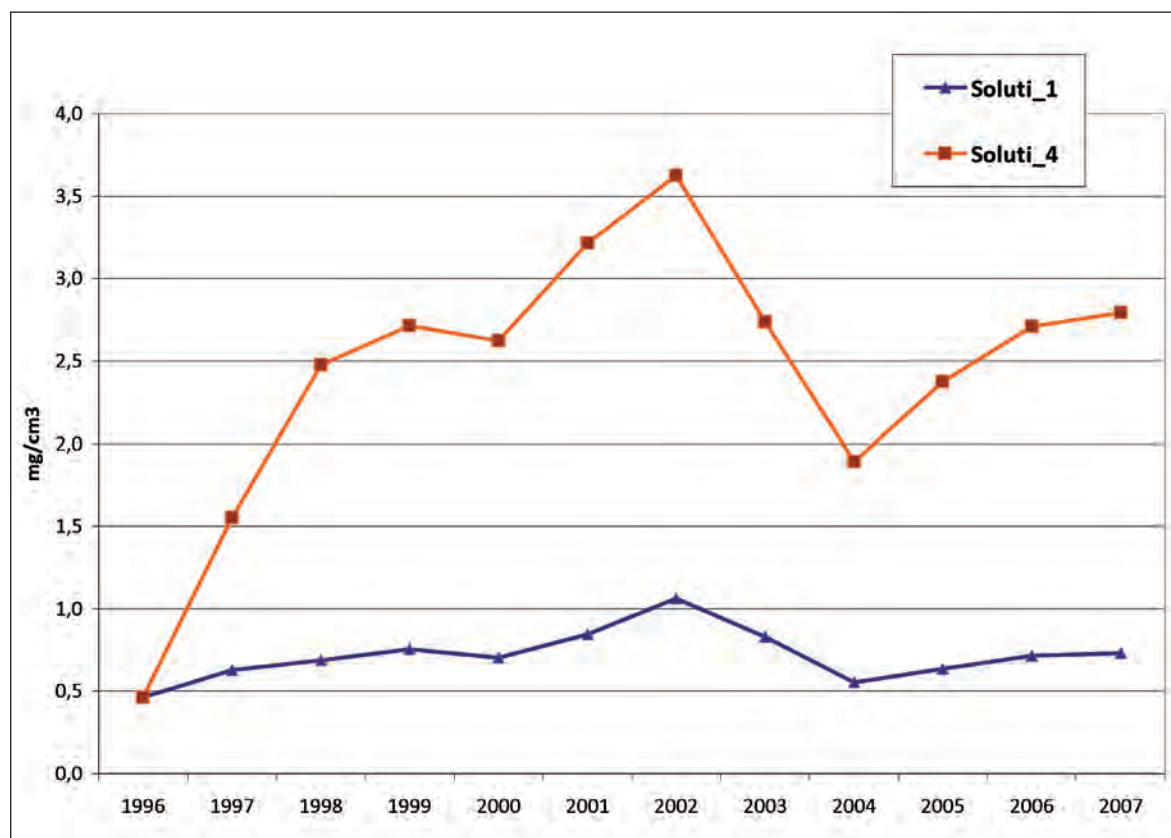
Le percentuali di acqua nel suolo e di concentrazione in soluti in entrambi i casi presentati sono stati calcolati e/o stabiliti a partire dal dato analitico del 31 dicembre 1996 (38,7 % di contenuto idrico e 0,5 mg/cm<sup>3</sup> di concentrazione in sali).

Come si può notare dai quattro grafici sopra riportati a coppie (figura 131-132 e 133-134) per ognuno dei due casi sono state effettuate simulazioni con differente tasso di salinità di acqua irrigua (1000 e 4000 mg/l). Dall'analisi dei dati simulati si vede che, fermi restando i valori di precipitazione, runoff e irrigazione ed anche l'accumulo di acqua (Water Storage) per entrambi i casi, i valori di acqua irrigua salina diversi influenzano prevalentemente l'andamento del valore di traspirazione fogliare; ciò mostra che la pianta si "difende" dall'aumentato tenore in sali nella soluzione circolante che le causa maggiore difficoltà di suzione a causa della variazione di potenziale osmotico, riducendo la traspirazione; in pratica con lo stesso meccanismo con cui reagisce ad uno stress idrico.

Naturalmente la corrispondenza tra l'aumento della concentrazione di soluti e traspirazione fogliare si realizza con un certo distacco temporale, che è variabile da caso a caso a seconda del tipo di coltura: tale intervallo sarà più breve e la riduzione di traspirazione più significativa a seconda di vari fattori fisiologici (grandezza pianta e forza di suzione radicale) ed anche di tolleranza ai sali.

L'aumento di concentrazione in sali, come mostrato in figura 135, mostra come pur partendo dalla medesima situazione di contenuto idrico e livello di sali nel suolo, in caso di irrigazione con acqua a tenori salini superiori (soluti\_4) porta subito ad un rapido accumulo nei primi tre-quattro anni, dopodiché si stabilizza e segue più o meno la stessa linea tendenziale del caso a minore salinità, su valori mediamente superiori di 3 volte.

**Figura 127. Simulazione di andamento della concentrazione di soluti nel suolo per i 10 anni di simulazione tra il caso 1 (acqua irrigua con 1000 mg/l di Sali) e 4 (acqua irrigua con 4000 mg/l)**



## BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2001). *Geologia della Sardegna. Note Illustrative della Carta Geologica della Sardegna a scala 1:200.000*. Memorie Descrittive della Carta Geologica D'Italia, Lx, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma , Italia.
- Abate B., Catalano R. & Renda P. (1978). *Schema geologico dei monti di Palermo (Sicilia)*. Boll. Soc. Geol. It., 97, 807-819.
- Alaimo R., Ferla P. & Hauser S. (1984). *Idrogeochimica delle acque della piana di Palermo*. ILA Palma Edizioni, 79 Pp., Palermo.
- Arangino F., Aru A., Baldacchini P., Vacca S., (1986). *Piano Generale delle Acque. I suoli delle aree irrigabili della Sardegna*. Assessorato della Programmazione Bilancio e Assetto del Territorio, Ente Autonomo del Flumendosa.
- Ardau F. (1995). *Studio dei fenomeni di salinazione delle acque sotterranee nella piana di Muravera (Sardegna Sud-Orientale)*. Tesi di Dottorato, Politecnico di Torino e Università degli Studi di Cagliari, Italia.
- Ardau F., Barbieri G. (2000). *Acquifer configuration and possible causes of salination in the Muravera plain (SE Sardinia, Italy)*. In: Proc. 16th Salt Water Intrusion Meeting, Pp. 11-18, Miedzyzdroje, Wolin Island.
- Ardau F., Barbieri G., Vernier A., Vernier E.. (1994). *Salination phenomena in the posada coastal aquifer (north-east Sardinia)*. In: De Breuck, W.; Walschot, L. (Ed.) (1999). Proceedings of the 15th Salt-Water Intrusion Meeting Ghent (Belgium), 25-29 May 1998. Natuurwetenschappelijk Tijdschrift, 79(1-4): pp. 125-131
- Ardau F., Barrocu G., Salis N., Sanna F., Sciabica M. G., Soddu S., Vernier A. (2004). *Hydrogeology of the island of Sardinia (Italy)*. Memorie descrittive della Carta Geologica D'Italia Vol. Lxiii, Field Trip Guide Book, "32nd International Geological Congress (Igc)", 20-28 Ago., Firenze, Italy, P 37, Pp 1-40. Ed. L. Guerrieri, I. Rischia, L. Serva-Apat, Roma .
- Ardau F., Ghiglieri G., Vernier A.. (1994). *Salination of a coastal aquifer of the Turritana Plain: an important factor conditioning land planning use*. In Proceedings 13th Swim Villasimius, Pp. 335-342.
- Arrigoni, P.V., (1968). *Fitoclimatologia della Sardegna*. Webbia 23: 1-100, Firenze. In: Carboni, S., Cristini, A., Di Gregorio, F., Ferrara, C, 1987. Trasporto solido di un corso d'acqua a regime torrentizio e caratteristiche dei sedimenti della spiaggia alimentata. Il Rio di Quirra (Sardegna Sud-Orientale). Proc. 1st International Congress Of Geo-hydrology, Firenze. Gndci – Cnr, Pubbl. N.129, Pp. 103-114.
- Aru A., Baldacchini P., Vacca A. (1991). *Nota illustrativa alla carta dei suoli della Sardegna*. Regione Autonoma della Sardegna e Università degli Studi di Cagliari, Italia.
- Aru A., Baldaccini P., Barrocu G., Barbieri G. E Madeddu B. (1987). *Studi idrogeologici e pedologici relativi alla bonifica dello stagno Avalè Su Petrosu – Orosei (Nu)*. Memorie della Società Geologica Italiana, 37, Pp. 17-25.
- Aru, R., (2004). Degree Thesis: *Contenuto di arsenico e altri metalli pesanti in colture agricole della piana di Quirra, Sardegna Sud-Orientale*. University of Cagliari.
- Atzeni, A., (1992). *Santa Gilla: Una laguna che rinasce*. Informazione (59), 7-9.

- Balia, R., Boi, A., Deidda, G.P., Marchisio, M., Sambuelli, L., (1994). *Electrical and I.P. survey in a coastal area west of Cagliari (Southern Sardinia)*. Proceedings of the 13th Saltwater Intrusion Meeting, Cagliari, Ed. G. Barrocu, Pp. 235-240.
- Barbieri G., Barrocu G., Poledrini C., Uras G. (1983). *Salt intrusion phenomena in the south-east coast of Sardinia*. In: Proc. 8th Salt Water Intrusion Meeting, Vol. 18, Parte Ii, Pp. 315-323, Bari, Italia.
- Barbieri G., Ghiglieri G., Vernier A. (2004). *Proposta di strategie di gestione sostenibile della risorsa idrica, in ambiente mediterraneo, finalizzata agli interventi per la lotta alla desertificazione (Sardinia Nw, Italy)*. Atti "Ive Congrès International Environnement et Identità en Méditerranée", Corte, 19-25 Juillet, 2004, Pp. 75-76.
- Barbieri G., Ghiglieri G., Vernier A. (2006). *Impostazione di una rete di monitoraggio delle acque sotterranee ed individuazione di indicatori di qualità ambientale per la lotta alla desertificazione*. Rivista Igea – Ingegneria E Geologia Degli Acquiferi N. 21 2006 Issn 1121-9041, pp 71-80.
- Barbieri, G., Fidelibus, M.D., Grassi, S., Raes, H., Vernier, A., (1994). *Hydrogeological and hydrochemical observations on salinization processes in the coastal Campidano plain*. Proceedings of the 13th Saltwater Intrusion Meeting, Cagliari, Ed. G. Barrocu, Pp.235-234.
- Barrocu G. And Soddu S.. (2006). *Saltwater intrusion in Arborea area (Central-Western Sardinia)*. In: Proceedings of the "1st Swim-Swica – First International Joint Salt Water Intrusion Conference", 24-29 Set., Cagliari, Chia Laguna, Italy. In press.
- Barrocu G., Cau P., Soddu S. And Uras G.. (2004). *Predicting groundwater salinity changes in the coastal aquifer of Arborea (Central-Western Sardinia)*. In: Proceedings of the "18th Salt Water Intrusion Meeting (Swim)", 31 Mag.-3 Giu., Cartagena, Spain, Pp. 243-255.
- Barrocu G., Ghiglieri G., Uras G. (1995). *Intrusione salina e vulnerabilità degli acquiferi costieri nella piana di Oristano (Sardegna Centro-Occidentale)*. In: Proceedings of the Convegno gestione irrigua in ambiente mediterraneo, Pubblicazione N° 1383 Del Gndci-Cnr U.O. 4. 12., Oristano, Italia.
- Barrocu, G., (1994). *Idrogeologia sotterranea dei graniti cataclastici della valle del rio San Gerolamo fra monte Su Sinzurru e Monte Pauliara (Capoterra- Sardegna Meridionale)*. Studio inedito.
- Barrocu, G., Fidelibus, M.D., Sciabica, M.G., Uras, G., (1994). *Hydrogeological and hydrogeochemical study of saltwater intrusion in the Capoterra coastal aquifer system (Sardinia)*. Proceedings of the 13th Salt Water Intrusion Meeting, Cagliari, Pp. 105-111.
- Barrocu, G., Paniconi, C., Sciabica, M.G., 1994. *Three dimensional model of saltwater intrusion in the Capoterra coastal aquifer system (Sardinia)*. Proceedings of the 13th Salt Water Intrusion Meeting, Villasimius (Cagliari).
- Barrocu, G., Sciabica, M.G., Uras, G., Cortis, A., Vernier, E., (1997). *Saltwater intrusion and artificial recharge modeling in the coastal aquifer system of Capoterra (Southern Sardinia)*. Proceedings of the International Conference on Water Problems in the Mediterranean Countries, Near East University - Civil Engineering Department, Nicosia, North Gypsum.
- Belmans, C., J.G. Wesseling And R.A. Feddes, 1983. *Simulation of the water balance of a cropped soil: SWATRE*. J. Hydrol., 63, 271-286.



- Beltman, W.H.J., Boesten J.J.T.I. and Van Der Zee S.E.A.T.M., 1995. *Analytical modelling of pesticide transport from the soil surface to a drinking water well*. J. Hydrol., 169, 209-228.
- Bertolino, G., Caboi, R., Caredda, A.M., Conti-Vecchi, G., Et All., (1981). *Caratteri idrogeochimici delle acque naturali della Sardegna meridionale 2 – le acque del Sarrabus e del Campidano di Cagliari*. Rendiconti S.I.M.P., Vol. 37, Fasc. 2, Pp. 929-949.
- Boselli M. (2001). *Idrogeologia e modellazione dell'acquifero superficiale nel campidano di Oristano*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Cagliari, Italia.
- Biggar, J.W. And D.R. Nielsen, 1976. *The spatial variability of the leaching characteristics of a field soil*. Water Resour. Res., 12, 78-84.
- Boesten, J.J.T.I. and Van Der Linden A.M.A., 1991. *Modeling the influence of sorption and transformation on pesticide leaching and persistence*. J. Environ. Qual., 20, 425-435.
- Bolt, G.H., 1979. *Movement of solutes in soils: principles of adsorption/exchange chromatography*. In: G.H. Bolt (Ed.), Soil Chemistry B, Physico-Chemical Models. Elsevier, Amsterdam. P. 285-348.
- Bonanno A., Ciabatti P., Liguori V., Provenzano M.C. & Sortino G. (2000). *Studio idrogeologico ed idrogeochimico dell'acquifero multifalda della piana di Castelvetrano e Campobello di Mazara (Sicilia Occidentale)*. Quaderni Di Geologia Applicata, 7, 4, 45-59.
- Botrini L., Lipucci Di Paola M., Temperini O., Giustiniani L., Graifenberg A., 1996. *Stress salino: risposta di specie orticole e suggerimenti di tecnica colturale*. Informatore Agrario, 52 (22), 41-46.
- Breusse J.J., Huot G. (1954). *Hydrogeological surveys in the Catania area by means of electrical soundings*. Geophysical Prospecting, II, N. 3.
- Buccheri G. (1966). *Contributo alla conoscenza della malacofauna di un terrazzo marino presso Palermo*. Atti Acc. Gioenia Di Sc. Nat. In Catania, Vol. XVIII, Catania.
- Caflich L. (1966). *La geologia dei monti di Palermo*. Riv. Ital. Paleont. Strat., Mem., 12, 1-108.
- Calvi F., Contino A., Cusimano G., Di Cara A., Frias Forcada A., Hauser S. & Pellerito S. (1998). *Nuovi contributi alla conoscenza dell'idrogeologia della piana di Palermo*. Atti Del 79° Congr. Naz. Soc. Geol. It., Vol. A, 212-215.
- Calvi F., Contino A., Cusimano G., Di Cara A., Frias Forcada A., Hauser S. & Pellerito S. (2000). *Hydrostructures related to the piana di Palermo aquifers and their hydrogeochemical characteristics*. Mem. Soc. Geol. It., 55, 473-481, 1 Fig., 2 Tabb., 2 Tavv. F.T.
- Cao Pinna C., Buffa F., Fadda A., Orrù N., Pes M., Petruso A., Silvano R. (1998). *Nuovo siss (nuovo studio dell'idrologia superficiale della Sardegna)*. Regione autonoma della Sardegna - Assessorato della programmazione, bilancio ed assetto del territorio - Centro regionale di programmazione e Ente Autonomo del Flumendosa, Italia.
- Carmignani L. et alii. (1996). *Carta Geologica della Sardegna in scala 1:200.000*. Servizio Geologico Nazionale, Regione Autonoma della Sardegna,.
- Carmignani, L., et alii, (2001). *F.549 Sezione I – Castello Di Quirra –1:25,000*. Carta Geologica della Regione Sardegna. Servizio Geologico D'italia – Ras.
- Cassa Per Il Mezzogiorno (1982). *Indagini idrogeologiche per l'approvvigionamento idrico del sistema ii nord-occidentale della Sicilia - acquiferi principali*). Arlab S.R.L.

- Cassa Per Il Mezzogiorno (1982). *Indagini idrogeologiche e geofisiche per il reperimento di acque sotterranee per l'approvvigionamento idrico del sistema e zona centro-orientale della Sicilia (Catanese)*. CMP S.P.A. (studio inedito).
- Catalano R., Abate B. & Renda P. (1979). *Carta geologica dei monti di palermo scala 1:50.000 e note illustrative*. Istituto di Geologia, Università degli Studi di Palermo.
- Cau P. (2000). *Vulnerabilità dell'acquifero superficiale nel Campidano di Oristano: il metodo Syntax*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Cagliari, Italia.
- Celico P. (2004), *Elementi di idrogeologia*, Liguori Editore.
- Cerchi, A., Murru, M., 1985. *Plio-Quaternary Campidano Graben*. Atti del 19th European Micropaleontology Colloquium, Sardegna.
- Ciabatti P. & Provenzano M.C. (2003). *Simulazione del flusso idrico sotterraneo dell'acquifero multifalda della piana di Castelvetrano e Campobello di Mazara (Sicilia Sud-Occidentale)*. Quaderni di Geologia Applicata, 10, 3, 5-16.
- Civita M. (1994). *Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica. quaderni di tecniche di protezione ambientale*, 31, Pitagora Editrice, Bologna, 325 Pp.
- Civita M. (2005). *Idrogeologia applicata ed ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 794 Pp.
- Compagnone L., Cuomo M., Pace G., Pirelli L. and Ghiglieri G. (2006). *Riade, Acs, Grass Strikes Back: research, business and free software nvis site management: variable attribute (size/color), luts, picking and multimedia*. Atti del VII Convegno degli Utenti Grass, Genova 23 Febbraio 2006.
- Contena M. M., (1994). *Intrusione marina in alcune aree costiere delle Baronie*. Unpublished Degree Thesis.
- Contino A., Giammarinaro M. S. & Varsalona S. (2003). *Settore sud orientale della città di Palermo: studio stratigrafico – geotecnico della porzione non interessata dai depositi alluvionali dell'Oreto*. Geologi Di Sicilia, N. 3, Luglio-Settembre 2003, 9-24.
- Cordoni M. F.. (2007). *Valutazione della vulnerabilità intrinseca ed integrata all'inquinamento degli acquiferi nella piana Turritana*. Tesi di Laurea inedita. Relatore: Prof. Giorgio Ghiglieri; Correlatore: Dott. Daniele Pittalis. Università degli Studi di Sassari.
- Cotecchia V., (1981). *Methodologies adopted and results achieved in the investigations of seawater intrusion into the aquifer of Apulia (Southern Italy)*. Salt Water Intrusion Meeting, Hannover 15-18 October 1981, 1-68.
- Cotecchia V., Grassi D., Polemio M., (2004). *Carbonate aquifers in apulia and seawater intrusion*. 32nd IGC, "Some Engineering Geology Case Histories In Italy", 1-16.
- Cotecchia V., Polemio M., (1997). *L'inquinamento e il sovrasfruttamento delle risorse idriche sotterranee pugliesi*. VI Workshop del Progetto Strategico «Clima, Ambiente e Territorio nel Mezzogiorno», Dicembre 1995, Taormina, I, 447-484.
- Cotecchia V., Polemio M., (1998). *The hydrogeological survey of apulian groundwater (Southern Italy): Salinization, pollution and overabstraction*. Proceedings of the International Conference on «Hydrology In a changing environment», British Hydrological Society, Exeter, 6-10 July, 1998 United Kingdom, John Wiley & Sons, II, Pp.129-136.
- Cotecchia V., Polemio M., (1999). *Apulian groundwater (Southern Italy) salt pollution monitoring network*. 15th Salt Water Intrusion Meeting, Ghent, Belgium, 1998, Fle-

- mish Journal of Natural Science, Ghent; Belgium, Pp-197-204.
- Cotecchia V., Tadolini T. & Tulipano L., (1981). *Saline contamination phenomena in the karstic and fissured carbonatic aquifer of Salentine Peninsula (Southern Italy) and their evolution*. Proceedings of the 7th Salt Water Intrusion Meeting, Uppsala (Sweden).
- Cotecchia V., Tulipano L., (1993). *Le emergenze a mare, individuate anche con tecniche di telerilevamento, come vettori di carichi inquinanti dagli acquiferi carbonatici e carsici pugliesi all'ambiente costiero*. I Workshop Progetto Strategico CNR "Clima, Ambiente E Territorio Nel Mezzogiorno".
- Cusimano G. Frias Forcada A. & Hauser S. (1996). *Processi di salinizzazione caratterizzanti li acquiferi della piana di Palermo*. *Acque Sotterranee*, A. XIII, 13-25, Ed. Geograph, Se grate (MI).
- Cusimano G., Di Cara A., Hauser S., Monteleone S. & Pipitone G. (1997). *Indagini idrogeologiche per la predisposizione di un piano di gestione dei corpi idrici della piana di Palermo e dei Sicani Meridionali*. Rapporto finale del progetto A-Risorse Idriche, Modulo A/8 del Programma Operativo Plurifondo Sicilia 90-93. Regione Sicilia, Palermo.
- D'angelo U. & Vernuccio S. (1992). *Carta geologica del foglio 617 "Marsala" (Scala 1:50.000)*. Dipartimento di Geologia e Geodesia dell'Università degli Studi di Palermo.
- D'angelo U. & Vernuccio S. (1994). *Note illustrative della carta geologica del foglio 617 "Marsala" (Scala 1:50.000)*. *Boll. Soc. Geol. It.*, CXIII, 55-67.
- D'angelo U. & Vernuccio S. (1996). *I terrazzi marini quaternari dell'estremità occidentale della Sicilia*. *Mem. Soc. Geol. It.*, LI, 585-594.
- D'angelo U., Parrino G. & Vernuccio S. (2001). *Il quaternario della fascia costiera compresa fra la Punta Granitola e Porto Palo (Sicilia Sud Occidentale)*. *Naturalista Siciliano*, S. IV, XXV, N.3-4, 333-344.
- Dadea, C., Ardau, C., Frau, F., Lattanzi, P., (2005). *Contaminazione da arsenico in acque superficiali e profonde nell'area di baccu locci, Quirra (Sardegna Sud-Orientale). Presenza e diffusione dell'arsenico nel sottosuolo e nelle risorse idriche italiane*. Nuovi strumenti di valutazione delle dinamiche di mobilitazione, i Quaderni di Arpa.
- Dazzi C. (1999) *Suoli salini e problematiche di gestione*. Progetto POM-OTRIS "Ottimizzazione dell'uso delle risorse idriche, convenzionali e non, in sistemi colturali sostenibili", Unità Operativa H del Dipartimento ACEP- Università Di Palermo, pp.22.
- De Girolamo A.M., Limoni P.P., Portoghese I., Vurro M., (2001). *Impiego di tecniche GIS per la valutazione e rappresentazione del bilancio idrogeologico a scala regionale. Applicazione della metodologia alla Penisola Salentina*. *L'Acqua*, 2, 57-70.
- De Girolamo A.M., Limoni P.P., Portoghese I., Vurro M., (2002). *Il bilancio idrogeologico delle idrostrutture pugliesi. Sovrasfruttamento e criteri di gestione*. *L'Acqua*, 3, 33-45.
- Deidda, G.P., Ranieri, G., Uras, G., Cosentino, P., Martorana, R., (2000). *Seismic reflection and tdem imaging of a complex aquifer system*. XXV Egs General Assembly, Niza.
- Di Pace e Baldassarre. (2005). *Aree sensibili alla desertificazione nel tavoliere di Puglia*. In: *Giornale di Geologia Applicata* 2 (2005) Pp.203–209.
- Di Stefano E. (1998). *I sedimenti marini post-tirreniani del centro storico di Palermo*. *Atti Del 79° Congr. Naz. Soc. Geol. It.*, Vol. A, 419-420.
- Dono G. Et Al (2007). *Studio sulla gestione sostenibile delle risorse idriche: analisi dei modelli di consumo per usi irrigui e civili*. (in stampa).

- EAF. (1999). *Realizzazione e controllo di una rete di monitoraggio della falda costiera del Flumendosa per la determinazione del fenomeno dell'intrusione marina*. Convenzione tra Eaf e DIT Università di Cagliari. Responsabili Scientifici: G. Barrocu e R. Balia. Collaboratori: Dott. Giorgio Ghiglieri; Dott.Ssa Federica Ardaù. Rapporto Tecnico non pubblicato.
- Fadda A.F. (1990). *L'evoluzione del paesaggio in Sardegna - geomorfologia e idrografia*. Co Edi Sar, Cagliari, Italia.
- Fadda A.F., Pala, A. (1992). *Le acque della Sardegna*. Co Edi Sar, Cagliari, Italia.
- FAO – UNESCO. (1985). *Guidelines: land evaluation for irrigated agriculture*. FAO Soils Bulletins N.55, Rome 1985.
- FAO – UNESCO. (1992). *The use of saline waters for crop production*. J.D. Rhoades, A. Kandiah And A.M. Mashali Rome, FAO Irrigation And Drainage Paper 48.
- FAO-UNESCO (1988). *The Soil Map of the World - Revised Legend*. World Soil Resource 60
- Feddes, R.A., Kowalik P.J. and Zaradny H., (1978). *Simulation of field water use and crop yield. simulation monographs*. Pudoc. Wageningen. 189 Pp.
- Fidelibus M.D., Tulipano L. (1986). *Mixing phenomena owing to sea water intrusion for the interpretation of chemical and isotopic data of discharge waters in the Apulian coastal aquifer (southern Italy)*. Proceedings of the 9th SWIM, Delft.
- Fidelibus M.D., Tulipano L., (1996). *Regional flow of intruding sea water in the carbonate aquifers of Apulia (Southern Italy)*. 14th Salt Water Intrusion Meeting, Malmo, Sweden.
- FLORES G. (1959). *Evidence of slump phenomena (olistostromes) in areas of hydrocarbons exploration in Sicily*. Fifth World Petroleum Congr., Sect. 11, Paper 13, New York.
- Funedda A., Oggiano G., Pasci S., (2000). *The Logudoro basin: a key area for the tertiary tectono-sedimentary evolution of North Sardinia*. Boll. Soc. Geol. It., 119, Pp.31-38.
- Ghiglieri G., Barbieri G., Vernier A. (2006). *Studio sulla gestione sostenibile delle risorse idriche: dall'analisi conoscitiva alle strategie di salvaguardia e tutela*. Isbn 88-8286-147-3, 550 Pp
- Ghiglieri G., Barbieri G., Vernier A., Carletti A., Demurtas N., Dore M., Pinna R., Pittalis D, Vargiu M. (2007). *Vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi della Nurra di Alghero (SS) per la gestione integrata delle risorse idriche (Sardegna NW)* . (Sottoposta a Rivista Igea – Ingegneria e Geologia degli Acquiferi ISSN 1121-9041).
- Ghiglieri G., Oggiano G., Fidelibus D., Barbieri G., Vernier A., Tamiru A. (2007). *Geological and structural controls on hydrogeochemistry in the Nurra Area, Sardinia (Italy)*. Hydrogeology Journal Springer Verlag Issn 1431-2174 (Sottoposto a Hydrogeology Journal).
- Giammarinaro M.S., Spotorno R., Sulli A. & Catalano R. (1999). *Analisi litostratigrafica del sottosuolo del centro storico della città di Palermo finalizzata alla stima della pericolosità sismica dell'area*. Il Naturalista Siciliano, 24, 335-357.
- Gignoux M. (1913). *Les formations marines pliocenes et quaternaires de l'Italie Du Sud Et De La Sicilie*. Ann. Univ. Lyon, N. 36, Paris.
- Godio, A., Sambuelli, L., Barrocu, G., Ranieri, G., (1999). *Aplicación del método tdm para la delimitación de la intrusión salina en el acuífero costero de Capoterra (Cerdeña Sud-Occidental)*. En (M. Olmo Y J.A. López-Geta Editores) Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología. 32-41 Pp.

- Groen, K.P., (1997). *Pesticide leaching in polders. field and model studies on cracked clays and loamy sand*. Phd Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 296 Pp.
- Hauser S., Cusimano G. & Vassallo M. (2002). *Idrogeochimica di ambienti umidi costieri: Mazara Del Vallo*, Trapani. GEAM, 107, 4, 71-76
- INEA (2005). Progetto Monidri. Programma Operativo Risorse Idriche, Casi 4.
- Jury, W.A., 1982. *Simulation of solute transport using a transfer function mode*. Water Resour.Res., 18, 363-368.
- Jury, W.A., Gardner W.R. and Gardner W.H., (1991). *Soil physics*. Fifth Edition. Wiley, New York. 330 Pp.
- Kabat, P., Broek B.J., Van Den And Feddes R.A, (1992). *SWACROP: A water management and crop production simulation model*. ICID Bulletin 92, Vol. 41 No. 2, 61-84.
- Kroes JG, Van Dam JC. (Eds). (2003). *Reference Manual SWAP Version 3.0.3*. Alterra-Report 773 Alterra-Report 773, 1566–7197 Alterra Green World Research, Wageningen.
- Kroes, J.G., And Roelsma J., (1998). *User's Guide ANIMO 3.5; input instructions and technical programme description. technical document 46*, DLO Winand Staring Centre, Wageningen.
- Kroes, J.G., Van Bakel P.J.T., Huygen J., Kroon T. And Pastoors R., (2001). *Actualisatie van de hydrologie voor STONE 2.0*. Rapport 298, Alterra, Wageningen, 68 P.
- Leistra, M., Van Der Linden A.M.A., Boesten J.J.T.I., Tiktak A. and Van Den Berg F.. (2001). *PEARL model for pesticide behaviour and emissions in soil-plant systems. Description of processes*. Alterra Report 13, RIVM Report 711401009, Alterra, Wageningen, 107 Pp.
- Maas E. V., Hoffman G. J., (1977). *Crop salt tolerance-current assessment*. J. Irr. And Drainage Div., 103, 115-134.
- Maas E. V., Hoffman G. J., Chaba J. A., Poss J. A., Shannon M.C., (1983). *Salt sensitivity of corn at various growth stage*. Irrig. Sci., 4, 45-67.
- Maggiore M., Pagliarulo P., (2004). *Circolazione idrica ed equilibri idrogeologici negli acquiferi della Puglia*. Geologi e Territorio, Supp. Al N.1/2004, 13-35.
- Marogna A., (1985). *Le pianure dei fiumi Posada e Siniscola, evoluzione dal cenozoico ai tempi attuali*. unpublished degree Thesis.
- McNeil, J.D., (1980). *Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction number*. Geonics Technical Note 6.
- media. Water Resour. Res., 12, 513-522.
- Millington, R.J., And Quirk. J.P., (1961). *Permeability of porous solids*. Trans. Faraday Soc., 57, 1200-1207.
- Montaldo, P., (1966). *I frontalini della tuerra di Capoterra (Campidano di Cagliari- Sardegna)*. Boll. Tecn. Ing. e Arch. Sardi, Anno Xvi (1-2).
- Monteleone M. (2006). *Problematiche della salinità nelle aree irrigue meridionali*. Italian Journal Of Agronomy / Riv. Agron., N. 1, Pp.129-202.
- Motroni A., Canu S., Bianco G. and Loj G., (2003). *Development of a geographic information system for assessing and monitoring environmentally sensitive areas to desertification in Sardinia*. In "Desertification: Actors, Research, Policies. Comitato Nazionale per la Lotta alla Siccità e alla Desertificazione, Roma.

- Mualem, Y., (1976). *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous*
- Nino P., Vanino S., a cura di, (2009). *Usa del suolo e stima dei fabbisogni irrigui nelle aree non servite da reti collettive dei Consorzi di Bonifica nelle Regioni Meridionali*. INEA - Rapporto Irrigazione, ISBN 978-88-8145-174-6.
- Oggiano G., Sanna G., Temussi I., (1987). *Caractères géologiques et géochimiques de la bauxite de la region de la Nurra*. 'Groupe Français du Crétacé', Sardinia, 24-29, Mai, 1987, Pp.72-124.
- Pala, A., (1983). *Studio geoidrologico della piana di Capoterra (Sardegna Meridionale)*. Rendiconti del seminario della Facoltà di Scienze dell'Università di Cagliari, 53(2).
- Palomba, M., Ulzega, A., (1984). *Geomorfologia dei depositi quaternari del Rio di Quirra e della piattaforma continentale antistante (Sardegna Orientale)*. Rendiconti del seminario della facoltà di Scienze dell'università di Cagliari, Vol Liv, Fascicolo 2.
- Perniola M., Lovelli S., Petrizzi N. (1999). *L'effetto dei sali sul suolo*. Atti del Seminario "Utilizzo delle Acque Salmastre in Agricoltura" (Progetto POM-OTRIS), Macerata, Pp.72.
- Pilia, A., (2005). *Mobilizzazione e trasporto dell'arsenico nell'acquifero alluvionale della piana di Quirra*. Tesi di Dottorato.
- Polemio M., Limoni P.P., (2001). *L'evoluzione dell'inquinamento salino delle acque sotterranee della Murgia e del Salento*. Memorie della Società Geologica Italiana, 56, 327-331.
- Polemio M., Limoni P.P., Mitolo D., Virga R. (2006) *Il degrado qualitativo delle acque sotterranee pugliesi*. In: *Giornale di Geologia Applicata* 3 (2006) Pp. 25-31.
- Progemisa S.P.A., (2004). *Piano della caratterizzazione dell'area Baccu Locci-Quirra – piano di investigazione iniziale – comuni di Villaputzu e San Vito (Ca)*. Ras – Assessorato della Difesa dell'ambiente e Comune di Villaputzu.
- Regione Autonoma della Sardegna, Assessorato degli Enti Locali, Finanze e Urbanistica, Servizio Informativo e Cartografico (1998). *Carta tecnica regionale numerica (Ctr) - Scala 1:10.000*.
- Regione Autonoma della Sardegna, Assessorato degli Enti Locali, Finanze e Urbanistica, Direzione Generale della Pianificazione Urbanistica, Territoriale e della Vigilanza (2003). *La Carta dell'uso del suolo della Sardegna - Scala 1:25000*.
- Rhoades, J.D. 1997. *Salinization of soil and water: A review of causes, issues and control principles*. ISSS Int'l Symp. on Salt-Affected Lagoon Ecosystems, Valencia, Spain, September 18-25, 1995, pp. 343-370.
- Rijtema, P.E., Groenendijk P. and Kroes J.G., (1997). ANIMO, *A dynamic simulation model for transport and transformation of nutrients and organic materials in soils*. Report 30, DLO Winand Staring Centre, Wageningen, In press.
- Rivelli A., Tarantino E. (1999). *Le acque saline come risorsa irrigua*. Atti del Seminario "Utilizzo delle Acque Salmastre in Agricoltura" (Progetto POM-OTRIS), Macerata.
- Ruggieri G. & Sprovieri R. (1975). *La definizione dello strato tipo del piano siciliano e le sue conseguenze*. Riv. Min. Sic., 151-153.
- Ruggieri G. & Torre G. (1973). *Geologia delle zone investite dal terremoto del Belice. 1) La tavoletta di Gibellina*. Riv. Min. Sic., 132-139, 127-187.
- Ruggieri G. (1967). *Quadro sintetico del quaternario marino fra Castellammare ed Alta-*

- villa (Pa)*. Atti Acc. Gioenia Sc. Nat. In Catania S. VI, 18, 345-355.
- Ruggieri G., Unti A. Unti M. & Moroni A. (1977). *La calcarenite di Marsala (Pleistocene Inferiore) e i terreni contermini*. Boll. Soc. Geol. It., 94, 1623-1657.
- Schmidt di Friedberg P. (1962). *Introduction a la géologie pétrolière de la Sicile*. Rev. Inst. Franc. Pétr., 17, 653-688.
- Sciabica, M.G., (1994). *Validazione dei modelli concettuali e matematici degli acquiferi con i dati idrogeologici e idrogeochimici delle reti di monitoraggio*. Tesi di Dottorato.
- Sodde, M., (2007). *Potential long-term impacts of heavy metals accumulated in soils and sediments: the study case of the alluvial plain of Quirra (South-Eastern Sardinia)*. Tesi di Dottorato. Banca Dati Nazionale Pubblitesi.
- Sodde, M., Barrocu, G., (2006). *Seawater intrusion and arsenic contamination in the alluvial plain of Quirra and Flumini Pisale rivers, South-Eastern Sardinia*. Proceedings of the 1st Swim-Swica Conference, Cagliari 2006, in press.
- Sodde, M., Barrocu, G., Fidelibus, M.D., (2007). *Assessment of retoxification factors variability in a heavy metal contaminated coastal aquifer in south-eastern Sardinia (Italy)*. Proceedings of the Technology of Seawater Intrusion into Coastal Aquifers (T Iac'07), Almería (Spain) 2007.
- Soddu S., Barrocu G.. (2006). *Contaminazione salina degli acquiferi nell'area della bonifica di Arborea (Sardegna Centro-Occidentale)*. Igea – Ingegneria e Geologia degli Acquiferi, Anno 2006, N. 21, Pp 103-112.
- Soddu S.. (2004). *Gis e modellazione numerica dei processi di salinazione della piana costiera di Oristano (Sardegna Centro-Occidentale)*. Tesi di Dottorato, pp 267. Università degli Studi di Cagliari, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Sezione di Geologia Applicata e Geofisica Applicata.
- SOGESID S.P.A. (2005). *Piano di tutela delle acque della Regione Puglia, documento di sintesi*. Novembre 2005, Pp. 240.
- SOGESID s.p.a. (2005). *Piano di tutela delle acque della Regione Sicilia, documento di sintesi*. Dicembre 2005, Pp. 240.
- Staffa F. (2003). *Studio idrogeologico della piana di Oristano*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Cagliari, Italia.
- Tadolini T. Tulipano L., Fidelibus M.D. (1982). *Significativi aspetti del chimismo delle acque sotterranee circolanti nell'acquifero carsico della Penisola Salentina (Italia Meridionale)*. In Zezza F. (Ed.), Proceedings of the 2nd Int. Symp. on the "Utilization of Karst Areas", Bari, 1982, in Geol Appl. e Idrogeol., XVII, p. II, 411-425.
- Tiktak, A., Van Den Berg F., Boesten J.J.T.I., Leistra M., Van Der Linden A.M.A., And Van Kraalingen D., (2000). *Pesticide emission at regional and local scales: Pearl version 1.1 User Manual*. RIVM Report 711401008, Report 29, Alterra Green World Research, Wageningen.
- Tola F., 1997. *Studio idrogeologico degli acquiferi costieri del settore di Posada (Alta Baronia)*. Unpublished Degree Thesis.
- Tulipano L. (1976). *La contaminazione marina nelle acque sotterranee pugliesi. Atti Seminario su Falde sotterranee e Trattamento delle Acque, Ente Sviluppo, Irrigazione e Trasformazione Fondiaria in Puglia e Lucania, Istituto Geologia Applicata e Geotecnica, ISRA, 16 nov.-3 dic. 1976, pp. 17-26, Bari*.
- Tulipano L., Fidelibus M.D. (1986). *Temperature of groundwater in coastal aquifers:*

- some aspects concerning saltwater intrusion. Proc. SWIM 10, 16-20 May 1988, 308-316, Gent.
- UNEP (1994). *United Nations convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa*. UNEP, Geneva.
- United States Salinity Laboratory Staff (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. USDA Agriculture Handbook, N. 60, USA.
- Van Dam, J.C., (2000). *Field scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies*. PHD Thesis, Wageningen Universiteit, 167 pp.
- Van Dam, J.C., Huygen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., Van Walsum P.E.V., Groenendijk P. And Van Diepen C.A., (1997). *Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil-water-atmosphere-plant environment*. Wageningen University And Alterra. Technical Document 45.
- Van Den Berg, F., And Boesten J.J.T.I., (1998). *Pesticide leaching and accumulation model (PESTLA) Version 3.4; Description and user's guide*. Technical Document 43, Alterra Green World Research, Wageningen, 150 P.
- Van Den Broek, B.J., Van Dam J.C., Elbers J.A., Feddes R.A., Huygen J., Kabat P., Van De Pol J.G., Wierenga R.M., and Nielsen D.R., (1977). *Solute movement in a field soil*. Soil Sci. Soc. Am. J., 41, 10-13.
- Van Der Zee S.E.A.T.M., and Van Riemsdijk W.H., (1987). *Transport of reactive solute in spatially variable soil systems*. Water Resour. Res., 23, 2059-2069.
- Van Genuchten M.Th., (1980). *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.
- Vernier, E., (1999). *Studio idrogeologico e idrogeochimici del sistema acquifero della piana di Capoterra (Sardegna Meridionale)*. Tesi di Dottorato.
- Vitale F.P. (1990). *Studi sulla valle del medio Belice (Sicilia Centro Occidentale) - L'avanfossa plio-pleistocenica nel quadro dell'evoluzione paleotettonica dell'area*. Tesi di Dottorato (Inedita).
- Wesseling J.G., (1994). *SWAP 1993, input instructions manual*. Report 45, Dep. Water Resources, Wageningen Agricultural University.