

## **Comparazione fra metodiche per la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi. Applicazione all'acquifero del Sulcis Iglesiasite (Sardegna meridionale)**

Romina Secci, Gabriele Uras

PhD Università di Cagliari, Facoltà di ingegneria, Dipartimento di Ingegneria del Territorio  
Via Marengo 3, Cagliari, e-mail: romisecci@tiscali.it  
Professore associato, e-mail:urasg@unica.it, Tel. 0706755161

### **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 aquifer systems. In particular, we have applied the SINTACS method (Civita, 1994), the EPIK method (Doerfliger N., Jeannin P.Y., Zwahlen F., 1999) and the COP method (Vias et al., 2006). 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 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.

### **Sommario**

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). 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 di bonifiche dei siti maggiormente vulnerabili e per lo sfruttamento ecosostenibile delle risorse.

### **Inquadramento geografico e geologico dell'area.**

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

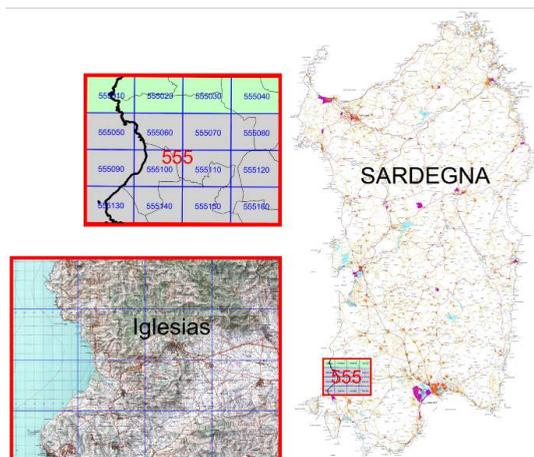


Figura 1 – Inquadramento dell'area (da Uras, Pintore, 2009).

Di questa zona si è considerata l'area ricadente all'interno del cosiddetto anello metallifero, delimitata da strutture carsiche all'interno delle quali sono presenti diversi giacimenti minerali. Il termine anello metallifero, (Merlo, 1904), indica il grande anello carbonatico che circonda il nucleo di metarenarie e filliti nei pressi della città di Iglesias (fig. 2a), che comprende anche il piccolo anello passante per le località di Monteponi, Campo Pisano e San Giovanni (fig.2b). La struttura dell'anello metallifero delimita l'acquifero carsico del Sulcis. Nel "piccolo anello" sono ubicati la maggior parte dei pozzi minerali monitorati mensilmente per anni dalla società IGEA, società deputata al controllo delle acque dopo la cessazione delle attività minerarie. La presenza e la precisione di questa moltitudine di dati riguardanti la falda acquifera sotterranea ha consentito di effettuare delle analisi precise sulla vulnerabilità all'inquinamento della zona.

I numerosi cantieri minerari susseguitisi nel tempo hanno sensibilmente modificato la falda e anche il territorio sovrastante con scavi e discariche a cielo aperto. Negli ultimi dieci anni la situazione è notevolmente peggiorata, infatti, con l'abbandono delle attività minerarie la falda è risalita e si sta contestualmente determinando un grave danno ambientale.

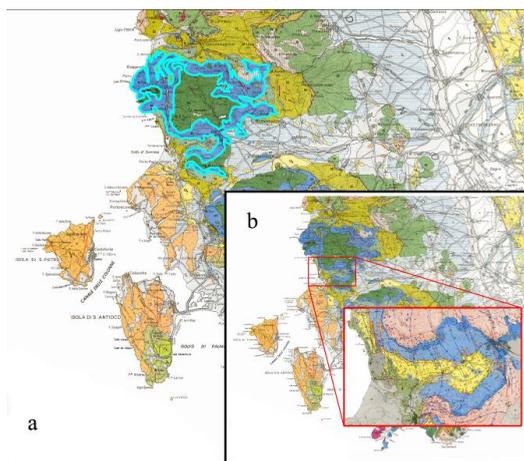


Figura 2 – Il grande (a) ed il piccolo (b) anello metallifero (da Uras, Pintore, 2009).

### 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 sono di seguito descritte in successione cronologica e in base alla natura originaria delle rocce:

- *Gruppo di Nebida*

Il gruppo di Nebida è suddiviso 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 lungo chilometri che presenta spessori fino a 100 m, poggiante 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. Nelle facies calcaree sono presenti strutture sedimentarie e frammenti di fossili.

- *Gruppo di Gonnesa*

Il gruppo di Gonnesa costituito essenzialmente da litofacies carbonatiche è rappresentato dal membro della *dolomia rigata*, dal membro della *dolomia grigia* e dal membro del *calcare ceroidale*.

Il membro della dolomia rigata si sovrappone stratigraficamente 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.

- *Gruppo di Cabitza*

Il gruppo di Cabitza è rappresentato 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.

### 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 Gonnesa. 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). 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.

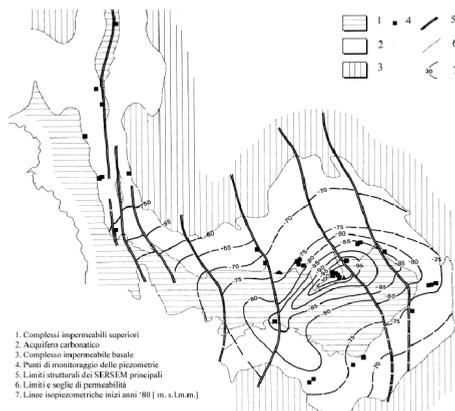


Figura 3 – Limiti dei SERSEM – (da Civita, 1983 modificata).

### **I metodi di valutazione della vulnerabilità intrinseca all'inquinamento**

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). Diversi sono i metodi utilizzati per la valutazione della vulnerabilità intrinseca di un acquifero. In questo studio sono stati presi in considerazione diversi metodi parametrici a punteggi e pesi, due dei quali specificamente tarati per lo studio degli acquiferi carsici. In generale, i sistemi parametrici si sviluppano tutti secondo il seguente schema:

- vengono selezionati i parametri sui quali effettuare la valutazione della vulnerabilità e successivamente 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; questo parametro viene a sua volta moltiplicato per un fattore moltiplicatore (peso) che evidenzia l'importanza che lo stesso assume nel contesto della valutazione della vulnerabilità;
- dalla combinazione lineare dei parametri pesati si ottiene il valore finale della vulnerabilità, valore che può essere quantitativo o qualitativo a seconda del sistema utilizzato.

### **Il metodo SINTACS**

Il primo dei metodi applicati al contesto per la valutazione della vulnerabilità, è il metodo SINTACS (Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Centro Nazionale per le Ricerche, Civita et al.). L'acronimo SINTACS deriva dai parametri che vengono presi in considerazione, corrispondenti agli stessi parametri dell'analogo modello DRASTIC (USEPA 1983,1987) e cioè 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 è stato discretizzato, per elementi finiti quadrati attraverso una griglia regolare, e per ogni area discretizzata sono calcolati i valori dei suddetti parametri. 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. 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, si ottiene dalla combinazione lineare dei pesi moltiplicati per il parametro corrispondente.

Questo indice viene normalizzato e a seconda del punteggio ottenuto viene assegnata la corrispondente classe di vulnerabilità.

### **Il metodo COP**

Il metodo COP (Vias e altri, 2006) è un metodo studiato per valutare la vulnerabilità intrinseca degli acquiferi carsici 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 della Spagna che presentano differenti caratteristiche climatiche, idrologiche ed idrogeologiche. Nel seguito viene riportata una figura che riassume il metodo nella sua complessità:

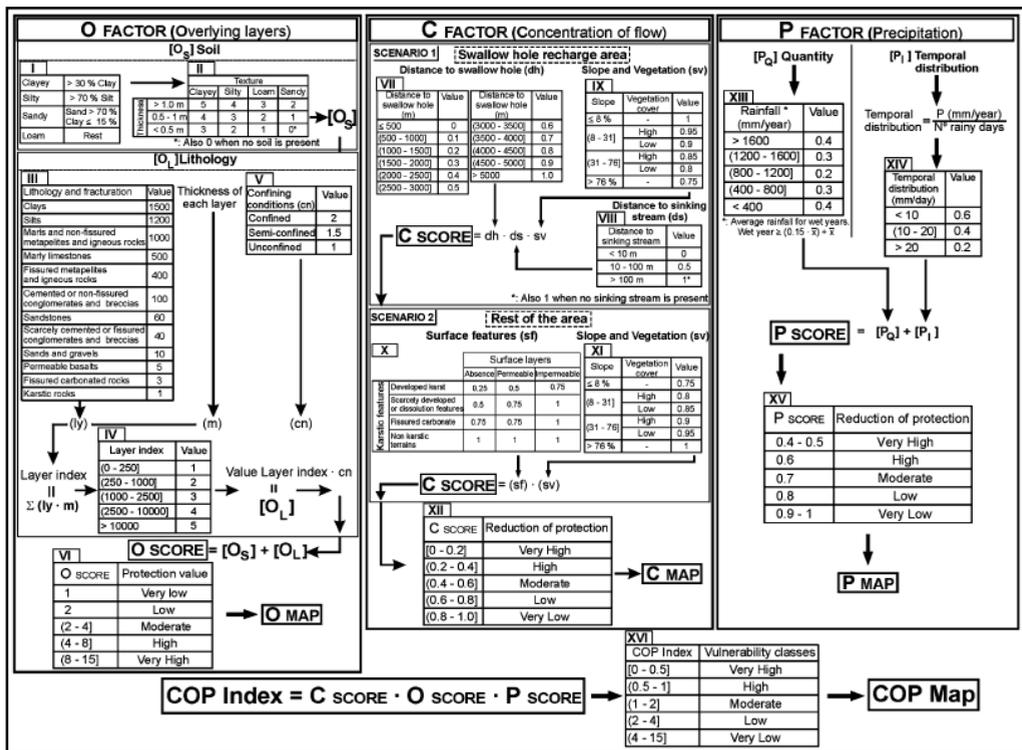


Figura 4 – Metodo COP (da Vias et al., 2006).

## Il metodo EPIK

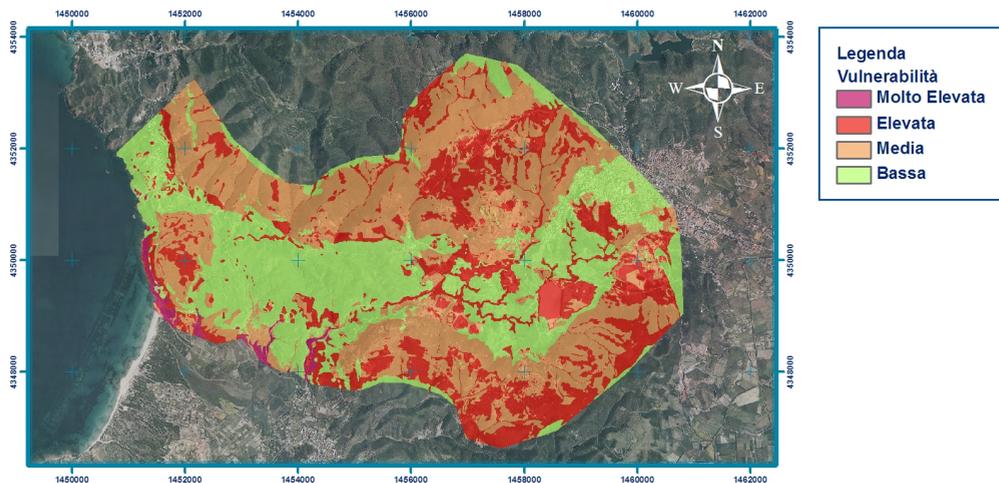
Il metodo EPIK (Costantin et al.; 2000) è un metodo parametrico a pesi e punteggi, specificamente sviluppato per classificare la vulnerabilità intrinseca degli acquiferi carsici all'inquinamento. Il metodo si basa sulle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche degli acquiferi carsici. Nel metodo vengono considerati quattro parametri: Epikarst (E), Protective Cover (P), Infiltration Condition (I) e Karst Network Development (K), che corrispondono a quattro caratteristiche dell'acquifero influenzanti il flusso dell'acqua e le condizioni di trasporto attraverso il sistema carsico.

## Applicazione del metodo SINTACS all'area in esame

L'intero territorio in esame di estensione pari a circa 43 km<sup>2</sup> è stato discretizzato suddividendolo in celle quadrate (EFQ) di 10 m di lato; per ogni EFQ, con strumenti GIS, sulla base dei dati forniti dalle società IGEA e ABBANOVA relativamente ai pozzi, si è calcolata la superficie piezometrica in periodo di piena ed il DTM della zona, riuscendo così a calcolare il valore della soggiacenza. Successivamente si è ricavato il dato relativo all'infiltrazione efficace, basandosi sulla cartografia geologica e pedologica, e sui valori di precipitazione media annua ed evapotraspirazione. L'Effetto di auto depurazione del non saturo e le caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero sono stati ricavati basandosi sui dati relativi alla litologia affiorante dell'area. Il parametro T è indicativo della capacità di attenuazione dei suoli ed è stato valutato anch'esso, come il punteggio I, sulla base della cartografia pedologica, tenendo conto in particolar modo della tessitura del suolo. La conducibilità idraulica è stata ricavata attraverso una correlazione 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. Per la valutazione del parametro relativo all'acclività della superficie topografica 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.

La maggior parte del territorio è occupata da discariche minerarie a cielo aperto, pertanto in un primo momento l'analisi della vulnerabilità ha portato ad individuare la maggior parte del territorio all'interno della stringa dell'impatto rilevante, senza considerare le caratteristiche intrinseche di carsismo dell'area, e ciò ha portato ad una carta della vulnerabilità che non rispecchiava pienamente le caratteristiche della zona. In seconda analisi si sono assegnate anche alcune aree coperte da discariche alla stringa del 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. La carta risulta più dettagliata e poiché prende in considerazione le aree carsiche fessurate e gli inghiottitoi, rispecchia maggiormente la situazione di vulnerabilità all'inquinamento della zona. In questa elaborazione le zone a vulnerabilità alta, corrispondono alle zone carsiche degradate e le zone a vulnerabilità elevata e molto elevata si trovano 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.



*Figura 5 – Carta della vulnerabilità ottenuta con il metodo SINTACS e l'applicazione della stringa "Carsismo", riducendo da quattro a sei le classi di vulnerabilità per consentire un confronto con gli altri due metodi.*

### **Applicazione del metodo EPIK all'area in esame**

Il metodo prevede che la determinazione dell'epicarso avvenga attraverso dei parametri morfologici facilmente rilevabili dall'analisi territoriale di superficie. La determinazione del parametro protective cover sarebbe dovuta avvenire su basi esclusivamente pedologiche. Sarebbe stato necessario disporre dei dati di base completi sulle caratteristiche rappresentative del suolo in termini di spessore e orizzonti geologici, e da questi, in base alla tabella di conversione dell'attributo, 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 studi di dettaglio di stampo pedologico che fossero

reperibili, ha impedito di utilizzare al meglio la metodologia. Si è ovviato a tale inconveniente mediante la classificazione indiretta del territorio attraverso la carta dell'uso del suolo regionale (CORINE LAND COVER, 2008). Per quanto riguarda il parametro I esso riguarda le condizioni di infiltrazione nell'acquifero carsico, condizioni d'infiltrazione che possono passare da concentrata a diffusa. Il parametro K, invece rappresenta lo sviluppo della rete carsica. Dalle informazioni bibliografiche si evince 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. 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. Dall'analisi della cartografia risultante dall'overlay mapping si evince che la maggior parte dell'area in studio ricade in zone a vulnerabilità elevata o molto elevata. 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. È importante ribadire, come la scelta dei punteggi e dei pesi assegnati agli attributi sia, in questo metodo, caratterizzata da una totale soggettività.

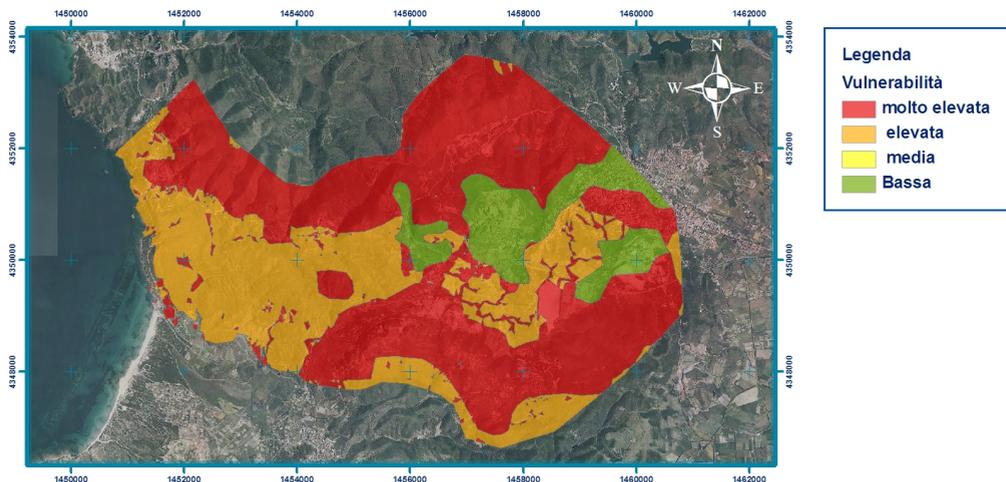


Figura 6 – Carta della vulnerabilità ottenuta dall'applicazione del metodo EPIK.

### Applicazione del metodo COP all'area in esame

Per l'applicazione del metodo si è discretizzato il territorio come negli altri metodi, in modo che fossero confrontabili. Il fattore C rappresenta la capacità dell'acqua di aggirare gli strati protettivi sovrastanti (Daly et al. 2002), cioè il modo in cui le precipitazioni o un vicino acquifero si infiltrano concentrandosi in un inghiottitoio, non coinvolgendo la zona non satura. La posizione di inghiottitoi, fratture, faglie e grotte di origine carsica è stata ricavata dalla Cartografia Geologica Regionale. La posizione delle grotte è stata individuata digitalizzando e georeferenziando i dati ricavati dal catasto delle grotte censite dai Gruppi Speleologici della zona. Il valore del parametro P è dato dalla somma dei punteggi di due sub fattori: il subfattore  $P_0$  che rappresenta la quantità di pioggia media annua all'interno del bacino e il sub fattore  $P_1$  [(mm/giorno)/n° giorni piovosi all'anno]. I dati meteorologici di base sono quelli del SISS ( Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna, Servizio idrografico, 1992) dal 1922 all'anno 1992 già utilizzati per le elaborazioni del

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

Il subfattore Os 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). 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. 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.

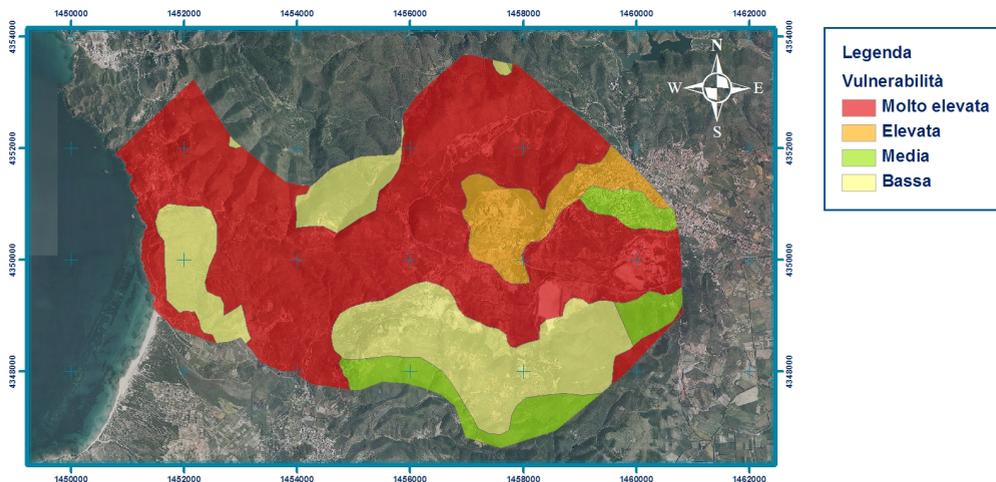


Figura 7 – Carta della vulnerabilità ottenuta dall'applicazione del metodo COP.

### Risultati a confronto

In generale si può dire che tutti e tre i metodi 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. Le carte ottenute con i tre metodi non sono sovrapponibili ad una prima analisi, questo è dovuto principalmente al fatto che, i metodi di valutazione della vulnerabilità intrinseca applicati, si basano su dati di input diversi e con diversa precisione di base. E' evidente 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 spiegabile considerando il fatto che i due metodi (COP ed EPIK) sono stati tarati appositamente per lo studio degli acquiferi di tipo carbonatico e 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 per la Sardegna (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 per effettuare la valutazione delle dinamiche che interagiscono con la vulnerabilità.

La cartografia pedologica utilizzata, ha un dettaglio scarso in quanto è basata su uno studio in scala 1:250.000 e non esistono cartografie più dettagliate. Per alcune zone dove i dati sono imprecisi se non inesistenti si è dovuto ovviare con l'utilizzo di dati pedologici presenti negli attributi della carta dell'uso del suolo.

Il metodo SINTACS, invece, utilizza diversi parametri basati più sulla geologia che sulla pedologia e poiché i dati geologici a disposizione per la zona in esame sono molto più precisi di quelli pedologici, è stato possibile effettuare con questo metodo un'analisi più dettagliata della zona rispetto ai metodi precedenti. 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.

Fra i tre metodi utilizzati quello meno affidabile è forse il metodo EPIK in quanto la scelta dei punteggi e dei pesi assegnati ai parametri è caratterizzata da una totale soggettività e può variare molto da un utente ad un altro. Inoltre tale metodo necessiterebbe per una precisione maggiore di dati continui relativi allo spessore dello strato carbonatico e dell'Epicarso (zona che si trova immediatamente al di sotto del suolo e 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 preciso fra i tre risulta essere il metodo SINTACS, sia perché più completo, in quanto prende in considerazione un numero maggiore di parametri di input rispetto agli altri due metodi, sia perché risulta il metodo più versatile. Inoltre nella metodica si tiene conto della presenza di zone o attività potenzialmente inquinanti nell'applicazione delle stringhe.

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 estrema 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**

La ricerca ha consentito di confrontare i metodi e di individuare i pro e i contro di ogni metodica e le caratteristiche dello studio a cui ognuno di essi potrebbe essere adatto. Le cartografie finali 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 maggiore di parametri di input rispetto agli altri due metodi, sia perché il grado di discrezionalità nell'assegnare i punteggi rispetto 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 m<sup>3</sup> di ricarica attiva dell'acquifero (ricostruzione dati IGEA), ne vengono emunti appena 6 milioni di m<sup>3</sup> all'anno per la rete idrica potabile (dati ABBANOVA, ente gestore acque). 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**

Abbanova spa (2000 – 2007), *Report interni*.

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'eduzione 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.

Carmignani L.; Coccozza T.; Pertusati P. (1983). *Carta Geologica del Paleozoico dell'Iglesiente (Sardegna Sud-Occidentale. Scala 1:50000*. Litografia Artistica Cartografica.

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., De Maio M. (2000). *Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5* (Pitagora Editrice).
- 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.
- Cocozza T. (1967). *I rapporti cambro-ordoviciani nella zona di Acqueresi*. Resoconti della 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.
- 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.
- Ente Autonomo del Flumendosa, (1993), SISS, *Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna - dati termo-pluviometrici, 1924-1992*.
- IGEA S.p.a. (2004). Idrogeologia bacino Monteponi. Tratto da *Piano di Caratterizzazione Valle Rio S.Giorgio*.
- 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
- 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.
- Uras, G., Pintore M. (2009), "Acque di miniera dell'Iglesiente: storia, analisi e caratterizzazione", *EHEGeology*.2009-12.0-17.0259, 29-39.
- 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.