

La protezione degli acquiferi attraverso la valutazione della vulnerabilità intrinseca all'inquinamento: esempi di applicazione nell'area beneventana (Campania)

Protecting aquifers through evaluation of intrinsic vulnerability of pollution: examples of its application in the Benevento area (Campania)

BRUNO R. (*), ESPOSITO L. (*),
MAINOLFI L. (*), VALLETTA M. (**)

RIASSUNTO - Lo studio riguarda le problematiche associate all'applicazione delle tecniche di protezione qualitativa degli acquiferi complessi. Questi ultimi sono caratterizzati da una circolazione idrica sotterranea articolata legata all'elevata eterogeneità litologica e granulometrica dei depositi che li costituiscono. Da ciò deriva la scomposizione del flusso idrico sotterraneo e la possibilità di riconoscere, generalmente, una circolazione idrica sotterranea che si realizza secondo lo schema delle falde sovrapposte interagenti a grande scala. In particolare, la ricerca condotta pone in evidenza quali siano le ripercussioni, in tema di vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero, derivanti dalle considerazioni suesposte, attraverso due esempi relativi a contesti idrogeologici dell'area beneventana. Nello specifico è stato analizzato l'acquifero alluvionale della Piana di Benevento e quello sabbioso-ghiaioso dell'area di San Giorgio-Calvi.

Per pervenire allo scopo si è resa necessaria l'esatta conoscenza delle Unità Idrostratigrafiche costituenti l'acquifero e dei rapporti che fra di esse si realizzano, sia lungo l'orizzontale sia lungo la verticale. In tal modo sono stati definiti i meccanismi di alimentazione dei diversi livelli acquiferi, anche di quelli sottoposti, ed i processi che regolano l'eventuale propagazione nella zona satura delle sostanze contaminanti. Pur riguardando specifiche realtà territoriali la ricerca evidenzia i limiti di applicabilità delle carte di vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi, in particolare per quelli caratterizzati da condizioni "complesse" del deflusso sotterraneo. Si perviene, pertanto, alla considerazione che la prevenzione e la tutela delle RIS vada affrontata attraverso il confronto tra diversi tematismi cartografici, incluso quello della qualità di base delle acque sotterranee e quello della vulnerabilità intrinseca risultante.

PAROLE CHIAVE: Benevento; Idrogeologia; Carte tematiche; Acquiferi complessi; Vulnerabilità.

ABSTRACT - In ground-water storeys, the ground-water circulation is extremely complex because of the high heterogeneity (in terms of lithology and grain size) of their constituent deposits. The occurrence of levels with lower relative permeability, both locally and vertically, may cause ground-water flow to split up. Actually, these aquifers usually consist of multiple layers that interact with one another at large scale. A thorough knowledge of the Hydrostratigraphic Units making up the aquifer, as well as of their horizontal and vertical relations, makes it possible to: i) identify the mechanisms of recharge of the aquifer levels at different depths, and ii) based on the findings from hydrogeological investigations, understand the processes controlling the propagation of pollutants into the aquifer. The study reported in the paper shows the repercussions of the above considerations in terms of aquifer vulnerability to pollution.

KEY WORDS: Benevento; Hydrogeology; Thematic maps; Ground-water storeys; Vulnerability.

1. - INTRODUZIONE

La protezione e la prevenzione dell'inquinamento delle risorse idriche sotterranee (RIS) viene garantita attraverso l'applicazione di "sistemi di difesa" a tutto campo insistenti sull'intera area di alimentazione dei corpi idrici sotterranei. Tali sistemi, basati sulla conoscenza approfondita della suscettibilità all'inquinamento degli acquiferi e delle attività presenti sul territorio, permettono di redigere le "carte di vulnerabilità degli acquife-

(*) Dipartimento di Studi Geologici ed Ambientali dell'Università del Sannio (DSGA). Via dei Mulini, 59/A - 82100, Benevento

(**) Dipartimento di Ecologia e Sviluppo Economico Sostenibile (DECOS). Via S. Giovanni Decollato, 1 - 01100, Viterbo.

ri all'inquinamento"; queste ultime offrono uno scenario statico capace di territorializzare la "suscettibilità specifica dei sistemi acquiferi ad ingerire e diffondere, sia pure mitigandone gli effetti, un inquinante idroveicolato tale da produrre impatto sulla qualità delle acque nello spazio e nel tempo" (CIVITA, 1987). Pur essendo numerosi, ed in continua evoluzione, i metodi di valutazione e cartografia della vulnerabilità (AA. VV., 2001; CIVITA, 1994) tutti considerano il grado di vulnerabilità intrinseca la diretta conseguenza dei processi che si producono all'interno del "sistema sottosuolo" soggiacente al punto e/o alla zona di impatto. Tali processi tengono conto degli eventuali arricchimenti in sostanza/e inquinante/i subiti dalle acque di infiltrazione efficace durante la percolazione in falda. Essi prescindono dal deflusso idrico sotterraneo e dall'insieme delle fenomenologie che possono realizzarsi durante il deflusso. Ne deriva che zone di acquifero molto vulnerabili, pur ospitando RIS di scarsa qualità (con riferimento, ad esempio, alla normativa sulle acque potabili), siano sottoposte a vincoli territoriali restrittivi, a tutela di una risorsa già compromessa, e viceversa.

Da queste premesse è parere degli Autori ritenere che la pianificazione, la prevenzione e la tutela delle RIS debba essere frutto non della sola lettura della carta della vulnerabilità intrinseca e integrata all'inquinamento, ma del confronto tra diversi tematismi cartografici, incluso quello della qualità di base delle acque sotterranee. Solo in questo modo gli Organi e le Istituzioni operanti sul territorio (Autorità di Bacino, Province, Regioni, Comuni, ATO-Ambiti Territoriali Ottimali) potranno indicare gli interventi più idonei per normare e controllare, in modo "ragionato" e riducendone l'impatto, le eventuali fonti potenziali di inquinamento presenti in un territorio.

2. - CASI DI STUDIO E CONSIDERAZIONI DERIVANTI DALL'ANALISI DELLA VULNERABILITÀ

Le considerazioni suesposte, peraltro già evidenziate in precedenti studi (CELICO F., 1996), scaturiscono da applicazioni dei metodi di valutazione parametrica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento (Drastic, Sintacs R5, DAC) (ALLER *et alii*, 1987; CELICO F., CIVITA & DE MAIO, 1997; 1996) su alcune realtà idrogeologiche della provincia beneventana dotate di permeabilità matriciale. Acquiferi, questi, generalmente caratterizzati da una circolazione idrica sotterranea a falde sovrapposte, interagenti a grande

scala e per i quali si riconoscono, talvolta, meccanismi complessi di alimentazione dei diversi livelli in profondità.

In particolare si è scelto di studiare l'acquifero alluvionale della Piana di Benevento (cfr. par. 2.1. e fig. 1; Caso A) e quello sabbioso-ghiaioso della zona di S. Giorgio-Calvi (cfr. par. 2.2. e fig. 1; Caso B). Pur trattandosi di contesti specificatamente territoriali, dalla ricerca scaturiscono spunti di riflessione validi anche per realtà idrostratigrafiche differenti.

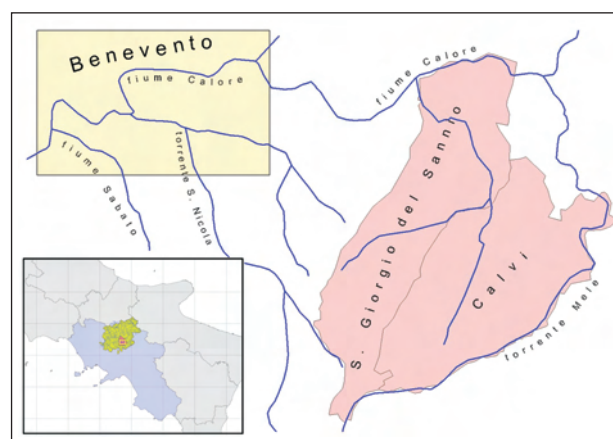


Fig. 1. - Inquadramento delle aree di studio.- *Setting of studied areas.*

2.1. - CASO A: L'ACQUIFERO ALLUVIONALE DELLA PIANA DI BENEVENTO

2.1.1. - Generalità

La piana di Benevento (quote topografiche variabili tra 10 ed 80 m s.l.m.) si estende, per circa 30 km², nella media valle del fiume Calore (fig. 2). Essa ospita un acquifero che ha sede nei depositi quaternari rappresentati: 1) dalle alluvioni antiche terrazzate costituite da conglomerati a struttura massiccia, con intercalazioni lentiformi di sabbie e silt argillosi; 2) dai depositi di origine fluvio-lacustre rappresentati da: i) argille limose bruno-giallastre, compatte, alternate a strati di ciottoli eterometrici addensati, poligenici, immersi in abbondante matrice sabbiosa (depositi di S. Giorgio e di Cretarossa; PESCATORE *et alii*, 1996); ii) ghiaie e ciottoli addensati, in matrice sabbiosa, passanti verso l'alto ad argille limose, molto compatte, con intercalazioni sabbioso-limose (depositi del fiume Sabato ed alluvioni terrazzate; PESCATORE *et alii*, 1996); iii) ghiaie sciolte e ciottoli eterometrici, poligenici, immersi in abbondante matrice sabbioso-limosa, con intercalazioni di lenti di sabbie limose e di argille sabbioso-limose

(alluvioni recenti; PESCATORE *et alii*, 1996); 3) dai depositi detritici e dalle colluvioni costituiti, rispettivamente, da ghiaie eterometriche, generalmente addensate, in matrice sabbioso-limosa e da sabbie sciolte e limi argillosi, poco consistenti, con inclusi lapidei poligenici ed eterometrici.

2.1.2. - Caratteristiche idrogeologiche

I depositi appena descritti (cfr. par. 1.1.1) presentano una permeabilità uniforme di tipo prevalentemente matriciale e di grado medio - alto ($K \cong 5,0 \times 10^{-4}$ m/s). Ciò nonostante si tratta di termini con notevoli variazioni nell'assortimento granulometrico e nel grado di cementazione, dovute alla natura deposizionale dei sedimenti. Ne consegue una circolazione idrica sotterranea complessa che si realizza secondo lo schema a "falde sovrapposte" interagenti a grande scala.

Dal punto di vista geometrico, l'acquifero si estende in direzione Est-Ovest, mentre i suoi spessori, ricostruiti attraverso l'interpretazione delle stratigrafie disponibili (Piano Regolatore Generale del Comune di Benevento, 1984; CELICO *et alii*, 1998), risultano variabili aumentando progressivamente dai bordi della valle verso le

zone assiali della stessa dove si raggiungono anche i 110 metri circa.

L'impermeabile di fondo è rappresentato dai termini argilloso-marnosi dell'Unità di Lagonegro e dalle argille grigio-azzurre dell'Unità di Ariano (PESCATORE *et alii*, 1996).

2.1.3. - Ricostruzione dell'assetto idrostratigrafico

La ricostruzione dell'assetto idrostratigrafico è stata effettuata sulla base dell'interpretazione degli anzidetti sondaggi geognostici (cfr. par. 1.1.2; circa 170, di profondità variabile da 10 metri a 100 metri circa, distribuiti principalmente nell'area del centro abitato di Benevento; fig. 3).

L'interpretazione delle stratigrafie ha consentito la realizzazione di una serie di sezioni idrostratigrafiche e la conseguente definizione delle litologie che costituiscono l'Unità Idrostratigrafica alluvionale. Quest'ultima, come si osserva dalla sezione riportata in figura 3, è costituita dall'alternanza di conglomerati poligenici ed eterodimensionali, a diverso grado di cementazione.

All'interno della suddetta Unità rilevante è la presenza di un livello di argille limose di ambiente fluvio-lacustre (cfr. par. 1.1.1 e fig. 3), spesso

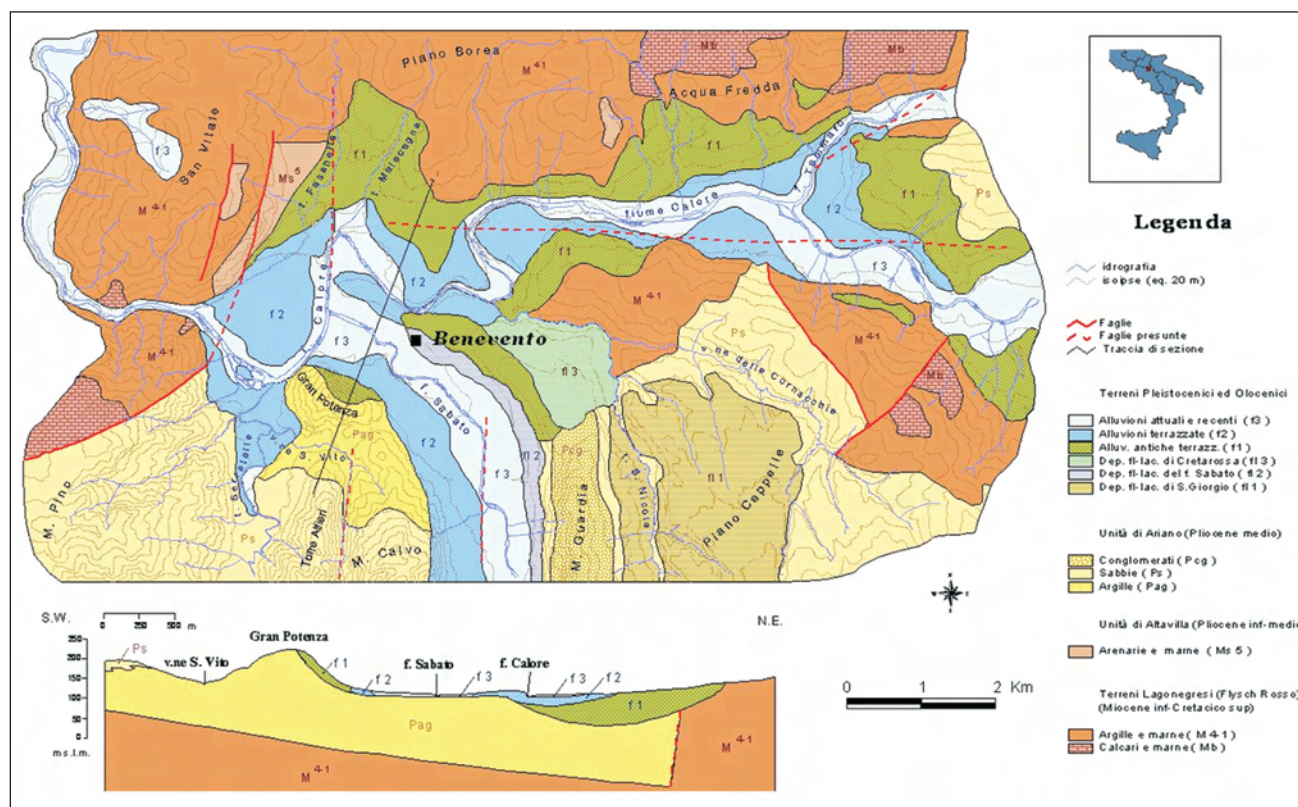


Fig. 2 - Stralcio della carta geologica della media valle del fiume Calore (Benevento) e relativa sezione rappresentativa (da PESCATORE *et alii*, 1996; modificato).
- Sketch of geological map of the Calore river middle-railley (Benevento) with representative section (by PESCATORE *et alii*, 1996; modified).

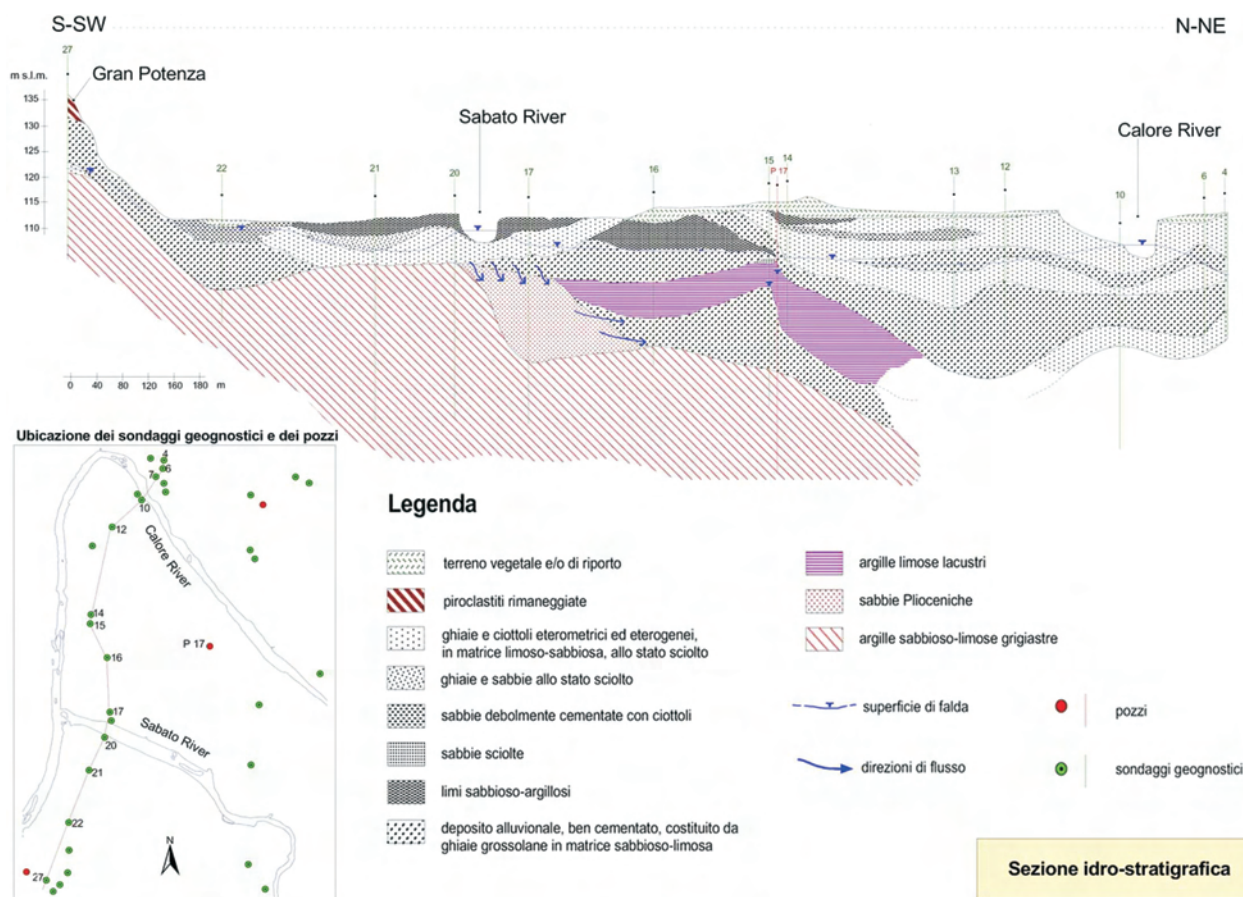


Fig. 3 - Sezione rappresentativa dell'Unità Idrostratigrafica alluvionale della media valle del fiume Calore (da ESPOSITO *et alii*, 2005a).
 - Typical section of the alluvial Hydrostratigraphic Unit of the Calore river middle-valley (by ESPOSITO *et alii*, 2005a).

mediamente 5 metri circa ed interposto tra due orizzonti di conglomerati costituiti da ghiaie grossolane in matrice sabbioso-limosa. La scarsa permeabilità relativa fa assumere, al suddetto livello, il ruolo di acquicludde particolarmente importante nell'ambito della struttura dell'acquifero e della conseguente articolazione verticale dei deflussi sotterranei; esso, infatti, sostiene localmente una falda superficiale di tipo freatico, oltre a rappresentare il tetto impermeabile del livello idrico più profondo presente in condizioni di confinamento.

L'attività di campo ha consentito il censimento di un significativo numero di punti d'acqua, circa 155 tra pozzi (108) e livelli idrometrici sui fiumi Calore, Sabato e Tammaro (47), in corrispondenza dei quali, nei periodi di magra e di inizio della ricarica dell'anno 2002 (ESPOSITO *et alii*, 2005a), sono state condotte le misure di soggiacenza (S , in m dal p.c.) della falda superficiale.

Per il livello idrico profondo, invece, non è stato possibile censire altrettanti punti di misura rappresentativi. Ciò nonostante, il confronto tra i dati di soggiacenza riferiti alla falda superficiale e quei pochi relativi a pozzi spinti al di sotto del-

l'impermeabile relativo, ha consentito di verificare l'esistenza di alcuni metri di differenza (< 5 m, in media) tra i due livelli, in fase di magra, con escursioni stagionali, tra la magra e l'inizio della ricarica, mai superiori ai 2 metri circa. Dalla figura 3 si evince che l'alimentazione del livello idrico profondo è garantita dalla falda superficiale attraverso le sabbie plioceniche che interrompono la continuità laterale dello strato di argille limose lacustri. Una tale situazione rende vulnerabile anche l'acquifero profondo, soprattutto in considerazione dell'elevato grado di vulnerabilità che caratterizza il livello idrico ad esso sovrapposto (cfr. par. 1.1.4).

2.1.4. - Analisi di vulnerabilità intrinseca ed integrata dell'acquifero superficiale

I dati di soggiacenza della falda (cfr. par. 1.1.3) hanno consentito di pervenire alla valutazione della vulnerabilità intrinseca all'inquinamento dell'acquifero della piana di Benevento per il solo livello idrico superficiale.

La carta tematica (figg. 4a e 4b), elaborata

adottando i criteri sperimentali previsti dal metodo SINTACS (CIVITA & DE MAIO, 1997) ed avvalendosi dell'uso del software Arc View Gis - Version 3.1, evidenzia il più elevato grado di vulnerabilità in corrispondenza delle fasce adiacenti ai principali corsi d'acqua. Ciò in conseguenza: 1) della bassa soggiacenza della falda (raramente superiore ai 3 m); 2) dei minimi valori dell'acclività topografica ($0,5 \div 3\%$); 3) delle elevate trasmissività ($1,8 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{sec}$); 4) degli alti valori attribuiti al coefficiente di infiltrazione potenziale (sempre $> 80\%$). Allontanandosi dal reticolo idrografico, il grado di vulnerabilità tende a decrescere in relazione all'aumento del parametro soggiacenza, alle diverse caratteristiche delle litologie costituenti le porzioni insatura e satura dell'acquifero ed all'aumento dell'acclività topografica.

Sulla stessa carta, sulla base di quanto riportato nella "Legenda unificata per le Carte di vulnerabilità" (CIVITA, 1990; 1994; fig. 4b), sono cartografati i più importanti produttori reali e potenziali di inquinamento dei corpi idrici sotterranei, i potenziali ingestori e veicoli di inquinamento dei corpi idrici sotterranei e, per finire, i principali soggetti ad inquinamento (fig. 4a). Si nota l'assenza, sul territorio, dei preventori e/o riduttori di inquinamento ad eccezione di un unico impianto di depurazione (quello a servizio della Zona Industriale di Ponte Valentino, fig. 4a), peraltro in disuso. Dalla carta si rileva la più alta concentrazione dei punti di potenziale e reale inquinamento in corrispondenza delle porzioni di acquifero con grado di vulnerabilità intrinseca all'inquinamento compreso fra l'alto e l'estremamente elevato (fig. 4a). Rientra, in tale settore, anche la porzione di piana in corrispondenza della quale si rinviene sia il livello idrico superficiale sia quello profondo.

2.2. - CASO B: L'ACQUIFERO SABBIOSO-GHIAIOSO-ARGILLOSO DELL'AREA DI SAN GIORGIO-CALVI

2.2.1. - Generalità

L'acquifero dell'area di S. Giorgio-Calvi, sito a Sud-Est di Benevento (fig. 5), rientra, a pieno titolo, nella categoria degli acquiferi cosiddetti "minori" (*sensu* BRUNO *et alii*, 2006 - in questo stesso volume - con le opportune differenze di ambito e di scala), a causa della ridotta potenzialità idrica sotterranea che lo caratterizza. Ma tale acquifero non può e non deve essere considerato poco significativo, soprattutto se lo si inserisce in un contesto geologico, quello della Provincia di Benevento, dove affiorano, per circa l'80%, depositi caratterizzati da permeabilità molto basse

(ESPOSITO *et alii*, 2005b). Quanto affermato ha rappresentato uno dei motivi per i quali è parso interessante affrontare lo studio della vulnerabilità su tale territorio. L'altro, non meno significativo, è connesso con la possibilità di riconoscere, sia pure in una zona limitata, due livelli idrici sovrapposti (fig. 5) che hanno reso maggiormente interessante lo studio della vulnerabilità intrinseca all'inquinamento. Ultima, ma non meno importante, è la considerazione che il recapito finale di questo acquifero è rappresentato dall'alveo del fiume Calore.

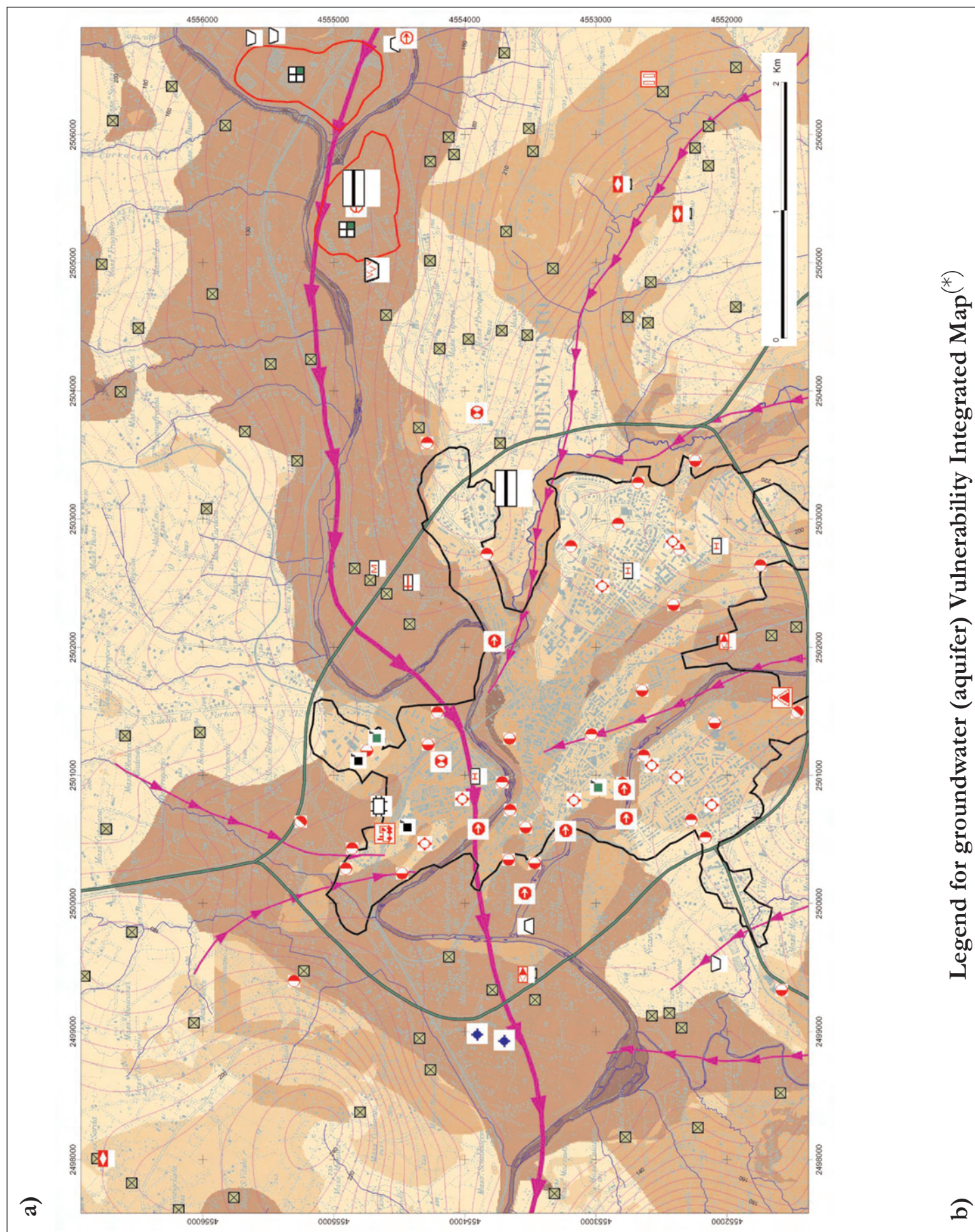
2.2.2. - Caratteristiche idrogeologiche

L'acquifero principale ha sede nei depositi sabbioso-ghiaiosi (complesso sabbioso-ghiaioso, in fig. 5) ascrivibili ai terreni fluvio-lacustri, granulometricamente grossolani, di S. Giorgio del Sannio (fig. 5; PESCATORE *et alii*, 1996), dotate di un grado di permeabilità, per porosità, variabile da medio ad alto. Localmente, le alteriti del complesso sabbioso-argilloso (fig. 5), costituito dalle sabbie argillose, appartenenti ai depositi fluvio-lacustri di S. Giorgio del Sannio, e dalle sabbie e sabbie argillose del Pliocene (Unità di Ariano; D'ARGENIO *et alii*, 1973), ospitano un livello idrico secondario.

La granulometria delle sabbie argillose plioceniche è tale da consentire di attribuire a questi depositi un grado di permeabilità, sempre per porosità, compreso tra il basso ed il medio. Queste, pertanto, assumono il ruolo di aquiclude nella sequenza idrogeologica, confinando localmente la falda principale (fig. 5).

Entrambi i livelli hanno deflusso orientato lungo la direzione Sud-Nord e recapito principale nel corso del fiume Calore. Tra i due livelli, attraverso il monitoraggio condotto nel periodo compreso tra agosto 2003 e gennaio 2004 (agosto 2003, ottobre 2003, dicembre 2003 e gennaio 2004), si rinvenivano delle differenze dei carichi idraulici. La falda sovrapposta presenta carichi idraulici più alti di quella confinata (anche di una decina di metri circa) sebbene lungo il deflusso ed in prossimità del limite a flusso imposto, rappresentato dall'affioramento del complesso argilloso-marnoso (meno permeabile di quello sabbioso-ghiaioso e di quello sabbioso-argilloso; fig. 5), le due risultino coincidenti.

L'alimentazione della falda principale, laddove sottoposta all'aquiclude sabbioso-argilloso, è garantita dall'infiltrazione efficace che si realizza nelle aree di affioramento del complesso sabbioso-ghiaioso site più a monte (il termine "monte" è da intendersi nel senso della direzione del flusso idrico sotterraneo; fig. 5).



Real and potential pollution causes for groundwater bodies

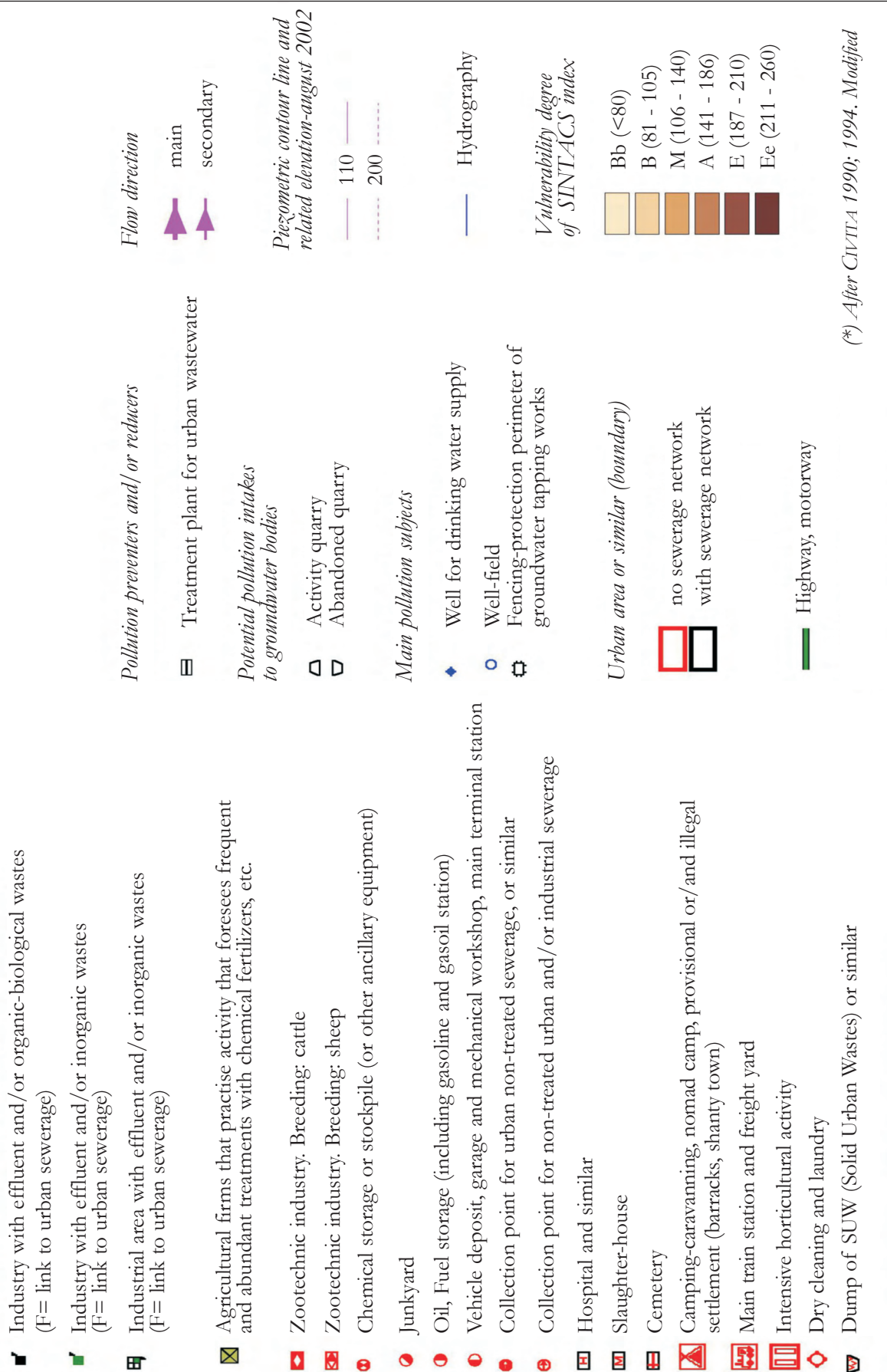


Fig. 4 - a) Carta della Vulnerabilità intrinseca ed integrata all'inquinamento dell'acquifero alluvionale della Piana di Benevento; b) Legenda della figura 4.
- a) *Intrinsic and integrated Vulnerability map of the Benevento alluvial plane*; b) *Legend of figure 4*.

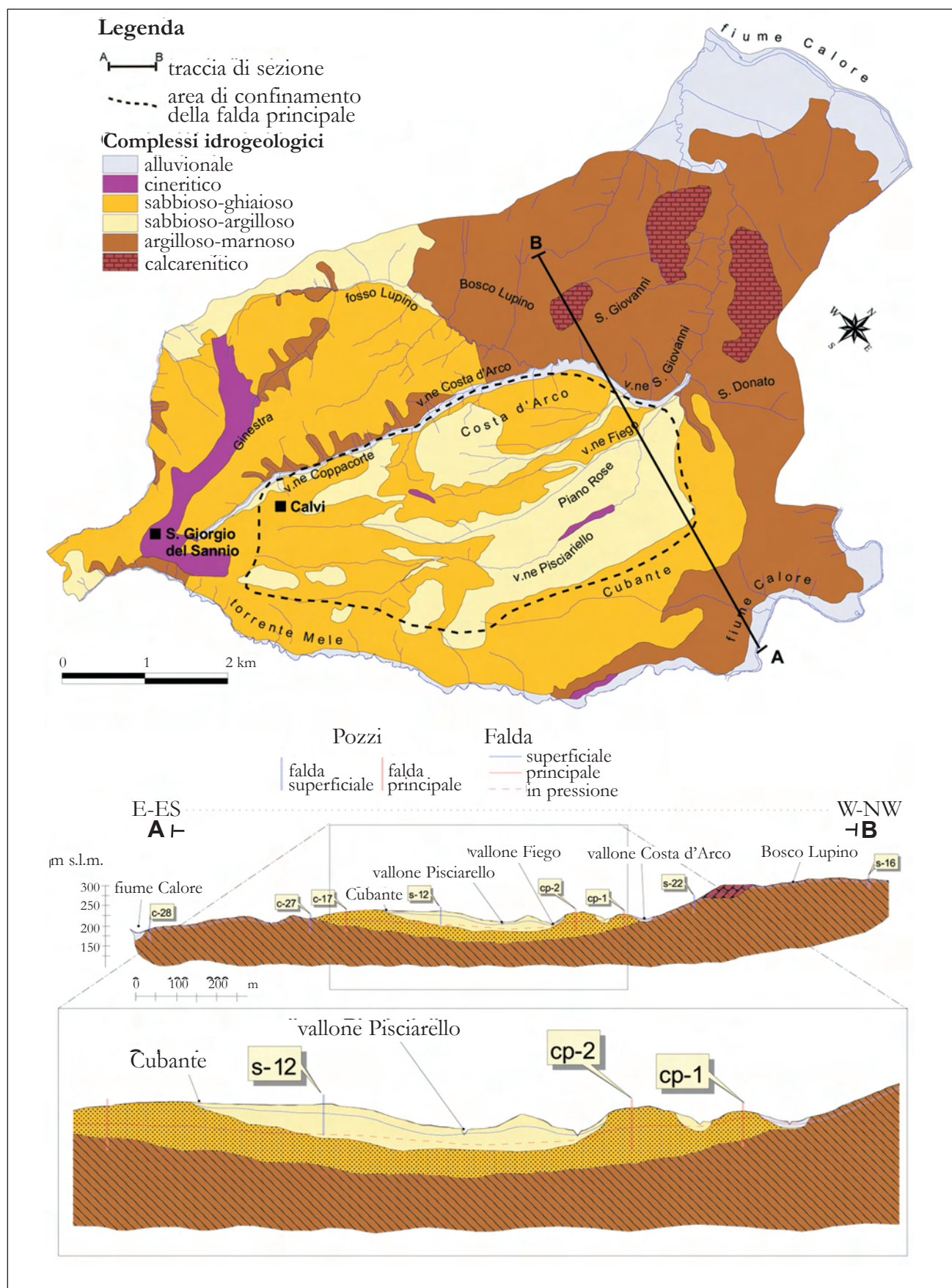


Fig. 5 - Schema dei complessi idrogeologici e sezione rappresentativa dell'area S. Giorgio-Calvi.
 - Scheme of hydrogeological complex of the S. Giorgio-Calvi area, with representative section.

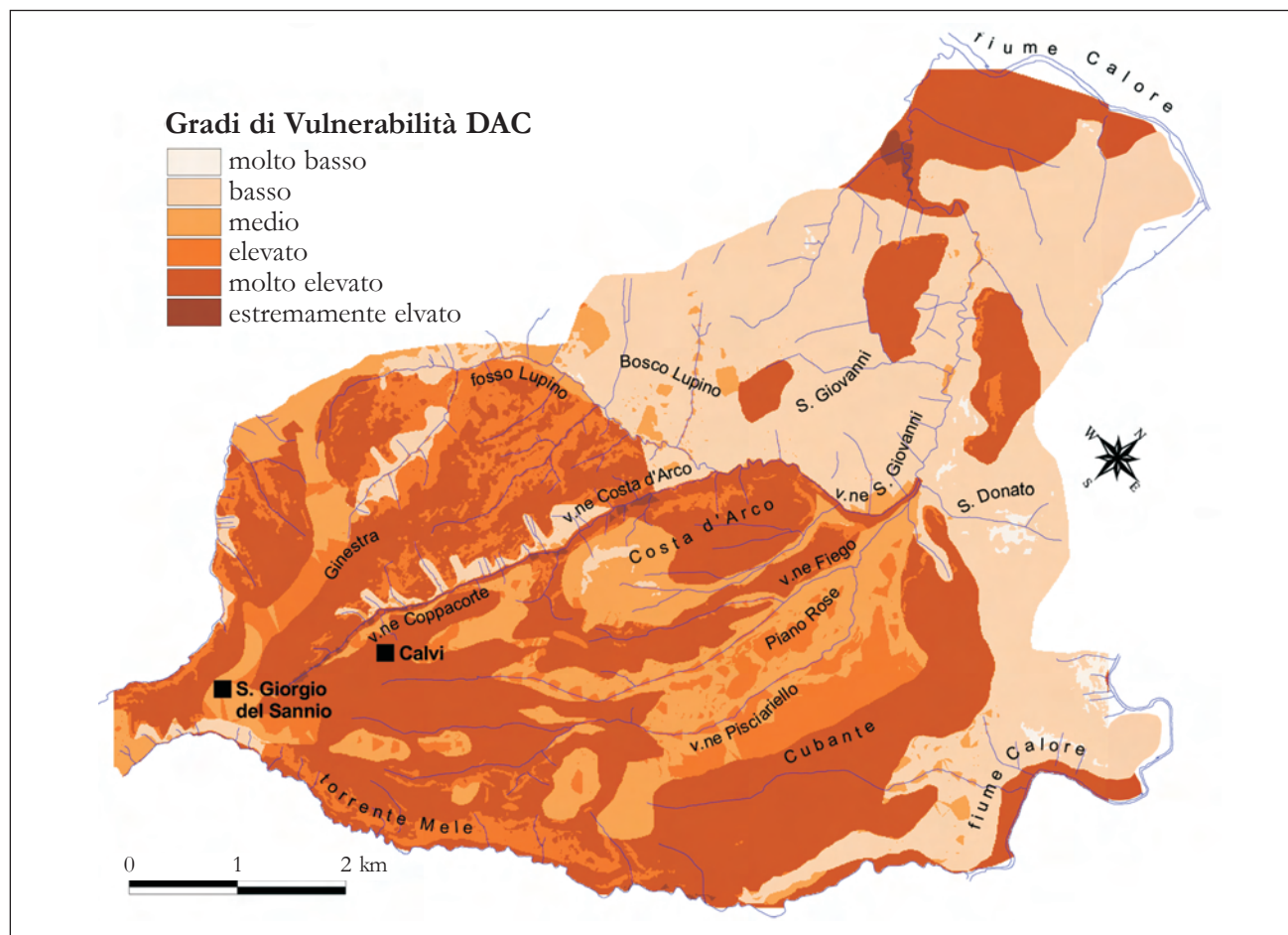


Fig. 6 - Carta della Vulnerabilità intrinseca all'inquinamento dell'acquifero di S. Giorgio- Calvi elaborata con il metodo DAC.
- *Intrinsic Vulnerability map of the S. Giorgio-Calvi area, produced with DAC method.*

2.2.3. - *Analisi di vulnerabilità intrinseca dell'acquifero superficiale*

Attraverso l'applicazione dei metodi parametrici a punteggi e pesi (DAC e SINTACS) è stata redatta la carta della vulnerabilità intrinseca all'inquinamento dell'acquifero. In figura 6 si riporta l'elaborato ottenuto attraverso l'applicazione del DAC, peraltro non dissimile da quella redatto con l'uso del SINTACS. La carta si riferisce: 1) al livello idrico principale, laddove esso è in condizioni freatiche; 2) al livello idrico sovrapposto, allorché quello principale è in condizioni di confinamento. Dall'elaborato si osserva che il complesso sabbioso-ghiaioso, ospitante la falda principale, risulta generalmente caratterizzato da un grado di vulnerabilità elevato.

Le aree di affioramento del complesso sabbioso-argilloso, sede della falda sovrapposta, risultano, invece, contraddistinte da un grado di vulnerabilità variabile dal medio all'elevato. Ad incidere sul differente grado di vulnerabilità sono, in modo predominante, i parametri: 1) Infiltrazione efficace,

più elevata nel settore di affioramento del complesso sabbioso-ghiaioso; 2) Insaturo e saturo, ai quali è possibile attribuire un indice di pericolosità (IP) più elevato laddove è affiorante il complesso di cui al punto 1; 3) Suolo, che nella zona di affioramento del complesso sabbioso-ghiaioso rientra nella categoria dei suoli franco-sabbiosi ai quali è attribuibile una minore capacità di auto-depurazione rispetto a quelli che presentano una maggiore percentuale della frazione argillosa.

3. - DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

In entrambi i casi di studio, come già delineato, il limitato numero di dati disponibili per i livelli idrici sottoposti non ha per essi consentito la definizione del grado di vulnerabilità intrinseca all'inquinamento. Ciò nonostante, traendo spunto dal metodo DAC (Drastic in Acquiferi Complessi; CELICO F, 1996), si dovrebbe considerare la porzione più profonda dell'acquifero "invulnerabile", trovandosi nella condizione di "interscambi idrici

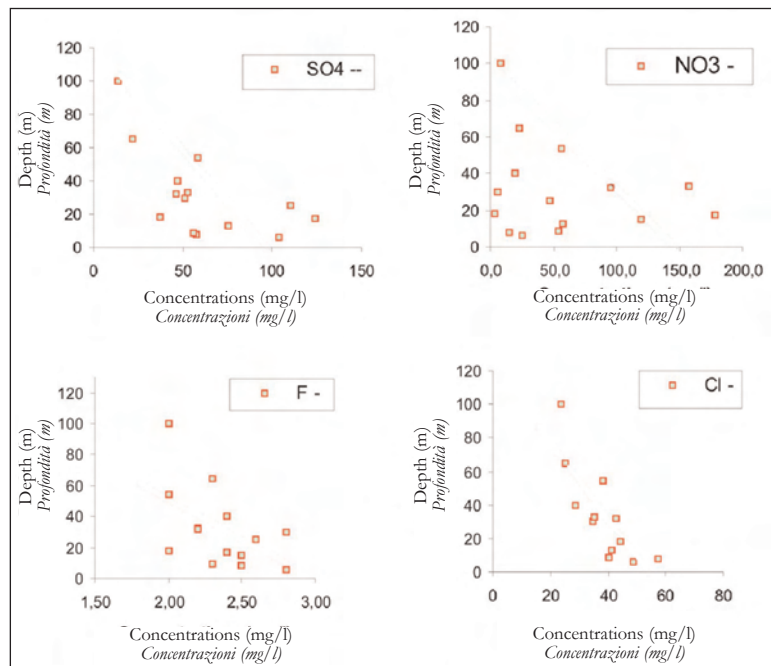


Fig. 7 - Comparazione tra profondità dei pozzi e concentrazioni di SO_4^{2-} , NO_3^- , F e Cl. - Concentrations of SO_4^{2-} , NO_3^- , F e Cl versus wells depth, in the Benevento alluvial plane.

sotterranei impediti” (CELICO F., 1996).
Come anticipato, però:

- nel caso A, il livello confinato viene alimentato, a monte, da quello superficiale attraverso il livello di sabbie plioceniche. Quest’ultimo assume, di conseguenza, il ruolo di *aquitard* oltre ad interrompere la continuità laterale dell’aquiclude argilloso (cfr. par. 1.1.3; fig. 3). Ne deriva, pertanto, che alla falda confinata si debba comunque attribuire un certo grado di vulnerabilità intrinseca all’inquinamento, sebbene inferiore a quello della falda freatica, atteso l’effetto auto-depurante operato dalle sabbie plioceniche.

- Nel caso B, il livello idrico principale, laddove presente in condizioni di confinamento, riceve alimentazione dalle aree di affioramento del complesso sabbioso-ghiaioso site più a monte rispetto al senso di deflusso idrico sotterraneo (cfr. par. 1.2.2; fig. 5). Anche in queste condizioni, al livello idrico sottoposto

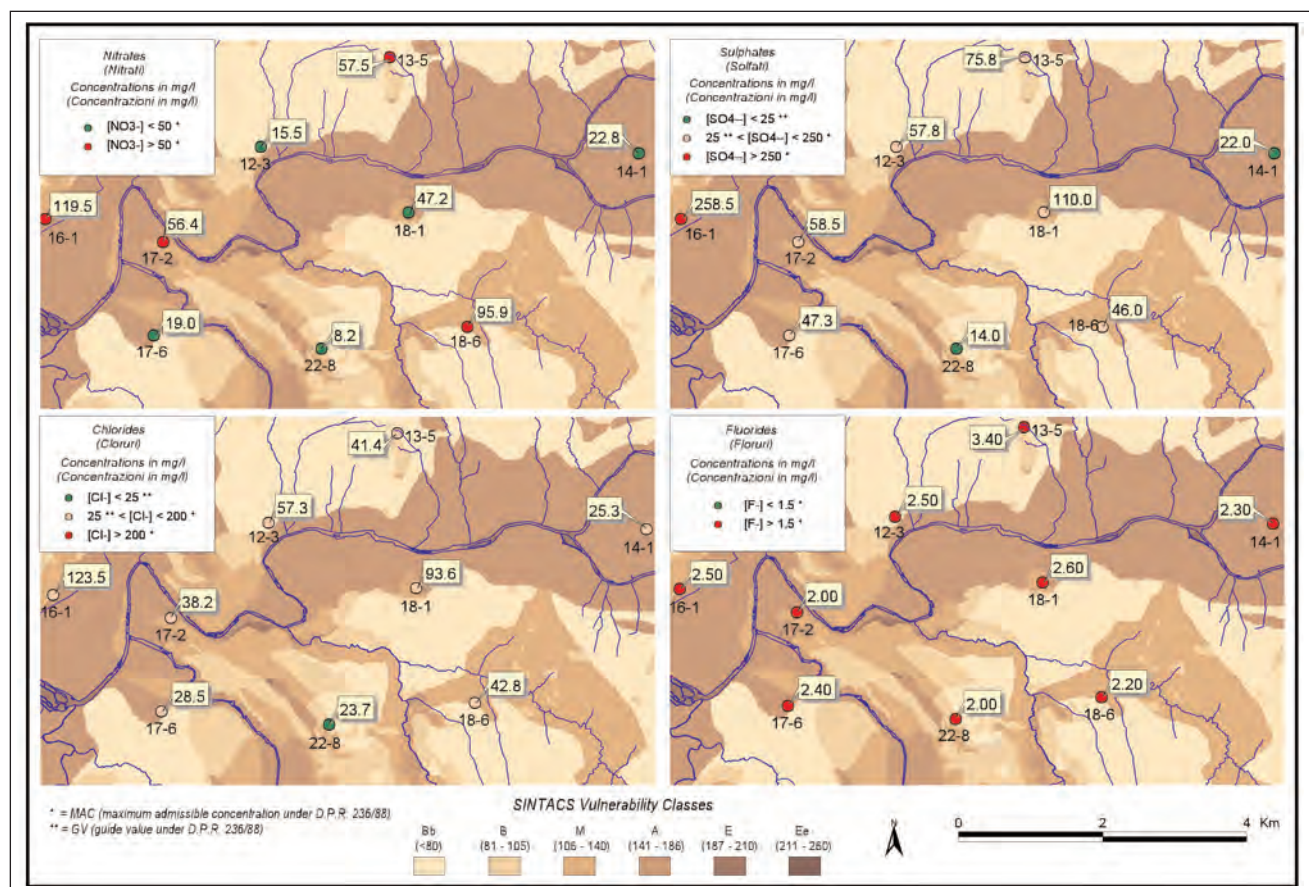


Fig. 8 - Rappresentazione puntuale della qualità delle acque sotterranee della piana di Benevento, con riferimento ai parametri: Nitrati, Solfati, Cloruri e Fluoruri. - Map of point-source ground-water quality of the Benevento alluvial plane, in terms of Nitrate, Sulphate, Chloride e Fluoride contents.

sarebbe opportuno assegnare un grado di vulnerabilità, che in questo caso può addirittura superare quello attribuito alla porzione più superficiale dell'acquifero. Questo perché, come si può facilmente intuire, gli eventuali apporti di sostanze contaminanti idroveicolate non sono soggette ad alcuna azione di auto-depurazione, se non a quella esercitata dal suolo e dagli spessori di insaturo dello stesso acquifero principale.

Con riferimento al Caso A, ad avvalorare le considerazioni sin qui esposte sono i risultati delle analisi chimiche di alcuni campioni d'acqua (circa 15, prelevati da pozzi con canne pescanti sia dal livello idrico superficiale sia da quello profondo) che mostrano il decadimento qualitativo della RIS anche con riferimento alla falda da considerare teoricamente invulnerabile. Tralasciando gli aspetti prettamente classificativi delle acque analizzate (ESPOSITO *et alii*, 2005a), ai fini del presente lavoro vale la pena soffermarsi sui soli parametri, tra quelli monitorati, indicativi di una contaminazione antropica, quindi superficiale (fig. 8). La presenza di ioni quali Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- ed F^- , in concentrazioni spesso superiori ai limiti di potabilità previsti dalla normativa vigente (D.P.R. 236/88), non può essere, infatti, associata a condizioni geologiche locali tali da ipotizzarne l'origine naturale.

Indipendentemente dalle possibili variazioni idrochimiche in funzione del periodo idrologico considerato (ESPOSITO *et alii*, 2005a), dai diagrammi di correlazione elaborati (fig. 7) non è sempre evidente la riduzione delle concentrazioni del contaminante all'aumentare della profondità delle perforazioni. Questo contrasta con l'accertata origine superficiale degli ioni considerati, ancor di più nei pozzi che intercettano il livello idrico profondo, sebbene sottoposti all'aquiclude argilloso.

Quanto esposto evidenzia il limite dei metodi di redazione delle carte di vulnerabilità, rappresentato dall'assunzione che ad influire sulla determinazione della stessa siano esclusivamente i fenomeni che si realizzano lungo la componente verticale (CELICO F. *et alii*, 1997). Fenomeni, quindi, incidenti a scala locale ed assolutamente indipendenti dal percorso che la risorsa effettua nel bacino sotterraneo. Tale limite induce a considerare più corretto, sebbene di non semplice applicazione, un approccio allo studio della vulnerabilità basato sulla Vulnerabilità Intrinseca Risultante (VIR; CELICO F., 1996). L'introduzione di tale concetto consente di tener conto, in qualsiasi punto dell'acquifero, delle interazioni alle quali sono sottoposte le acque sotterranee durante il loro deflusso, permettendo di pervenire alla valutazione dello stato di protezione complessiva delle RIS rispetto ai fenomeni di inquinamento.

BIBLIOGRAFIA

- ALLER L., BENNET T., LEHR J.H., PETTY R.J. & HACKETT G. (1987) - *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeological Settings*. EPA/600/2-87-035. Washington D.C.
- AUTORI VARI (2001) - *Nitrati, acqua e suolo da salvaguardare. Prevenzione dell'inquinamento dei sistemi idrogeologici*. Geofluid. Atti del convegno, 5 ottobre 2000 - Piacenza. I quaderni di Arpa.
- BRUNO R., ESPOSITO L., MAINOLFI L., MONACELLI G., PANZA R., SCALISE A.R. & VALLETTA M. (2005) - *La Formazione della Daunia (Appennino Centro-Meridionale): un esempio di acquifero minore*. Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia (novembre 2005 - accettato per la stampa). Roma.
- CELICO F. (1996) - *Vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi e delle risorse idriche sotterranee in realtà idrogeologiche complesse: i metodi DAC e VIR*. Quaderni di Geol. Appl. 3-1, 93-115, Pitagora Ed., Bologna.
- CELICO F., ESPOSITO L. & PISCOPO V. (1997) - *Limiti di applicabilità delle carte di vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi nella previsione dello stato di contaminazione antropica delle acque sotterranee*. Geologica Romana, **33**: 65-72, Roma.
- CELICO P., CONTE F., DI SANTO A., LUISE G. & PISCOPO V. (1998) - *L'acquifero alluvionale della piana di Benevento (Campania): un tipico esempio di serbatoio naturale di compenso a rischio di inquinamento*. Quaderni di Geol. Appl., 5/2, 101-113, Bologna.
- CIVITA M. (1987) - *La previsione e la prevenzione del rischio di inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le carte di vulnerabilità*. Atti Conv.: Inquinamento delle Acque Sotterranee: Previsione e Prevenzione, Mantova.
- CIVITA M. (1990) - *Legenda unificata per le carte della vulnerabilità dei corpi idrici sotterranei/Unified legend for the aquifer pollution vulnerability maps*. Studi sulla Vulnerabilità degli Acquiferi, 1 (Append.), Pitagora Editrice Bologna, 13 pp.
- CIVITA M. (1994) - *Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica*. Pitagora Editrice Bologna.
- CIVITA M. & DE MAIO M. (1997) - *Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5*. Quaderni di tecniche di protezione ambientali.
- D'ARGENIO B., PESCATORE T.S. & SCANDONE P. (1973) - *Schema geologico dell'Appennino Meridionale (Campania e Lucania)*. Atti Acc. Naz. Lincei, 183, Roma.
- ESPOSITO L., BRUNO R., DE PAOLA P.A. & AQUINO S. (2005a) - *Hydrogeology and vulnerability of the alluvial aquifer of the Benevento plain (Campania)*. Journal of technical & environmental geology, 3/2005, pp. 5-24. Roma.
- ESPOSITO L., CELICO P., GUADAGNO F.M., AQUINO S. & DE PAOLA P.A. (2005b) - *Idrogeologia del Sannio*. L'acqua, 4/2005, pp. 55-66.
- PESCATORE T., IMPROTA L., ROMEO R. & IANNACCONE G. (1996) - *Geologia della città di Benevento: caratteristiche litostratigrafiche di base per una microzonazione sismica*. Boll. Serv. Geol. It., **115**, Roma.
- PIANO REGOLATORE GENERALE DEL COMUNE DI BENEVENTO (1984) - *Allegati geologici al Piano Regolatore Generale del Comune di Benevento*.