

Valutazione precauzionale della vulnerabilità degli acquiferi attraverso tecniche di matematica fuzzy

Enrico Cameron¹, Gian Francesco Peloso²

¹Studio di consulenza geologica e ambientale GeoStudio, Morbegno (SO), geostd@tele2.it, tel/fax 0342 615987.

²Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pavia, gpeloso@unipv.it, tel. 0382 985828.

Precautionary assessment of aquifer vulnerability through fuzzy mathematics techniques

ABSTRACT: The assessment of aquifer's vulnerability to pollution is an important tool for protecting groundwater resources. Vulnerability may be underestimated because of uncertainties affecting the evaluation, with possible adverse consequences for pollution prevention policies; in order to prevent underestimation a precautionary vulnerability value may be used as a reference for such policies. This work illustrates a method for selecting a precautionary vulnerability value under uncertainty, applied to the vulnerability rating system SINTACS R5 (Civita, De Maio, 1997) and to the territory of the municipality of Vigevano (PV). Possibility theory and fuzzy mathematics are used: 1) for defining quantitative models of the uncertainties as to the parameters and partial ratings used to evaluate vulnerability, included those of a subjective nature; 2) for propagating such uncertainties to the final vulnerability rating; 3) for calculating how much a vulnerability rating among the possible ones can be considered precautionary, starting from a rigorous definition of a precaution degree related to each rating. Vulnerability maps that correspond to different precaution degrees and that can be obtained automatically are illustrated, and a possible initial criterion for selecting an optimal degree is discussed.

Key words: aquifer vulnerability, precautionary assessment, fuzzy mathematics, possibility theory

Parole chiave: vulnerabilità degli acquiferi, stima precauzionale, matematica fuzzy, teoria delle possibilità.

Riassunto

Conoscere la vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento è importante per la protezione delle risorse idriche sotterranee. La vulnerabilità può essere sottostimata a causa di incertezze nella sua valutazione, con possibili conseguenze negative sulle politiche di prevenzione dell'inquinamento; per ridurre la possibilità di sottostimare la vulnerabilità – utilizzando metodi parametrici che la esprimono come punteggio numerico - si può sceglierne un valore precauzionale da utilizzare come riferimento per tali politiche. Questo lavoro illustra un metodo per selezionare, in condizioni di incertezza, un valore precauzionale della vulnerabilità, applicato al sistema parametrico SINTACS R4 (Civita, De Maio, 1997) e al territorio comunale di Vigevano (PV). La teoria della possibilità e la matematica fuzzy sono utilizzate: 1) per definire modelli quantitativi delle incertezze, anche di natura soggettiva, circa i parametri e i punteggi parziali utilizzati per valutare la vulnerabilità; 2) per propagare tali incertezze al punteggio finale; 3) per calcolare quanto un punteggio di vulnerabilità fra quelli possibili possa definirsi precauzionale, a partire da una definizione rigorosa del grado di precauzione relativo a ciascun punteggio. Sono descritte carte della vulnerabilità che corrispondono a diversi gradi di precauzione e possono essere ottenute automaticamente, ed è discusso un possibile criterio iniziale per individuare un valore ottimale del grado

di precauzione stesso.

Introduzione

La vulnerabilità degli acquiferi può essere definita come la loro attitudine ad essere raggiunti da un carico inquinante e diffonderlo, anche mitigandone gli effetti attraverso fenomeni di auto-depurazione. La stima della vulnerabilità, e le carte della sua distribuzione areale, hanno notevole importanza nell'ambito della pianificazione territoriale e della protezione delle risorse idriche sotterranee, poiché contribuiscono ad orientare le scelte relative all'uso del suolo – tra cui quelle riguardanti la localizzazione di attività potenzialmente inquinanti - a definire le zone di protezione degli acquiferi e a stabilire le normative di tutela.

Fra i metodi di stima della vulnerabilità – tra cui si ricorda anche DRASTIC (Aller *et alii*, 1987) – sarà considerato in questo articolo il sistema parametrico SINTACS (Civita, De Maio, 1997) sviluppato nell'ambito delle attività del Gruppo Nazionale di Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del C.N.R. Con SINTACS la vulnerabilità è espressa da un punteggio calcolato a partire dal valore di sette parametri - dalla profondità della falda, al tipo di suolo, all'acclività della superficie topografica – cui fa riferimento ciascuna lettera dell'acronimo del metodo.

Il territorio da esaminare è suddiviso in elementi (celle) entro i quali la situazione idrogeologica, rispetto alla

valutazione della vulnerabilità, si considera uniforme.

Dal valore dei diversi parametri all'interno di ciascuna cella si ottiene un punteggio parziale di vulnerabilità, in alcuni casi mediante una scelta guidata, ma in parte soggettiva, del tecnico che effettua la valutazione. Ciascun punteggio parziale si moltiplica poi per un peso dipendente dall'assetto idrogeologico e dall'uso del suolo nelle diverse zone del territorio considerato; infine si sommano i risultati ottenendo un punteggio totale di vulnerabilità fra 26 e 260 - normalizzabile in una scala da 0 a 100 - sulla base del quale si può assegnare ogni cella a una classe di vulnerabilità, da molto bassa a estremamente elevata.

Ci può essere incertezza circa il valore da attribuire a ciascun parametro, in primo luogo in relazione a possibili errori nella sua misura o valutazione, nella stima della sua distribuzione areale e - anche per questo - nell'attribuzione del suolo e del sottosuolo alle differenti classi pedologiche o litologiche considerate nel metodo SINTACS. Vi può, perciò, essere incertezza relativamente ai punteggi parziali di vulnerabilità da assegnare a ciascuna cella, con il caso particolare in cui la scelta sia di natura in parte soggettiva; infine ci può essere incertezza anche circa i pesi da utilizzare per ottenere il punteggio finale.

Il termine incertezza, in questo articolo, si usa per indicare una situazione in cui non esiste un unico valore possibile da attribuire ad un parametro o ad un punteggio parziale, ma una pluralità di valori in vario grado plausibili. In presenza di incertezza, dunque, esiste in linea di principio anche una pluralità di valori plausibili del punteggio totale di vulnerabilità. Riferirsi a un punteggio ottenuto senza tener conto dell'incertezza stessa può condurre sia a sovrastimare la vulnerabilità sia a sottovalutarla, in quest'ultimo caso con potenziali conseguenze negative sulla protezione delle risorse considerate. Migliorare l'affidabilità delle indagini può rappresentare una soluzione, ma oltre a essere un percorso non sempre praticabile, anche per ragioni di costo, non elimina - in generale - la possibilità di sottostimare la vulnerabilità con le conseguenze di cui si è detto; tale possibilità può invece essere ridotta scegliendo un valore precauzionale del punteggio di vulnerabilità, caratterizzato da un ben definito grado di precauzione, la cui conoscenza contribuisca a orientare la scelta.

A questo scopo è necessario:

1. Costruire un modello delle incertezze, anche di tipo soggettivo, sui dati, sui punteggi parziali e sui pesi utilizzati per ottenere il punteggio totale.
2. Trasferire tali incertezze al punteggio totale, determinando un insieme di suoi valori possibili ed il grado di plausibilità di ciascuno.
3. Valutare quanto la scelta di un dato punteggio fra quelli possibili sia da ritenersi precauzionale, nel senso che riduca la possibilità di sottostimare la vulnerabilità.

La teoria della possibilità, quella degli insiemi fuzzy e la matematica fuzzy costituiscono strumenti idonei per i compiti di cui ai punti precedenti; attraverso le prime due, in particolare, possono essere rappresentate in modo

efficace anche incertezze di tipo soggettivo, comprese condizioni estreme quali l'ignoranza totale circa i valori assunti da una data variabile.

Con l'approccio descritto nel presente articolo dalle incertezze sui parametri e sui punteggi parziali si ricava una gamma di possibili punteggi totali di vulnerabilità, ciascuno caratterizzato da un ben definito livello di plausibilità. A ciascun punteggio possibile è poi associato un grado di precauzione da utilizzare per la scelta finale della vulnerabilità da attribuire ad una cella. Il metodo è stato applicato al territorio di Vigevano (PV) nell'ambito del lavoro di tesi in corso di elaborazione da parte di Luca Garavaglia presso il Dipartimento di Ingegneria Ambientale dell'Università degli Studi di Pavia. Il risultato è uno strumento software che permette di ottenere in modo automatizzato cartografie della vulnerabilità che rappresentano "viste" del territorio caratterizzate da un grado di precauzione variabile fra 0 e 1 e selezionabile secondo criteri opportuni da un eventuale decisore finale per definire, di conseguenza, i criteri di progettazione o gli indirizzi di pianificazione.

Esistono, in letteratura, altre applicazioni della logica fuzzy alla valutazione della vulnerabilità degli acquiferi (ad es. Gemitzi *et alii*, 2005, Dixon *et alii*, 2002, Huicheng *et alii*, 1999) che si concentrano principalmente sul metodo di stima; il lavoro presentato propone invece una procedura di supporto alle decisioni per gestire, in un'ottica precauzionale, l'incertezza che rimane *dopo* la stima stessa. La tecnica utilizzata fa sì che per raggiungere il voluto grado di protezione delle risorse idriche siano necessarie valutazioni meno conservative della vulnerabilità minore è l'incertezza sulla sua stima e viceversa, come auspicabile; non si ha, inoltre, un rischio di sovrastime indesiderate della vulnerabilità maggiore di quello che sia ha applicando SINTACS in modo standard.

Cenni sulle teorie matematiche utilizzate

La teoria delle possibilità e quella degli insiemi fuzzy sono state introdotte, alla fine degli anni '60, dal matematico di origine armena Lotfi Zadeh, sono state sviluppate in seguito anche da altri autori e rappresentano strumenti particolarmente adatti per formalizzare incertezze di tipo non probabilistico circa l'accadere di un evento in generale, e circa il valore assunto da una variabile come caso particolare. Si illustreranno nel seguito, in modo introduttivo e sintetico, le teorie e le tecniche matematiche utilizzate, rimandando a testi specifici per una loro presentazione formale (vedi ad esempio Dubois, Prade, 1988, 2000).

Un insieme fuzzy S , i cui elementi si suppongono tratti da un qualche universo U , è rappresentato da una funzione $\mu_S : U \rightarrow [0,1]$ detta *funzione di appartenenza* di S ; quest'ultima associa ad un oggetto x di U il valore $\mu_S(x)$ - da 0 a 1 - che si definisce *grado di appartenenza* di x all'insieme fuzzy S , ed esprime in che misura x si considera

appartenente ad S .

Se $\mu_S(x) = 0$ allora x non appartiene a S , se $\mu_S(x) = 1$ allora x appartiene a S nello stesso senso della teoria degli insiemi ordinari, mentre se $0 < \mu_S(x) < 1$ allora x appartiene ad S solo in una certa misura, data appunto da $\mu_S(x)$.

Se l'insieme fuzzy S contiene gli elementi di U caratterizzati da una certa proprietà P , allora il grado di appartenenza $\mu_S(x)$ di un elemento x a S è anche interpretato come il grado con cui x soddisfa la proprietà P .

In Figura 1, ad esempio, è mostrato un insieme fuzzy A , i cui elementi sono le temperature esterne - prese dall'intervallo da 0 a 50 °C - riferite ad una zona a clima temperato, a mezzogiorno, e caratterizzate dalla proprietà di essere alte.

La funzione di appartenenza vale 0 per temperature inferiori o uguali a 10° C, a indicare che queste non appartengono all'insieme fuzzy A e non sono ritenute in alcun modo alte.

Temperature superiori a 10 °C appartengono ad A con grado progressivamente maggiore, e sono via via più compatibili con la proprietà di essere alte. Infine temperature da 35° C fino a 50° C appartengono pienamente all'insieme fuzzy e sono, perciò, considerate del tutto alte.

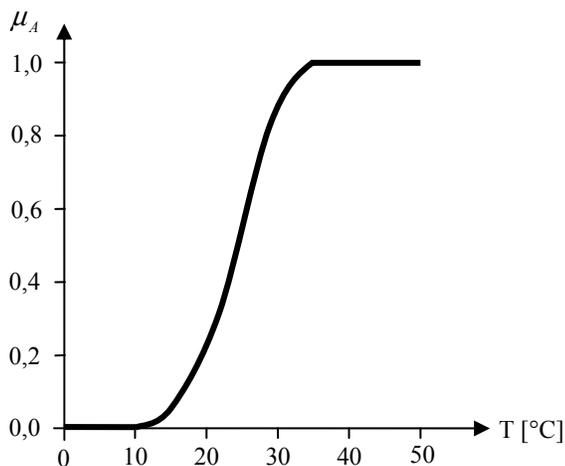


Figura 1 – Un insieme fuzzy di temperature caratterizzate dalla proprietà di essere alte.

Figure 1 – A fuzzy set with temperatures having the property of being high.

Le caratteristiche della funzione di appartenenza sono scelte in base allo specifico problema considerato e alla proprietà che si vuole rappresentare; la scelta, in generale, non è univoca e dipende anche da valutazioni di tipo soggettivo.

Allo stesso tempo gli insiemi fuzzy costituiscono modelli formalizzati e numerici – e dunque oggettivamente confrontabili - di proprietà e concetti anche intrinsecamente imprecisi e, appunto, soggettivi, quali l'essere alta di una

temperatura. Questi modelli sono utilizzati all'interno di opportune cornici teoriche - tra cui la matematica e la logica fuzzy – ed impiegati proficuamente in una pluralità di campi, dalla teoria delle decisioni a quella del controllo.

Una funzione di appartenenza si dice *normalizzata* se il grado di appartenenza raggiunge 1 per qualche elemento dell'insieme sul quale la funzione è definita.

Un insieme fuzzy definito sull'insieme R dei numeri reali e la cui funzione di appartenenza sia normalizzata – come in Figura 1 - si chiama *quantità fuzzy*.

Se R contiene i valori che una certa variabile v può assumere allora il grado di appartenenza $\mu(x)$ ad una quantità fuzzy è interpretabile anche come misura della possibilità che v assuma il valore x .

Le proprietà di tale misura – e della sua duale, detta misura di necessità – sono definite nella teoria delle possibilità; in termini interpretativi:

1. Se $\mu(x) = 0$ è impossibile che la variabile v assuma il valore x .
2. Se $0 < \mu(x) < 1$ è possibile, in misura pari a $\mu(x)$, che la variabile v assuma il valore x .
3. Se $\mu(x) = 1$ è pienamente possibile che la variabile v assuma il valore x ; questo non implica, tuttavia, che sia certo che il valore di v sia x .

La Figura 1 si può allora considerare una distribuzione di possibilità sull'insieme delle temperature fra 0 °C e 50 °C; in particolare – poiché la proprietà delle temperature di mezzogiorno nella zona in esame è di essere alte - il grado di appartenenza $\mu_A(x)$ si può interpretare come possibilità che la temperatura sia x dato che deve essere alta.

Dalla Figura 1 si rileva, perciò, che la temperatura stessa non può essere compresa fra 0° C e 10 ° C, poiché $\mu_A(x) = 0$ per ogni x entro questo intervallo; la possibilità aumenta progressivamente per temperature via via maggiori di 10 ° C, fino a che diviene pienamente possibile che la temperatura – dovendo essere alta - sia fra 35 °C e 50 °C, poiché in questo intervallo il grado di appartenenza vale costantemente 1.

Come casi estremi di distribuzioni di possibilità si possono considerare gli esempi rappresentati dalle figure 2 e 3.

Nella prima figura è illustrata una situazione nella quale è certo che la temperatura di mezzogiorno, nell'area in esame, è di 30 °C; infatti 30° C è l'unica temperatura possibile poiché ad essa corrisponde un grado di appartenenza/misura di possibilità pari a 1, mentre lo stesso grado/misura è 0 per ogni altro valore di temperatura.

La Figura 3 esprime invece una condizione di ignoranza totale circa la temperatura a mezzogiorno nella zona in questione, poiché ogni valore fra quelli ammissibili è ugualmente e pienamente possibile, essendo il grado di appartenenza – o misura di possibilità, pari a 1 su tutto l'intervallo 0 – 50 °C.

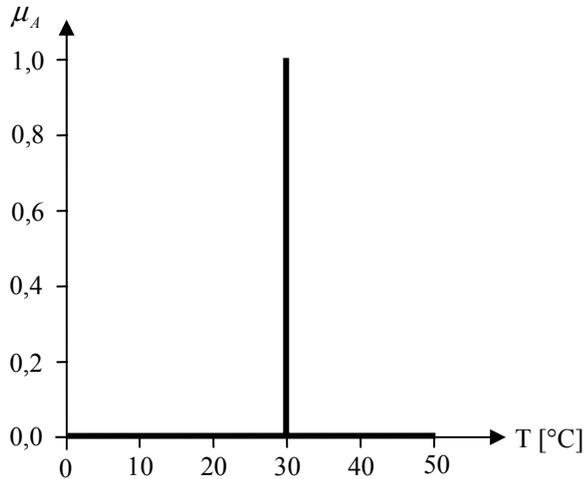


Figura 2 – Un insieme fuzzy che esprime una condizione di conoscenza certa del valore della temperatura (30 °C).
 Figure 2 - A fuzzy set expressing a certain knowledge as to the temperature value (30 °C).

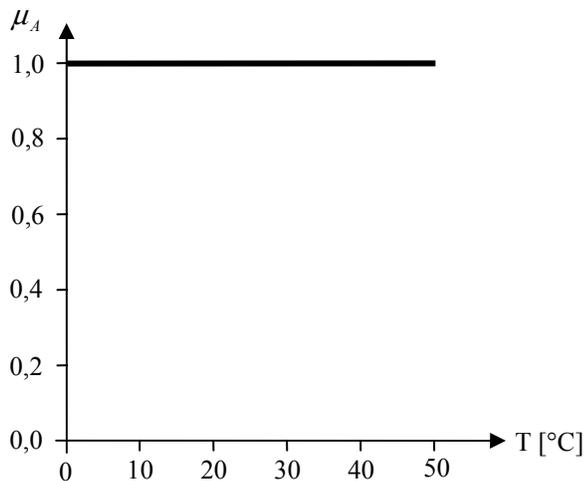


Figura 3 – Un insieme fuzzy che esprime una condizione di ignoranza totale circa il valore della temperatura.
 Figure 3 - A fuzzy set expressing a state of total ignorance as to the temperature value.

La possibilità che il valore di una variabile v sia compreso in un insieme I è data dall'estremo superiore dei valori assunti dal grado di appartenenza in corrispondenza degli elementi di I , cioè $\sup\{\mu(x)|x \in I\}$. In riferimento, ad esempio, alla Figura 1 la possibilità che la temperatura sia fra 20 °C e 30 °C è circa 0,84, pari al massimo della funzione di appartenenza nello stesso intervallo.

Per una migliore comprensione del contenuto dei paragrafi successivi occorre, ora, introdurre qualche ulteriore nozione.

Il *supporto* di un insieme fuzzy S è l'insieme – ordinario – degli oggetti per i quali il grado di appartenenza è maggiore di 0; nella Figura 1 è costituito dalle temperature fra 10 °C (esclusa) e 50 °C.

Dato un valore α da 0 a 1 si dice α -cut di un insieme fuzzy S l'insieme – ordinario – degli oggetti per i quali il grado di appartenenza è maggiore o uguale ad α . Ancora nella Figura 1 si può verificare che per $\alpha=0,2$ il relativo α -cut è l'insieme delle temperature fra circa 20 °C e 50 °C.

Una quantità fuzzy con supporto limitato, funzione di appartenenza unimodale – cioè con un solo massimo, in questo caso pari a 1 – e α -cut che siano tutti degli intervalli si chiama *numero fuzzy*; in altre definizioni di numero fuzzy non si richiede l'unimodalità o, viceversa, si richiede che la funzione di appartenenza soddisfi proprietà più restrittive di quella indicata. Queste alternative non rivestono significativa importanza per questo lavoro.

Un esempio di numero fuzzy – detto *triangolare* – è mostrato in Figura 4. Il grado di appartenenza 1 è assegnato alla migliore stima, al valore più plausibile assunto da una quantità – nella Figura 4 una temperatura di 30 °C – mentre gli estremi inferiore e superiore del supporto (15 °C e 40 °C nella stessa figura) indicano rispettivamente il minimo e il massimo valore possibile di tale quantità. Numeri fuzzy con minore varianza, quale quello tratteggiato nella stessa Figura 4, indicano una minore incertezza, perché valori più lontani dalla migliore stima sono meno plausibili.

La Figura 4, infine, può interpretarsi anche come insieme fuzzy di temperature caratterizzate dalla proprietà di essere circa uguali a 30 °C. Il grado di appartenenza rappresenta allora la compatibilità fra ciascuna temperatura e la proprietà suddetta.

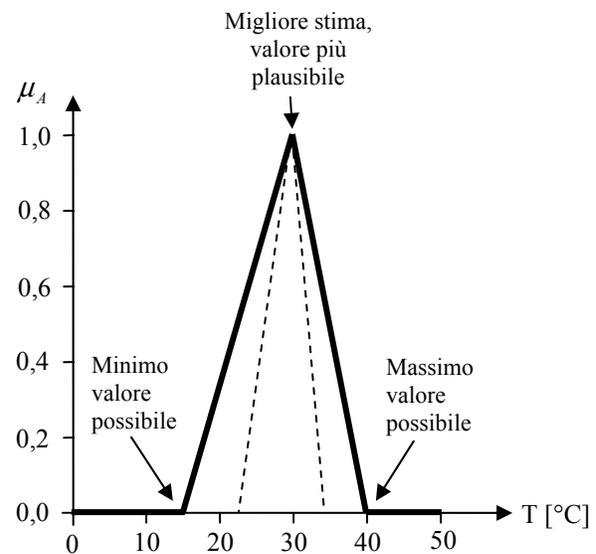


Figura 4 – Due numeri fuzzy; quello indicato con la linea tratteggiata corrisponde a una minore incertezza.

Figure 4 - Two fuzzy numbers; the one indicated by the dashed line corresponds to a lesser uncertainty.

I numeri fuzzy sono rappresentazioni, di tipo non probabilistico, di quantità note solo approssimativamente e di valutazioni soggettive circa il valore di tali quantità. Si tratta di modelli di incertezza che implicano, in pratica, il

solo confronto fra possibilità, richiedono meno assunti di rappresentazioni fondate sulla teoria della probabilità e, in diverse situazioni, sono più facilmente giustificabili rispetto a queste ultime sotto il profilo dell'interpretazione (Bárdossy, Fodor, 2005, cfr. anche Dubois, Prade, 2000).

Nel seguito saranno considerate anche valutazioni soggettive di quantità non misurabili, e in particolare di punteggi parziali che SINTACS richiede di scegliere all'interno di uno spettro di valori. In tal caso si assumerà che la possibilità assegnata ad ogni punteggio parziale corrisponda al grado di plausibilità che il valutatore attribuisce a tale punteggio parziale.

Tra numeri fuzzy e tra questi e i numeri reali è possibile effettuare operazioni aritmetiche, come la somma e la moltiplicazione; in generale molti concetti e procedimenti della matematica ordinaria sono stati riformulati per operare con enti fuzzy.

Si accenna, da ultimo, all'importante *principio di estensione*, utilizzato per trasferire l'incertezza sui valori della c.d. variabile indipendente di una funzione, ai valori della c.d. variabile dipendente.

Se A è un insieme fuzzy definito da una funzione di appartenenza μ_A , e f è una funzione definita su A con valori in un insieme B , allora su quest'ultimo si può definire una funzione di appartenenza μ_B data da:

$$\mu_B(y) = \begin{cases} \sup\{\mu_A(x) \mid x \in f^{-1}(y)\} & \text{se } f^{-1}(y) \neq \emptyset \\ 0 & \text{se } f^{-1}(y) = \emptyset \end{cases}$$

Dunque il grado di appartenenza (o la misura di possibilità) di un elemento y di B è dato dall'estremo superiore dell'insieme dei gradi di appartenenza degli elementi x di A , se ne esiste qualcuno, nella controimmagine di y , ossia nell'insieme degli elementi x di A cui la f associa l' y considerato; altrimenti, se y non è associato dalla f ad alcun elemento di A , il suo grado di appartenenza $\mu_B(y)$ è 0. In questo modo, ad esempio, se $f(x) = x^2$ e l'incertezza sui valori assunti dalla x è rappresentata da un numero fuzzy è possibile ottenere un altro numero fuzzy che rappresenta l'incertezza sui valori assunti dal quadrato di x .

Il sistema SINTACS

I parametri utilizzati per valutare la vulnerabilità con il metodo SINTACS sono sette - uno per ogni lettera dell'acronimo - e precisamente: la profondità della superficie piezometrica rispetto al piano campagna locale o soggiacenza (S), l'infiltrazione efficace (I), la litologia del mezzo non saturo (N), il tipo di suolo (T), la litologia dell'acquifero (A), la sua conducibilità idraulica (C) ed infine l'inclinazione della superficie topografica (S).

Come accennato in premessa il territorio da analizzare è suddiviso in elementi discreti detti celle - di norma quadrati - entro i quali la situazione idrogeologica, ai fini della stima di vulnerabilità, si ritiene uniforme.

Dal valore di ogni parametro all'interno di una cella si ricava, innanzi tutto, un punteggio parziale di vulnerabilità v_i - con $i = 1, 2, \dots, 7$ - mediante due tipi di diagrammi, esemplificati nelle figure 5 e 6; il primo è una funzione che associa ad ogni profondità della falda un determinato punteggio parziale, il secondo associa ad ogni tipo litologico di acquifero un intervallo di punteggi parziali.

Nel primo caso il punteggio parziale è legato ad una grandezza fisica in linea di principio misurabile, nel secondo caso la scelta del punteggio parziale è all'interno di un intervallo predeterminato, ma è caratterizzata da un certo grado di soggettività.

Diagrammi di tipo analogo a quello di Figura 5 sono utilizzati per determinare anche i punteggi parziali relativi all'infiltrazione efficace, alla conducibilità idraulica e all'inclinazione della superficie topografica.

Diagrammi di tipo analogo a quello di Figura 6 sono, invece, utilizzati sia per determinare i punteggi parziali associati, oltre che alla litologia dell'acquifero, a quella del mezzo non saturo e al tipo di suolo, sia per determinare fattori quali il coefficiente di infiltrazione potenziale, utilizzato per stimare quella efficace, o la conducibilità idraulica in relazione alla litologia, se non ottenuta attraverso prove in campo o misure di laboratorio. Opportune relazioni permettono di tener conto della situazione geologica di dettaglio, ad esempio della presenza nello spessore non saturo di strati con caratteristiche differenti.

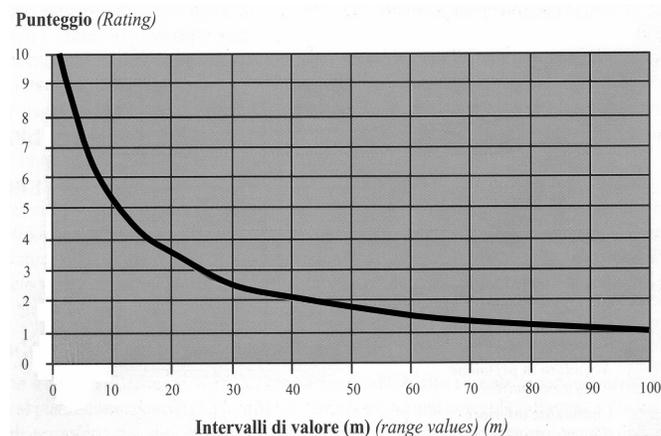


Figura 5 - Diagramma che correla la profondità della falda al punteggio parziale (da Civita, De Maio, 1997).

Figure 5 - Diagram correlating the water table depth to the partial vulnerability rating (from Civita, De Maio, 1997)..

A ciascun parametro è assegnato un peso p_i che ne determina l'importanza relativa nel calcolo del punteggio finale di vulnerabilità. I pesi dipendono dalla situazione idrogeologica, dall'uso del suolo e dagli impatti conseguentemente attesi nelle diverse zone del territorio considerato; sono dati in apposite tabelle per situazioni-tipo, ma sono adattabili dall'utente al caso specifico purché la loro somma sia sempre uguale a 26.

Complessi idrogeologici (*Hydrogeological Complex*)

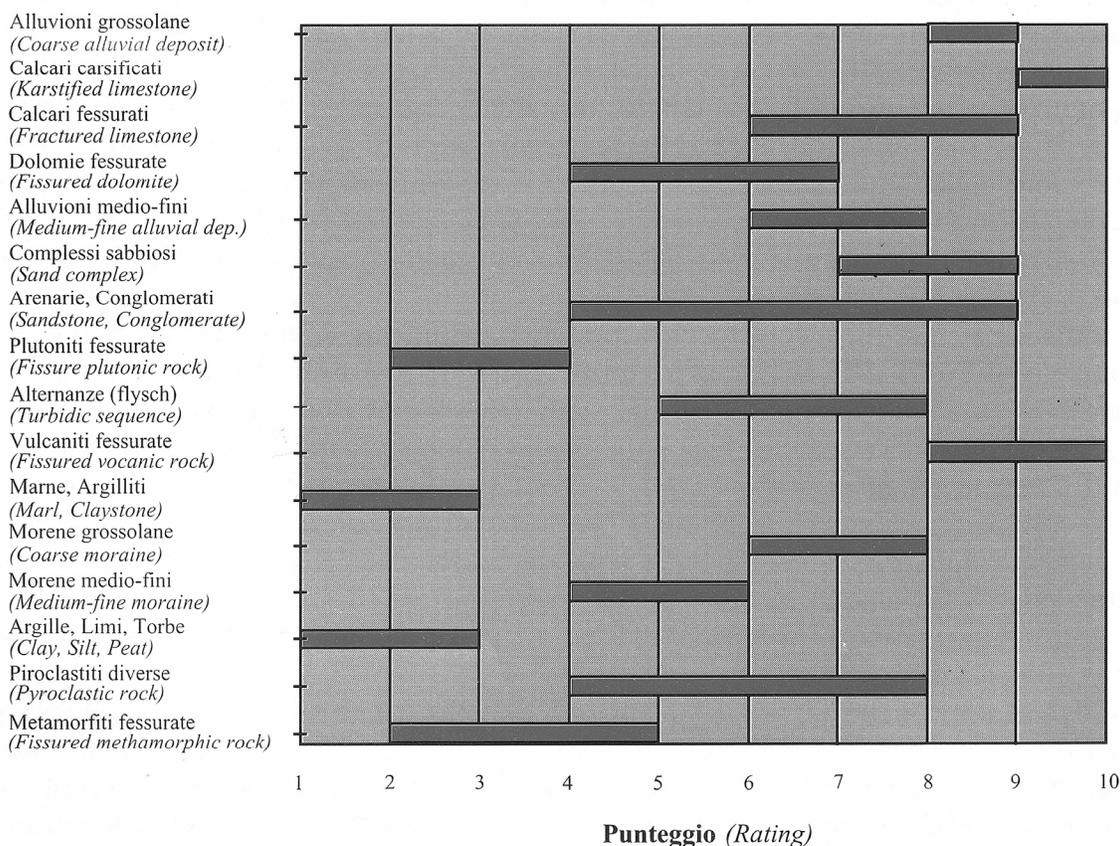


Figura 6 – Diagramma che correla il tipo litologico dell’acquifero al punteggio parziale (Civita, De Maio, 1997).
 Figure 6 - Diagram correlating the aquifer lithology with the partial vulnerability rating.

Il punteggio totale di vulnerabilità V , compreso fra 26 e 260, è dato dalla formula:

$$V = \sum_{i=1}^7 p_i v_i$$

Il punteggio normalizzato V_n , compreso fra 0 e 100, si ottiene dalla relazione:

$$V_n = \left(\frac{V - 26}{260 - 26} \right) \cdot 100$$

In base al punteggio totale o a quello normalizzato ciascuna cella in cui il territorio indagato è stato suddiviso può essere assegnata ad una classe di vulnerabilità, come indicato nella tabella 1, ottenendo una mappa di vulnerabilità il cui grado di dettaglio dipende dalle dimensioni - e dunque dall’area - degli elementi considerati.

Cartografie della vulnerabilità possono essere prodotte assegnando uno specifico colore ad ogni classe e quindi ad ogni cella della griglia di valutazione della vulnerabilità, griglia che può poi essere sovrapposta ad un’opportuna base cartografica che rappresenta il territorio considerato.

Si rimanda ai testi ed agli esempi di applicazione di

SINTACS per descrizioni complete e approfondimenti sull’uso del metodo (v. ad es. Civita, De Maio, 1997) .

Tab. 1 – Determinazione delle classi di vulnerabilità in base al punteggio totale e a quello normalizzato.
 Tab. 1 - Vulnerability classes based on the vulnerability rating and the normalized vulnerability rating.

Punteggio totale	Punteggio normalizzato	Classe di vulnerabilità
26 - 80	0 - 24	Molto bassa
81 - 105	25 - 35	Bassa
106 - 140	36 - 49	Media
141 - 186	50 - 69	Alta
187 - 210	70 - 79	Elevata
211 - 260	80 - 100	Estremamente elevata

Il territorio considerato

A scopo esemplificativo e comparativo il metodo di stima precauzionale della vulnerabilità degli acquiferi descritto in questo articolo è stato applicato a un’area per la quale erano già disponibili dati sulla vulnerabilità ottenuti attraverso il

metodo SINTACS. Si tratta, in particolare, della vulnerabilità della falda libera entro il territorio del Comune di Vigevano (PV) analizzato nell'ambito della tesi di laurea di Paola Mancin, svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Ambientale dell'Università di Pavia (relatore prof. G. F. Peloso, a.a. 2001-2002), tesi cui ci si riferirà anche per la descrizione delle caratteristiche del territorio stesso e per i dati di base utilizzati per la stima della vulnerabilità.

La zona esaminata, situata nella parte occidentale della pianura padana lombarda, ha un'estensione di circa 81 km². Le quote topografiche sono comprese fra 171 e 17 m s.l.m. mentre la pendenza del terreno è dell'ordine dello 0,2%, tranne che in corrispondenza delle due scarpate del F. Ticino, la prima delle quali ha un'inclinazione intorno al 3% e la seconda del 30% circa.

Il Ticino delimita a est l'area oggetto di indagine, che è attraversata anche dal T. Tradoppio Lomellino. Nella parte settentrionale del territorio sono presenti diverse risorgive.

I suoli sono di composizione sabbiosa, ghiaioso-sabbiosa e, meno frequentemente, limoso-sabbiosa.

Il sottosuolo è caratterizzato da depositi alluvionali con potenza complessiva di circa 250-300 m. Si tratta in prevalenza di litologie di tipo sabbioso, sabbioso-ghiaioso o ghiaioso-sabbioso con livelli argillosi di modesto spessore ed estensione.

Nella porzione più occidentale del territorio si osserva un incremento delle litologie a granulometria più fine, in particolare argille e limi miscelati con la frazione sabbiosa, che restano in ogni caso di importanza subordinata rispetto ai depositi a granulometria più grossolana.

Solo oltre 100 m di profondità si trovano livelli pelitici di notevole potenza e continuità areale anche oltre la zona indagata.

Le falde idriche sono captate da pozzi ad uso idropotabile, irriguo e industriale. Entro i primi 100 m si può parlare di un acquifero libero unico, suddiviso in più livelli. La falda di quest'ultimo, oggetto della valutazione di vulnerabilità, si trova nella maggioranza del territorio entro 10 -12 m profondità e si avvicina alla superficie topografica in prossimità del F. Ticino.

All'esterno degli ambiti più densamente edificati, primo fra tutti quello di Vigevano, si sviluppano soprattutto aree agricole con risaie; i cicli di irrigazione di queste ultime condizionano le principali escursioni della falda libera.

Per la valutazione della vulnerabilità attraverso il sistema SINTACS l'area considerata è stata suddivisa in 1300 celle quadrate di 250 m di lato (v. anche cartografie nelle figure da 13 a 18 e la figura 20).

I dati contenuti nel lavoro di tesi citato sono stati utilizzati in questo studio come informazioni di riferimento.

Modellizzazione dell'incertezza nella stima della vulnerabilità

Per la stima precauzionale della vulnerabilità con il metodo descritto in questo lavoro occorre, innanzi tutto, rappresentare con numeri fuzzy l'eventuale incertezza sui punteggi parziali v_i da assegnare a ciascun parametro.

Nel caso della soggiacenza, della conducibilità idraulica e dell'inclinazione della superficie topografica tali numeri sono stati costruiti a partire dai valori minimo, più plausibile e massimo dei parametri all'interno di ciascuna cella, ottenendo un numero fuzzy triangolare analogo a quello della Figura 4 ed esemplificato, per la soggiacenza s , nella successiva Figura 7.

Nella Figura 7 la migliore stima della profondità della falda è 3 m e a questo dato è attribuito un grado di appartenenza – o misura di possibilità – pari a 1; 2,5 m e 3,5 m sono invece gli estremi della gamma dei valori possibili, via via più plausibili quanto più vicini alla migliore valutazione disponibile di 3 m.

Dato il carattere dello studio, comparativo e diretto a verificare le modalità di applicazione e i risultati del metodo proposto, si è considerata come migliore stima di un parametro il dato fornito nel lavoro originale di tesi, mentre il campo di variazione dei valori del parametro stesso è stato definito a partire dalla prevedibile entità massima dell'errore connesso alla sua valutazione. Gli errori possono essere più precisamente valutati, ad esempio, nell'ambito di procedimenti geostatistici.

Per la falda libera la disponibilità di dati, il limitato gradiente, la regolarità della superficie piezometrica in quasi tutto il territorio considerato, e infine le caratteristiche topografiche di quest'ultimo, hanno indotto a ritenere limitato l'errore commesso nella stima della soggiacenza, considerato di $\pm 0,5$ m per ogni cella.

Sulla base di considerazioni circa le litologie presenti nel sottosuolo la conducibilità idraulica dell'acquifero, nel lavoro di tesi originale, è stata considerata uniforme su tutto

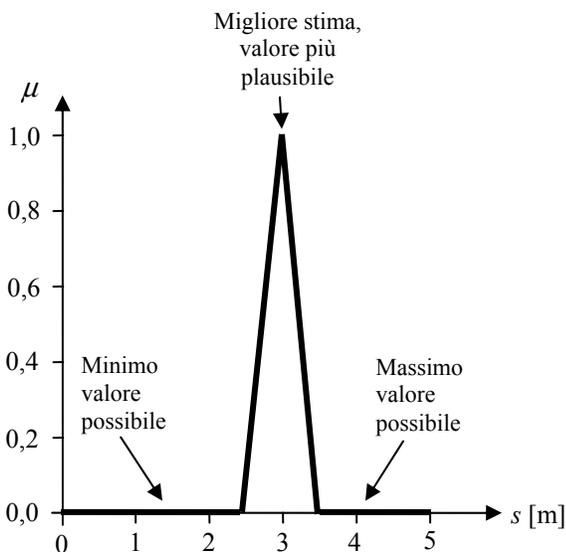


Figura 7 – Esempificazione di un numero fuzzy che rappresenta l'incertezza relativa alla soggiacenza della falda.

Figure 7 – A fuzzy number representing uncertainty as to the water table depth.

il territorio considerato e pari a 10^{-3} m/s (Mancin, 2002). L'ampiezza degli intervalli di variazione di questo parametro, nel manuale di applicazione di SINTACS, è considerata pari ad almeno due ordini di grandezza per ciascuna litologia. In questo lavoro l'incertezza nella stima della conducibilità idraulica è stata considerata minore e al più pari a mezzo ordine di grandezza; di conseguenza gli estremi del numero fuzzy triangolare che descrivono l'incertezza stessa sono stati fissati a $10^{-2.5}$ m/s e $10^{-3.5}$ m/s.

L'infiltrazione efficace si ottiene come prodotto di un coefficiente di infiltrazione χ , variabile fra 0,03 e 0,55 e dipendente dalla tessitura dei suoli, e le precipitazioni medie annue o le precipitazioni efficaci medie annue secondo lo spessore, rispettivamente rilevante o ridotto, dei suoli stessi. In questo studio si è considerata solo l'incertezza sull'assegnazione del coefficiente, che va scelto dal valutatore entro la gamma di valori possibili per ogni tipo di tessitura del suolo, indicati in un diagramma non riportato in questo articolo; i valori assegnati nel lavoro di tesi originale (0,2, 0,35, 0,4 e 0,45) sono stati considerati la migliore stima, mentre gli estremi del numero fuzzy triangolare che rappresenta l'incertezza sono dati dai valori stessi $\pm 0,05$.

Tale numero fuzzy è stato poi moltiplicato per la precipitazione media annua (come richiesto dal metodo SINTACS quando i suoli sono potenti, come quelli dell'area indagata) stimata nel lavoro di tesi di cui si è detto in 866 mm/anno. Ne risulta un altro numero fuzzy triangolare che rappresenta l'incertezza sui valori dell'infiltrazione efficace.

Infine l'incertezza sull'inclinazione della superficie topografica – salvo che in corrispondenza delle scarpate del F. Ticino – è rappresentata da un numero fuzzy triangolare con estremi 0,15 e 0,25% e migliore stima 0,2%, pari alla pendenza media dell'area considerata. Per le scarpate l'incertezza è stata descritta mediante un altro numero fuzzy triangolare con valori modal 3,5% e 29,5% – rispettivamente per la scarpata esterna ed interna – ed estremi dati dai valori modal $\pm 0,5\%$.

Nel caso dei parametri prima considerati l'incertezza sui punteggi parziali è stata poi ottenuta applicando il principio di estensione di cui si è detto nel secondo paragrafo, poiché tali punteggi sono legati al valore dei parametri stessi da funzioni di tipo analogo a quello di Figura 5.

Nel caso della soggiacenza, ad esempio, si ottengono numeri fuzzy simili a quello della successiva Figura 8; le irregolarità del grafico sono dovute a effetti di tipo numerico dell'algoritmo di calcolo, e non sono significative ai fini dell'interpretazione del risultato. Il massimo del grafico si ha per la migliore stima del punteggio parziale – circa 6,5 – corrispondente, come già scritto, al punteggio assegnato nel lavoro di tesi di partenza, a meno di errori numerici trascurabili. La possibilità attribuita a punteggi via via maggiori o minori della migliore stima diminuisce progressivamente fino a diventare zero per punteggi corrispondenti a valori di soggiacenza impossibili, che hanno cioè grado di appartenenza zero al numero fuzzy che esprime l'incertezza su questo parametro (ad esempio 6,75

m in Figura 8).

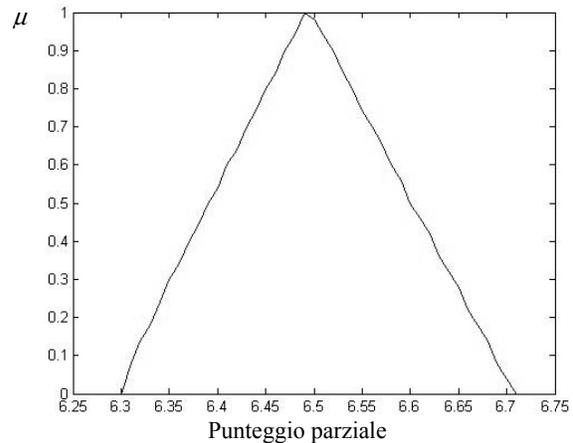


Figura 8 - Un numero fuzzy che rappresenta l'incertezza sul punteggio parziale relativo alla soggiacenza.
Figure 8 - A fuzzy number representing uncertainty as to the partial rating relative to the water table depth.

Nel caso dell'effetto di auto-depurazione dello spessore non saturo, della tipologia delle coperture e della litologia dell'acquifero i punteggi parziali sono assegnati direttamente scegliendoli all'interno di intervalli dati in diagrammi come quello di Figura 6.

Il modello dell'incertezza di tipo soggettivo sul punteggio parziale da attribuire a tali parametri è ancora un numero fuzzy triangolare, esemplificato in Figura 9 per il parametro litologia dell'acquifero.

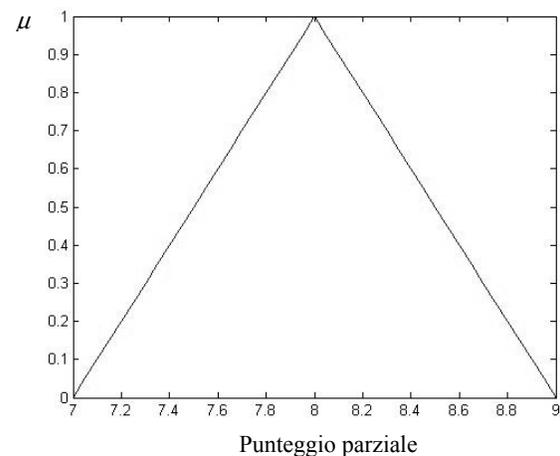


Figura 9 - Un numero fuzzy che rappresenta l'incertezza sul punteggio parziale relativo alla litologia dell'acquifero.
Figure 9 - A fuzzy number representing uncertainty as to the partial rating relative to the aquifer lithology.

Come già anticipato si assume che la possibilità di ogni punteggio parziale corrisponda al grado di plausibilità che il valutatore attribuisce a tale punteggio parziale.

Nel caso specifico l'acquifero è nel suo insieme assimilabile a un complesso idrogeologico sabbioso con

alluvioni più grossolane e, pertanto, si può assegnare alla sua litologia un punteggio parziale fra 7 e 9, come si deduce dal grafico di Figura 6. In base alla Figura 9 il punteggio ritenuto più plausibile è 8, mentre 7 e 9 sono gli estremi della gamma dei punteggi parziali ritenuti compatibili con le caratteristiche litologiche dell'acquifero, tanto più plausibili quanto più vicini a 8.

Dai numeri fuzzy v_i che rappresentano l'incertezza sul punteggio parziale si può calcolare il punteggio totale di vulnerabilità $V = \sum_{i=1}^7 p_i v_i$ come somma di ciascuno di tali

numeri, moltiplicato per il relativo peso p_i ; V è un numero fuzzy - esemplificato nella Figura 10 - interpretabile come distribuzione di possibilità sui punteggi totali da 26 a 260. Le irregolarità del grafico sono dovute ancora una volta a effetti di tipo numerico non significativi al fine dell'interpretazione del risultato.

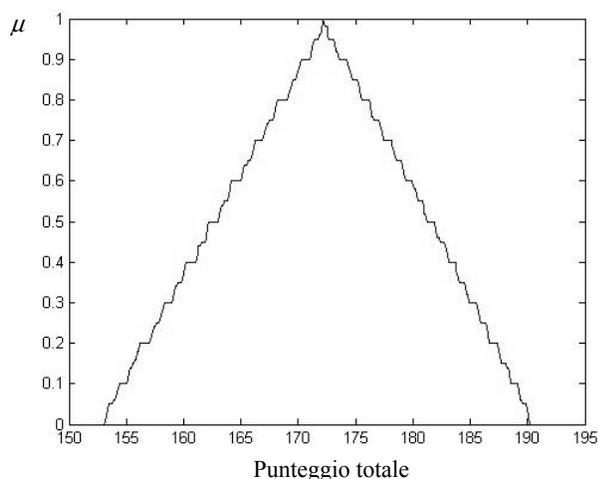


Figura 10 - Un numero fuzzy che rappresenta l'incertezza sul punteggio totale.

Figure 10 - A fuzzy number representing uncertainty as to the total vulnerability rating.

Nella Figura 10 il valore più plausibile del punteggio, 172, è quello assegnato alla cella nel lavoro di tesi che costituisce il termine di confronto per questo studio, mentre 153 e 190 sono, rispettivamente, l'estremo inferiore e superiore dell'intervallo di punteggi possibili; punteggi intermedi sono tanto più plausibili quanto più si avvicinano a 172.

In questo lavoro si è preferito considerare le precipitazioni medie annue, le precipitazioni efficaci medie annue e i pesi p_i come numeri ordinari, al fine di garantire a livello metodologico e interpretativo la coerenza con il sistema SINTACS.

I parametri che definiscono i numeri fuzzy, laddove essi rappresentino grandezze fisiche misurabili, possono essere ricavati da un'analisi degli errori di misura o stima (v. Bárdossy, Fodor, 2005). In questo studio si è fatto uso, come si è detto, di un criterio più semplice consistente nel

valutare, sulla base dell'esperienza e della situazione idrogeologica, l'intervallo di variazione delle grandezze considerate.

L'assegnazione dei gradi di possibilità non avviene, allo stato attuale, attraverso metodi consolidati come quelli utilizzati nel campo della teoria delle probabilità, anche in relazione all'interpretazione soggettiva di quest'ultima. In questo lavoro, per ottenere i modelli di incertezza, si è fatto uso dell'assegnazione diretta (v. Raufaste *et alii*, 2003).

Nell'esecuzione di operazioni con numeri fuzzy che si riferiscono a variabili tra loro correlate - come nel caso dei punteggi parziali relativi alla litologia e alla permeabilità dell'acquifero - è possibile tener conto delle correlazioni tra le variabili stesse, soprattutto allo scopo di evitare possibili incoerenze. Tali incoerenze derivano dal fatto che le operazioni di cui si è detto, in generale, implicano l'analisi di tutte le combinazioni possibili dei valori del dominio su cui i numeri fuzzy sono definiti; in altre parole è necessario considerare, come primo passo, il prodotto cartesiano dei domini stessi. Tra le combinazioni possono apparire alcune formalmente possibili ma prive di significato, come ad esempio punteggi parziali associati a litologie molto permeabili e punteggi bassi associati a conducibilità idrauliche molto ridotte. Sui metodi per affrontare questo problema si veda ad esempio Lesage (2001). In questo studio la difficoltà è stata aggirata definendo i numeri fuzzy in modo da evitare l'apparire delle combinazioni di cui si è detto.

Infine l'incertezza su ogni variabile di SINTACS - comprese la piovosità, l'evapotraspirazione e i pesi - può essere trattata in modo analogo a quanto visto, verificando la coerenza delle procedure e la significatività dei risultati ottenuti introducendo enti fuzzy diversi da quelli prima considerati.

Il grado di precauzione nella stima della vulnerabilità

Consideriamo la distribuzione di possibilità sui punteggi totali di vulnerabilità di Figura 10. Tale distribuzione indica che più di un punteggio è plausibile per la cella cui la figura si riferisce; si pone dunque il problema di scegliere un valore precauzionale del punteggio stesso, cioè tale da ridurre la possibilità che il punteggio prescelto rappresenti una sottostima della vulnerabilità. A questo scopo si introdurrà la nozione di grado di precauzione associato a un determinato punteggio.

Esaminiamo alcuni casi. Un punteggio pari a 160, ad esempio, non appare per nulla precauzionale poiché non solo punteggi maggiori sono possibili, ma la migliore stima disponibile - cui corrisponde il valore 1 della funzione di appartenenza - è 172. Un punteggio di 185, invece, si può considerare in buona misura precauzionale perché sebbene punteggi maggiori siano plausibili, la loro possibilità è ridotta, non superando mai 0,3 come si può verificare esaminando i valori in ordinata. Infine un punteggio totale

di vulnerabilità pari a 190 appare del tutto precauzionale poiché, in base alla distribuzione di possibilità di figura 10, punteggi più alti sono impossibili, avendo grado di appartenenza o misura di possibilità uguale a 0.

Coerentemente alla nozione di valore precauzionale del punteggio data all'inizio ed agli esempi fatti si può allora stabilire che il grado di precauzione, relativo alla scelta di un dato punteggio, sia tanto più alto quanto meno sono possibili punteggi superiori a quello prescelto.

In base alla teoria della possibilità dato un qualsiasi punteggio V^* la possibilità $\pi(V > V^*)$ che il punteggio totale V sia maggiore di V^* è $\pi(V > V^*) = \sup\{\mu(V) | V > V^*\}$, ossia è data dall'estremo superiore dell'insieme dei gradi di appartenenza attribuiti ai punteggi maggiori del V^* prescelto.

Per numeri fuzzy come quello in Figura 10 si ha $\pi(V > V^*) = 1$ se $V^* \leq V_m$, dove V_m è il valore modale - pari a 172 nella stessa figura - mentre $\pi(V > V^*) = \mu(V^*)$ se $V^* > V_m$; nel secondo caso, cioè, la possibilità che il punteggio totale V sia maggiore di V^* è pari al valore della funzione di appartenenza in corrispondenza del punteggio V^* .

Il grado di precauzione $\sigma(V^*)$ legato all'attribuzione ad una cella di un punteggio totale V^* può essere allora definito come $\sigma(V^*) = 1 - \pi(V > V^*)$.

Riconsideriamo ora, alla luce di questa definizione, la figura 10 e gli esempi precedenti.

Il grado di precauzione $\sigma(V^*)$ corrispondente ad un punteggio di vulnerabilità $V^* = 160$ è 0; poiché, infatti, è del tutto possibile che il punteggio sia superiore a 160 - ed anzi la migliore stima è 172 - è $\pi(V > 160) = 1$ e allora $\sigma(160) = 1 - \pi(V > 160) = 1 - 1 = 0$. La scelta di attribuire alla cella un punteggio di 160, dunque, non è per nulla precauzionale, come già concluso.

Per $V^* = 185$ il grado di precauzione sale a 0,7, perché in questo caso $\pi(V > 185) = \mu(185) = 0,3$ e $\sigma(185) = 1 - \pi(V > 185) = 1 - 0,3 = 0,7$. Perciò attribuire alla cella un punteggio di 185, data la distribuzione di possibilità di Figura 10, è in buona misura precauzionale.

Infine il grado di precauzione di un punteggio $V^* = 190$ è 1, poiché $\pi(V > 190) = \mu(190) = 0$ e $\sigma(190) = 1 - \pi(V > 190) = 1 - 0 = 1$; dunque, come già evidenziato, attribuire alla cella un punteggio di 190 è del tutto precauzionale.

Valori fra 172 e 190 sono tanto più precauzionali quanto più ci si avvicina all'estremo superiore della gamma dei valori possibili, come indicato in figura 11.

Il grado di precauzione corrispondente alla migliore stima della vulnerabilità, ossia al valore più plausibile del punteggio totale, è 0 se punteggi superiori a tale valore sono

in qualche misura possibili, e 1 in caso contrario. In altre parole assegnare ad una cella la migliore stima del punteggio totale di vulnerabilità è una scelta che - per quanto giustificabile - non può ritenersi in senso stretto precauzionale se c'è l'eventualità che il punteggio sia superiore. In questo lavoro tale stima si ottiene applicando SINTACS nel modo usuale, trascurando l'incertezza.

Si osservi che anche la scelta di un punteggio totale inferiore al massimo possibile, pari a 260, può risultare del tutto precauzionale, come nel caso del valore 190 considerato in precedenza.

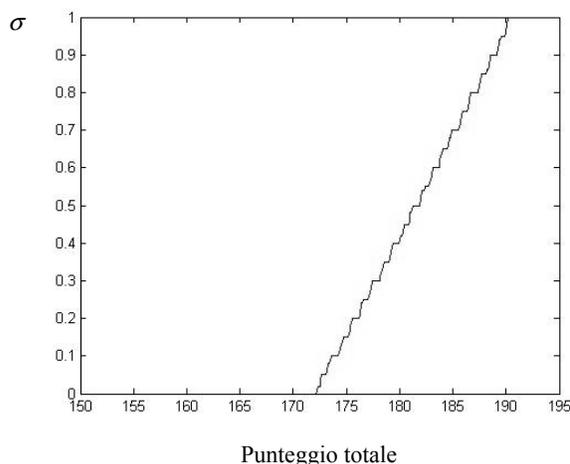


Figura 11 - Grado di precauzione σ in funzione del punteggio totale, calcolato a partire dalla distribuzione di possibilità di Figura 10.

Figure 11 - Precaution degree, as a function of vulnerability ratings, calculated from the possibility distribution in Figure 10.

Si può mostrare che con il diminuire dell'incertezza (v. Figura 4) aumenta la pendenza del tratto obliquo di figura 11, e lo stesso grado di precauzione viene raggiunto per punteggi via via più vicini alla migliore stima; più alta è l'affidabilità di tale stima, perciò, e meno ci si allontanerà da essa nonostante la precauzione, com'è ragionevole. Applicando SINTACS nel modo standard, inoltre, a una cella è di norma assegnato il punteggio che rappresenta la migliore valutazione di quest'ultimo, trascurando punteggi inferiori anche se in qualche grado plausibili; la stessa cosa avviene utilizzando il metodo illustrato in questo articolo in assenza di precauzione. Con la procedura descritta, pertanto, non aumenta la possibilità di sovrastimare la vulnerabilità rispetto a SINTACS, se non nella misura voluta e connessa al grado di precauzione prescelto, che sarà in generale individuato attraverso un'analisi costi/benefici (v. anche ultimo paragrafo).

Carte della vulnerabilità precauzionali

Con il metodo descritto in questo articolo è possibile ottenere in modo automatizzato carte della vulnerabilità, caratterizzate da un prefissato grado di precauzione nella scelta del punteggio totale di vulnerabilità da assegnare a

ogni cella. E' sufficiente scegliere il grado di precauzione desiderato - uniforme per tutta la carta o anche diverso da una zona all'altra - e a partire da grafici come quello di figura 11 il software realizzato risale al punteggio cui corrisponde il grado prescelto, assegnato poi a ciascuna cella in esame; il procedimento è esemplificato in figura 12.

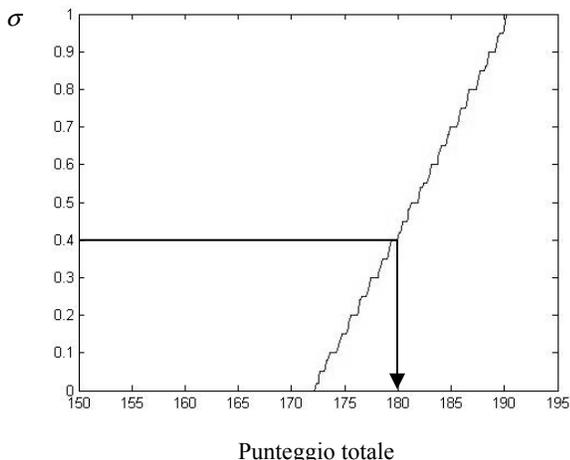


Figura 12 – Calcolo del punteggio (pari 180) associato ad un grado di precauzione prescelto, in questo caso pari a 0,4.

Figure 12 – Vulnerability rating (equal to 180) associated to a chosen precaution degree, in this case equal to 0,4.

A secondo dell'incertezza e del grado di precauzione la differenza fra il punteggio di vulnerabilità calcolato applicando SINTACS nel modo usuale e quello precauzionale può essere sufficientemente elevata da determinare l'attribuzione di una cella almeno alla classe di vulnerabilità immediatamente superiore.

Le figure da 13 a 18 mostrano le carte della vulnerabilità del territorio considerato corrispondenti a un grado di precauzione uniforme e pari a 0 – nel qual caso la carta è identica a quella ottenuta utilizzando SINTACS in modo standard – e pari a 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0. Si tratta di viste progressivamente più conservative del territorio stesso, in cui a ciascuna cella è assegnato un punteggio caratterizzato da un grado di precauzione crescente e perciò via via maggiore.

L'effetto sulla distribuzione areale della vulnerabilità è piuttosto evidente. Le celle attribuite alla classe alta si riducono progressivamente fino a divenire un'esigua minoranza, mentre aumentano quelle appartenenti alle classi superiori; in particolare a partire da un grado di precauzione pari a 0,2 compaiono e poi aumentano man mano di numero le celle appartenenti alla classe di vulnerabilità estremamente elevata, la più alta possibile.

La carta di figura 18 corrisponde ad una vista del tutto conservativa dell'area esaminata, poiché il grado di precauzione diventa 1; anche a fronte dell'incertezza sul punteggio totale di vulnerabilità attribuibile a ciascuna cella punteggi superiori a quelli assegnati non sono in linea di principio possibili.

Gradi di precauzione diversi possono essere utilizzati per tutelare in modo differenziato i vari settori del territorio indagato.

Criterio di bilanciamento possibilità-precauzione e conclusioni

Con l'approccio descritto in questo articolo è possibile dare un significato più rigoroso e quantitativo al concetto di valutazione precauzionale della vulnerabilità degli acquiferi e ottenere in modo automatizzato carte della vulnerabilità con un grado di precauzione prescelto ed eventualmente variabile da zona a zona.

Tali carte sono prodotte in presenza di livelli variabili di incertezza, ed anche in condizioni di ignoranza totale sul valore di uno o più parametri; il sistema determinerà in ogni caso punteggi con un prefissato grado di precauzione e sarà possibile raggiungere, di conseguenza, una certa tutela delle risorse idriche sotterranee.

E' sufficiente specificare, attraverso numeri fuzzy, l'incertezza sui parametri o i punteggi parziali utilizzati per valutare la vulnerabilità e, una volta ottenuta la distribuzione di possibilità sul punteggio totale di vulnerabilità, scegliere quello cui corrisponde il grado di precauzione desiderato.

Specificare l'incertezza è un compito che si può ritenere spetti in primo luogo al tecnico, mentre stabilire quale sia il grado di precauzione più idoneo per limitare i possibili effetti negativi dell'incertezza stessa appare un compito di pertinenza soprattutto del decisore finale, in particolar modo di quello politico.

Aumentando il grado di precauzione, infatti, aumenta anche in linea di principio la tutela delle risorse idriche sotterranee, poiché le scelte di pianificazione e progettazione sono prese con riferimento a valutazioni e cartografie della vulnerabilità progressivamente più conservative.

Allo stesso tempo la maggiore tutela comporterà, in generale, più limitazioni nell'uso del suolo. Contemperare le diverse spinte socio-economiche alla protezione e allo sfruttamento delle risorse è compito, appunto, tipico del decisore politico.

Esiste, in ogni caso, un criterio immediato per individuare un possibile grado di precauzione a prescindere da più articolate valutazioni costi-benefici. Comparando le figure 10 e 11 si osserva che punteggi progressivamente più alti sono sì più precauzionali, ma anche via via meno plausibili; si può allora utilizzare, almeno come punto di partenza, il grado di precauzione corrispondente a quel punteggio che rappresenta il miglior compromesso fra plausibilità e precauzione.

Tale punteggio, che indicheremo con \tilde{V} , corrisponde al punto di intersezione fra i grafici analoghi a quelli delle figure 10 e 11 come mostrato in figura 19, dove \tilde{V} vale circa 181 e il relativo grado di precauzione 0,5.

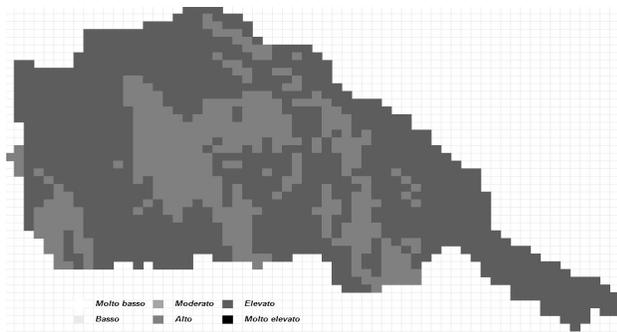


Figura 13 – Carta della vulnerabilità per un grado di precauzione 0. ■ vulnerabilità alta; ■ vulnerabilità elevata.
 Figure 13 – Vulnerability map corresponding to a precaution degree equal to 0. ■ high vulnerability; ■ elevated vulnerability.

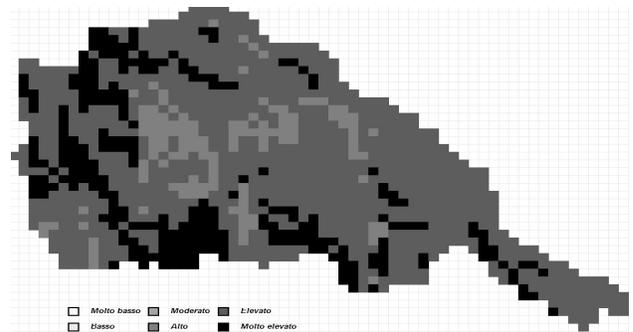


Figura 16 – Carta della vulnerabilità per un grado di precauzione 0,6. ■ vulnerabilità alta; ■ vulnerabilità elevata; ■ vulnerabilità estremamente elevata.
 Figure 16 – Vulnerability map corresponding to a precaution degree equal to 0,6. ■ high vulnerability; ■ elevated vulnerability; ■ extremely elevated vulnerability.

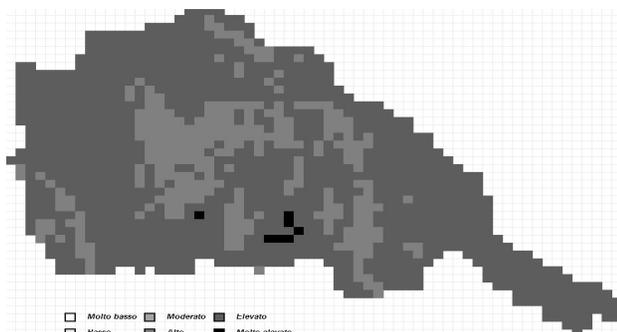


Figura 14 – Carta della vulnerabilità per un grado di precauzione 0,2. ■ vulnerabilità alta; ■ vulnerabilità elevata; ■ vulnerabilità estremamente elevata.
 Figure 14 – Vulnerability map corresponding to a precaution degree equal to 0,2. ■ high vulnerability; ■ elevated vulnerability; ■ extremely elevated vulnerability.

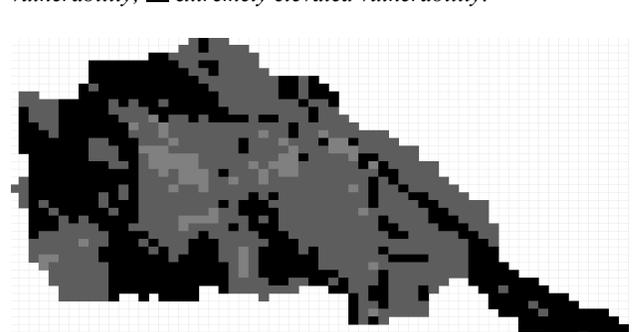


Figura 17 – Carta della vulnerabilità per un grado di precauzione 0,8. ■ vulnerabilità alta; ■ vulnerabilità elevata; ■ vulnerabilità estremamente elevata.
 Figure 17 – Vulnerability map corresponding to a precaution degree equal to 0,8. ■ high vulnerability; ■ elevated vulnerability; ■ extremely elevated vulnerability.

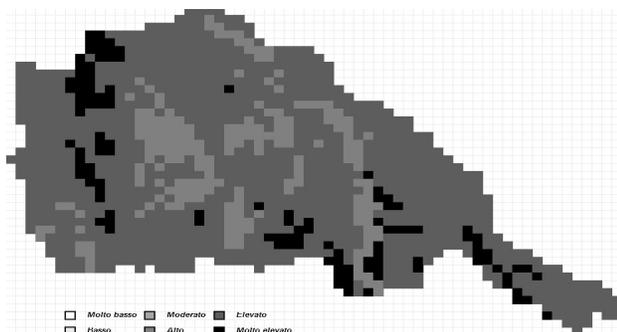


Figura 15 – Carta della vulnerabilità per un grado di precauzione 0,4. ■ vulnerabilità alta; ■ vulnerabilità elevata; ■ vulnerabilità estremamente elevata.
 Figure 15 – Vulnerability map corresponding to a precaution degree equal to 0,4. ■ high vulnerability; ■ elevated vulnerability; ■ extremely elevated vulnerability.

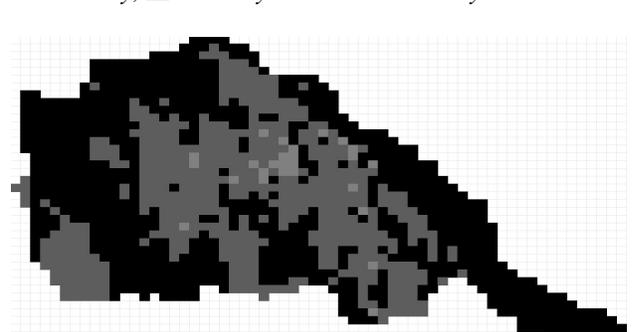


Figura 18 – Carta della vulnerabilità per un grado di precauzione 1,0. ■ vulnerabilità alta; ■ vulnerabilità elevata; ■ vulnerabilità estremamente elevata.
 Figure 18 – Vulnerability map corresponding to a precaution degree equal to 1,0. ■ high vulnerability; ■ elevated vulnerability; ■ extremely elevated vulnerability.

Come si può verificare punteggi maggiori di \tilde{V} sono più precauzionali poiché per essi aumenta il grado di precauzione σ , ma meno plausibili, poiché diminuisce la possibilità μ .

Viceversa accade per punteggi minori di \tilde{V} ; quest'ultimo, pertanto, si può ritenere il compromesso cercato fra plausibilità e precauzione. La corrispondente carta della vulnerabilità è mostrata nella figura 13. La

rappresentazione del territorio è significativamente diversa da quella di figura 12, ottenuta applicando SINTACS nel modo standard; il grado di precauzione è ovunque di 0,5.

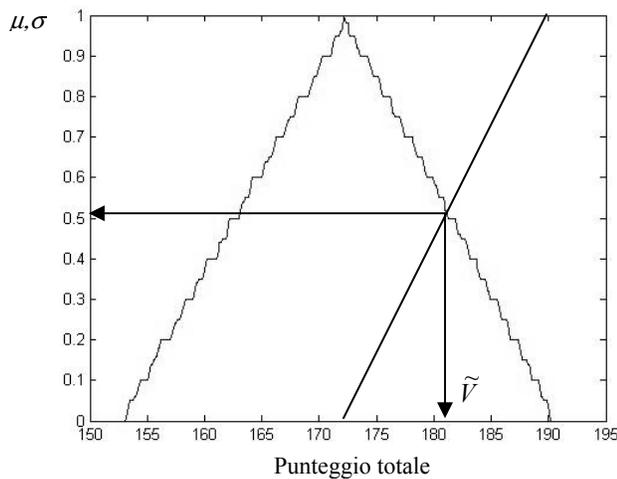


Figura 19 – Determinazione del punteggio che rappresenta il miglior compromesso fra plausibilità e precauzione.
 Figure 19 – Evaluation of the vulnerability rating representing the best compromise between plausibility and precaution.

Un metodo analogo a quello descritto può essere utilizzato per la stima precauzionale di altri fattori di rischio, ed esteso anche al caso in cui il parametro oggetto di incertezza sia la probabilità di accadere degli eventi che determinano il rischio stesso (cfr. ad esempio Cameron, Peloso, 2005).

Bibliografia

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., Hackett, G., 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. North Wales Water Authority/EPA Serv. EPA 600/2-85/018.
- Bárdossy, G., Fodor, J., 2004. Evaluation of uncertainties and risks in geology. Springer Verlag Heidelberg, Germany.
- Cameron, E., Peloso, G. F., 2005. Risk management and the precautionary principle: a fuzzy logic model. *Risk Analysis*, 25 (4), 901-912.
- Civita, M., De Maio, M., 1997. SINTACS: un metodo parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Pitagora Editrice, Bologna, Italia.
- Dixon, B., Scott H. D., Dixon J. C., Steele K. F., 2002. Prediction of aquifer vulnerability to pesticides using fuzzy rule-based models at the regional scale. *Physical Geography*, 23 (2), 130-153.
- Dubois, E., Prade, H. M., 1988. Possibility theory. Plenum Press, New York, USA.
- Dubois, E., Prade, H. M. (Editori), 2000. The handbook of fuzzy sets volume 7: fundamentals of fuzzy sets. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.
- Gemitzi, A., Petalas, C., Tsihrintzis, V. A., Pisinaras, V., 2006. Assessment of groundwater vulnerability to pollution: a combination of GIS, fuzzy logic and decision making techniques. *Environmental Geology*, 49 (5), 653-673.
- Lesage, C., 2001. Discounted cash-flow analysis: an interactive fuzzy arithmetic approach. *European Journal of Economic and Social Systems*, 15 (2), 46-68.
- Mancin, P., 2002. La vulnerabilità della falda nel territorio comunale di Vigevano: applicazione georeferenziata del metodo SINTACS (tesi di laurea, Dipartimento di Ingegneria Ambientale dell'Università di Pavia, relatore prof. G. F. Peloso).
- Raufaste E., Da Silva Neves, R., Mariné, C., 2003. Testing the descriptive validity of possibility theory in human judgements of uncertainty. *Artificial Intelligence*, 148, 197-218.
- Huicheng, Z., Guoli, W., Qing, Y., 1999. A multi-objective fuzzy pattern recognition model for assessing groundwater vulnerability based on the DRASTIC system.

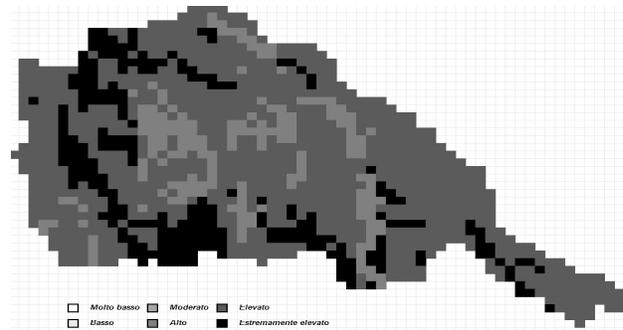


Figure 20 – Carta della vulnerabilità con i punteggi determinati bilanciando precauzione e possibilità come in figura 12.
 ■ vulnerabilità alta; ■ vulnerabilità elevata; ■ vulnerabilità estremamente elevata.
 Figure 20 – Vulnerability map with the vulnerability rating evaluated balancing plausibility and precaution as shown in figure 12. ■ high vulnerability; ■ elevated vulnerability; ■ extremely elevated vulnerability.

Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare gli organizzatori del convegno Geoitavia 2005, durante il quale la ricerca descritta in questo articolo è stata presentata, e in particolare i convener della sessione T28 prof. Gianfranco Ciancetti e prof.ssa Grazia Martelli; gli autori desiderano inoltre ringraziare Luca Garavaglia il cui lavoro di tesi (in corso di elaborazione nel periodo di stesura di questo articolo) ha contribuito in maniera determinante allo sviluppo in direzione applicativa della ricerca stessa.