



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA
IN GEOINGEGNERIA E TECNOLOGIE AMBIENTALI
Ciclo XXI

*Comparazione fra metodiche per la valutazione della
vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi.
Applicazione all'acquifero del Sulcis Iglesiente*

Settore scientifico disciplinare di afferenza:

GEO/05

Presentata da:	ing. Romina Secci
Coordinatore Dottorato	Prof. ing. Luciano Curreli
Relatore	Prof. ing. Gabriele Uras

Esame finale anno accademico 2009 - 2010

Comparazione fra metodiche per la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi.
Applicazione all'acquifero del Sulcis Iglesiente

ABSTRACT.....	4
INTRODUZIONE	6
CAPITOLO 1 - I FATTORI DELLA VULNERABILITÀ ALL'INQUINAMENTO.....	9
1.1 IL CONCETTO DI VULNERABILITÀ DI UN ACQUIFERO ALL'INQUINAMENTO: VULNERABILITÀ INTRINSECA, VULNERABILITÀ SPECIFICA E VULNERABILITÀ INTEGRATA.	10
1.2 INTERAZIONI TRA CONTAMINANTI E SISTEMI ACQUIFERI.	12
1.2.1 PROPRIETÀ E TIPI DI INQUINANTI.	12
1.2.2 PROCESSI DI ATTENUAZIONE DEGLI INQUINANTI NEL SISTEMA ACQUIFERO.....	15
1.2.3 LE POSSIBILI FONTI DI INQUINAMENTO DELLE ACQUE SOTTERRANEE.....	16
1.3 RIFERIMENTI NORMATIVI.....	20
CAPITOLO 2 - VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ DEGLI ACQUIFERI ALL'INQUINAMENTO	22
2.1 IL CONCETTO DI VULNERABILITÀ DEGLI ACQUIFERI ALL'INQUINAMENTO	23
2.1.1 ANISOTROPIA DEL SISTEMA CARSICO.	25
2.1.2 METODI DI VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ INTRINSECA	26
2.1.3 ZONAZIONE PER AREE OMOGENEE	27
2.1.4 VALUTAZIONE PER MODELLI NUMERICI	27
2.1.5 VALUTAZIONE PER SISTEMI PARAMETRI.....	27
2.1 IL METODO SINTACS.....	29
2.2.1 SOGGIACENZA S	29
2.2.2 INFILTRAZIONE I.....	31
2.2.3 EFFETTO DI AUTODEPURAZIONE DEL NON SATURO N	33
2.2.4 TIPOLOGIA DELLA COPERTURA T.....	35
2.2.5 CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DELL'ACQUIFERO A	36
2.2.6 CONDUCEBILITÀ IDRAULICA DELL'ACQUIFERO C.....	37
2.2.7 ACCLIVITÀ DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA.....	39
2.2.8 L'INDICE DI VULNERABILITÀ	42
2.3 IL METODO COP	43
2.3.1 IL FATTORE O (OVERLYING LAYERS)	43
2.3.2 IL FATTORE C (FLOW CONCENTRATION)	44
2.3.3 IL FATTORE P (PRECIPITATION)	46
2.4 IL METODO EPIK.....	48
2.4.1 MODELLO CONCETTUALE DI ACQUIFERO CARSICO	49
2.4.2 GLI ATTRIBUTI	51
2.4.3 VALUTAZIONE DEL FATTORE DI PROTEZIONE – GRADO DI VULNERABILITÀ	59
CAPITOLO 3 - ARTICOLAZIONE DELLA RICERCA	64
3.1 FASE PRELIMINARE.....	65
3.2 FASE DI SCELTA DEL SITO.	66
3.3 FASE DI ELABORAZIONE DATI.	67
3.4 APPLICAZIONE DELLE METODOLOGIE DI VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ.	69
3.5 FASE DI PRODUZIONE CARTOGRAFIA TEMATICA IN BASE GIS.	70
CAPITOLO 4 - INQUADRAMENTO STORICO: IL RUOLO DELL'ATTIVITÀ MINERARIA NEL TERRITORIO	71
4.1 INQUADRAMENTO STORICO DELL'AREA.	72
4.2 STORIA DELL'EDUZIONE DELLA FALDA A MONTEPONI.	73
4.3 L'EDUZIONE NEGLI ALTRI CANTIERI.....	78
4.4 LA CESSAZIONE DEL POMPAGGIO E LA RISALITA DELLA FALDA.	80
4.5 IL MONITORAGGIO DELLA FALDA.	82
CAPITOLO 5 - AREA IN ESAME	85
5.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE	86

5.2	CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	87
5.2.1	CARATTERISTICHE GEOMORFOLOGICHE	89
5.3	CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE.....	89
5.3.1	FENOMENI CARSICI.....	91
5.3.2	IDROSTRUTTURE DEL METALLIFERO.....	92
5.3.3	ACQUIFERO PRINCIPALE E RAPPORTI CON I BACINI LIMITROFI.....	94
5.3.4	PARAMETRI IDRODINAMICI DELL'ACQUIFERO PRINCIPALE.....	95
5.3.5	RISALITA DELLA FALDA.....	95
5.3.6	PROBLEMATICHE DI DISSESTO LEGATE ALLA RISALITA.....	98
5.4	CENNI CLIMATICI	99
5.5	BILANCIO IDROGEOLOGICO	99
5.5.1	IPOTESI MINIMA	100
5.5.2	IPOTESI MASSIMA	101
5.6	ASPETTI PEDOLOGICI-VEGETATIVI.....	102
5.6.1	CARATTERI GENERALI DEI SUOLI E LORO CLASSIFICAZIONE	105
5.7	ANALISI MULTITEMPORALE DEL PAESAGGIO DEL DISTRETTO MINERARIO DI MONTEPONI.....	106
CAPITOLO 6 - ANALISI DELLE ACQUE.....		109
6.1	DESCRIZIONE CAPTAZIONI.....	110
6.2	CUCCURU TIRIA.....	110
6.2.1	DOMUSNOVAS	113
6.2.2	MONTE FIGU	119
6.2.3	GUARDIA SU MERTI	120
6.2.4	CAMPO PISANO.....	121
6.3	DATI RELATIVI ALLE PORTATE MEDIE ANNUE DI ACQUA POTABILE EDOTTE DALL'ACQUIFERO.....	124
6.4	CHIMISMO DELLE ACQUE.....	127
6.4.1	INQUINAMENTO DA CLORURI.....	131
CAPITOLO 7 - APPLICAZIONE DEL METODO SINTACS ALL'AREA IN ESAME.....		134
7.1	DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI E RELATIVI PUNTEGGI.....	135
7.2	SOGGIACENZA.....	136
7.3	INFILTRAZIONE EFFICACE	143
7.3.1	PRECIPITAZIONI RAGGUAGLIATE.....	146
7.3.2	STIMA DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE MEDIA ANNUA.....	147
7.4	EFFETTO DI AUTO DEPURAZIONE DEL NON SATURO E CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DELL'ACQUIFERO.....	150
7.5	TIPOLOGIA DELLA COPERTURA.....	152
7.6	CONDUCIBILITÀ IDRAULICA.....	155
7.7	ACCLIVITÀ DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA.....	156
7.8	I PESI RELATIVI ALLE SITUAZIONI IDROGEOLOGICHE E DI IMPATTO E CORRISPONDENTE RAPPRESENTAZIONE CARTOGRAFICA	158
7.9	CARTA DELLA VULNERABILITÀ INTRINSECA.....	161
CAPITOLO 8 - APPLICAZIONE DEL METODO COP ALL'AREA IN ESAME.....		165
8.1	DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI E RELATIVI PUNTEGGI.....	166
8.2	PARAMETRO O (OVERLYING LAYERS – SOVRAPPOSIZIONE STRATI INFORMATIVI).....	166
8.2.1	SUBFATTORE O _S (SUOLO).....	166
8.2.2	SUBFATTORE O _L (LITOLOGIA).....	168
8.2.3	CARTA DEI PUNTEGGI DEL FATTORE O.....	171
8.3	CARTA DEI PUNTEGGI DEL FATTORE C (CONCENTRATION OF FLOW).....	172
8.4	CARTA DEI PUNTEGGI DEL FATTORE P (PRECIPITATION).....	176
8.5	CARTA DEI PUNTEGGI DELL'INDICE COP.....	177
CAPITOLO 9 - APPLICAZIONE DEL METODO EPIK ALL'AREA IN ESAME		180

9.1	DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI E RELATIVI PUNTEGGI.....	181
9.2	EPIKARST	181
9.3	PROTECTIVE COVER	183
9.4	INFILTRATION CONDITION	187
9.5	KARST NETWORK DEVELOPMENT.....	189
9.6	ASSEGNAZIONE DEI PESI	192
9.7	VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ	193
CAPITOLO 10 - CONFRONTO TRA LE METODOLOGIE APPLICATE PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA'		195
10.1	CONFRONTO TRA I RISULTATI OTTENUTI.....	196
10.2	PUNTI DI FORZA E CARENZE INDIVIDUATI PER OGNI METODO.....	202
CONCLUSIONI		204
BIBLIOGRAFIA.....		209
INDICE DELLE FIGURE		214
INDICE DELLE TABELLE.....		216

ABSTRACT

The assessment of the vulnerability of aquifers is a key instrument for planning the methods of environmental resources protection. This research compares three scoring and weighting methods to assess the intrinsic vulnerability of the carbonate type aquifer systems. In particular, we have applied the SINTACS method (Civita, 1994), the EPIK method (Doerfliger N., Jeannin PY, Zwahlen F., 1999) and the COP method (Vias et al., 2006) to the carbonate Sulcis Iglesiente aquifer. The study focused on the area of the so-called "small Metal ring", near the town of Iglesias, in the south of Sardinia. The peculiarity of this area lies in the fact that for millennia it has been exploited by mining of lead-zinc mines, among the most productive in the world. These activities have left a precarious environment, as potentially polluting landfill opencast mining sites are scattered throughout the area. The analysis of the results has led to develop a methodology for assessing the vulnerability more effective than the others and to highlight the critical issues of each method.

With the identification of those areas inherently more vulnerable, we laid the ground for the strategic planning of reclamation of the most vulnerable sites.

The study is also preparatory to a larger scale research aimed at the protection and sustainable exploitation of the environment and water resources in the area.

RIASSUNTO

La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi è uno strumento determinante per la pianificazione di metodi di salvaguardia delle risorse ambientali. In questa ricerca si è effettuata una comparazione fra tre metodi a punteggi e pesi per la valutazione della vulnerabilità intrinseca dei sistemi acquiferi di tipo carbonatico. In particolare si sono applicati il metodo SINTACS (Civita, 1994), il metodo EPIK (Doerfliger N., Jeannin P.Y., Zwahlen F., 1999) ed il metodo COP (Vias et al. , 2006) all'acquifero carbonatico del Sulcis Iglesiente. Lo studio si è incentrato sulla zona del cosiddetto "piccolo anello metallifero", in prossimità del comune di Iglesias, situato nel sud della Sardegna. La peculiarità di questa zona risiede nel fatto che per millenni è stata sfruttata dalle attività estrattive delle miniere piombo-zincifere, tra le più produttive al mondo. Queste attività

hanno lasciato una situazione di precarietà ambientale, in quanto tutto il territorio è disseminato di discariche minerarie a cielo aperto potenzialmente inquinanti.

L'analisi dei risultati ottenuti ha portato a definire una metodologia di valutazione della vulnerabilità più efficace delle altre e a mettere in evidenza le criticità di ogni metodo. Con l'individuazione delle zone del territorio intrinsecamente più vulnerabili si sono poste le basi per la pianificazione strategica di bonifiche dei siti maggiormente vulnerabili.

Lo studio inoltre è propedeutico ad una ricerca a scala più vasta tesa alla tutela e ad un possibile sfruttamento ecosostenibile dell'ambiente e delle risorse idriche del territorio.

INTRODUZIONE

Le acque sotterranee rivestono oggi un ruolo fondamentale nella definizione di criteri affidabili per la gestione del territorio.

La pianificazione territoriale ed il conseguente processo di trasformazione del territorio, non possono prescindere da un accurato studio idrogeologico.

I problemi cui si va incontro nei processi pianificatori, consistono sia nel valutare la quantità d'acqua disponibile nel sottosuolo, sia la qualità. In tal senso, in funzione dell'uso che si fa (uso potabile, irriguo, ecc.), tale acqua deve rispondere a requisiti specifici, vincolati da severe norme giuridiche.

Particolare importanza assumono gli acquiferi costieri, che dovrebbero essere costantemente monitorati, in modo tale da verificarne lo stato ambientale, in quanto maggiormente predisposti a fenomeni di inquinamento. È fondamentale, a tal fine, impiegare differenti strumenti e metodologie atti ad individuare le zone potenzialmente più vulnerabili, in modo tale che il processo pianificatorio le preservi da possibili fenomeni d'inquinamento e di intrusione marina.

Ogni tipologia di acquifero presenta un grado di sensibilità alla propagazione di contaminanti funzione di differenti fattori, sia intrinseci all'acquifero, sia legati alle caratteristiche fisico-chimiche del contaminante. Tra le metodologie per il monitoraggio degli acquiferi rientrano quelle di valutazione della vulnerabilità all'inquinamento.

L'argomento di questa ricerca verte sullo studio della contaminazione degli acquiferi. L'obiettivo di questo lavoro consiste, infatti, nell'individuare una metodologia utile per l'individuazione delle zone a maggior rischio di contaminazione.

Nel presente lavoro vengono utilizzati diversi metodi parametrici a punteggi e pesi per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. E' stato scelto di studiare l'acquifero del Sulcis Iglesiente, che per le sue caratteristiche intrinseche si presta ad essere analizzato con diverse metodologie. In particolare questo acquifero, oltre ad essere costiero è anche di tipo carbonatico e ciò ha consentito l'applicazione di diversi metodi di valutazione della vulnerabilità, studiati ad hoc per questo tipo di acquiferi. Il Sulcis Iglesiente è di particolare interesse anche per il fatto di essere stato sede delle attività minerarie che per secoli ne hanno sfruttato il territorio, hanno indotto cambiamenti sia a livello morfologico che strutturale, ed hanno lasciato una pesante eredità ambientale. L'attività di sfruttamento minerario ha fatto sì che per tali aree ci fossero a disposizione una mole di dati (monitoraggi continui spazio-temporali dei pozzi minerari) tale da consentire uno studio

approfondito del territorio e delle dinamiche di trasformazione che lo hanno interessato, anche a livello profondo, e che hanno interessato soprattutto le acque presenti al suo interno.

Una notevole parte del tempo impiegato per la ricerca è stata spesa per l'omogeneizzazione e la digitalizzazione dei dati. I dati storici, infatti, prevalentemente di tipo cartaceo e con poche indicazioni di ordine geografico, hanno richiesto un notevole impegno per la loro georeferenziazione e digitalizzazione.

In questo studio è stato individuato il metodo parametrico a punteggi e pesi più rispondente e più efficace per la caratterizzazione del sito in esame. Ciò ha consentito di produrre una specifica e dettagliata cartografia in base GIS (Geographic Information System), ancora non disponibile per la zona. Con la produzione della carta di vulnerabilità non si è voluto delineare in via definitiva le aree di vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero, anche in considerazione dei limiti con cui, in talune occasioni, ci si è dovuti scontrare, ma si è voluto semplicemente porre le basi per ulteriori approfondimenti in merito alla valutazione della stessa vulnerabilità. Si è cercato, in tal senso, di gettare le basi per la definizione di un metodo parametrico studiato ad hoc per la valutazione della vulnerabilità di acquiferi che avessero le stesse caratteristiche della zona in esame.

Capitolo 1 - I FATTORI DELLA VULNERABILITÀ ALL'INQUINAMENTO

1.1 Il concetto di vulnerabilità di un acquifero all'inquinamento: vulnerabilità intrinseca, vulnerabilità specifica e vulnerabilità integrata.

Esistono numerosissime e differenti definizioni della vulnerabilità naturale o intrinseca di un acquifero, gli autori più recenti però concordano nel considerare la vulnerabilità di un corpo idrico sotterraneo come funzione di diversi parametri quali la idrolitologia e struttura del sistema idrogeologico, la natura del suolo, il processo di ricarica, il flusso sotterraneo, i processi di interazione idrogeochimica. Secondo una definizione che comprende l'insieme di questi parametri, la vulnerabilità intrinseca è *“la suscettibilità specifica dei sistemi acquiferi, nelle loro diverse parti componenti e nelle diverse situazioni geometriche e idrodinamiche, ad ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un inquinante fluido o idroveicolato tale da produrre impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea, nello spazio e nel tempo”*(M.Civita,1987). Secondo questa definizione la vulnerabilità intrinseca di un acquifero dipende esclusivamente dalle sue condizioni naturali, superficiali e sotterranee, prescindendo quindi dalla effettiva presenza di fonti di inquinamento.

Quando alla vulnerabilità intrinseca di una zona è associata la presenza dei centri di pericolo (potenziali fonti di inquinamento), esistenti o dei quali è prevista la realizzazione, la vulnerabilità intrinseca acquista carattere applicativo e si parla allora di *vulnerabilità integrata*: tale concetto sottintende l'interazione tra le condizioni naturali di un sistema idrogeologico e i centri di pericolo ad esso associati, coincidendo quindi con il concetto di potenziale di inquinamento.

Per *vulnerabilità specifica* si intende invece la vulnerabilità valutata in rapporto alla singola tipologia di inquinante, in termini di composizione chimica, mobilità e persistenza nel sistema acquifero; concettualmente una valutazione di vulnerabilità specifica trova giustificazione nel fatto che il potenziale di attenuazione di ogni sistema acquifero, cioè la sua capacità di autodepurazione, dipende sia dalle sue caratteristiche intrinseche sia dal tipo di inquinante, dalla sorgente, dal meccanismo di rilascio, dalla quantità e dalla velocità di immissione. Tuttavia realizzare una valutazione di vulnerabilità specifica per ogni singolo inquinante non è conveniente in termini di dispendio temporale e di risorse finanziarie, inoltre bisogna considerare che spesso non è possibile conoscere a priori quale sarà il tipo di inquinamento per un certo territorio, dipendendo questo fenomeno da numerosissimi fattori anche accidentali.

Si preferisce quindi una valutazione generalizzata attraverso una carta di *vulnerabilità integrata*, la quale costituisce uno strumento dinamico di prevenzione e previsione generale nel campo della pianificazione territoriale: la dinamicità si esplica nella possibilità di un continuo aggiornamento della vulnerabilità, essendo i fattori che la determinano (sensibilità intrinseca dell'acquifero e carico potenziale di inquinante), suscettibili di una certa variabilità temporale.

1.2 Interazioni tra contaminanti e sistemi acquiferi.

Le qualità naturali delle acque sotterranee dipendono, oltre che dalle caratteristiche del sistema idrogeologico contenitore, dalla loro origine (prevalentemente meteorica) e dal tipo e dalla velocità di flusso (attraverso il suolo e le rocce componenti il sistema); durante il flusso processi chimici, fisici e biologici ne alterano le caratteristiche originarie determinando la presenza di una certa quantità di sostanze disciolte e caratteristiche fisiche quali temperatura, gusto e odore nonché la presenza di microrganismi. Accanto a questi fenomeni naturali, si collocano poi variazioni delle caratteristiche delle acque dovute alle attività antropiche, che nella maggior parte dei casi provocano un peggioramento della qualità arrivando talvolta a casi limite di inquinamento. Sono considerate inquinate le acque che contengono determinate sostanze in concentrazioni che superino i limiti massimi imposti dalle norme nazionali o internazionali; tali limiti dipendono dagli usi specifici quali consumo umano, agricolo o industriale.

1.2.1 Proprietà e tipi di inquinanti.

Le principali proprietà delle sostanze inquinanti che ne caratterizzano modalità e tempi di spostamento e potenziale inquinante sulle acque sotterranee sono la densità, la viscosità, la conducibilità idraulica, la solubilità, la volatilità e la persistenza.

La densità è la massa dell'unità di volume di una certa sostanza rapportata alla massa volumica dell'acqua; in generale è una caratteristica variabile con la temperatura in maniera inversamente proporzionale. In formazioni geologiche uniformi, al crescere della densità i fluidi presentano una tendenza crescente a penetrare in profondità nell'acquifero; tuttavia i fluidi con densità superiore alla densità dell'acqua sono caratterizzati da velocità inferiori a quella del flusso idrico sotterraneo e quindi da una capacità di migrazione orizzontale inferiore.

La viscosità dinamica rappresenta l'attrito interno di un fluido, cioè la tendenza di uno strato fluido in moto laminare a trascinare gli strati adiacenti e pertanto può essere vista come una misura della resistenza al moto per quel fluido; questa grandezza dipende dalla temperatura e dalla conducibilità idraulica in ragione inversamente proporzionale. Il rapporto tra viscosità dinamica e densità di un fluido si definisce viscosità cinematica.

Sostanze viscosi si spostano con difficoltà nei mezzi porosi e quindi nei sistemi acquiferi, viceversa sostanze molto fluide risultano particolarmente mobili.

La conducibilità idraulica di un fluido K è definita dalla relazione

$$K = \frac{w}{\mu} \cdot k$$

dove w è il peso specifico del fluido, μ la sua viscosità dinamica e k la permeabilità dell'acquifero. Al crescere della conducibilità idraulica cresce la mobilità di un inquinante nel sistema acquifero: alcune sostanze quali benzina, benzene e idrocarburi volatili clorurati risultano addirittura più mobili dell'acqua nei mezzi porosi.

La solubilità è definita come la massa di una certa sostanza (soluta) che si discioglie nell'unità di volume di solvente, generalmente nell'unità di volume d'acqua. La solubilità di un composto in acqua dipende da numerosi parametri quali temperatura, pressione, pH, Eh e dalle concentrazioni di altre sostanze disciolte nella soluzione. Una sostanza solubile in acqua introdotta in un acquifero da luogo ad una soluzione, come nel caso dei sali, mentre una sostanza non solubile da luogo alla formazione di una miscela insolubile, come succede nel caso di olii oppure, in generale, per sostanze non polari come gli idrocarburi.

La volatilità indica la tendenza delle sostanze a passare allo stato di vapore. Una sostanza particolarmente volatile può passare con facilità dal suolo o dal sottosuolo (insaturo) nell'atmosfera sottraendosi così all'impatto sulle acque sotterranee, a meno che tale sostanza non si trovi in soluzione, condizione nella quale la volatilità si riduce notevolmente.

La persistenza rappresenta la capacità di una sostanza, o di un microrganismo inquinante, di resistere nell'ambiente fisico-biologico in cui viene a trovarsi; viene espressa in termini di tempo di dimezzamento o emivita, oppure tramite il tempo necessario per la sua eliminazione. Nel caso di sostanze biodegradabili l'eliminazione segue una legge di decadimento esponenziale del tipo:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

dove C_t è la concentrazione al tempo t , C_0 la concentrazione iniziale, λ una costante di decadimento inversamente proporzionale alla emivita T_D , variabile a seconda del tipo di sostanza o microrganismo considerato.

I principali tipi di inquinanti sono raggruppabili nelle seguenti categorie: metalli pesanti, inquinanti inorganici non metallici, composti chimici organici, batteri e virus.

I metalli pesanti comprendono 70 elementi con densità maggiore di 5g/cm^3 i cui numeri atomici rientrano negli intervalli 23-33,40-41,57-84,87-106; molti di questi, se presenti in acque destinate al consumo umano in concentrazioni superiori a quelle massime ammissibili dalle norme, sono considerati tossici (ad esempio mercurio, piombo, cromo, cadmio etc.); altri (come argento, oro, ferro, rame, manganese) sono considerati indesiderabili. La presenza nei suoli o nelle acque sotterranee può essere dovuta sia a cause naturali (vulcanismo, lisciviazione di giacimenti metallici) sia, come nella maggioranza dei casi, ad attività antropiche di tipo chimico-industriale, estrattivo o agricolo (si possono trovare tra i costituenti di pesticidi e fertilizzanti), senza contare il fatto che nei processi di combustione dei combustibili fossili vengono liberate discrete quantità di metalli pesanti. La solubilità e la persistenza dei metalli in un sistema acquifero sono favorite da un elevato grado di acidità (pH) e dipendono inoltre dal potenziale di ossidoriduzione delle acque sotterranee.

Tra gli inquinanti inorganici non metallici si ritrovano soprattutto i composti dell'azoto e del fosforo e in minor misura cloruri, fluoruri, composti dello zolfo e del boro; sono considerati inquinanti se la loro presenza non è tipica della composizione naturale delle acque. L'origine dei composti azotati e fosforici si individua soprattutto nell'utilizzo di concimi agricoli, nelle attività zootecniche, negli scarichi civili e in minor quantità nelle attività industriali.

I principali inquinanti chimico-organici comprendono: idrocarburi (a catena lineare o ramificata e composti aromatici), composti organo-alogenati, tensioattivi ionici e non ionici, idrocarburi policiclici aromatici, olii minerali e soprattutto, in quantità preponderante, fitofarmaci di largo uso agricolo (erbicidi, insetticidi, nematocidi, fungicidi). I composti organo-alogenati si ritrovano soprattutto in scarichi solidi e liquidi di origine industriale (sono utilizzati come solventi e sgrassanti); i tensioattivi sono invece componenti importanti di detersivi liquidi e solidi di uso domestico e si ritrovano quindi in

tutti gli scarichi civili o misti. Gli idrocarburi policiclici aromatici sono considerati altamente tossici e alcuni cancerogeni; la loro origine è da attribuire a emissioni del traffico veicolare, impianti termoelettrici, raffinerie petrolifere, industria chimica e incenerimento di rifiuti senza adeguati trattamenti. Gli idrocarburi componenti il petrolio e gli oli minerali possono inquinare le acque sotterranee a causa di perdite da serbatoi o impianti di distribuzione di carburanti, oppure in alcuni casi da impianti di confezionamento del bitume per asfaltatura stradale, da scarichi di industrie metallurgiche, meccaniche e della gomma.

Batteri e virus sono microrganismi che possono trovarsi abitualmente nel sottosuolo o che possono provenire dall'esterno in quantità tali da produrre inquinamento per le acque sotterranee. La presenza di batteri e virus diventa allarmante qualora si tratti di organismi patogeni, per i quali sia reale un pericolo di contaminazione nei confronti di acque captate per usi umani. Nella maggioranza dei casi hanno tempi di persistenza non superiori alle tre settimane in condizioni ambientali non favorevoli; la persistenza è maggiore nelle acque di scarico o nelle parti profonde degli acquiferi.

1.2.2 Processi di attenuazione degli inquinanti nel sistema acquifero.

Nella maggior parte dei casi le sostanze inquinanti vengono rilasciate sulla superficie: nel loro spostamento attraverso il suolo, la zona insatura e infine la zona di saturazione subiscono una serie di processi fisici e reazioni chimiche che possono determinare una riduzione della concentrazione originaria, una trasformazione dello stato fisico o della composizione chimica e talvolta una completa rimozione dal sistema. Tali fenomeni dipendono sia dalla natura dell'inquinante che dalle caratteristiche idrogeochimiche dell'acquifero, del non saturo e del suolo e prendono il nome di processi di *attenuazione* degli inquinanti. I processi di attenuazione comprendono:

- reazioni geochimiche quali dissoluzione, precipitazione, scambio ionico, reazioni acido-base, ossidoriduzione, adsorbimento.
- processi fisici quali dispersione, filtrazione meccanica, volatilizzazione.
- processi biologici di biodegradazione e sintesi cellulare.

L'attenuazione può esplicarsi secondo differenti gradi che dipendono essenzialmente dalla velocità di percolazione (e quindi dal tempo di contatto con la roccia costituente

l'acquifero o con il suolo), dalle dimensioni e caratteristiche fisico-chimiche dei granuli o dei materiali in cui passa l'inquinante (nel caso in cui non si abbia a che fare con mezzi porosi bensì fratturati o carsificati), infine dallo spazio percorso.

I processi di attenuazione possono talvolta operare in sinergia determinando così un maggior grado di attenuazione dell'inquinante.

1.2.3 Le possibili fonti di inquinamento delle acque sotterranee.

Nella quasi totalità dei casi, l'inquinamento delle acque sotterranee è connesso in modo diretto o indiretto con le attività antropiche di tipo industriale, agricolo, commerciale o domestico. Le attività che possono generare un impatto sulle acque superficiali e sotterranee sono dette *centri di pericolo*. Gli impatti possono essere di tipo *superficiale*, se generati da inquinanti sversati sulla superficie del suolo o nel reticolo idrografico superficiale, *sottosuperficiale*, nel caso di sostanze sversate nel sottosuolo ma al di sopra del livello idrostatico dell'acquifero, *in acquifero*, nei casi di accumulo, immagazzinamento o azioni di scavo ed estrazione al di sotto del livello idrostatico.

I centri di pericolo possono essere singoli o multipli e, nel secondo caso, omogenei o eterogenei. In relazione allo spazio impegnato, possono distinguersi in centri di pericolo puntuali, ad esempio pozzi o serbatoi perdenti, e centri di pericolo diffusi, quando l'impatto copre una vasta area non identificabile con un singolo punto. In base a indagini statistiche possono essere evidenziate le attività che più frequentemente possono essere causa di inquinamento per i corpi idrici sotterranei; tali cause sono identificate principalmente nelle perdite da rete fognaria, scarichi industriali, allevamenti zootecnici, nell'uso di concimi chimici, fitofarmaci e spandimento di liquami in agricoltura, depositi di fluidi o rifiuti solidi, pozzi perdenti; con frequenze relative di gran lunga inferiori si annoverano poi episodi di perdite accidentali dovute a fuoriuscite da mezzi di trasporto o da oleodotti. Da non trascurare sono poi i fenomeni di ricaduta sul suolo di particolato prodotto dagli scarichi dei fumi industriali o dalle emissioni dei veicoli a motore.

I centri di pericolo possono essere classificati inoltre in base al tipo di insediamento in cui sono presenti; si hanno:

- Insedimenti industriali e assimilabili, i cui centri di pericolo sono costituiti da stoccaggi di materie prime sul suolo, perdite da tubazioni, scarichi, serbatoi superficiali e interrati, servizi igienici, impianti di trattamento, scarichi

incontrollati sul suolo di scarti di lavorazione, fanghi, rifiuti solidi e liquidi, scarichi liquidi senza trattamento nella rete idrografica, immissioni accidentali nel sottosuolo di rifiuti liquidi da pozzi perdenti, fosse, vasche di raccolta e di lagunaggio, ricaduta sul suolo di aerodispersi.

- Discariche di rifiuti e attività connesse: il pericolo principale deriva dall'altissimo numero di discariche incontrollate e abusive, nelle quali le perdite di percolato sono normali, mentre costituiscono una eventualità più remota nelle discariche controllate. Sono presenti poi una serie di impianti di servizi e sottoservizi connessi alle discariche (officine, autoparchi, serbatoi, tubazioni di trasporto liquami) che devono essere considerati anch'essi dei centri di pericolo.
- Attività minerarie ed estrattive: le operazioni di coltivazione mineraria alterano le condizioni di flusso idrogeologico e possono determinare peggioramenti quantitativi e qualitativi delle acque sotterranee presenti. Nel caso di coltivazioni minerarie in profondità vengono spesso utilizzati *pozzi di eduazione o connessione* per l'evacuazione delle acque sotterranee permeanti i giacimenti in coltivazione: tali acque sono nella maggior parte dei casi di pessima qualità (ricche di metalli pesanti, sali, altre sostanze nocive o tossiche) e vengono scaricate in un acquifero ricettore compromettendone quindi la qualità. Non trascurabili sono poi i rischi connessi con il dilavamento delle discariche di scorie, sterili e residui di lavorazione, l'infiltrazione e l'efflusso dai bacini di decantazione e gli scarichi dagli impianti di flottazione. Nel caso di estrazione di petrolio e gas il rischio per le acque sotterranee è dovuto sia alle tecniche di ricerca, sia all'attività estrattiva vera e propria, durante la quale vengono movimentate notevoli quantità di sostanze ad alto potenziale inquinante e acque salate connesse ai giacimenti. Sono considerati centri di pericolo anche i pozzi petroliferi abbandonati, i quali attraversano più acquiferi e in caso di rivestimento deteriorato si comportano da connettori tra i vari strati, provocando il passaggio di acque inquinate negli acquiferi non ancora contaminati. Per quanto concerne l'attività estrattiva a cielo aperto (cave di argilla, calcari, marne da cemento, sabbie e ghiaie, materiali da costruzione e pietre ornamentali) i rischi sono dovuti al fatto che le escavazioni sono spesso approfondite fino a mettere a nudo la zona satura dell'acquifero soggiacente, che si trova così privato delle protezioni apportate dal suolo e

dall'insaturo e quindi particolarmente vulnerabile. Quando poi le cave vengono abbandonate senza programmare una attività di ripristino sono spesso utilizzate come discariche incontrollate e abusive per rifiuti di varia natura e pericolosità: in questi casi il potenziale di impatto diviene elevatissimo.

- Insedimenti urbani: costituiscono un aggregato complesso di centri di pericolo alcuni dei quali risultano più o meno controllabili, se collegati al sistema fognario con adeguato trattamento, altri risultano invece difficilmente controllabili. Del primo gruppo fanno parte centri di pericolo quali officine, carrozzerie, parcheggi, autolavaggi, stazioni ferroviarie, portuali, aeroportuali, impianti militari, cantieri e stoccaggi di materiali da costruzione, attività artigianali, ospedali, penitenziari, alberghi, mense, insediamenti temporanei, macelli, mercati, acque di ruscellamento superficiale e di lavaggio delle strade. Tra i centri di pericolo difficilmente controllabili si hanno: serbatoi interrati per liquidi di uso domestico, industriale o commerciale (soprattutto contenitori di combustibili per riscaldamento domestico e per impianti di distribuzione di carburanti); impianti di fognatura non perfettamente funzionanti a causa di rotture, scarsa manutenzione o impermeabilizzazione insufficiente, che determinano infiltrazioni, negli acquiferi soggiacenti, di liquidi con alte percentuali di microrganismi, sostanze in sospensione (oli e grassi), sostanze inorganiche (solfati, carbonati, fosfati, solfuri, nitriti, nitrati, cloruri), sostanze organiche (carboidrati, grassi, sostanze proteiche, acidi, aldeidi, detergenti, solventi, fenoli), metalli pesanti e acidi se il sistema fognario è connesso anche con attività produttive; smaltimenti di liquami in loco nei Comuni e insediamenti abitativi privi di sistema fognario, attraverso l'utilizzo di fosse settiche e pozzi perdenti : il potenziale di inquinamento diviene preoccupante quando il numero di installazioni supera le possibilità di abbattimento del suolo, quando installazione, manutenzione, posizionamento e dimensionamento non sono adeguati alle norme e quando i tempi di utilizzo superano una vita media (20-40 anni) oltre la quale vengono considerati dei centri di pericolo rilevante; cimiteri (nel caso di vecchie strutture situate in prossimità di fonti di approvvigionamento idrico e qualora non vengano rispettate le norme previste per l'ubicazione e per le aree di salvaguardia delle captazioni).

- Infrastrutture di comunicazione e collegamento. Sono comprese in questa categoria: la rete stradale, i cui impatti sono dovuti soprattutto a sversamenti, dolosi o accidentali, di liquidi inquinanti trasportati su strada, e alla pratica comune di spargimenti di sale e additivi per eliminare il ghiaccio dalle strade in inverno, con conseguente aumento di cloruri nelle acque sotterranee circostanti e soggiacenti; le strutture di trasferimento di liquidi, quali condutture per il trasporto di liquidi utili (oleodotti, gasdotti) o reflui, il cui potenziale pericolo è dovuto alle perdite o alla loro posa in opera nel sottosuolo, pratica che comporta lo scavo di trincee profonde nell'insaturo e talvolta nella zona satura.
- Attività agricole: sono generalmente considerate attività inquinanti di tipo diffuso. Il loro impatto è dovuto: all'uso di fertilizzanti organici e inorganici, tra i quali particolarmente inquinanti sono quelli a base azotata (ad elevata solubilità) che determinano accumulo di nitrati nel suolo e nelle acque sotterranee; all'uso di fitofarmaci costituiti da prodotti organici di sintesi con numerosissimi principi attivi diversi (atrazina, simazina, molinate, propazina, bentazone), la cui pericolosità per le acque sotterranee è da considerarsi elevatissima data l'alta solubilità e persistenza; alle pratiche di irrigazione e fertirrigazione che possono agire da moltiplicatori dell'inquinamento provocando una massiccia infiltrazione nel sottosuolo di fitofarmaci e fertilizzanti.
- Attività zootecnica: il potenziale di inquinamento di una attività zootecnica dipende dal tipo di bestiame allevato, dal numero di capi, dalla tipologia di allevamento e dalle quantità e metodi di smaltimento del letame. E' abbastanza intuitivo comprendere come un allevamento di tipo industriale, caratterizzato dalla presenza di un alto numero di capi concentrati in spazi ristretti, sia potenzialmente più pericoloso rispetto all'allevamento di tipo brado o semi-brado con un numero limitato di animali. Gli inquinanti più importanti connessi con queste attività derivano dall'accumulo o dall'utilizzo come fertilizzanti delle deiezioni animali e sono l'azoto organico (nitriti e soprattutto nitrati) e inorganico in forma ammoniacale, alcuni metalli (Zn,Cu), fosfati, cloruri e batteri.

Esistono poi numerose attività che non hanno una precisa collocazione tra gli ambiti descritti in precedenza, ma che tuttavia impegnano i sistemi acquiferi, costituendo una

fonte potenziale di inquinamento o una semplice causa di variazione della qualità delle acque o del flusso idrico sotterraneo; queste attività comprendono impianti di ricarica artificiale degli acquiferi, pozzi di eduazione, pozzi abbandonati, perforazioni geognostiche e di monitoraggio, gallerie e scavi in sotterraneo, canalizzazioni.

1.3 Riferimenti normativi

La più importante norma che tutela i corpi idrici dall'inquinamento nel nostro Paese è il **DECRETO LEGISLATIVO 3 aprile 2006 , n. 152, parte terza sezione II, e successive modificazioni ed integrazioni**, che contiene le disposizioni per la tutela delle acque superficiali, marine e sotterranee. La normativa persegue gli obiettivi di prevenzione e riduzione dell'inquinamento e attuazione del risanamento dei corpi idrici inquinati impedendone un ulteriore deterioramento, proteggendo e migliorando lo stato degli ecosistemi acquatici, degli ecosistemi terrestri e delle zone umide direttamente dipendenti dagli ecosistemi acquatici sotto il profilo del fabbisogno idrico. Un altro obiettivo fondamentale di questa normativa sta nel conseguimento del miglioramento dello stato delle acque attraverso la garanzia di un'adeguata protezione di quelle destinate a particolari usi; del perseguimento di usi sostenibili e durevoli delle risorse idriche, con priorità per quelle potabili.

Perciò la norma è tesa a mantenere la capacità naturale di autodepurazione dei corpi idrici, nonché la capacità di sostenere comunità animali e vegetali ampie e ben diversificate; a mitigare gli effetti delle inondazioni e della siccità contribuendo quindi a:

- 1) garantire una fornitura sufficiente di acque superficiali e sotterranee di buona qualità per un utilizzo idrico sostenibile, equilibrato ed equo;
- 2) ridurre in modo significativo l'inquinamento delle acque sotterranee;
- 3) proteggere le acque territoriali e marine e realizzare gli obiettivi degli accordi internazionali in materia, compresi quelli miranti a impedire ed eliminare l'inquinamento dell'ambiente marino, allo scopo di arrestare o eliminare gradualmente gli scarichi, le emissioni e le perdite di sostanze pericolose prioritarie al fine ultimo di pervenire a concentrazioni, nell'ambiente marino, vicine ai valori del fondo naturale per le sostanze presenti in natura e vicine allo zero per le sostanze sintetiche antropogeniche;

Il raggiungimento dei risultati indicati si realizza attraverso l'individuazione di obiettivi di qualità ambientale e per specifica destinazione dei corpi idrici; attraverso la tutela integrata degli aspetti qualitativi e quantitativi nell'ambito di ciascun distretto idrografico ed un adeguato sistema di controlli e di sanzioni.

Il rispetto dei valori limite agli scarichi fissati dallo Stato, nonché la definizione di valori limite in relazione agli obiettivi di qualità del corpo recettore, l'adeguamento dei sistemi di fognatura, collettamento e depurazione degli scarichi idrici, nell'ambito del servizio idrico integrato, l'individuazione di misure per la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento nelle zone vulnerabili e nelle aree sensibili; l'individuazione di misure tese alla conservazione, al risparmio, al riutilizzo ed al riciclo delle risorse idriche, sono tutti strumenti che se applicati potranno risultare utili allo scopo.

La tutela dei corpi idrici deve realizzarsi tra l'altro attraverso l'individuazione di aree sensibili e meno sensibili, secondo criteri espressamente indicati, di zone vulnerabili da nitrati e prodotti fitosanitari e di aree di salvaguardia, individuate per migliorare le caratteristiche qualitative delle acque superficiali e sotterranee destinate al consumo umano. In particolare, l'individuazione delle zone vulnerabili deve essere attuata attraverso tre livelli di valutazione:

- Vulnerabilità intrinseca degli acquiferi
- Vulnerabilità potenziale (combinazione tra vulnerabilità intrinseca e potenziale di attenuazione del suolo)
- Vulnerabilità specifica e vulnerabilità integrata.

Capitolo 2 - VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA' DEGLI ACQUIFERI ALL'INQUINAMENTO

2.1 Il concetto di vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento

L'inquinamento idrico viene definito come *“l'impatto volontario o involontario, di qualunque attività antropica, che comporti uno sversamento in uno o più dei sottosistemi componenti il sistema ambiente, di sostanze tali da causare una variazione negativa di tipo chimico e/o fisico della qualità naturale delle acque tale da mettere in pericolo la salute dell'uomo e degli esseri viventi”* (Civita).

Il concetto di vulnerabilità di un acquifero all'inquinamento necessita di un approfondimento. Infatti si deve sempre tenere a mente la differenza tra il concetto di vulnerabilità in senso stretto (o vulnerabilità integrata) e quello di vulnerabilità intrinseca di un sistema acquifero. Per vulnerabilità intrinseca si intende *“la suscettibilità dei sistemi acquiferi, nelle loro parti componenti, e nelle diverse situazioni geometriche ed idrodinamiche, ad ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un inquinante fluido o idroveicolato tale da produrre un impatto sulla qualità delle acque sotterranee, nello spazio e nel tempo”* (Civita, 1987).

La vulnerabilità intrinseca di un acquifero all'inquinamento, dipende da una lunga serie di processi che si producono all'interno del sistema sottosuolo, al di sotto del punto e/o zona d'impatto. Questo insieme di processi può essere suddiviso in tre principali fenomeni:

- spostamento dell'acqua e dell'inquinante fluido o idroportato attraverso l'insaturo sino alla superficie piezometrica dell'acquifero soggiacente;
- dinamica del flusso sotterraneo e dell'inquinante fluido o idroportato nella zona di saturazione dell'acquifero soggiacente;
- abbattimento della concentrazione dell'inquinante fluido o idroportato nella zona di saturazione che determina la capacità di attenuazione dell'impatto inquinante propria del sistema acquifero.

Questi tre processi sono regolati da parametri propri della situazione idrogeologica e antropica, e quindi funzione della zona d'interesse. L'azione di attenuazione esercitata dall'insaturo è dovuta alle numerose interazioni chimiche, fisiche e biologiche tra suolo, acque sotterranee ed inquinanti, il cui impatto viene notevolmente mitigato. Un'ulteriore azione di mitigazione avviene nel momento in cui l'inquinante, la cui concentrazione è già

notevolmente diminuita, va a diluirsi nella zona di saturazione in ragione della velocità, del valore della portata unitaria di flusso e della dispersione che opera il mezzo.

Per poter definire la vulnerabilità integrata bisogna prima introdurre il concetto di *Centro di Pericolo* (CDP) o *Centro d'Impatto*, al quale è associato il concetto di *Potenziale d'Impatto*.

Tutte quelle attività che possono generare e trasmettere un impatto sulle acque sotterranee, e sulle acque in genere, sono chiamate Centri di Pericolo (CDP).

Il Potenziale d'Impatto di un Centro di Pericolo rappresenta la sua capacità di provocare l'inquinamento di un determinato acquifero, in funzione della vulnerabilità intrinseca dello stesso acquifero.

La vulnerabilità integrata esprime dunque, l'interazione tra la vulnerabilità intrinseca di un sistema idrogeologico caratterizzato¹ ed i CDP effettivamente connessi al sistema stesso. Il concetto di vulnerabilità intrinseca quindi, non ha mai un contenuto applicativo e pianificatorio. Esso l'acquista quando la vulnerabilità intrinseca viene associata ai CDP esistenti nel territorio in esame, e dei quali si pianifica la realizzazione.

C'è ancora da sottolineare che la valutazione della vulnerabilità riferita alla suscettibilità di un sistema idrologico a subire danno a causa dell'immissione di un inquinante idroportato, ha carattere generale. Infatti la vulnerabilità di un acquifero è strettamente legata al suo potere di attenuazione, che a sua volta è funzione del tipo di sorgente, del meccanismo di rilascio, dei quantitativi e della velocità di immissione, oltre che del tipo di inquinante in termini di composizione chimica, mobilità e persistenza. Quindi la vulnerabilità integrata dell'acquifero andrebbe valutata per ogni classe o addirittura per ogni tipo di inquinante, ovvero bisognerebbe valutare la *vulnerabilità specifica*. Infine va evidenziata anche la variabilità temporale della suscettibilità di un sistema acquifero e del carico di inquinante, e in tal caso la vulnerabilità dovrebbe essere datata (vulnerabilità temporale)

¹ Si intende con questo termine una caratterizzazione delle situazioni specifiche, per le quali si conosce o si deduce da una Carta della Vulnerabilità Integrata almeno la soggiacenza, la litologia dell'acquifero e la direzione locale del flusso.

2.1.1 Anisotropia del sistema carsico.

Le fenomenologie ed i processi di natura chimico-fisica cui un acquifero carbonatico può andare incontro durante la propria evoluzione geologica sono diverse. Gli effetti di tali azioni sono schematicamente rappresentate nella figura seguente:

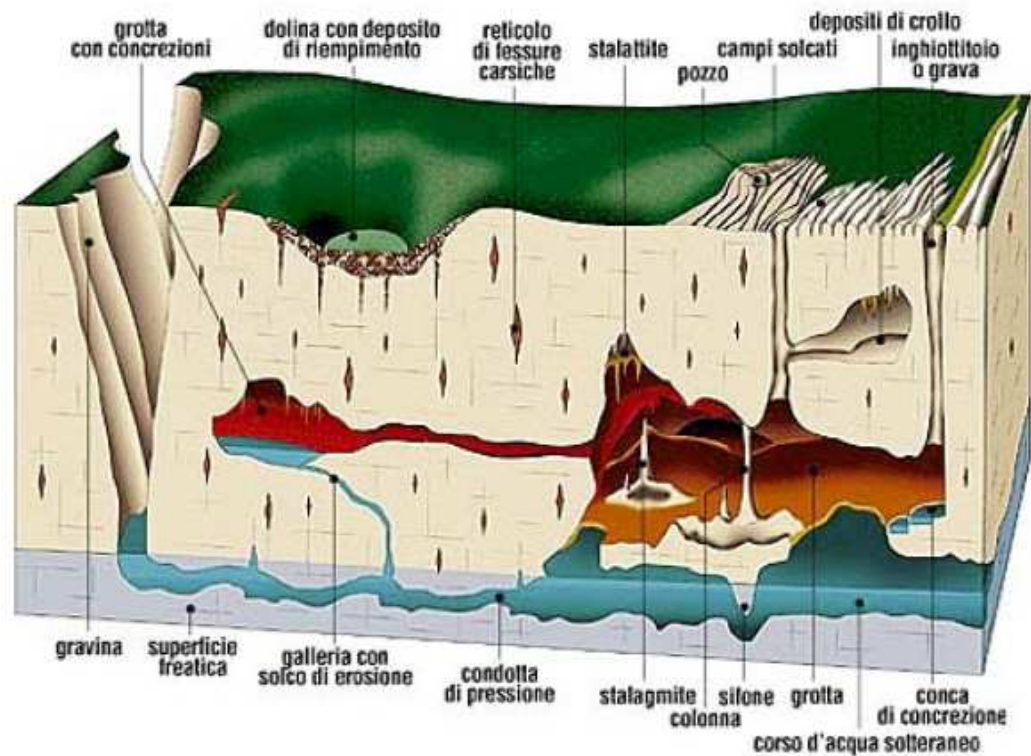


Figura 1: Anisotropia di un acquifero carsico (Santoro, 2007).

Un esempio dei parametri che influenzano la variabilità del sistema è dato dalle misure di livello piezometrico che mostrano spesso fluttuazioni evidenti in conseguenza di brusche variazioni di conducibilità idraulica o di altri fattori ad essa correlabili.

L'inadeguatezza degli approcci tradizionali nel descrivere dette variazioni richiede l'uso di metodologie geostatistiche, capaci di definire e cogliere, partendo da un numero discreto e spesso limitato di campioni, la legge spaziale del parametro studiato e di ricostruirlo nell'intera area-studio. In idrogeologia le informazioni effettivamente disponibili riguardo le caratteristiche dell'acquifero in studio sono così rade e carenti rispetto alla sua estensione, che la conoscenza della distribuzione delle proprietà idrauliche è estremamente incerta. Finora si sono potute fare solo ipotesi

Data l'elevata variabilità spaziale delle proprietà fisiche di un acquifero carsico, un approccio deterministico avrebbe necessitato di un set molto assortito ed ampio di misure, capace di arrivare a descrivere la distribuzione tridimensionale del parametro.

Tuttavia, tenendo conto che la scala di variabilità di detti parametri è dell'ordine del metro, mentre l'estensione di un acquifero è dell'ordine di qualche decina di chilometri, appare evidente come tale approccio risulti del tutto proibitivo richiedendo una mole di dati impossibile da rilevare e difficile da reperire.

Un approccio alternativo potrebbe essere quello di ignorare la variabilità reale ed assumere dei parametri omogenei e variabili solo a grande scala, capaci di catturare l'essenza dei fenomeni fisici e condurre a risultati accettabili (*upscaling*). Tale metodologia di lavoro possiede importanti punti deboli. Innanzitutto, essa assume che le equazioni di flusso e trasporto definite per mezzi omogenei si possano applicare a sistemi eterogenei descrivendo valori medi delle variabili a grande scala (scala dell'acquifero nel suo complesso). In secondo luogo, quest'approccio non considera gli effetti della variabilità sull'attendibilità delle previsioni del modello. Un approccio più efficace al problema della modellazione ambientale prevede invece di trattare la variabilità a piccola scala come casuale, avente però certe caratteristiche di correlazione spaziale. I modelli che ne risultano descrivono i parametri delle equazioni coinvolte, ad es. la trasmissività, come variabili aleatorie. L'applicazione di tali modelli riguarda appunto contesti ove l'incertezza e l'estrema variabilità diventano giocoforza i fattori condizionanti della campagna di caratterizzazione idrogeologica

2.1.2 Metodi di valutazione della vulnerabilità intrinseca

A partire dagli anni '60 sono stati sviluppati diversi metodi per la valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi all'inquinamento, basati sulla elaborazione generalizzata dei dati di base normalmente disponibili, e che sono raggruppabili in tre grandi famiglie tipologiche:

- Zonazione per aree omogenee (valutazione per complessi e situazioni idrogeologiche);
- Valutazione per modelli numerici (espressioni analogiche);

- Valutazione per sistemi parametrici;

2.1.3 Zonazione per aree omogenee

Questi metodi valutano la vulnerabilità per complessi e situazioni idrogeologiche (CSI), utilizzando in genere la tecnica di sovrapposizione cartografica.

Questi sono considerati generalmente metodi universali, adatti ad essere utilizzati su territori vasti ed articolati morfologicamente ed idrogeostrutturalmente. Sono adatti a generare cartografia a grande denominatore di scala, quindi per la copertura di interi territori nazionali. I parametri presi in considerazione sono quasi sempre gli stessi: caratteristiche idrolitologiche del saturo e dell' insaturo, soggiacenza, permeabilità, velocità di percolazione degli acquiferi. A questi possono essere aggiunte altre caratteristiche fisico-chimiche dei suoli, generalmente molto meno agevoli da reperire o determinare in campagna.

2.1.4 Valutazione per modelli numerici

Tramite delle espressioni analogico-matematiche più o meno semplici, si valuta un indice di vulnerabilità intrinseca, I_v . Molte espressioni sono state messe a disposizione a partire dagli anni '60 ad oggi, ognuna delle quali considerava un numero variabile di parametri.

Questo tipo di valutazione della vulnerabilità è applicabile universalmente per la redazione di mappe a piccolo denominatore di scala.

2.1.5 Valutazione per sistemi parametri

I sistemi parametrici si suddividono in:

- Sistemi a matrice (MS);
- Sistemi a punteggio semplice (RS);
- Sistemi a punteggi e pesi (PCSM);
- Sistemi di valutazione d'impatto ambientale (EES).

I sistemi parametrici si sviluppano tutti secondo il seguente schema: vengono selezionati i parametri sui quali effettuare la valutazione della vulnerabilità; quindi a questi parametri viene assegnato un punteggio arbitrario in funzione dell'importanza che esso assume nella

valutazione complessiva. Ogni parametro possiede un suo range di variabilità, che viene suddiviso in intervalli di valori. Dalla combinazione lineare dei parametri viene fuori il valore finale della vulnerabilità, valore che può essere più o meno quantitativo e qualitativo a seconda del sistema utilizzato.

Particolare importanza, anche ai fini del presente studio, assumono i sistemi a pesi e punteggi (PCSM). Questi sono una evoluzione dei sistemi a punteggio semplice (RS). In questi ultimi, ad ogni parametro viene assegnato un punteggio in funzione del suo significato e/o valore fisico. Nei sistemi a punteggi e pesi, questo parametro viene moltiplicato per un fattore moltiplicatore (peso) che evidenzia l'importanza che lo stesso assume nel contesto della valutazione della vulnerabilità.

Il primo PCSM messo a punto per la valutazione di vulnerabilità degli acquiferi è il metodo DRASTIC dell'USEPA (1983,1987): il nome del metodo è un acronimo formato con le iniziali dei sette parametri che lo caratterizzano ossia Depth to water, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone, hydraulic Conductivity of the aquifer. A ciascun parametro si attribuisce un punteggio compreso tra 1 e 10 che viene moltiplicato poi per un peso variabile tra 1 e 5; sono utilizzate due linee di pesi moltiplicatori, la prima nei casi standard e la seconda nell'eventualità in cui sussista pericolo di inquinamento da fitofarmaci. L'indice di vulnerabilità si ottiene come sommatoria dei prodotti tra punteggi e pesi dei sette parametri.

Sulla base dell'esperienza di DRASTIC, partendo dalla necessità di adattare tale metodo alle numerosissime realtà idrogeologiche italiane, è stato elaborato dal GNDCI-CNR (Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Centro Nazionale per le Ricerche, Civita et al.) il metodo SINTACS descritto nel paragrafo seguente. Oltre a quest'ultimo metodo saranno descritti gli altri metodi a punteggi e pesi applicati nella presente ricerca. Queste metodiche sono state applicate con l'ausilio di softwares come Surfer e Arcgis, in particolare per la ricostruzione spaziale della piezometrica e per il modello digitale del terreno.

2.1 Il metodo SINTACS

L'acronimo SINTACS deriva dalle denominazioni dei parametri che vengono presi in considerazione, corrispondenti agli stessi parametri del modello DRASTIC:

S=Soggiacenza, **I**=Infiltrazione efficace, **N**=Effetto di autodepurazione del Non saturo,
T=Tipologia della copertura, **A**=Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero,
C=Conducibilità idraulica dell'acquifero, **S**=Acclività della Superficie topografica.

Il territorio in studio deve essere discretizzato, generalmente per elementi finiti quadrati attraverso una griglia regolare, e per ogni area discretizzata devono essere calcolati i valori dei suddetti parametri.

2.2.1 Soggiacenza S

Si definisce *soggiacenza* la profondità della superficie piezometrica valutata rispetto al piano-campagna. La sua influenza sulla vulnerabilità è dovuta al fatto che dal valore di soggiacenza dipende il tempo di transito di un inquinante nell'insaturo, e quindi la durata delle azioni autodepurative in tale spessore. Il punteggio SINTACS relativo è massimo (uguale a 10) per valori bassi di soggiacenza, cioè per livelli piezometrici prossimi alla superficie topografica o per zone di affioramento della falda, e tende asintoticamente al valore minimo pari ad 1 per valori di soggiacenza superiori ai 60m. La soggiacenza viene valutata sulla base di misure effettuate sui punti d'acqua presenti nell'area in esame oppure può essere dedotta da Carte piezometriche eventualmente esistenti; i dati puntuali devono poi essere territorializzati mediante interpolazione.

L'attribuzione del punteggio al parametro S si effettua sulla base dell'abaco di Figura 2.

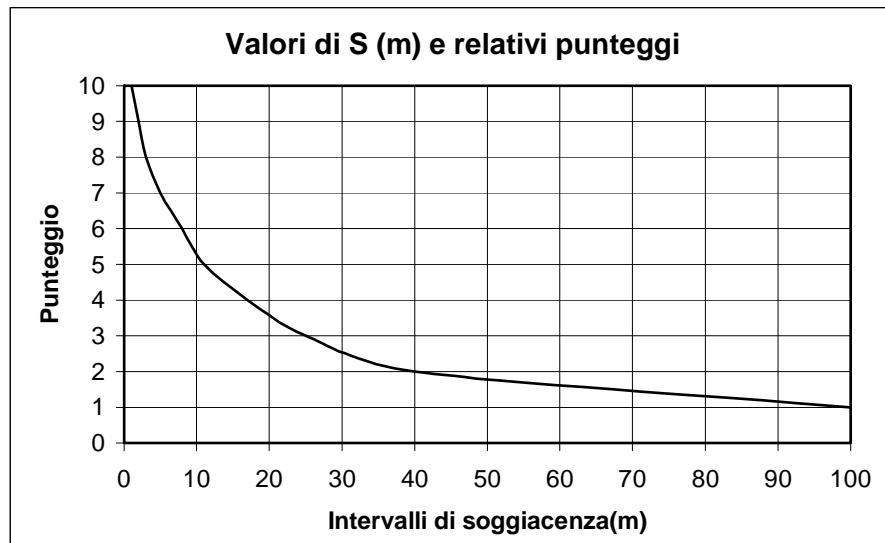


Figura 2: Valori di soggiacenza e relativi punteggi nel metodo Sintacs

2.2.2 Infiltrazione I

L'importanza dell'infiltrazione efficace, nella valutazione di vulnerabilità, è dovuta all'azione di trascinamento in profondità che le acque meteoriche svolgono nei confronti di inquinanti liquidi o idroportati, ma anche ad un'azione di diluizione sia nell'insaturo che nella zona satura. Dove non sussistono scambi tra corpi idrici superficiali e acquiferi sotterranei, oppure in aree non irrigue, l'infiltrazione efficace rappresenta l'unica componente di ricarica attiva per l'acquifero. Il calcolo del parametro è basato sui valori di piovosità efficace e su un coefficiente di infiltrazione potenziale (c.p.i.= χ), caratteristico delle condizioni idrogeologiche superficiali; per le zone in cui sia lecito supporre l'esistenza di scambi con corpi idrici superficiali (aste fluviali, zone lacustri etc), o per aree agricole in cui si utilizzino grandi volumi d'acqua d'irrigazione, a rigore si dovrebbe correggere, incrementandolo, il valore dell'infiltrazione calcolata sulla base della sola piovosità. Tuttavia i dati necessari per attuare questa correzione sono generalmente non disponibili o difficilmente territorializzabili, pertanto, nelle zone interessate da tali fenomeni, si preferisce agire sul peso che il parametro infiltrazione ha sulla valutazione complessiva di vulnerabilità, piuttosto che sul valore del parametro stesso.

Il calcolo dell'infiltrazione efficace I (mm/anno) viene condotto in maniera differente nel caso di rocce nude o poco coperte ed in quello di suolo potente. Nel primo caso (copertura scarsa o assente), per ogni elemento discretizzato del territorio, si calcola il valore delle precipitazioni efficaci medie annue \bar{Q} :

$$\bar{Q} = \bar{P} - \bar{E}_r \text{ (mm/a)}$$

\bar{P} è il valore delle precipitazioni medie annue ragguagliate, \bar{E}_r è il valore dell'evapotraspirazione reale media annua; questi valori devono essere calcolati sulla base di serie storiche almeno ventennali, continue o ricostruite, di dati termo-pluviometrici mensili, misurati nelle stazioni di interesse per l'area in esame.

Il valore di \bar{Q} deve essere moltiplicato per l'indice χ proprio del tipo di roccia affiorante nell'area considerata, ottenendo così il valore dell'infiltrazione efficace:

$$\bar{I} = \bar{Q} \cdot \chi \text{ (mm/a)}$$

Vengono riportati nella tabella seguente gli intervalli di valori dell'indice χ , per rocce affioranti o sotto scarsa copertura:

Complessi idrogeologici	χ
Alluvioni grossolane	0,65-1
Calcari carsificati	0,75-1
Calcari fessurati	0,5-0,85
Dolomie fessurate	0,48-0,65
Alluvioni medio-fini	0,15-0,48
Complessi sabbiosi	0,75-0,88
Arenarie, conglomerati	0,3-0,5
Plutoniti fessurate	0,05-0,35
Alternanze (flysch)	0,2-0,45
Vulcaniti fessurate	0,75-1
Marne, Argilliti	0,12-0,18
Morene grossolane	0,48-0,7
Morene medio-fini	0,12-0,22
Argille, limi, torbe	0-0,25
Piroclastiti diverse	0,2-0,65
Metamorfiti fessurate	0,2-0,28

Tabella 1: Intervalli di valori dell'indice χ , per rocce affioranti o sotto scarsa copertura.

Tale indice è determinato, oltre che dalla litologia affiorante, dal grado di fratturazione e carsismo, dall'acclività della superficie topografica e da una serie di parametri correttivi quali soggiacenza, uso del suolo, densità della rete drenante superficiale. Nel caso di suoli spessi si utilizza invece il valore intero di \bar{P} e si ricava l'infiltrazione efficace dalla relazione:

$$\bar{I} = \bar{P} \cdot \chi \quad (\text{mm/a})$$

L'indice χ dipende in questo caso dalla tessitura dei suoli presenti; gli intervalli di valore assunti sono dati nella tabella seguente:

Tessitura dei suoli	χ
Ghiaia pulita	0,4-0,55
Sabbia pulita	0,5-0,55
Sabbioso	0,3-0,5
Torba	0,2-0,4
Argillo-sabbioso	0,15-0,4
Franco sabbioso	0,1-0,35
Franco-sabbioso-limoso	0,1-0,3
Franco	0,05-0,2
Franco limoso	0,03-0,15
Franco-limo-argilloso	0,03-0,1
Franco-argilloso	0-0,025
Argillo-limoso	0-0,025
Suolo humifero	0-0,02
Argilloso	0-0,02

Tabella 2: Intervalli di valori dell'indice χ , per la tessitura dei suoli.

Una volta ricavato il valore dell'infiltrazione efficace, per ogni elemento discretizzato del territorio, si attribuisce un punteggio sulla base del seguente diagramma:

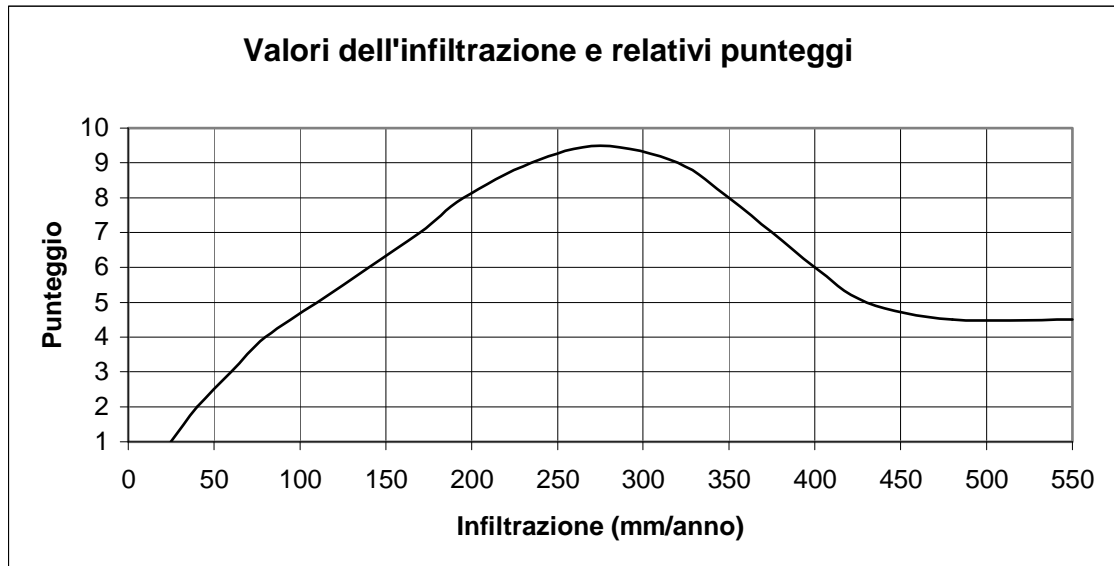


Figura 3: Valori dell'infiltrazione e relativi punteggi nel metodo SINTACS.

Il punteggio massimo si ha in corrispondenza dell'intervallo di infiltrazione 250-300 mm/a, oltre tali valori tende a diminuire per tenere conto dei fenomeni di diluizione e dispersione attraverso l'insaturo, più accentuati per elevati volumi di infiltrazione, e del ruscellamento superficiale, che si genera anche in terreni ad elevata permeabilità in occasione di precipitazioni particolarmente intense e frequenti.

2.2.3 Effetto di autodepurazione del Non saturo N

La zona insatura è costituita dalla parte di sottosuolo compresa tra la base del suolo e la zona satura dell'acquifero (o base del livello confinante superiore per acquiferi in pressione). In tale zona avvengono spostamenti prevalentemente verticali e tutta una serie di processi fisici e chimici che favoriscono il fenomeno dell'attenuazione.

L'effetto di autodepurazione del non saturo si valuta a partire dalle condizioni litologiche dello spessore insaturo: litologia, granulometria, presenza di argille e limi, per rocce permeabili, fratturazione o carsismo nel caso di rocce compatte. Si attribuisce un punteggio alla litologia del parallelepipedo avente per base l'area dell'elemento discretizzato considerato e altezza coincidente con lo spessore insaturo. Se lo spessore

insaturo è costituito da diversi tipi litologici è necessario calcolare il punteggio come media ponderale riferita agli spessori delle singole litologie: ciò è possibile solo se si dispone di dati adeguati (stratigrafie).

Gli intervalli di punteggi per il parametro N in base alla litologia sono indicati di seguito:

Complessi idrogeologici	N
Alluvioni grossolane	6-9
Calcari carsificati	8-10
Calcari fessurati	4-9
Dolomie fessurate	2-5
Alluvioni medio-fini	3-6
Complessi sabbiosi	4-7
Arenarie, conglomerati	5-8
Plutoniti fessurate	3-5
Alternanze (flysch)	2-5
Vulcaniti fessurate	5-10
Marne, Argilliti	1-2
Morene grossolane	4-6
Morene medio-fini	2-4
Argille, limi, torbe	1-2
Piroclastiti diverse	2-5
Metamorfiti fessurate	2-6

Tabella 3: Intervalli di punteggi per il parametro N in base alla litologia.

2.2.4 Tipologia della copertura T

La tipologia dei suoli di copertura riveste un ruolo di massima importanza nella valutazione di vulnerabilità, avendo il suolo una capacità notevole di mitigazione dell'impatto degli inquinanti: esso costituisce la prima linea di difesa di un sistema acquifero. I parametri pedologici che influenzano il potenziale di attenuazione del suolo possono essere divisi in due gruppi; il primo gruppo è costituito da quei parametri che caratterizzano processi di assorbimento, filtrazione, capacità di drenaggio, grado di umidità, velocità di infiltrazione, e sono:

- granulometria
- tessitura
- spessore effettivo
- massa volumica
- porosità totale
- quantità d'acqua disponibile per la vegetazione
- conducibilità idraulica

Alcuni possono essere valutati mediante campionamenti e analisi (ad es. la granulometria), altri si calcolano attraverso relazioni empiriche.

I parametri del secondo gruppo influiscono invece sul grado di adsorbimento di un composto chimico da parte del suolo e sono:

- Il pH
- La capacità di scambio cationico
- Il contenuto di sostanza organica
- Il contenuto di argilla

Il pH del suolo influisce in maniera determinante sulla capacità di adsorbimento dei metalli pesanti che è massima per pH=6 o superiore; altri metalli, come ad esempio Hg, vengono adsorbiti meglio in ambiente acido.

La capacità di scambio cationico rappresenta la quantità massima di cationi metallici adsorbibili da un suolo, e si valuta attraverso relazioni empiriche funzioni dei contenuti di sostanza organica e di argilla, i quali sono invece valutabili sperimentalmente per campionamento. Talvolta queste informazioni possono ricavarsi dalle cartografie pedologiche su scala operativa, ma più di frequente esistono solo dati puntuali non

territorializzabili: in questi casi si fa riferimento alle caratteristiche tessiturali dei suoli, allo spessore e ai parametri disponibili tra quelli elencati, al fine della determinazione del parametro T per ogni elemento discretizzato del territorio in esame.

Si riportano gli intervalli di punteggio relativi alle diverse classi tessiturali del suolo:

Suoli	Punteggio T
Sottile o assente	10
Ghiaia pulita	9,5-10
Sabbia pulita	8,9-9,5
Sabbioso	8-8,5
Torba	7,5-8,2
Argillo-sabbioso	6,2-7
Franco sabbioso	5,5-6
Franco-sabbioso-limoso	4,5-5,2
Franco	4-5
Franco-limoso	3,5-4,2
Franco limo-argilloso	3-4
Franco-argilloso	2-3
Argillo-limoso	1,4-2
Suolo humifero	1,2-2
Argilloso	1-1,3

Tabella 4: Intervalli di punteggio relativi alle diverse classi tessiturali del suolo

2.2.5 Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero A

Il parametro A dipende essenzialmente dalle caratteristiche del complesso idrogeologico che contiene l'acquifero e più precisamente la zona satura: al di sotto della superficie piezometrica, quando un inquinante idroveicolato giunge a mescolarsi con l'acqua sotterranea, avvengono ulteriori processi di abbattimento della concentrazione iniziale, in seguito a quelli che si verificano nello spessore del suolo e dell'insaturo. Tali processi sono:

- diluizione;
- dispersione;
- assorbimento;
- reazioni chimiche.

La diluizione dipende dalla ricarica e dalla portata dell'acquifero; la dispersione cinematica è influenzata dalla lunghezza e tortuosità dei percorsi che il fluido segue nella zona satura e dipende da granulometria e grado di compattazione, per i mezzi porosi, dallo

stato di fratturazione o carsismo, per mezzi non porosi. Le reazioni chimiche sono determinate dalla reattività della roccia acquifera e quindi dalla sua composizione chimica e dalla permeabilità dell'acquifero.

Sulla base dei dati disponibili si individua il valore del punteggio A all'interno degli intervalli elencati di seguito, in corrispondenza dei diversi complessi idrogeologici:

Complessi idrogeologici	Punteggio A
Alluvioni grossolane	8-9
Calcari carsificati	9-10
Calcari fessurati	6-9
Dolomie fessurate	4-7
Alluvioni medio-fini	6-8
Complessi sabbiosi	7-9
Arenarie, conglomerati	4-9
Plutoniti fessurate	2-4
Alternanze (flysch)	5-8
Vulcaniti fessurate	8-10
Marne, Argilliti	1-3
Morene grossolane	6-8
Morene medio-fini	4-6
Argille, limi, torbe	1-3
Piroclastiti diverse	4-8
Metamorfiti fessurate	2-5

Tabella 5: Punteggio relativo ai diversi complessi idrogeologici.

2.2.6 Conducibilità idraulica dell'acquifero C

La conducibilità idraulica indica la capacità di spostamento dell'acqua nel mezzo saturo e, dunque, di un inquinante idroveicolato che abbia un valore di densità vicino a quello dell'acqua sotterranea. Generalmente si calcola attraverso prove di pompaggio in cui si determina la trasmissività T dell'acquifero (m^2/s) e noto il valore di H (spessore dell'acquifero in m), si ricava la conducibilità $C = T/H$ (m/s).

Se non sono disponibili dati di conducibilità che caratterizzino affidabilmente gli acquiferi, il modello SINTACS offre un metodo di stima indiretta, indicando l'ordine di grandezza della conducibilità idraulica in base al complesso idrogeologico che contiene l'acquifero. Il punteggio per il parametro A si individua entrando nel grafico seguente:

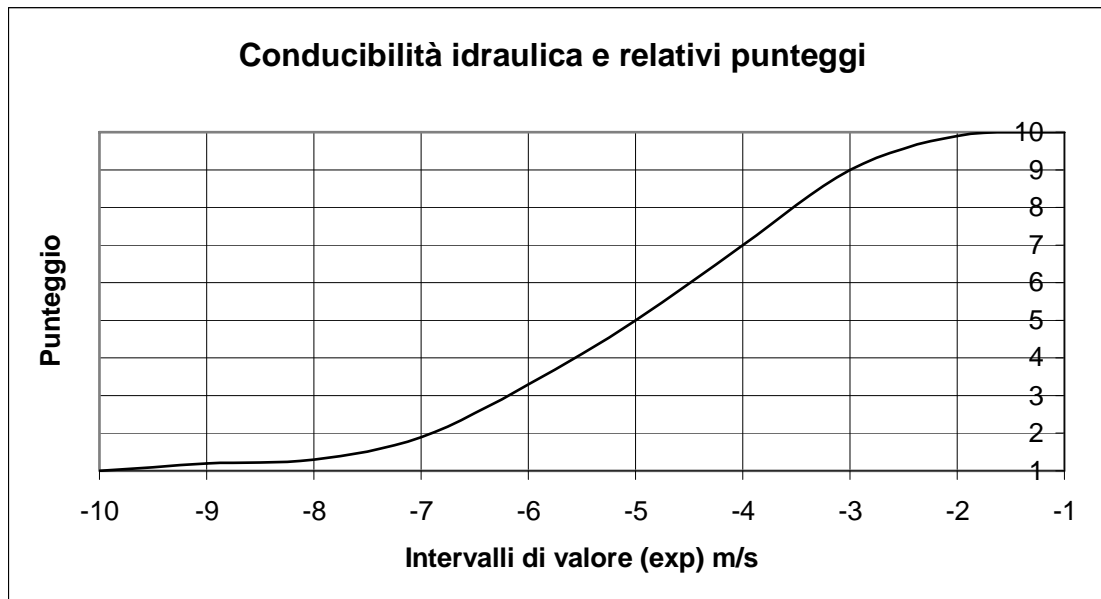


Figura 4: Conducibilità idraulica e relativi punteggi nel metodo SINTACS.

Complessi idrogeologici	C (m/s)
Ghiaie	$10^{-3} - 0$
Sabbie pulite	$10^{-6} - 10^{-2}$
Sabbie limose	$10^{-7} - 10^{-3}$
Limi	$10^{-10} - 10^{-5}$
Depositi glaciali	$10^{-12} - 10^{-6}$
Argille	$10^{-13} - 10^{-9}$
Piroclastiti	$10^{-10} - 10^{-5}$
Argilliti-marne	$10^{-13} - 10^{-9}$
Dolomie	$10^{-9} - 10^{-6}$
Calcari e marmi	$10^{-9} - 10^{-2}$
Arenarie	$10^{-10} - 10^{-6}$
Vulcaniti	$10^{-12} - 10^{-2}$
Rocce cristalline	$10^{-13} - 10^{-4}$

Tabella 6: Complessi idrogeologici e relativi intervalli di conducibilità.

Per i mezzi porosi devono essere scelti valori di C più bassi all'interno dell'intervallo se si tratta di materiali fini, e valori più alti per granulometrie grossolane; nel caso di rocce massive i parametri discriminanti saranno i gradi di fessurazione, carsismo, alterazione o compattazione.

2.2.7 Acclività della superficie topografica

Dalla acclività della superficie topografica dipendono, a parità di precipitazioni, il ruscellamento e la velocità di spostamento dell'acqua (e dunque di un potenziale inquinante) sulla superficie. Si attribuisce un punteggio elevato a zone in cui la pendenza è molto bassa o zone pianeggianti, nelle quali l'infiltrazione è favorita dalla limitata capacità di spostamento dell'acqua (o degli inquinanti) in superficie, con conseguente possibilità di ristagno. Alle zone con elevato gradiente topografico si attribuiscono punteggi minimi, data la scarsa attitudine per tali zone ad assorbire i fluidi che vengono a trovarsi sulla superficie, essendo questi più facilmente trasportabili dalla forza di gravità sulla superficie stessa.

Per l'attribuzione del punteggio si stabiliscono delle classi di pendenza comprese tra 0 e 30%, ricavabili mediante costruzione di una Carta delle classi di acclività derivata dalla Carta topografica, e si assegnano i valori secondo il grafico seguente:

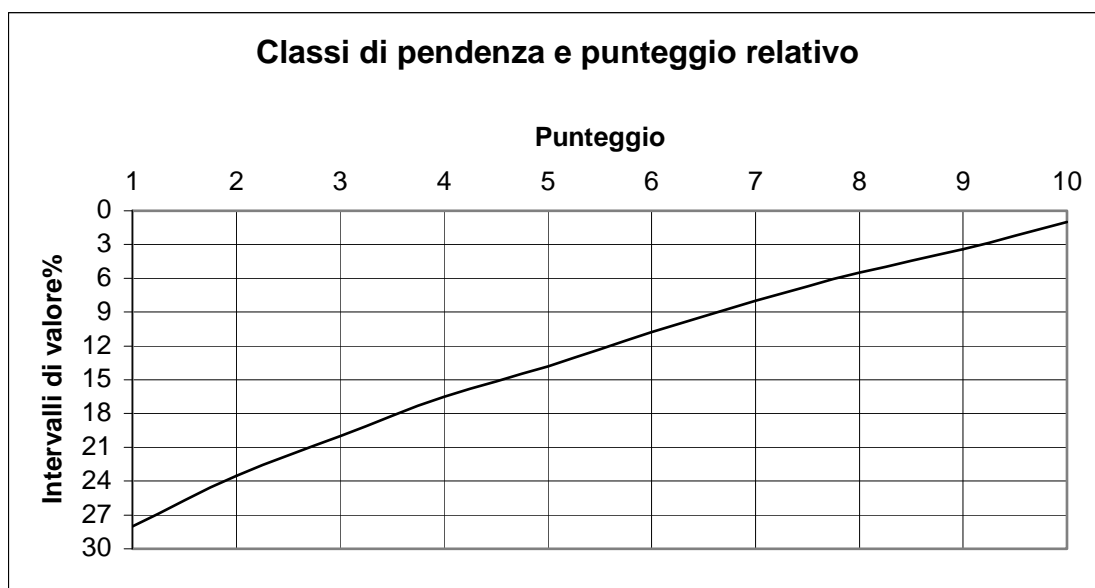


Figura 5: Classi di pendenza e relativo punteggio nel metodo SINTACS.

2.3.2 Situazioni idrogeologiche e di impatto

Una volta determinato il punteggio per ognuno dei parametri previsti dal modello SINTACS e per ogni elemento discretizzato del territorio, occorre individuare delle stringhe di pesi moltiplicatori, sulla base degli effettivi scenari identificati, cui corrisponderanno particolari situazioni idrogeologiche o di impatto. L'identificazione può essere realizzata mediante l'utilizzo di Carte d'uso reale del territorio, Geologia, Pedologia

o rilievi in loco. Le possibili stringhe di pesi (W) saranno tante quanti sono gli scenari individuati, purché siano rispettati i vincoli:

$$\sum_{i=1}^7 W_i = \text{cost.} = 26$$

$$W_{i \text{ max}} = 5$$

L'indice i è relativo ad ognuno dei 7 parametri.

Il modello SINTACS propone cinque diverse stringhe di pesi associate alle situazioni di:

-Impatto Normale (IN)

-Impatto Rilevante (IR)

-Drenaggio (D)

-Carsismo (C)

-Fessurato(F)

I valori di tali pesi per ogni parametro sono i seguenti:

Parametro	IN	IR	D	C	F
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	2	5	4

Tabella 7: Valori dei pesi relativi ad ognuno dei parametri SINTACS.

Possono essere classificate aree soggette a impatto normale quelle caratterizzate da scarso gradiente topografico, con insaturo a prevalente permeabilità matriciale, non soggette a particolari situazioni di impatto antropico o con uso del territorio contenuto.

Rientrano in questa tipologia le aree incolte o coltivate in asciutto, senza uso di fitofarmaci e fertilizzanti, in cui sia praticato l'allevamento brado con un numero limitato di capi. La stringa corrispondente esalta al massimo i pesi assunti da soggiacenza e insaturo e assegna un'elevata importanza alla ricarica dell'acquifero, mentre gli altri parametri assumono un peso minore e quindi saranno determinanti nella valutazione globale solo se il loro punteggio è elevato.

Le aree soggette a impatto rilevante comprendono invece tutte quelle situazioni territoriali in cui siano presenti fonti diffuse di inquinamento potenziale, insediamenti antropici,

colture trattate con abbondante uso di fitofarmaci, fertilizzanti chimici, fertirrigazione, aree a discarica incontrollata, aree industriali e minerarie (sia attive che dismesse). La stringa corrispondente enfatizza i pesi della soggiacenza, dell'infiltrazione e della tipologia della copertura, in misura leggermente inferiore è considerata l'importanza dell'insaturo, mentre gli altri parametri hanno un peso relativo minore.

Le aree soggette a drenaggio sono quelle in cui si ha un continuo o frequente travaso di acqua da corpi idrici superficiali a quelli sotterranei soggiacenti, aree soggette a forte rischio di esondazione dei corsi d'acqua in regime di piena, aree di irrigazione con grandi volumi d'acqua per sommersione o per scorrimento, aree di affioramento della superficie piezometrica. Per queste zone assumono importanza preponderante la conducibilità idraulica e le caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero, elevata è anche l'importanza della ricarica efficace, della soggiacenza e del non saturo, mentre tipologia della copertura e acclività sono messe in secondo piano.

Le aree carsiche sono tipiche dei massicci carbonatici (calcarei e dolomitici), sono caratterizzate da collegamenti tra superficie e acquifero attraverso pozzi carsici e inghiottitoi; sono piuttosto diffuse in tutto il territorio italiano. La stringa assegna il massimo valore ai pesi relativi all'infiltrazione (per questo tipo di rocce si ha spesso $\chi=1$), alla conducibilità idraulica, alla pendenza della superficie, alle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero, mentre nulla o quasi è l'importanza della soggiacenza e del non saturo (le acque superficiali si riversano nel sottosuolo con velocità elevatissime, è pressoché nulla l'azione di mitigazione).

La stringa Fessurato si applica ad aree il cui sistema idrogeologico è costituito in prevalenza da rocce permeabili per fessurazione, non carsificate o con carsismo superficiale. Il peso maggiore è attribuito alla conducibilità idraulica, data l'elevata mobilità dei fluidi in mezzi particolarmente fessurati; pesi inferiori ma non bassissimi sono assegnati agli altri parametri, volendo considerare in questo caso un'azione globale di mitigazione dell'intero sistema, non strettamente connessa con i singoli parametri.

2.2.8 L'indice di vulnerabilità

Valutati i sette parametri caratteristici del metodo e assegnate le relative stringhe di pesi, l'indice di vulnerabilità intrinseca $I_{SINTACS}$, per ogni area discretizzata del territorio, si ottiene dalla relazione:

$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^7 P_i \cdot W_i$$

Essendo P_i il punteggio di ciascuno dei sette parametri considerati e W_i il peso relativo.

Si ottiene così un valore dell'indice che varia da un minimo pari a 26 ad un massimo di 260 punti; il valore ottenuto viene poi normalizzato in un intervallo di valori compresi tra 0 e 100 per renderne più agevole la lettura e la restituzione cartografica secondo delle classi di vulnerabilità.

L'indice normalizzato si calcola con la relazione:

$$IS_{NO} = \frac{IS_{GR} - IS_{MIN}}{IS_{MAX} - IS_{MIN}} \cdot 100$$

Dove IS_{GR} è l'indice SINTACS "grezzo", cioè quello calcolato con la sommatoria dei prodotti tra punteggi e pesi, $IS_{min}=26$, $IS_{max}=260$.

Le classi di vulnerabilità sono state individuate attraverso un'analisi statistica basata sul confronto delle vulnerabilità calcolate per oltre 500 aree campione con il metodo SINTACS e con il Metodo-base del CNDCL.CNR.

Tali classi corrispondono ai seguenti intervalli di punteggi normalizzati:

GRADO DI VULNERABILITA'	INTERVALLO DI PUNTEGGIO
Bassissima (Bb)	0 – 24
Bassa (B)	25 – 35
Media (M)	36 – 49
Alta (A)	50 – 69
Elevata (E)	70 – 79
Molto elevata (Ee)	80 – 100

Tabella 8: Punteggi e relativi gradi di vulnerabilità del metodo SINTACS.

2.3 Il metodo COP

Il metodo COP (Vias e altri, 2006) è un metodo studiato per valutare la vulnerabilità intrinseca degli acquiferi all'inquinamento. COP è l'acronimo di Concentration, Overlying layers, e Precipitation. Il metodo, sviluppato in accordo all'European Approach (Daly et al. 2002; Goldscheider and Popescu 2004), si basa sul fatto che la protezione naturale dell'acquifero sotterraneo è fornita dalle proprietà e dallo spessore degli strati di suolo sovrastanti (fattore O) e che essa varia sia in funzione dell'infiltrazione, che può essere diffusa o concentrata (fattore C), sia dell'intensità delle precipitazioni (fattore P). Questo metodo è applicabile a diversi tipi di acquiferi carsici e a diverse condizioni climatiche. È stato testato in due acquiferi carsici del Sud della Spagna che presentano differenti caratteristiche climatiche, idrologiche ed idrogeologiche. Dopo aver indagato i due acquiferi con altri metodi per la mappatura della vulnerabilità, il metodo COP è stato parzialmente validato.

2.3.1 Il fattore O (Overlying layers)

Il fattore O considera la protezione fornita dallo spessore del suolo e dalle caratteristiche fisiche degli strati sovrastanti la zona satura.

Daly ed altri (2002) hanno proposto la suddivisione del terreno in quattro elementi: suolo, sottosuolo, rocce non carsiche e rocce carsiche insature. Nel metodo COP invece, vengono considerati solo due parametri che rivestono un ruolo idrogeologico importante. Questi parametri sono: il suolo (O_s) e gli strati litologici della zona insatura (O_L). Il sub fattore suolo rappresenta gli strati biologicamente attivi del sottosuolo nei quali si verificano i processi di attenuazione dell'inquinamento. Il sub fattore O_s contiene in sé diversi parametri: tessitura, spessore e grana del terreno. Il sub fattore O_L , invece, riflette la capacità di attenuazione dell'inquinamento degli spessori del suolo appartenenti alla zona insatura. I criteri per quantificare O_L sono: il tipo di roccia (che con le sue caratteristiche idrogeologiche influenza il valore della porosità efficace e della conducibilità idraulica), il grado di fatturazione (ly), lo spessore di ogni strato (m) e le eventuali condizioni al contorno (cn). Eseguendo la somma dei prodotti dello spessore e della litologia di ogni strato si ottiene un indice che è associato al fattore protezione (Layer index = $\sum(ly \cdot m)$).

Il concetto di sommare gli strati è basato sul metodo AVI (Van Stempvoort et al.1993) e sul metodo PI (Goldscheider et al. 2000).

Il valore del parametro “cn”, che rappresenta il peso assegnato alle condizioni presenti al confine dello strato di suolo considerato, conferisce il valore di protezione massima agli acquiferi confinati, mentre non influisce sulle falde non confinate (infatti in questi casi “cn = 1”).

La capacità di attenuazione dell'inquinamento aumenta proporzionalmente alla somma degli strati protettivi sovrastanti. Il punteggio del fattore di protezione O è dato dalla somma dei due sub fattori suolo (Os) e litologia (OL). Valori bassi di O corrispondono ad un alto grado di vulnerabilità e sono riscontrabili per esempio nelle zone dove si hanno rocce carbonatiche affioranti e fessurate o dove gli strati di suolo sono assenti o molto sottili. Valori più alti del fattore O corrispondono invece a zone con vulnerabilità più bassa. Ciò può derivare dalla presenza di litologie impermeabili o da diversi strati di suolo.

2.3.2 Il fattore C (Flow Concentration)

Il parametro C rappresenta la possibilità dell'acqua di aggirare la protezione fornita dagli strati sovrastanti (Daly et al. 2002). Esso coincide con la presenza di corsi d'acqua superficiali, che bypassando la zona satura si infiltrano direttamente nel sottosuolo attraverso fratture profonde o inghiottitoi, che non è infrequente trovare in una zona carsica come quella in studio. Questo concetto è ripreso sia dal metodo PI (Goldscheider et al. 2000) che dal metodo EPIK (Doerfliger e Zwahlen 1998).

Possono essere considerati due scenari:

Scenario 1: Il primo scenario si riferisce ad una situazione in cui il bacino in considerazione sia ricoperto da uno strato a bassa permeabilità dove il deflusso confluisca in un inghiottitoio o in una zona di infiltrazione concentrata come per esempio i piedi di un pendio e in cui l'acqua riesca a bypassare la zona satura.

La valutazione del parametro C in questo scenario tiene conto di quattro parametri: la distanza dell'area di ricarica dall'inghiottitoio (dh) o dal percorso dell'acqua per giungere alla dolina (ds), la pendenza dell'area e la presenza o meno di vegetazione (v).

La vulnerabilità dell'acquifero si riduce con l'aumentare della distanza tra l'area di ricarica e un inghiottitoio o un percorso superficiale che culmini in una dolina. Il parametro “v” (vegetazione) rappresenta la percentuale di bacino coperta da vegetazione che con maggior probabilità incide sul regime di infiltrazione. Si hanno bassi valori del parametro v se, per

esempio, la superficie coperta dalla vegetazione corrisponde al 20-30% dell'intera superficie del bacino.

Il parametro slope (s = pendenza) è suddiviso in quattro classi percentuali (variabili da 0 a 100%) che sono diversamente correlate con il fenomeno del deflusso. La combinazione di pendenza e vegetazione fornisce il valore del parametro "sv", variabile tra 0,75 e 1. Quando la pendenza dell'area aumenta e la vegetazione è scarsa, la vulnerabilità all'inquinamento aumenta e il parametro sv assume valori pari ad 1. Questo fatto è conseguente alla riduzione del tempo che il flusso di ricarica attiva dell'acquifero impiega per arrivare direttamente alla tavola d'acqua attraverso doline o inghiottitoi. Il fattore C considerato in questo scenario, con le condizioni di ricarica appena descritte si ottiene moltiplicando i tre sub fattori sopra menzionati ($C=d_h \cdot d_s \cdot sv$).

Scenario 2: Questo scenario descrive le situazioni che non sono ricomprese nello scenario precedente, e cioè quelle in cui la ricarica si verifica in condizioni standard e non direttamente attraverso inghiottitoi, canali di drenaggio oppure ai piedi di un pendio. In questo caso il fattore C è dato dalla combinazione di tre parametri: caratteristiche della superficie (surface features =sf), pendenza (s) e vegetazione (v).

Il parametro sf dipende dalle caratteristiche geomorfologiche delle rocce carbonatiche e dalla presenza o dall'assenza degli strati sovrastanti (permeabili o impermeabili) fattore che determina l'influenza dei processi di deflusso e di infiltrazione.

La valutazione dei parametri pendenza e vegetazione viene effettuata, in questo scenario, in modo opposto allo scenario 1, infatti quando la pendenza è ripida e la vegetazione è assente, la pioggia e i potenziali contaminanti defluiscono e si allontanano dalla falda, contrariamente a ciò che avviene quando sono presenti gli inghiottitoi.

Nello scenario 2 il parametro pendenza/vegetazione dipende dalle caratteristiche della superficie. Per esempio, nelle zone dove la ricarica avviene direttamente per mezzo degli inghiottitoi si ha un valore di C basso. Al contrario, dove si verifica l'infiltrazione diffusa e in assenza di fenomeni carsici l'acquifero mantiene la sua protezione naturale e i valori assunti dal parametro C saranno più elevati.

2.3.3 Il fattore P (Precipitation)

Questo parametro include sia la quantità di precipitazione che i fattori che influenzano il tasso di infiltrazione, cioè la frequenza, la distribuzione temporale, la durata e l'intensità delle precipitazioni. Questi fattori rappresentano la capacità della pioggia di trasportare contaminanti dalla superficie verso le acque sotterranee, infatti, maggiore è la capacità di trasporto dei contaminanti dalla superficie verso la falda acquifera, maggiore risulterà la vulnerabilità intrinseca.

Il fattore P è valutabile attraverso due sub fattori: il sub fattore P_Q che rappresenta la quantità di precipitazioni e il sub fattore P_I , che rappresenta la distribuzione temporale delle precipitazioni.

Il sub fattore P_Q corrisponde al valore della quantità annua di precipitazioni mediata su una serie di dati di almeno un ventennio. Diversi metodi utilizzati per valutare la vulnerabilità di un acquifero all'inquinamento (PI, DRASTIC) considerano che la protezione della falda offerta dagli strati superficiali diminuisca (o che analogamente, la vulnerabilità aumenti) con l'aumento della ricarica e quindi con il rapido aumento dell'infiltrazione. Al contrario si potrebbe considerare che quando le precipitazioni aumentano notevolmente aumenti anche la diluizione del contaminante e che perciò la vulnerabilità diminuisca.

A proposito di ciò il metodo SINTACS (Civita, 1994) assume che la vulnerabilità diminuisca quando la ricarica media annua aumenta di 300-400 mm/anno. In molti acquiferi carsici dell'area Mediterranea è stato verificato che la ricarica media annua varia tra il 35 e il 55% delle precipitazioni medie annue (Lopez, Geta et al., 2004). Ciò permette di stabilire con una certa probabilità che un aumento delle precipitazioni fino a un valore di 800-1200 mm può determinare un aumento della vulnerabilità, in quanto i contaminanti giungono in breve tempo alla falda sotterranea e ciò a scapito del fenomeno di diluizione che risulterebbe meno accentuato. Se le precipitazioni aumentassero oltre il valore appena citato di 800-1200 mm è probabile che la diluizione sarebbe il processo dominante e che pertanto il fattore O che determina la protezione sarebbe il meno modificato (Vias et al. , 2006).

Il sottofattore P_I , rappresenta la distribuzione temporale delle precipitazioni in un certo periodo di tempo e quindi è indicativo dell'intensità delle precipitazioni. Per stimare questo

sub fattore vengono considerate due variabili: la precipitazione media annua e il numero di giorni di pioggia in un anno. Da ciò consegue che il valore di P_1 sarà maggiore quanto maggiore sarà il valore della precipitazione media annua e quanto minore sarà il numero di giorni di pioggia. Questo si traduce in una maggiore infiltrazione attraverso i condotti carsici e in un aumento della vulnerabilità. Nei casi in cui l'infiltrazione sia diffusa, e non avvenga attraverso i condotti carsici il valore di P_1 è basso e i volumi di ricarica risultano piccoli. Valori più alti del fattore P indicano un minore impatto sul livello di protezione garantito dal fattore O e quindi una bassa vulnerabilità. Valori più bassi di P indicano invece un aumento della vulnerabilità.

L'indice COP si ottiene moltiplicando fra loro i valori dei tre parametri su descritti:

$$\text{COP index} = C \cdot O \cdot P$$

Il valore viene assegnato cella per cella all'intero territorio in esame attraverso le metodologie GIS già descritte per il metodo SINTACS.

Ognuno dei parametri rappresenta un fattore che incide sul grado di vulnerabilità di un acquifero carsico.

I valori di vulnerabilità che può assumere l'indice COP si dividono in cinque classi (molto alta, alta, media, bassa e molto bassa). I valori che l'indice può assumere variano tra 0 e 15. Il fattore che incide maggiormente sull'indice è il parametro O che rappresenta il livello di protezione dell'acquifero. Le classi molto alta e alta sono assegnate a seconda dell'influenza del fattore C sulle rocce carbonatiche e in misura minore sull'influenza del fattore P. La classe molto bassa corrisponde alle zone in cui i fattori C e P hanno poca influenza sulla protezione. Le classi bassa e moderata, si riferiscono alle zone dove il potenziale di protezione è mediamente basso e nelle quali i fattori C e P non hanno una notevole influenza sulla vulnerabilità.

La validazione del metodo è stata effettuata dopo aver generato le carte della vulnerabilità, attraverso l'utilizzo di traccianti chimici, inseriti non solo all'interno di inghiottitoi, ma anche in percorsi idrici in roccia affiorante e mettendo a confronto i risultati ottenuti con l'utilizzo di strumenti idrochimici e idrodinamici.

Nel seguito viene riportata una figura che riassume il metodo nella sua complessità:

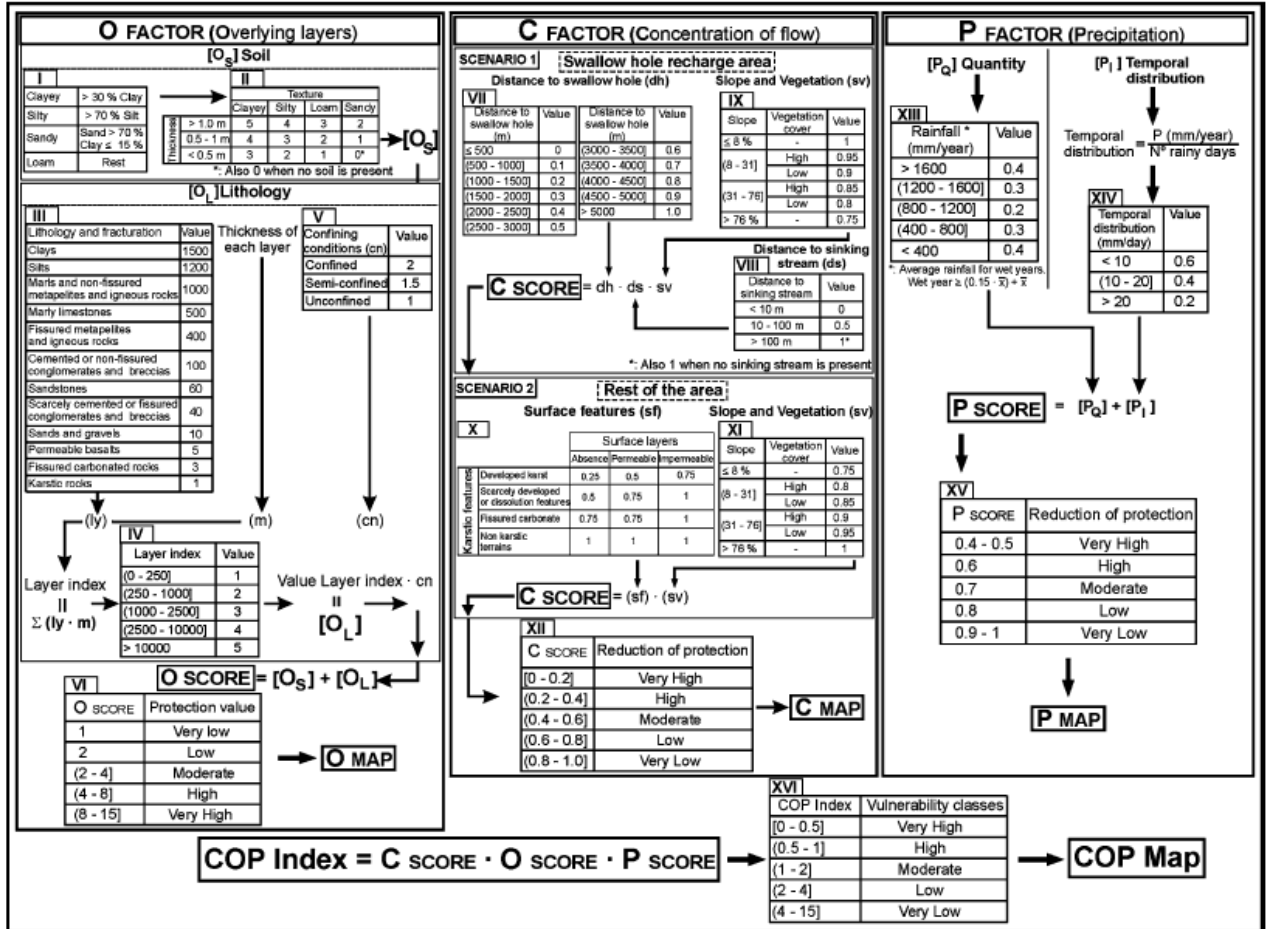


Figura 6: Schema di calcolo del metodo COP (da Vias et al., 2006).

2.4 Il metodo EPIK.

In Svizzera, allo scopo di migliorare la conoscenza delle aree di protezione dall'inquinamento, gli organi federali preposti hanno deciso di effettuare uno studio per mappare la vulnerabilità intrinseca degli acquiferi carsici presenti nel Paese. Il metodo di valutazione della vulnerabilità intrinseca utilizzato, cosiddetto EPIK (Doerfliger N., Jeannin PY, Zwahlen F., 1999), è l'acronimo dei quattro parametri utilizzati per la sua valutazione. È un metodo che prende in considerazione lo specifico comportamento idrogeologico degli acquiferi carsici, ed è basato su un particolare modello concettuale di sistema idrogeologico carsico.

In generale, gli acquiferi carsici sono considerati particolarmente vulnerabili all'inquinamento, a causa della loro particolare struttura, fortemente eterogenea. Essa può essere considerata come una rete di condotti ad alta permeabilità circondati un gran volume di roccia a bassa permeabilità (dovuta essenzialmente alla porosità della stessa roccia). Questo significa che una grossa quantità di acqua di ricarica si infila direttamente nella rete di condotti, cosicché l'attenuazione dei contaminanti da parte del terreno è molto ridotta rispetto agli acquiferi porosi. La nascita del metodo EPIK è una diretta conseguenza di ciò, poiché i processi di propagazione degli inquinanti in ambiente carsico sono totalmente differenti da quelli in ambiente poroso, per i quali sono stati sviluppati numerosi metodi di valutazione della vulnerabilità all'inquinamento.

Il metodo EPIK è un metodo parametrico a pesi e punteggi, sviluppato per classificare la vulnerabilità intrinseca degli acquiferi carsici all'inquinamento. Il metodo è basato su caratteristiche geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche degli acquiferi carsici. Nel metodo vengono considerati quattro parametri: Epikarst (E), Protective Cover (P), Infiltration Condition (I) e Karst Network Development (K), che corrispondono a quattro caratteristiche (che più avanti vedremo nello specifico) che influenzano il flusso dell'acqua e le condizioni di trasporto attraverso il sistema carsico.

2.4.1 Modello concettuale di acquifero carsico

La schematizzazione del sistema carsico con un modello idrogeologico concettuale, permette di utilizzare i più significativi parametri di questo modello come parametri del metodo EPIK. Il modello concettuale di un acquifero carsico include una rete di condotti ad elevata conducibilità idraulica ($K > 10^{-1}$ m/sec), che occupa un piccolo volume (questa è la rete carsica), connessa ad uno o più punti di fuoriuscita dell'acqua, che possono essere ad esempio delle sorgenti. La rete carsica è inglobata da un grosso volume di roccia fratturata e fessurata con basso valore di conducibilità idraulica ($10^{-7} < K < 10^{-3}$ m/s). La rete carsica, da un lato ricarica lo stesso acquifero, convogliando le acque dalla superficie sino alla zona satura, e dall'altro drena l'acqua al di fuori della roccia che la circonda, attraverso i punti di fuoriuscita della stessa.

Poiché la ricarica d'acqua non è dovuta alla porzione di acquifero a bassa conducibilità idraulica (la roccia che circonda i condotti), ci possono essere alcuni punti d'infiltrazione concentrata, come ad esempio inghiottitoi o punti di assorbimento direttamente connessi

alla rete carsica attraverso i quali si ha un'elevata ricarica dell'acquifero. Il resto della ricarica dell'acquifero arriva alla rete carsica attraverso l'Epicarso.

L'Epicarso, chiamato anche zona sottocutanea, è una zona che si trova immediatamente al di sotto del suolo, è altamente fessurata, e la sua formazione è dovuta alla dissoluzione delle rocce e alla formazione di pressioni in prossimità della superficie del terreno. Mangin (1973,1975) definì l'epicarso come "un temporaneo acquifero posato su una base che è essenzialmente una barriera capillare (caratterizzata da lenta percolazione in fessure strette, a causa della roccia sotto l'epicarso stesso che possiede bassa conducibilità idraulica), ma che include anche condotti tra loro interconnessi che prevedono l'effettivo drenaggio dell'acqua sino alla zona satura".

Il piano alla base dell'epicarso non è necessariamente continuo e la sua profondità può essere pari anche a dieci metri.

La vulnerabilità dell'acquifero carsico è funzione dei processi di trasferimento della massa da una parte all'altra dello stesso acquifero. Questi processi sono governati da parametri fisici quali diffusione molecolare, dispersione e capacità d'assorbimento e da parametri di flusso come il campo della velocità di flusso. Dall'analisi di questi parametri, si evince che la vulnerabilità dell'acquifero carsico dipende essenzialmente dal tempo di residenza (o dalla velocità del flusso) del sistema. In particolare, in base alla velocità del flusso, e quindi al tipo di flusso (condizioni di flusso di base o flusso di piena), si possono assumere le seguenti posizioni:

- 1) durante il periodo di minimo livello idrico (flusso di base), il flusso dell'acqua dalla sorgente è dovuto principalmente all'acqua contenuta all'interno del volume di roccia a bassa permeabilità, Quest'acqua è stata all'interno dell'acquifero per molto tempo. La vulnerabilità dell'acqua che fluisce dalla sorgente durante questa fase del ciclo idrogeologico, è relativamente bassa;
- 2) durante il periodo in cui il livello dell'acqua è alto (periodo di piena), le precipitazioni si infiltrano nei condotti dell'epicarso e quindi fluiscono attraverso la rete di condotti carsici. Quest'acqua raggiunge la sorgente molto rapidamente. I processi depurativi di filtrazione sono meno importanti che nel caso di basso livello idrico, ma compensati dalla diluizione degli inquinanti in una grande quantità d'acqua.

Si è detto che la vulnerabilità all'inquinamento dipende dal tempo di residenza, e questo è funzione della zona dell'acquifero in cui si trova l'acqua, pertanto si possono distinguere nell'acquifero stesso tre zone caratteristiche:

- l'endocarso, che è la parte più profonda dell'acquifero, caratterizzata dallo sviluppo della rete di condotti carsici, dove la velocità del flusso dell'acqua è alta, mentre la stessa è bassa all'interno del volume di roccia che circonda i condotti. Maggiore sarà lo sviluppo della rete carsica, maggiore sarà la vulnerabilità dell'acquifero;
- l'epicarso, che si trova al di sopra dell'endocarso, è quella porzione di acquifero dove una parte dell'acqua è rilasciata lentamente, e questa è caratterizzata da bassa vulnerabilità all'inquinamento, e il resto dell'acqua viene concentrata rapidamente nella rete di condotti dell'endocarso;
- la copertura protettiva, rappresentata dai sedimenti sovrapposti al calcare, dove il tempo di residenza dipende essenzialmente dalla permeabilità della copertura stessa e dal suo spessore.

La distinzione fra le tre parti dell'acquifero, acquista maggiore significato in caso di ricarica diffusa, e minore significato nel caso di ricarica concentrata (ad esempio inghiottitoi). In base alle caratteristiche fisiche e idrauliche dell'acquifero carsico, vengono definiti quattro parametri, utilizzati nel metodo di valutazione della vulnerabilità intrinseca all'inquinamento, che ora si vedranno in dettaglio.

2.4.2 Gli attributi

Epikarst. Come già visto l'epicarso è localizzato al di sotto del suolo consolidato, se questo è presente. Se il suolo non è presente, l'epicarso assume caratteristiche morfologiche simili ai campi carreggiati (Karren). Purtroppo, non esistono oggi strumenti di classificazione che permettano la mappatura dei differenti tipi di epicarso in funzione delle specifiche caratteristiche geomorfologiche e idrogeologiche. L'epicarso, può essere fortemente eterogeneo ed è difficile realizzare studi di dettaglio delle differenti tipologie in cui si presenta.

Per questo motivo l'epicarso è stato, nel nostro caso, caratterizzato indirettamente, basandosi su quelle caratteristiche geomorfologiche rilevabili dalla cartografia disponibile. L'attributo E è stato così suddiviso in tre classi di vulnerabilità (vedi tabella 9)

Epicarso	Classe Epikarst	Morfologia Carsica
Altamente sviluppato	E1	Shaft, sinkholes o doline (da tutti i tipi di genesi), polje, campi karren, sorgenti, grotte, inghiottitoi
Moderatamente sviluppato	E2	Zone intermedie nell'allineamento di doline, valli secche, codule
Piccolo o Assente	E3	Assenza di fenomeni morfologici propri dell'ambiente carsico, zone a bassa densità di fratturazione

Tabella 9: Classi dell'attributo E (Epikarst)

Come si vede dalla tabella precedente, per attribuire alle celle del territorio una delle tre classi E1-E3, bisogna rilevare le caratteristiche geomorfologiche. Questo può essere fatto con l'utilizzo di strumenti quali le carte topografiche (1:25000,...,1:5000). In una prima fase, con le fotografie aeree, che permettono la precisa definizione degli elementi geomorfologici evidenziati dalle carte topografiche. Per esempio, dall'analisi delle fotografie aeree, può risultare che osservate intersezioni di lineamenti, corrispondano a zone altamente fratturate. Se a queste non sono associate tipiche caratteristiche carsiche, possono essere mappate in classe E2 invece che in classe E3, per una maggiore cautela.

Protective Cover. In questo attributo viene incluso sia il suolo che altri strati geologici di copertura, come depositi quaternari (depositi periglaciali, silt, loess, detriti di falda) e altri orizzonti non carsici, come argilla e arenarie. Il terreno non consolidato al di sopra dell'acquifero è comunemente considerato come uno dei più importanti attributi nella valutazione della vulnerabilità delle acque sotterranee. Questo perché il suolo e gli altri orizzonti geologici, hanno una grande capacità di attenuazione degli inquinanti, in funzione di parametri quali tessitura/struttura, spessore, contenuto di sostanze organiche e minerali d'argilla, grado di saturazione dell'acqua e sua conducibilità idraulica, in genere variabili da contaminante a contaminante. Lo spessore del suolo è fortemente legato al tempo di residenza, nel senso che più sottile è il suolo, più alta è la vulnerabilità. Come elementi base per la classificazione di questo attributo, vengono considerati lo spessore della copertura e la sua conducibilità idraulica. Vengono distinti due casi, in accordo o meno alla presenza di orizzonti geologici al di sopra del calcare, e alla loro conducibilità idraulica, utilizzando quattro intervalli di spessore del suolo (vedi tabella 10):

Copertura del Suolo	Classi Protective Cover	Caratterizzazione	
		A. Suolo direttamente giacente sul calcare o su strutture geologiche ad alta permeabilità, per esempio detriti di falda e depositi glaciali	B. Suolo giacente su strutture geologiche a bassa permeabilità, per esempio argilla e silt
Assente	P1	0-20 cm di suolo	0-20 cm di suolo su strutture che hanno uno spessore minore di 1 m
Intermedia P1-P3	P2	20-100 cm di suolo	20-100 cm di suolo su strutture che hanno uno spessore minore di 1 m
Intermedia P2-P4	P3	100-200 cm di suolo	<100 cm di suolo o >100 cm di suolo e spessore della struttura geologica a bassa permeabilità >1m
Presente	P4	>200 cm di suolo	>100 cm di suolo e struttura detritica di bassissima conducibilità idraulica o spessore dello strato impermeabile (per esempio argilla) >8 m

Tabella 10: Classi dell'attributo P (Protective Cover)

La valutazione di questo attributo richiederebbe verifiche di campo, con l'utilizzo di trivellazioni e pozzi per le analisi di campagna. Con l'utilizzo di carte geologiche, pedologiche e topografiche, e l'ausilio di studi regionali, si possono definire le aree di territorio coperte o meno dagli orizzonti geologici. Anche le fotografie aeree e le immagini satellitari si possono utilizzare per determinare la presenza del suolo e lo spessore, se accompagnate da verifiche di campo. Avendo a disposizione una trivella, lo spessore del suolo si potrebbe misurare direttamente in campagna, ma i costi di perforazione sarebbero altissimi, tanto più quanto maggiore è il dettaglio che si cerca, perché bisognerebbe seguire una griglia di perforazione tanto più regolare quanto più cresce lo stesso dettaglio, cioè con i punti in cui si eseguono le perforazioni ravvicinati tra loro. Inoltre, maggiore è l'estensione del territorio d'interesse, maggiore sarà l'estensione della singola cella. In tal caso, lo spessore del suolo misurato in un punto della cella, deve essere rappresentativo dell'intera cella, ottenendo così un'approssimazione che cresce col crescere della dimensione del territorio e quindi delle celle nel quale esso è suddiviso. L'eterogeneità topo-morfologica del territorio in studio, va sempre tenuta in considerazione.

Infiltration Condition: Questo parametro riguarda il tipo di ricarica dell'acquifero carsico. La ricarica viene suddivisa in diffusa e concentrata, le due tipologie influiscono in maniera completamente differente sulla vulnerabilità di un acquifero carsico. Si possono identificare quattro classi per questo parametro d'infiltrazione, come riportato nella tabella seguente:

Condizioni di infiltrazione	Classi Infiltration Condition	Caratterizzazione
Concentrata	I1	Correnti temporanee o perenni – correnti temporanee o perenni alimentanti inghiottitoi e doline – aree d'influenza (codule) di queste correnti appena menzionate, includenti sistemi di drenaggio artificiale
Intermedia I1-I3	I2	Aree d'infiltrazione concentrata (senza sistemi di drenaggio artificiale) con pendenza >10% per campi coltivati, e >25% per prati e pascoli
Intermedia I2-I4	I3	Aree d'infiltrazione concentrata (senza sistemi di drenaggio artificiale) con pendenza <10% per campi coltivati, e <25% per prati e pascoli
Diffusa	I4	Il resto del territorio

Tabella 11: Classi dell'attributo I (Infiltration Condition) nel metodo EPIK.

Riconoscere i punti di ricarica concentrata è la parte più complicata della valutazione di questo parametro. Le aree a cui appartengono i punti di ricarica concentrata si assegnano alla classe I1 cui corrisponde il valore di protezione minore, cioè vulnerabilità maggiore, per poi diminuirne il valore per ricarica che si avvicina sempre più a quella diffusa, o assente, come per la classe I4. A quest'ultima classe appartengono tutte quelle porzioni di territorio che non ricadono in nessuna delle classi I1, I2 e I3, e nella tabella seguente (tabella 12) vengono indicate come "foresta". Le classi I2 e I3 vengono valutate in funzione dell'uso del suolo e dalla pendenza del territorio. L'acqua di precipitazione tende a concentrarsi lungo delle direzioni preferenziali dando luogo a corsi d'acqua perenni o meno che danno al territorio stesso una maggiore vulnerabilità. Questi elementi rientrano così nella classe I1. L'acqua di precipitazione che non si concentra lungo delle direzioni preferenziali, costituisce la ricarica diffusa per l'acquifero carsico. Questa ricarica è tanto più importante quanto più le condizioni di infiltrazione sono favorevoli. Queste condizioni sono dettate dalla pendenza del territorio e dalla copertura vegetale, ovvero l'uso del suolo.

La combinazione di queste due condizioni dà luogo ad un coefficiente di deflusso, come evidenziato dalla seguente tabella:

Pendenza (%)	Foresta	Prato – Pascolo	Campi coltivati
0.5	-	0.005	0.12
1	0.01	0.020	0.13
2	0.02	0.040	0.14
4	0.04	0.070	0.23
6	0.05	0.090	0.27
8	0.06	0.110	0.31
10	0.07	0.130	0.34
15	0.08	0.170	0.40
20	0.10	0.190	0.45
25	0.12	0.220	0.50
30	0.13	0.250	0.55
35	0.14	0.270	0.59
40	0.15	0.290	0.62
45	0.16	0.310	0.65
50	0.17	0.330	0.69

Tabella 12: Coefficienti di deflusso in funzione dell'uso del suolo e della pendenza nel metodo EPIK.

Come possiamo vedere, elevata pendenza e povera copertura vegetale comportano un valore elevato del coefficiente di deflusso, stabilito su basi empiriche, e quindi un'elevata vulnerabilità, perché queste condizioni generano un flusso più concentrato dell'acqua verso le aree di più basso rilievo dove l'acqua si infiltra con maggiore efficacia, che non nel caso di debole pendenza e consistente copertura vegetale. Quindi in questo metodo parametrico, contrariamente agli altri, la vulnerabilità aumenta all'aumentare della pendenza, assumendo che la superficie di deflusso è direttamente connessa a punti d'infiltrazione concentrata.

L'appartenenza dei coefficienti di deflusso alle classi I2 e I3 viene stabilito in maniera totalmente arbitraria, con un limite che stabilisce la separazione fra le suddette classi. Questo studio viene effettuato con carte topografiche e carte dell'uso del suolo.

Karst Network Development: Questo attributo rappresenta il grado di sviluppo della rete carsica del sistema acquifero. La rete può essere più o meno ben sviluppata e i condotti interconnessi a seconda dell'acquifero carsico considerato. Ogni rete carsica può rientrare in una delle tre classi di appartenenza stabilite per il parametro K, come specificato nella tabella 13:

Rete carsica	Classi	Caratterizzazione
	Karst Network Development	
Rete carsica ben sviluppata	K1	Presenza di rete carsica ben sviluppata (rete con ampiezza dei canali dal decimetro al metro)
Rete carsica poco sviluppata	K2	Presenza di una rete carsica poveramente sviluppata (piccola rete di condotti o poveramente connessi o apertura dei condotti minore del decimetro)
Solo acquifero fratturato	K3	Presenza di sorgenti di emergenza attraverso terreni porosi. Acquiferi non carsici e solo fessurati

Tabella 13: Classi dell'attributo K nel metodo EPIK.

Lo sviluppo della rete carsica gioca un ruolo molto importante nella valutazione della vulnerabilità, perché ne influenza notevolmente la velocità del flusso dell'acqua e quindi il tempo di residenza. La maggior parte delle situazioni carsiche, non è accompagnata da uno studio dettagliato dello sviluppo della rete carsica, sia per questioni economiche che per questioni logistiche, perché si tratterebbe di percorrere chilometri e chilometri di grotte di non facile, se non di impossibile, accesso. Per questi motivi si può utilizzare un solo valore del parametro K per l'intero territorio d'interesse. Inoltre caratteristiche come faglie o cavità che conducono a labirinti speleologici, non sempre possono essere rilevati in superficie. In questi casi possono essere utilizzati dei metodi indiretti di analisi. Tra i più utilizzati, uno di quelli che porta a dei soddisfacenti risultati, è sicuramente quello che prevede l'utilizzo di tests con traccianti artificiali. Con questo metodo si studia direttamente la velocità del flusso dei traccianti immessi all'interno della rete carsica e trasportati dall'acqua. I valori delle velocità del flusso, ottenuti con questi metodi, possono così identificare e caratterizzare la rete carsica. La velocità di transito è calcolata considerando, come intervallo di tempo, quello che intercorre tra l'istante d'immissione del tracciante nella rete carsica, e l'istante in cui tale tracciante comincia a fuoriuscire dal punto di uscita stabilito della rete carsica. La velocità di transito dipende dalle condizioni idrodinamiche esistenti nel sottosuolo carsico, e dallo sviluppo stesso della rete carsica. Si può così affermare che se la velocità di transito è maggiore di 15 m/h in condizioni di basso regime di flusso d'acqua, o maggiore di 75 m/h in condizioni di flusso di piena, questo implica, se non altro, la presenza della rete carsica. Se invece le due condizioni non sono verificate, ovvero se nelle due condizioni del flusso dell'acqua sopra esposte, la velocità della stessa è minore ai valori indicati, questo comunque non implica automaticamente la sua assenza.

2.4.3 Valutazione del fattore di protezione – Grado di vulnerabilità

Sino ad ora la valutazione degli attributi è stata solo di carattere qualitativo (suddividendoli cioè nelle classi E1,...,E3,P1,...,P4, e così via), ma per dare un significato a tale metodo, è necessario valutarli quantitativamente, ossia assegnare ad ogni classe un punteggio. Tale quantificazione è resa esplicita nella seguente tabella (tabella 14):

Attributo	Classe	Punteggio
Epikarst	E1	1
	E2	3
	E3	4
Protective Cover	P1	1
	P2	2
	P3	3
	P4	4
Infiltration Condition	I1	1
	I2	2
	I3	3
	I4	4
Karst Network Development	K1	1
	K2	2
	K3	3

Tabella 14: Punteggi delle classi degli attributi E, P, I e K. Minore è il valore numerico maggiore sarà la suscettibilità alla contaminazione.

Infine, bisogna quantificare anche l'influenza che ogni parametro esercita ai fini della vulnerabilità finale, e nella tabella che segue sono riportati i valori di ogni coefficiente di peso per ogni attributo (tabella 15):

Attributo	Coefficiente	Peso
Epikarst	a	3
Protective Cover	b	1
Infiltration Condition	c	3
Karst Network Development	d	2

Tabella 15: Coefficienti moltiplicatori (pesi) relativi agli attributi E,P,I e K

Come già messo precedentemente in evidenza, analizzando attentamente il significato fisico che assumono gli attributi, si evince che per punteggi elevati si ha una vulnerabilità minore dell'acquifero carsico, mentre, al decrescere del punteggio, tale vulnerabilità aumenta. Così, invece di calcolare il valore dell'indice di vulnerabilità, è più conveniente calcolare il fattore di protezione F_p , più semplicemente trattabile analiticamente. Il fattore di protezione è calcolato per ogni cella della griglia, con la seguente formula:

$$F_{pi} = a \cdot E_i + b \cdot P_i + c \cdot I_i + d \cdot K_i ,$$

con:

$i = 1, \dots, n$, dove n è il numero di celle della griglia;

E_i, P_i, I_i, K_i = punteggi assunti dagli attributi nella cella i -esima;

a, b, c, d = pesi relativi agli attributi (costanti per ogni attributo)

F_{pi} = fattore di protezione relativo alla cella i -esima.

Il metodo EPIK, è un metodo multi-attributo a punteggi e pesi che può essere classificato fra i metodi di valutazione per sistemi parametrici. Il territorio in studio viene suddiviso in un numero n di celle quadrate di lato 10 m; per ogni cella viene assegnato un punteggio per ogni parametro, in funzione del valore o significato fisico che lo stesso parametro assume nella stessa cella. Quindi, ad ogni parametro, viene assegnato un peso moltiplicatore che

riflette la maggiore o minore importanza che l'attributo assume nel metodo di valutazione della vulnerabilità.

Per ogni cella e per ognuno dei quattro attributi, si effettua il prodotto tra il punteggio e il suo peso, e la sommatoria dei quattro prodotti ci dà il punteggio finale che rappresenta l'indice di vulnerabilità. Maggiore sarà il punteggio dell'indice maggiore sarà da considerarsi la protezione dell'area, e minore la vulnerabilità, perché agli attributi viene assegnato un valore decrescente all'aumentare della vulnerabilità dell'acquifero. L'intervallo di valori che può assumere l'indice viene suddiviso in un numero finito di classi (generalmente quattro), a decrescente grado di vulnerabilità (quindi a crescente grado di protezione), come mostrato nella tabella seguente:

Classi di Vulnerabilità

Classe	Vulnerabilità
1	Molto Elevata
2	Elevata
3	Media
4	Bassa

Tabella 16: Classi di vulnerabilità nel metodo EPIK.

Il punteggio finale dell'indice cadrà all'interno di una di queste quattro classi di vulnerabilità. In sintesi:

- 1) le mappe risultanti per i quattro attributi E, P, I e K sono digitalizzate ed integrate in un GIS. L'attributo K può essere valutato globalmente per l'intero bacino (un solo punteggio per tutta il territorio in analisi), ma può essere anche valutato in accordo col contesto tettonico e geologico, o con le conoscenze speleologiche. Il GIS può calcolare il valore di vulnerabilità per ognuna delle "n" celle nelle quali è stato suddiviso il territorio;
- 2) sulla base delle mappe ottenute, che mostrano la distribuzione spaziale della vulnerabilità, possiamo definire le differenti zone di protezione.

Riepilogando, F_p restituisce il fattore di protezione di ogni cella della griglia dell'acquifero carsico; un basso valore di tale indice, corrispondendo a bassa protezione, sta a significare una elevata vulnerabilità dello stesso acquifero, mentre un elevato valore dell'indice significa un basso grado di vulnerabilità. Il fattore di protezione può assumere un valore compreso nell'intervallo [9,34]. Questo intervallo di valori viene suddiviso in un numero di classi pari a tre, e ad ogni classe viene assegnata una definizione qualitativa di vulnerabilità, come evidenziato in tabella (tabella 17):

Classe di Vulnerabilità	Intervallo di Vulnerabilità	Aree di Protezione
Molto Elevata	$9 < F_p < 19$	S1
Elevata	$20 < F_p < 25$	S2
Media	$F_p > 25$	S3
Bassa	Presenza di P4	Il resto del territorio

Tabella 17: Fattore di Protezione – Vulnerabilità Intrinseca

La valutazione del fattore di protezione ha delle implicazioni importanti. Ad esempio, in accordo con la definizione degli attributi e delle loro classi, una dolina, un'area carsica non coperta da vegetazione, una zona d'infiltrazione concentrata, una rete carsica ben sviluppata, costituiscono il caso peggiore di vulnerabilità. Ancora, dalle tabelle dei pesi e punteggi, si evince che i parametri E ed I possono giocare un importante ruolo di protezione nei confronti dell'acquifero carsico, a causa dell'elevato valore del peso degli stessi attributi. Poiché il ruolo che assume l'attributo P nella protezione dell'acquifero, considerandolo solo in funzione del suo spessore, è sovrastimato, ad esso è attribuito uno scarso peso (il più basso). Anche l'attributo K gioca un ruolo poco importante nella protezione dell'acquifero, e quindi anche il suo peso è minore di quello degli attributi E ed I.

Per concludere, è importante ribadire ancora una volta come la scelta dei punteggi e dei pesi assegnati agli attributi sia caratterizzata da una totale soggettività.

Capitolo 3 - ARTICOLAZIONE DELLA RICERCA

3.1 Fase preliminare.

La fase preliminare della ricerca è consistita nella ricerca bibliografica e nell'acquisizione dei dati cartacei relativi alla cartografia dell'area. In questa fase ci si è imbattuti in diverse difficoltà; infatti, nonostante la zona sia stata studiata approfonditamente per via dei lavori minerari che l'hanno interessata, non si trovano molti dati relativi all'idrogeologia generale (l'ultimo lavoro è quello del prof. Civita del 1983, propedeutico all'apertura del pompaggio al livello -200 di Monteponi). I dati reperiti non sono aggiornati, se non quelli relativi al monitoraggio delle falde da parte dell'IGEA spa, che però rispetto alla vastità dell'anello carbonatico risultano pochi.

Tra le altre cose si è rilevata la mancanza di una carta pedologica di dettaglio e le cartografie riguardanti l'idrogeologia risalgono al periodo in cui si educeva dalla falda sotterranea; niente di rilevante è stato fatto successivamente alla chiusura degli impianti di estrazione.

I dati cartacei sono datati, non presentano riferimenti geografici precisi e la scala di dettaglio non è approfondita. In molti casi non si è riusciti a risalire alle fonti dei pochi dati digitali reperiti. Per questi motivi si è dedicato molto tempo alla digitalizzazione ed alla georeferenziazione dei dati.

Nell'ultimo periodo fortunatamente, la Regione Sardegna ha messo a disposizione molti dati del database regionale in formato shape file, e questo ha consentito di uniformare i dati di cui non si aveva sicurezza della fonte, con quelli regionali.

Per ciò che riguarda la raccolta bibliografica, un'importante contributo è stato fornito dal prof. Massimo Civita, che ha consentito di accedere al suo archivio personale. Molti dei documenti che riguardavano il periodo di gestione della Società Italiana Miniere sono stati mandati al macero, e il prof. Civita ha salvato parte di questa documentazione, necessaria per i propri studi, e l'ha messa a disposizione.

I dati sono stati gentilmente forniti dalla società IGEA SPA, per ciò che riguarda il monitoraggio dei pozzi minerari (piezometria e qualità delle acque), dalla società ABBANOVA, di gestione delle acque potabili per ciò che riguarda le acque potabili emunte dagli stessi pozzi, dalla PROGEMISA (ora confluita nell'ARPAS, Agenzia Regionale di Protezione Ambientale Sardegna) per ciò che riguarda alcune prove di pompaggio effettuate negli anni '80, e per uno studio di modellazione numerica dell'acquifero

carbonatico, dal SAR, Servizio Agrometeorologico Regionale della Sardegna (ora confluito nell'ARPAS) per la fornitura dei dati meteorologici, ed infine dall'Università di Cagliari, relativamente a tesi di laurea inedite e ad alcuni studi sulla zona.

3.2 Fase di scelta del sito.

Il sito è stato scelto sulla base di diverse considerazioni.

Innanzitutto l'acquifero è un acquifero carbonatico di età mesopaleozoica, di tipo costiero. Queste caratteristiche consentono l'applicazione di diverse metodologie per la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento.

Diversi metodi sono stati sviluppati per gli acquiferi di tipo carbonatico e altrettanti quelli che considerano le problematiche legate all'intrusione marina.

L'anello carbonifero del Sulcis inoltre per la sua interrelazione con i siti minerari è stato da sempre studiato sia per lo sfruttamento minerario che per la successiva bonifica dall'inquinamento residuo che i processi estrattivi hanno lasciato in eredità. Per cui anche se i dati non sono molti, in relazione all'area in studio, vi è stato il vantaggio di poter disporre dei dati relativi ai costanti monitoraggi della piezometria effettuati dall'IGEA e dal gestore unico dell'acqua in Sardegna, la società ABBANOVA SPA.

Da un iniziale studio dell'intero grande anello metallifero (fig.7a) (denominazione assegnata all'area mineraria del SULCIS) ci si è portati allo studio del piccolo anello (zona a Sud rappresentata nella fig.7b).

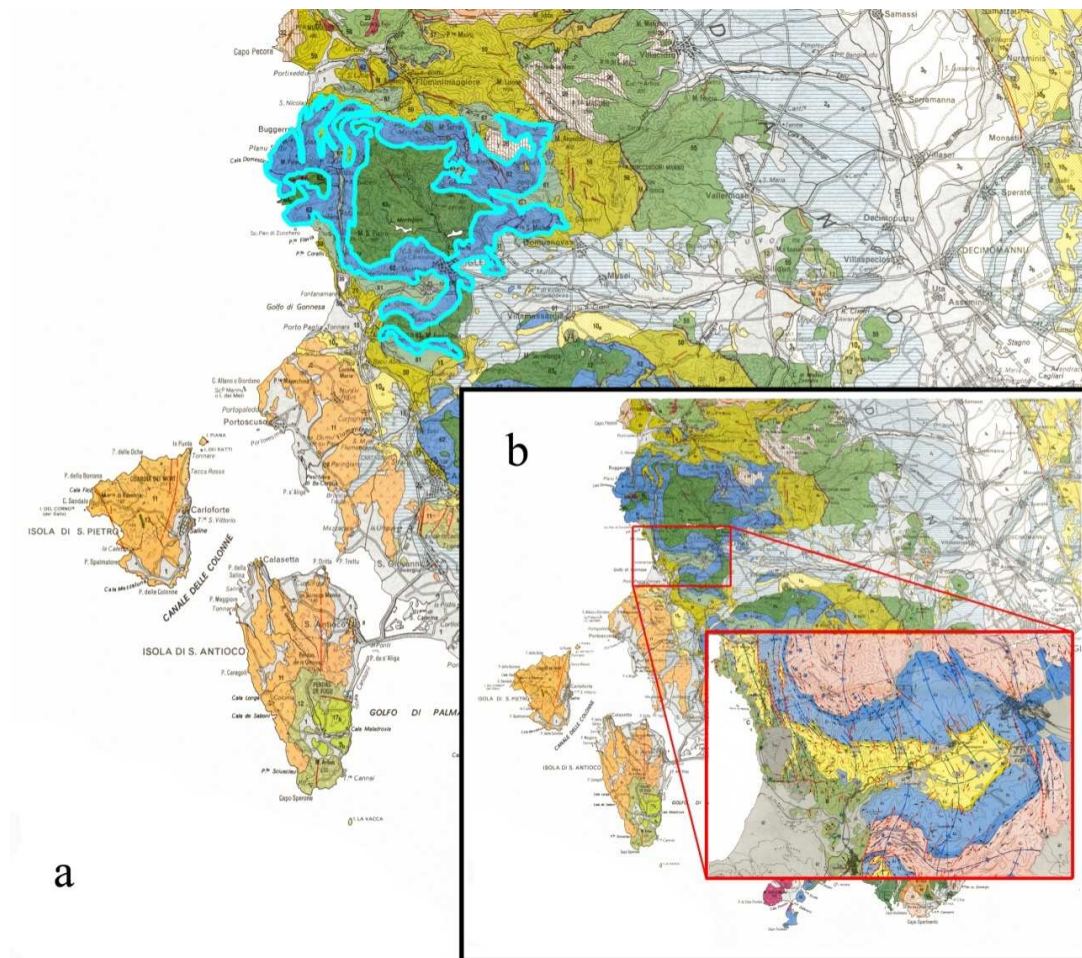


Figura 7a Grande anello metallifero e 7 b Piccolo anello metallifero, area in esame (Uras, Pintore, 2009).

La zona del piccolo anello, infatti, ha le stesse caratteristiche geomorfologiche strutturali e le stesse caratteristiche idrogeologiche di quella più grande, e da un punto di vista dell'elaborazione dei dati digitali e dei metodi della vulnerabilità, ha consentito uno snellimento delle procedure ed una maggiore precisione dovuta alla concentrazione dei dati tutti nella stessa zona (dati relativi ai pozzi minerari, alle stazioni meteorologiche, alle sorgenti e alle miniere della zona).

3.3 Fase di elaborazione dati.

Scelto il sito da studiare si è proceduto alla digitalizzazione dei dati a disposizione e alla loro georeferenziazione in un unico sistema di riferimento. I dati a disposizione per essere uniformati sono stati riportati in un unico sistema di riferimento. Si è scelto, allo scopo, il sistema di riferimento Gauss Boaga, secondo la proiezione trasversa di Mercatore che

utilizza un cilindro tangente ad un meridiano, detto meridiano di riferimento. La proiezione di Gauss-Boaga è la proiezione cartografica proposta nel 1940 dal prof. Giovanni Boaga - capo dell'Istituto Geografico Militare. Le coordinate di questo sistema di riferimento si esprimono in metri.

Come tutte le proiezioni sul piano di una superficie a doppia curvatura, anche quella di Gauss è affetta da deformazione, in particolare la famiglia delle proiezioni di Gauss deformano (aumentano) le distanze quanto più ci si allontana dal meridiano di riferimento. Tuttavia la sua natura di proiezione conforme fa sì che le forme geometriche siano preservate in intorni sufficientemente piccoli e che gli angoli misurati sulla carta corrispondano agli angoli misurati sul terreno.

Una volta georeferenziati i dati geometrici, sono state create delle tabelle contenenti gli attributi del dato spaziale di riferimento. Dal software GIS è possibile accedere a queste tabelle di dati semplicemente con un click.

I dati sono stati elaborati con metodi afferenti alle tecniche di geostatistica, in particolare mediante i softwares SURFER ad ARCGIS. Gli attributi dei dati spaziali sono stati utilizzati per poter fare in automatico i calcoli relativi alla valutazione della vulnerabilità all'inquinamento. Per ciò il territorio è stato discretizzato in celle elementari di 10 m di lato e ad ogni cella è stato assegnato un valore preciso.

Alcune aree sono state analizzate mediante analisi di immagini telerilevate. In particolare sono state usate le immagini Landsat risoluzione 30 m visibile e 15 m termico acquisite nel 2006, immagini IKONOS risoluzione 60 cm, sempre del 2006, immagini MODIS con risoluzione a 500 m, fornite gratuitamente dal dipartimento di scienze della terra, laboratorio di telerilevamento.

Interessante ciò che si è notato analizzando le immagini satellitari: l'analisi dei dati è stata eseguita operando lo slicing incrociato delle bande 123 e 2-4 e la sintesi additiva a colori falsati delle bande 742 (infrarosso). Con l'ausilio del software ENVI sono state evidenziate sia le discontinuità strutturali (faglie) della zona in studio che anomalie termiche.

E' stato possibile visualizzare sia le zone incendiate pochi giorni prima dell'acquisizione delle immagini che alcuni fenomeni esotermici in corrispondenza delle discariche di miniere di blenda e aree più fredde in corrispondenza delle miniere di fluorite.

Sono riconoscibili anche le aree carsiche sotto copertura vegetale, la cui conoscenza è risultata di fondamentale importanza per l'applicazione di metodi di valutazione della vulnerabilità.

3.4 Applicazione delle metodologie di valutazione della vulnerabilità.

I dati elaborati ed uniformati sono stati utilizzati per applicare le metodologie di valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. Le metodologie che si è scelto di utilizzare sono tre e sono le uniche compatibili col tipo di sito analizzato.

In particolare i tre metodi scelti che sono il metodo SINTACS, il metodo COP, ed il metodo EPIK effettuano la valutazione della vulnerabilità da inquinamento in direzione verticale, cioè dall'alto verso il basso. Gli ultimi due metodi enunciati inoltre sono specifici per gli acquiferi di tipo carsico, mentre il metodo SINTACS si adatta con facilità ad ogni genere di situazione, in quanto costituisce uno strumento versatile e dinamico che può essere tarato sulla situazione particolare con una certa facilità.

Le carte della vulnerabilità ottenute con i tre metodi sono state quindi messe a confronto ed analizzate nel dettaglio per giungere alla scelta di quello meglio adattabile alla situazione in esame.

Si è scelto di non applicare tra gli altri il metodo a punteggi e pesi denominato GALDIT, che valuta l'inquinamento in senso orizzontale dovuto all'ingressione delle acque salmastre, in quanto è noto che l'acquifero è già vulnerato in questo senso, senza contare che sarebbe stato molto difficile attualmente (a seguito della dismissione delle attività minerarie), reperire dati precisi sul monitoraggio delle falde in punti prossimi alla costa.

I pompaggi continui dai cantieri minerari hanno prodotto nel tempo un fenomeno di ingressione marina che ha contaminato l'acquifero, in modo particolare nelle zone a ridosso della costa e dove i pompaggi erano concentrati. La situazione è andata migliorando nell'ultimo periodo, infatti il tenore di cloruro di sodio presente nelle acque è diminuito progressivamente con la cessazione del pompaggio di Monteponi (dati IGEA, serv. Monitoraggio Falde).

3.5 Fase di produzione cartografia tematica in base GIS.

Una volta acquisiti i dati spaziali e creato il database di attributi corrispondente si è proceduto con l'operazione di overlay mapping, cioè con la sovrapposizione degli strati informativi di interesse per la creazione delle cartografie tematiche.

Le carte prodotte si riferiscono oltre all'inquadramento geografico ed ambientale della zona (caratteristiche geologiche, idrogeologiche, idrologiche, vegetazione, uso del suolo, ecc...), anche alla vulnerabilità dell'acquifero all'inquinamento. La cartografia consente di studiare il territorio prendendo in considerazione diversi parametri, e poiché è uno strumento dinamico, partendo dal loro incrocio, permette di fare delle valutazioni di tipo diverso ed approfondito.

Oltre al fatto che la cartografia prodotta è aggiornata ed ha un dettaglio maggiore rispetto a quella precedentemente esistente, il vantaggio dell'utilizzo dei sistemi GIS sta nella versatilità del prodotto, cioè nella sua modificabilità e continua aggiornabilità con l'utilizzo di risorse limitate in termini di tempo e di economicità.

Capitolo 4 - INQUADRAMENTO STORICO: IL RUOLO DELL'ATTIVITA' MINERARIA NEL TERRITORIO

4.1 Inquadramento storico dell'area.

La storia mineraria del Sulcis inizia già in epoca romana, per proseguire poi con la dominazione pisana ed in misura minore con quella aragonese. La prima citazione di Monteponi come località mineraria risale al lontano 1324. Le coltivazioni prevedevano all'epoca lo scavo di fosse sub-verticali, finalizzate all'estrazione della galena argentifera, alcune di queste sono ancora presenti nella zona intorno alla miniera di Seddas Moddizis, a ridosso di Iglesias.

Fino al 1700 i lavori minerari interessarono la sommità del monte, fino a quando nel 1720, con l'unione della Sardegna al Piemonte, non fu introdotto l'uso della polvere nera e successivamente della dinamite. A quel tempo i protagonisti delle vicende legate all'attività estrattiva furono Mandel e Belly, (Ottelli L., 2010).

Fino al 1850, gestioni sbagliate e scarsità di capitali non consentirono un adeguato sfruttamento della zona, furono 50 anni di sacrifici e di lavori incessanti che portarono però ad innovazioni tecniche senza uguali per l'epoca. Nel 1850 venne rilasciata la concessione mineraria a firma del ministro Cavour alla società Monteponi, costituita da banchieri ed imprenditori liguri, con sede a Genova. Tale anno segna l'inizio ascendente della parabola che porterà alla scoperta dei grandi giacimenti sotterranei.

Il maggiore sviluppo dell'attività mineraria e di conseguenza dell'economia della zona si ebbe nel 1870 con la costruzione dei primi pozzi e pompe per l'eduzione dell'acqua sotterranea, al fine di affrancare nuove porzioni di giacimento e con la costruzione di una ferrovia per il trasporto dei materiali fino al mare (Porto Vesme).

Nel 1880, per far fronte al problema delle venute d'acqua in sottosuolo nel sistema carsico viene progettata e costruita dall'ingegner Ferraris una galleria di scolo, che venne intitolata al Re Umberto I e che serviva a convogliare l'acqua dal Pozzo Vittorio Emanuele alla palude di Sa Masa nei pressi di Fontanamare. Al tempo i materiali coltivati provenivano dalle miniere di Monteponi, San Marco e Cungiaus ed erano principalmente:

- galene da cernita;
- terre piombifere;
- calamine ricche in roccia;
- terre calaminari da trattare nelle laverie.

La produzione mineraria andò avanti per la prima metà del '900 con alti e bassi dovuti prima alla crisi economica degli anni '20 e poi per l'interruzione durante il periodo bellico.

Si dovette affrontare nuovamente il problema dell'eduzione idrica dovuto all'approfondirsi delle coltivazioni minerarie. Fu avviata negli anni '60 un'intensa attività di ricerca in sottosuolo ed è da segnalare che nel 1977 gli impianti vennero assorbiti dalla SAMIM SPA (gruppo ENI) che prevede un nuovo impianto di eduzione a quota -200 m s.l.m. iniziando gli studi tecnici ed idrogeologici del caso. Nel 1986 la miniera passa dalla SAMIM alla Sim (Società Italiana Miniere). La ristrutturazione delle miniere di piombo e zinco raggiunse l'apice dello sviluppo, nel 1988 vennero centralizzati tutti i servizi nell'area di Campo Pisano. La messa in esercizio dell'impianto al -200 risale al 1990. Nel 1993 subentra la società Miniere Iglesiente SPA, ultima società produttiva del comparto piombo-zinco, acquisita dal sistema regionale a seguito del disimpegno dell'ENI nella gestione mineraria. A questo punto l'attività produttiva continua nelle miniere di Acquaresi e S. Giovanni e muore in tutto il restante territorio. L'ing. Pruna (direttore e Amministratore di varie società minerarie) nel 2006, in un dettagliato studio sui motivi che determinarono l'abbandono dell'attività mineraria nel giacimento piombo-zincifero dell'iglesiente, attribuisce le cause all'aggravio dei costi di eduzione e di estrazione. Infatti gli impianti di pompaggio richiedevano ingenti risorse per la manutenzione ed il monitoraggio, insieme al diminuire della produzione e alla riduzione dei settori di utilizzo del piombo. Il tutto in concomitanza con il confronto dei mercati extraeuropei e un maggiore costo del lavoro.

Di tutto ciò, rimane oggi una testimonianza di archeologia industriale che non si riesce a sfruttare a fini turistici e una pesante eredità ambientale con cui ci si deve confrontare quotidianamente, sia per le trasformazioni territoriali apportate e mai risanate, sia per l'inquinamento prodotto e per il quale solo adesso si è entrati nell'ottica delle bonifiche.

4.2 Storia dell'eduzione della falda a Monteponi.

Vista l'importanza che ha rivestito nella storia della miniera l'eduzione della falda, si riporta nel seguito l'exkursus temporale delle vicende più importanti che la riguardano.

A Monteponi l'attività mineraria risale al periodo cartaginese, ma fu solo nel XII secolo che le acque comparvero negli scavi dei pisani. Le prime informazioni certe sulla presenza dell'acqua risalgono alla seconda metà dell'800: con il forte incremento delle produzioni, gli scavi raggiunsero presto il livello +70 m s.l.m., precisamente, nel 1866, in piena fase produttiva per l'intero giacimento superficiale, si presentò la necessità di proseguire la

coltivazione delle colonne mineralizzate in profondità. Perciò si iniziò, con difficoltà, dal livello Cavour, lo scavo di due pozzi chiamati Sella n°1 e Sella n°2, che avrebbero permesso il tracciamento di un livello più basso di trenta metri. L'Ing. Pellegrini, allora direttore della Miniera, tentò in diversi modi di risolvere il problema: furono ordinate tre pompe a stantuffo da Liegi che si rivelarono presto insufficienti per edurre l'acqua. I guasti all'impianto erano frequenti e nel 1870, durante lo scavo del Pozzo Vittorio Emanuele, si vide comparire l'acqua in tutti i cantieri che venivano scavati oltrepassando la suddetta quota di +70. L'acqua divenne presto una triste realtà: tenere asciutti i cantieri diventava quasi impossibile con le attrezzature e i mezzi di allora. Benché l'ausilio delle pompe portasse l'acqua, sino al livello +45, nel 1871 una galleria in avanzamento tagliò una frattura dalla quale sgorgò acqua in quantità superiore alla portata delle pompe ed il livello risalì a +70. Il +70 fu identificato poi come livello idrostatico permanente delle acque, livello indisturbato da milioni di anni. Già da allora si aveva un'idea della conformazione del bacino, infatti era stato constatato che le arenarie costituivano il letto dell'acquifero, che i calcari e le dolomie erano le rocce che contenevano l'acqua e che gli scisti sigillavano fino a mezza costa le rocce carbonatiche, impedendone la fuoriuscita a giorno. Si decise quindi, con l'aumento, sia in numero che in entità, delle fratture portatrici d'acqua, di installare delle pompe più potenti al fine di abbassare il livello della falda. In realtà già maturava l'idea di drenare maggiori volumi d'acqua attraverso una galleria di scolo da intestare alla quota più bassa del terreno, con la quale si doveva bucare il grosso serbatoio e convogliare a mare tutta l'acqua contenuta nei calcari e nelle dolomie.

Si scelse tuttavia la soluzione più immediata di installare le pompe, perché le concessioni minerarie erano prossime alla scadenza. Fu così scavato un nuovo pozzo, denominato Pozzo Sella i cui lavori iniziarono il 4 marzo del 1872. Il nuovo pozzo andò ad ospitare due enormi pompe a vapore (Pompe Sella) di potenza complessiva pari a mille cavalli e della portata complessiva di 260 l/s. Per la tecnologia di allora, le Pompe Sella, ordinate da Liegi e messe in moto il 30 novembre 1874, costituivano un impianto colossale, ma nonostante il loro perfetto funzionamento, la falda si abbassò di soli 8,50 m raggiungendo la quota di 61,5 m s.l.m. in sei anni di esercizio delle pompe.

La spesa, di oltre 2 milioni di lire di allora, si rivelò vana. In considerazione dell'inutilità delle pompe, il nuovo direttore, l'ing. Erminio Ferraris, decise di mettere in essere il progetto della grande galleria di scolo.

I lavori, che incontrarono diverse battute d'arresto, si protrassero per circa dieci anni. Nell'agosto 1889, già superato il contatto con gli scisti (esattamente l'8 marzo 1885 alla progressiva di m 4161 dall'imbocco), alla progressiva di m 4268,4, si ebbe una imponente irruzione d'acqua, misurata in 3559 l/s nelle prime 24 ore, da un sistema carsico alla quota di +6,50 m slm denominato poi Gran Sorgente.

Dopo questo incidente si ebbe una svolta: l'intercettazione della Gran Sorgente, in comunicazione con tutto il sistema di fatturazione del bacino, permise l'abbassamento del livello freaticometrico di oltre 40 m, non solo a Monteponi, ma in tutto l'anello metallifero, consentendo lo sviluppo dei cantieri minerari verso il basso anche in tutte le miniere vicine: S. Giorgio, S. Giovanni, Nebida, Monte Agruxiau, Campo Pisano, Seddas Moddizzis, S. Marco, etc.. Dopo cinque mesi la portata si stabilizzò in 1400 l/s e il livello dell'acqua a Monteponi scese a +26. La galleria raggiunse la Miniera di Monteponi nel 1908-1909 ed il livello idrostatico si stabilizzò a quota +13,508.

Le masse mineralizzate, prosciugate grazie al drenaggio della galleria di scolo, cominciarono ad esaurirsi e già nel 1914 si cominciava a scavare sotto al +15. Intanto la portata alla galleria era stabile intorno agli 800 l/s con oscillazioni dovute ai cicli stagionali. Il problema delle acque sotterranee si ripresentò allo stesso modo, ma si aveva la necessità di proseguire le coltivazioni oltre il livello di sfioro della Gran Sorgente. Nel 1928 entrò in funzione l'impianto di eduazione al -15, per la costruzione del quale non mancò la tecnologia ma nemmeno i forti dubbi, essendo lo stesso, il primo impianto di eduazione sotto il livello del mare. I volumi edotti dalla stazione di pompaggio furono fissati di poco superiori alla portata defluente dalla galleria di scolo. L'impianto fu realizzato in una camera stagna in calcari compatti, dove si installarono tre pompe da 500 l/s l'una, di cui una di riserva. La stazione di pompaggio del -15 marcì inizialmente con una portata di 200 l/s, che aumentò gradatamente fino a 600 l/s e alla fine del 1930 la portata edotta era stabile a 950 l/s mentre, la portata naturale alla galleria di scolo 40 diminuì lentamente fino a cessare in maniera definitiva il 5 marzo 1929. In seguito, ogni qualvolta le coltivazioni raggiungevano la quota dell'impianto, la stazione di pompaggio

veniva costruita ad una quota più profonda. Il forte sviluppo delle attività minerarie a Monteponi, fra i livelli +15 e -15, ripropose il problema dell'eduzione. Già alla fine del 1932 era pronto il progetto di una stazione di pompaggio da realizzarsi a quota -60. In linea di massima si ripeté la stessa esperienza del -15: camera pompe in calcari compatti e quattro pompe da 1000 l/s ciascuna, di cui una di riserva, con una prevalenza di 80 m. Entrato in funzione nel 1936, l'impianto venne fermato in data 8 ottobre 1943 a causa degli eventi bellici e per quasi cinque anni.

La ripresa del pompaggio avvenne in data 1 luglio 1948 con due pompe del -15, fermo ormai da dieci anni, e una del -60 e con una portata complessiva di 2400 l/s. Tutto si era mantenuto in perfetto stato e dopo circa tre mesi si poté riaccedere ai cantieri del -60.

Nel 1955 fu realizzato un nuovo impianto di eduzione: quello del -100 il cui progetto era già pronto dal 1952. Per l'ubicazione delle pompe si ritenne sempre opportuno rimanere all'interno dei calcari compatti, già sfruttati nella realizzazione degli impianti precedenti. L'impianto, venne avviato nel marzo del 1956, consentendo una portata a regime di 1400-1500 l/s con due pompe a pieno regime. Anche in questo caso, come nei precedenti, quando si diede avvio al nuovo impianto, si proseguì il pompaggio anche con quello del -60, che venne fermato solo in assenza di afflusso d'acqua. La camera pompe di tutti questi impianti veniva costruita non comunicante con i cantieri di coltivazione, per evitarne l'allagamento in caso di assenza di pompaggio, inoltre, alla quota del livello di base (determinato dalla quota di realizzazione dell'impianto) veniva scavata una rete di gallerie tali da intersecare le grosse fratture e facilitare il deflusso d'acqua, che a sua volta si raccoglieva in canali scavati sul fianco delle strutture minerarie e veniva convogliata alla camera di raccolta adiacente alla sala pompe. L'ultima tappa dell'eduzione della falda dell'Iglesiente è rappresentata dall'attività del grande impianto del -200, realizzato allo scopo di affrancare ulteriori 100 m di riserve mineralizzate sottostanti il precedente livello idrostatico (-100). Il progetto iniziale dell'impianto, come si legge da Civita *e altri* (1983b), fu redatto nel 1977 dalla *Tecnomin*, con la collaborazione dei tecnici della miniera. Nel febbraio del 1980, la *Snamprogetti* si occupò della revisione dell'intero progetto soprattutto dal punto di vista elettromeccanico e civile. La caratteristica principale dell'impianto consisteva nella sua capacità di edurre una portata di 3000 l/s, con tre gruppi, per una prevalenza di 220 m, con la possibilità di modificare l'eduzione attraverso la variazione del

numero di giri dei motori, gestibile automaticamente o manualmente. Questa caratteristica permetteva un enorme risparmio: non era infatti necessario abbassare immediatamente e rapidamente il livello delle acque alla quota minima per poter iniziare le preparazioni delle coltivazioni, ma bastava un abbassamento rapido iniziale di 30 m, seguito da un abbassamento medio di 10 m/anno negli anni successivi. La portata di regime venne raggiunta solo al termine delle coltivazioni.

L'impianto di eduazione venne realizzato, similmente agli altri, in una camera stagna, scavata a quota -200, nella quale vennero installate 4 pompe ad asse orizzontale della portata di 1000 l/s, a due stadi, con giranti a doppio ingresso, azionate da motori a velocità variabile.

Le acque, sollevate a quota +10,50 m, venivano convogliate al mare mediante una nuova galleria che confluiva nella vecchia galleria di scolo a monte della Gran Sorgente. La camera pompe era collegata all'esterno mediante un pozzo di servizio, il Pozzo P; furono utilizzati poi altri pozzi per il passaggio delle tubazioni, il Pozzo T, per il riflusso, il Pozzo R e per l'accesso alle gallerie di drenaggio, il Pozzo A. La captazione dell'acqua avveniva tramite una galleria di drenaggio, scavata a quota -200 con andamento N-S. Tale galleria di drenaggio, sviluppata parallelamente alle fratture principali, note già dai livelli superiori, costituiva un asse da cui si dipartivano una serie di captazioni intersecanti le fratture che, essendo in comunicazione con tutto il sistema acquifero principale, permettevano il drenaggio di grossi volumi d'acqua.

L'acqua della miniera, captata sottobattente al livello -200 direttamente dalla roccia, veniva convogliata poi tramite tubazioni alla camera di raccolta (in pressione) e scaricata dalle pompe nella galleria di scolo.

Durante l'esercizio di questo impianto, avviato nel febbraio 1990 con portate crescenti sino a 1650 l/s, si osservò che le portate calcolate teoricamente per la depressione della falda, non erano sufficienti ad abbassare il livello idrostatico fino alla quota di base. Anche superando abbondantemente il regime di eduazione, dopo 5 anni dall'avvio dell'impianto, non si riscontrarono proporzionali abbassamenti piezometrici. La ricerca delle cause alla base di questa incongruenza ha portato a ritenere valido il modello matematico utilizzato per relazionare portate e abbassamenti, basato sui valori storici dell'eduazione a Monteponi,

ma tale funzione avrebbe dovuto comprendere anche le portate edotte a S.Giovanni, di cui invece non si è tenuto conto.

Pertanto l'impianto di eduazione, che a regime avrebbe dovuto portare all'asciutto i livelli fino al -200, arrivava solo alla quota di -160. Una prova di pompaggio, eseguita per esaminare il fenomeno alla base del limitato abbassamento piezometrico, con l'impianto al massimo delle sue potenzialità: 3 gruppi pompe in marcia con portata massima a regime di 2670 l/s, dopo 24 ore di pompaggio ha portato il sistema ad una stabilizzazione del livello alla quota più profonda di -164,58 m s.l.m.. Tale prova, che ha dato la conferma dell'impossibilità di raggiungere il -200 con un tale impianto, ha dato però importanti risultati in merito ai limiti del bacino idrogeologico e alla qualità delle acque edotte.

4.3 L'eduazione negli altri cantieri

La ricerca di minerale da estrarre da livelli sempre più profondi, richiedeva di rendere asciutte le coltivazioni laddove necessario. La stazione centrale di pompaggio di Monteponi comandava le piezometrie di tutta l'area per un raggio di oltre 15 km, ma dove l'influenza di questa era limitata o dove si coltivavano livelli molto profondi o erano presenti forti venute d'acqua, si rese necessaria l'esigenza di dotare gli impianti di stazioni di pompaggio, la cui entità era assai modesta rispetto alla stazione centrale. Soprattutto prima dell'avvento delle pompe del -200, l'eduazione localizzata era diffusa in quasi tutti i cantieri.

Dopo Monteponi, l'eduazione più importante fu praticata nel cantiere di S.Giovanni: si arrivò ad estrarre acqua per 194 l/s. La cosa influenzò sicuramente l'acquifero, creando un cono d'emungimento affiancato rispetto a Monteponi. La fermata delle pompe si ebbe nel giugno del 1991 e non si tenne conto, durante il dimensionamento dell'impianto del -200, delle acque di S.Giovanni: probabilmente il livello auspicato non fu mai raggiunto anche per questo motivo.

Nei mesi successivi al giugno 1991, novembre e dicembre, il livello piezometrico rimontò progressivamente in tutti i cantieri e nella miniera di Monteponi si stabilizzò a quote più elevate rispetto ai livelli precedenti: si notò una rimonta di circa 10 m. Si può inoltre

evidenziare che successivamente alla fermata di S. Giovanni, le depressioni raggiunte fino al giugno 1991 si ottennero solo con sensibili incrementi di portata.

Campo Pisano dal 1966 fu dotato di stazione di pompaggio sia per approfondire gli scavi sia per sfruttare l'acqua dolce, di buona qualità, per utilizzi idrici dei cantieri e successivamente civili e industriali. La portata media estratta era di 91,4 l/s.

A S.Marco, dopo l'avvio del -200 a Monteponi, per raggiungere la quota -100 quando l'effetto indotto di quest'ultimo non era ancora sufficiente a tenere all'asciutto il cantiere, venne installata una pompa al fronte con una portata di circa 30 l/s. Successivamente, durante lo scavo, si incontrarono altre venute d'acqua in cantiere, da rendere necessaria l'installazione di una seconda pompa, per un totale edotto di circa 60-70 l/s. Ciò terminò quando l'effetto indotto del -200 rese asciutto il cantiere.

Nella miniera di Monte Onixeddu era ubicata una pompa al livello -50 con portata di 60 l/s.

A Seddas Moddizzis le acque circolanti sono sempre state a bassa salinità (1.0-3.0 gr/l di Cl), mentre le portate edotte erano dell'ordine di 100 l/s.

L'eduzione avveniva pompando alla base l'acqua e reimmettendola nelle fratture esistenti a quota più alta. Ciò permetteva di tenere più o meno i cantieri all'asciutto anche se le venute d'acqua erano rilevanti. Al 1994, l'eduzione a Seddas Moddizzis si attestava a circa 25 l/s.

A Nebida si ebbero da sempre problemi con l'acqua nei cantieri, nel Pozzo Ausiliario del Cantiere Lamarmora, si installarono due pompe di portata totale di 62,5 l/s anche se la portata media edotta si attestava a 25 l/s e l'acqua era utilizzata sia per gli impianti di trattamento, sia per servire l'abitato di acqua industriale. Anche il Cantiere Fortuna era dotato di una modesta stazione di pompaggio: 4 l/s dal livello -100 ed 8 l/s dal -117.

Ad Acquaresi, prima dell'allestimento della Rampa Nastri i pompaggi erano modesti. Le acque, attraverso altre pompe orizzontali, venivano portate ad un grosso bacino ricavato dal vuoto di coltivazione della Massa Tetto San Marco, della capacità di 35000 mc al livello +190. L'acqua raccolta in quest'ultimo bacino veniva utilizzata per usi di cantiere e il surplus inviato a Nebida e Masua, sempre per usi interni ed esterni di cantiere.

Il Pozzo Garibaldi di Scalittas, punto di raccolta delle acque di numerosi lavori minerari della zona, raccoglieva una quantità d'acqua sempre rilevante, tanto da aver richiesto l'installazione di un impianto di pompaggio di cui non è, purtroppo, nota la portata.

Per quanto riguarda il Pozzo S. Luigi della miniera di Pira Roma, le notizie in possesso sono poche, il cantiere è sempre stato interessato dalla presenza dell'acqua, ma le strutture tettoniche, come detto precedentemente, l'hanno sempre compartimentato.

I dati riportati evidenziano quindi che l'eduzione non era puntuale ma diffusa nei vari cantieri del metallifero, dove, seppur con portate modeste, si educeva acqua dal sottosuolo, creando degli abbassamenti localizzati del livello piezometrico. Si comprende bene che i volumi idrici in gioco erano notevoli e che questi, attualmente, a seguito della risalita della falda, sono disponibili come risorsa per svariati usi.

4.4 La cessazione del pompaggio e la risalita della falda.

Il gennaio del 1997 segna la fermata delle attività produttive nelle miniere dell'Iglesiente, con esse, le pompe della grande stazione di eduazione di Monteponi, vengono spente.

L'arresto del -200 avvenne gradualmente, al fine di evitare miscelamenti tra le acque della falda a diversa salinità: in circa sette mesi, seguendo un piano programmato, si passò da una portata a regime di 1900 l/s con due pompe, ad 800 l/s con un solo gruppo di pompaggio. Questa modalità di disattivazione ha permesso di non alterare l'equilibrio venutosi a determinare con il pompaggio del -200, che, educendo dal basso volumi di acque salate sempre maggiori rispetto a quelle dolci superficiali, ha dato luogo alla stratificazione con tenori in sali crescenti verso il basso.

Una volta spento l'impianto, nel giugno 1997, si è notata una immediata risalita della falda, monitorata istantaneamente e sistematicamente in una rete di controllo composta da pozzi, sorgenti e piezometri.

Nell'ottica della chiusura degli impianti, si è reso necessario studiare lo scenario idrogeologico che si sarebbe determinato con la sospensione del pompaggio e la conseguente rimonta della falda. La scarsa dotazione di dati sperimentali rilevati nel tempo, non ha consentito di prevedere con certezza il comportamento della falda; tuttavia è

stata formulata una ipotesi di risalita sino al livello della Gran Sorgente nella galleria di scolo a quota +6,58 m s.l.m., comune recapito di tutte le acque del bacino metallifero.

Di particolare importanza nella formulazione dell'ipotesi sono state due serie di dati: la prima è stata ricavata dalle fermate totali dell'impianto del -200, durate alcune ore, a causa di guasti tecnici; la seconda è stata ricavata dall'arresto dell'impianto del -60, avvenuto nel 1943 in seguito agli eventi bellici. In quest'ultimo caso, l'acqua impiegò circa 4 mesi prima di raggiungere la Gran Sorgente. Secondo i calcoli di Bellè *e altri* (1995), partendo da una rapida risalita, la rimonta si sarebbe dovuta stabilizzare in 0,25 m/giorno, che equivale all'incremento medio giornaliero avutosi negli ultimi mesi della risalita del 1943.

Questa formulazione si basa su una ipotesi che si può ritenere abbastanza verosimile: l'uguaglianza temporale delle caratteristiche idrogeologiche e idrodinamiche del bacino dal livello -60 in poi.

Secondo tale interpretazione, il tempo necessario all'acqua per tracimare nuovamente dalla crevasse della Gran Sorgente, sarebbe dovuto essere di 19 mesi. La previsione è stata confermata, anzi preceduta dai fatti: la fuoriuscita dell'acqua si registrò infatti negli ultimi mesi del 1998.

Il progressivo abbassamento della falda nel tempo ha prodotto un richiamo sempre più cospicuo di acqua salmastra nel bacino. Le acque di provenienza marina, sono andate a miscelarsi con le acque della riserva geologica, del flusso di base e della ricarica attiva serbate nell'acquifero.

Quando fu intercettata la Gran Sorgente nel 1889, si riversarono a mare ingenti quantitativi d'acqua, stimati in 3600 l/s: iniziava allora il lento svuotamento dell'acquifero. Il deflusso dalla galleria scese nei cinque mesi successivi fino a 1400 l/s, diminuì ulteriormente intorno agli 850-900 l/s fino al 1928, anno in cui entrò in funzione l'impianto del -15, per decrescere ancora fino ai 650 l/s durante il periodo bellico in assenza di pompaggio. Nella prima fase di svuotamento, il deflusso a mare era costituito da apporti che possono essere individuati in flusso di base, ricarica attiva e riserve geologiche, mentre nella seconda fase il deflusso a mare si componeva solo di ricarica attiva e flusso di base, le riserve geologiche erano invece assenti fino a quota +6,50 (Gran Sorgente) 20.

Ciò che tutti si aspettavano, con la fermata del -200, era una portata di deflusso a mare molto prossima ai volumi che defluivano nel periodo bellico, dopo l'arrivo dell'acqua alla Gran Sorgente. Quindi al fine di permettere una rapida risalita della falda, si diaframmò la galleria di scolo mediante gettito in calcestruzzo nel 1998, al fine di isolare il sistema acquifero e di permettere in esso l'immagazzinamento dell'acqua che prima andava a mare

In realtà, la portata di circa 650 l/s, che si aveva naturalmente alla galleria di scolo nel periodo bellico, non si è mai rimaniestata e ancora ad oggi la superficie piezometrica non è risalita ai livelli di un tempo.

4.5 Il monitoraggio della falda.

Il monitoraggio della falda oggetto di studio, è sempre stato svolto nel corso della storia mineraria del territorio dalle varie società che si sono avvicendate nella gestione dei cantieri. Tuttavia, dopo la cessazione delle attività estrattive e dell'eduzione, l' IGEA S.p.A., ha attivato a partire dal luglio del 1996 un servizio dedicato, che in maniera sistematica tiene sotto controllo le acque sotterranee del sistema acquifero. All'avvio del monitoraggio, l'impianto di eduzione di Monteponi era ancora attivo, ma si avviava al termine: fu quindi predisposta tutta una rete di pozzi, piezometri e sorgenti, ubicati nelle zone centrali e periferiche dell'anello, da tenere sotto osservazione, al fine di studiare la risalita e la qualità delle acque. Nel corso della risalita, molte postazioni sono state abbandonate per ragioni di sicurezza (allagamenti o frane) e sostituite con altre.

Nelle fasi di misura e campionamento delle acque, sono adottate metodologie standard, tali che tutte le attività eseguite in campagna possano essere affidabili, ripetibili e riconosciute dagli organi preposti al controllo. Le attività che costituiscono il monitoraggio sono così riassumibili:

- Rilievi manuali del livello piezometrico tramite freatimetro;
- Rilievi automatici del livello piezometrico e di altri parametri tramite sonda multiparametrica in situ;
- Log stratigrafico della conducibilità specifica e della temperatura;
- Campionamento delle acque di falda ed analisi in laboratorio;

- Rilievo manuale delle fratture tramite fessurimetro e calibro micrometrico digitale.

I rilievi piezometrici consentono di acquisire dati idrogeologici da mettere in relazione con i periodi piovosi, con gli innalzamenti del livello freatico e la corrispondente concentrazione dei sali e dei metalli disciolti. Le misure vengono fatte mensilmente e registrate su una apposita scheda di campagna.

I rilievi automatici vengono eseguiti attraverso sonda ambientale multiparametrica installata in situ.

Vengono monitorati sei parametri:

1. Temperatura [\pm C]
2. Conducibilità specifica [μ S/cm 25 \pm]
3. Profondità-livello [m]
4. pH
5. Ossigeno disciolto [mg/l]
6. Torbidità [NTU]

Le sonde, presenti solo a Monteponi, Campo Pisano, Palmari, San Giovanni, Monte Agruxiau, Nebida, Masua e Acquaresi, sono state impostate per effettuare una acquisizione ogni 12 ore. Il rilevamento avviene ogni 10 metri di pozzo tramite campionatore in plexiglas, il campione prelevato viene poi analizzato in laboratorio. Il prelievo dei campioni d'acqua avviene sempre tramite campionatore in plexiglas. Le acque vengono poste in appositi contenitori e portate immediatamente al laboratorio, che provvede ad effettuare la caratterizzazione chimico-fisica.

I rilievi delle fratture avvengono tramite calibro digitale micrometrico, su alcune postazioni in cui è stata installata una placca fessurimetrica riportante tre incavi coincidenti con gli assi di riferimento, in cui vengono effettuate le misure.

Nel seguito è riportato un grafico indicante l'andamento del livello piezometrico in funzione della distanza dal punto di pompaggio di quota -200 a Monteponi.

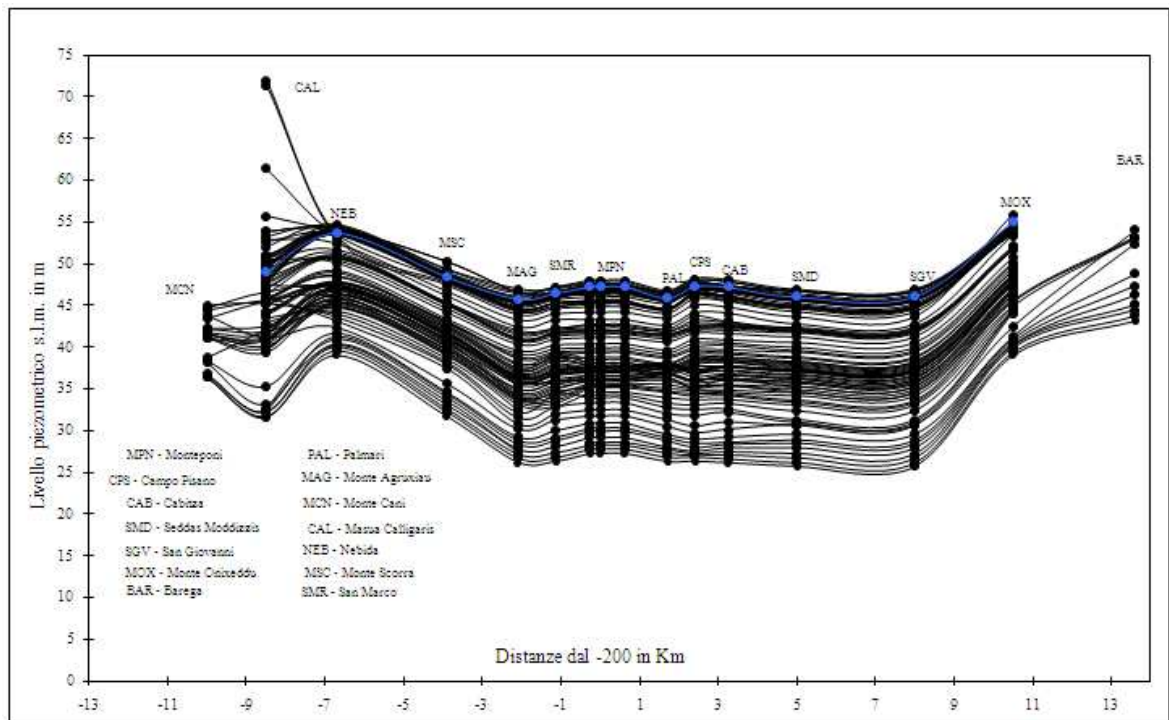


Figura 8: Livello piezometrico dei pozzi minerari in funzione della distanza dal -200 di Monteponi in km (IGEA, servizio monitoraggio falde, 2007).

Essendo i livelli piezometrici rappresentati influenzati dal pompaggio centrale di Monteponi, la risalita è meno marcata man mano che ci si allontana da quest'ultimo.

C'è ancora da osservare come il livello di Masua sia influenzato anche dagli eventi franosi della vicina Acquaresi. Il collegamento fra questi sottobacini, rappresentato dalla galleria di carreggio Ornella, scavata durante le lavorazioni minerarie in sotterraneo, esisterebbe comunque a livello idrostrutturale per la rete di fratture e cavità carsiche presenti.

Le elaborazioni sono state gentilmente concesse dal Servizio Monitoraggio falda dell' IGEA S.p.A..

Capitolo 5 - AREA IN ESAME

5.1 Inquadramento geografico generale.

L'area in esame ricade all'interno delle Carte tecniche regionali n. 555060, 555070, 555100, 555110 della Regione Autonoma della Sardegna, il foglio IGM al 25.000 di riferimento è in scala 1:50.000 è il foglio Iglesias, numero 555. La zona si trova per la maggior parte all'interno del territorio comunale di Iglesias e in misura minore all'interno del territorio comunale di Gonnessa.

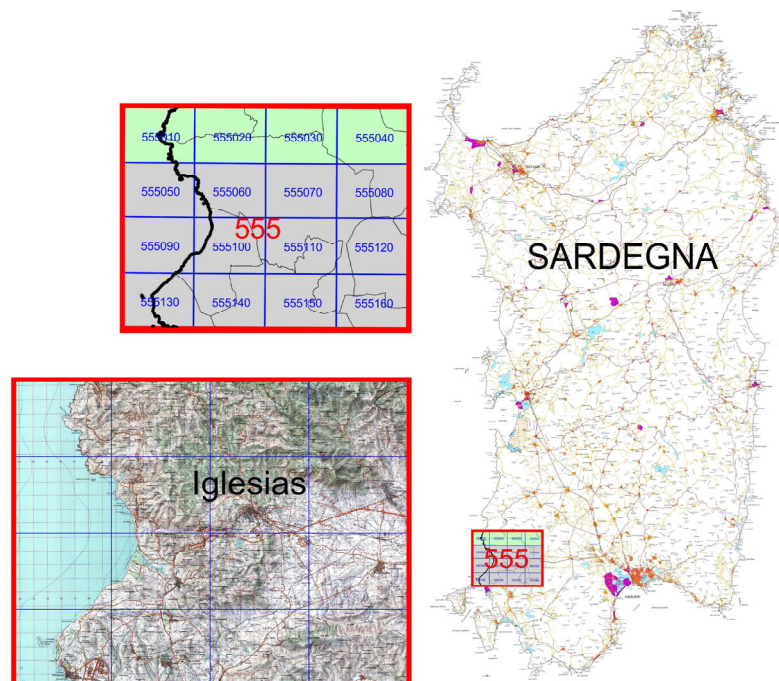


Figura 9: Inquadramento dell'area (da Uras, Pintore, 2009)

Di questo territorio si è presa in considerazione l'area ricadente all'interno del cosiddetto anello metallifero, delimitata da strutture carsiche all'interno delle quali sono presenti diversi giacimenti minerari sfruttati in misura diversa. Il termine anello metallifero, coniato da Merlo (1904), indica il grande anello carbonatico che circonda il nucleo di metarenarie e filliti nei pressi della città di Iglesias (centro urbano principale del territorio) comprendente più a sud il piccolo anello passante per le località di Monteponi, Campo Pisano e San Giovanni.

La struttura dell'anello metallifero delimita l'acquifero carsico del Sulcis. Nel "Piccolo Anello" sono ubicati la maggior parte dei pozzi minerari monitorati. Per questo motivo si è scelto di incentrare lo studio all'interno di quest'area.

5.2 Caratteristiche geologiche

La geologia dell'area è caratterizzata da terreni di antica formazione, appartenenti alla successione del Cambrico inferiore e medio. Si tratta di tre formazioni denominate “Nebida”, “Gonnesa” e “Cabitza”. Le formazioni che verranno di seguito descritte in successione cronologica e in base alla natura originaria delle rocce, sono rappresentate nella sezione stratigrafica di riferimento riportata nel seguito.

- *Formazione di Nebida*

La formazione di Nebida è suddivisa in due membri: Mattoppa e Punta Manna. Il più antico (Mattoppa), è costituito da un'alternanza argilloso-arenacea che diviene sempre più siltitica e arenacea procedendo da sud verso nord e nord ovest. Alla base del membro di Punta Manna si trova un orizzonte oolitico che presenta spessori fino a 100 m lungo chilometri che poggia su depositi terrigeni e localmente sui calcari. Segue a questa un'alternanza di arenarie, talvolta con stratificazioni incrociate e di calcari più o meno dolomizzati (Servizio idrogeologico IGEA). Nelle facies calcaree sono presenti strutture sedimentarie e frammenti di fossili.

- *Formazione di Gonnesa*

La formazione di Gonnesa costituita essenzialmente da litofacies carbonatiche è rappresentata dal membro della *dolomia rigata*, dal membro della *dolomia grigia* e dal membro del *calcare ceroide*.

Il membro della dolomia rigata si sovrappone strati graficamente al membro di Punta Manna ed è costituito da una sequenza ben stratificata di dolomia primaria alternata a stromatoliti e pisoliti vadose, spesso caratterizzata dalla presenza di livelli di ossidi ed idrossidi di ferro.

- *Formazione di Cabitza*

La Formazione di Cabitza è rappresentata in quest'area dal membro del calcare nodulare con scarsi affioramenti e dal membro degli Scisti di Cabitza. In discordanza con i terreni cambrici si individua la formazione ordoviciana costituita da conglomerati color rosso vinaccia (puddinga ordoviciana) a cui fanno seguito alternanze di arenarie, siltiti e argilliti. Sulle formazioni deformate dall'orogenesi ercinica si rinvengono depositi lacustri del carbonifero inferiore in discordanza. Tali depositi costituiscono i sedimenti del bacino di S. Giorgio che hanno uno spessore di 30 m.

Comparazione fra metodiche per la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi.
 Applicazione all'acquifero del Sulcis Iglesiente

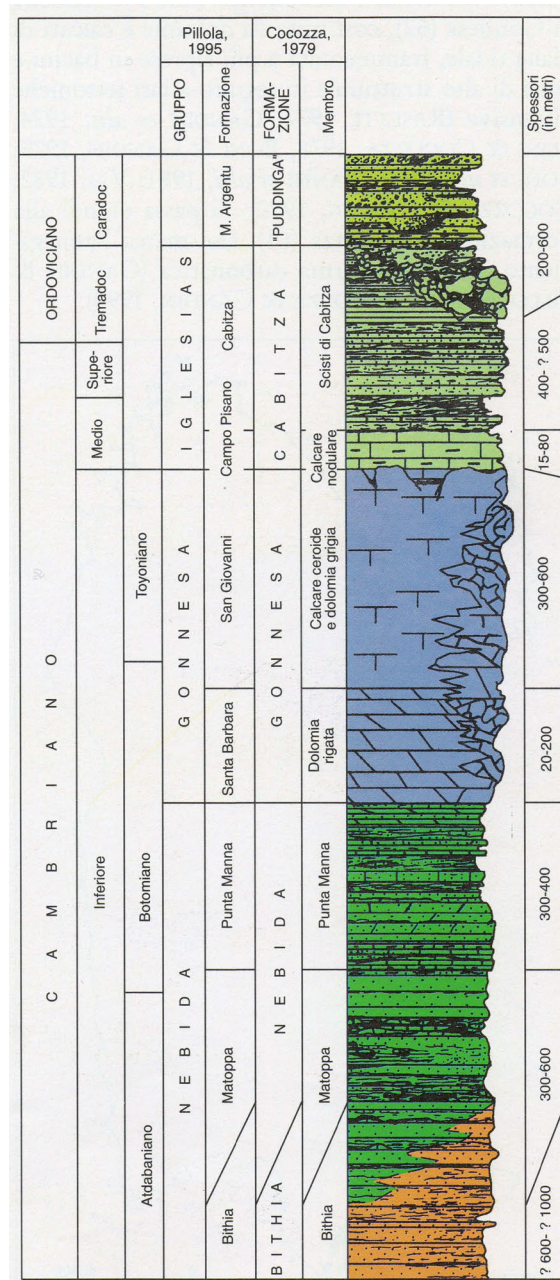


Figura 10: Successione paleozoica dell'Iglesiente (da Memorie descrittive Carta Geologica d'Italia – V. LX – 2001)

5.2.1 Caratteristiche geomorfologiche

L'iglesiente presenta diverse morfologie legate alla presenza di varie tipologie litologiche. Gli scisti e le puddinghe ordoviciane sono denotati dalla presenza di rilievi poco marcati, appena più accentuati nelle arenarie, mentre nelle rocce calcaree si hanno forme più aspre con pareti spesso verticali. L'area risente di un'intensa attività erosiva che ha lungamente modellato il paesaggio. Diverse valli si affacciano nell'area, tra queste si possono ricordare quella del Cixerri, di forma approssimativamente rettangolare, delimitata da faglie con direzione E-W N-E, allungata in direzione EW e lunga oltre 25 km, e la valle di Iglesias impostata sull'omonima sinclinale. La costa si presenta con poche spiagge e formazioni a dirupo sul mare che in diversi punti superano i 100 metri, specie dopo Masua in direzione Buggerru.

Anche l'uomo è diventato un fattore di modellamento del rilievo. L'attività mineraria ha modificato profondamente il paesaggio disseminato di discariche, scavi e impianti abbandonati. Soprattutto in concomitanza dell'anello metallifero, ma anche in larga parte dei calcari cambri, il territorio si presenta con cavità variamente allungate con rilievi a scarpate molto ripide o a gradino sui versanti. Queste forme conferiscono al paesaggio forme e colori caratteristici che rivelano il passaggio dell'industria estrattiva nella zona.

5.3 Caratteristiche idrogeologiche

Le diverse formazioni litologiche presenti nella zona si differenziano nel comportamento in relazione a favorire o meno il passaggio dell'acqua. I principali complessi sono:

- Il *complesso carbonatico antico* che assume un ruolo dominante nelle idrostrutture in qualità di acquifero principale;
- Il *complesso terrigeno inferiore*, molto esteso e scarsamente permeabile, che costituisce la base idrostrutturale dell'acquifero carbonatico;
- Il *complesso scistoso intermedio* e quello *terrigeno superiore* più in alto.

Tali complessi determinano la circolazione idrica sotterranea dell'intero acquifero, perciò saranno meglio descritti nel seguito evidenziando le caratteristiche idrogeologiche di ognuno di essi.

Il complesso *terrigeno inferiore* costituisce la base dell'acquifero principale, grazie alle sue caratteristiche di scarsa permeabilità e scarsa fessurazione. Esso si identifica con il Gruppo

di Nebida ed è alla base della serie idrogeologica dell'iglesiente. La potenza complessiva media affiorante è di 800 m circa.

Il *complesso carbonatico antico* si identifica con il gruppo di Gonnese il cui spessore varia tra i 500 e i 700 m. Esso riunisce tre diverse lito-stratigrafie: la dolomia rigata, la dolomia massiccia grigia e il calcare ceroide. Le dolomie presentano un minor grado di fratturazione, con le fratture riempite di materiale residuale. Il complesso carbonatico costituisce la cosiddetta roccia serbatoio in cui sono immagazzinati i volumi idrici sotterranei.

Il *complesso scistoso intermedio e superiore* si identifica con il gruppo di Iglesias e cioè con il calcare nodulare e con gli argilloscisti di Cabitza. La potenza media di questo complesso è di circa 400 m. La permeabilità di questa formazione è quasi nulla e ciò è dimostrabile dal fatto che la galleria di scolo delle acque edotte da Monteponi è avvenuto in assenza d'acqua fino a che non si è incrociato il contatto con la Formazione di Gonnese.

Complessi idrogeologici	Sub-complessi	Età geologica	Potenza media	Caratteristiche litologiche e giaciture	Caratteristiche idrogeologiche	Ruolo idrostrutturale
Alluvioni		Quaternario	Var.	Ghiaie, ghiaie sabbiose, argille ghiaiose, argille sabbiose, conglomerati a cemento argilloso; panchina e areniti	Permeabilità var., alta negli orizzonti più grossolani e dilavati, bassa in tutti i livelli più o meno argillosi.	piccole falde idriche di discr. produttività nelle alluvioni ghiaiose attuali e recenti.
Terrigeno post-Triassico		Paleogene	150	Marne policrome, arenarie e conglomerati. Conglomerati, arenarie con interc. di argille lignitifere e calcari.	Permeabilità molto scarsa per fessurazione.	Impermeabile relativo, costit. soglia di permeabilità a N dell'anello metallifero.
Carbonatico superiore		Trias	30	Calcari, calcari dolomitici, dolomie, breccie e conglomerati poligenici, stratificati, in giaciture sub-orizzontale.	Alto grado di permeabilità per fess. e cars..	Strutt. carsica indipendente e limitata (Campu Mari)
"Filoni"		Paleozoico sup.	Var.	Filoni basaltici, lamprofirici, a quarzo prevalente, porfidi, etc.. Quarzo, calcite concrezionare, tasche calaminari, etc..	Alto grado di compattezza equivalente e scarsa permeabilità, salvo nei casi di discont. dovute alla tettonica.	Compartimentazione a quinte degli acquiferi principali (carsici) con setti a bassa permeabilità.
Magmatico	Porfidi e graniti	Paleozoico sup.	Var.	Porfidi rosati a quarzo e ortoclasio, poco fessurati. Graniti rosa, granodioriti, tonaliti, etc..	Permeabilità media per fessurazione	Moderatamente acquifero.
Terrigeno superiore	Scisti e conglomerati	Ordoviciano	100-200; 0-500	Argilloscisti arenacei, argilliti, siltiti, con scistosità pronunciate e metamorf. di cont con i graniti (scisti). Conglomerato poligenico a cemento ematitico-arenaceo (conglomerati).	Permeabilità scarsa per fessurazione o impermeabili.	Impermeabile relativo, limita idrogeol. gli acquiferi carbonatici in molte zone dell'Iglesiente
Scistoso intermedio	Argilloscisti di Cabitza	Cambrico medio e superiore	400	Successione di argilloscisti e siltiti laminati e spesso intensamente pieghettati.	Permeabilità praticamente nulla	Impermeabile relativo, genera numerose soglie di permeabilità limitando il complesso carbonatico antico.

Figura 11: Tavola idrostratigrafica riassuntiva tratta da Civita e altri (1983)

5.3.1 Fenomeni carsici.

I rilievi dell'iglesiente sono costituiti per il 40% da rocce carbonatiche (dolomie e calcari del cambrico), queste formazioni, in particolare il calcare ceroide, sono sede di fenomeni carsici che si sono evoluti dal Cambriano inferiore fino ad oggi. Ogni ciclo si imposta a seguito degli eventi tettonici che portano alla emersione delle rocce calcaree, seguendo o meno i cicli antecedenti. La singolare caratteristica di questo territorio è data oltre che dalla circolazione di acque carbonatiche e dalla presenza diffusa di corpi mineralizzati, dalla

presenza di acque fortemente acide per alterazione di solfuri ed acque salmastre, in una complessa azione ipercarsica (Forti & Perna, 1985)

I grandi fenomeni carsici di superficie sono rari, se si esclude la zona della grotta di S. Giovanni e la zona di Tinny. I fenomeni carsici epigei si limitano a piccole forme, ed è presente una normale distribuzione di karren, scannellature e fori ovoidali.

Il livello di carsificazione dell'area è maggiore di quanto si possa immaginare dall'esterno, infatti la zona è una delle più ricche di cavità in Italia. Le ricerche speleologiche e i lavori minerari hanno permesso di censire un gran numero di grotte anche al di sotto del livello del mare, con condotti carsici che superano i 100 km di estensione lineare.

Le cavità carsiche di maggiore interesse sono quelle di Su Mannau (che si sviluppa per circa 8 km) e la grotta di Fluminimaggiore, la grotta di S. Giovanni a Domusnovas, la grotta di S. Barbara della miniera di S. Giovanni e il complesso di Cuccuru Tiria ad Iglesias, la grotta di Is Zuddas e la grotta di Pirosu a Santadi.

5.3.2 Idrostrutture del metallifero.

L'acquifero principale è costituito dai carbonati e dalle dolomie delle formazioni di S. Barbara e di S.Giovanni che costituiscono il gruppo di Gonnese (ex formazione di Gonnese). Sulla base dei dati geologico strutturali, dell'andamento delle superfici piezometriche costruite con dati provenienti dai censimenti dei punti d'acqua e delle piezometrie rilevate nei cantieri minerari, mediante l'utilizzo di modelli di calcolo, sono state rilevate nell'iglesiente 26 idrostrutture elementari (Civita, 1983).

Il sistema acquifero principale è stato definito come una serie di serbatoi semidipendenti denominati SERSEM, posti parte in serie e parte in parallelo tra loro. I SERSEM sono caratterizzati da piezometriche diverse (in alcuni casi anche sensibilmente diverse). I SERSEM sono separati da discontinuità strutturali, fratture, sedimenti e cavità carsiche, ed è per questo che l'andamento della piezometrica è condizionato dalla presenza e dalla direzione delle fratture più che dai giunti di stratificazione. Nella figura seguente è possibile vedere la ricostruzione dei limiti dei SERSEM principali.

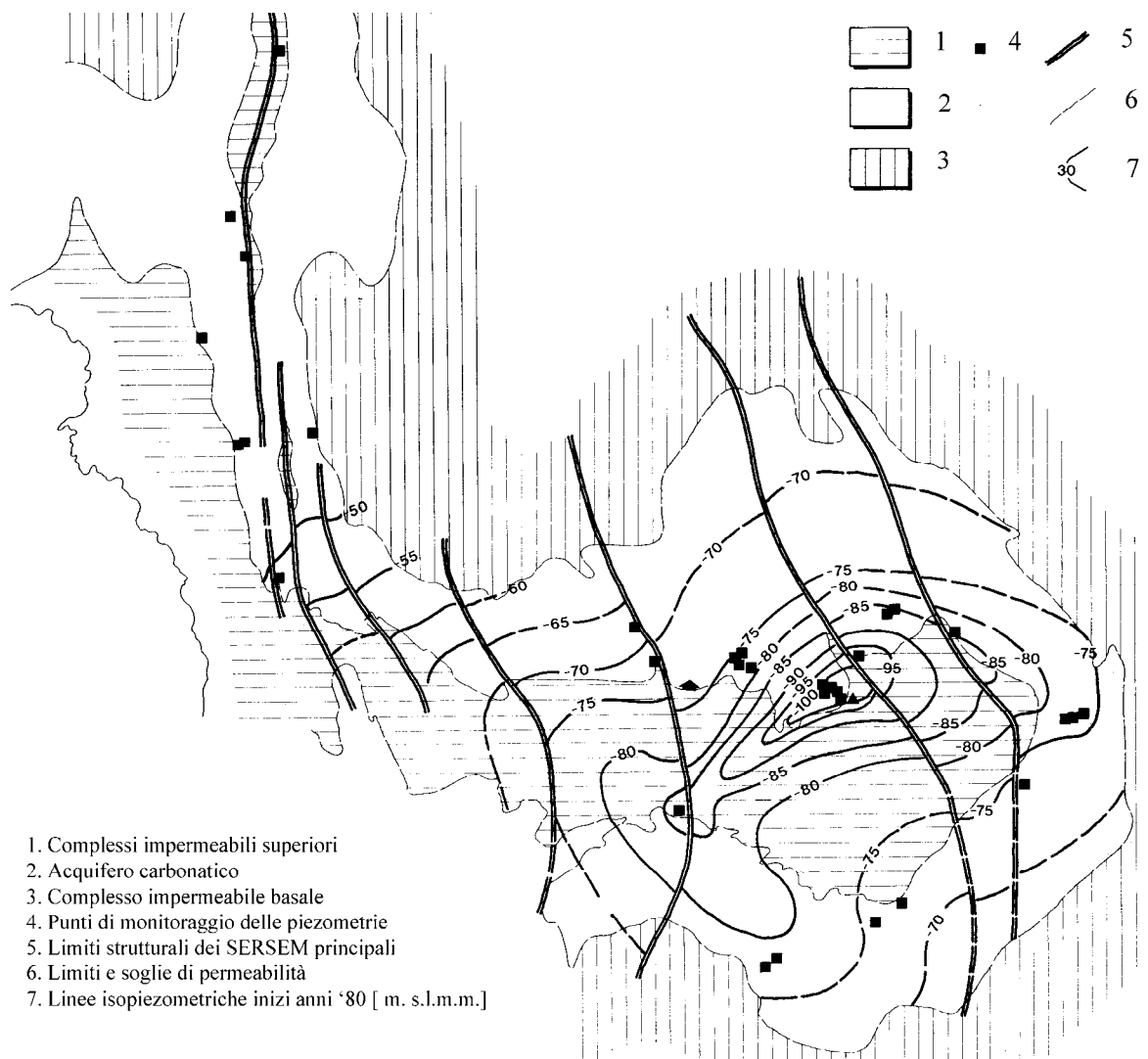


Figura 12 Limiti dei SERSEM e soglie di permeabilità (da Civita ed altri, 1983, modificato)

Nella zona in esame si può dire che le unità idrostrutturali principali sono le seguenti (Servizio idrogeologico IGEA, Studi e valutazioni sulle risorse idriche sotterranee, 1997):

- Unità idrostrutturale di Iglesias – comprende l'intera sinclinale di Iglesias e un'area di ricarica indiretta estesa a Nord, fino a P. Curadori.
- Fascia litorale ad Ovest
- Sistema di "Su Mannau", Gutturu Pala nella parte Nord;
- Sistema grotta S. Giovanni, Rolfo, Sa Crovassa a SE;
- Sistema Cuccuru Tiria, Torpado, Canello nella parte SO.

Il primo sistema è caratterizzato da grotte con ingresso sottomarino e da piccole fratture che drenano in mare le acque di scorrimento, il secondo sistema è stato notevolmente

influenzato dall'eduzione delle miniere, dove le lavorazioni hanno intercettato una serie di condotti carsici a sviluppo verticale dalle caratteristiche freatiche. Gli ultimi tre sistemi sono costituiti da una rete di condotti carsici molto estesi. Intorno a questi sistemi è presente un gran numero di cavità che rappresentano i residui dell'attività di questi corsi d'acqua sotterranei.

Si può dire che l'unità strutturale comprende buona parte del massiccio delle arenarie a nord di Monteponi e ad est della linea Masua-Acquaresi, una parte delle stesse arenarie a sud di S. Giovanni, e gli argilloscisti a nucleo della sinclinale di Iglesias e dell'analogia struttura della zona Masua-Montecani-Acquaresi. Non vi sono, pare, rapporti diretti tra il mare e l'acquifero principale del sistema, costituito dal complesso carbonatico antico

Alimentazione	km ²	C.Carb.	% kmq	C.Terr	% kmq	C.Scist.	% kmq
Max	89,50	34,50	38,60	42,00	46,90	13,00	14,50
Min	72,25	27,50	38,10	33,50	46,40	11,25	15,60

Tabella 18: Ripartizione della superficie nei tre complessi idrogeologici (Civita e altri, 1983b)

5.3.3 Acquifero principale e rapporti con i bacini limitrofi.

Gli studi effettuati nella zona dalle società minerarie succedutesi nel tempo, sia di tipo idrodinamico che geochimico ed idrogeochimico hanno permesso di delimitare con una certa precisione l'acquifero drenato dagli impianti di Monteponi, nonché quelli ad esso adiacenti. In particolare è stato evidenziato che in direzione della valle del Cixerri non vi è interconnessione tra l'acquifero di Monteponi e quello ospitato nella stessa formazione carbonatica del metallifero che affiora nella valle del Cixerri, attigua al bacino di Monteponi, poiché l'anticlinale di Gennalvas, separa in modo netto i due bacini. L'assenza di intercomunicazione tra i due bacini è provata dal fatto che con l'avvio dell'impianto di eduzione del -200 di Monteponi la falda si abbassò fino ad oltre -170 m s.l.m., mentre nel Cixerri le piezometrie subirono solo le variazioni indotte dai cicli stagionali, col risultato che la differenza di quota tra le due piezometrie era di circa 280 m. Con la cessazione del pompaggio avvenne la rimonta della falda in tutti i cantieri minerari collegati, mentre nel bacino del Cixerri non si riscontrò alcuna variazione piezometrica. Esiste invece una continuità idrogeologica dell'acquifero carbonatico al di sotto del nucleo di scisti impermeabili; provata, da S. Giovanni, fin oltre Masua, dagli effetti prodotti dai diversi livelli conseguenti all'eduzione di Monteponi. In particolare i limiti dell'acquifero

principale, costituito all'interno da sub-serbatoi semi dipendenti, si estenderebbero nel limite orientale che passa sopra Iglesias attraverso l'anticlinale di Gennalvas. A S-SW il limite dell'acquifero passa poi per Campo Pisano, Funtanaperda, S. Giorgio, Seddas Moddizis e S. Giovanni. Verso N lo spartiacque passa per M. Candiazzus, mentre il limite occidentale coincide con il piano assiale della sinclinale che passa per Nebida fino a M. Malfidaneddu. Nei diversi sub serbatoi il deflusso dell'acqua è regolato dalle discontinuità strutturali nelle diverse zone. Per questo motivo i conoidi di depressione prodotti dalle diverse stazioni di pompaggio hanno sempre assunto forme irregolari, con depressioni non sempre proporzionali alle distanze dalle stazioni di pompaggio.

5.3.4 Parametri idrodinamici dell'acquifero principale.

I parametri idrodinamici sono stati calcolati (Civita et Alii, 1983) mediante l'elaborazione dei dati rilevati durante la fase di svuotamento del bacino (luglio 1948), quando riprese l'attività estrattiva, alla fine della prima guerra mondiale.

In quella occasione si ottenne un valore della trasmissività $T = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ e un coefficiente di immagazzinamento variabile tra $S = 7,4\%$ e $S=9,1\%$ per le aree massime e minime del sistema. Tale valore viene attribuito alla presenza dei vuoti di coltivazione all'interno dell'acquifero.

I parametri idrodinamici sono stati ricalcolati dall'IGEA, utilizzando il metodo di Chow e le piezometriche raggiunte durante il pompaggio del -200. Da queste elaborazioni si è ottenuto un valore della trasmissività pari a $T = 7,67 \cdot 10^{-2} \text{ (m}^2/\text{s)}$ mentre il valore del coefficiente S di immagazzinamento è pari a $S = 3,67\%$. Si è ottenuto anche il valore del raggio di influenza che è risultato pari a circa 16 m.

I valori ottenuti risultano leggermente diversi anche se dello stesso ordine di grandezza di quelli calcolati nel dopoguerra.

5.3.5 Risalita della falda.

Al fine di evitare miscelamenti tra diverse acque di falda, la disattivazione dell'impianto a quota -200 è stata effettuata riducendo progressivamente le portate edotte; ciò è avvenuto in circa 7 mesi di tempo in cui si è passati da una portata a regime di 1900 l/s (con due pompe), a 800 l/s (con una pompa). Questa modalità di disattivazione ha permesso di non alterare l'equilibrio venutosi a determinare con il pompaggio del -200, che educendo dal

basso volumi di acque salate sempre più ponderanti, rispetto a quelle dolci superficiali, ha dato luogo alla stratificazione con tenori di sali crescenti verso il basso.

Contestualmente sono stati attenuati i fenomeni di contaminazione delle acque di Campo Pisano. La falda si è disposta in un equilibrio tipico degli acquiferi in falda libera con contenuto gradiente idraulico.

In generale, per quanto concerne la risalita, alla luce delle nuove acquisizioni e dei dati passati, si può affermare che il raggiungimento del livello idrostatico indisturbato di +70 m s.l.m. appare difficilmente raggiungibile. Le cause potrebbero essere molteplici:

1. Il sistema acquifero ha subito importanti modifiche causate dai lavori minerari: gallerie, pozzi, rampe, fornelli e vuoti di coltivazione diversificano il sistema da quello originale e ne aumentano globalmente la porosità. Pertanto, a parità di acque circolanti all'interno, il livello della superficie piezometrica si mantiene più basso rispetto alle condizioni iniziali perché le acque devono occupare un maggior numero di vuoti.

2. L'acquifero durante l'eduazione è stato sconvolto da un pompaggio forzato e continuativo; ciò può aver sconvolto la circolazione dell'acqua. Soprattutto l'intensità del pompaggio può aver causato il dilavamento delle fratture occluse, comportando l'instaurarsi di nuove vie di circolazione dell'acqua. Testimonia ciò il fatto che all'avvio dell'impianto del -200, con una portata di circa 1,6 mc/s, si pompò per mesi fango e acqua altamente torbida (da testimonianze tecnici IGEA).

3. Le attività minerarie e il carsismo, in simbiosi, possono aver creato delle intercomunicazioni con nuovi serbatoi carsici o acquiferi appartenenti ad altri bacini idrogeologici. Pertanto esisterebbero delle vie di fuga dell'acqua che non consentono oltremodo il sollevamento della piezometrica.

4. Nell'ultimo trentennio si è verificata una diminuzione, in misura del 15% ,della piovosità media annua. Ciò ha comportato una proporzionale diminuzione dell'infiltrazione e quindi della ricarica attiva.

Nel seguito sono riportati due grafici che riportano rispettivamente la velocità di risalita della falda e l'andamento piezometrico di due cantieri negli anni, dal 2000 al 2007.

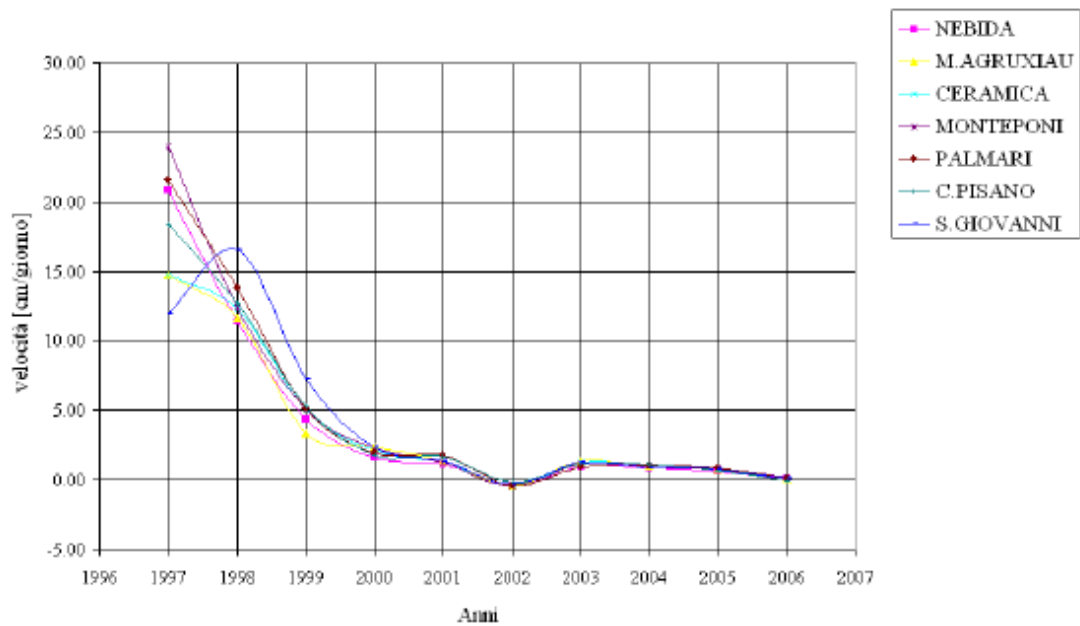


Figura 13: Velocità media annua di risalita in alcuni cantieri.

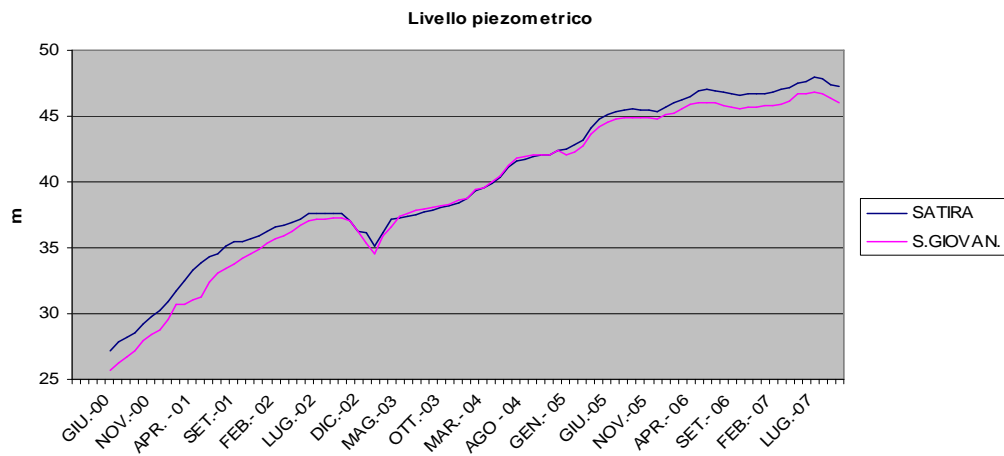


Figura 14: Variazioni del livello piezometrico dal 2000 al 2007 nei pozzi di Satira e S.Giovanni

5.3.6 Problematiche di dissesto legate alla risalita.

L'abbandono delle attività minerarie, dovuto alla attuale non economicità delle coltivazioni, ha comportato, con la chiusura di tutti i cantieri, lo spegnimento di tutti gli impianti di eduazione dislocati nel metallifero, nonché dell'impianto di pompaggio centrale sito a Monteponi, di entità nettamente maggiore rispetto agli altri. Quindi la repentina risalita della falda dell'acquifero profondo, unitamente all'abbandono delle coltivazioni, hanno generato un fenomeno diffuso di dissesto idrogeologico, manifestatosi prima nel sottosuolo e successivamente all'esterno.

Evidente segno di ciò sono le aperture di fratture, e nella roccia e nelle strutture e infrastrutture, le frane, gli smottamenti e le subsidenze. I fenomeni, inizialmente incontrollati, sono oggi tenuti sotto osservazione, ove possibile, anche se il territorio avrebbe da dotarsi di un piano di assetto perciò che concerne il rischio idrogeologico. Piano in cui venga definito il rischio sui vari livelli di pericolosità, esposizione e vulnerabilità degli elementi a rischio. La cosa non è semplice, considerata l'estensione delle aree minerarie e la complessità del sistema di vuoti, pozzi e gallerie; c'è inoltre da segnalare che, come per tanti fenomeni naturali, la mano dell'uomo può solamente rallentare il corso delle cose, approntando una soluzione immediata che non è comunque quella definitiva. Esempi del fenomeno descritto, possono essere identificati nell'area di Acquaresi, San Giovanni e Monteponi. Ad Acquaresi, si sono ripetuti dal 1991 ad oggi fenomeni franosi di crollo e subsidenza, che hanno causato elevato pericolo per la popolazione. Come si vedrà nel paragrafo successivo l'area è fortemente instabile e tutt'oggi necessita di soluzioni operative che ne permettano la messa in sicurezza. Gli scavi in sotterraneo vengono continuamente monitorati attraverso una rete di geofoni e di estensimetri che registrano i movimenti e permettono di tenere sotto controllo il fenomeno. A San Giovanni e Monteponi invece, sono state individuate delle grandi fratture attive che minacciano fenomeni di distacco e sprofondamento. Il tutto è tenuto sotto controllo attraverso alcuni fessurimetri, ubicati a cavallo delle fratture, nei quali è possibile, attraverso micrometro, misurare gli spostamenti lungo i tre assi spaziali di riferimento. A San Giovanni, nella zona Peloggio "Contatto Ovest", sono installati tre fessurimetri, uno all'esterno e due all'interno. A Monteponi invece i fessurimetri sono due, uno all'interno, al livello Cavour e uno all'esterno, negli antichi scavi di Cungiaus.

5.4 Cenni climatici

Analizzando i dati delle tre stazioni pluviometriche della zona, si osserva un andamento tipicamente sinusoidale delle precipitazioni con un'alternanza monotona dei cicli minimi e massimi. Il grosso delle precipitazioni (75%) sono concentrate nel semestre che va da ottobre a marzo, la situazione delle aste fluviali si presenta con accentuate caratteristiche di regime di magra, entrando in secca per lunghi periodi di tempo. Le precipitazioni medie annue superano talvolta i 1000 mm nelle zone montagnose mentre nelle zone collinari e di pianura hanno valori compresi attorno ai 750 mm. L'escursione termica annua è alta in tutta l'area (17°C nelle stazioni di Iglesias e Santadi), mentre il vento prevalente ha direzione N-W.

5.5 Bilancio idrogeologico

Il calcolo del bilancio idrogeologico è stato fatto prendendo in considerazione l'intero bacino idrogeologico di Iglesias e come dati di base si sono utilizzati i dati meteorologici del Servizio idrografico (SISS) relativi al settantennio 1922 -1992. Sono state fatte due ipotesi per il calcolo. In funzione del valore dell'evapotraspirazione è stata considerata un'ipotesi di minima e un'ipotesi di massima.

L'ipotesi di minima è stata fatta prendendo in considerazione valori di evapotraspirazione calcolati con il metodo Thornthwaite, mentre l'ipotesi di massima è basata sul fatto che l'evapotraspirazione abbia una minore incidenza sulle rocce carbonatiche.

5.5.1 Ipotesi minima

Nel seguito sono riportati i valori dei parametri utilizzati per il calcolo del bilancio minimo:

ANNI	P (mm/a)	T (°C)	Er (mm/a)	Pe/P (%)
1922 - 1992	698	17,0	418	39

Tabella 19: Parametri per il calcolo del bilancio idrogeologico

Il calcolo del volume di apporti efficaci all'unità idrostrutturale considerata, essendo nota l'altezza di pioggia efficace annua (pioggia totale meno evapotraspirazione),ha consentito di effettuare la valutazione della ricarica del bacino.

ANNI	Superficie Bacino (km²)	Apporti Totali (m³/a)	Apporti Efficaci (m³/a)
1922-1992	72.7	50.7*10 ⁶	19.8*10 ⁶

Tabella 20: Volumi degli apporti efficaci all'acquifero.

La ricarica degli acquiferi avviene per infiltrazione diretta delle piogge in corrispondenza delle aree di affioramento dei carbonati cambriani.

I coefficienti di infiltrazione maggiori si registrano nell'unità carbonatica cambriana (fino al 90% - dal "Piano di caratterizzazione del Rio S. Giorgio, IGEA), mentre per la formazione di Nebida e per la formazione di Cabitza si sono considerati valori di circa il 25%. Oltre alla ricarica diretta è stata considerata anche la modalità di ricarica indiretta dovuta al ruscellamento ed alle falde circostanti.

ANNI	Modalità ricarica	Superficie (km ²)	Ricarica (m ³ /a)	Ricarica totale (m ³ /a)
1922-1992	Diretta	41.1	10.1*10 ⁶	16.5*10 ⁶ 524 l/s
	Indiretta per rusc.	31.6	4.3*10 ⁶	
	Indiretta tra falde	31.6	2.1*10 ⁶	

Tabella 21: Valori di ricarica calcolati secondo l'ipotesi di minima.

Si è ritenuto plausibile che i valori medi riportati precedentemente potessero essere inferiori rispetto a quelli reali e di conseguenza che gli apporti efficaci reali potessero essere maggiori di quanto stimato. Tale considerazione deriva dal fatto che i calcari presenti sono caratterizzati da morfologie aspre con pendenze elevate e un elevato indice di rocce affioranti. La discontinuità delle coperture sugli affioramenti e la presenza di una cospicua rete di fratture e di cavità carsiche, determina una infiltrazione rapida delle acque meteoriche limitando così le perdite per evaporazione. Inoltre la vegetazione è scarsa e con apparati radicali molto ridotti sulla copertura carsica. Da queste considerazioni si è dedotto che l'ipotesi per il calcolo della ricarica dovesse tener conto di ciò e che pertanto l'ipotesi più plausibile sia l'ipotesi massima descritta nel seguito.

5.5.2 Ipotesi massima

Dato che non si dispone di dati sperimentali per apportare le necessarie correzioni, si è ritenuto di considerare un valore di evapotraspirazione molto più basso del valore calcolato con il metodo Thornthwaite precedente.

ANNI	P (mm/a)	T (°C)	Er (mm/a)	Pe/P
1922-1992	698	17	116	62%

Tabella 22: Parametri per il calcolo del bilancio idrogeologico

Nella tabella seguente vengono riportati gli apporti totali e gli apporti efficaci:

ANNI	Superficie Bacino (km²)	Apporti Totali (m³/a)	Apporti Efficaci (m³/a)
1922-1992	72.7	50.7*10 ⁶	31.6*10 ⁶

Tabella 23: Volumi degli apporti efficaci all'acquifero.

I dati della ricarica dell'acquifero secondo l'ipotesi di massima sono i seguenti:

ANNI	Modalità ricarica	Superficie (km²)	Ricarica (m³/a)	Ricarica totale (m³/a)
1922-1992	Diretta	41.1	20.7*10 ⁶	27.1*10 ⁶ 859 l/s
	Indiretta per rusc.	31.6	4.3*10 ⁶	
	Indiretta tra falde	31.6	2.1*10 ⁶	

Tabella 24: Volumi di ricarica calcolati secondo l'ipotesi di massima

Come si può vedere i valori calcolati con l'ipotesi massima sono notevolmente superiori rispetto a quelli della prima, con una differenza di 10,6 *10⁶ m³/a pari a 335 l/s.

5.6 Aspetti pedologici-vegetativi

Sebbene le utilizzazioni del passato, legate in particolar modo all'attività estrattiva, abbiano determinato la scomparsa di ampie porzioni del sistema boschivo primario, così compromettendo l'insediamento e sostentamento delle tipiche forme vegetali di tipo erbaceo-arbustivo, rimangono comunque attivi i processi di riedificazione vegetale della tipica macchia mediterranea.

Le scarse superfici ricoperte da aree boscate a lecci e a pini, vengono individuate presso l'abitato di Norman, vicino alla miniera di San Giovanni, presso l'abitato di Bindua, e nella anticlinale di Gennaluas; i rilievi dominanti i versanti meridionale (direttrice Seddas Moddizzis-Barega) e settentrionali, soprattutto, (Monte Bellicai-Monte San Pietro)

mantengono ancora forti connotati boschivi a lecci e querce da sughero, accompagnati dalla tipica vegetazione suffruticola minore.

Nelle aree caratterizzate da formazioni arenacee, di natura silicea sono presenti aree boscate a quercia da sughero che hanno stabilito la loro presenza, nonostante i tagli indiscriminati, gli incendi e l'utilizzazione delle aree a pascolo.

Una parte consistente del territorio è caratterizzata dalla presenza di macchia mediterranea in cui prevalgono lentisco, corbezzolo, erica arborea, cisto di Montpellier.

La maggiore differenziazione è data non tanto dalla composizione floristica, quanto dalla struttura che determina un aspetto complessivamente diverso al paesaggio vegetale.

Macchie a lentisco, erica e corbezzolo rappresentano uno stadio di evoluzione verso formazioni forestali più mature, mentre la presenza del cisto di Montpellier e dell'asfodelo stanno a significare uno stadio di degradazione legato alla frequenza degli incendi.

Le aree caratterizzate da rocce carbonatiche in cui la macchia ha subito in modo determinante l'effetto dei fattori antropici ed in cui i suoli sono stati degradati in modo irreversibile, sono caratterizzati dalla presenza di formazioni basse dominate da specie particolarmente resistenti alle condizioni di aridità, quali santolina, elicrisio, euforbia arborea, oryzopsis miliacea e diverse specie di ginestre spinose (Gariga).

Sui terreni adibiti a pascolo in cui sono scomparsi gli elementi arborei o legnosi della macchia le superfici, anche a seguito delle arature, sono ricoperte da una vegetazione in cui prevalgono decisamente le specie erbacee infestanti (tipo carline - asfodelo) che sono tuttavia quelle più resistenti alle utilizzazioni che hanno come forma predominante il pascolo brado.

Per ciò che attiene al seminativo in genere, oltre a qualche piccolo appezzamento di terreno dislocato in prossimità degli abitati, questi occupano per la maggior parte la zona pianeggiante compresa tra gli ex impianti di produzione dell'Acido Solforico - Laveria Mameli, subito a ridosso della s.s. 126 e il rio San Giorgio.

Si tratta in genere di colture di cereali per lo più caratterizzate da grano, orzo e avena, che vengono utilizzati per l'alimentazione del bestiame presente in zona.

Gli oliveti e i frutteti occupano piccoli appezzamenti di terreno ubicati generalmente in vicinanza alle abitazioni e vengono utilizzati per il consumo familiare.

Per ciò che attiene alle aree soggette a rimboschimento, queste vengono utilizzate più che per scopi produttivi, con la funzione di protezione del suolo e regimazione delle acque di scorrimento superficiale.

La specie di maggior impiego è il pino domestico, dimostratosi di facile impiego e buona adattabilità (pineta Bindua, Area San Giovanni Norman).

Alcune aree invece sono state rimboschite a Eucaliptus (area prospiciente la diga sterili di Campo Pisano).

L'utilizzo dell'eucaliptus è duplice, infatti assolve alla funzione di frangivento e alla produzione di legno. Alcune aree della valle di Iglesias sono state di recente sottoposte a decespugliamento con l'asportazione della macchia mediterranea con l'obiettivo di trasformarle ad erbai o a aree da pascolo. Queste pratiche agricole, purtroppo assai diffuse, sono la principale causa che predispone il suolo ai processi di erosione areale.

Per ciò che attiene alla pedologia, nell'area in esame vengono individuati paesaggi su calcari e dolomie paleozoici caratterizzati da rocce affioranti e suoli a profondità variabile nelle anfrattuosità della roccia, da mediamente a poco permeabili.

Queste aree sono inoltre caratterizzate da rocciosità e pietrosità elevate e da forte pericolo di erosione.

Nei paesaggi caratterizzati da scisti arenacei e da argilloscisti paleozoici vengono individuati suoli da poco a mediamente profondi, da franco sabbiosi ad argillosi con caratteristiche da permeabili a mediamente permeabili.

Sono aree con forme da aspre a sub-pianeggianti al di sotto degli 800-1000 m con scarsa copertura arbustiva e arborea.

Il quadro sopra descritto evidenzia che le zone idonee all'agricoltura praticamente interessano superfici modestissime. Ciò può essere messo in relazione sia alla natura pedologica stessa, per la presenza di suoli che non si adattano ad una agricoltura intensiva, sia a fenomeni di degradazione del suolo (incendi, erosione, eccesso di pascolo), per effetto

di un non corretto uso, che hanno determinato una diminuzione drastica della sua potenzialità.

Nel complesso, l'area è prevalentemente adibita ad attività di pascolo e modeste lavorazioni agricole; sebbene la natura praticamente impermeabile del substrato roccioso scistoso legato alla Formazione di Cabitza, abbia limitato fortemente la possibilità di attingimento acque dal sottosuolo mediante pozzo, questi ultimi risultano estremamente limitati ed, allo stato attuale, contaminati da carico organico antropico o specie metalliche in soluzione.

5.6.1 Caratteri generali dei suoli e loro classificazione

Per completare il quadro delle condizioni ambientali della zona vengono di seguito delineate le principali caratteristiche pedologiche, con riferimento alla classificazione della Carta dei Suoli della Sardegna.

Sono state individuate le seguenti unità cartografiche:

➤ *Unità cartografica n° 1*

Substrato: Paesaggi su Calcari e dolomie del paleozoico e relativi depositi di versante

Suoli predominanti: Lithic e typic xerorthents

Sono suoli che appartengono all'ordine degli Entisuoli; sono poco profondi in genere la profondità varia nelle anfrattuosità delle rocce, con caratteristiche da mediamente a poco permeabili. Sono suoli formati in clima mediterraneo a regime di umidità xerico. Queste aree sono inoltre caratterizzate da rocciosità e pietrosità elevate e da forte pericolo di erosione.

Notevole è il degrado della copertura vegetale, rappresentata da macchia mediterranea bassa e talora alta, ma principalmente da formazioni vegetali tipo gariga. Le colture sono scarse e limitate ad aree caratterizzate da particolari situazioni morfologiche. E' notevole il pascolo.

➤ *Unità cartografica n° 2*

Substrato: Paesaggi su metamorfiti (scisti, argilloscisti, arenarie ect.) del Paleozoico e relativi depositi di versante.

Suoli predominanti: Typic, Distrit, e Lithic Xerorthents.

Sono rappresentati suoli che appartengono all'ordine degli Entisuoli; sono poco profondi, formati in clima mediterraneo a regime xerico. Si presentano facilmente erodibili soprattutto dove all'asprezza del rilievo si aggiunge il degrado della copertura vegetale a causa degli incendi. Le colture più diffuse in questo tipo di suolo sono i seminativi, ma spesso prevale il pascolo.

➤ **Unità cartografica n° 3**

Substrato: Depositi alluvionali recenti.

Suoli predominanti: Typic, Aquic, Mollic Xerofluents.

Fanno parte degli Entosuoli e mostrano uno scarso sviluppo degli orizzonti diagnostici. Si sono formati su superfici pianeggianti in alluvioni recenti, esposte a inondazioni per la vicinanza di alvei fluviali. Hanno buona permeabilità, sono in genere coltivati a frutteti e orti, sono sede di pascolamenti.

5.7 Analisi multitemporale del paesaggio del distretto minerario di Monteponi.

L'analisi dei cambiamenti temporali del bacino minerario è stata eseguita con tecniche di fotointerpretazione di foto aeree per gli anni 1955, 1977 e di ortofoto digitali AGEA per il 1998 (Zavattero et al.). Grazie all'attività mineraria il territorio in esame si è trasformato moltissimo dagli anni '50 ad oggi. In particolare nel primo ventennio, dal 1955 al 1977 si è avuta una trasformazione del territorio con un tasso di trasformazione pari a quasi il 50%, con un notevole aumento di discariche minerarie e di bacini di decantazione a scapito delle aree boscate. Contestualmente si è avuto un notevole accrescimento del nucleo urbano di Iglesias e della rete stradale ad esso connessa. Nel ventennio successivo invece (1977 – 1997), il tasso di cambiamento è aumentato fino al 53,8%, con un notevole incremento anche in questo caso delle aree a destinazione mineraria (prevalentemente edifici minerari) e delle aree destinate alle infrastrutture. In contemporanea si è avuto un notevole decremento dei boschi di sughera ed un cambiamento radicale delle aree agricole, soprattutto a causa dell'espansione del centro urbano. Allo stesso tempo con la dismissione di alcune miniere ultimamente si è registrato l'aumento della macchia mediterranea. Questo è avvenuto grazie al fatto che la gariga è una specie vegetale molto resistente alla presenza di inquinamento da metalli pesanti, a differenza di altre specie che nell'area non

hanno trovato il loro habitat naturale. Va detto che buona parte dei tentativi di rimboschimento (che nelle intenzioni avrebbero dovuto portare ad un incremento della produttività di legname e al ripristino ambientale) non andò a buon fine soprattutto a causa della vicinanza delle acque inquinanti provenienti dai vicini bacini di decantazione. Per tale motivo le aree destinate alla piantumazione delle pinete artificiali vennero dapprima annesse ai preesistenti bacini di decantazione e successivamente (alla dismissione di quest'ultimi) ricolonizzate dalla macchia mediterranea. Nella figura sottostante sono schematicamente rappresentati le percentuali dei cambiamenti intervenuti nel territorio in esame dal 1955 al 1998 rispetto all'uso del suolo.

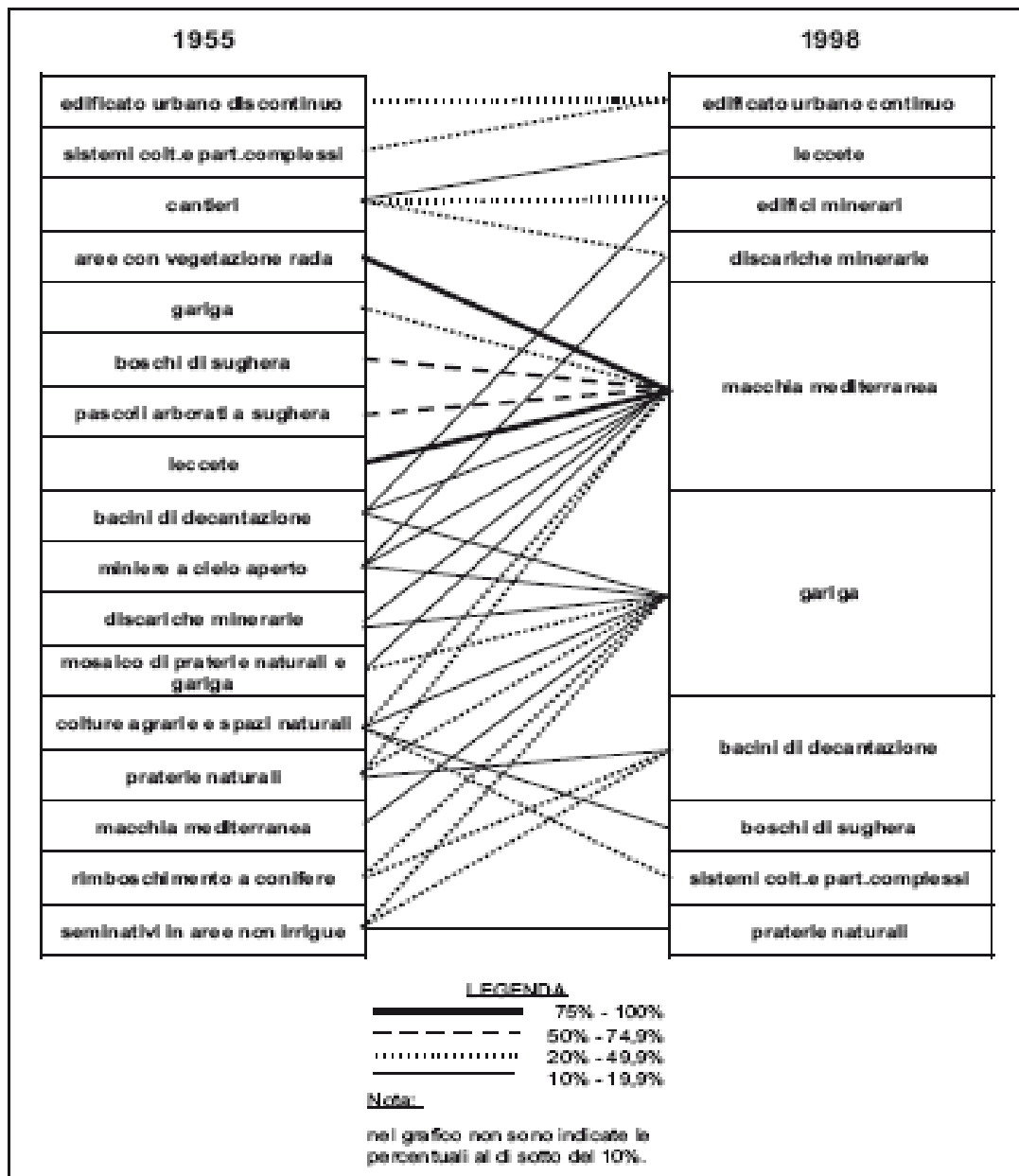


Figura 15: Schema riassuntivo relative alle trasformazioni di copertura del suolo tra il 1955 e il 1998 nell'area mineraria di Montepioni. (da Rivista Italiana di Telerilevamento - 2006, 37: 137-146, Zavattero et altri)

Capitolo 6 - ANALISI DELLE ACQUE

6.1 Descrizione captazioni

Il monitoraggio delle acque di miniera ha permesso di individuare e di edurre dall'acquifero anche acque potabili nella zona. Nel seguito sono riportate le descrizioni relative alle captazioni di acque potabili effettuate dalla società ABBANOVA nella zona con i dati relativi all'emungimento ed alle analisi chimiche effettuate.

6.2 Cuccuru Tiria

La captazione di Cuccuru Tiria si trova circa 3,5 Km a NE di Iglesias in corrispondenza dell'omonima grotta; essa fa parte di un complesso sistema di cavità carsiche, sviluppatesi nelle rocce calcareo-dolomitiche della Formazione di Gonnese, tra loro interconnesse tramite condotti ipogei più o meno stretti.

La grotta di Cuccuru Tiria, esplorata per circa 1 Km, ha un andamento pressoché orizzontale, e partendo da una quota di ingresso a circa 187 m si sviluppa in stretti cunicoli che si alternano ad ampi cameroni.

E' stato accertato il collegamento della grotta di Cuccuru Tiria con le grotte VI° e IX° di Corongiu de Mari, e con la Grotta del Lago. E' inoltre molto probabile il collegamento con la Grotta del Cannello, la Grotta di Pizz'e Crobis e la Grotta del Torpado. La Grotta della Radice pare invece essere un ramo fossile e ora separato del complesso della grotta di Cuccuru Tiria (Forti P. e Perna G. 1982).

Questo complesso sistema carsico si sviluppa essenzialmente in direzione N-S, come le principali direttrici strutturali dell'Iglesiente.

Il massiccio calcareo-dolomitico del Monte Marganai rappresenta una abbondante fonte di alimentazione per questo sistema, e infatti all'interno della grotta di Cuccuru Tiria si rileva un torrente permanente che scorre a una quota di circa 170 m.

Nel suo percorso, il torrente, dopo una stretta spaccatura, incontra una cascata, a valle della quale l'acqua scompare in un inghiottitoio.

Per valutare la portata del torrente, l'E.S.A.F. (Ente Sardo Acquedotti e Fognature) nel 1983 ha costruito e tarato uno stramazzo, immediatamente a monte della cascata, caratterizzato però da un limite massimo di soli 50 l/s.

Le misure effettuate in diversi periodi dell'anno e per alcuni anni hanno evidenziato una portata minima di 15 l/s il 15/3/89, anno particolarmente siccitoso. Una misura eseguita dopo soli 11 giorni, ma preceduta da alcuni giorni di pioggia ha però dato una portata di 21 l/s, dimostrando come questo sistema risente in tempi molto brevi delle precipitazioni piovose.

MISURE DI PORTATA TORRENTE (E.S.A.F.)

Data	Portata l/s	Note
27/10/83	18,5	
2/11/83	18,5	
12/11/83	46	abbondanti piogge nei giorni precedenti
10/6/84	46	superiore al limite dello stramazzo
17/6/84	45,6	
8/7/84	38,8	
10/7/84	38	
15/3/89	15	
26/3/89	21	piogge nei giorni precedenti

La portata massima può invece essere stimata soltanto in maniera induttiva. Lo stramazzo è infatti posto a valle di uno stretto cunicolo, lungo circa 30m, le cui dimensioni sono di circa 2 m di altezza e 1 m di larghezza. Una spaccatura di queste dimensioni, in periodi di piena, sarebbe in grado di smaltire almeno 150-200 l/s, ma talvolta dalla spaccatura non riesce a defluire tutta l'acqua del condotto carsico.

Questo fatto è testimoniato dalla colorazione scura della parte terminale delle stalattiti presenti nel camerone a monte del condotto.

Questa colorazione indica infatti che in alcuni periodi l'acqua non riesce a essere smaltita dalla spaccatura, e per ciò il livello nel camerone sale fino ad arrivare alle stalattiti.

Si può dunque affermare che il torrente di Cuccuru Tiria è in grado di assicurare una portata media annua di 50-60 l/s, con portate che in periodi di magra non sono inferiori ai 15-18 l/s e in periodi di piena possono superare i 150-200 l/s.

In regime di piovosità normale, il torrente non ha punti di risorgenza, e solo in periodi particolarmente piovosi il livello dell'acqua si solleva tanto da poter raggiungere due paleosorgenti da cui può temporaneamente emergere l'acqua.

Questa manifestazione torrentizia sembra però rappresentare solo una parte della potenzialità idrica del Marganai, e per ciò si suppone che la maggior parte della circolazione idrica sotterranea dell'area si svolga al di sotto dell'area occupata dalle grotte. A questo proposito Civita et alii(1983) hanno individuato nell'area di Cuccuru Tiria due cicli carsici sovrapposti e concatenati; il primo va riferito al Mesozoico-Terziario, e si sviluppa in profondità a quota intorno ai 150 m s.l.m., se non inferiore. Il secondo, riferito al Plio-Quaternario, è invece caratterizzato da un livello di base posto a 170 m s.l.m. che rappresenta il livello di base del torrente. I due sistemi sono interconnessi da condotti molto ristretti, e danno così luogo a una circolazione ad acquiferi sovrapposti. Pertanto l'acqua che giunge nell'inghiottitoio a valle della cascata va ad alimentare la falda posta a circa 150 m s.l.m..

In seguito a questa considerazione l'E.S.A.F. ha deciso di captare l'acqua direttamente dalla falda più profonda, realizzando nel periodo tra Marzo 1983 e Settembre 1983 quattro pozzi che si sono spinti sino a quota 120m s.l.m. penetrando per oltre 30 m nella falda freatica permanente.

Questi pozzi non sono però poi risultati idonei per sfruttare la risorsa sotterranea, poiché durante le prove di portata si ebbero frequenti inconvenienti per la notevole presenza di limi rossi, il che rese impossibile l'attuazione del progetto di approvvigionamento per mezzo di pozzi, con emungimento sotto falda.

In seguito a questo risultato negativo si è esclusa l'area di Cuccuru Tiria da tutti i progetti di captazione dell'Iglesiente, e solo successivamente si è ipotizzata una nuova e differente captazione di questa risorsa.

Si è per ciò deciso di captare le acque più superficiali che scorrono nel torrente, e si è perforato un pozzo che va a pescare immediatamente a valle della cascata. Nel pozzo passano 4 pompe in grado di eurre le seguenti quantità d'acqua:

- pompa 1 = 40 l/s
- pompa 2 = 20 l/s
- pompa 3 = 20 l/s
- pompa 4 = 40 l/s

L'azione di queste pompe è regolata da un lettore ottico che misura il livello delle acque presenti a valle della cascata. Il lettore fa in modo che le pompe lavorino a pieno regime nei periodi di abbondanza idrica, e le spegne automaticamente quando il livello cala esageratamente.

Le acque di Cuccuru Tiria sono recapitate presso i serbatoi di Monte Altai, dai quali vengono poi utilizzate per soddisfare parte delle necessità idriche di Iglesias.

6.2.1 Domusnovas

L'area attorno a Domusnovas è particolarmente interessante dal punto di vista geologico e idrogeologico. Essa è infatti caratterizzata da un buon numero di sorgenti, talora con caratteri tra loro notevolmente differenti.

L'area inoltre si presenta geologicamente complessa a causa degli intensissimi fenomeni carsici che l'hanno rimodellata e dei fenomeni tettonici che hanno fortemente condizionato la struttura idrogeologica della stessa.

In questo contesto hanno funzione di acquifero altamente permeabile i calcari e le dolomie della Formazione di Gonnesa, che caratterizzano la quasi totalità del Monte Acqua, ai piedi del quale è situata la più importante sorgente di quest'area (sorgente di S. Giovanni).

Le litologie di quest'area sono state fortemente deformate nelle varie fasi dell'orogenesi ercinica, e infatti l'area è caratterizzata da frequenti faglie, diaclasi e sovrascorrimenti.

Una prima ma isolata misura di portata è stata effettuata il 29/9/1927, nell'ambito di un monitoraggio complessivo di tutte le sorgenti della Sardegna; in questa occasione si era rilevata una portata di 151 l/s, a dimostrare l'abbondanza di questa risorsa.

Il primo studio accurato di questo sistema è stato effettuato da Barbieri (1993), che ha tra l'altro monitorato le portate di efflusso delle principali sorgenti dell'area.

Sono così state acquisite le portate della principali sorgenti nei seguenti intervalli di tempo:

- S. Giovanni: dal 21/4/90 al 2/5/91
- S'Acqua Callenti: dal 21/2/91 al 2/5/91
- Gutturreddu: dal 28/3/91 al 2/5/91

Questo studio ha messo in evidenza due gruppi distinti di sorgenti, alimentati da circuiti carsici nettamente distinti: il primo comprende le due sorgenti di S. Giovanni e gran parte delle sorgenti minori, il secondo le sorgenti di S'Acqua Callenti, Gutturreddu e alcune sorgenti minori a simile chimismo e termalità.

Per il primo sistema sono state stimate una portata media di 145,5 l/s, e una temperatura media di 15°-16°C. Questo sistema è caratterizzato da un basso tempo di risposta alle precipitazioni, da un alto indice di variabilità e da acque non termali.

Nel secondo si sono registrate una portata media di 36,8 l/s, e una temperatura media di 20°-22°C. Questo sistema è al contrario caratterizzato da un basso tempo di risposta alle precipitazioni, da un basso indice di variabilità e da acque termali, tutti caratteri che fanno supporre una circolazione piuttosto profonda per le acque che alimentano questo sistema.

Questo studio ha inoltre stimato per la sorgente di S.Giovanni un volume delle risorse sotterranee nettamente inferiore al volume di immagazzinamento calcolato tramite la curva di esaurimento della sorgente, a testimoniare che il reale bacino idrogeologico è molto maggiore del bacino imbrifero del Rio S.Giovanni.

Nel periodo seguente a questo studio il monitoraggio delle acque è venuto nuovamente a mancare, e solo nel Gennaio del 2000 sono stati posti dei contatori a monitorare le quantità d'acqua prelevate e immesse nelle diverse condotte.

Tra le varie risorse ubicate nei pressi di Domusnovas, la più abbondante e conseguentemente più usata è senza dubbio la sorgente di S. Giovanni, captata tramite due adiacenti opere di presa: la prima realizzata nel 1927 per l'approvvigionamento idrico della città di Cagliari, la seconda costruita per le esigenze idriche degli impianti delle Ferrovie dello Stato.

L'impianto del Comune di Cagliari è alimentato da un'ampia cavità naturale impostata sui calcari cambrici, dalla quale sgorga l'acqua; di fronte alla cavità vi è una camera di presa di circa 1 m di larghezza e 1,70 m di lunghezza, al termine della quale si trova una camera di calma, disposta perpendicolarmente ad essa, di circa 11 m per 1,80 m. Alla destra di questa camera è situato lo sfioro del troppo pieno, che è attualmente utilizzato per integrare le acque che gli altri impianti emungono per soddisfare l'elevato fabbisogno idrico di Iglesias.

Infatti sino agli anni '90 non si captavano le morbide della sorgente, che venivano scaricate nell'alveo del Rio S. Giovanni.

In seguito al sempre maggiore deficit idrico che colpiva soprattutto l'area di Iglesias si è deciso di utilizzare anche questa risorsa tramite la costruzione di un nuovo acquedotto che convoglia le morbide della sorgente di S. Giovanni al serbatoio di Monte Altai caratterizzato da una capacità di 5000 litri.

Quest'impianto è costituito schematicamente da:

- opera di presa.
- condotta premente
- vasca di carico
- condotta di avvicinamento al serbatoio di Monte Altai
- impianto di sollevamento
- condotta premente dal serbatoio di Monte Altai all'impianto di potabilizzazione
- impianto di potabilizzazione

L'opera di presa consiste in un manufatto in calcestruzzo cementizio armato, costituito da una parte interrata che comprende vasca di colma (3x6,35 m) e vasca di accumulo (10,2x3,3 m), e da una parte fuori terra comprendente sala pompe e cabina elettrica. Nella sala pompe sono ubicate 4 pompe ad asse verticale di cui una di riserva della portata di 33 l/s ciascuna, in modo da poter emungere a pieno regime una portata complessiva di quasi 100 l/s.

La condotta premente è in ghisa sferoidale del diametro di 400 mm, è lunga 971 m e collega l'opera di presa con la vasca di carico (5x5 m), ubicata a fianco di una stradina tra Punta Perd'e Cerbu e Genna Caboni a quota 300 m.

Anche la condotta di avvicinamento è in ghisa sferoidale del diametro di 400 mm. Questa è lunga 8520 m, e partendo dalla vasca di carico arriva sino al serbatoio di Monte Altai, al quale è collegato un impianto di sollevamento.

Quest'impianto permette di immettere le acque che si presentano particolarmente torbide e fangose nell'impianto di potabilizzazione o nell'invaso artificiale di Punta Gennarta, e permette inoltre di convogliare a Punta Gennarta le acque in eccedenza.

L'impianto di sollevamento è costituito da 4 elettropompe centrifughe ad asse orizzontale (3 in esercizio e una di riserva) della portata complessiva di 100 l/s.

Il serbatoio di Monte Altai e l'impianto di potabilizzazione sono collegati tramite una condotta in ghisa sferoidale del diametro di 350 mm, lunga 1106 m, che dalla quota di 278,5 m arriva a quota 330 m.

Questa ulteriore integrazione d'acqua a beneficio del Comune di Iglesias, anche se importante, non ha naturalmente risolto il cronico problema idrico di quest'area, anche perché questa ulteriore fonte è mediamente disponibile per solo 4 mesi all'anno e viene naturalmente a mancare nei mesi più aridi.

La quantità d'acqua inviata a Monte Altai tramite quest'impianto viene calcolata dall'E.S.A.F. dal 1/3/99, tramite l'istituzione di contatori presso le quattro pompe precedentemente menzionate.

Oltre a questo periodico recapito, la sorgente di S. Giovanni garantisce un continuo apporto per lo stesso comune di Iglesias, per le Ferrovie di Stato e per i comuni di Domusnovas e Siliqua.

Infatti dal 1992 il Comune di Domusnovas si è impegnato a erogare a favore del Comune di Iglesias 11,25 l/s che vanno ad aggiungersi alle quantità erogate per le altre utenze.

Quest'erogazione è stata poi ulteriormente integrata nel Gennaio 2000, quando dalla condotta delle Ferrovie dello Stato è stata derivata un'altra piccola condotta, tramite la

quale vengono prelevati costantemente 4 l/s a integrare ulteriormente l'approvvigionamento idrico di Iglesias.

L'opera di presa delle Ferrovie di Stato è situata in adiacenza all'opera di presa comunale precedentemente descritta, e si sviluppa per circa 14 m parallelamente alla parete rocciosa.

Lungo questa parete si trova l'emergenza sorgentizia che confluisce in una vasca di decantazione a cui seguono altre due vasche di decantazione e di calma. La camera di derivazione è situata all'ingresso dell'opera di presa, e da essa si sviluppa la condotta di adduzione, in acciaio del diametro di 200 mm. Essa si riallaccia all'altezza della stazione di Villamassargia al tracciato ferroviario, fino alla stazione di Cagliari. Lo scarico del troppo pieno è realizzato con due tubazioni in materiale plastico del diametro di 200 mm.

In questi anni questa sorgente ha mediamente fornito una portata di circa 15 l/s. Attualmente essa fornisce circa 20 l/s, ma a causa della recente derivazione per Iglesias le Ferrovie di Stato usufruiscono al momento di circa 16 l/s.

La condotta che va ad alimentare i centri abitati di Domusnovas e Siliqua, si sviluppa invece dall'impianto del Comune di Cagliari.

Le acque destinate ai due comuni confluiscono inizialmente in un'unica condotta che poi si biforca per poter condurre le acque sino a Siliqua.

La quantità massima d'acqua che l'impianto può inviare ai due comuni è di circa 75 l/s. Sfortunatamente solo dal Gennaio 2000 tramite la lettura di contatori idrici si può stimare la quantità d'acqua inviata ai due comuni, che è piuttosto variabile nei diversi periodi dell'anno.

A causa del cronico deficit idrico che caratterizza soprattutto l'area di Iglesias si sta attualmente valutando la possibilità di approvvigionare il Comune di Siliqua tramite l'acquedotto intercomunale di "Villacidro", per poter poi dirottare ad Iglesias le acque che attualmente vengono captate per Siliqua.

In sintesi le sorgenti di S. Giovanni forniscono le seguenti quantità d'acqua:

- 20 l/s dalla scaturigine presso l'impianto delle Ferrovie dello Stato, di cui 4 l/s recapitati a Iglesias
- 11 l/s recapitati costantemente a Iglesias dall'impianto del Comune di Cagliari

- una quantità variabile che può arrivare sino a 75 l/s recapitati a Domusnovas e Siliqua dall'impianto del Comune di Cagliari
- un massimo di 100 l/s che possono essere recapitati a Monte Altai nei periodi più piovosi.

Questi dati sono confermati dalle letture dei contatori effettuate durante l'anno di riferimento.

DATA	11/1/00	17/1/00	24/1/00	31/1/00	7/2/00
STAZIONE	PORTATE (l/s)				
FF.SS	21				
IGLESIAS	11	11	11	11	11
DOMUSNOVAS	25	22	22	22	22
SILIQUA	30	27	23	23	23

Tabella 25: Dati di portata (l/s) relativi alle stazioni del Sulcis nell'anno 2000.

L'attuale istituzione dei contatori non permette però di stimare esattamente la portata delle sorgente in tutti i periodi dell'anno, poiché essi non misurano l'entità dello "sfioro".

Dato che questa quantità d'acqua viene captata, si potrebbe valutare l'entità dello sfioro tramite la quantità d'acqua emunta da Abbanoa (allora ESAF).

Però le condotte che sfruttano queste acque non possono trasportare più di 100 l/s, e pertanto quando lo sfioro supera i 100 l/s è impossibile valutare la portata della sorgente senza fare una classica misura di portata presso la camera di presa.

Perciò il 5 Gennaio 2000 dalle 10,30 alle 12 è stata misurata la portata della sorgente tramite mulinello idraulico. Per far ciò sono state eseguite 2 misure di velocità dell'acqua in 30 punti individuati all'interno di una sezione larga 99cm e alta 123cm.

La misurazione è stata condotta tramite un mulinello SIAP ME 4001 per il quale valgono le seguenti curve di taratura:

1) $V = 0.2523n + 0.011$ per $0.644 < n < 4.43$

2) $V = 0.2499n + 0.027$ per $4.43 < n < 14.148$

Dove:

$n =$ giri/sec.

$V =$ velocità in m/sec.

In questo caso si è rilevato un valore di $n = 0,509$ che è stato inserito nella prima equazione, anche se questo valore è leggermente inferiore al “range” di funzionamento ottimale dello strumento.

Tramite questa equazione si è ricavata, nella sezione studiata, una velocità media di 13,93 cm/sec che ha dato una portata di 169.7 l/s.

La misurazione è stata condotta in condizioni di assenza di precipitazioni, che sono state assenti anche la settimana precedente alla misurazione.

6.2.2 Monte Figu

Morfologicamente Monte Figu rappresenta un rilievo collinare costituito da rocce carbonatiche paleozoiche, che interrompe la monotona morfologia pianeggiante che caratterizza la piana del Cixerri.

Questo modesto rilievo si presenta praticamente allineato con i simili rilievi di Cuccuru Tiria, Guardia Su Merti e Monte Ollastu, secondo una direzione che rispecchia le principali direttrici tettoniche della zona.

Queste affinità hanno pertanto indotto a verificare se anche presso Monte Figu si potessero effettuare delle produttive captazioni.

Il primo intervento in questo senso è stata la perforazione dei pozzi M e O nell'ambito del Progetto Speciale 25/96 della Cassa del Mezzogiorno, avvenuta dal 23/11/83 al 2/2/84.

Le successive prove di portata hanno evidenziato caratteristiche piuttosto differenti per questi pozzi:

- il pozzo O è infatti caratterizzato da una mediocre trasmissività ($T= 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) e da una permeabilità media piuttosto bassa ($K= 0,015 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$).
- il pozzo M è invece caratterizzato da una buona trasmissività ($T= 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) e da una permeabilità maggiore di un'ordine di grandezza rispetto a quella del pozzo O.

Inoltre queste prove hanno evidenziato per il pozzo M un livello statico s.l.m. piuttosto costante, che nel mese di osservazione è rimasto costantemente tra 120,1 m e 120,2 m, mentre il pozzo O presentava un livello statico più variabile, essendo passato in un mese da 140 m a 138,6 m s.l.m..

Queste differenze sono anche testimoniate dalle stratigrafie dei due pozzi: infatti, mentre il pozzo M presenta, dopo gli iniziali materiali sciolti, una monotona presenza di dolomia calcarea, il pozzo O ha una stratigrafia molto più varia, caratterizzata dalla irregolare sequenza di vari tipi di calcari e dolomie calcaree.

Tutti questi aspetti determinano naturalmente la produttività dei pozzi, e infatti è stata stimata una portata di esercizio ottimale di 20 l/s per il pozzo M, e di 5 l/s per il pozzo O.

6.2.3 Guardia su Merti

Morfologicamente questo rilievo ha caratteristiche molto simili a Monte Figù, e come Monte Figù è stato storicamente oggetto di captazione.

Perciò nel 1979 è stata effettuata la perforazione di quattro pozzi (denominati 1, 2, 2-bis e 3) e successivamente, nei mesi di Dicembre 1979 e Febbraio 1980, sono state effettuate le prove di emungimento sui pozzi 1, 2-bis e 3, dirette dal dipartimento di ingegneria del territorio della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari.

Durante le prove di emungimento le variazioni dei livelli piezometrici dei tre pozzi sono state costantemente monitorate tramite idrometrografi, e si è così riscontrato che esiste una certa influenza tra i pozzi 2-bis e 3, mentre il livello del pozzo 1 non è influenzato dall'emungimento degli altri due.

Si è inoltre stabilito che il livello dei pozzi 2-bis e 3 cresce rapidamente in seguito a precipitazioni, mentre il livello del pozzo 1 è scarsamente influenzato dalle stesse.

Ciò dimostra che i pozzi sono alimentati da differenti acquiferi, e che il bacino che alimenta il pozzo 1 è molto più vasto di quello che alimenta i pozzi 2-bis e 3.

Pertanto si era stimata per i pozzi 2-bis e 3 una portata complessiva di esercizio di 1,5 l/s, mentre per il pozzo 1 si era considerata una capacità produttiva di almeno 10 l/s.

6.2.4 Campo Pisano

Gli impianti di Campo Pisano sono ubicati circa 2 Km a est di Monteponi e circa 1 Km a ovest dell'anticlinale arenacea di Genna Luas che delimita occidentalmente la piana del Cixerri, e rappresenta un importante soglia di permeabilità.

Dal punto di vista tettonico l'area di Campo Pisano è particolarmente complessa a causa dell'interferenza tra la sinclinale di Iglesias, ad asse E-W, e l'anticlinale di Genna Luas ad asse N-S.

Questa struttura è la causa principale per cui le acque di Campo Pisano, pur avendo sempre notevolmente risentito degli abbassamenti indotti dal pompaggio di Monteponi, sono state interessate piuttosto marginalmente dalla contaminazione del cloro.

Il collegamento tra questi due sistemi è apparso evidente fin dal 1889, quando durante lo scavo della galleria di scolo venne attraversata la Gran Sorgente; in seguito a questo evento si ebbe infatti anche un notevole abbassamento della piezometrica a Campo Pisano, che passò da +63 m a +14 m.

La bassa contaminazione chimica ha nel tempo portato a utilizzare abbondantemente le acque di Campo Pisano secondo diverse modalità.

Infatti, dal 1966 al 1989 queste acque sono state emunte per uso industriale, nell'ambito del trattamento dei minerali, e dei diversi usi di miniera.

In questi anni si è prelevata una quantità d'acqua costante pari a 91,4 l/s, e la qualità delle acque non ha subito particolari variazioni.

Nel 1989, a causa della cronica emergenza idrica, si è potenziato il pompaggio per soddisfare i fabbisogni idrici di Iglesias, e si è rapidamente riscontrato un depauperamento delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque, testimoniato soprattutto dall'aumento

della concentrazione di cloro. Pertanto, terminata l'emergenza idrica, è stato ridotto il pompaggio, e si sono ristabilite le condizioni chimico-fisiche di partenza.

Però, in seguito alla problematica situazione idrica che riguardava soprattutto il comune di Iglesias, si è deciso di riprendere l'emungimento forzato a partire dal 1995. Pertanto dal 1995 al 1997 sono state edotte portate medie di quasi 200 l/s, con punte di oltre 250 l/s.

Questo gran incremento del pompaggio ha determinato l'estensione del raggio di influenza verso le aree più contaminate, determinando un decadimento della qualità dell'acqua. L'emungimento è poi proseguito sino al mese di Marzo del 1999 anche se con portate medie nell'ordine dei 30 l/s. Anche in questo caso il tenore in cloro è un ottimo indice del depauperamento delle acque, e infatti tra il 1995 e il 1998 esso è passato da poco più di 150 mg/l a più di 400 mg/l.

L'emungimento delle acque di Campo Pisano è stato per lungo tempo garantito da un impianto strutturato in due salti, e solo recentemente, in seguito alla risalita della falda determinata dalla sospensione del pompaggio a Monteponi, è stato realizzato un nuovo impianto che consta di un'unica stazione di sollevamento.

Il primo impianto era costituito da quattro pompe sommerse con portata di 65 l/s ciascuna, calate all'interno di pozzi di 300 mm di diametro, che raggiungono la quota di -200m.

L'acqua, captata direttamente dalla falda veniva poi inviata con tubazioni di diametro di 150 mm a un bacino di ripresa a quota -65 m.

Questo bacino alimentava le pompe, che tramite un secondo salto, inviavano l'acqua fino ai bacini esterni a quota a quota +224 m .

Nel nuovo impianto sono state invece disattivate le quattro pompe che raggiungevano quota -200 m, e pertanto le acque vengono captate tramite una serie di pompe sommerse calate nel pozzo 2 .

L'esecuzione di diverse prove di portata e l'analisi dei dati relativi alle variazioni piezometriche della falda in seguito all'emungimento hanno permesso di determinare con una certa precisione i parametri idrodinamici e le caratteristiche idrogeologiche del sub-bacino di Campo Pisano. Sono stati per così stimati i seguenti valori:

Tramissività : $T=7,48 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

Coefficiente di immagazzinamento: $S=6,5 \%$

Una delle prove più dettagliate e significative è quella che è stata realizzata nel pozzo n° 4, ubicato in prossimità della rampa di servizio di Campo Pisano, tramite 4 gradini di portata della durata di 3-4 ore ciascuno. Da questa prova si deduce che l'acquifero è fortemente alimentato, e per ciò rappresenta un'importante risorsa idrica.

La grande ricettività idrica, e la complessa situazione geologico-strutturale di quest'area sono i motivi fondamentali per cui, nonostante l'abbondante sfruttamento di questa risorsa così vicina a un'area geochimicamente degradata come quella di Monteponi, le acque di Campo Pisano hanno avuto nel tempo un degrado chimico particolarmente limitato.

6.3 Dati relativi alle portate medie annue di acqua potabile edotte dall'acquifero.

Nella tabella seguente si riassumono i dati medi relativi alle portate edotte annue nel 2006 (società Abbanoa, ente gestore delle acque in Sardegna).

SORGENTI	Località servite (m³)	m³	portate medie l/s
MINIERA CAMPO PISANO		2.023.616	64
SORGENTI "4 STAGIONI"		441.504	14
POZZI "CUCCURU TIRIA"		608.067	19
POZZI MONTE FIGU		343.748	11
SORGENTE "S.GIOVANNI DOMUSNOVAS"		622.001	20
SORGENTE "GUTUREDDU DOMUSNOVAS"			
	<i>Iglesias</i>	233.802	7
	<i>Musei</i>	345.701	
		579.503	
SORGENTE "CAPUT ACQUAS"			
	<i>Iglesias</i>	1.205.193	38
	<i>Villamassargia</i>	123.945	
	<i>Corongiu - Barega</i>	157.680	
		1.486.818	
SORGENTE "ORBAI"			
	<i>Villamassargia</i>	345.947	
	<i>Monte Cadelano - MONTE Gioioso</i>	32.000	
		377.947	
		6.483.204	
totale portata Iglesias e frazioni		5.477.931	174

Tabella 26: Dati medi relativi alle portate edotte annue nel 2006.

Di sotto sono riportati i dati relativi ai volumi d'acqua potabile immessi nella rete idrica per servire Iglesias e le frazioni (dati relativi all'anno 2006).

COMPUTO VOLUMI ACQUA IMMESSA IN RETE		2006		
ACQUEDOTTO IGLESIAS				
SERBATOIO	m ³	m ³ /g	m ³ /h	l/sec
MONTE ALTARI (Iglesias)	3.401.700	9319,73	388,32	107,87
CRUCCUEDDU (Iglesias)	1.189.273	3258,28	135,76	37,71
CAPELLACCI (Iglesias)	111.526	305,55	12,73	3,54
MONTE FIGU (Iglesias)*	24.443	66,97	2,79	0,78
sommano capoluogo	4.726.942			
NEBIDA	112.050	306,99	12,79	3,55
BINDUA-M.AGRUXIAU-S.GIOVANNI MINIERA	44.082	120,77	5,03	1,40
FORANEA X NEBIDA + OSP. CROBU	131.695	360,81	15,03	4,18
sommano	287.827			
<i>sommano da acquedotto Iglesias</i>	5.014.769			
alimentazioni indipendenti				
S. BENEDETTO	24.083	65,98	2,75	0,76
MUSEI	282.630	774,33	32,26	8,96
VILLAMASSARGIA	469.892	1287,38	53,64	14,90
FORANEA/BAREGA	155.880	427,07	17,79	4,94
CORONGIU	1.800	4,93	0,21	0,06
MONTE CADELANO / MONTE GIOIOSO	32.000	87,67	3,65	1,01
	5.981.054			
* serbatoio in disuso dal marzo del 2006				

Tabella 27: Computo dei volumi totali immessi nella rete idrica cittadina relativi all'annualità 2006 (ABBANO spa).

Rilevamento portate e livelli pozzi Caput Acquas , Monte Figu e Cuccuru Tiria

Località	Caput Acquas							
Data	Pozzo 2	Pozzo 2	Pozzo 3	Pozzo 3	Pozzo 5	Pozzo 5	Pozzo 7	Pozzo 7
	portata l/s	livello mt	portata l/s	livello mt	portata l/s	livello mt	portata l/s	livello mt
09/07/2006	18	1,9	17	1,96	17	41,1	fermo	
10/09/2006	19	1,86	18	1,94	19	43,01	5,5	
22/10/2006	18,5	1,88	19	1,96	19	42,02	4,7	
17/12/2006	17	1,83	16	1,95	19	40,15	5	
28/01/2007	18	1,83	19	1,93	19	42,15	fermo	
15/02/2007	18	1,8	fermo		19	40,1	5	
05/03/2007	fermo	1,5	fermo	1,5	fermo	43,9	fermo	63,1
10/04/2007	fermo	1,5	fermo	1,5	fermo	43,9	fermo	63,1
20/05/2006	fermo	1,5	fermo	1,5	fermo	43,9	fermo	63,1
01/07/2007	18	1,86	19	1,96	19	43,9	5	

Tabella 28: Rilevamento portate e livelli pozzi Caput Acquas nel 2006 e nel 2007.

Località Monte Figu

Data	Pozzo 1	Pozzo1
	portata l/s	livello m
09/07/2006	14	44,16
10/09/2006	14	44,01
22/10/2006	14	43,2
17/12/2006	12	42,03
08/01/2007	14	44,18
15/02/2007	14	44,15
05/03/2007	13	43,04
10/04/2007	14	44,23
20/05/2007	14	44,2
01/07/2007	14	44,18

Tabella 29: Rilevamento portate e livelli pozzi Monte Figu nel 2006 e nel 2007

Località CuccuruTiria

Data	Sorgente
	portata l/s
09/07/2006	19
10/09/2006	13,5
22/10/2006	14
17/12/2006	13
08/01/2007	12
15/02/2007	20,3
05/02/2007	27,3
10/04/2007	25,7
20/05/2007	30,8

Tabella 30: Rilevamento portate e livelli pozzi Cuccuru Tiria nel 2006 e nel 2007.

6.4 Chimismo delle acque.

Le tabelle che seguono riportano i dati relativi al chimismo delle acque per l'anno 2007. I dati sono stati elaborati in parte dai laboratori dell'Università di Cagliari, in parte dai laboratori IGEA e alcuni dai laboratori dell'Hydrocontrol. Srl.

università			2-mag-07
PARAMETRO	C.M.A	U.M.	usc.vasche
Torbidità	1,00	NTU	0,440
Calcio		mg/l	84,330
Magnesio		mg/l	49,740
Sodio	200	mg/l	73,240
Alluminio	0,20	mg/l	0,010
Durezza Totale	°F	mg/l	41,500
Residuo Fisso	1500	mg/l	
Conc. Ioni Idrogeno	9,50	pH	7,7
Conducibilità Elettrica	2500,00	µS/cm ²	1197,0
Cloruri	250,00	mg/l	170,980
Solfati	250,00	mg/l	132,270
Nitrati	50,00	mg/l	43,260
Nitriti	0,50	mg/l	0,350
Ammoniaca	0,50	mg/l	0,040
Ossidabilità	5,00	mg/l	1,440
Ferro	200,00	µg/l	78,0
Manganese	50,00	µg/l	<20,0
Rame	1000,00	µg/l	0,300
Arsenico	10,00	µg/l	<0,050
Cadmio	5,00	µg/l	1,000
Cromo	50,00	µg/l	0,200
Mercurio	1,00	µg/l	<0,010
Nichel	20,00	µg/l	0,200
Piombo	10,00	µg/l	5,400
Antimonio	10,00	µg/l	
Selenio	10,00	µg/l	<5,000
Vanadio	50,00	µg/l	0,800
Antiparassitari	0,10	µg/l	<100
Antiparassitari tot.	0,50	µg/l	<0,500
1,2 Dicloroetano	3,00	µg/l	<0,300
Tetracloroetilene	10,00	µg/l	1,510
Tricloroetilene	10,00	µg/l	<1000

Tabella 31: Analisi relative al chimismo delle acque per l'anno 2007, campionamenti effettuati all'uscita vasche di accumulo.

Comparazione fra metodiche per la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi.
Applicazione all'acquifero del Sulcis Iglesiente

università			10-gen-07	10-gen-07	10-gen-07	10-gen-07	22-gen-07	22-gen-07	22-gen-07	22-gen-07	20-mar-07	20-mar-07	20-mar-07
PARAMETRO	C.M. A	U.M.	usc.vasc he	pozzo 2	pozzo sella	p. T	usc.vasc he	pozzo 2	pozzo sella	pozzo T	usc.vasc he	pozzo 2	pozzo sella
Torbidità	1,00	NTU											
Calcio		mg/l											
Magnesio		mg/l											
Sodio	200	mg/l											
Alluminio	0,20	mg/l											
Durezza Totale	°F	mg/l											
Residuo Fisso	1500	mg/l											
Conc. Ioni Idrogeno	9,50	pH											
Conducibilità Elettrica	2500,00	µS/cm ²			□								
Cloruri	250,00	mg/l											
Solfati	250,00	mg/l											
Nitrati	50,00	mg/l	43,260	48,400	12,100	15,000	19,200	55,280	19,300	18,700	48,810	50,000	22,380
Nitriti	0,50	mg/l											
Ammoniaca	0,50	mg/l											
Ossidabilità	5,00	mg/l											
Ferro	200,00	µg/l			□								
Manganese	50,00	µg/l			□								
Rame	1000,00	µg/l			□								
Arsenico	10,00	µg/l			□								
Cadmio	5,00	µg/l	0,700	0,700	1,600	1,100	0,900	0,700	1,500	1,400	0,700	0,600	0,100
Cromo	50,00	µg/l											
Mercurio	1,00	µg/l	0,440	0,500	0,310	<0,010	0,280	0,360	0,200	0,200	<0,010	<0,010	<0,010
Nichel	20,00	µg/l											
Piombo	10,00	µg/l	6	6	35	30	4	4	35	31	4	4	29
Antimonio	10,00	µg/l											
Selenio	10,00	µg/l											
Vanadio	50,00	µg/l											

*Comparazione fra metodiche per la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi.
Applicazione all'acquifero del Sulcis Iglesiente*

università			10-gen-07	10-gen-07	10-gen-07	10-gen-07	22-gen-07	22-gen-07	22-gen-07	22-gen-07	20-mar-07	20-mar-07	20-mar-07
PARAMETRO	C.M. A	U.M.	usc.vasche	pozzo 2	pozzo sella	p. T	usc.vasche	pozzo 2	pozzo sella	pozzo T	usc.vasche	pozzo 2	pozzo sella
1,2 Dicloroetano	3,00	µg/l											
Tetracloroetilene	10,00	µg/l	3,030	1,250	<1,000	<1,000	<1,000	<1,000	<1,000	<1,000	11,110	11,080	3,000
Tricloroetilene	10,00	µg/l	<1,000	<1,000	<1,000	<1,000	<1,000	<1,000	<1,000	<1,000	<1,000	<1,000	<1,000

Tabella 32: Analisi chimiche sulle acque effettuate dai laboratori dell'Università di Cagliari nel primo trimestre 2007. Dati relativi sia all'uscita vasche che ai pozzi minerali.

**Rilevamento dati miniera campo pisano .Valori fuori norma.
Hyc=laboratori Hydrocontrol**

anno 2006

punto di campionamento	laboratorio	data	unità	tetracloroetilene	tricloroetilene	ferro	piombo
uscita vasca	università	06/03/2006	µg/l	<1,000	<1,000		
uscita vasca	università	09/05/2006	µg/l	<1,000	<1,000		
uscita vasca	università	13/07/2006	µg/l	15,800	<1000		
uscita vasca	università	19/07/2006	µg/l	9,750	<1,000	67	9
pozzo T	università	19/07/2006	µg/l	2,310	<1,000	59	90
pozzo sella	università	19/07/2006	µg/l	2,540	<1,000	78	22
pozzo 2	università	19/07/2006	µg/l	26,800	<1000	2500	168
pozzo T	università	27/07/2006	µg/l	0,000			41
pozzo T	hyc	27/07/2006	µg/l	<0,2	<0,2		31
pozzo 2	università	27/07/2006	µg/l	6,860			8
pozzo 2	hyc	27/07/2006	µg/l	1,050	0,31		27
pozzo 2 nuova quota	università	27/07/2006	µg/l	13,400			8
pozzo 2 nuova quota	hyc	27/07/2006	µg/l	1,290	0,39		28
pozzo sella	università	27/07/2006	µg/l	5,920			31

*Comparazione fra metodiche per la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi.
Applicazione all'acquifero del Sulcis Iglesiente*

punto di campionamento	laboratorio	data	unità	tetracloroetilene	tricloroetilene	ferro	piombo
pozzo sella	hyc	27/07/2006	µg/l	<0,2	<0,2		38
uscita vasca	università	27/07/2006	µg/l	6,940			10
uscita vasca	hyc	27/07/2006	µg/l	0,720	0,2		27
pozzo T	università	01/08/2006	µg/l	0,00			49
pozzo T	hyc	01/08/2006	µg/l	<0,2	<0,2		320
pozzo 2	università	01/08/2006	µg/l	6,340			840
pozzo 2	hyc	01/08/2006	µg/l	0,510	0,29		280
pozzo 2 nuova quota	università	01/08/2006	µg/l	2,500			8
pozzo 2 nuova quota	hyc	01/08/2006	µg/l	0,370	0,27		270
pozzo sella	università	01/08/2006	µg/l	0,000			49
pozzo sella	hyc	01/08/2006	µg/l	<0,200	<0,200		39
uscita vasca	università	01/08/2006	µg/l	5,700			7
uscita vasca	hyc	01/08/2006	µg/l	1,010	0,28		29
uscita vasca	hyc	08/08/2006	µg/l	0,400	<0,2		12
pozzo T	hyc	08/08/2006	µg/l	<0,2	<0,2		<6
pozzo sella	hyc	08/08/2006	µg/l	<0,2	<0,2		<6
pozzo 2	hyc	08/08/2006	µg/l	1,400	0,4		<6
pozzo sella	università	21/09/2006	µg/l	43,500	<1000		
pozzo 2	università	21/09/2006	µg/l	34,700			
pozzo sella	hyc	13/10/2006	µg/l				20
uscita vasca	hyc	13/10/2006	µg/l				14
pozzo 2	hyc	19/10/2006	µg/l				16
pozzo sella	hyc	19/10/2006	µg/l				17
pozzo T	hyc	19/10/2006	µg/l				20
uscita vasca	hyc	19/10/2006	µg/l				14

*Comparazione fra metodiche per la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi.
Applicazione all'acquifero del Sulcis Iglesiente*

punto di campionamento	laboratorio	data	unità	tetracloroetilene	tricloroetilene	ferro	piombo
uscita vasca	università	06/11/2006	µg/l	13,270			
pozzo T	università	22/11/2006	µg/l				40
pozzo 2	università	22/11/2006	µg/l	28,410			
uscita vasca	università	22/11/2006	µg/l	11,160			

Tabella 33: Analisi chimiche sulle acque effettuate da diversi laboratori analisi. Dati comparativi relativi ai dati di miniera.

6.4.1 Inquinamento da cloruri

Nella tabella successiva sono riportati i dati relativi all'inquinamento da cloruri di cui si è parlato nei capitoli precedenti.

anno	Pozzo Calligaris mg/l	Santa Margherita mg/l	Pozzo Sella mg/l	P. 2 mg/l	P.T mg/l	Pozzo Vittoria mg/l	Pozzo Carolina mg/l	Palmari mg/l	San Marco mg/l	Monte Onixeddu mg/l	Monte Scorra mg/l	Pozzo Hubert mg/l	Pozzo S.Luigi mg/l	Acquaresi mg/l
2004	148,91	392,00	163,1	145,37	198,19	350,79	354,06	135	102,19	512,74	183,74	219,83	35,46	
2005	85,09	139,73	148,91	148,91	156,01	326,2	290,74	232,91		850,96	181,46	226,92	49,64	
2006	163,1	380,50	134,73	135,2	140,5	326,2	261,1	148,52		499,5	181,28	174,19	56,73	49,64

Tabella 34: Dati relativi all'inquinamento da cloruri.

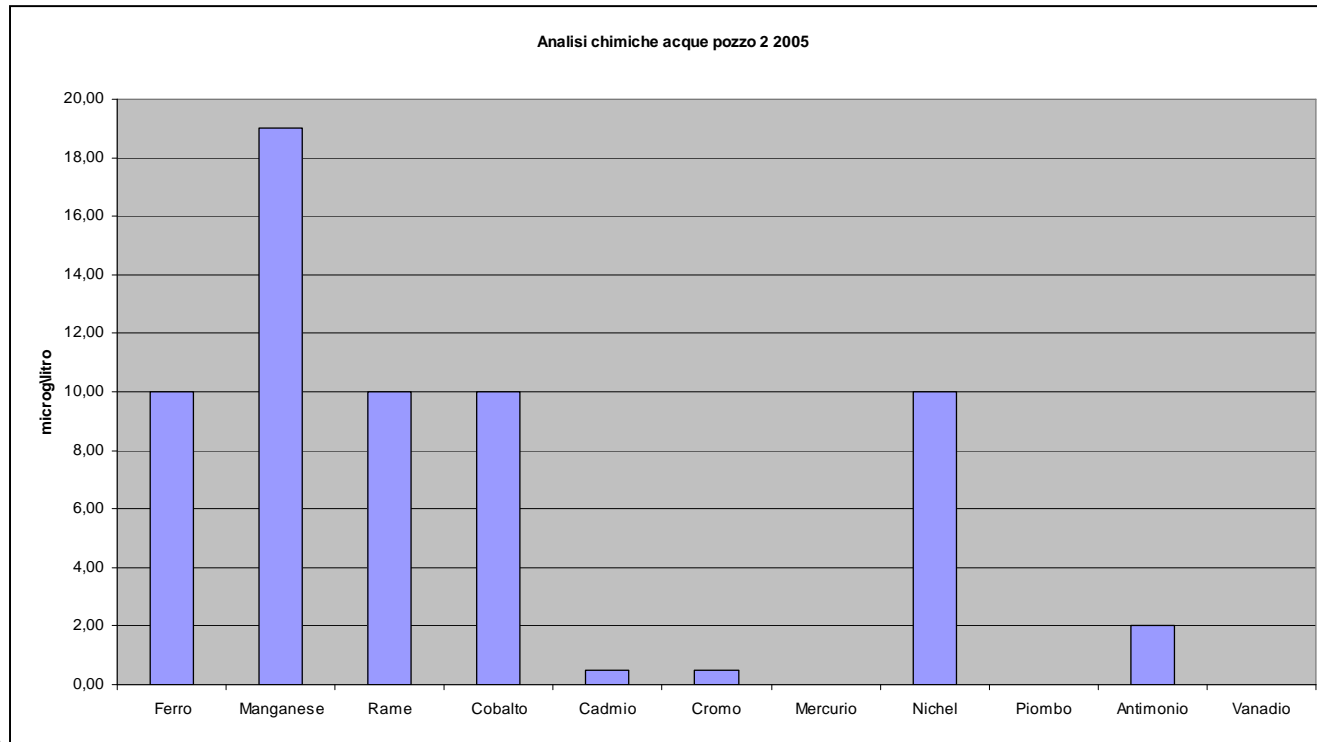


Figura 16 : Analisi chimiche relative ai metalli pesanti riscontrati nelle acque campionate al pozzo 2. (IGEA, 2005)

Con la risalita della falda si è verificata una diminuzione marcata degli ioni maggiori, di origine marina, ma non si è avuto un simile decremento per alcuni cationi metallici: Zn, Cd e Pb, la cui presenza dipende dal processo di interazione tra le acque e i solfuri in ambiente ossidante. Zn e Cd, insieme ai solfati, sono associati alla dissoluzione di blenda, mentre il piombo è associato con i solfati alla dissoluzione di galena. Dal grafico di fig.17 riportato sotto, relativo alle acque campionate nel 2007 e ai tenori di metalli pesanti come

piombo, cadmio e mercurio si vede chiaramente che i tenori di metalli pesanti sono molto più elevati nel pozzo Sella rispetto al pozzo 2 e all'uscita vasche. Il contenuto di questi metalli, espresso in $\mu\text{g}/\text{l}$, aumenta al diminuire della distanza delle captazioni dalla miniera.

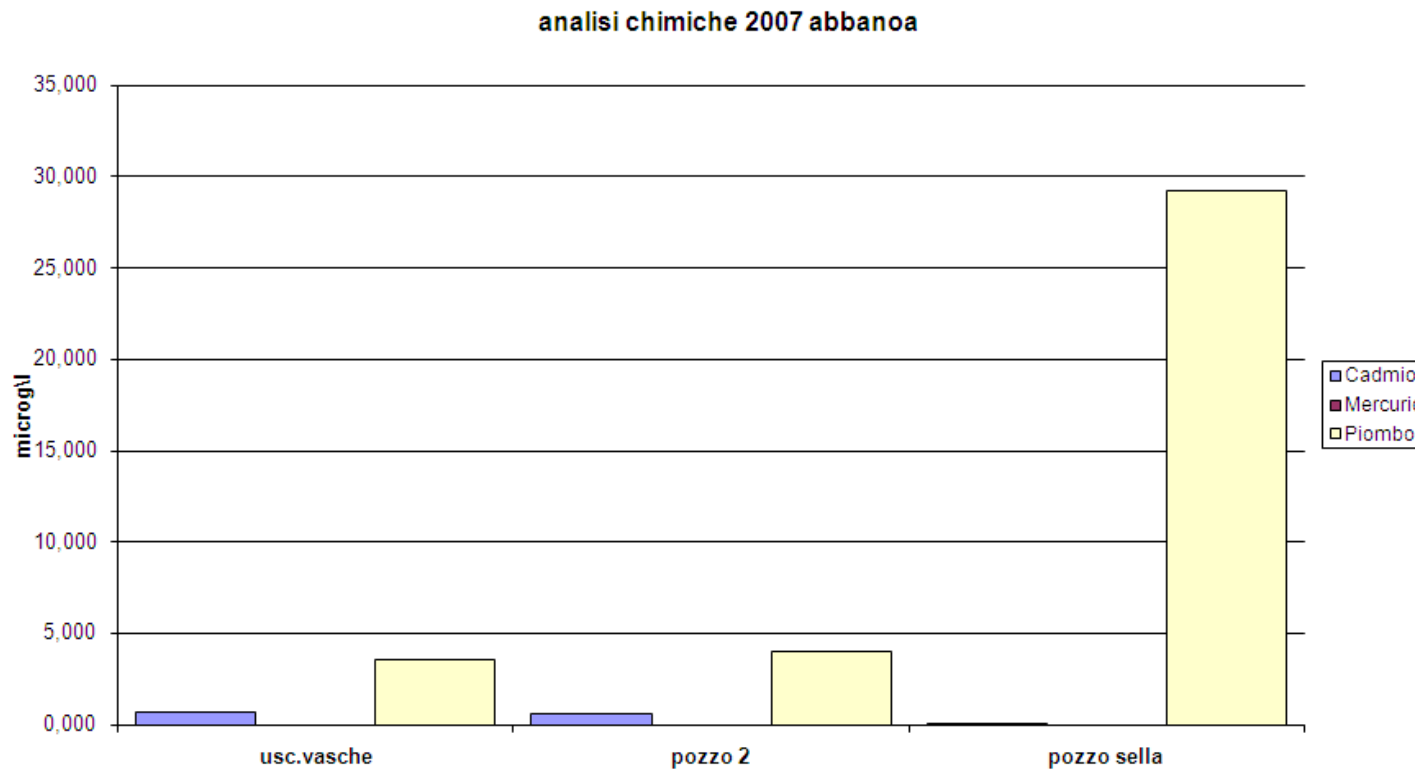


Figura 17: Analisi chimiche effettuate da Abbanoa spa sulle acque campionate all'uscita vasche e nei pozzi minerari. Grafico rappresentativo dei tenori di cadmio, mercurio e piombo

**Capitolo 7 - APPLICAZIONE DEL METODO SINTACS ALL'AREA
IN ESAME**

7.1 Determinazione dei parametri e relativi punteggi

Al fine di costruire le cartografie tematiche relative ai parametri del metodo SINTACS, è necessario suddividere il territorio in esame in aree discrete: si è scelto di attuare tale suddivisione attraverso una griglia regolare a maglie quadrate da 10 m di lato. L'area studiata risulta quindi discretizzata in elementi finiti quadrati (EFQ). Attraverso questa discretizzazione si è ottenuta una suddivisione della porzione di territorio studiato, di area complessiva pari a 43,81 km².



Figura 18 :Area in studio

Per la costruzione dei suddetti tematismi sono stati utilizzati, principalmente, i software Autocad e Arc GIS 9.3 - Arcmap, con l'ausilio dei database di calcolo associati sui quali sono stati esportati i dati parametrici di interesse relativi ad ogni cella elementare di discretizzazione, mediante i quali sono stati poi determinati i punteggi relativi. Per i parametri Tipologia della copertura, autodepurazione del Non-saturo, caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero e Conducibilità idraulica, l'attribuzione del punteggio SINTACS è stata realizzata direttamente su Arc GIS sulla base della cartografia

pedologica o geologica. Questi tipi di carte infatti offrono una zonazione del territorio per aree omogenee, secondo la litologia presente o il tipo di suolo, ed è quindi possibile attribuire il punteggio scelto per un certo parametro ad ognuna di queste aree. Invece per i parametri Soggiacenza, Infiltrazione efficace e acclività della Superficie topografica la procedura è stata più complessa, essendo questi parametri variabili con continuità nello spazio: in questo caso il punteggio è stato attribuito cella per cella, a seconda dei valori di soggiacenza, infiltrazione o pendenza della superficie ricavati da elaborazioni grafiche e numeriche; tali punteggi sono stati poi riferiti a delle mappe costruite con Arc View, permettendo quindi una costruzione automatizzata delle carte dei punteggi. Questo passaggio è reso possibile dalla georeferenziazione dei dati: ad ogni cella infatti, oltre al dato parametrico o al punteggio, sono associate delle informazioni quali coordinate geografiche, dimensioni e numero delle celle, che permettono quindi di stabilire una diretta corrispondenza tra le celle del foglio associato di ACCESS e gli elementi finiti quadrati della griglia di discretizzazione.

Vengono illustrate nel seguito in maniera più dettagliata le procedure seguite per la determinazione dei parametri e dei punteggi corrispondenti.

7.2 Soggiacenza

Per la determinazione dei valori di soggiacenza è necessario conoscere, per ogni EFQ, il valore della quota della superficie topografica sul livello medio del mare, Z, e quello della superficie piezometrica, H; il valore della soggiacenza S si determina per differenza:

$$S=Z-H \text{ (m)}.$$

Non è dato conoscere punto per punto il valore della quota della superficie topografica; è necessario costruire allora un modello di tale superficie, partendo dal maggior numero possibile di elementi discreti di cui si conosca l'elevazione: punti quotati, isoipse o altri punti di cui sia nota la quota. In questo caso il modello della superficie è stato costruito interpolando, tramite triangolazione attraverso il software Arc GIS 9.3, le quote di migliaia di punti quotati estrapolati dalla cartografia topografica (CTR in scala 1:10.000, in formato digitale). Successivamente il modello ottenuto per triangolazione è stato discretizzato, sempre tramite le funzioni di Arc GIS, secondo la griglia regolare a maglie quadrate da 10

m di lato, per la quale ad ogni EFQ corrisponde quindi un valore di elevazione della superficie espresso in m s.l.m. Le quote variano tra 0 e 500 m s.l.m.. Le quote più alte si hanno verso il confine esterno dell'area, in corrispondenza del massiccio carbonatico. Il modello della superficie topografica è riportato in seguito.

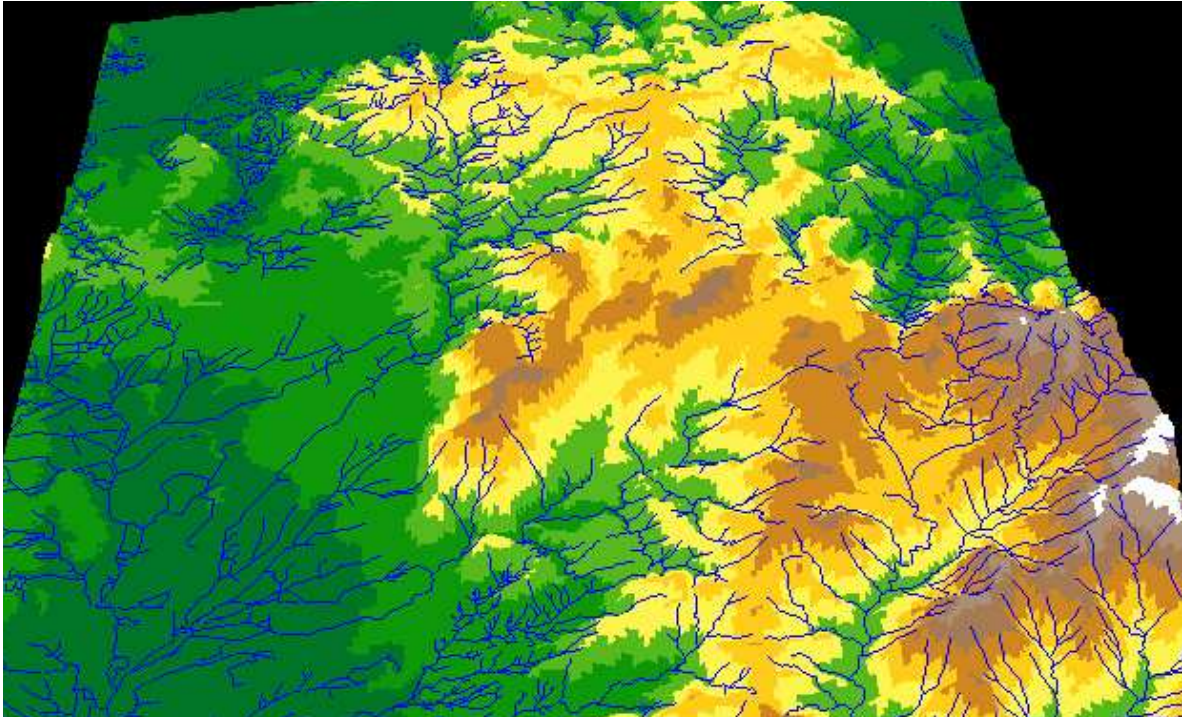


Figura 19: Visualizzazione tridimensionale dell'area in esame

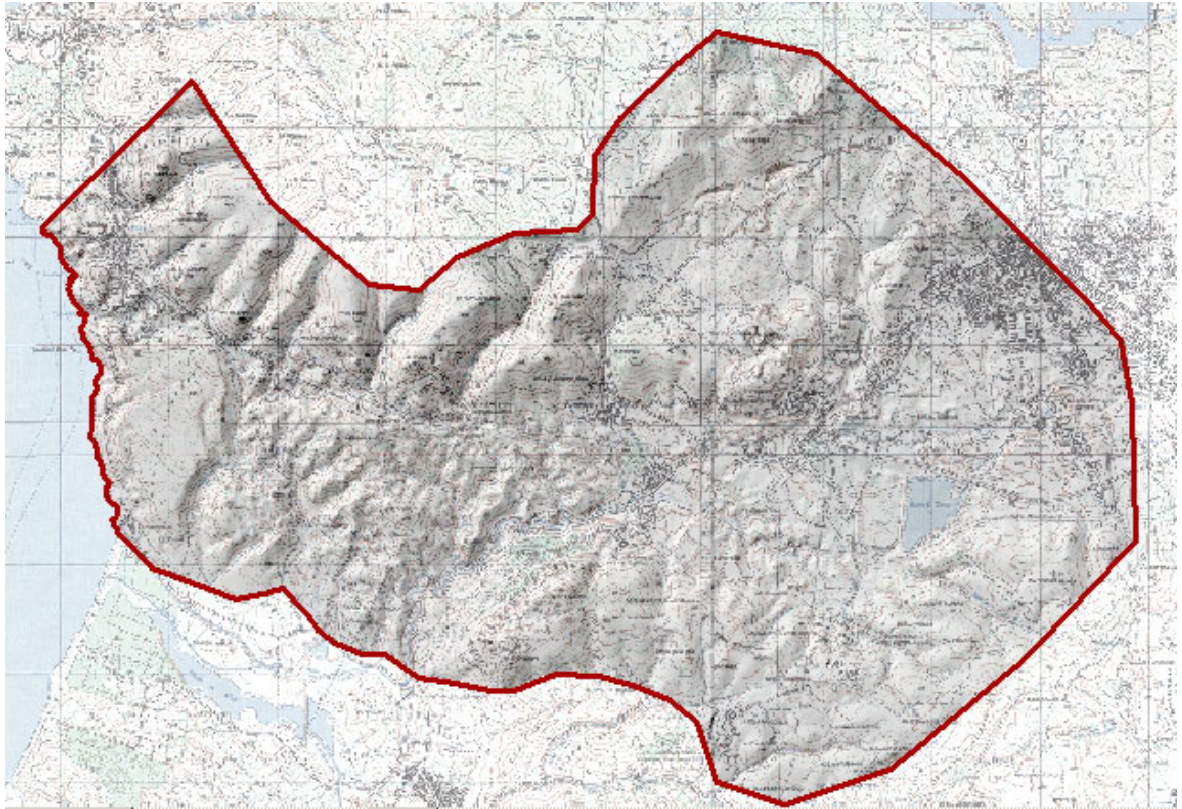


Figura 20 :Rappresentazione del modello digitale del terreno con il drapping della carta IGM in scala 1:25.000.

Un procedimento analogo è stato seguito per ottenere un modello tridimensionale della superficie piezometrica: in questo caso i dati discreti da interpolare erano costituiti dai valori del livello freatico dell'acquifero, misurati in una serie di pozzi minerari costituenti la rete di monitoraggio dell'IGEA (dati relativi al mese di Gennaio 2007 e Settembre 2007). La figura che rappresenta i pozzi monitorati è riportata nel seguito. È da notare il fatto che si siano presi in considerazione solo i pozzi minerari che tutto sommato sono in numero esiguo rispetto alla totalità dei pozzi anche privati presenti nella zona. Si è scelto di procedere in questa direzione in quanto l'IGEA ha monitorato costantemente per vent'anni questi pozzi generando una notevole quantità di dati nel tempo, per cui non avrebbe avuto senso confrontare pozzi privati per cui si sarebbero avuti pochi dati a disposizione che rischiavano di essere imprecisi e di falsare i risultati. I pozzi monitorati sono riportati nel seguito.



Figura 21 Pozzi minerari (da M.Pintore, 2006)

Sono stati assegnati valori nulli alle quote piezometriche in corrispondenza di una serie di punti sulla linea di costa. In questo caso però è stato utilizzato il metodo Krigging e l'elaborazione è stata effettuata con il software SURFER 8.

Di seguito si riporta la tabella relativa ai pozzi monitorati dall'IGEA con le piezometriche relative all'anno 2007:

nome pozzo	mese	Gen	Feb	Mar	Apr
↓	anno	2007	2007	2007	2007
CALLIGARIS	m s.l.m.	47,76	48,57	49,80	53,92
NEBIDA	m s.l.m.	53,70	53,77	53,86	54,23
M.SCORRA	m s.l.m.	47,84	47,90	47,98	50,25
M.Agruxiau	m s.l.m.	45,40	45,53	45,50	46,55
S.MARCO	m s.l.m.	46,07	46,26	46,40	46,61
PALMARI	m s.l.m.	45,66	45,87	45,99	46,35
CAMPO .PISANO	m s.l.m.	46,95	47,25	47,35	47,75
CABITZA	m s.l.m.	46,82	46,96	47,04	47,34
S.MODDIZZIS.	m s.l.m.	45,76	45,94	46,08	46,65
S.GIOVANNI.	m s.l.m.	45,76	45,94	46,08	46,65
M.Onixeddu	m s.l.m.	53,59	53,63	53,70	54,09

Tabella 35: Valori espressi in m delle piezometriche dei pozzi minerari relative ai primi quattro mesi del 2007.

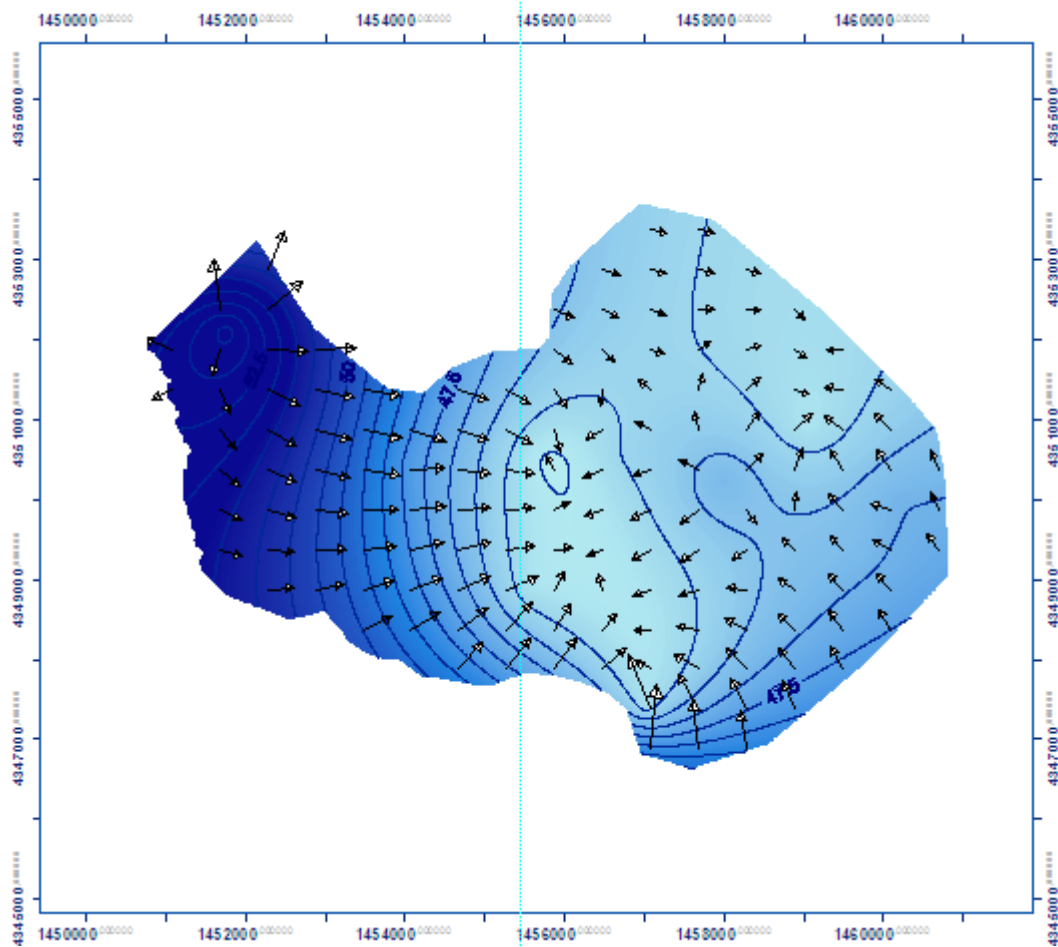


Figura 22: Ricostruzione delle superfici piezometriche relative al periodo di gennaio 2007.

Dalla figura 22 si vede chiaramente che il flusso dell'acqua è diretto a ricaricare l'acquifero. Si sta ripristinando l'equilibrio dopo gli emungimenti degli anni precedenti che hanno provocato una forte depressione della piezometrica.

Il calcolo della soggiacenza, per ogni cella discreta, è stato eseguito automaticamente sul foglio elettronico degli attributi associati, sottraendo i dati relativi alle quote topografiche e piezometriche di ogni EFQ. Ad ogni cella del foglio di calcolo si è attribuito un punteggio S, in base al valore assunto dalla soggiacenza, si è ottenuto un grid che viene riportato in figura 23. Il foglio di calcolo con i valori associati al parametro S è stato poi utilizzato per costruire la carta dei punteggi di S, riportata più avanti.

Il modello per la soggiacenza è riportato nella figura seguente, i valori variano da 0 m in prossimità della linea di costa fino a circa 400 m s.l.m. in prossimità dei rilievi calcarei.

Ad ogni EFQ corrisponde un valore dell'isopieza ottenuto mediante l'interpolazione dei dati piezometrici appartenenti ai pozzi minerari relativi al mese di gennaio 2007.

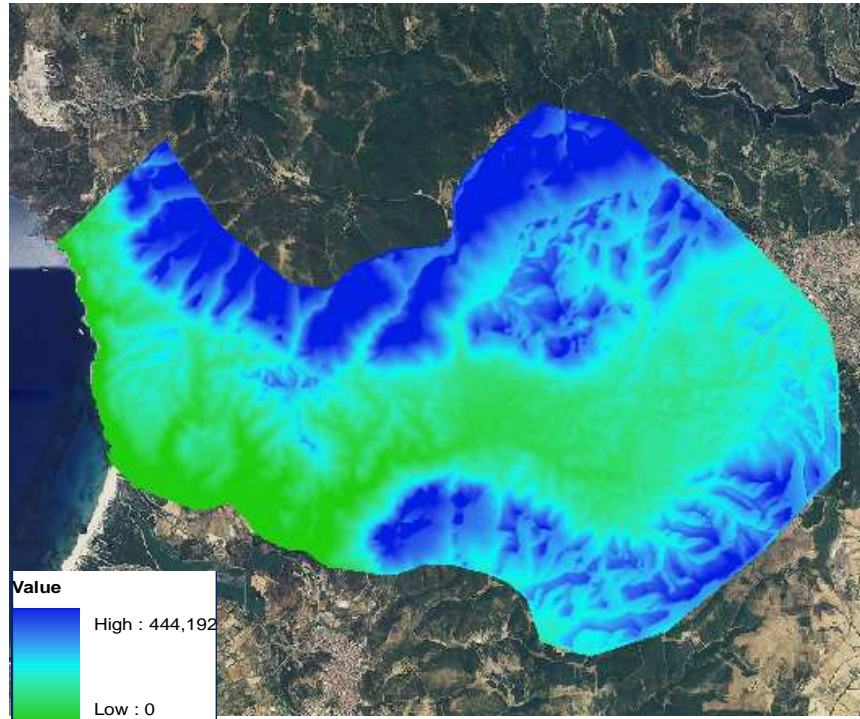


Figura 23: Ricostruzione mediante il software ARCGIS 9.3 del modello rappresentante la soggiacenza calcolata utilizzando la piezometrica relativa al mese di gennaio 2007.

I punteggi relativi alla soggiacenza sono stati assegnati in automatico utilizzando la curva di regressione contenuta nel grafico dei punteggi del modello SINTACS:

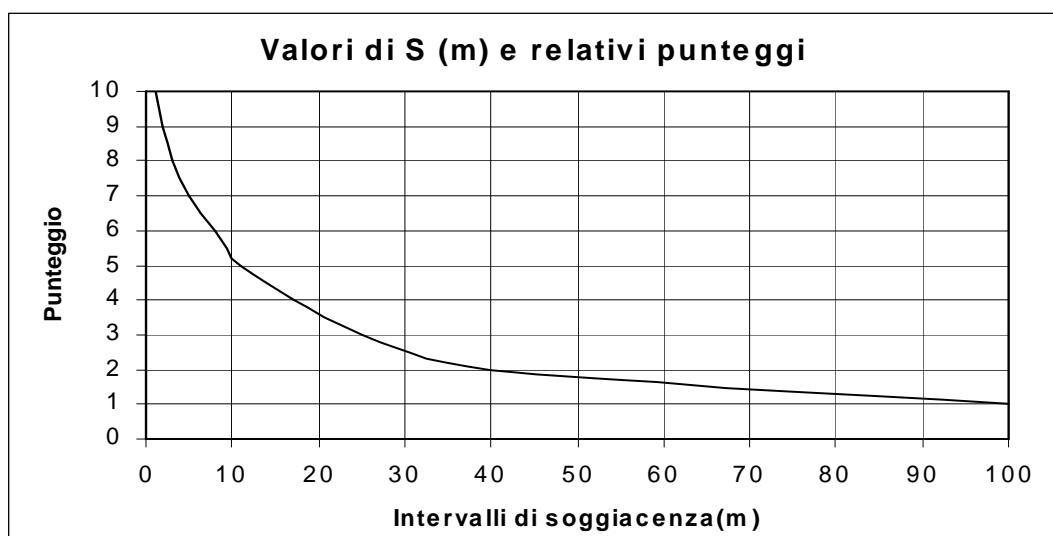


Figura 24 :Punteggi della soggiacenza nel metodo SINTACS.

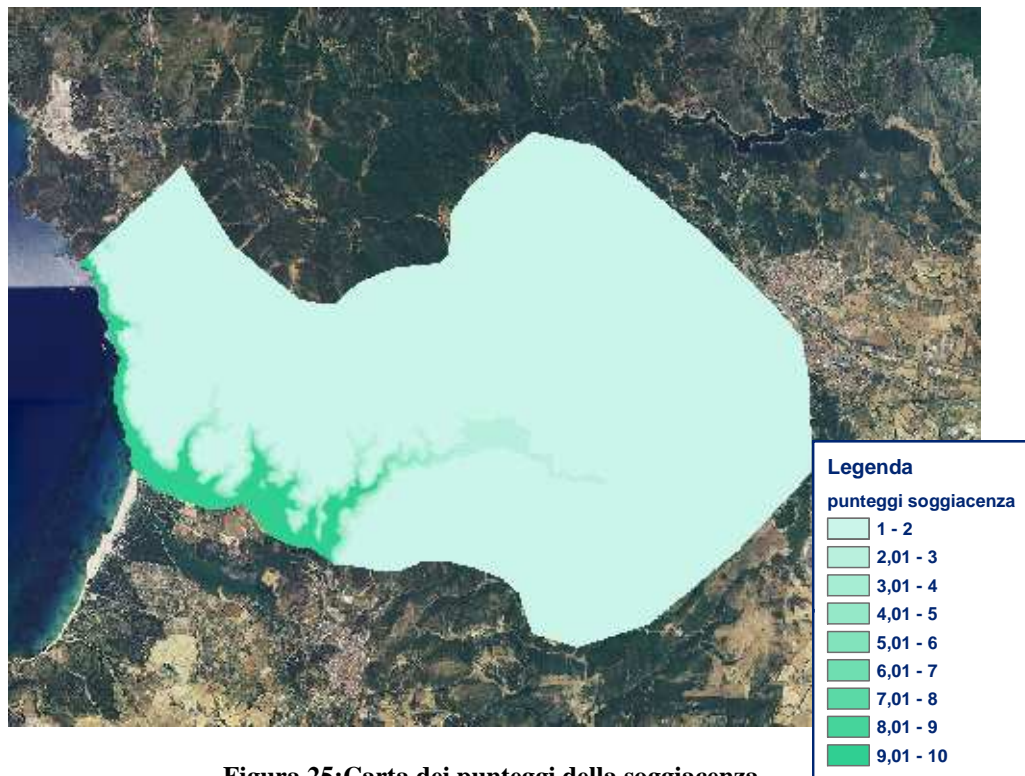


Figura 25: Carta dei punteggi della soggiacenza.

Come riportato in figura 25 è evidente che il punteggio della soggiacenza assume valori maggiori in prossimità della costa in quanto i valori in metri sono più bassi e l'acquifero risulta in queste zone più vulnerabile.

7.3 Infiltrazione efficace






La valutazione dell'infiltrazione efficace è stata eseguita sulla base della cartografia geologica e pedologica, necessarie per la determinazione dei coefficienti di infiltrazione potenziale χ , e in funzione dei valori di precipitazione media annua ed evapotraspirazione calcolati nel seguito. Tali coefficienti dipendono dalle caratteristiche tessiturali dei suoli, nel caso di coperture abbastanza spesse, o dalla litologia affiorante, nel caso di assenza di suolo. L'infiltrazione efficace rappresenta una delle componenti di ricarica attiva dell'acquifero, cioè quella parte di risorsa idrica che si infila in profondità nell'acquifero.

Il fatto che il valore dell'infiltrazione efficace sia elevato comporta sia un'azione di trascinamento in profondità degli inquinanti idroportati sia un'azione di diluizione.

La carta pedologica utilizzata è la carta digitalizzata in formato shape file di prof. Aru (1990) in scala 1:250.000. Purtroppo la precisione a questa scala non è ideale ma non è stato possibile reperire dati più precisi alla scala di dettaglio.

Si evince dalla carta pedologica che per la maggior parte i suoli possiedono una tessitura di tipo franco sabbiosa all'interno e argillosa verso i confini carsici, intervallati da aree intermedie. Le zone con la colorazione priva di legenda sono le aree antropizzate del centro urbano di Iglesias.

TESSITURA

-  argillosa
-  argillosa o argillo-limoso
-  da franco-sabbiosa a franco-argillosa
-  da franco-sabbioso-argillosa ad argillosa
-  da sabbiosa a sabbioso-franca

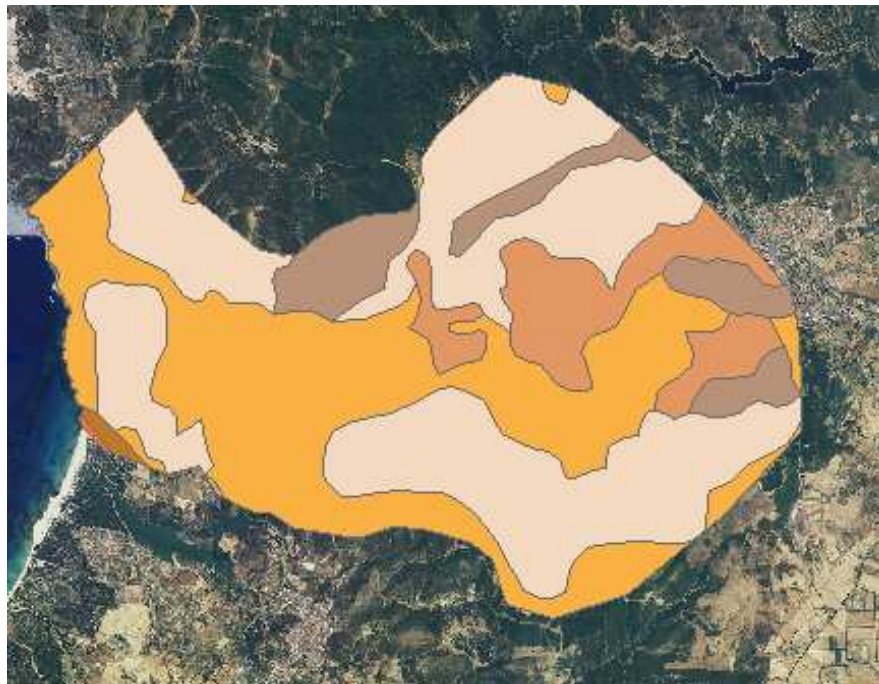


Figura 26: Carta pedologica dell'area in esame.

La carta geologica utilizzata per l'elaborazione è la carta geologica del progetto CARG (2008) in scala 1:10.000, messa a disposizione in formato digitale dalla Regione Sardegna. Poiché la carta risultava essere fin troppo dettagliata è stata effettuata una riclassificazione utilizzando le macroformazioni conosciute della zona, anche per fare in modo che la carta non avesse un dettaglio talmente piccolo da non essere confrontabile con quella pedologica a disposizione.

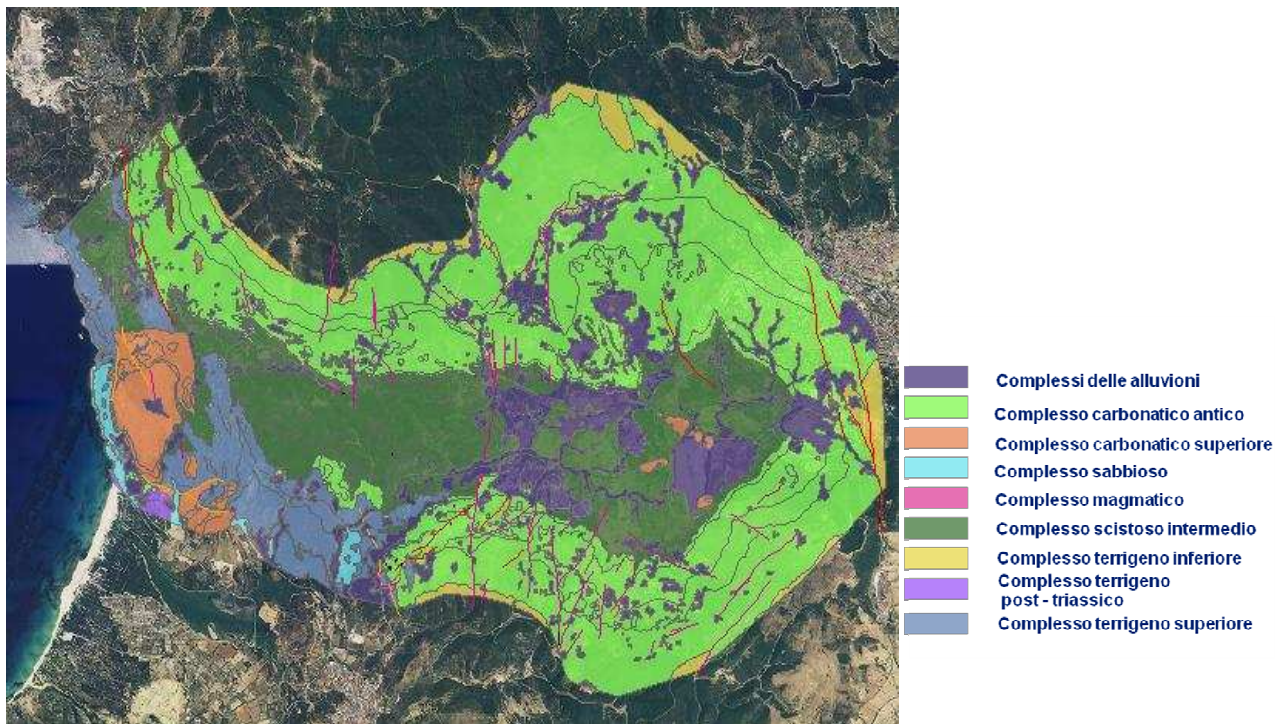


Figura 27 Carta geologica con riclassificazione in complessi geologici (carta base da RAS, 2008)

Il calcolo dell'infiltrazione si effettua sulla base di coefficienti di infiltrazione potenziale χ che dipendono dalla tessitura dei suoli e dalla litologia. Nel nostro caso

Per la stima del coefficiente χ si è tenuto conto delle seguenti caratteristiche:

1. Tessitura dei suoli, attraverso la quale si individua, per ogni tipo di suolo, un intervallo di valori all'interno del quale ricade il coefficiente χ cercato;
2. Pendenza media dell'area coperta da ogni singola unità pedologica: si attribuiscono valori elevati, all'interno dell'intervallo individuato al punto precedente, per zone pianeggianti; valori bassi per zone a forte pendenza dove l'infiltrazione non è favorita;
3. Contenuto di particelle fini (limo, argilla) le quali tendono a far abbassare il valore del coefficiente χ all'interno del range individuato, riducendo, ove presenti, le caratteristiche di permeabilità sia dei suoli che dei complessi idrogeologici.

Per le zone sotto scarsa copertura la valutazione di χ deriva dall'analisi incrociata tra la carta geologica e la carta dei suoli.

Si è proceduto poi con il calcolo dell'infiltrazione potenziale, per ogni cella, secondo le formule:

$$I = \bar{P} \cdot \chi \text{ (mm/a) per zone con potente copertura del suolo;}$$

$$\bar{I} = (\bar{P} - \bar{E}_r) \cdot \chi \text{ (mm/a) per roccia nuda o sotto scarsa copertura.}$$

7.3.1 Precipitazioni ragguagliate.

I valori relativi alle precipitazioni medie annue e precipitazioni efficaci ragguagliate sono stati calcolati come nel seguito utilizzando il metodo dei topoi.

Il *metodo dei topoi* : consiste nel determinare graficamente le aree di influenza delle singole stazioni pluviometriche (all'interno delle quali è possibile l'estrapolazione dei dati registrati dai relativi pluviometri). Per la costruzione dei topoi si georeferenziano sulla carta i punti rappresentativi delle singole stazioni. Il topoi di una certa stazione è formato da un poligono i cui punti interni hanno distanza dalla stazione stessa inferiore rispetto alle distanze dalle altre stazioni e tale area si ricava, per via grafica, mediante il cosiddetto *reticolo di Thiessen*.

Ogni poligono rappresenta la presunta area di influenza del pluviometro in esso contenuto, cioè ad ogni topoi si attribuisce l'altezza di precipitazione misurata, nel periodo di riferimento (anno idrologico o anno solare), nella stazione di riferimento. Con una media ponderata si calcola l'altezza di precipitazione ragguagliata all'intero dominio in esame:

$$\bar{P} = \frac{1}{A_d} \sum_{i=1}^n P_i \cdot A_i$$

Dove P_i è l'altezza di precipitazione in mm/a misurata nella stazione i-esima; A_i è l'area del topoi i-esimo; A_d è l'area del dominio idrogeologico in studio.

Per la zona considerata nel presente lavoro sono state individuate due stazioni di riferimento: Iglesias e Monteponi; costruiti graficamente i topoi relativi alle due stazioni, sono stati calcolati i valori delle precipitazioni medie annue sulla base dei dati del SISS (Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna realizzato dall'Ente Autonomo del Flumendosa), relativi alle precipitazioni medie mensili su una serie storica continua di 68 anni (1924-1992).

I risultati sono presentati nella seguente tabella e attraverso una rappresentazione cartografica:

Stazione	Coord Gauss Boaga est	Coord Gauss Boaga nord	Superficie topoieta (km ²)	Precipitazione media annua (mm/a)
Iglesias	1460250	4351290	6	790,7
Monteponi	1457660	4350150	37,8	753,4

Tabella 36: Dati relativi al metodo dei topoieta per le stazioni meteo di Iglesias e Monteponi.



Figura 28: Topoieta relativi alle stazioni di Iglesias e Monteponi.

7.3.2 Stima dell'evapotraspirazione media annua.

Per il calcolo dell'evapotraspirazione reale media annua si è fatto riferimento ancora ai dati termo-pluviometrici del SISS relativi al periodo 1924-1992, e si è effettuato il calcolo mediante la formula di Turc modificata da Santoro per le aree semiaride del bacino del Mediterraneo:

$$E_r = \frac{P}{\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{0.5}}$$

Dove E_r è l'evapotraspirazione media annua calcolata per ciascun topoietao;

P = precipitazione media annua per il topoietao ;

L è un indice di calore che si calcola attraverso la relazione:

$$L = 586 - 10 \cdot T_c + 0.05 \cdot T_c^3$$

Dove T_c è la temperatura media diurna ($^{\circ}\text{C}$), corretta per la piovosità e calcolata secondo la formula:

$$T_c = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i \cdot T_i}{P}$$

P_i sono le precipitazioni medie mensili relative al mese i -esimo;

T_i sono le temperature diurne medie mensili rilevate.

Si riportano di seguito i dati e i risultati relativi alle stazioni di interesse:

IGLESIAS	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
prec medie mensili	109,30	92,50	78,30	64,90	39,70	16,10	6,90	8,80	41,90	90,30	117,20	124,90
temp medie mensili	9,4	9,8	11,8	14	17,5	21,9	25,3	25,6	22,8	18,4	13,8	10,7
Pi*Ti	1027,42	906,5	923,94	908,6	694,75	352,59	174,57	225,28	955,32	1661,52	1617,36	1336,43

Tabella 37: Dati meteo climatici relativi alla stazione meteo di Iglesias.

$$T_c = 13,63$$

$$L = 576,46$$

$$E_r = 474,11 \text{ mm/a}$$

$$Q = P - E_r = 316,58 \text{ mm/a}$$

Monteponi	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
prec medie mensili	104,4	90,3	77,5	61,4	39,2	14,8	4,5	7,8	39,5	84,4	107,5	122,1
temp medie mensili	9,4	9,8	11,8	14	17,5	21,9	25,3	25,6	22,8	18,4	13,8	10,7
Pi*Ti	981,36	884,94	914,5	859,6	686	324,12	113,85	199,68	900,6	1552,96	1483,5	1306,47

Tabella 38: Dati meteo climatici relativi alla stazione di Monteponi.

$$T_c = 13,55$$

$$L = 574,86$$

$$E_r = 465,66 \text{ mm/a}$$

$$Q = P - E_r = 287,73 \text{ mm/a}$$

Oltre al valore dell'evapotraspirazione reale si è calcolato il valore delle precipitazioni efficaci Q come differenza tra precipitazioni ragguagliate ed evapotraspirazione, tale valore è stato utilizzato nel seguito per il calcolo dell'infiltrazione efficace per zone sotto scarsa copertura o con roccia affiorante. I valori sono stati riportati sulla carta ed è stato effettuato il calcolo cella per cella, con l'ausilio del foglio attributi di ACCESS associato ad ogni tematismo del software Arcgis. Le distribuzioni spaziali dei valori ricavati sono leggibili dalla carta parametrica relativa ai punteggi I riportata sotto.

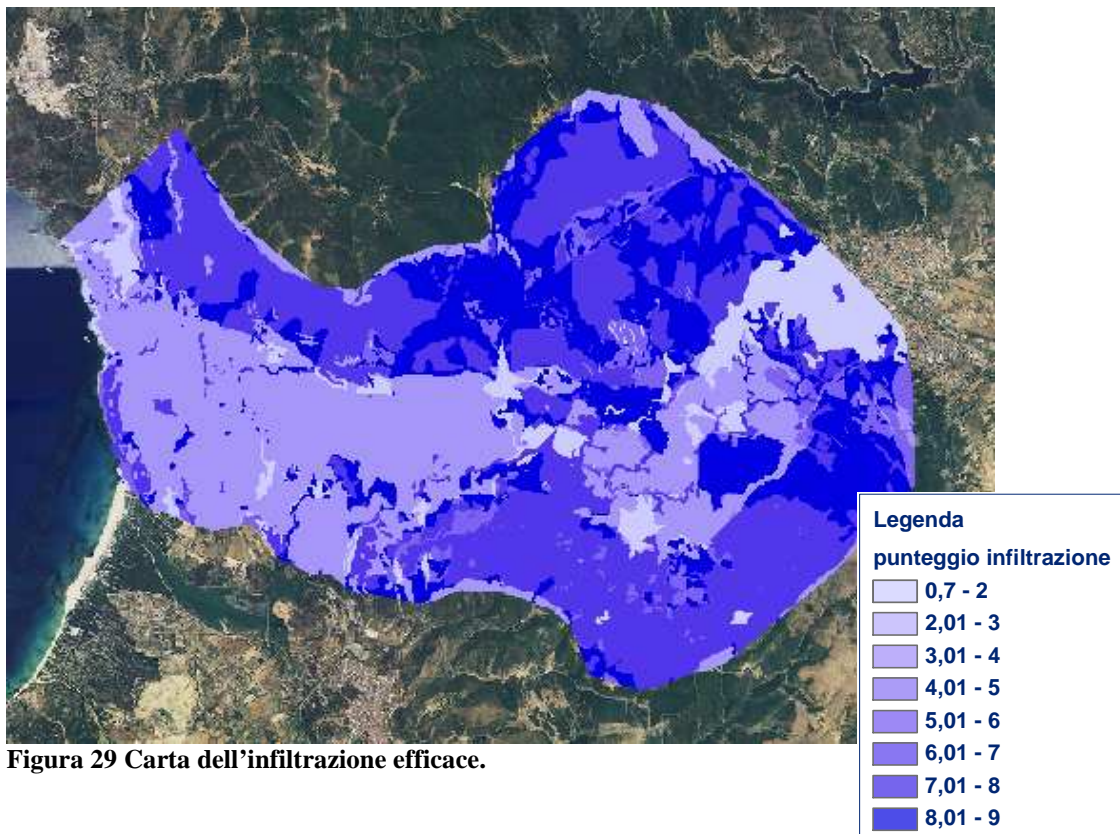


Figura 29 Carta dell'infiltrazione efficace.

7.4 Effetto di auto depurazione del non saturo e caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero.

Questi due parametri sono stati valutati sulla base della litologie affioranti dell'area studiata. In particolare, per la determinazione del punteggio del parametro N si è tenuto conto, tra l'altro, dello spessore dell'insaturo (deducibile dai valori di soggiacenza) e, anche in questo caso, della presenza di materiali argillo-limosi che favoriscono l'adsorbimento, e quindi l'attenuazione, nei confronti di un discreto numero di sostanze inquinanti. Molta importanza è stata data anche alle zone che presentavano fenomeni di carsismo accentuato e zone fratturate che favoriscono l'ingresso degli inquinanti velocemente all'interno della falda sotterranea. Come si può vedere dalla tabella sotto, punteggi alti di N (effetto di auto depurazione del non saturo) sono stati assegnati al complesso carbonatico superiore (che risulta fratturato) e ai complessi alluvionali, bassi punteggi agli scisti e ai complessi terrigeni che possono essere considerati quasi impermeabili. Per il parametro A, sono essenzialmente le caratteristiche litologiche della roccia contenente l'acquifero a determinare il punteggio. In linea di massima, si può affermare, per entrambi i parametri, che i punteggi maggiori si attribuiscono alle zone con rocce a permeabilità matriciale.

Complessi	N	A
Complessi delle alluvioni	7,00	8,00
Complesso magmatico	4,00	5,00
Complesso terrigeno post - triassico	4,00	4,00
Complesso terrigeno superiore	3,00	4,00
Complesso carbonatico superiore	9,00	7,00
Complesso carbonatico antico	5,00	9,00
Complesso scistoso intermedio	3,00	4,00
Complesso terrigeno inferiore	3,00	4,00
Laghi	1,00	1,00

Tabella 39: Punteggi attribuiti ai diversi complessi geologici con la metodologia G.I.S. per i parametri N ed A

Dalla fig.30 si vede che in gran parte del territorio studiato sono presenti le metamorfiti a cui è stato assegnato punteggio 3, con il punteggio 5 si distinguono i calcari carsificati ed infine con il punteggio 10 i calcari fessurati e le dolomie. Con il colore fucsia ed il punteggio pari a 8 si individuano al di sopra delle metamorfiti i depositi alluvionali medio fini.

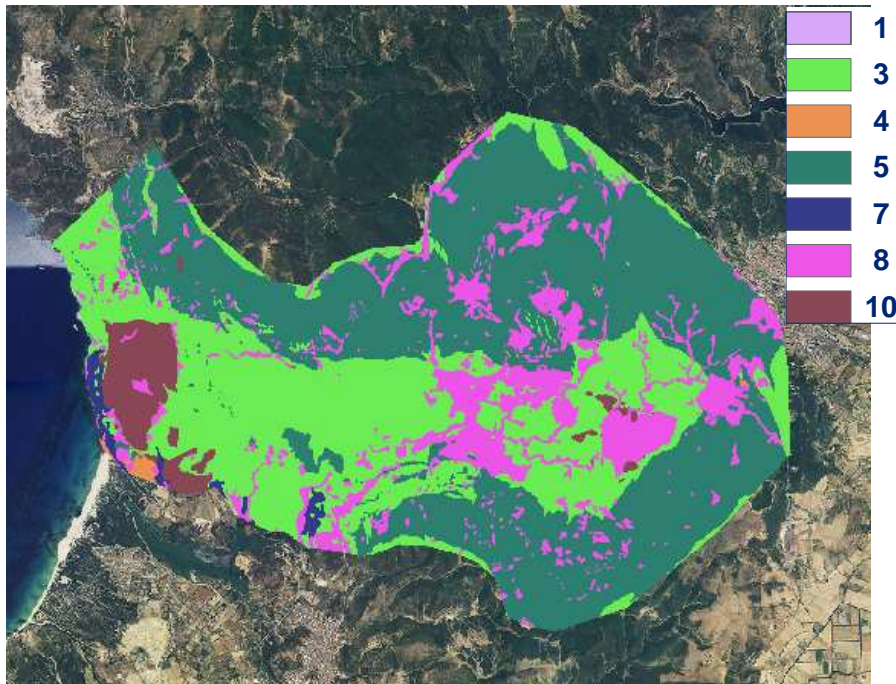
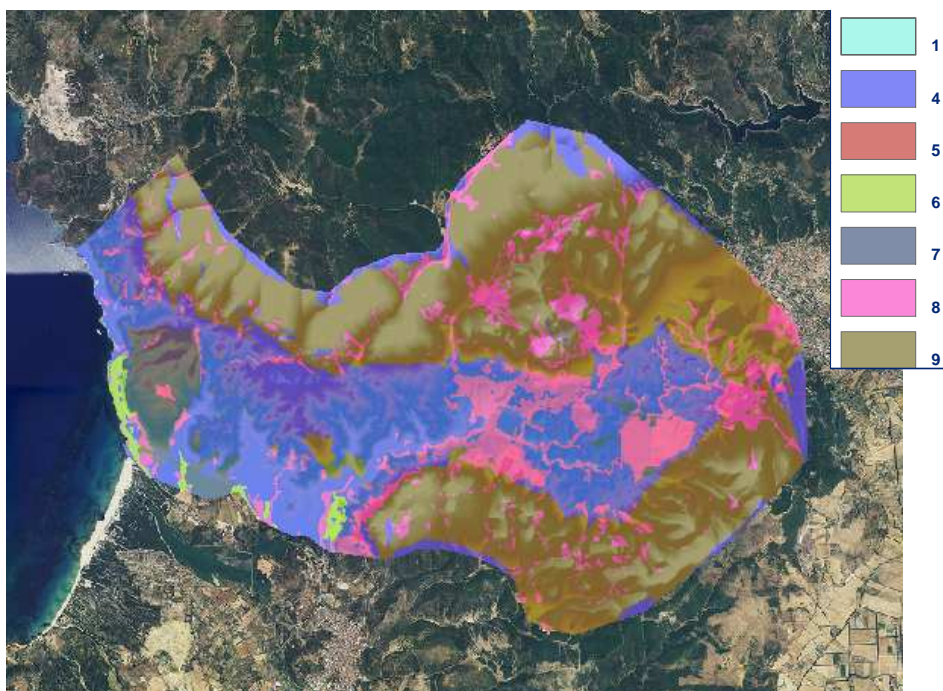


Figura 30 Carta dei punteggi relativi al parametro N (effetto di auto depurazione del non saturo).

Figura 31: Carta relativa ai punteggi attribuiti al parametro A (caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero).



Complessi idrogeologici	Punt. A	Complessi idrogeologici	Punt. A
Alluvioni grossolane	8-9	Plutoniti fessurate	2-4
Calcari carsificati	9-10	Alternanze (flysch)	5-8
Calcari fessurati	6-9	Vulcaniti fessurate	8-10
Dolomie fessurate	4-7	Marne, argilliti	1-3
Alluvioni medio-fini	6-8	Morene grossolane	6-8
Complessi sabbiosi	7-9	Morene medio-fini	4-6
Piroclastiti diverse	4-8	Metamorfiti fessurate	2-5
Arenarie, conglomerati	4-9	Argille, limi, torbe	1-3

Tabella 40: Attribuzione dei punteggi ai diversi litotipi.

7.5 Tipologia della copertura.

Il parametro T è indicativo della capacità di attenuazione dei suoli; è stato valutato anch'esso, come il punteggio I, sulla base della cartografia pedologica, tenendo conto in particolar modo della tessitura del suolo, ma seguendo una procedura analoga a quella descritta per i punteggi N ed A. In questo caso, importante è la presenza di classi tessiturali argillose e limose, le quali hanno capacità d'attenuazione massima e quindi determinano, in corrispondenza, un punteggio T molto basso all'interno degli intervalli individuati secondo i grafici forniti dal metodo. Anche lo spessore dei suoli assume una certa importanza, attribuendo un punteggio T massimo o comunque elevato per suoli sottili o assenti, o in presenza di zone evidentemente fratturate, essendo nulla in questi casi la capacità di attenuazione. Nel seguito si riportano la tabella di attribuzione del punteggio T

relativa alle unità pedologiche precedentemente descritte e la carta parametrica corrispondente.

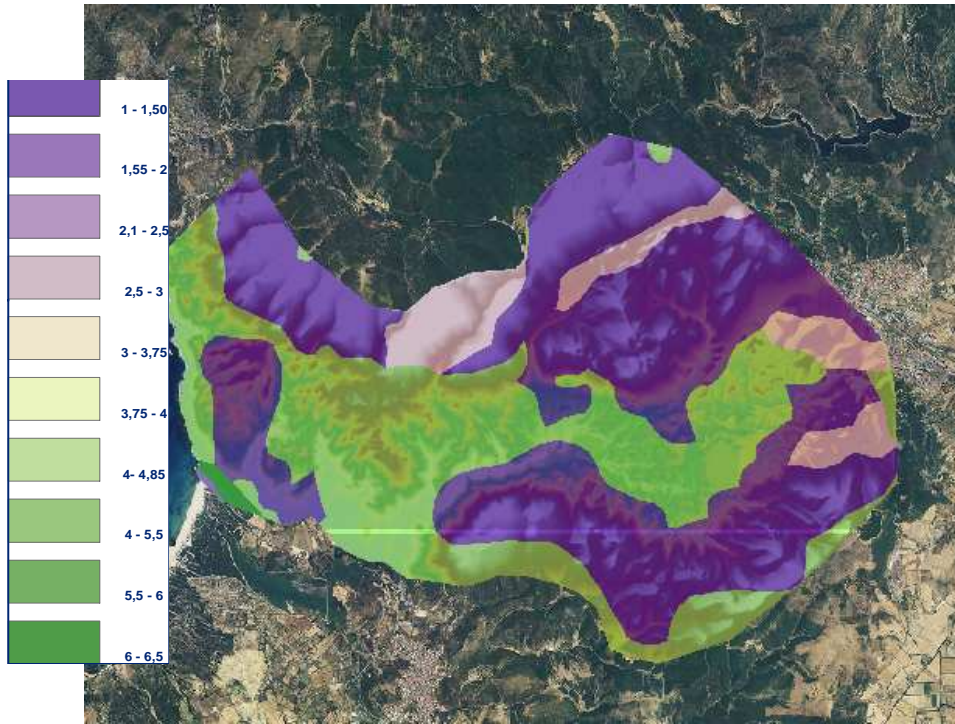


Figura 32: Carta dei punteggi relativi alla tipologia della copertura.

DESCRIZIONE	TESSITURA	PROFONDITA	T (punt)
Paesaggi su sabbie eoliche dell'Olocene	da sabbiosa a sabbioso-franca	profondi (oltre il metro)	6,50
Paesaggi su sedimenti litoranei (paludi, lagune costiere, ecc.) dell'Olocene	argillosa o argillo-limosa	profondi (oltre il metro)	2,00
Paesaggi su calcari, dolomie e calcari dolomitici del Paleozoico e del Mesozoico e relativi depositi di versante	da franco-sabbioso-argillosa ad argillosa	da poco profondi a profondi	3,00
Paesaggi su metamorfiti (scisti, scisti arenacei, argilloscisti, ecc.) del Paleozoico e relativi depositi di versante	da franco-sabbiosa a franco-argillosa	da poco profondi a mediamente profondi	5,00
Paesaggi urbanizzati			1,00
Paesaggi su calcari, dolomie e calcari dolomitici del Paleozoico e del Mesozoico e relativi depositi di versante	argillosa	variabile	1,30
Paesaggi su metamorfiti (scisti, scisti arenacei, argilloscisti, ecc.) del Paleozoico e relativi depositi di versante	da franco-sabbiosa a franco-argillosa	da poco profondi a profondi	5,00

Tabella 41: Punteggi relativi alla tipologia della copertura

7.6 Conducibilità idraulica.

Per l'attribuzione del punteggio relativo alla conducibilità idraulica è necessario conoscere l'ordine di grandezza assunto da tale parametro. Per l'area studiata è noto solamente il valore della trasmissività idraulica ricavato dalle prove di pompaggio eseguite nei pozzi minerari di Monteponi (all'interno dei calcari) e lo spessore dei fronti da sondaggi minerari. La conducibilità idraulica è stata ricavata attraverso una correlazione esponenziale con la trasmissività. Per le altre unità idrogeologiche, l'ordine di grandezza è stato valutato sulla base dei valori forniti dal metodo SINTACS per la stima indiretta di C, in funzione del complesso idrogeologico contenente l'acquifero. Il massimo di conducibilità si ha per i complessi delle alluvioni, cui corrispondono punteggi elevati. Il valore più basso è assunto dal complesso magmatico, in quanto le rocce ignee sono completamente impermeabili e quasi prive di fatturazioni. Nella tabella sottostante sono riportati i valori attribuiti ad ogni parametro, nella pagina seguente si trova la rappresentazione cartografica dei punteggi attribuiti al parametro conducibilità.

Complessi	C	punteggi_C
Complessi delle alluvioni	0,001000000000000000	9,0000000
Complesso magmatico	0,000000010000000000	1,3000000
Complesso terrigeno post - triassico	0,000010000000000000	5,0000000
Complesso terrigeno superiore	0,000010000000000000	3,0000000
Complesso carbonatico superiore	0,000000010000000000	7,0000000
Complesso carbonatico antico	0,000010000000000000	5,0000000
Complesso scistoso intermedio	0,000000001000000000	3,0000000
Complesso terrigeno inferiore	0,000001000000000000	3,0000000

Tabella 42: Punteggi relativi alla conducibilità idraulica dei complessi geologici.

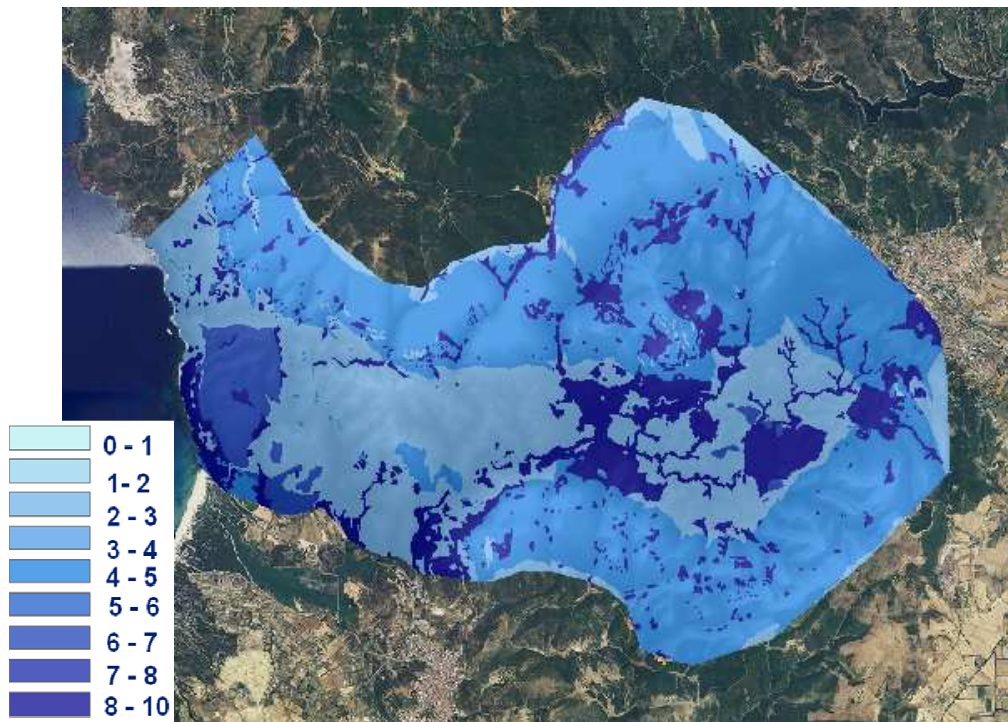


Figura 33: Carta dei punteggi relativi alla conducibilità idraulica.

7.7 Acclività della superficie topografica.

Per la valutazione di questo parametro è stato necessario costruire una carta divisa per classi di pendenza, elaborata a partire dal modello tridimensionale della superficie topografica; si è ottenuta in questo modo una carta in cui ad ogni EFQ corrisponde un determinato valore di pendenza percentuale che, inserito nel grafico fornito dal metodo SINTACS, permette di ricavare il relativo punteggio. Il punteggio è molto elevato per zone dove la pendenza è blanda, corrispondenti a parti del territorio dove l'inquinante può spostarsi poco sotto l'azione della gravità o addirittura ristagnare favorendo l'infiltrazione. Inoltre l'acclività influenza in misura più o meno grande la tipologia e lo spessore del suolo e della copertura.

Nella figura sottostante è riportata la carta dei punteggi attribuiti all'acclività, e la tabella con la classe di pendenza e il relativo punteggio corrispondente.

Pendenza %	Punteggio S
0-2	10
2-4	9
4-6	8
6-9	7
9-12	6
12-15	5
15-18	4
18-21	3
21-26	2
>26	1

Tabella 43: Punteggi e relative classi di pendenza.

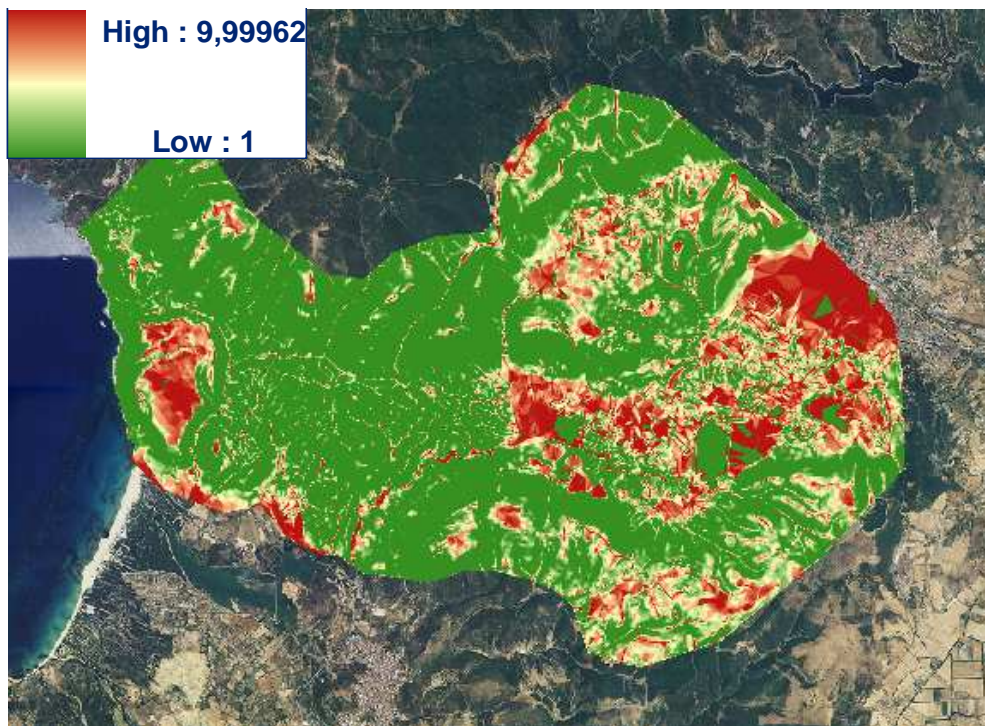


Figura 34: Carta dei punteggi dell'acclività della Superficie topografica.

7.8 I pesi relativi alle situazioni idrogeologiche e di impatto e corrispondente rappresentazione cartografica

Gli scenari relativi alle situazioni idrogeologiche e di impatto sono stati individuati sulla base delle informazioni estrapolabili dalla Carta d'uso reale del suolo e dalla cartografia geologico-pedologica precedentemente descritta. E' stata operata una zonazione del territorio secondo cinque scenari proposti dal metodo SINTACS (Impatto Normale, Impatto Rilevante, Carsismo, Drenaggio, Fessurato) .

Impatto normale: a tale scenario si riconducono aree pianeggianti o a scarsa pendenza, con insaturo prevalentemente a permeabilità matriciale, basso impatto antropico, utilizzo del territorio contenuto (aree sterili o incolte , colture che non prevedono utilizzo di fitofarmaci e concimi, né pratiche irrigue, allevamento con numero limitato di capi).

Impatto rilevante: queste zone sono caratterizzate, per il territorio studiato, dalla presenza di insediamenti urbani e costieri, pratiche agricole che prevedono l'utilizzo di irrigazione, concimi e fitofarmaci, aree minerarie dismesse.

Drenaggio: appartengono a questo scenario le aree in corrispondenza dei corpi idrici superficiali dove avviene un frequente drenaggio verso i corpi idrici sotterranei. Per

esempio: aree sondabili,, zone agricole soggette a irrigazione con grandi volumi d'acqua , aree di affioramento della piezometrica.

Carsismo: fanno parte di questo scenario le zone dove sono presenti fenomeni carsici evidenti. In queste zone le acque attraversano condotti sub verticali riversandosi nel sottosuolo in tempi ridottissimi, con velocità molto maggiori rispetto ai processi di infiltrazione normali. E' ovvio che in queste situazioni, il processo di attenuazione degli inquinanti risulta praticamente nullo.

Fessurato: sono comprese in questa situazione idrogeologica le aree occupate da rocce semipermeabili del paleozoico.

Le stringhe di pesi moltiplicatori relative alle situazioni descritte sono indicate nella seguente tabella:

parametro	IN	IR	D	C	F
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	2	5	4

Tabella 44: Punteggi relativi alle stringhe di pesi moltiplicatori.

Per ciascun elemento della griglia di discretizzazione dell'area sono stati calcolati i pesi relativi ai sette parametri del metodo identificando uno scenario ed assegnando il valore corrispondente.

Per ciascun elemento finito quadrato della maglia si ottiene l'indice di vulnerabilità intrinseca I con la somma:

$$I_{\text{SINTACS}} = \sum_{i=1}^7 P_i \cdot W_i$$

Essendo P il punteggio di ciascuno dei sette parametri considerati dal metodo e W il peso relativo della stringa prescelta.

$W_{\text{max}}=5$, $S_{W_i}=26$.

L'area in esame è quasi completamente occupata da discariche minerarie (dati RAS), come riportato nella figura sottostante (fig. 35). Tutte queste aree sono state inserite all'interno della stringa dell'Impatto Rilevante.



Figura 35: Discariche minerarie presenti nell'are in esame

Dalla carta delle situazioni idrogeologiche e di impatto (fig. 36) si evince che l'area ricade quasi per intero nello scenario di impatto rilevante e in misura minore nella situazione del Carsismo.

Si ottiene così un valore dell'indice che varia da un minimo pari a 26 ad un massimo di 260 punti; il valore ottenuto viene poi normalizzato in un intervallo di valori compresi tra 0 e 100 per renderne più agevole la lettura e la restituzione cartografica secondo delle classi di vulnerabilità.

L'indice normalizzato si calcola con la relazione:

$$IS_{NO} = \frac{IS_{GR} - IS_{MIN}}{IS_{MAX} - IS_{MIN}} \cdot 100$$

Dove IS_{GR} è l'indice SINTACS "grezzo", cioè quello calcolato con la sommatoria dei prodotti tra punteggi e pesi, $IS_{min}=26$, $IS_{max}=260$.

Le classi di vulnerabilità sono state individuate attraverso un'analisi statistica basata sul confronto delle vulnerabilità calcolate per oltre 500 aree campione con il metodo SINTACS e con il Metodo-base del CNDICI.CNR.

Tali classi corrispondono ai seguenti intervalli di punteggi normalizzati:

GRADO DI VULNERABILITA'	INTERVALLO DI PUNTEGGIO
Bassissima (Bb)	0 - 24
Bassa (B)	25 - 35
Media (M)	36 - 49
Alta (A)	50 - 69
Elevata (E)	70 - 79
Molto elevata (Ee)	80 - 100

Tabella 45: Intervalli di punteggio assegnati dal metodo SINTACS ai vari gradi di vulnerabilità.

7.9 Carta della vulnerabilità intrinseca.

Il risultato di queste elaborazioni è una carta della vulnerabilità intrinseca dalla quale risulta che quasi la totalità del territorio ha una vulnerabilità all'inquinamento molto bassa. Solo alcune aree, per la precisione quelle individuate nella stringa del carsismo, risultano avere un grado medio di vulnerabilità (fig.37).

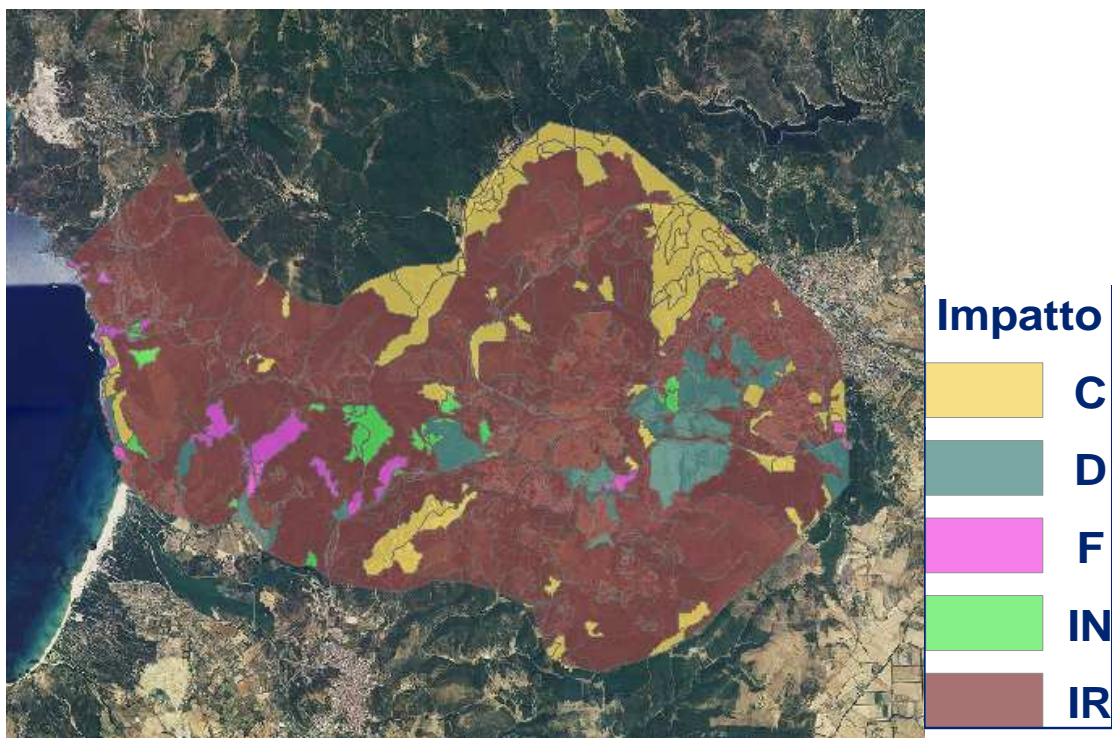


Figura 36: Situazioni idrogeologiche e di impatto.

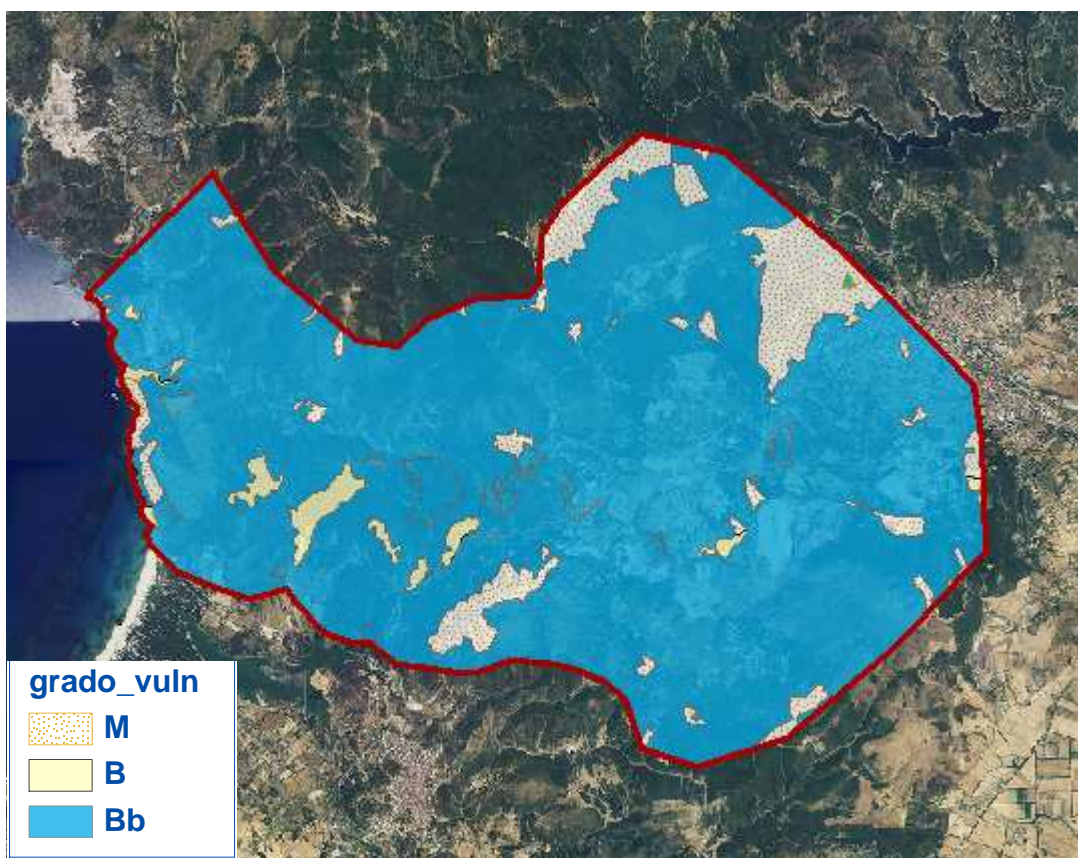


Figura 37: Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con la stringa "impatto rilevante".

Considerando il fatto che molte delle aree minerarie dismesse e relative discariche si trovano in zone carsiche che presentano in molti casi evidenti fatturazioni, la situazione potrebbe essere peggiore di questa nella realtà. Si è scelto per questo motivo di effettuare un'ulteriore analisi facendo ricadere tutte le aree carsiche all'interno della stringa del carsismo e non nella stringa dell'impatto rilevante come fatto in precedenza.

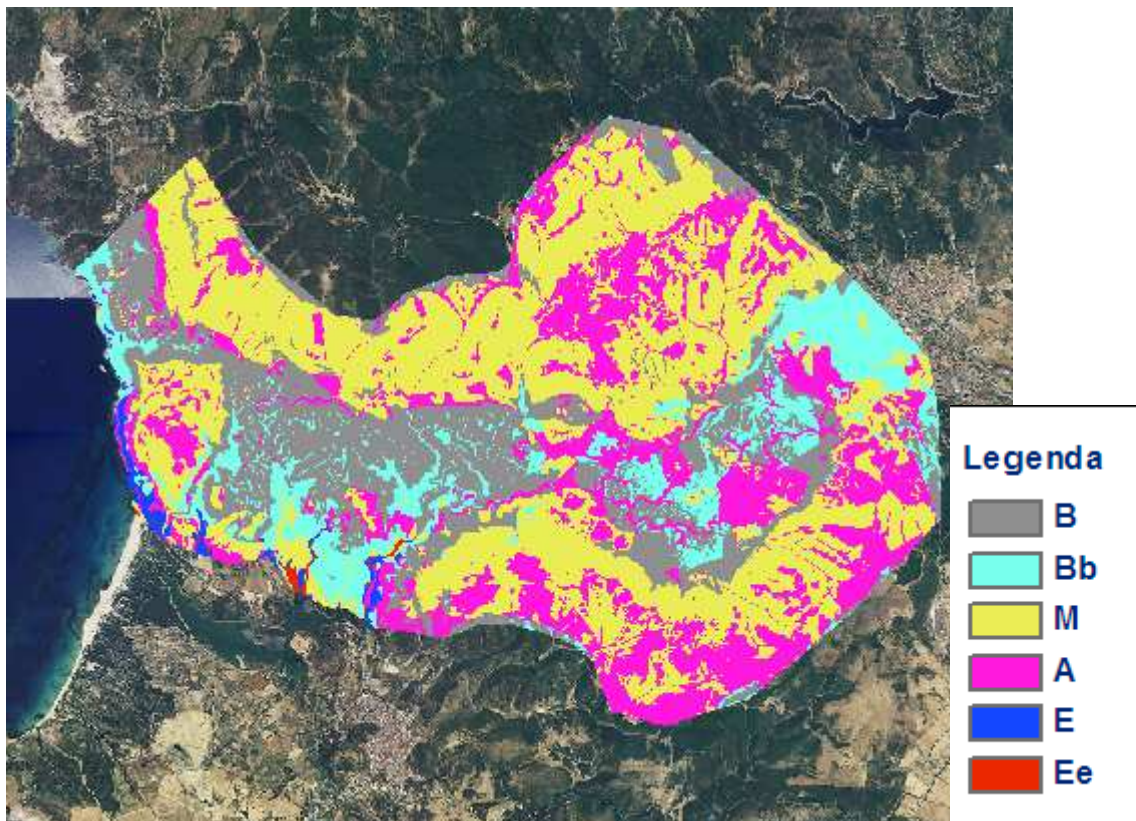


Figura 38: Carta della vulnerabilità considerando le aree minerarie dismesse ricadenti in aree carsiche all'interno dell'impatto "carsismo" e non della stringa dell'"impatto rilevante".

E' notevole la differenza con la carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta precedentemente (fig.37). In questa nuova elaborazione vi sono zone a vulnerabilità alta, corrispondenti alle zone carsiche degradate e addirittura zone a vulnerabilità elevata e molto elevata in corrispondenza della costa o di zone paludose. Le zone a vulnerabilità media corrispondono con le aree carsiche poco degradate. Le zone dove sono presenti gli scisti e le rocce ignee e le zone urbanizzate risultano appartenenti alle classi basse di vulnerabilità.

Per poter effettuare un raffronto con gli altri metodi di valutazione della vulnerabilità è stata effettuata una riclassificazione accorpando le classi bassa e molto bassa in un'unica classe, così come le classi elevata e molto elevata.

La carta che si è ottenuta con questa riclassificazione presenta la maggior parte del territorio (coincidente con le aree ricadenti nei complessi carsici) con una classe di vulnerabilità medio alta, il resto ricade in classe di vulnerabilità bassa.

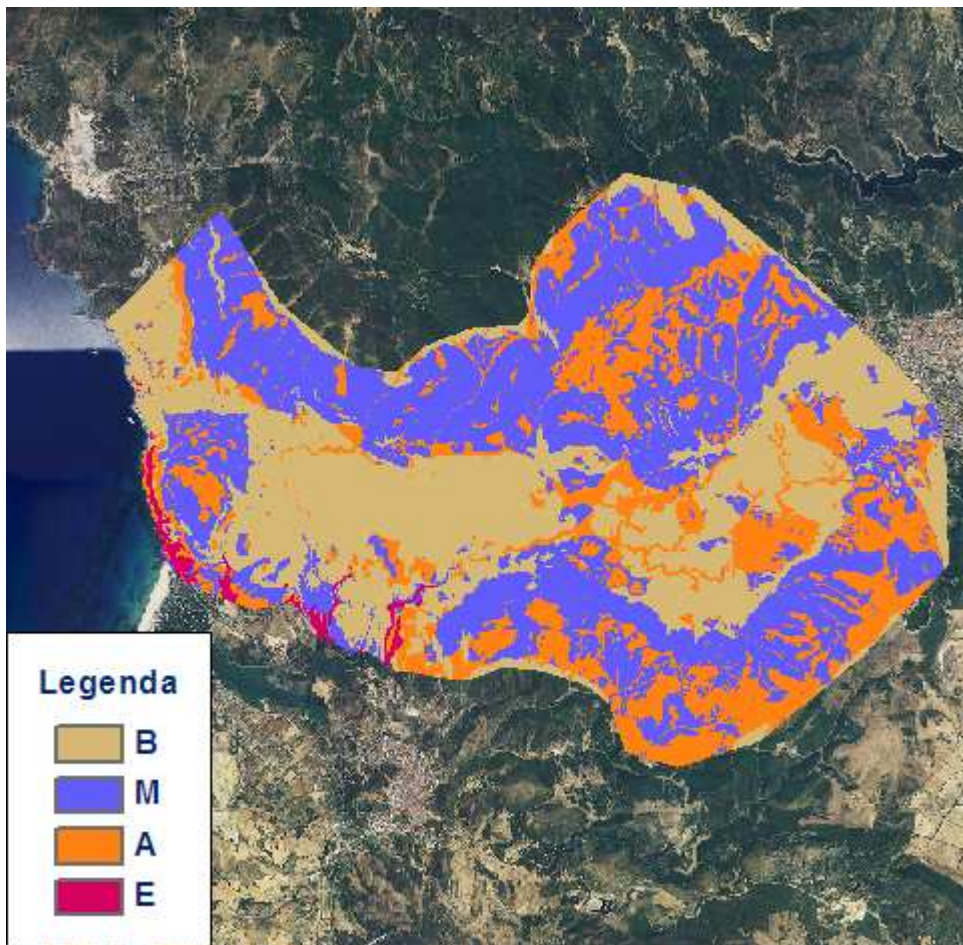


Figura 39: Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con la riclassificazione della legenda in quattro classi per consentire un più agevole confronto con gli altri metodi utilizzati per valutare la vulnerabilità.

Capitolo 8 - APPLICAZIONE DEL METODO COP ALL'AREA IN ESAME

8.1 Determinazione dei parametri e relativi punteggi

Così come nell'applicazione del metodo SINTACS, è necessario suddividere il territorio in esame in aree discrete: si è scelto di attuare tale suddivisione attraverso la stessa griglia regolare a maglie quadrate da 10 m di lato, in modo che le carte fossero sovrapponibili. L'area studiata risulta quindi discretizzata in elementi finiti quadrati (EFQ).

Per la costruzione dei tematismi sono stati utilizzati anche in questo caso i software Autocad e Arc GIS 9.3 - Arcmap, seguendo lo stesso procedimento utilizzato in precedenza.

8.2 Parametro O (Overlying layers – sovrapposizione strati informativi).

Il parametro O è il frutto della combinazione di due sub fattori: il sub fattore suolo O_s , e il sub fattore O_L litologia.

Il subfattore O_s ingloba la valutazione di diversi parametri relativi alla matrice organica del suolo, all'interno della quale avvengono i processi di attenuazione, tessitura, grana, distribuzione dimensionale e spessore.

La valutazione del sub fattore O_L riflette la capacità di attenuazione entro gli strati della zona insatura. Esso si valuta a seconda del tipo di roccia, della porosità efficace e della conducibilità idraulica, il grado di fratturazione (ly), lo spessore di ogni strato (m) e le eventuali condizioni di confinamento dell'acquifero (cn).

8.2.1 Subfattore O_s (suolo).

La valutazione del parametro O_s è stata effettuata sulla base della carta pedologica di prof. Aru del 1990. Lo spessore e la tipologia del suolo sono stati dedotti in parte dalla conoscenza del territorio e da sopralluoghi e in parte dai dati presenti nel foglio degli attributi della carta pedologica dove sono indicati anche gli spessori del suolo. Il limite di questa carta è, come è già stato evidenziato, il basso dettaglio dato dalla scala a 1:250.000.

La tabella sottostante riporta i punteggi attribuiti alle diverse aree a seconda della tessitura e dello spessore del suolo. Ai paesaggi urbanizzati è stato attribuito un punteggio pari a zero.

Tessitura					
Spessore		Argilla	Limo	Franco	Sabbia
	> 1 m	5	4	3	2
	0.5 – 1m	4	3	2	1
	<0.5 m	3	2	1	0

Tabella 46: Punteggi relativi al subfattore Os, attribuiti in funzione dello spessore e della tessitura del suolo.

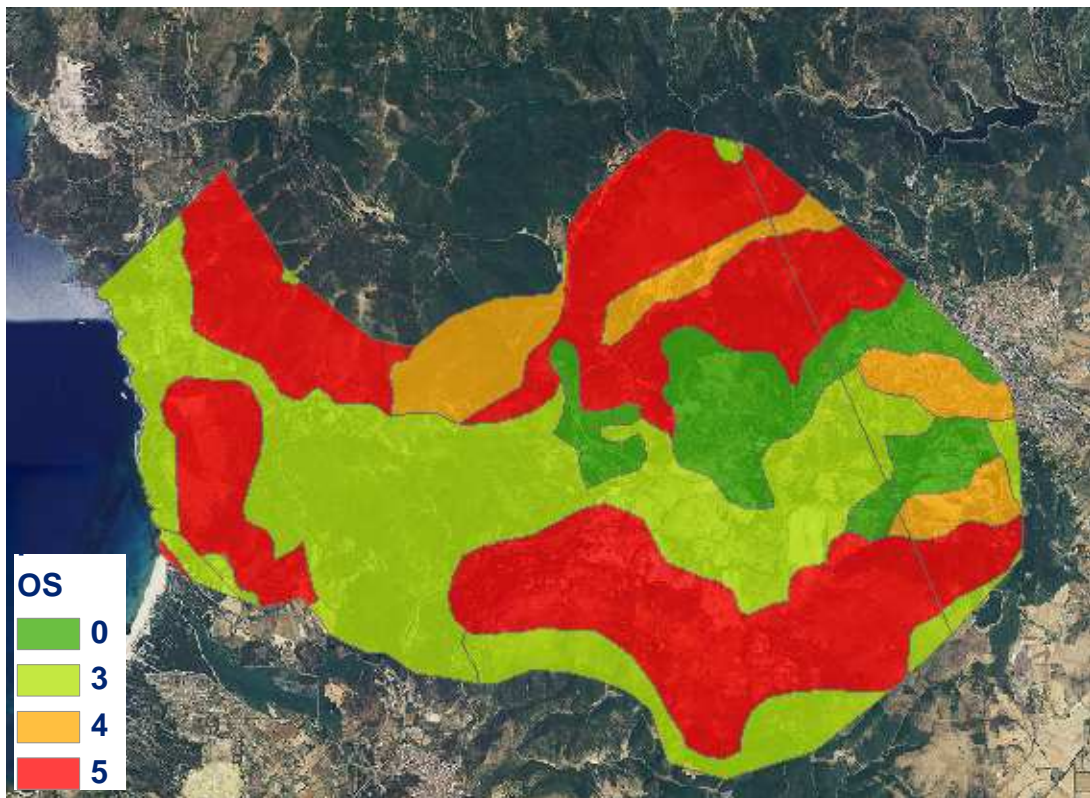


Figura 40: carta del sub fattore Os del metodo COP.

8.2.2 Subfattore O_L (litologia).

Il sub fattore O_L è il risultato del prodotto tra tre parametri : il punteggio attribuito alla litologia e alla fratturazione, il punteggio attribuito allo spessore dello strato litologico e il punteggio attribuito alle condizioni di confinamento dell'acquifero.

Il tipo di litologia è desunto dalla carta pedologica, gli spessori medi degli strati si sono desunti dalla tabella del Civita (1983).

Comparazione fra metodiche per la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi.
Applicazione all'acquifero del Sulcis Iglesiente

Complessi idrogeologici	Sub-complessi	Età geologica	Potenza media	Caratteristiche litologiche e giaciture	Caratteristiche idrogeologiche	Ruolo idrostrutturale
Alluvioni		Quaternario	Var.	Ghiaie, ghiaie sabbiose, argille ghiaiose, argille sabbiose, conglomerati a cemento argilloso; panchina e areniti.	Permeabilità variabile, alta negli orizzonti più grossolani e dilatati, bassa in tutti i livelli più o meno argillosi.	Alcune piccole falde idriche di discreta produttività nelle alluvioni ghiaiose attuali e recenti.
Terrigeno post-Triassico		Paleogene	150	Marne policrome, arenarie e conglomerati. Conglomerati, arenarie con intercalazioni di argille lignitifere e calcari.	Permeabilità complessivamente molto scarsa per fessurazione.	Impermeabile relativo, costituisce soglia di permeabilità a N dell'anello metallifero.
Carbonatico superiore		Trias	30	Calcari, calcari dolomitici, dolomie, brecce e conglomerati poligenici, stratificati, in giacitura sub-orizzontale.	Alto grado di permeabilità per fessurazione e carsismo.	Struttura carsica indipendente e limitata (Altopiano di Campumari).
«Filoni»		Paleozoico sup.	Var.	Filoni basaltici, lamprofirici, a quarzo prevalente, porfidi, ecc. Quarzo, calcite concrezionare, tasche calaminari, ecc.	Alto grado di compattezza equivalente a scarsa permeabilità, salvo nei casi di discontinuità dovute alla tettonica.	Compartimentazione «a quinte» degli acquiferi principali (carsici) con setti a bassa permeabilità.
Magmatico	Porfidi	Paleozoico sup.	Var.	Porfidi rosati a quarzo e ortoclasio, poco fessurati.	Permeabilità media per fessurazione.	Moderatamente acquifero.
	Graniti		Var.	Graniti rosa, granodioriti, tonaliti, ecc.	Idem c.s.	Moderatamente acquifero.
Terrigeno superiore	Scisti	Ordoviciano	100-200	Argilloscisti arenacei, argilliti, siltiti, con scistosità pronunciate e metamorfismo di contatto con i graniti.	Permeabilità complessiva scarsa per fessurazione o impermeabili.	Impermeabile relativo, limita idrogeologicamente gli acquiferi carbonatici in molte zone dell'area in studio.
	Conglomerati		0-500	Conglomerato poligenico a cemento ematitico-arenaceo.		
Scistoso intermedio	Argilloscisti di Cabitza	Cambrico medio e superiore	400	Successione di argilloscisti e siltiti laminati e spesso intensamente pieghettati.	Permeabilità praticamente nulla.	Impermeabile relativo, genera numerose soglie di permeabilità limitando il complesso carbonatico antico.
Carbonatico antico	Calcare nodulare	Cambrico medio	20-40	Sottili alternanze calcaree ed argillose con graduale prevalenze delle argilliti verso l'alto.	Permeabilità per fessurazione decrescente verso l'alto sino all'annullamento.	Limite di permeabilità indefinito.
	Calcare ceroide	Cambrico inferiore	100-600	Calcare ceroide chimicamente puro, a grana finissima e giacitura prevalentemente massiccia, intensamente fessurali e carsificati.	Permeabilità molto elevata per fessurazione e carsismo attivo.	Acquifero principale con alta capacità di infiltrazione e di ingestione, variamente compartimentato per effetti strutturali e per la presenza di «filoni».
	Dolomia massiccia	Cambrico inferiore	100-250	Dolomia calcarea saccaroide, in giacitura massiccia.	Permeabilità medio-alta di fessurazione e carsismo.	Acquifero con circolazione apparentemente limitata alla rete di fratture più recenti e meno concrezionate ed al non elevato numero di cavità carsiche. Comportamento idrodinamico solidale con la parte calcarea.
	Dolomia rigata	Cambrico inferiore	50-250	Ritmiche successioni ciclotemiche di dolomie stromatolitiche, dolomie calcaree e paleosuoli ferrosi.	Permeabilità medio-bassa per fessurazione e scarso carsismo.	Limite di permeabilità indefinito.
Terrigeno inferiore		Cambrico inferiore	800	Alternanze di argilliti, siltiti, arenarie, scisti arenacei. Intercalazioni di livelli calcareo-dolomitici nel terzo superiore.	Permeabilità da nulla a scarsa per fessurazione. Acquiferi calcarei intercalari.	Impermeabile relativo con circolazione modesta in superficie, drenata dai livelli carbonatici (acquiferi indipendenti).

Tabella 47: Spessori medi relativi ai complessi litologici dell'area (Civita, 1983).

Layer index	Valore	Confining conditions	Valore
0 - 250	1	Confinato	2
250 - 1000	2	Semi-confinato	1,5
1000 - 2500	3	Non confinato	1
250 - 10000	4		
>10000	5		

Tabella 48: Punteggi relativi ai parametri necessari per il calcolo del subfattore O_L

Nel seguito è riportata la carta del subfattore O_L .

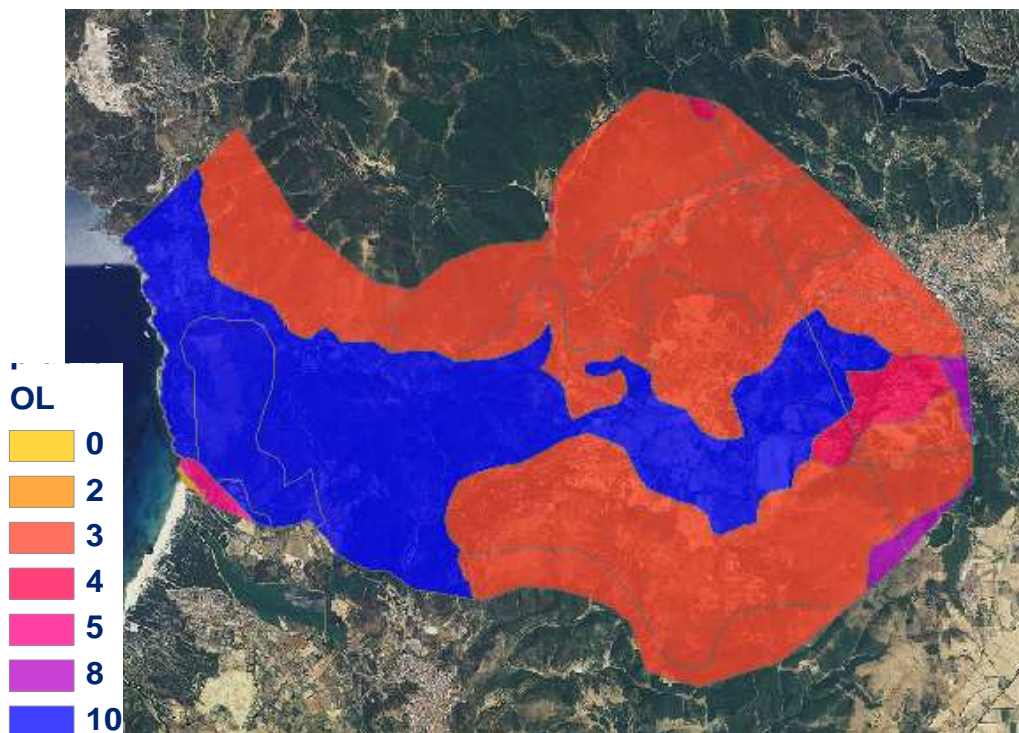


Figura 41: Carta del sub fattore O_L .

8.2.3 Carta dei punteggi del fattore O.

Il punteggio relativo al fattore O si ottiene dalla somma dei due sub fattori O_s e O_L .

$$O = O_s + O_L$$

Sulla base del valore assunto dalla cella corrispondente si assegna il valore della protezione attribuita allo strato litologico sovrastante.

O score	Valore protezione
1	Very low
2	Low
2 - 4	Moderate
4 - 5	High
8 - 15	Very high

Tabella 49: Valori di protezione corrispondenti al punteggio del sub fattore O.

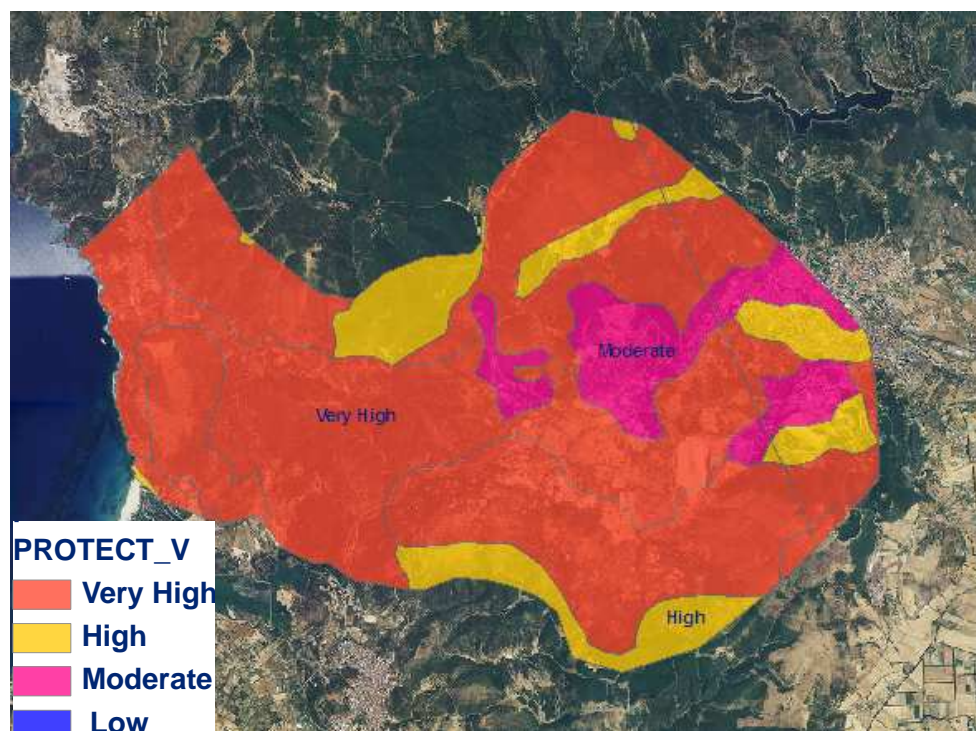


Figura 42: Carta dei punteggi relativi al fattore O.

Da questa elaborazione si ricava una carta in cui risulta che la maggior parte del territorio ha caratteristiche tali da consentire un'elevata protezione degli strati sovrastanti rispetto a quelli sottostanti. Si ha una protezione *moderata* solo in corrispondenza delle aree urbanizzate.

8.3 Carta dei punteggi del fattore C (Concentration of flow).

Il fattore C rappresenta la capacità dell'acqua di aggirare gli strati protettivi sovrastanti (Daly et al. 2002). Il fattore C rappresenta il grado con cui le precipitazioni o un vicino acquifero si infiltrano concentrandosi in un inghiottitoio, bypassando la zona non satura. Su questo principio si basano anche i metodi PI (Goldscheider et al. 2000) e il metodo EPIK (Doerfliger e Zwahlen 1998).

Gli scenari contemplati dal metodo sono due:

1. Aree che presentano inghiottitoi, doline e corsi d'acqua superficiali che si riversano in condotti carsici o all'interno di fratture;
2. Aree che non presentano discontinuità, inghiottitoi o doline.

Entrambi gli scenari sono fortemente dipendenti da parametri quali la pendenza dell'area e la presenza di vegetazione.

La posizione di inghiottitoi, fratture, faglie e grotte di origine carsica è stata ricavata dalla cartografia geologica regionale. (Il Progetto "Carta Geologica di base della Sardegna in scala 1:25.000" ha realizzato una carta geologica omogenea ed estesa a tutta l'Isola, conforme agli obiettivi di pianificazione del Piano Paesaggistico Regionale (PPR) ed alle indicazioni del Servizio Geologico d'Italia. I layer in formato shape della carta geologica relativa all'anno 2008 disponibili sono di tipo areale. lineare, puntuale). La posizione delle grotte è stata individuata digitalizzando e georeferenziando i dati ricavati dal catasto delle grotte censite dai gruppi speleologici.

Per ciò che riguarda lo scenario 1, il calcolo del punteggio si effettua considerando il prodotto tra un punteggio dato dalla distanza dell'area di ricarica dall'inghiottitoio, un punteggio dato dalla copertura vegetale espressa in percentuale e un punteggio dato dalla distanza dell'area di ricarica dal letto del torrente carsico superficiale.

Lo scenario 2 considera il resto dell'area dove non sono presenti né discontinuità né faglie, inghiottitoi o torrenti e assegna un punteggio variabile a seconda della tipologia degli strati sovrastanti: punteggi maggiori per terreni impermeabili con forte pendenza e copertura vegetale densa e punteggi minori per rocce carbonatiche fessurate pendenza bassa e copertura vegetale assente.

Nel seguito si riporta la carta con le posizioni degli elementi di discontinuità dello strato protettivo sovrastante.

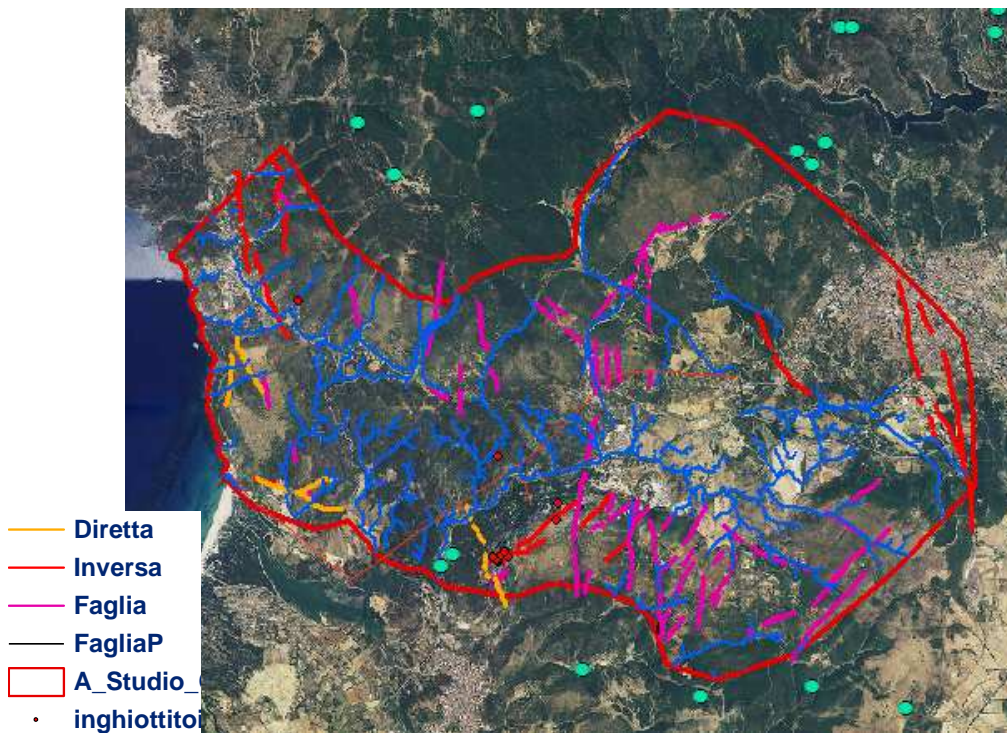


Figura 43: Carta delle faglie e degli inghiottitoi derivata dalla carta geologica regionale.

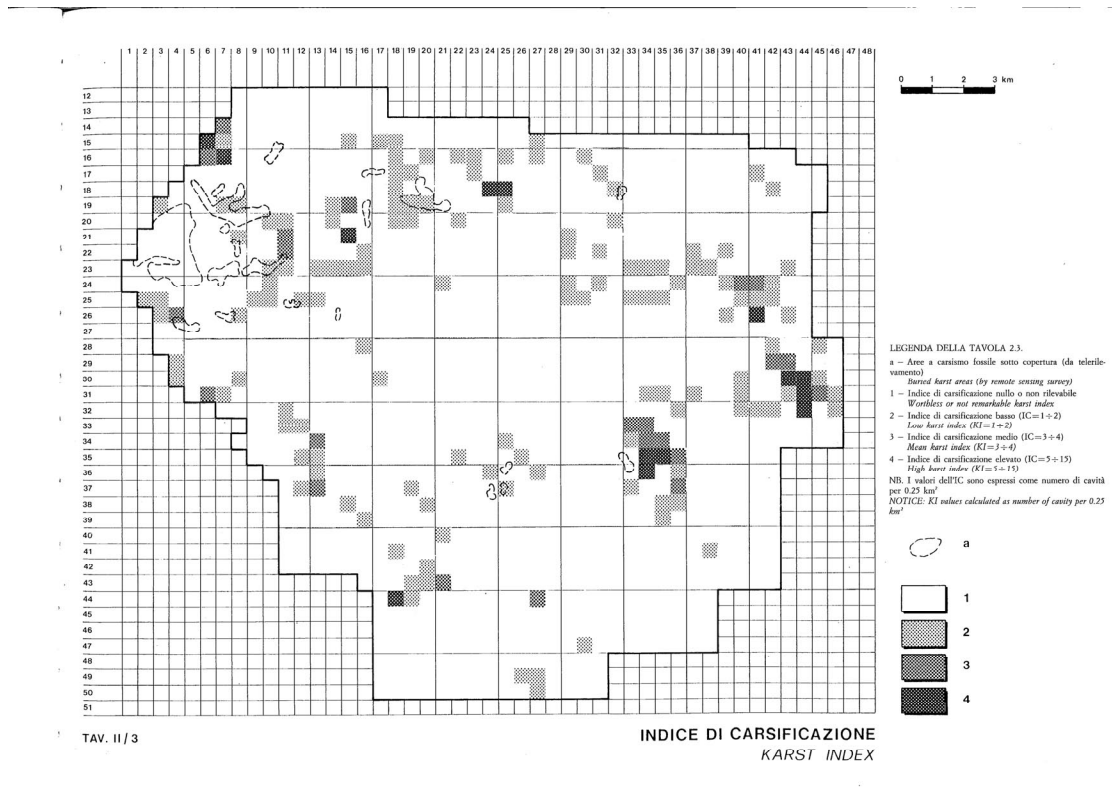


Figura 44: Indice di carsismo dell'area relativa all'intero acquifero (Civita, 1983)

Il fattore C, che indica la riduzione della protezione, è dato dal punteggio attribuito cella per cella ai due scenari. Più basso sarà il valore assunto dal parametro C, più alta sarà la riduzione della protezione degli strati sovrastanti in quella determinata porzione di territorio. La tabella sottostante mostra i valori del attore C a seconda del punteggio assegnatogli.

C score	Riduzione della protezione
0- 0,2	Very high
0,2 – 0,4	High
0,4 – 0,6	Moderate
0,6 – 0,8	Low
0,8 - 1	Very low

Tabella 50: Punteggi del parametro C.

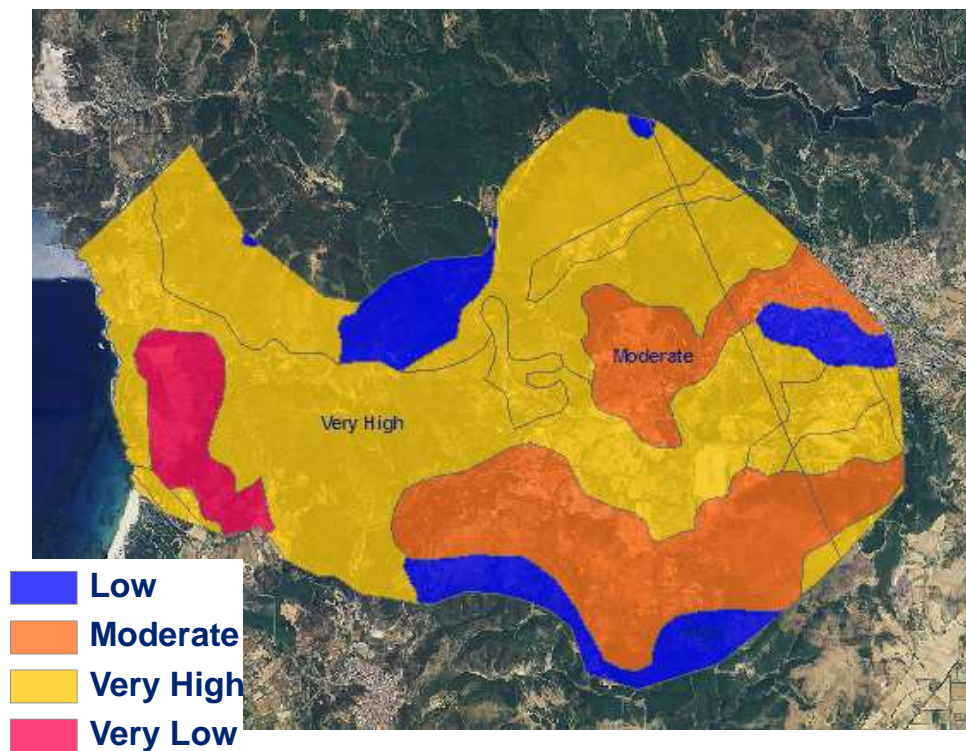


Figura 45: Carta dei punteggi relativi al fattore C.

8.4 Carta dei punteggi del fattore P (Precipitation).

Come già descritto nel paragrafo 8 il valore del parametro P è dato dalla somma dei punteggi di due sub fattori: il subfattore P_Q che rappresenta la quantità di pioggia media annua all'interno del bacino e il sub fattore P_I [(mm/giorno)/n° giorni piovosi all'anno].

I dati meteorologici di base sono quelli del SISS dal 1922 all'anno 1992 già utilizzati per le elaborazioni del metodo SINTACS.

I valori del punteggio P sono riportati nella tabella sottostante.

P score	Riduzione della protezione
0,4 – 0,5	Very high
0,6	High
0,7	Moderate
0,8	Low
0,9 - 1	Very low

Tabella 51: Punteggi attribuiti al fattore P e al corrispondente valore relativo alla riduzione della protezione.

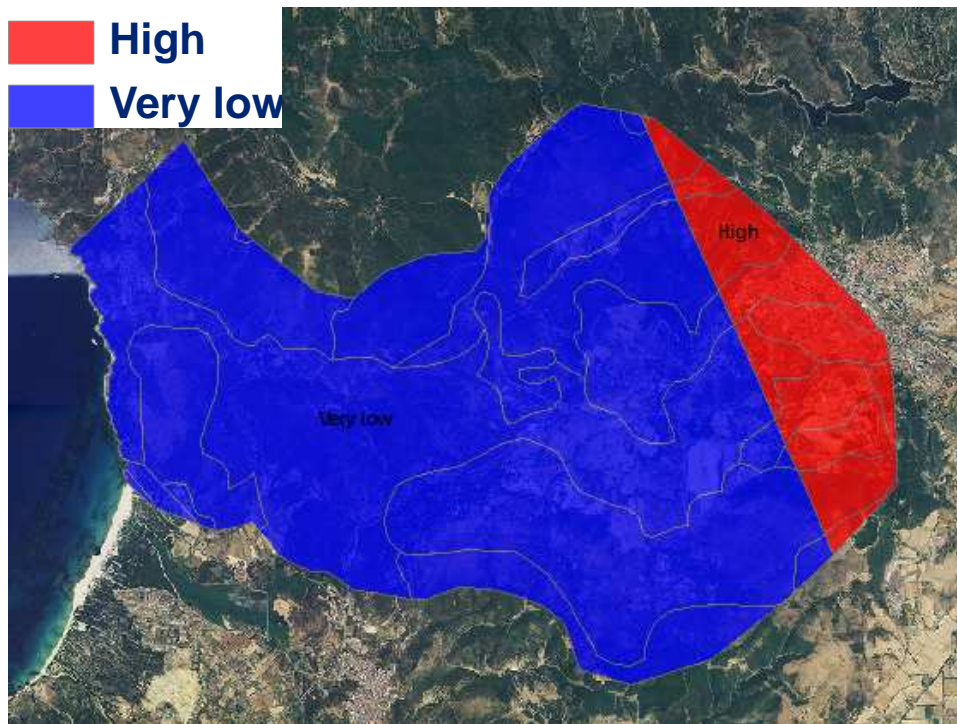


Figura 46: Carta della riduzione della protezione fornita dai punteggi del parametro P.

Dalla carta dei punteggi del parametro P calcolata dai dati SISS con il metodo dei topoi, si evince che la protezione è ridotta nella porzione di topoi ricadente nell'area della stazione meteo di Iglesias. La riduzione della protezione è molto bassa nella porzione di topoi relativa a Monteponi.

8.5 Carta dei punteggi dell'indice COP.

L'indice COP è dato dal prodotto dei punteggi attribuiti ai tre parametri CxOxP. Il fattore che ha maggior incidenza sui punteggi finali è il sub fattore O, dal quale dipendono tutti gli altri.

Nella tabella sottostante sono riportate le classi di punteggio attribuibili all'indice COP ed il corrispondente valore di vulnerabilità associato.

COP index	Riduzione della protezione
0 – 0,5	Very high
0,5 - 1	High
1 - 2	Moderate
2 - 4	Low
4 - 15	Very low

Tabella 52: Punteggi relativi all'indice COP.

Le zone che ricadono nella classe Very Low corrispondono alle zone in cui i fattori C e P hanno poca influenza sulla protezione. Le classi moderate e basse si riferiscono alle zone dove la protezione è bassa di media, nelle quali C e P non hanno una influenza decisiva sulla vulnerabilità (influenza che hanno in alta e altissima classe).

La carta ottenuta mostra che quasi la totalità del territorio è soggetta ad un'altissima vulnerabilità all'inquinamento e che solo qualche zona, dove sono presenti dolomie o calcare non carsificato presenta vulnerabilità bassa o bassissima. La carta è riportata nel seguito.

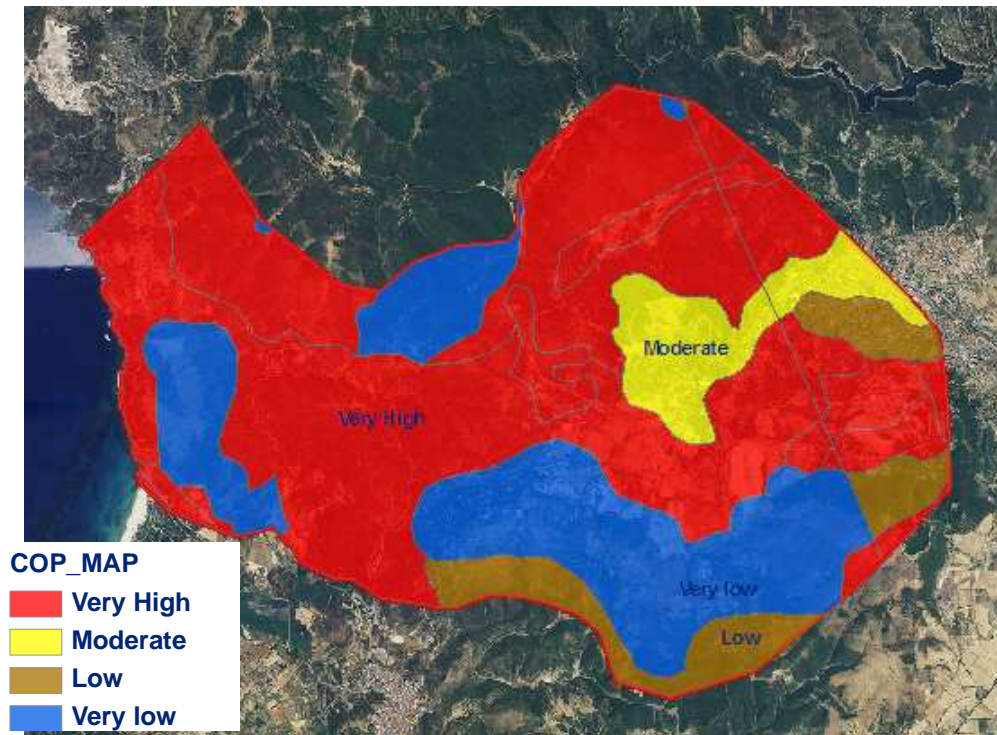


Figura 47: Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con l'applicazione dell'indice COP.

Il risultato ottenuto risulta compatibile con la realtà, anche se le zone che sono risultate a vulnerabilità molto bassa, dovrebbero essere inquadrate nella classe di vulnerabilità media.

Capitolo 9 - APPLICAZIONE DEL METODO EPIK ALL'AREA IN ESAME

9.1 Determinazione dei parametri e relativi punteggi

Il metodo EPIK è stato applicato per il calcolo dei parametri con una metodologia analoga a quella applicata nei metodi precedenti. Come già descritto nel capitolo 2 il metodo EPIK, che è caratterizzante degli acquiferi carsici si basa sui seguenti quattro parametri:

- E **Epikarst**
(Epicarso)
- P **Protective Cover**
(Copertura protettiva del suolo)
- I **Infiltration Condition**
(Condizioni d'Infiltrazione)
- K **Karst Network Development**
(Grado di sviluppo della rete carsica).

Per tutti e quattro i parametri del metodo si sono costruite le rispettive mappe, utilizzando, per un'analisi dettagliata, un modello raster che prevede la suddivisione del territorio carbonatico in studio, in celle quadrate di lato pari a 10 m.

9.2 Epikarst

Il metodo prevede che la determinazione di questo parametro avvenga attraverso dei parametri morfologici facilmente rilevabili dall'analisi territoriale di superficie. Infatti non esistono oggi degli studi approfonditi che riguardano proprio lo sviluppo dell'epicarso, quindi l'unico modo per valutarne l'influenza ai fini della valutazione della vulnerabilità, è proprio quello di eseguire un'analisi sui parametri direttamente collegati all'epicarso, e facilmente rilevabili dall'analisi morfologica, e valutarlo in base ad esso. Il metodo prevede che per l'analisi morfologica del territorio in esame, si utilizzino basi cartografiche quali ortofoto, carte topografiche e carte geologiche, da sovrapporre l'una all'altra, in modo da effettuare un'analisi il più possibile precisa. Su queste basi cartografiche, tramite

gli strumenti software quali Autocad e GIS, è stato effettuato il lavoro di rappresentazione degli elementi carsici quali doline, faglie principali, sorgenti, grotte e inghiottitoi, cercando il più possibile di rispettarne le posizioni e le dimensioni.

Una volta che sono stati digitalizzati gli elementi morfologici propri dell'ambiente carsico, si è proceduto alla loro elaborazione tramite GIS, al fine di assegnare ognuno dei suddetti elementi, ad una delle tre classi nelle quali è stato suddiviso l'attributo E (tab. 53).

Epicarso	Classe Epikarst	Morfologia Carsica
Altamente sviluppato	E1	Shaft, sinkholes o doline (da tutti i tipi di genesi), campi karren, sorgenti, grotte, inghiottitoi
Moderatamente sviluppato	E2	Zone intermedie nell'allineamento di doline, valli secche
Piccolo o Assente	E3	Assenza di fenomeni morfologici propri dell'ambiente carsico, zone a bassa densità di fatturazione

Tabella 53: Classi dell'attributo E (Epikarst)

L'elaborazione ha così prodotto una carta, per tale parametro, che evidenzia le tre diverse aree appartenenti alle relative classi (fig. 48).

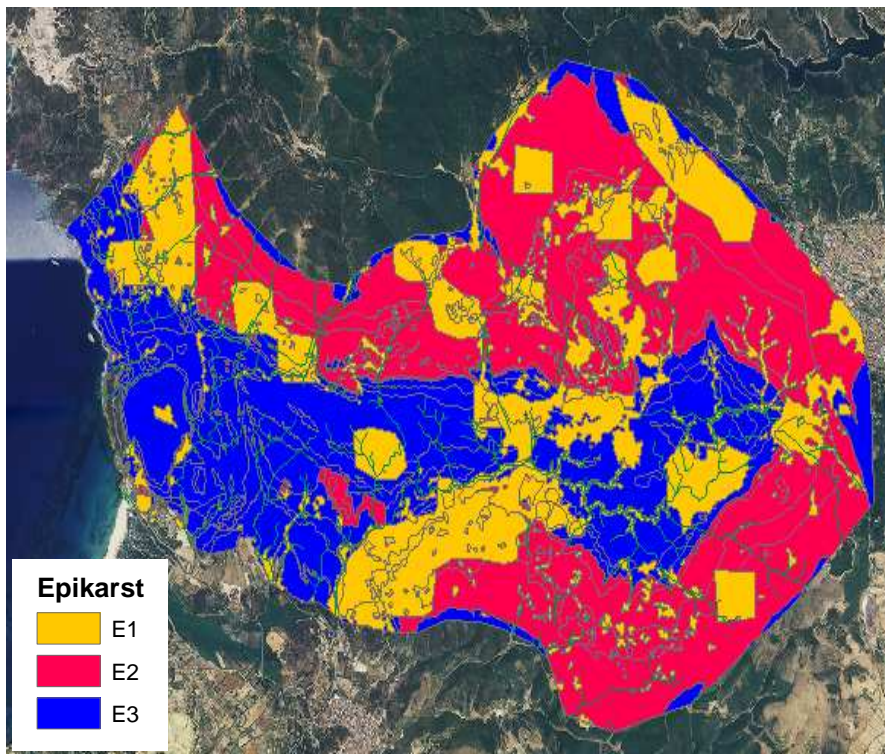


Figura 48: Carta del parametro Epikarst

9.3 Protective Cover

La determinazione del parametro protective cover sarebbe dovuta avvenire su basi esclusivamente pedologiche. Sarebbe stato necessario avere cioè, dei dati di base completi sulle caratteristiche rappresentative del suolo nel territorio in esame in termini di spessore e orizzonti geologici, e da questi, in base alla tabella di conversione dell'attributo (tab. 54), riportata di seguito, determinare le classi di vulnerabilità.

Ma la mancanza, per quanto riguarda il territorio del Sulcis in particolare e di tutta la Sardegna in generale, di un qualche studio di dettaglio di stampo pedologico reperibile, ha impedito di utilizzare al meglio la metodologia. In Sardegna infatti, lo studio che fornisce informazioni sulla distribuzione dei suoli, è lo studio di Aru & Baldaccini, la cui scala di elaborazione è l'1:250.000 già utilizzato negli altri due metodi.

Se si fosse utilizzato esclusivamente questo studio, si sarebbero avuti problemi nell'assegnazione delle classi nelle celle in cui è stato suddiviso il territorio del piccolo anello metallifero, nel senso che la maggior parte dello stesso, in particolare l'intera zona carbonatica, sarebbe appartenuta a due sole classi. Inoltre, le informazioni dello studio di Aru & Baldaccini sono troppo generiche, al punto che non quantificano lo spessore del suolo, ma ne danno solo un'indicazione qualitativa, ovvero indicano solo se il suolo presente è poco profondo (spessore minore di 50 cm), mediamente profondo (spessore compreso fra 50 e 100 cm) o profondo (spessore maggiore di 100 cm).

Risulta così evidente quanto importante fosse la necessità di ovviare a questo inconveniente. Per fare ciò, si è invece classificato il suolo per via indiretta, utilizzando la carta dell'uso del suolo regionale (CORINE LAND COVER, 2008).

Copertura del Suolo	Classi Protective Cover	Caratterizzazione	
		A. Suolo direttamente giacente sul calcare o su strutture geologiche ad alta permeabilità, per esempio detriti di falda e depositi glaciali	B. Suolo giacente su strutture geologiche a bassa permeabilità, per esempio argilla e silt
Assente	P1	0-20 cm di suolo	0-20 cm di suolo su strutture che hanno uno spessore minore di 1 m
Intermedia P1-P3	P2	20-100 cm di suolo	20-100 cm di suolo su strutture che hanno uno spessore minore di 1 m
Intermedia P2-P4	P3	100-200 cm di suolo	<100 cm di suolo o >100 cm di suolo e spessore della struttura geologica a bassa permeabilità >1m
Presente	P4	>200 cm di suolo	>100 cm di suolo e struttura detritica di bassissima conducibilità idraulica o spessore dello strato impermeabile (per esempio argilla) >8 m

Tabella 54: Classi dell'attributo P

Laddove sono presenti la macchia mediterranea o un bosco di lecci, o ancora dei terreni coltivati a vite, è evidente che lo spessore del suolo non può essere limitato, e a questi terreni si è deciso di assegnare la classe P4, corrispondente ad uno spessore del suolo maggiore di 100 cm. Nella stessa classe P4 sono state inserite le aree antropizzate.

Laddove, invece, è presente roccia nuda o scarsa vegetazione, risulta altresì evidente l'impossibilità della presenza di un suolo, e a queste zone si è assegnata la classe P1, corrisponde ad uno spessore del suolo inferiore ai 20 cm. Gli altri usi del suolo sono stati assegnati alle classi P2 e P3 con considerazioni analoghe. Da questa analisi si sono tenute fuori quelle zone per le quali la Carta dei Suoli di Aru & Baldaccini dava un'indicazione più precisa dello spessore del suolo, e in questo caso sono state assegnate direttamente le classi dell'attributo. In base alla distribuzione dell'uso del suolo nel territorio del Sulcis, e alle poche informazioni deducibili dalla Carta dei Suoli, si è riusciti ad assegnare alle zone del territorio le classi dell'attributo P, ottenendo la carta della fig. 49.

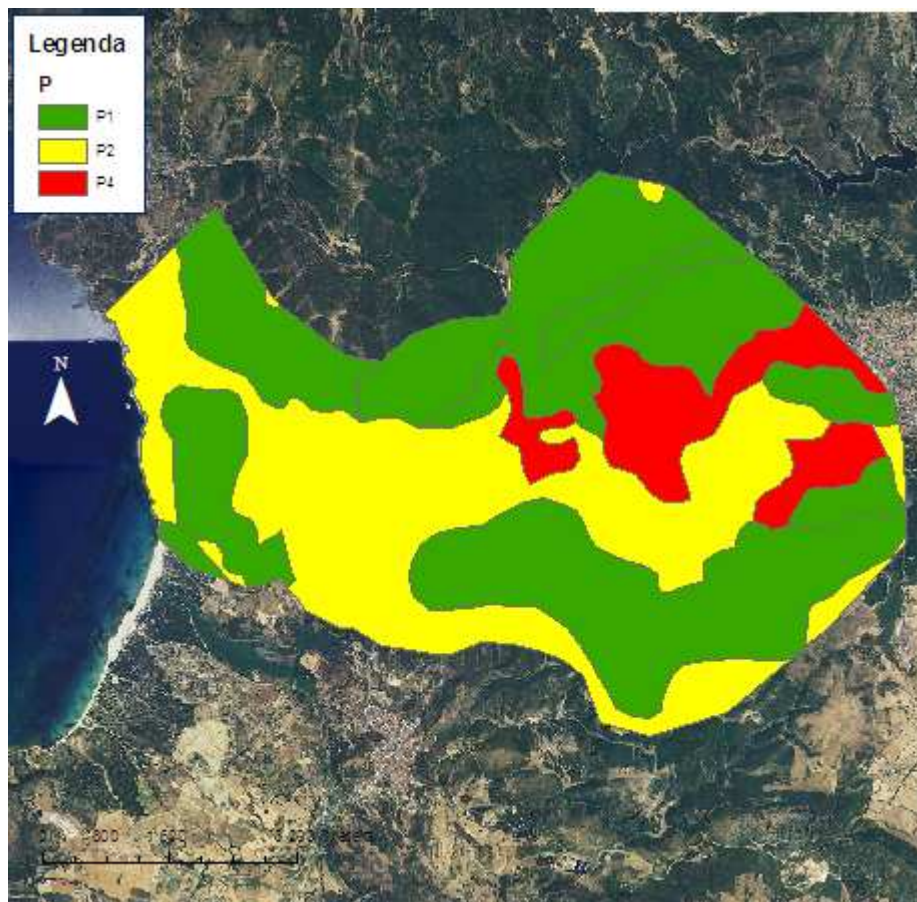


Figura 49: Carta del parametro Protective Cover

9.4 Infiltration Condition

Si è già visto che il parametro I riguarda le condizioni di infiltrazione nell'acquifero carsico, condizioni d'infiltrazione che possono passare da concentrata a diffusa (tab. 55).

Condizioni di infiltrazione	Classi Infiltration Condition	Caratterizzazione
Concentrata	I1	Correnti perdenti temporanee o perenne – correnti temporanee o perdenti alimentanti inghiottitoi e doline – aree d'influenza (codule) di queste correnti appena menzionate, includenti sistemi di drenaggio artificiale
Intermedia I1-I3	I2	Aree d'infiltrazione concentrata (senza sistemi di drenaggio artificiale) con pendenza >10% per campi coltivati, e >25% per prati e pascoli
Intermedia I2-I4	I3	Aree d'infiltrazione concentrata (senza sistemi di drenaggio artificiale) con pendenza <10% per campi coltivati, e <25% per prati e pascoli
Diffusa	I4	Il resto del territorio

Tabella 55: Classi dell'attributo I (Infiltration Condition)

Alla classe I1 appartengono tutte quelle porzioni di territorio che presentavano i losing streams, ovvero le correnti perdenti, temporanee o perenni. Queste aree sono rappresentate dalle incisioni fluviali, nelle quali sono distribuiti con una continuità maggiore che altrove, i punti di assorbimento dell'acqua. In questa porzione di territorio però non ne sono presenti. Le classi I2 e I3 sono state valutate in funzione di due parametri quali la pendenza e l'uso del suolo. Le due carte (uso del suolo e pendenza) sono le stesse utilizzate per i metodi di valutazione della vulnerabilità visti nei capitoli precedenti.

La Carta dell'Uso del Suolo non è stata utilizzata così come acquisita, ma è stata riadattata in modo tale da renderla compatibile con quello che richiede il metodo EPIK.

Il limite che stabilisce il passaggio fra le classi I2 e I3, è differente a seconda delle categorie di uso del suolo. Si assume, infatti, che all'aumentare della pendenza, le aree più vulnerabili sono quelle più povere di vegetazione, essendo questa la condizione per la quale la ricarica dell'acquifero carsico è più sostanziosa che non nel caso in cui la vegetazione abbia una maggiore distribuzione. Quindi, essendo la categoria "Campi coltivati" quella che gode di minore densità a parità di estensione territoriale, se ne deduce che questa, a parità di pendenza, possiede un coefficiente di deflusso maggiore rispetto alla categoria Pascoli, e quindi il limite fra le classi I2 e I3 è stabilito alla pendenza del 10%. Alla categoria Boschi e foreste, che comprende tutto il territorio rimanente, escludendo cioè quelle aree del territorio assegnate alle classi I1, I2 e I4, è stata assegnata la classe I4, che rappresenta la situazione più favorevole di ricarica diffusa, e quindi maggiore protezione per l'acquifero carsico. Nella tabella sottostante sono riportati i valori dei coefficienti di deflusso attribuiti alle zone corrispondenti della carta dell'uso del suolo, le differenze cromatiche indicano il passaggio tra una classe e l'altra di I.

Pendenza (%)	Foresta	Prato – Pascolo	Campi coltivati
0.5	-	0.005	0.12
1	0.01	0.020	0.13
2	0.02	0.040	0.14
4	0.04	0.070	0.23
6	0.05	0.090	0.27
8	0.06	0.110	0.31
10	0.07	0.130	0.34
15	0.08	0.170	0.40
20	0.10	0.190	0.45
25	0.12	0.220	0.50
30	0.13	0.250	0.55
35	0.14	0.270	0.59
40	0.15	0.290	0.62
45	0.16	0.310	0.65
50	0.17	0.330	0.69

Tabella 56: Coefficienti di deflusso in funzione dell'uso del suolo e della pendenza. I limiti fra le classi I2 e I3 sono messi in evidenza con una differenza di cromatismo: I3 = chiaro; I2 = scuro; I4 = rosso

La rappresentazione della carta del parametro I è data in fig. 51.

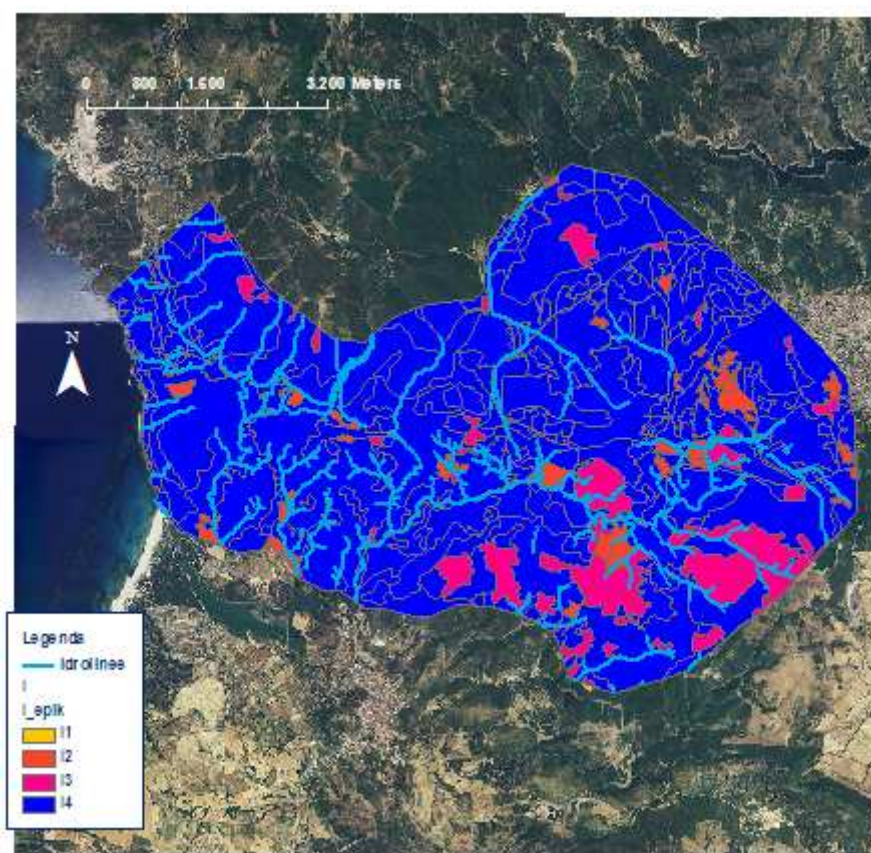


Figura 50: Carta del parametro I.

E' evidente come la quasi totalità del territorio ricada nella classe I4.

9.5 Karst Network Development

Per la valutazione di questo attributo, bisogna prendere in esame lo sviluppo della rete carsica del Sulcis iglesiente. Le conoscenze a disposizione su tale argomento, non hanno un'impronta tale da spiegare con chiarezza assoluta come sia realmente strutturata la rete carsica, ma ci sono comunque delle indicazioni di massima sufficienti tali da poter valutare l'attributo. Ricordando quanto esposto nel capitolo dedicato all'analisi idrogeologica del territorio carsico in esame, circa la presenza di SERSEM si è potuto affermare che la zona corrisponde a una rete carsica ben sviluppata, mentre la restante zona, che occupa il resto del territorio, corrisponde a una rete carsica con un grado di sviluppo minore.

Rete carsica	Classi Karst Network Development	Caratterizzazione
Rete carsica ben sviluppata	K1	Presenza di rete carsica ben sviluppata (rete con ampiezza dei canali dal decimetro al metro)
Rete carsica poco sviluppata	K2	Presenza di una rete carsica poveramente sviluppata (piccola rete di condotti o poveramente connessi o apertura dei condotti minore del decimetro)
Solo acquifero fratturato	K3	Presenza di sorgenti di emergenza attraverso terreni porosi. Acquiferi non carsici e solo fessurati

Tabella 57: Classi dell'attributo K

Nella figura 52 che segue è riportata la carta del parametro K e la classificazione assegnata alle varie zone.

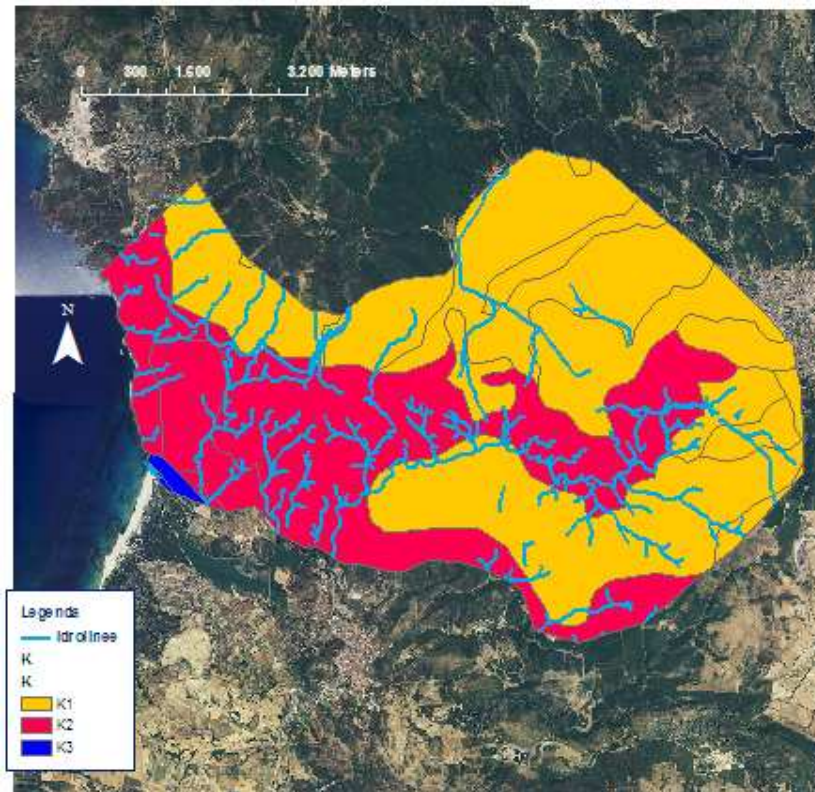


Figura 51: Carta del parametro K.

Dalla carta si vede che l'intero anello carbonatico ricade nella classe K1, in quanto presenta una rete carsica ben sviluppata. Il resto del territorio ricade quasi interamente in classe K2. Solo la zona paludosa di Funtanamare, a ridosso delle spiagge risulta in classe K3.

9.6 Assegnazione dei pesi

L'ultimo passo prima del calcolo dell'indice finale di vulnerabilità, è quello dell'assegnazione dei moltiplicatori agli attributi. Questi rendono conto dell'importanza che l'attributo assume nella valutazione dell'indice finale, e vengono stabiliti su basi totalmente empiriche. Ai parametri Epikarst e Infiltration Condition, si è attribuita una maggiore importanza rispetto agli altri due. In particolare, all'attributo P è associato il peso minore (peso=1), quindi a questo è associata l'influenza minore nella valutazione dell'indice finale di vulnerabilità. Nella tabella sottostante sono riportati i valori attribuiti ai pesi relativi a ciascun parametro.

Attributo	Coefficiente	Peso
Epikarst	A	3
Protective Cover	B	1
Infiltration Condition	C	3
Karst Network Development	D	2

Tabella 58: Coefficienti moltiplicatori (pesi) relativi agli attributi E,P,I e K

9.7 Valutazione della vulnerabilità

La valutazione dell'indice finale di vulnerabilità prevede l'applicazione della formula seguente:

$$F_{pi} = a \cdot E_i + b \cdot P_i + c \cdot I_i + d \cdot K_i ,$$

con:

$i = 1, \dots, n$, dove n è il numero di celle della griglia;

E_i, P_i, I_i, K_i = punteggi assunti dagli attributi nella cella i -esima;

a, b, c, d = pesi relativi agli attributi (costanti per ogni attributo)

F_{pi} = fattore di protezione relativo alla cella i -esima.

Il fattore di protezione viene calcolato per ogni cella della griglia, e indica, all'aumentare del punteggio, un crescente grado di protezione dell'acquifero carsico, e quindi, inversamente, minore è il punteggio di tale indice, maggiore sarà la vulnerabilità dell'acquifero, così come evidenziato nella tabella.

Classe di Vulnerabilità	Intervalli di Vulnerabilità	Gradi di Vulnerabilità
V1	$9 < lv < 19$	Molto Elevato
V2	$20 < lv < 25$	Elevato
V3	$26 < lv < 34$	Medio
V4	Appartenenza alla classe P4	Basso

Tabella 59: Intervalli di vulnerabilità e corrispondenti classi nel metodo EPIK

Questa operazione di semplice sovrapposizione delle mappe dei singoli attributi, e di moltiplicazione per il loro peso, ha prodotto la mappa di vulnerabilità finale mostrata nella figura seguente (fig. 53).

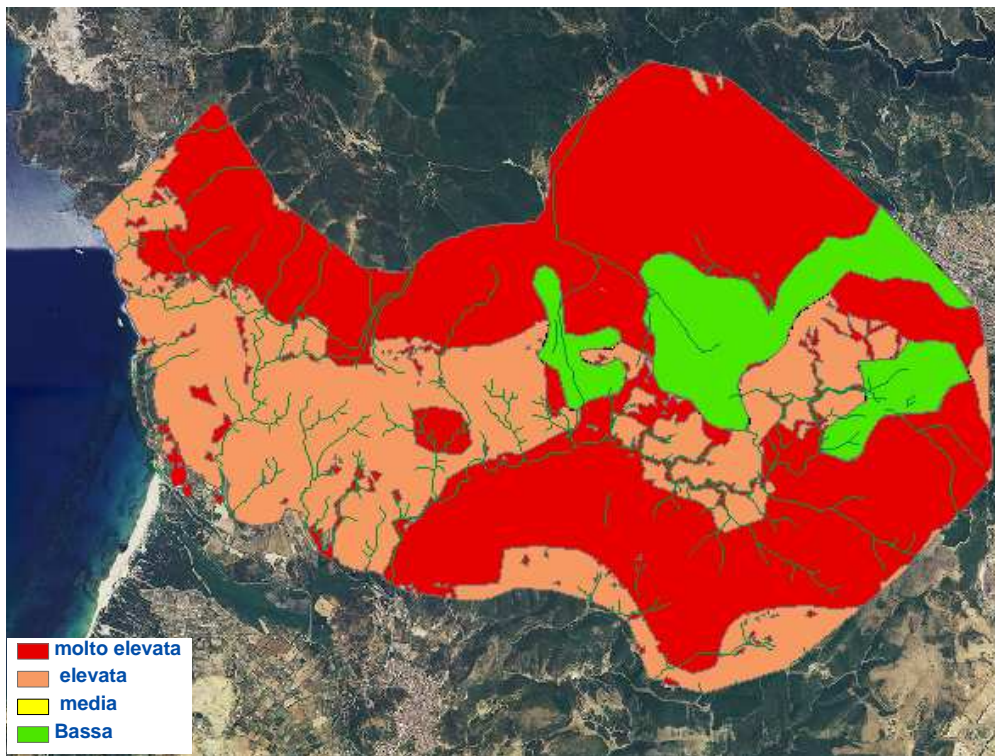


Figura 52: Carta della vulnerabilità ottenuta con il metodo EPIK.

Come si rileva dal confronto con la legenda della mappa, non sono state rilevate zone del territorio appartenenti alla classe di vulnerabilità V3 (**Media**), ovvero zone in cui è presente un suolo con spessore inferiore a 100 cm, o maggiore di 100 cm e spessore della struttura geologica a bassa permeabilità (>1m), infatti non si sono ottenute, sulla base dei dati a disposizione, zone con valore P3, nella carta relativa alla copertura protettiva.

Dall'analisi della cartografia risultante dall'overlay mapping si evince che la maggior parte dell'area in studio ricade in zone ad elevata o molto elevata vulnerabilità. In particolare l'intero anello carbonatico ricade nella classe di vulnerabilità molto elevata, ovviamente ciò è dovuto alla maggior influenza dei parametri E ed I, che assumono valori molto elevati nelle zone carsiche. La zona centrale che è occupata dagli scisti risulta invece appartenente alla classe elevata. Le aree antropizzate e le aree industriali, dove il suolo è stato classificato come impermeabile ricadono invece nella classe di vulnerabilità bassa.

Per concludere, è importante ribadire ancora una volta come la scelta dei punteggi e dei pesi assegnati agli attributi sia, in questo metodo, caratterizzata da una totale soggettività.

**Capitolo 10 - CONFRONTO TRA LE METODOLOGIE APPLICATE
PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA'**

10.1 Confronto tra i risultati ottenuti.

Dall'applicazione dei metodi per la valutazione della vulnerabilità si sono ottenute tre carte della vulnerabilità dell'acquifero in esame. Nel seguito si effettuerà un confronto tra i risultati ottenuti e si individuerà il metodo più rappresentativo della realtà in esame. Si precisa che attraverso il metodo SINTACS sono state elaborate due carte finali diverse in quanto si sono applicate diverse stringhe, si effettuerà un raffronto con entrambe.

Si riportano le carte di sintesi ottenute, per facilitare l'analisi visiva dei risultati:

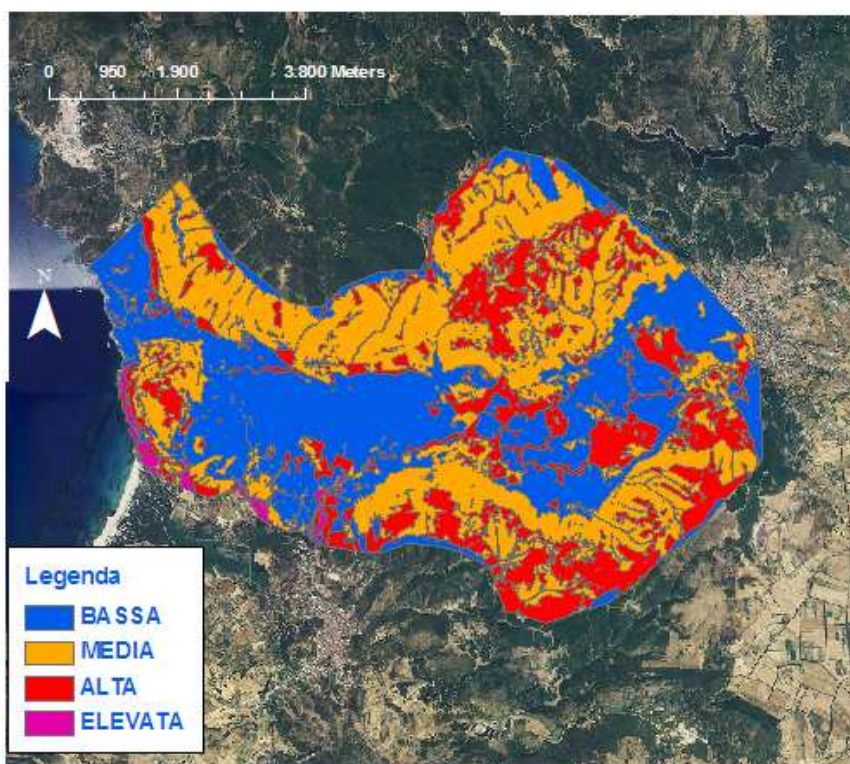


Figura 53: Carta della vulnerabilità ottenuta con il metodo SINTACS e l'applicazione della stringa "Carsismo".

Figura 54: Carta della vulnerabilità ottenuta dal metodo SINTACS mediante l'applicazione della stringa "Impatto Rilevante".

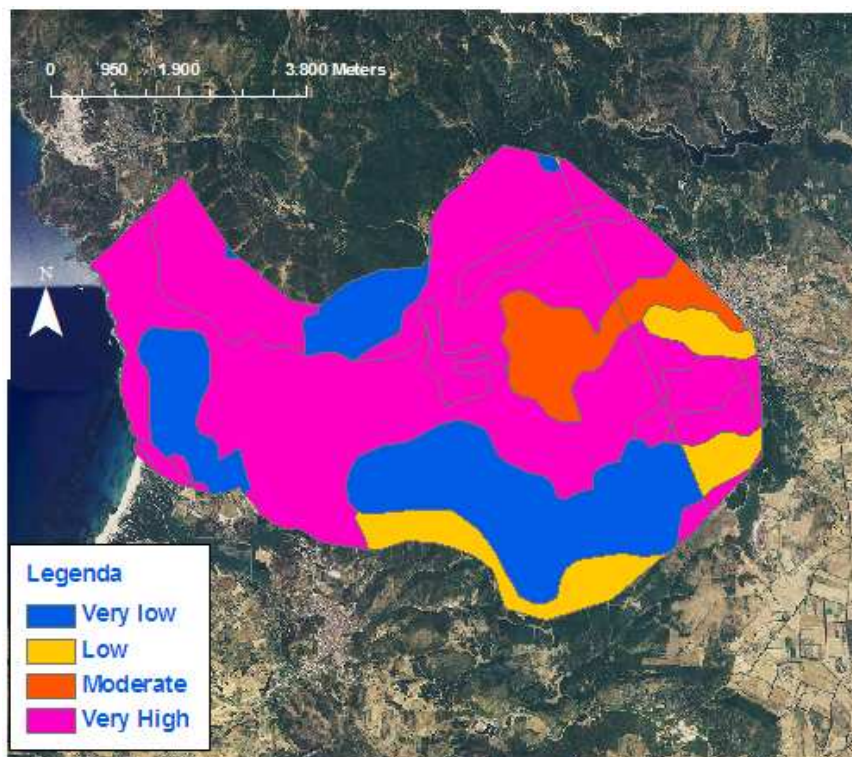
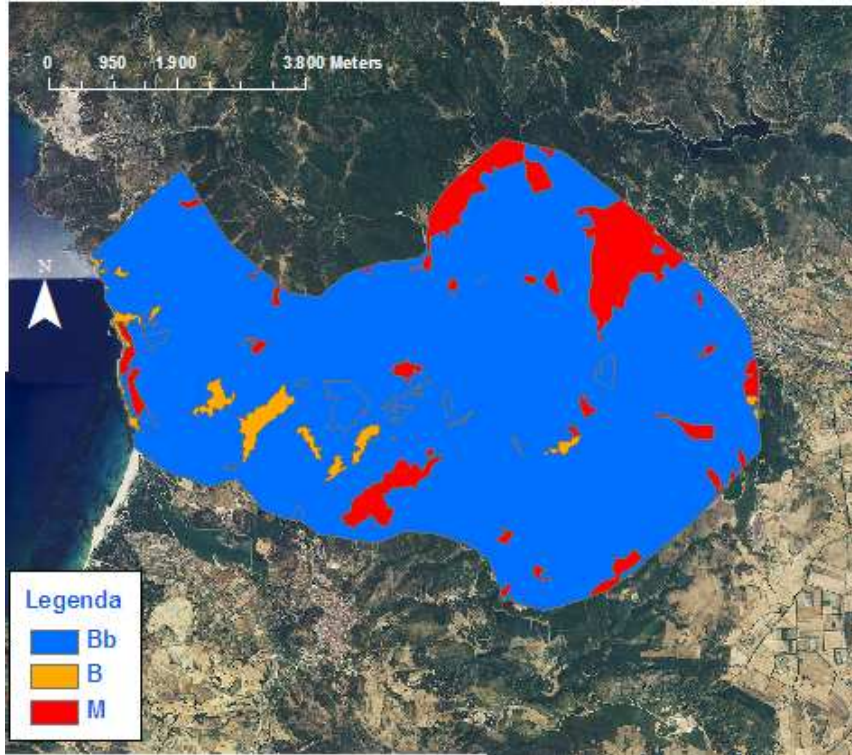


Figura 55: Carta della vulnerabilità ottenuta con il metodo COP.

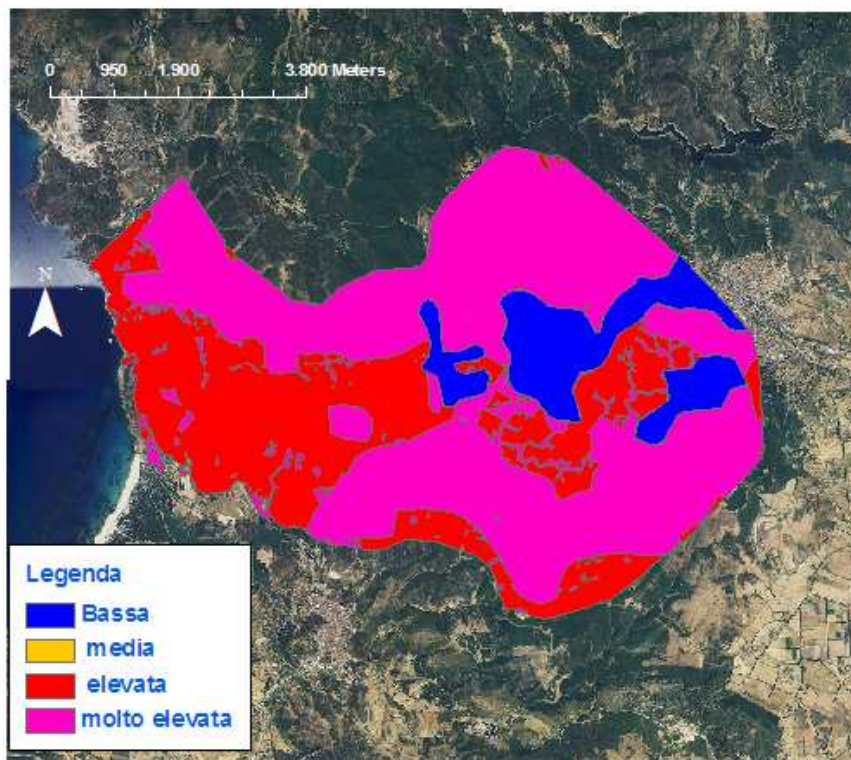


Figura 56: Carta della vulnerabilità ottenuta con il metodo EPIK.

E' evidente ad una prima analisi che le carte non sono sovrapponibili. Infatti i risultati sono molto variabili ed i metodi non sono confrontabili se non a larga scala; questo è dovuto principalmente al fatto che, i metodi di valutazione della vulnerabilità intrinseca applicati in questo studio, si basano su dati di input diversi e con una diversa precisione di base.

Innanzitutto si può dire che i risultati ottenuti con il metodo COP e con il metodo EPIK risultano più simili tra loro rispetto a quelli ottenuti con il metodo SINTACS. Ciò è facilmente spiegabile considerando il fatto che i due metodi (COP ed EPIK) sono stati tarati appositamente per lo studio degli acquiferi di tipo carbonatico e che pertanto assegnano un punteggio elevato ai parametri strettamente dipendenti dal carsismo, dalla pendenza e dall'infiltrazione. Inoltre essi si basano quasi esclusivamente su dati di input di origine pedologica. Questo influisce negativamente sulla precisione dei metodi, sia per lo scarso dettaglio della cartografia dei suoli a disposizione (la variabilità dei suoli, dove presenti è importante e non si può prescindere dalla sua conoscenza per ottenere un risultato affidabile), sia per il fatto che il suolo presente al di sopra degli strati carbonatici del piccolo anello metallifero è sottilissimo quando non inesistente, e perciò tale parametro

non risulta fondamentale nel nostro caso per effettuare la valutazione delle dinamiche che interagiscono con la vulnerabilità.

La cartografia pedologica utilizzata, come già evidenziato nei capitoli precedenti ha un dettaglio scarso in quanto è basata sullo studio Aru & Baldaccini, la cui scala di elaborazione è 1:250.000 e non esistono cartografie più dettagliate. Per alcune zone, infatti, dove i dati erano imprecisi se non inesistenti si è dovuto ovviare con l'utilizzo dei dati pedologici presenti negli attributi della carta dell'uso del suolo. Si riporta nel seguito, ai fini di una maggiore comprensione della scala di dettaglio, la cartografia pedologica utilizzata (fig. 58).

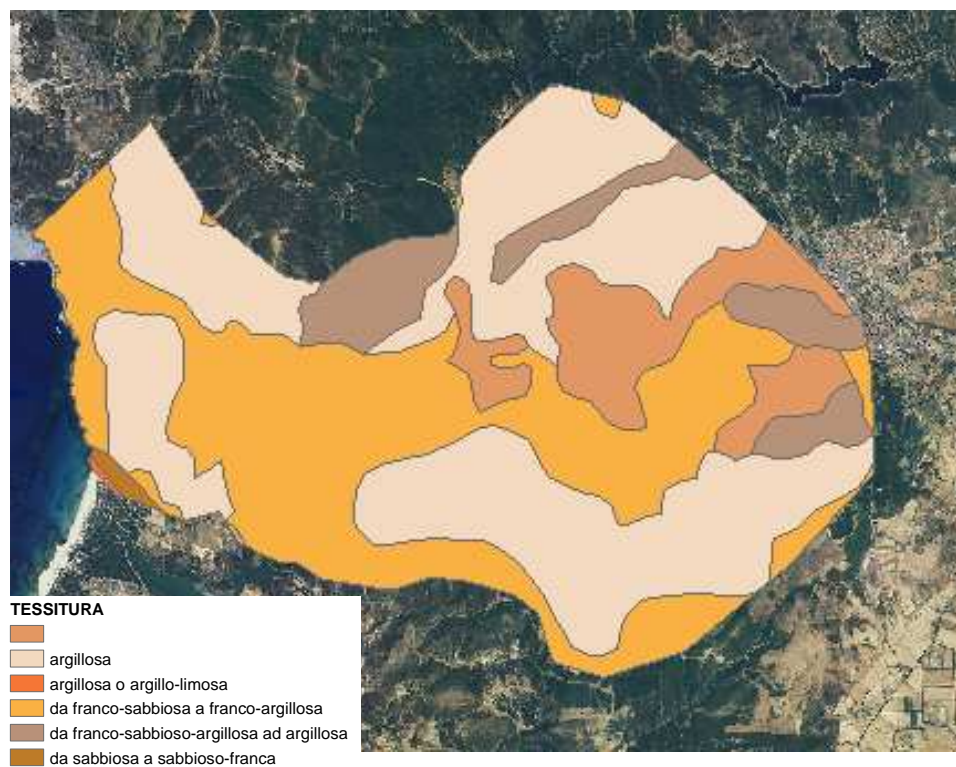


Figura 57: Carta pedologica in scala 1:250.000 (Aru e Baldaccini, 1990)

Dalle cartografie finali sopra riportate (figg. 56 e 57) si nota che le zone urbanizzate, rispettivamente evidenziate in arancio e in blu, presentano una vulnerabilità più bassa rispetto al resto del territorio, in quanto si è considerato come preponderante il fattore suolo, che in queste zone risulta praticamente impermeabile (asfalto). In questi metodi non si considera la presenza o meno di centri di pericolo o potenziali inquinanti, come invece avviene nel metodo SINTACS. Molte zone appartenenti all'anello carbonatico risultano in

entrambi i metodi appartenenti alla classe di vulnerabilità molto alta (zone di colore fucsia) e questo perché i fattori E e C hanno un punteggio superiore agli altri fattori considerati.

Il metodo SINTACS, invece, utilizza diversi parametri basati più sulla geologia che sulla pedologia e poiché i dati geologici a disposizione sono molto più precisi di quelli pedologici, in quanto in scala 1:10.000, è stato possibile effettuare con questo metodo un'analisi più dettagliata della zona rispetto ai metodi precedenti, inoltre la pedologia non ha un'influenza così importante sulla precisione del metodo in quanto mediata dagli altri fattori considerati.

In generale si può dire che tutti e tre i metodi (SINTACS riferito alla stringa del carsismo fig.54) evidenziano una vulnerabilità medio alta dell'anello carbonatico dovuta al fatto che l'infiltrazione efficace assume valori elevati in prossimità di fratture e inghiottitoi che permettono agli inquinanti idrotrasportati un accesso rapido e diretto alla falda acquifera sotterranea.

La carta dell'elaborazione del metodo SINTACS relativa all'utilizzo della stringa di "Impatto Rilevante" (fig. 55) appare invece molto meno dettagliata ed è raffrontabile esclusivamente con i risultati del metodo COP, che in alcuni punti a sud dell'anello carbonatico presenta zone a bassissima vulnerabilità. Questo è dovuto al fatto che la stringa dell'"Impatto Rilevante" come si può vedere dalla tabella riportata sotto, assegna un peso moltiplicatore più basso a parametri quali la conducibilità idraulica e la pendenza e assegna invece un punteggio più elevato al peso relativo al parametro N (effetto di autodepurazione del non saturo), al parametro soggiacenza e al parametro infiltrazione efficace, al contrario di ciò che avviene nella stringa relativa al carsismo.

Si può notare anche una similitudine tra le zone individuate ad elevata vulnerabilità nella cartografia del metodo SINTACS ottenuta con la stringa del "carsismo" e i risultati rappresentati attraverso il metodo EPIK. A grandi linee infatti, nonostante vi sia una differenza di classazione, le zone carbonatiche sono evidenziate in entrambi i metodi come zone altamente vulnerabili. La similitudine è dovuta al fatto che con la stringa del "carsismo" si attribuisce una maggiore importanza agli effetti prodotti dall'infiltrazione e alla presenza di fenomeni carsici.

parametro	IN	IR	D	C	F
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	2	5	4

Tabella 60: Punteggi relativi alle stringhe di pesi moltiplicatori

Un supporto ai risultati ottenuti si ha da studi precedenti per la mappatura del rischio geochimico, che individuano nell'area zone ad elevato rischio di inquinamento geochimico da metalli pesanti, residui dell'attività estrattiva. L'inquinamento deriva principalmente dai processi di ossidazione dei solfuri, come la galena e la blenda, che producono una forte acidificazione del substrato rilasciando zinco e piombo liberi. Sono spesso presenti altri pericolosi inquinanti come mercurio, arsenico cadmio, cromo, etc. Negli ultimi decenni la complessità della problematica ha portato all'interessamento di numerosi ricercatori, che ne hanno studiato gli effetti sulle componenti ambientali dei territori circostanti (Aru, 1993; Di Gregorio & Massoli Novelli, 1988), con particolare attenzione alla chimica delle acque superficiali (Fanfani et al., 1995, 2000) e di quelle sotterranee (Cidu et al., 2001; Cidu & Fanfani, 2002).

Nel seguito si riporta la carta del rischio di inquinamento da piombo (B. De Vivo, M. Boni, S. Costabile, 1998).

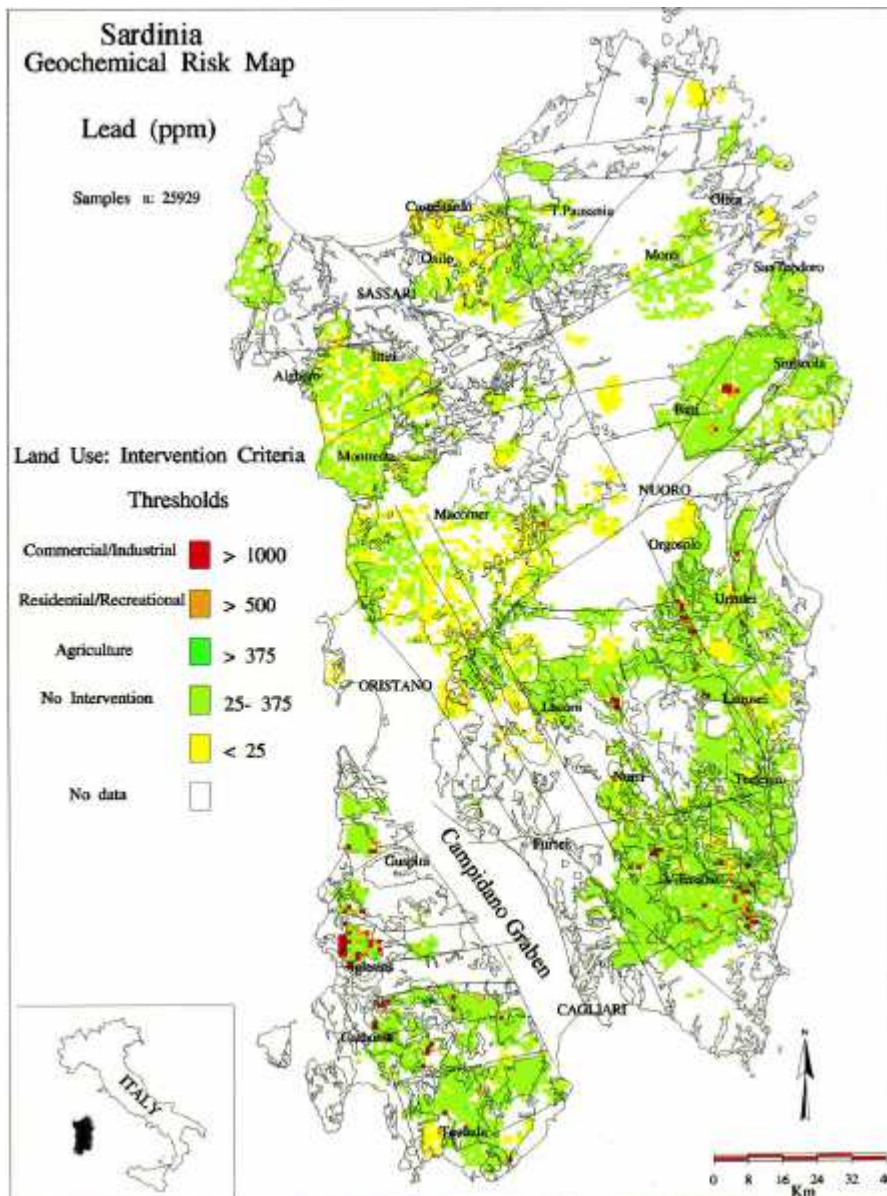


Figura 58: Carta del rischio di inquinamento da Pb, dati ottenuti da campionamenti di sedimenti fluviali (B. De Vivo, M. Boni , S. Costabile, 1998).

10.2 Punti di forza e carenze individuati per ogni metodo.

Alla luce di queste analisi si può dire che i metodi sono altrettanto validi e che la loro precisione dipende dalla disponibilità di dati di base che siano dettagliati e a scala adeguata.

Fra i tre metodi utilizzati quello meno affidabile è forse il metodo EPIK in quanto la scelta dei punteggi e dei pesi assegnati agli attributi è, in questo metodo, caratterizzata da una totale soggettività e può variare molto da un utilizzatore ad un altro. Inoltre esso

necessiterebbe per una precisione maggiore di dati precisi relativi allo spessore dello strato carbonatico e dell'Epicarso (zona che si trova immediatamente al di sotto del suolo, è altamente fessurata, e la sua formazione è dovuta alla dissoluzione delle rocce e alla formazione di pressioni in prossimità della superficie del terreno), dati che però non è sempre facile reperire se non in maniera sporadica e puntuale. Non è pensabile che tali dati possano essere precisi quando si studiano aree così vaste. Probabilmente tale metodo sarebbe applicabile con una maggiore resa in bacini idrogeologici molto piccoli.

Il metodo COP ha il vantaggio di essere un metodo semplice e che si può applicare in maniera speditiva, essendo basato su tre semplici parametri i cui dati si possono facilmente dedurre dalla cartografia aerea, senza bisogno necessariamente di indagini di campagna. Avendo a disposizione dati pedologici precisi si potrebbe utilizzare anche a scala regionale, consentendo di ottenere un buon risultato.

Per ciò che riguarda questo studio si può affermare che il metodo più affidabile risulta essere il metodo SINTACS, sia perché più completo, in quanto prende in considerazione molti parametri di input rispetto agli altri due metodi: infatti si basa in maniera minore sui dati pedologici, che sono per noi poco significativi, sia perché il grado di discrezionalità nell'assegnare i punteggi è più basso e ciò consente un più basso margine di errore, sia perché risulta il metodo più versatile. Inoltre nella metodica si tiene conto della presenza di zone o attività potenzialmente inquinanti per l'applicazione delle stringhe, cosa che non avviene negli altri metodi.

E' anche vero che l'applicazione di tale metodo è molto più complessa di quelli precedenti e che pertanto sia per la mole di dati da elaborare che per la complessità delle analisi da effettuare, sia per le caratteristiche prestazionali dell'elaboratore e del software, è impensabile che tale metodo possa essere utilizzato a scala regionale o nazionale con facilità.

In ogni caso è probabile che se i dati di input avessero avuto la stessa accuratezza per tutti i metodi, i risultati ottenuti sia con il metodo COP che con il metodo EPIK sarebbero stati altrettanto validi. Tutto ciò premesso, si può dire che la scelta del metodo più opportuno per la valutazione della vulnerabilità deve essere fatta sulla base della precisione dei dati che si hanno a disposizione e dal dettaglio richiesto nel lavoro finale.

CONCLUSIONI

Questa ricerca è consistita nello studio della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento e l'obiettivo di questo lavoro è stato quello di individuare una metodologia utile per delimitare le zone a maggior rischio di contaminazione. Si è cercato un metodo che rispondesse al meglio allo studio di acquiferi di tipo carbonatico.

L'area in studio ricade all'interno dei territori comunali di Iglesias e Domusnovas. Di quest'area si è presa in considerazione la porzione di territorio ricadente all'interno del cosiddetto "anello metallifero", delimitata da strutture carsiche all'interno delle quali sono presenti diversi giacimenti minerari sfruttati in misura diversa fin dall'epoca romana. Il termine anello metallifero, coniato da Merlo (1904), indica il grande anello carbonatico che circonda il nucleo di metarenarie e filliti nei pressi della città di Iglesias (centro urbano principale del territorio) (Figura 7a, Carmignani, 1996) comprendente più a sud il piccolo anello passante per le località di Monteponi, Campo Pisano e San Giovanni (Figura 7b, Carmignani et alii, 1982) (da Uras, Pintore, 2009).

La struttura dell'anello metallifero delimita l'acquifero carsico del Sulcis. che è costituito dai carbonati e dalle dolomie delle formazioni che costituiscono il gruppo di Gonnese (ex formazione di Gonnese). La peculiarità di questo sistema acquifero è che una volta cessate le attività estrattive, con esse si è cessato anche il pompaggio dell'acqua con il conseguente allagamento delle gallerie e ciò ha portato ad una situazione di ripristino dell'equilibrio idrodinamico originario che non si è ancora stabilizzata.

Il sistema acquifero principale è stato definito come una serie di serbatoi semidipendenti denominati SERSEM (Civita, 1983), posti parte in serie e parte in parallelo tra loro. I SERSEM sono caratterizzati da piezometriche diverse (in alcuni casi anche sensibilmente diverse). I SERSEM sono separati da discontinuità strutturali, fratture, sedimenti e cavità carsiche, ed è per questo che l'andamento della piezometrica è condizionato dalla presenza e dalla direzione delle fratture più che dai giunti di stratificazione. Si è scelto di delimitare lo studio all'area del piccolo anello metallifero sia perché ha le stesse caratteristiche geomorfologiche ed idrogeologiche del grande anello e un'estensione territoriale minore, sia perché ciò ha consentito uno snellimento dei calcoli e delle procedure di map calculation.

L'acquifero è stato oggetto di numerose indagini e di continui monitoraggi da parte delle società minerarie che si sono succedute nel tempo, principalmente per il fatto che durante i

periodi di attività estrattiva le miniere non dovevano essere allagate e in secondo luogo per tenere costantemente sotto controllo la qualità delle acque. Questo ha consentito di disporre di una grande mole di dati per lo studio.

Tali dati però non sono risultati sufficienti per definire le sue caratteristiche geometriche, quali tetto, spessore e letto. I dati a disposizione infatti sono costituiti da misure puntuali di soggiacenza e di livelli impermeabili, estesi poi, tramite metodi matematici di interpolazione, a tutto il territorio in esame. Il numero di misure puntuali non può ritenersi elevato, in quanto non è sufficientemente ben distribuito nel territorio, da ciò deriva che la determinazione dei parametri soggiacenza, spessore dell'acquifero e inquinamento in atto, necessari per l'applicazione dei metodi, hanno risentito di tali problematiche. La ricerca di dati di base precisi, affidabili ed omogenei ha richiesto un notevole dispendio di tempo, infatti, si è avuto a che fare con dati storici prevalentemente di tipo cartaceo e che riportavano poche indicazioni di ordine geografico che hanno richiesto un notevole impegno per la loro georeferenziazione e digitalizzazione.

Per la valutazione della vulnerabilità intrinseca di quest'area all'inquinamento si sono utilizzati tre diversi metodi a punteggi e pesi: il metodo SINTACS, il metodo COP ed il metodo EPIK. Gli ultimi due metodi sono stati tarati appositamente per lo studio degli acquiferi di tipo carbonatico e assegnano un punteggio elevato ai parametri strettamente dipendenti dal carsismo, dalla pendenza e dall'infiltrazione. Inoltre essi si basano quasi esclusivamente su dati di input di origine pedologica. Questo influisce negativamente sulla precisione dei metodi, sia per lo scarso dettaglio della cartografia dei suoli a disposizione (la variabilità dei suoli a livello locale, è importante, e non si può prescindere dalla sua conoscenza per ottenere un risultato affidabile), sia per il fatto che il suolo presente al di sopra degli strati carbonatici del piccolo anello metallifero è sottilissimo quando non inesistente, e perciò tale parametro non è fondamentale nel nostro caso per effettuare la valutazione delle dinamiche che interagiscono con la vulnerabilità.

La cartografia pedologica utilizzata, come già evidenziato nei capitoli precedenti ha un dettaglio scarso in quanto è basata sullo studio Aru & Baldaccini, la cui scala di elaborazione è 1:250.000 e non esistono per la Regione Sardegna cartografie più dettagliate. Per alcune zone, dove i dati pedologici erano scarsi, si è dovuto ovviare con l'utilizzo dei dati pedologici presenti negli attributi della carta dell'uso del suolo.

La ricerca ha consentito di confrontare i metodi e di individuare i pro e i contro di ogni metodica e di individuare le caratteristiche dello studio a cui ognuno di essi potrebbe essere adatto. Le cartografie ottenute non sono risultate totalmente sovrapponibili in quanto frutto di elaborazioni di dati di base a volte troppo poco dettagliati e superficiali o a scala troppo grande, nonostante ciò si è riusciti ad ottenere risultati apprezzabili, in particolare con la metodologia SINTACS.

Il metodo SINTACS, è risultato il più completo, in quanto prende in considerazione un numero molto maggiore di parametri di input rispetto agli altri due metodi: infatti si basa in maniera minore sui dati pedologici, che sono per noi poco significativi, sia perché il grado di discrezionalità nell'assegnare i punteggi rispetto per esempio al metodo EPIK, è più basso e ciò consente un più basso margine di errore, sia perché risulta il metodo più versatile. Nella metodica SINTACS, inoltre, diversamente dagli altri due metodi si tiene conto della presenza di zone o attività potenzialmente inquinanti per l'applicazione delle stringhe.

E' anche vero che l'applicazione di tale metodo è molto più complessa rispetto alle altre due metodologie e che pertanto sia per la mole di dati da elaborare che per la complessità delle analisi da effettuare, sia per le caratteristiche prestazionali dell'elaboratore e del software, è impensabile che tale metodo possa essere utilizzato a scala regionale o nazionale con facilità.

In ogni caso è probabile che se i dati di input avessero avuto la stessa accuratezza per tutti i metodi, i risultati ottenuti sia con il metodo COP che con il metodo EPIK sarebbero potuti ritenersi altrettanto validi. Tutto ciò premesso, si può dire che la scelta del metodo più opportuno per la valutazione della vulnerabilità deve essere fatta sulla base della precisione dei dati che si hanno a disposizione e dal dettaglio richiesto nel lavoro finale.

Dalla ricerca è emerso il fatto che l'acquifero carbonatico del Sulcis Iglesiente è intrinsecamente e in maniera elevata, suscettibile all'inquinamento (dato supportato da altri studi scientifici sull'area). Questo è un dato allarmante se si pensa alla risorsa sia economica che ambientale che viene celata all'interno di queste rocce.

Infatti a fronte di circa 27 milioni annui di m³ di ricarica attiva dell'acquifero, ne vengono emunti appena 6 milioni di m³ all'anno per la rete idrica potabile. Ciò significa che la

risorsa acqua potrebbe essere sfruttata maggiormente e in maniera ecosostenibile. Perché ciò avvenga, è necessario che essa venga preservata da un danno ambientale che avrebbe pesanti ricadute socio economiche, in un territorio già pesantemente segnato dall'eredità dell'industria estrattiva. A tal fine la valutazione effettuata in questo studio vuole costituire il primo passo di un importante contributo alla ricerca verso la salvaguardia di un'importante risorsa del territorio. Con l'acquisizione di dati di base più precisi sarebbe possibile certamente, effettuare un lavoro di dettaglio ed intervenire con le bonifiche in zone mirate, risparmiando tempo e risorse economiche ed avendo la certezza che gli interventi scongiurino il verificarsi di danni ambientali di vaste proporzioni.

BIBLIOGRAFIA

- Abbanoa spa (2000 – 2007), *Report interni*.
- Angiolini C., Bacchetta G., Brullo S., Casti M., Giusso del Galdo G. & Guarino R.,(2005). *The vegetation of mining dumps in SW-Sardinia*. Feddes Repertorium, 116 (3-4): 243-276.
- Barrocu G. (1995). *Le acque sotterranee in Sardegna e gestione integrata delle risorse idriche*. Memorie della Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.
- Bellè O.; Cherchi F. (1994). *Studio sul bacino idrogeologico di Monteponi. Valutazioni sulla quantità e qualità delle acque sotterranee*. Miniere Iglesiente S.p.A.-Campo Pisano.
- Bellè O.; Cherchi F.; Salvadori I. (1995). *Il bacino idrogeologico di Monteponi*. Aggiornamento al 1995.
- Bellè O.; Cherchi F. (1995). *Il Problema dell'acqua nel bacino metallifero dell'Iglesiente. Nuovi studi e previsioni sulla ricostruzione della falda dopo la cessazione dell'attività mineraria (fermata dell'eduazione dal livello -200)*. Memorie della Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.
- Binetti A. (1935). *Sul movimento delle acque sotterranee nelle miniere dell'iglesiente*. Resoconti della Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.
- Boni M.; Cocozza T. (1982). *Rapporti fra tettonica, paleografia e mineralizzazioni sul bordo orientale della piattaforma carbonatica cambrica in Sardegna*. Memorie Società Geologica Italiana.
- Brusca C.; Dessau G. (1968). *I giacimenti piombo-zinciferi di S. Giovanni (Iglesias nel quadro della geologia del Cambrico sardo. L'Industria Mineraria)*.
- Carmignani L.; Cocozza T.; Pertusati P. (1983). *Carta Geologica del Paleozoico dell'Iglesiente (Sardegna Sud-Occidentale. Scala 1:50000. Litografia Artistica Cartografica*.
- Castany G. (1985). *Idrogeologia. Principi e Metodi*. Dunod Université, Bordas, Paris, Palermo.
- Casula G.; Manca F.; Pinna P.; Porcu A.; Testa M.; L.Vargiu (1995). *Studio delle acque sotterranee della Sardegna-Sulcis. Valutazione delle potenzialità idriche sotterranee*. Memorie della Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.
- Cidu R. (2004). *Evoluzione della qualità delle acque nelle miniere dell'Iglesiente*.
- Cidu R.; Biagini C.; Fanfani L.; LaRuffa G.; Marras I. (2001). *Mine closure at Monteponi (Italy): effect of the cessation of dewatering on the quality of shallow groundwater. Applied Geochemistry*. Applied Geochemistry 489 – 502.

- Cidu R.; Biddau R.; Spanu T. (2005). *Temporal Variations in Water Chemistry at Abandoned Underground Mines Hosted in a Carbonate Environment. Mine Water and the Environment.*
- Civita M. (1980). *Interazioni tra idrogeologia e sviluppo minerario, con particolare riguardo per le situazioni coinvolgenti rocce fessurate. Bollettino dell'Associazione Mineraria Subalpina, (2).*
- Civita M. (1985). *Studio di dettaglio della situazione idrogeologica della struttura di Nebida-Masua-Acqueresi con particolare riguardo per il problema della protezione e dell'approvvigionamento idrico delle strutture minerarie locali. progress report, C.E.E., S.A.M.IM. S.p.a.*
- Civita M. (1994). *Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Teoria e pratica, Pitagora Editrice.*
- Civita M., De Maio M. (2000). *Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5 (Pitagora Editrice).*
- Civita M.; Forti P.; Perna G. (1983). *Carta Idrogeologica dell'Iglesiente. Scala 1:50000. Idrogeologia del Bacino Minerario dell'Iglesiente (Sardegna Sud Occidentale).*
- Civita M.; Coccozza T.; Forti P.; Perna G.; Turi B. (1983). *Idrogeologia del Bacino Minerario dell'Iglesiente (Sardegna Sud Occidentale). CEE, Regione Autonoma della Sardegna, Provincia di Cagliari, Roma.*
- Connell L.D. , Gerd van den Daele (2003) *A quantitative approach to aquifer vulnerability mapping, Journal of Hydrology 276 (2003) 71–88.*
- Cocco B.; Coghe S.; Lai S.; Putzolu S. (1995). *Studio per il futuro utilizzo della risorsa idrica sotterranea del bacino metallifero Iglesiente. Memorie della Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.*
- Coccozza T. (1965). *Contributo alla stratigrafia del Paleozoico sardo: nuove ricerche sull'affioramento permiano di San Giorgio (Iglesias). Nota preliminare.*
- Coccozza T. (1967). *I rapporti cambro-ordoviciani nella zona di Acqueresi. Resoconti della Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.*
- Coccozza T. (1979). *The Cambrian of Sardinia. Memorie della Società Geologica Italiana.*
- Compagnia Mediterranea di Prospezioni (1975). *Prospezione geofisica preliminare per l'individuazione delle vie di circolazione delle acque salmastre nel bacino dell'Iglesiente. Relazione tecnica, Ente Minerario Sardo.*

- Contini M.; Ottaviani A.; Rossi G.; Trois P. (1981). *La Ventilazione nella Miniera di Masua: - Alcuni aspetti della problematica*. Resoconti dell'Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.
- Costantin Gogu R., Dassargues A. (2000), *Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karst aquifer, southern Belgium*, Hydrogeology Journal, 8:337-345, Springer-Verlag.
- Cucchi F., Franceschini G., Zini L., Aurighi M., (2008), *Intrinsic vulnerability assessment of Sette Comuni Plateau aquifer (Veneto Region, Italy)*. Journal of Environmental Management 88, 984–994.
- De Vivo B., Boni M., Costabile S., (1998), *Formational anomalies versus mining pollution: geochemical riskmaps of Sardinia, Italy*, Journal of Geochemical Exploration 64 (1998) 321–337.
- Doerfliger N., Jeannin P.Y., Zwahlen F., (1999), *Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method)*, Environmental Geology 39 (2), 165-176, Springer-Verlag.
- Di Cobertaldo D. (1965). *Osservazioni geologico - minerarie e genetiche sul giacimento a Pb-Zn di Pira Roma (Buggerru-Sardegna)*. Prestampe per il Symposium Problemi Minerari della Sardegna. Associazione Mineraria Sarda. Cagliari-Iglesias.
- Ente Autonomo del Flumendosa, (1993), SISS, *Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna - dati termo-pluviometrici, 1924-1992*.
- Falci Vici D'Arcevia C., Nanni T., Marcellini M., Siciliani A & Vivalda P, (2001), *Cartografia idrogeologica del bacino del fiume Esino (Marche) tra la dorsale carbonatica marchigiana e la costa mediante l'uso di un GIS*, Mem. Soc. Geol. It., 56 339-351, 6 ff. 4 tabb., 1 tav. f.t.
- Fanfani L.; Cidu R.; Zuddas P. (1995). *Il rischio di inquinamento da metalli pesanti nelle aree minerarie*. Memorie della Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.
- Fierro G. (1978). *Relazione geologica di una esplorazione subacquea eseguita sul tratto litorale della piattaforma continentale compresa nelle tavolette di Buggerru e Nebida*. In *Studio delle acque sotterranee dell'Iglesiente*, volume VIII. RI. MIN. s.p.a.
- IGEA S.p.a. (2004). *Idrogeologia bacino Monteponi*. Tratto da Piano di Caratterizzazione Valle Rio S.Giorgio.
- Istituto Geografico Militare Italiano, Firenze (1992). Carta Topografica d'Italia, Serie 25 in Scala 1:25000. Foglio 555.

- Marcello A. (1968). *Bibliografia geo-mineraria del cambro-ordoviciano inferiore della Sardegna*. Stabilimento editoriale – Fossataro, Cagliari.
- Marcello A.; Salvadori I.; Zuffardi P. (1965). *Prime notizie su un sondaggio eseguito nella valle di Iglesias*. Resoconti dell'Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.
- Merlo G. (1904). *Il regime delle acque sotterranee in relazione alla tettonica dell'Iglesiente*. Resoconti delle riunioni della Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.
- Miniere Iglesiente S.p.a., Servizio Idrogeologico (1997). *Il bacino idrogeologico di Monteponi, Studi e valutazioni sulla potenzialità delle risorse idriche sotterranee*. Relazione tecnica, Ente Minerario Sardo.
- Muzzu M. (2002), *Applicazione del metodo EPIK al massiccio carbonatico di Urzulei, Oliena, Orgosolo*, Tesi di Laurea inedita, Dipartimento di ingegneria del territorio, Università degli Studi di Cagliari
- Otelli L.(2010). *Monteponi, (Iglesias – Sardegna) Storia di eventi e di uomini di una grande miniera*, Carlo Delfino editore.
- Palomba M., Padalino G., Marchi M.(2006). *Industrial mineral occurrences associated with Cenozoic volcanic rocks of Sardinia (Italy): Geological, mineralogical, geochemical features and genetic implications*. Ore Geology Reviews 29, 118– 145.
- Perna G. (1995a). *Idrogeologia del bacino minerario dell'Iglesiente. Studi per la realizzazione dell'impianto di eduazione al livello -200 di Monteponi*. Memorie della Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.
- Perna G. (1995b). *Il carsismo messiniano e la circolazione profonda delle acque nel Sulcis-Iglesiente*. Memorie della Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.
- Pietracaprina A.; Brizzi G. (1987). *La Sardegna e i suoi minerali*. 2D Editrice Mediterranea, Cagliari.
- Pintore M. (2006). *Acque di miniera dell'iglesiente: storia, analisi e proposte*. Tesi di Laurea inedita, Dipartimento di ingegneria del territorio, Università degli Studi di Cagliari.
- Regione Autonoma della Sardegna (2003). *Piano Regionale di Gestione dei Rifiuti, Piano di Bonifica Siti Inquinati*, R.A.S., Relazione tecnica.
- Regione Autonoma della Sardegna (2000). *Carta Tecnica Regionale*, Scala 1:10000. Foglio 555.
- Santoro D.(2007), “*Ricostruzione spaziale del campo di trasmissività e caratterizzazione delle principali idrostrutture interessate da intrusione marina mediante l'impiego di metodologie geostatistiche in acquiferi carbonatici costieri fortemente anisotropi*”, tesi di laurea pubblicata sul sito web di tesi online- cap.1, pagg.10 e 11.

- Sarritzu R. (2002). *Cenni Storici sulla Miniera di Masua*. Geologia Mineraria, IGEA.
- Serra S., (2002). *Vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero superficiale della bassa valle del Flumendosa: applicazione del metodo SINTACS*, Tesi di Laurea inedita, Dipartimento di ingegneria del territorio, Università degli Studi di Cagliari
- Servizio Geologico Nazionale (1994). *Memorie descrittive della carta geologica d'Italia. Volume XLVIII. Sedimentological, stratigraphical and ore deposits field guide of the autochthonous cambro-ordovician of Southwestern Sardinia (parte II)*, volume XLVIII. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- Società per la Ricerca e Valorizzazione delle Risorse del sottosuolo (1978). *Studio delle acque sotterranee dell'Iglesiente. Situazioni idrogeologiche nelle miniere del bacino minerario dell'iglesiente*. Documenti Volume VIII.
- Società per la Ricerca e Valorizzazione delle Risorse del sottosuolo (1978). *Studio delle acque sotterranee dell'Iglesiente. Ulteriori relazioni sul problema dell'educazione delle acque del bacino minerario dell'iglesiente*. Documenti Volume III. Rapporti.
- Trois C., Marcello A., Pretti S., Trois P., Rossi G. (2007). *The environmental risk posed by small dumps of complex arsenic, antimony, nickel and cobalt sulphides*. Journal of Geochemical Exploration 92 (2007) 83–95.
- Valera R. (1967). *Contributo alla conoscenza dell'evoluzione tettonica della Sardegna*. Resoconti dell'Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.
- Vecelli C. (1931). *Anomalia nella circolazione sotterranea delle acque nella regione di Acquaresi*. Resoconti della Associazione Mineraria Sarda, Iglesias.
- Vias J.M., Andreo B., Perles M.J., Carrasco F., Vadillo I., Jimenez P., (2006). *Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method, Application in two pilot sites in Southern Spain*. Hydrogeology Journal (2006) 14: 912–925.
- Zavattero L., Casti M., Bacchetta G., Di Pietro R.,. (2006). *Analisi multitemporale del paesaggio del distretto minerario di Monteponi*, Rivista Italiana di Telerilevamento - 2006, 37: 137-146.
- Zurru M. (1980). *Raccolta dati tecnico-economici e note su Miniera di Masua*. documenti archivio IGEA SpA.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Anisotropia di un acquifero carsico (Santoro, 2007).	25
Figura 2: Valori di soggiacenza e relativi punteggi nel metodo Sintacs	30
Figura 3: Valori dell'infiltrazione e relativi punteggi nel metodo SINTACS.	33
Figura 4: Conducibilità idraulica e relativi punteggi nel metodo SINTACS.	38
Figura 5: Classi di pendenza e relativo punteggio nel metodo SINTACS.	39
Figura 6: Schema di calcolo del metodo COP (da Vias et al., 2006).	48
Figura 7a Grande anello metallifero e 7 b Piccolo anello metallifero, area in esame (Uras, Pintore, 2009).	67
Figura 8: Livello piezometrico dei pozzi minerari in funzione della distanza dal -200 di Monteponi in km (IGEA, servizio monitoraggio falde, 2007).	84
Figura 9: Inquadramento dell'area (da Uras, Pintore, 2009)	86
Figura 10: Successione paleozoica dell'Iglesiente (da Memorie descrittive Carta Geologica d'Italia – V. LX – 2001)	88
Figura 11: Tavola idrostratigrafica riassuntiva tratta da Civita e altri (1983)	91
Figura 12 Limiti dei SERSEM e soglie di permeabilità (da Civita ed altri, 1983, modificato)	93
Figura 13: Velocità media annua di risalita in alcuni cantieri.	97
Figura 14: Variazioni del livello piezometrico dal 2000 al 2007 nei pozzi di Satira e S.Giovanni .	97
Figura 15: Schema riassuntivo relativo alle trasformazioni di copertura del suolo tra il 1955 e il 1998 nell'area mineraria di Monteponi. (da Rivista Italiana di Telerilevamento - 2006, 37: 137-146, Zavattoni et altri).	108
Figura 16 : Analisi chimiche relative ai metalli pesanti riscontrati nelle acque campionate al pozzo 2. (IGEA, 2005)	132
Figura 17: Analisi chimiche effettuate da Abbanoa spa sulle acque campionate all'uscita vasche e nei pozzi minerari. Grafico rappresentativo dei tenori di cadmio, mercurio e piombo	133
Figura 18 : Area in studio	135
Figura 19: Visualizzazione tridimensionale dell'area in esame	137
Figura 20 : Rappresentazione del modello digitale del terreno con il drapping della carta IGM in scala 1:25.000.	138
Figura 21 Pozzi minerari (da M.Pintore, 2006)	139
Figura 22: Ricostruzione delle superfici piezometriche relative al periodo di gennaio 2007.	141
Figura 23: Ricostruzione mediante il software ARCGIS 9.3 del modello rappresentante la soggiacenza calcolata utilizzando la piezometrica relativa al mese di gennaio 2007.	142
Figura 24 : Punteggi della soggiacenza nel metodo SINTACS.	142
Figura 25: Carta dei punteggi della soggiacenza.	143
Figura 26: Carta pedologica dell'area in esame.	144
Figura 27: Carta geologica con riclassificazione in complessi geologici (carta base da RAS, 2008)	145
Figura 28: Topoietici relativi alle stazioni di Iglesias e Monteponi.	147
Figura 29: Carta dell'infiltrazione efficace.	149
Figura 30: Carta dei punteggi relativi al parametro N (effetto di auto depurazione del non saturo).	151
Figura 31: Carta relativa ai punteggi attribuiti al parametro A (caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero).	151
Figura 32: Carta dei punteggi relativi alla tipologia della copertura.	153
Figura 33: Carta dei punteggi relativi alla conducibilità idraulica.	156
Figura 34: Carta dei punteggi dell'acclività della Superficie topografica.	158
Figura 35: Discariche minerarie presenti nell'are in esame	160
Figura 36: Situazioni idrogeologiche e di impatto.	162
Figura 37: Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con la stringa "impatto rilevante".	162

Figura 38: Carta della vulnerabilità considerando le aree minerarie dismesse ricadenti in aree carsiche all'interno dell'impatto "carsismo" e non della stringa dell'"impatto rilevante".	163
Figura 39: Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con la riclassificazione della legenda in quattro classi per consentire un più agevole confronto con gli altri metodi utilizzati per valutare la vulnerabilità.	164
Figura 40: carta del sub fattore O_s del metodo COP.	167
Figura 41: Carta del sub fattore O_L .	170
Figura 42: Carta dei punteggi relativi al fattore O.	171
Figura 43: Carta delle faglie e degli inghiottitoi derivata dalla carta geologica regionale.	173
Figura 44: Indice di carsismo dell'area relativa all'intero acquifero (Civita, 1983)	174
Figura 45: Carta dei punteggi relativi al fattore C.	175
Figura 46: Carta della riduzione della protezione fornita dai punteggi del parametro P.	177
Figura 47: Carta della vulnerabilità intrinseca ottenuta con l'applicazione dell'indice COP.	179
Figura 48: Carta del parametro Epikarst.	183
Figura 49: Carta del parametro Protective Cover	186
Figura 50: Carta del parametro I.	189
Figura 51: Carta del parametro K.	191
Figura 52: Carta della vulnerabilità ottenuta con il metodo EPIK.	194
Figura 53: Carta della vulnerabilità ottenuta con il metodo SINTACS e l'applicazione della stringa "Carsismo".	196
Figura 54: Carta della vulnerabilità ottenuta dal metodo SINTACS mediante l'applicazione della stringa "Impatto Rilevante".	197
Figura 55: Carta della vulnerabilità ottenuta con il metodo COP.	197
Figura 56: Carta della vulnerabilità ottenuta con il metodo EPIK.	198
Figura 57: Carta pedologica in scala 1:250.000 (Aru e Baldaccini, 1990)	199
Figura 58: Carta del rischio di inquinamento da Pb, dati ottenuti da campionamenti di sedimenti fluviali (B. De Vivo, M. Boni, S. Costabile, 1998).	202

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Intervalli di valori dell'indice χ , per rocce affioranti o sotto scarsa copertura.....	32
Tabella 2: Intervalli di valori dell'indice χ , per la tessitura dei suoli.....	32
Tabella 3: Intervalli di punteggi per il parametro N in base alla litologia.....	34
Tabella 4: Intervalli di punteggio relativi alle diverse classi tessiturali del suolo.....	36
Tabella 5: Punteggio relativo ai diversi complessi idrogeologici.....	37
Tabella 6: Complessi idrogeologici e relativi intervalli di conducibilità.....	38
Tabella 7: Valori dei pesi relativi ad ognuno dei parametri SINTACS.....	40
Tabella 8: Punteggi e relativi gradi di vulnerabilità del metodo SINTACS.....	42
Tabella 9: Classi dell'attributo E (Epikarst).....	52
Tabella 10: Classi dell'attributo P (Protective Cover).....	54
Tabella 11: Classi dell'attributo I (Infiltration Condition) nel metodo EPIK.....	56
Tabella 12: Coefficienti di deflusso in funzione dell'uso del suolo e della pendenza nel metodo EPIK.....	57
Tabella 13: Classi dell'attributo K nel metodo EPIK.....	58
Tabella 14: Punteggi delle classi degli attributi E, P, I e K. Minore è il valore numerico maggiore sarà la suscettibilità alla contaminazione.....	60
Tabella 15: Coefficienti moltiplicatori (pesi) relativi agli attributi E,P,I e K.....	61
Tabella 16: Classi di vulnerabilità nel metodo EPIK.....	62
Tabella 17: Fattore di Protezione – Vulnerabilità Intrinseca.....	63
Tabella 18: Ripartizione della superficie nei tre complessi idrogeologici (Civita e altri, 1983b) ...	94
Tabella 19: Parametri per il calcolo del bilancio idrogeologico.....	100
Tabella 20: Volumi degli apporti efficaci all'acquifero.....	100
Tabella 21: Valori di ricarica calcolati secondo l'ipotesi di minima.....	101
Tabella 22: Parametri per il calcolo del bilancio idrogeologico.....	101
Tabella 23: Volumi degli apporti efficaci all'acquifero.....	102
Tabella 24: Volumi di ricarica calcolati secondo l'ipotesi di massima.....	102
Tabella 25: Dati di portata (l/s) relativi alle stazioni del Sulcis nell'anno 2000.....	118
Tabella 26: Dati medi relativi alle portate edotte annue nel 2006.....	124
Tabella 27: Computo dei volumi totali immessi nella rete idrica cittadina relativi all'annualità 2006 (ABBANO spa).....	125
Tabella 28: Rilevamento portate e livelli pozzi Caput Aquas nel 2006 e nel 2007.....	126
Tabella 29: Rilevamento portate e livelli pozzi Monte Figu nel 2006 e nel 2007.....	126
Tabella 30: Rilevamento portate e livelli pozzi Cuccuru Tiria nel 2006 e nel 2007.....	126
Tabella 31: Analisi relative al chimismo delle acque per l'anno 2007, campionamenti effettuati all'uscita vasche di accumulo.....	127
Tabella 32: Analisi chimiche sulle acque effettuate dai laboratori dell'Università di Cagliari nel primo trimestre 2007. Dati relativi sia all'uscita vasche che ai pozzi minerari.....	129
Tabella 33: Analisi chimiche sulle acque effettuate da diversi laboratori analisi. Dati comparativi relativi ai dati di miniera.....	131
Tabella 34: Dati relativi all'inquinamento da cloruri.....	131
Tabella 35: Valori espressi in m delle piezometriche dei pozzi minerari relative ai primi quattro mesi del 2007.....	140
Tabella 36: Dati relativi al metodo dei topoi per le stazioni meteo di Iglesias e Monteponi.....	147
Tabella 37: Dati meteo climatici relativi alla stazione meteo di Iglesias.....	148
Tabella 38: Dati meteo climatici relativi alla stazione di Monteponi.....	149
Tabella 39: Punteggi attribuiti ai diversi complessi geologici con la metodologia G.I.S. per i parametri N ed A.....	150
Tabella 40: Attribuzione dei punteggi ai diversi litotipi.....	152
Tabella 41: Punteggi relativi alla tipologia della copertura.....	154
Tabella 42: Punteggi relativi alla conducibilità idraulica dei complessi geologici.....	155

Tabella 43: Punteggi e relative classi di pendenza.	157
Tabella 44: Punteggi relativi alle stringhe di pesi moltiplicatori.	159
Tabella 45: Intervalli di punteggio assegnati dal metodo SINTACS ai vari gradi di vulnerabilità.	161
Tabella 46: Punteggi relativi al subfattore O_s , attribuiti in funzione dello spessore e della tessitura del suolo.	167
Tabella 47: Spessori medi relativi ai complessi litologici dell'area (Civita, 1983).	169
Tabella 48: Punteggi relativi ai parametri necessari per il calcolo del subfattore O_L	170
Tabella 49: Valori di protezione corrispondenti al punteggio del sub fattore O	171
Tabella 50: Punteggi del parametro C	175
Tabella 51: Punteggi attribuiti al fattore P e al corrispondente valore relativo alla riduzione della protezione.	176
Tabella 52: Punteggi relativi all'indice COP	178
Tabella 53: Classi dell'attributo E (Epikarst)	182
Tabella 54: Classi dell'attributo P	185
Tabella 55: Classi dell'attributo I (Infiltration Condition).	187
Tabella 56: Coefficienti di deflusso in funzione dell'uso del suolo e della pendenza.	188
Tabella 57: Classi dell'attributo K	190
Tabella 58: Coefficienti moltiplicatori (pesi) relativi agli attributi E, P, I e K	192
Tabella 59: Intervalli di vulnerabilità e corrispondenti classi nel metodo $EPIK$	193
Tabella 60: Punteggi relativi alle stringhe di pesi moltiplicatori	201