

TAB. 7 - *Elenco dei pozzi di cui è stato misurato il livello statico o dinamico. \* = punti selezionati per la rete esecutiva; 1) prima campagna; 2) seconda campagna.*

- Wells where static or dynamic level has been measured. \* = points selected for the operational network; 1) first survey; 2) second survey.

Codice	quota (m s.l.m.)	liv. dinamico (prof. m)	liv. statico (prof. m)	Q (l/s)
lito0011*	6		4,9	4
lito0012	8		3,15	
lito0014	4,3		2,56	
lito0015	8		4,76	
lito0016	16		1,7	
lito0021*	3	4,89 (1)	1,55 (2)	
lito0022	5		0,97	
lito0023	5		1,72	
lito0024	26		2,98	
lito0025	32		3,7	
lito0029	8		3,4	6
lito0031	13		4,9	
lito0032*	17		4,38	2
lito0034*	6	2,5 (1)	3,6 (2)	3,5
RM0001*	13	19 (1) / 13 (2)		70 (1) / 80 (2)
RM0002*	174	45,2		41
RM0004*	153	52,5 (1) / 52,2 (2)		33
RM0008	12	4,5		30 - 100
RM0024	42		4	
RM0032	80		13,5	5
RM0034*	210	72		0,3
RM0038	216		10	4
RM0039*	234	65		7
RM0046*	165	16		12
RM0047*	23	10		5
RM0054*	47		10	1,5

verso la fine degli anni '80. È evidente tuttavia che l'esiguo numero di punti utilizzato e l'approssimazione insita nelle elaborazioni svolte non permettono di escludere l'esistenza di criticità localizzate.

## 6. - CARTOGRAFIA NUMERICA GEO-REFERENZIATA DI VULNERABILITÀ

### 6.1. - GENERALITÀ

L'obiettivo di questa attività elaborativa era di fornire una rappresentazione numerica georeferenziata della vulnerabilità dell'area, quale supporto

al processo di configurazione della rete di monitoraggio. La vulnerabilità è qui intesa come suscettività delle falde acquifere ad essere vulnerate da una sostanza inquinante veicolata dalle acque di infiltrazione dalla superficie topografica verso la superficie freatica e/o trasferita all'interno del corpo idrico verso le zone di effluenza naturale o di estrazione. La valutazione di questa caratteristica

TAB. 8 - *Elenco delle sorgenti censite. \* = punti selezionati per la rete esecutiva; (a) = informazione fornita dal gestore o dal PRGA; (b) = portata o rilascio misurati durante il censimento; (c) = dati da VENTRIGLIA (1988-90).*

- Sampled springs. \* = points selected for the operational network; (a) = information supplied by water utility or from General Aqueducts Master Plan (PRGA); (b) = measured discharge; (c) = data from VENTRIGLIA (1988-90).

Codice	Nome risorsa	Quota (m s.l.m.)	Q (l/s)
0068	Mola Bassa 1	260	5 (a)
0073	Braccio di Mare B.	189	32,6 (a)
0074*	Fontanella libera	90	
0075	Cinque Bottini	325	4,5 (a)
0081	Mola Antica	144	
0085	F.le Virgilio libera	189	
0088	Attici	300	1,5 (a)
0089	S. Carcera libera	197	
0090*	Mola Maggiorana	175	15 (a)
DEL0004*	fontanile	159	0,2 (b)
RM0003*	Castel Giuliano	180	21,5 (a)
RM0009	Bagnarello	237	4 (c)
RM0010	Ferrata	486	3 (a)
RM0011*	Fontanaccia	457	0,5 (b)
RM0012*	Fontanile La Concia	393	0,3 (b)
RM0013	Fontanile Bardone	318	1 (c)
RM0014*	Cisterna	203	2 (a)
RM0018	2 H12 (Ventriglia)	115	
RM0019*	Orti Biondi	157	4 (b)
RM0020	Fontanile Carissima	260	5 (b) / 11 (c)
RM0023	Fontanile Fontane Nuove	175	0,5 (b)
RM0027	11; f25 (Ventriglia)	88	1 (b)
RM0030	Primare (Monterone)	66	1 (b)
RM0031	Madonnella	80	3 (b)
RM0033*	Pantano	111	2 (b)
RM0035*	Fontanile S. Sebastiano	32	2,5 (b)
RM0043*	Cammorata	94	0,5 (b) / 1,5 (a)
RM0045	Caccaviello	216	4,5 (a)
RM0048*	Valle Muta	57	1,5 (a)
RM0049*	Fontana Giglio	204	7 (a)

(1) In particolar modo nell'area subito a nord della foce del fiume Tevere dove la scarsa corrispondenza è legata al tipo di interpolatore utilizzato che crea una superficie piezometrica quasi uniforme con quota zero, contro dei valori sperimentali variabili fra 0 e 25 m.

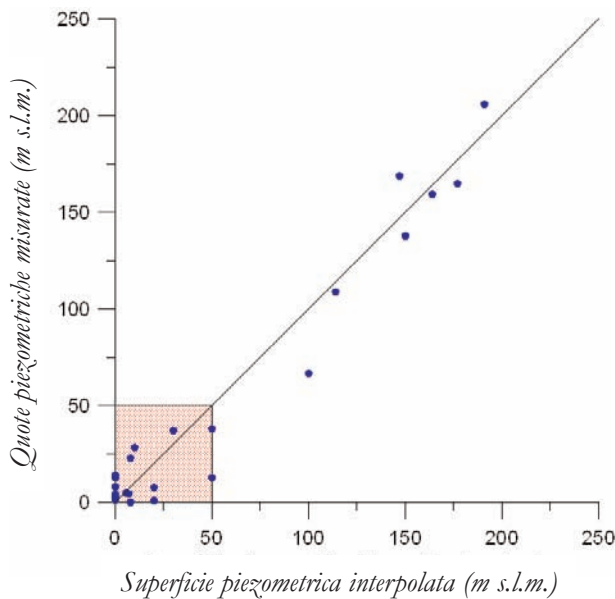


Fig. 21 - Confronto tra le quote dei livelli piezometrici ricavati dall'elaborazione dei dati di bibliografia e quelle misurate direttamente sul campo. Il coefficiente di determinazione  $R^2$  è pari a 0,95. Il riquadro evidenziato in rosso rappresenta il dettaglio dell'area costiera illustrato in fig. 22.  
- Comparison between the piezometric levels elaborated from literature data and the measured piezometric levels. The correlation coefficient  $R^2$  is 0,95. The red square represents the detail of the coastal area shown in fig. 22.

intrinseca delle falde è stata effettuata mediante l'uso combinato di alcuni parametri relativi ai diversi fattori condizionanti i processi di vulnerazione.

Per l'integrazione dei parametri utilizzati ci si è avvalsi di procedure GIS tramite matrici di incrocio. La sommatoria del "punteggio" associato a ciascuna qualificazione parametrica fornisce una stima della suddetta caratteristica, analogamente ai noti metodi del tipo a "punteggio e pesi" quali il DRASTIC (ALLER *et alii*, 1987) o il SINTACS (CIVITA & DE MAIO, 1997). Come per questi ultimi, la procedura utilizzata fornisce valutazioni di tipo esclusivamente qualitativo (del tipo "quest'area è più/meno vulnerabile di quest'altra") e presenta l'inconveniente che diverse suddivisioni e riaggregazioni in classi di ciascun parametro possono fornire valutazioni finali talora differenti. Una modalità per ridurre tali incertezze può essere rappresentata dalla normalizzazione delle valutazioni. Il risultato di ciascuna valutazione è stato esaminato attentamente, in relazione alle conoscenze dell'assetto reale del territorio prima di procedere al passo successivo, per evitare di ottenere dei risultati in termini di vulnerabilità non coerenti o non sufficientemente dettagliati.

Alla luce delle informazioni disponibili nell'area di studio, si è ritenuto di poter stimare in via preliminare, ancorché incompleta, la vulnerabilità dell'acquifero attraverso la "Capacità di protezione del non saturo", ottenuta mediante l'incrocio

di due fattori caratteristici: soggiacenza della falda e capacità di infiltrazione potenziale delle litologie affioranti. In tal modo di ottiene infatti una stima della capacità della zona non satura dell'acquifero di proteggere la falda sottostante che sicuramente rappresenta uno degli elementi rilevanti della vulnerabilità totale.

A causa della limitatezza di dati sull'assetto idrodinamico delle falde invece non è stato possibile procedere al completamento della valutazione di vulnerabilità in senso classico, cioè comprendendo i processi di trasporto nella zona satura, ancorché in modo qualitativo.

Inoltre, considerato che le falde sotterranee più importanti dell'area sono utilizzate a scopo prevalentemente potabile, uso condizionato dal non superamento di determinate soglie di concentrazione per alcune sostanze contaminanti, è stato ritenuto interessante integrare gli aspetti di protezione del non saturo con un fattore che svolga un ruolo di controllo della concentrazione dei contaminanti in falda; tale fattore è stato individuato nella diluizione nella zona satura dell'eventuale inquinante veicolato dalla superficie. Il fattore, denominato nel seguito "Capacità di diluizione" e parametrizzato in classi, è stato correlato in prima ipotesi all'assetto geolitologico dei principali corpi idrici individuati. A questo fattore è stato attribuita una valenza positiva poiché si ritiene che possa contribuire in modo talora significativo alla mitigazione del rischio di superamento delle soglie prefissate di concentrazione.

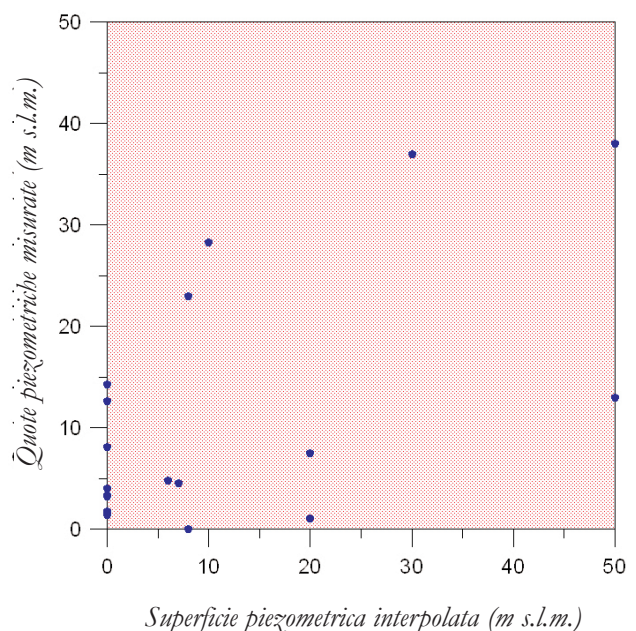


Fig. 22 - Dettaglio del confronto riportato in fig. 21 relativamente ai pozzi della zona litorale. - Detail of fig. 21 for the coastal area wells.

L'integrazione fra la Capacità di protezione del non saturo e la Capacità di diluizione del saturo, qui denominata "Suscettività delle falde al degrado qualitativo", rappresenta una valutazione della vulnerabilità delle falde che risponde agli obiettivi immediati della ricerca, ma che sconta in ogni caso l'incompletezza delle informazioni di base. Tale valutazione, che si ritiene correlabile alle stime ottenibili con i metodi classici, potrà essere migliorata mano a mano si renderanno disponibili informazioni adeguate sull'assetto idrogeologico dell'area.

Tutte le proprietà sono state oggetto di specifica rappresentazione cartografica georeferenziata.

## 6.2. - METODOLOGIA UTILIZZATA

Le elaborazioni sulle cartografie descritte nel seguito sono state svolte completamente in ambiente GIS mediante l'utilizzo di diverse tecniche che vanno dalla *Map Algebra* (ad esempio per il calcolo della Soggiacenza), all'interpolazione di dati puntuali (per l'elaborazione della superficie piezometrica), all'*Overlay* Spaziale utilizzato per l'integrazione di livelli informativi diversi.

Fra i vari metodi di *overlay*, quello noto come "modello di adeguatezza pesata" (WLC - *Weighted Linear Combination*) viene largamente usato nella pianificazione territoriale. Il suo scopo è classificare le diverse porzioni di territorio in funzione del loro grado di compatibilità alle attività oggetto della pianificazione stessa. Consiste nella combinazione algebrica di diverse tipologie di dati in un prodotto finale che tenga conto in maniera pesata dei diversi contributi (BASNET *et alii*, 2001). In particolare si osserva che l'applicazione di un modello per la determinazione del grado di adeguatezza prevede che i dati di *input* siano resi comparabili tra loro trasformando i valori degli attributi o in classi discrete o secondo una scala continua di valori aventi lo stesso *range*.

La metodologia impiegata nella produzione di un dato *layer* cartografico si compone di vari passi successivi che possono essere sintetizzati come segue (ESRI, 2001) :

1. scelta dei dati di *input*, cioè dei livelli informativi da utilizzare nell'analisi;
2. creazione di eventuali *set* di dati derivati che consentano di ottenere nuove informazioni dal *set* di dati di *input* (nel caso in esame, ad esempio, la soggiacenza è un dato derivato ottenuto dalla differenza tra il DTM e la superficie piezometrica);
3. assegnazione di una scala di adeguatezza omogenea per tutti i *layer* di *input* : questo passo è fondamentale per rendere i dati confrontabili

tra loro in operazioni di *Map Algebra*. Le scale di adeguatezza sono tipicamente lineari, generalmente hanno valori compresi tra 1 e 9, e fondamentalmente devono prestarsi a ben separare l'intervallo dei valori in "basso", "medio" e "alto" (sulla base dei quali si attribuiscono tutti gli altri valori). Nonostante queste indicazioni di massima, l'assegnazione delle scale di adeguatezza non segue delle regole rigide, ma è un processo di valutazione basato sull'analisi dei dati di partenza che, per l'importanza che riveste nella realizzazione del modello, viene generalmente eseguito da "personale esperto". Nel caso in esame la scala di adeguatezza scelta assume in generale valori compresi tra 1 e 6, ritenendo che in tal modo si potesse esprimere in modo flessibile la variabilità dei dati di *input* (salvo successive aggregazioni di classi).

4. definizione di "pesi" da attribuire ai singoli *layer*: è un passo necessario per esprimere l'importanza relativa di ogni livello informativo coinvolto nel processo di analisi. I pesi sono assegnati in modo tale che la loro somma sia uguale a uno, come richiesto dal modello WLC (EASTMAN, 1999 in BASNET *et alii*, 2001).

5. il *layer* di *output*, che presenta la stessa scala di valori dei *layer* di *input*, è ricavato applicando la formula:

$$S = \sum_{j=1}^N (f_j \times P_j) \quad (6.1.)$$

dove: S = valore risultante per il *layer* di *output*  
 $f_j$  = valore del *layer*  $j$  riclassificato secondo la scala di adeguatezza  
 $P_j$  = peso attribuito al *layer*  $j$   
 $N$  = numero dei *layer* di *input*

I valori dei pesi sono attribuiti secondo criteri di giudizio sulla rilevanza del ruolo dei diversi *layer* sul risultato finale.

## 6.3. - SOGGIACENZA

### 6.3.1. - Elaborazioni propedeutiche

La soggiacenza è stata ricavata per sottrazione della quota teorica del livello di falda dal DTM, ma questa elaborazione è stata preceduta da alcune operazioni preliminari per il trattamento del DTM stesso e per la realizzazione di un livello informativo che sintetizzasse nel modo più corretto possibile l'andamento della superficie piezometrica.

La creazione di un DTM idrologicamente corretto è il primo passo per la realizzazione di un modello idrogeologico (SAUNDERS, 1999). Gli errori che si possono incontrare sono sinteticamente di due tipi: le depressioni (*sink*) e le culmi-



nazioni (*peak*). Entrambi possono ricondursi a fenomeni naturali (come per esempio in ambienti carsici o glaciali) oppure possono essere delle anomalie artificiali dovute a errori indotti nella creazione del modello stesso. Un *sink* è una cella o un'area circondata da celle con valori di elevazione più alti, mentre un picco è al contrario una cella o un'area circondata da celle con valori di elevazione più bassi. I *sink* bloccano lo scorrimento potenziale dell'acqua, ponendo artificialmente fine ai corsi d'acqua, e devono essere quindi eliminati affinché gli strumenti di modellistica idrologica ed idrogeologica funzionino correttamente (MAIDMENT *et alii*, 2000).

A tal fine, il modello digitale di elevazione fornito dalla Regione Lazio - SIRA è stato opportunamente manipolato e trattato utilizzando gli strumenti e le funzioni messe a disposizione del *software* utilizzato, ArcGIS 8.3 della ESRI Inc. - modulo "3D Analyst". Il *raster* risultante, in formato proprietario GRID, è stato utilizzato per le elaborazioni di analisi spaziale effettuate tramite il modulo "Spatial Analyst" del *software* ArcGIS (fig. 23).

Il livello informativo della freatimetria è il ri-

sultato dell'integrazione dei dati disponibili in due prodotti cartografici di bibliografia (indicati in tab. 9): la Carta idrogeologica di Ventriglia (1988-1990) a scala 1:100.000 e la Carta delle isofreatiche del Lazio Settentrionale a scala 1:250.000, prodotta dalla Regione Lazio e dall'Autorità dei Bacini Regionali del Lazio.

Gli elementi vettoriali lineari di questo livello (isofreatiche) sono stati trasformati in punti, successivamente interpolati per ottenere una superficie continua; per l'interpolazione si è preferito utilizzare il metodo IDW (*Inverse Distance Weighted*) per la presenza di un *trend* marcato nello strato delle isofreatiche. L'IDW determina il valore delle celle del *raster* utilizzando una combinazione lineare pesata a partire da un insieme di dati puntuali. Il peso è funzione dell'inverso della distanza e tanto più un punto di *input* è lontano dalla posizione della cella di *output*, quanto più esso riveste un'importanza minore nel calcolo dei valori della superficie interpolata. Il prodotto dell'interpolazione IDW è la superficie piezometrica, che è stata utilizzata per le successive elaborazioni (fig. 24).

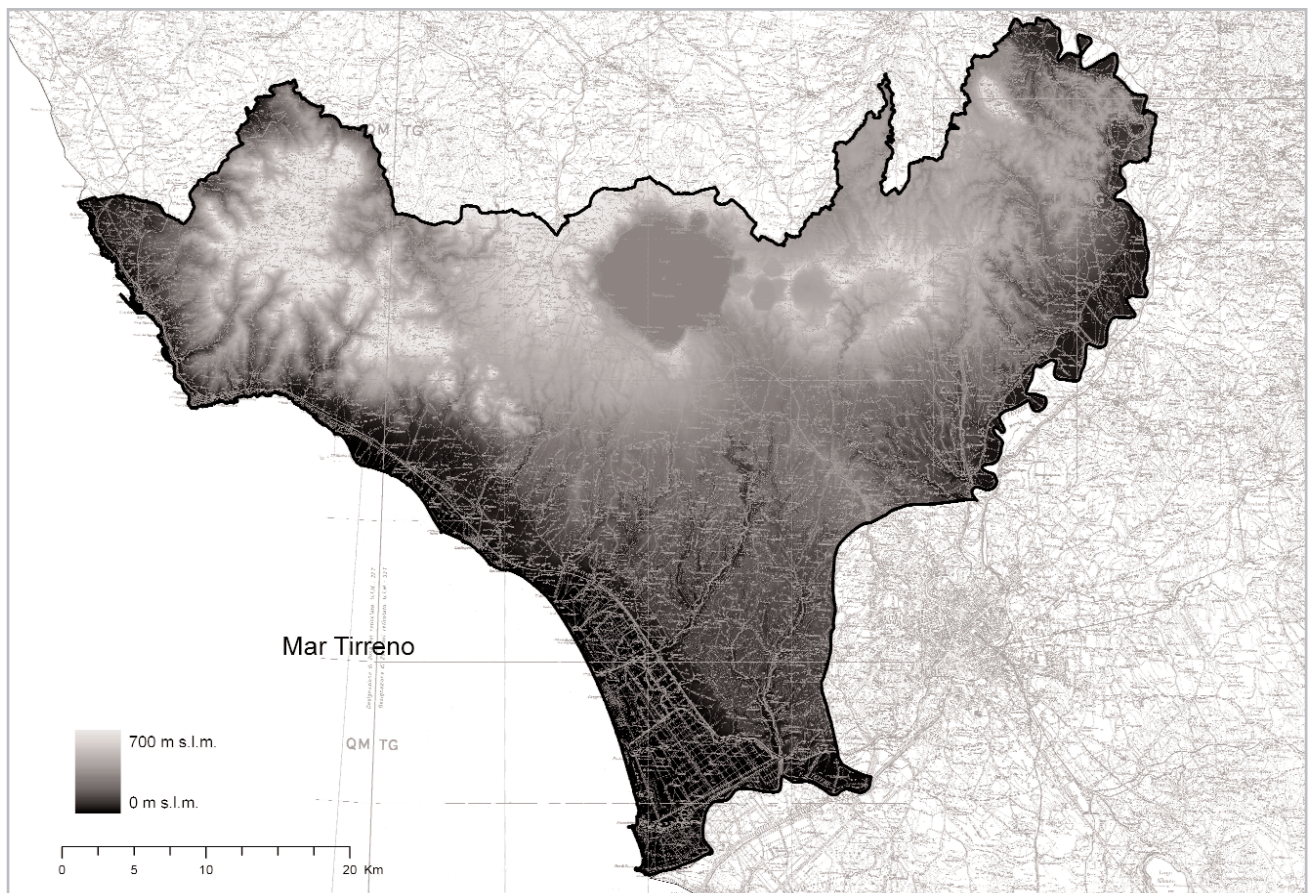


Fig. 23 - Modello digitale di elevazione (DTM) dell'area di studio fornito dalla Regione Lazio - SIRA (risoluzione originaria di 20 m ricampionato per ottenere una risoluzione di 50 m).

- Digital Terrain Model (DTM) of the study area supplied by Regione Lazio - SIRA (original resolution of 20 m successively re-sampled to obtain a resolution of 50 m).



TAB. 9 - *Basi utilizzate per l'elaborazione della superficie piezometrica.* - Layers used for the water table elaboration.

	Fonte	Formato
Isofreatiche estratte dai dati di Ventriglia (1988-89)	Provincia di Roma	Vettoriale lineare
Isofreatiche digitalizzate dalla Carta delle isofreatiche del Lazio Settentrionale alla scala 1:125.000 di Capelli et alii (1998)	Regione Lazio, Autorità dei Bacini Regionali	Vettoriale lineare

### 6.3.2. - Soggiacenza

La soggiacenza, ricavata per sottrazione della quota della falda ottenuta in precedenza dal DTM mediante operazioni di analisi spaziale (Map Algebra), rappresenta i valori relativi allo spessore di terreno compreso tra la superficie topografica e quella piezometrica. Il limite principale di questa elaborazione consiste nel fatto che la superficie piezometrica così ricavata ha un andamento molto generalizzato a causa della bassa densità dell'informazione, mentre il DTM ha un andamento molto più particolareggiato e rispecchia in modo abbastanza realistico la superficie topografica "vera". Per questo motivo e per la mancanza di informazioni lungo il reticolo idrografico secondario, il risultato della sottrazione dei due livelli in formato *raster* poteva risultare negativo, laddove la superficie piezometrica assume valori di elevazione maggiori della superficie topografica. In questi casi si è assunto che la falda sia effettivamente in prossimità della superficie e i pixel negativi sono stati riclassificati attribuendo alla soggiacenza un valore pari a zero. Questo problema si è verificato frequentemente nei fondovalle, ma anche in diversi settori delle aree collinari e di pianura (fig. 25). Per il calcolo della Capacità di protezione del non saturo la soggiacenza è stata classificata in 3 classi (0-10 m; 10-30 m; >30 m) secondo i limiti suggeriti da AA.VV. (1988) e da GIULIANO *et alii*, (1997) (fig. 26). La suddivisione secondo intervalli non lineari si ispira al criterio della diminuzione in modo iperbolico della vulnerabilità della falda freatica all'aumentare della soggiacenza (DE MAIO *et alii*, 2001).

### 6.4. - CAPACITÀ DI INFILTRAZIONE POTENZIALE-CIP

La carta della Capacità di Infiltrazione Potenziale (d'ora in avanti denominata CIP) è stata elaborata sulla base della carta geolitologica del Lazio in scala 1:25.000, fornita in formato digitale dalla Regione Lazio (Regione Lazio, 2002).

Analogamente ad altri metodi per la valutazione della vulnerabilità a ciascuna litologia è stata

assegnata una classe di infiltrazione potenziale, intesa come attitudine del litotipo a lasciarsi attraversare dalla ricarica meteorica; dato l'obiettivo della valutazione in oggetto non si è ritenuto di dover procedere alla stima dell'infiltrazione in termini quantitativi.

L'attribuzione delle classi di Capacità di Infiltrazione Potenziale alle diverse litologie presenti nell'area è scaturita da un ampio confronto delle informazioni di letteratura; in particolare sono stati messi a confronto schemi differenti di valutazione qualitativa di permeabilità per i differenti litotipi; in particolare quelli di VENTRIGLIA (1988-90) e Regione Lazio (2002), in relazione alle litologie affioranti nell'area, e quello di CIVITA e DE MAIO (1997) in relazione ad una classificazione generale dell'infiltrabilità potenziale dei complessi idrogeologici. Lo schema adottato di classificazione della CIP è articolato in 6 classi, da Irrilevante che caratterizza le argille plioceniche a Molto Elevata che caratterizza il Calcare massiccio e i Calcari detritici; alle altre litologie sono state attribuite classi intermedie. La valutazione risultante è quella riportata nella tab.10. Il risultato è rappresentato in fig. 27 e in scala 1:100.000 nella tavola 1 f.t. in tasca di copertina.

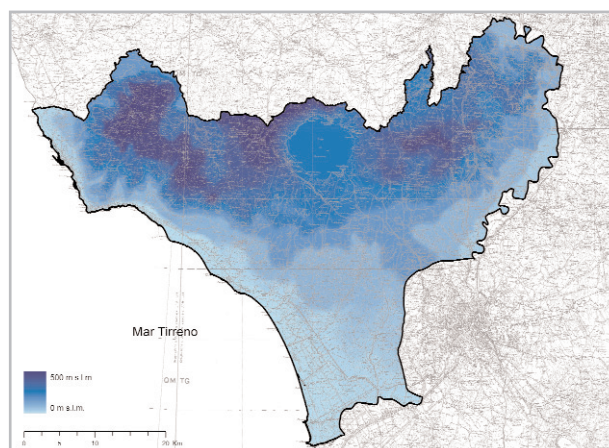


Fig. 24 - Carta della superficie piezometrica ottenuta dalle isolinee (convertite in punti) utilizzando l'interpolatore IDW (*Inverse Distance Weighted*).  
- Piezometric surface map obtained by interpolation of the isolines (previously transformed in points) using the IDW (*Inverse Distance Weighted*) technique.



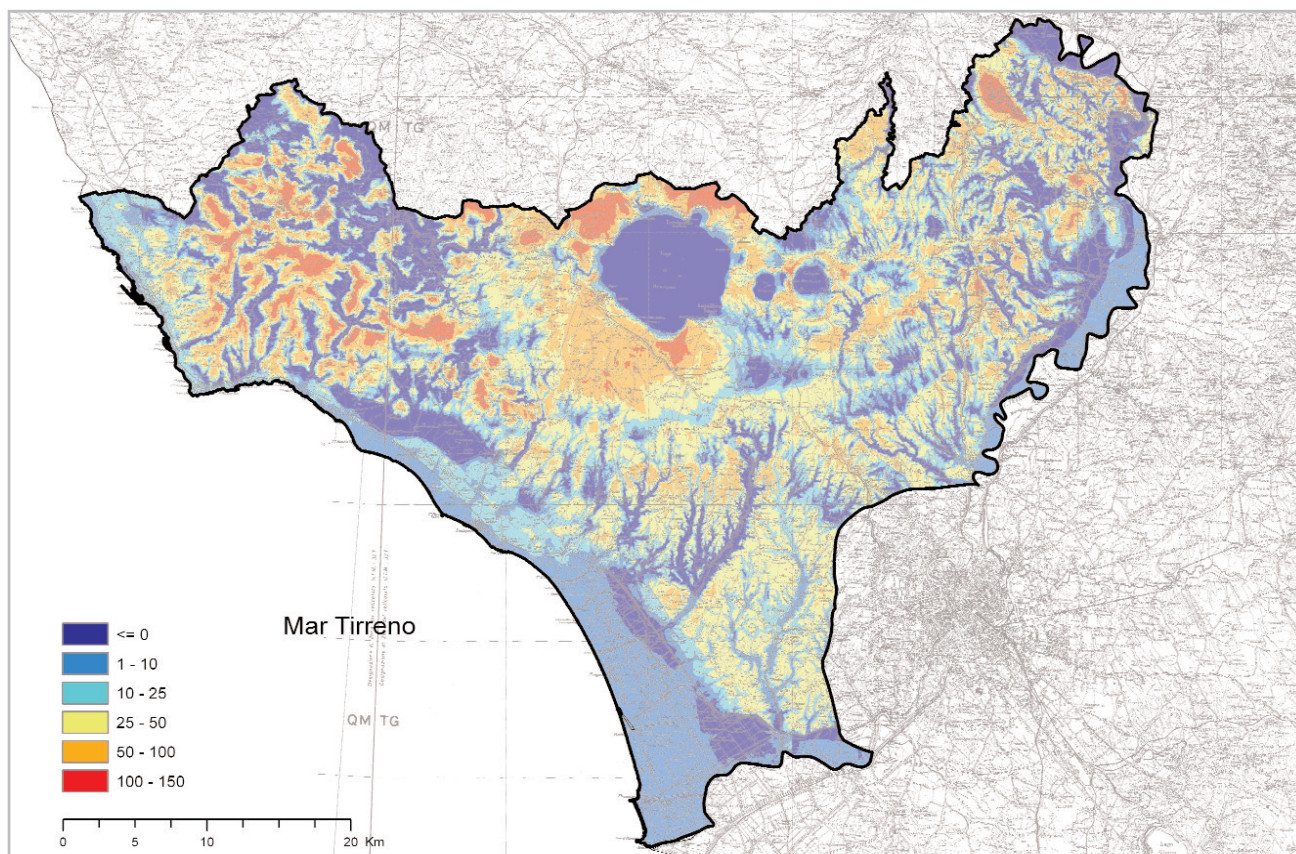


Fig. 25 - Soggiacenza della falda principale suddivisa in 6 classi. In legenda le classi in metri. - Depth to the water table of the main aquifer ranked into 6 classes. In the legend classes are in metres.

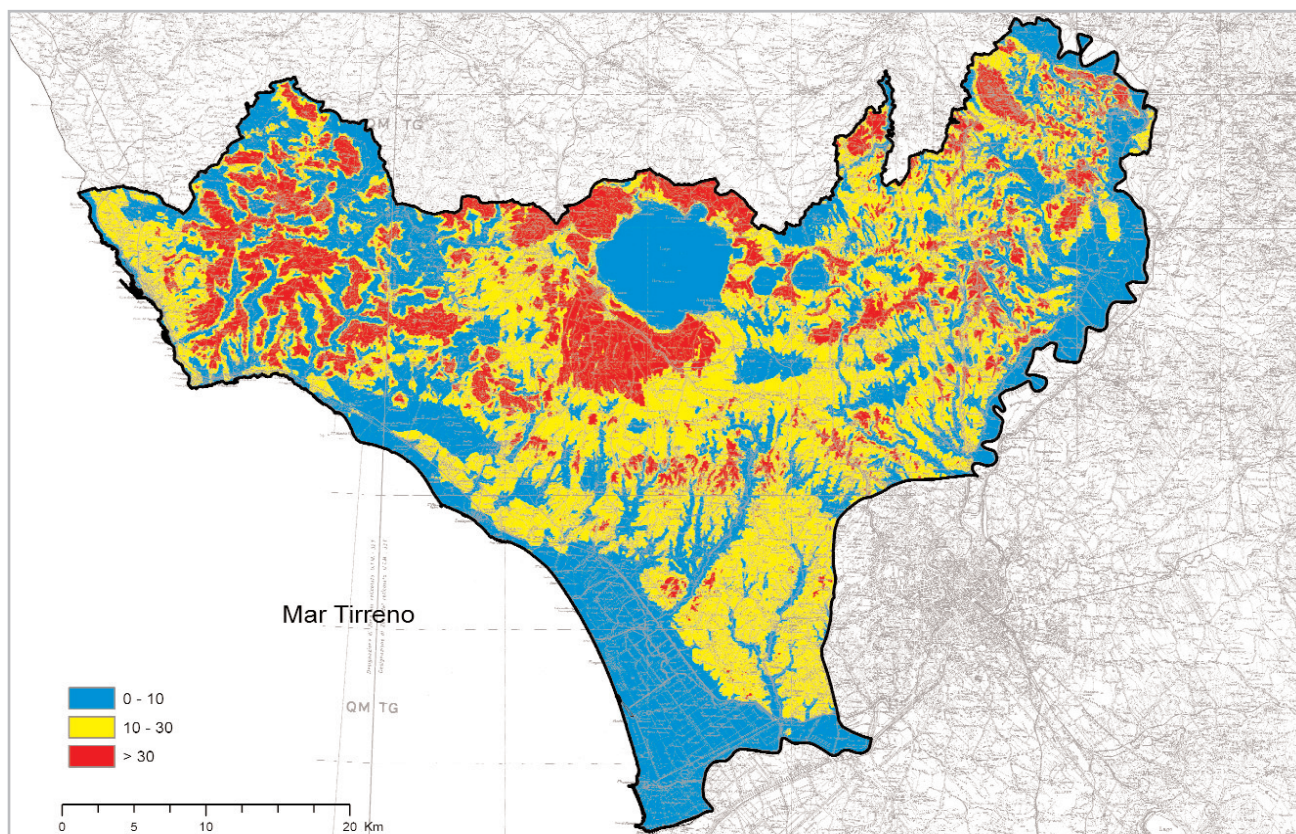


Fig. 26 - Soggiacenza della falda principale riclassificata in 3 classi. In legenda le classi in metri. - Depth to the water table of the main aquifer reclassified into 3 classes. In the legend classes are in metres.



## 6.5. - CAPACITÀ DI PROTEZIONE DEL NON SATURO (CPNS)

La Capacità di Protezione del Non Saturated (d'ora in avanti denominata CPNS) rappresenta una valutazione della capacità teorica di attenuazione del contaminante da parte della zona sovrastante l'acquifero. Il relativo livello informativo è stato ottenuto con operazioni di *Overlay* Spaziale tra i livelli *raster* della Soggiacenza e della Capacità di Infiltrazione Potenziale.

La matrice di integrazione tra Soggiacenza e CIP è mostrata in tabella 11. Ai due livelli informativi da combinare (Soggiacenza e CIP) è stata applicata la scala di adeguatezza scelta (1-6) in modo lineare: nel caso della CIP (suddivisa in 6 classi) i valori attribuiti variano da 1 a 6; nel caso della Soggiacenza, suddivisa in sole tre classi (0-10 m; 10-30 m; >30 m), i valori attribuiti sono rispettivamente 2, 4, 6 per coprire l'intero *range* della scala di adeguatezza scelta.

Nell'attribuzione dei pesi si è stimato che la Capacità di Infiltrazione, che esprime le caratteristiche litologiche del mezzo non saturo, abbia un'importanza maggiore rispetto alla Soggiacenza nella valutazione della CPNS; per questo si è deciso di attribuire un peso pari a 0.7 alla prima e 0.3 alla seconda.

Peraltro, altre procedure considerano il ruolo di questi due fattori in modo differente: ad esempio SINTACS (CIVITA & DE MAIO, 1997) in condizioni normali attribuisce alla soggiacenza (parametro "S") peso 5 e all'infiltrazione (parametro "I") 4, quindi apparentemente la soggiacenza pesa di più; tuttavia nel caso specifico le caratteristiche litologiche del non saturo sono valutate una seconda volta dal parametro "N" (non saturo), con peso 5, così in definitiva la litologia del non saturo pesa il 65% contro il 35% della soggiacenza.

Lo schema adottato è in linea con la considerazione generale che la vulnerabilità debba esprimere in qualche modo il tempo di transito del contaminante fino a raggiungere la falda, che può essere identificato in via speditiva col rapporto fra soggiacenza e permeabilità verticale, con la seconda rappresentativa della velocità del contaminante. L'inverso della permeabilità è in generale superiore alla soggiacenza di almeno 2-3 ordini di grandezza, esprimendo quindi la maggiore importanza della litologia rispetto alla soggiacenza nella maggioranza delle situazioni, fatto eccezione per le aree carsiche in zone montuose o altre situazioni limite.

I valori ottenuti dalla matrice illustrata in tabella 11, sono stati calcolati secondo la (6.1.), che in questo caso diviene:

$$CPNS = \text{Soggiacenza} \times 0,3 + \text{CIP} \times 0,7 \quad (6.2.)$$

La relazione tra i valori ottenuti nella matrice di tabella 11 e la CPNS è indicata in tabella 12. Successivamente all'elaborazione puramente "algebrica", alla luce della realtà idrogeologica del territorio in esame, si è proceduto ad alcuni aggiustamenti relativamente ad alcune evidenze oggettive:

1) l'area che corrisponde all'estensione dell'acquifero del Monte Soratte è stata classificata come CPNS "Irrilevante" (classe 6) a prescindere dal valore di soggiacenza stimata e dalla singola litologia affiorante: il motivo di questa scelta è dovuta al fatto che la struttura del Monte Soratte è costituita da calcari fratturati e intensamente carsificati, altamente vulnerabili.

2) Nel settore NW dell'area in esame (Tolfa - Allumiere) affiora la successione dei flysch argilloso - calcarei ed arenacei, caratterizzati da capacità di infiltrazione da bassa a molto bassa. Questo complesso idrogeologico è interessato da circolazione idrica sotterranea locale e discontinua, di scarso interesse regionale, per cui la valutazione della soggiacenza in quest'area perde di significato alla scala utilizzata in questa ricerca. Pertanto l'area è stata esclusa dalla classificazione (2). In figura 28 è mostrata la distribuzione della CPNS ottenuta con la procedura sopra descritta che in tavola 2 f.t. in tasca di copertina, è riprodotta in scala 1:100.000.

In generale, prescindendo dalle due zone citate (M. Soratte e area dei Flysch della Tolfa) si osserva come la CPNS nel territorio esaminato risulti da molto scarsa a scarsa nella fascia costiera e in corrispondenza della valle del Tevere a nord-est, da molto scarsa a scarsa nei rilievi vulcanici dei Monti Ceriti, da scarsa ad elevata in corrispondenza dell'apparato sabatino.

Un riscontro, seppur preliminare, della correttezza delle valutazioni sin qui svolte è stata cercata nel confronto tra la CPNS e i valori di concentrazione dei nitrati misurati nei campioni di acque sotterranee (fig. 29), certamente rappresentativi dello stato reale di vulnerazione della falda.

I tenori più elevati sono stati riscontrati nella fascia litoranea dove la CPNS è classificata da molto scarsa a scarsa, mostrando un'apparente corrispondenza tra questa e l'indicatore scelto.

(2) Tuttavia all'interno di questa area si individuano i rilievi dei Monti Ceriti, costituiti da prodotti vulcanici (stratigraficamente sovrapposti ai flysch) con capacità di infiltrazione elevata, la cui valutazione ottenuta con la Map Algebra è stata mantenuta nelle successive elaborazioni.

TAB. 10 - *Capacità di infiltrazione potenziale CIP (6 classi) di ciascun gruppo litologico.*  
 - Potential infiltration capability CIP (6 classes) of each lithological group.

DESCRIZIONE	GRUPPO LITOLOGICO	CIP
Detriti antropici (Olocene)	SEDIMENTARIO Plio-Pleistocene – Olocene	Bassa
Conoidi e detriti di pendio anche cementati, facies moreniche (Pleistocene - Olocene)	SEDIMENTARIO Plio-Pleistocene – Olocene	Elevata
Alluvioni ghiaiose, sabbiose, argillose attuali e recenti anche terrazzate e coperture colluviali ed eluviali (Olocene)	SEDIMENTARIO Plio-Pleistocene – Olocene	Media
Depositi prevalentemente limo - argillosi in facies palustre, lacustre e salmastra (Pleistocene - Olocene)	SEDIMENTARIO Plio-Pleistocene – Olocene	Bassa
Alluvioni ghiaiose, sabbiose, argillose antiche terrazzate dep. lacustri antichi (Pleistocene)	SEDIMENTARIO Plio-Pleistocene – Olocene	Media
Travertini (Pleistocene-Olocene)	SEDIMENTARIO Plio-Pleistocene – Olocene	Elevata
Depositi preval. ghiaiosi a luoghi cementati in facies marina e di trans. terr. lungo costa (Plio-Pleistocene)	SEDIMENTARIO Plio-Pleistocene – Olocene	Elevata
Depositi preval. sabbiosi a luoghi cementati in facies mar. e di trans. terr. lungo costa (Plio-Pleistocene)	SEDIMENTARIO Plio-Pleistocene – Olocene	Media
Depositi preval. Argillosi in facies marina e di trans. terr. lungo costa (Plio-Pleistocene)	SEDIMENTARIO Plio-Pleistocene – Olocene	Irrilevante
Argille (Pliocene)	SEDIMENTARIO Plio-Pleistocene – Olocene	Irrilevante
Calcareni e calcari organogeni (tipo Macco Auct.) (Pliocene)	SEDIMENTARIO Plio-Pleistocene – Olocene	Elevata
Sabbie litoranee e palustri e dune recenti (Olocene)	SEDIMENTARIO Plio-Pleistocene – Olocene	Elevata
Flysch a componente dominante arenacea o conglomeratico – arenacea ( Miocene medio - sup.)	SEDIMENTARIO (meso - cenozoico)	Molto Bassa
Flysch a componente dominante arenaceo o arenaceo-pelitico (Cretacico sup. - Miocene sup.)	SEDIMENTARIO (meso - cenozoico)	Molto Bassa
Flysch a componente dominante calcareo marnoso, subordin. argillitico (Cretacico sup. - Oligocene)	SEDIMENTARIO (meso - cenozoico)	Molto Bassa
Argille con gessi ( Miocene superiore)	SEDIMENTARIO (meso - cenozoico)	Molto Bassa
Conglomerati poligenici (Miocene - Pliocene)	SEDIMENTARIO (meso - cenozoico)	Elevata
Scaglia (Cretacico sup. - Eocene)	SEDIMENTARIO (meso - cenozoico)	Elevata
Rosso ammonitico (Lias medio - superiore)	SEDIMENTARIO (meso - cenozoico)	Media
Corniola e calcari selciferi (Lias medio - superiore)	SEDIMENTARIO (meso - cenozoico)	Elevata
Calcare massiccio (Lias)	SEDIMENTARIO (meso - cenozoico)	Molto Elevata
Dolomia (Trias.sup.)	SEDIMENTARIO (meso - cenozoico)	Bassa
Calcari detritici, micritici, microcristallini, oolitici, con inter. dolom., calc. organog. della serie Laz. Abr.(Lias med.-Cretacico sup.)	SEDIMENTARIO (meso - cenozoico)	Molto Elevata
Scorie e lapilli ( Pleistocene)	VULCANICO	Elevata
Lave sovrasure e laccoliti (Pliocene sup. - Pleistocene inf.)	VULCANICO	Elevata
Lave sottosature e sature (Pleistocene)	VULCANICO	Elevata
Tufi prevalentemente litoidi (Pleistocene)	VULCANICO	Media
Tufi stratificati, tufiti e tufi terrosi (Pleistocene)	VULCANICO	Bassa
Pozzolane (Pleistocene)	VULCANICO	Bassa
Facies freatomagmatiche (Pleistocene)	VULCANICO	Bassa



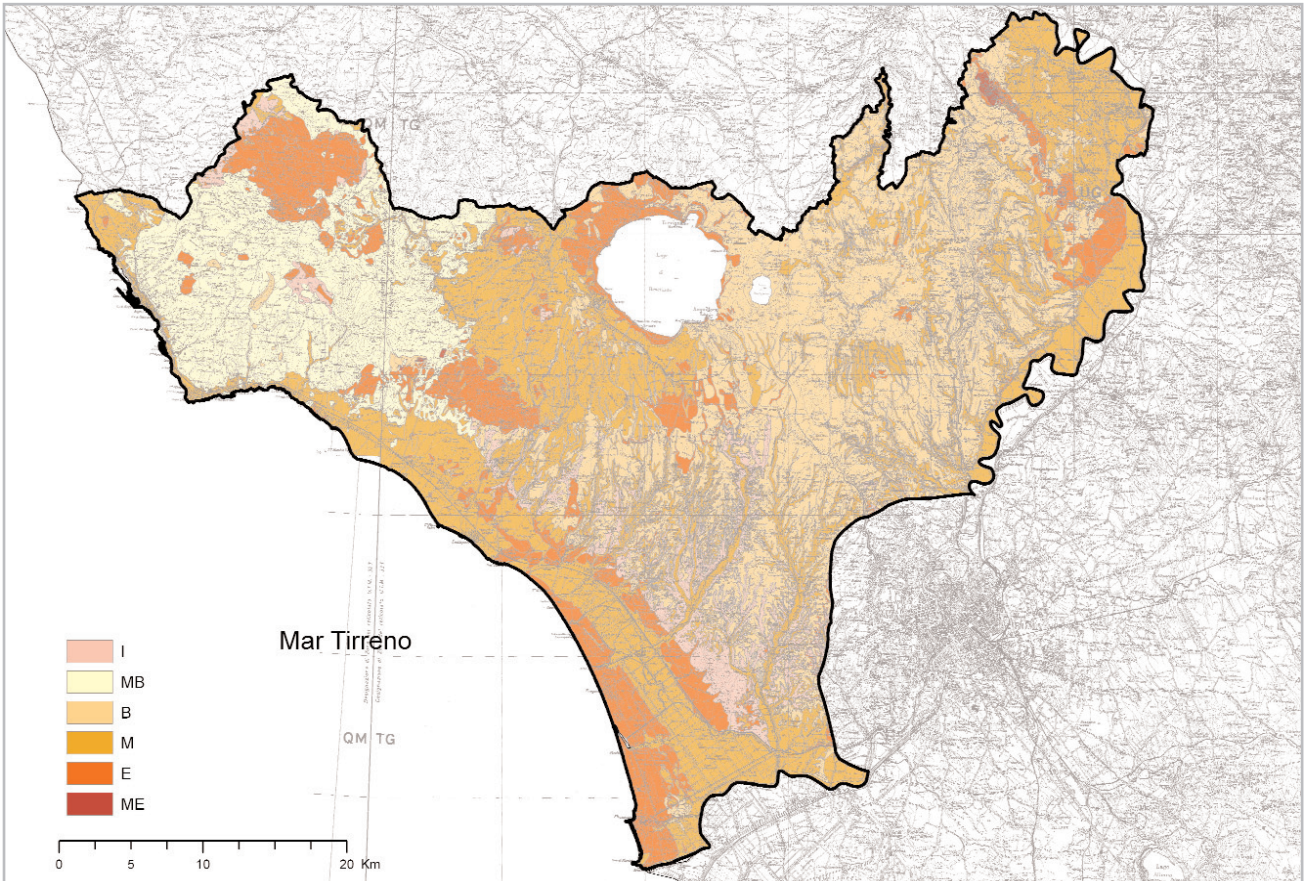


Fig. 27 - Carta della capacità di infiltrazione potenziale (CIP). I = irrilevante; MB = molto bassa; B = bassa; M = media; E = elevata; ME = molto elevata.  
- Map of potential infiltration capability (CIP). I = negligible; MB = very low; B = low; M = medium; E = high; ME = very high.

CPNS		CIP						Peso 0,7
Soggiacenza		Irrilevante	Molto Bassa	Bassa	Media	Elevata	Molto Elevata	
		1	2	3	4	5	6	
> 30	2	1,3	2	2,7	3,4	4,1	4,8	
10-30	4	1,9	2,6	3,3	4	4,7	5,4	
0-10	6	2,5	3,2	3,9	4,6	5,3	6	
Peso 0,3								

TAB. 11 - Matrice per il calcolo della Capacità di Protezione del Non Saturo (CPNS) ricavata dall'integrazione tra Capacità di Infiltrazione Potenziale (CIP) e soggiacenza. Le prime due colonne indicano rispettivamente i tre intervalli di soggiacenza considerati ed il relativo valore attribuito; le prime due righe riportano le classi della Capacità di Infiltrazione e il valore associato. Nella matrice la somma dei due parametri, ciascuno moltiplicato per il suo peso, fornisce i valori della CPNS.

- Matrix used for computing the Protection Capability of the Unsaturated Zone (CPNS), combining Potential Infiltration Capability (CIP) with depth to the water table. The first two columns show the three classes of the depth to the water table and the corresponding value; the first two rows show the classes of the Infiltration Capability and their value. The sum of the two parameters, each one multiplied by its weight, provides the CPNS values.



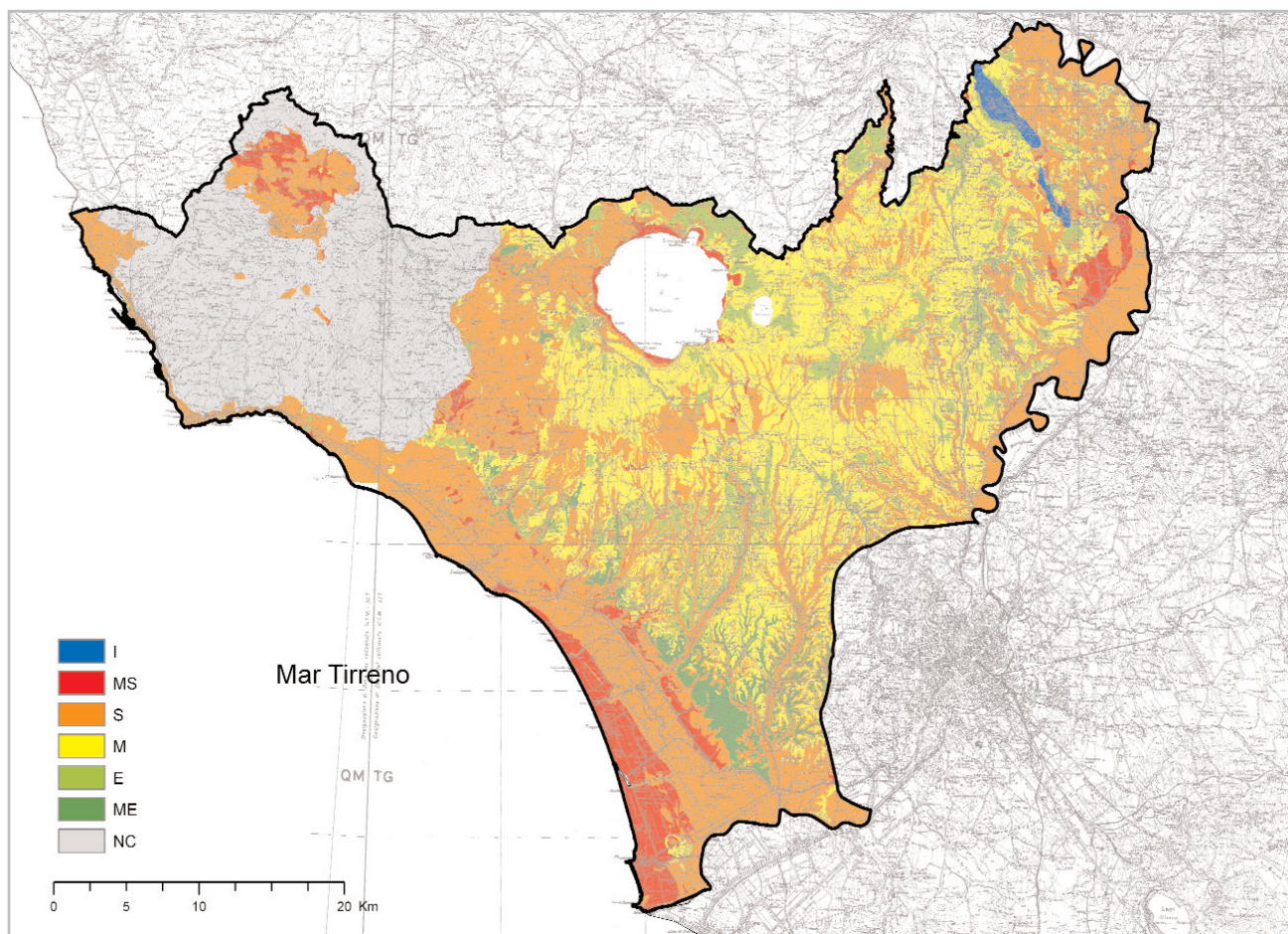


Fig. 28 - Carta della capacità di protezione del non saturo (CPNS). I = irrilevante; MS = molto scarsa; S = scarsa; M = media; E = elevata; ME = molto elevata; NC = non classificata (area di affioramento del complesso dei flysch non considerata perché interessata da circolazione idrica sotterranea discontinua e localizzata). - Map of unsaturated zone protection capability (CPNS). I = negligible; MS = very scarce; S = scarce; M = medium; E = high; ME = very high; NC = not classified (flysch outcropping area not considered because characterized by discontinuous and localised groundwater flow).

Viceversa, nel settore della valle del Tevere dove la CPNS risulta generalmente scarsa, un solo campione mostra una concentrazione di nitrati piuttosto elevata.

Sono stati individuati diversi fattori che potrebbero spiegare la situazione osservata:

a) la pressione antropica non è omogenea sull'area di studio, quindi le concentrazioni di nitrati rilevate non dipendono unicamente dalla CPNS, che ha valenza estensiva, ma sono funzione anche delle condizioni locali di maggiore pressione;

b) il campionamento può essere stato non sufficientemente dettagliato per rappresentare lo stato di contaminazione dell'area in esame in modo adeguato;

c) la valutazione della CPNS non è sufficiente a rappresentare la vulnerabilità della falda.

Allo stato delle conoscenze, si ritiene che tutti e tre i fattori sopra citati siano ugualmente importanti e plausibili nella ricerca di soluzioni alle incertezze rilevate.

#### 6.6. - DISTRIBUZIONE AREALE DEGLI ACQUIFERI

Si è cercato di approfondire gli aspetti metodologici dello studio prendendo in esame ulteriori processi che concorrono alla vulnerabilità quali la capacità di diluizione della zona satura. A tal fine sono stati individuati i limiti della zona satura relativamente ai differenti complessi idrogeologici, pur raggruppati in alcuni macro-tipi, come descritto nel seguito.

Sono state distinte cinque tipologie di corpi idrici sotterranei, che si impostano rispettivamente nelle seguenti litologie: vulcaniti, flysch (che come esposto in precedenza è stata classificata come "area interessata da circolazione idrica sotterranea discontinua e localizzata, di scarso interesse regionale"), depositi sedimentari plio-quaternari, complesso litoraneo-deltizio e calcari meso-cenozoici del M. Soratte (fig. 30).

La posizione dei limiti della zona satura di questi corpi idrici, in generale, non corrisponde a



TAB. 12 - *Classificazione in 6 classi dei valori di CPNS ottenuti da tab. 11.*

- Classification of CPNS values (obtained from tab. 11) in six classes.

Classificazione da Tab. 11	CPNS		Vulnerabilità ↓
1,3-1,9	Molto elevata	ME	
2-2,9	Elevata	E	
3-3,9	Media	M	
4-4,9	Scarsa	S	
5-5,9	Molto scarsa	MS	
6	Irrilevante	Irr	

quella in affioramento dello stesso litotipo. Questo è particolarmente evidente per il limite fra vulcaniti e depositi sedimentari plio-quadernari. Infatti nel settore meridionale dell'apparato Sabatino le vulcaniti presentano spessori estremamente ridotti e l'acquifero principale si imposta nelle formazioni sedimentarie sottostanti. In questo caso una banale associazione fra quanto appare in superficie e quanto realmente avviene in profondità può portare a delle attribuzioni erronee. Pertanto, sulla base delle informazioni stratigrafiche relative ai pozzi riportati in VENTRIGLIA (1988-90) e di quelle reperite durante le campagne di monitoraggio, sono stati individuati i limiti tra i distinti acquiferi a livello della zona saturata ed è stata elaborata una cartografia sintetica, che al di là del valore puramente interpretativo evidenzia importanti differenze nell'assetto idrogeologico. Questa analisi è stata utilizzata nelle successive valutazioni.

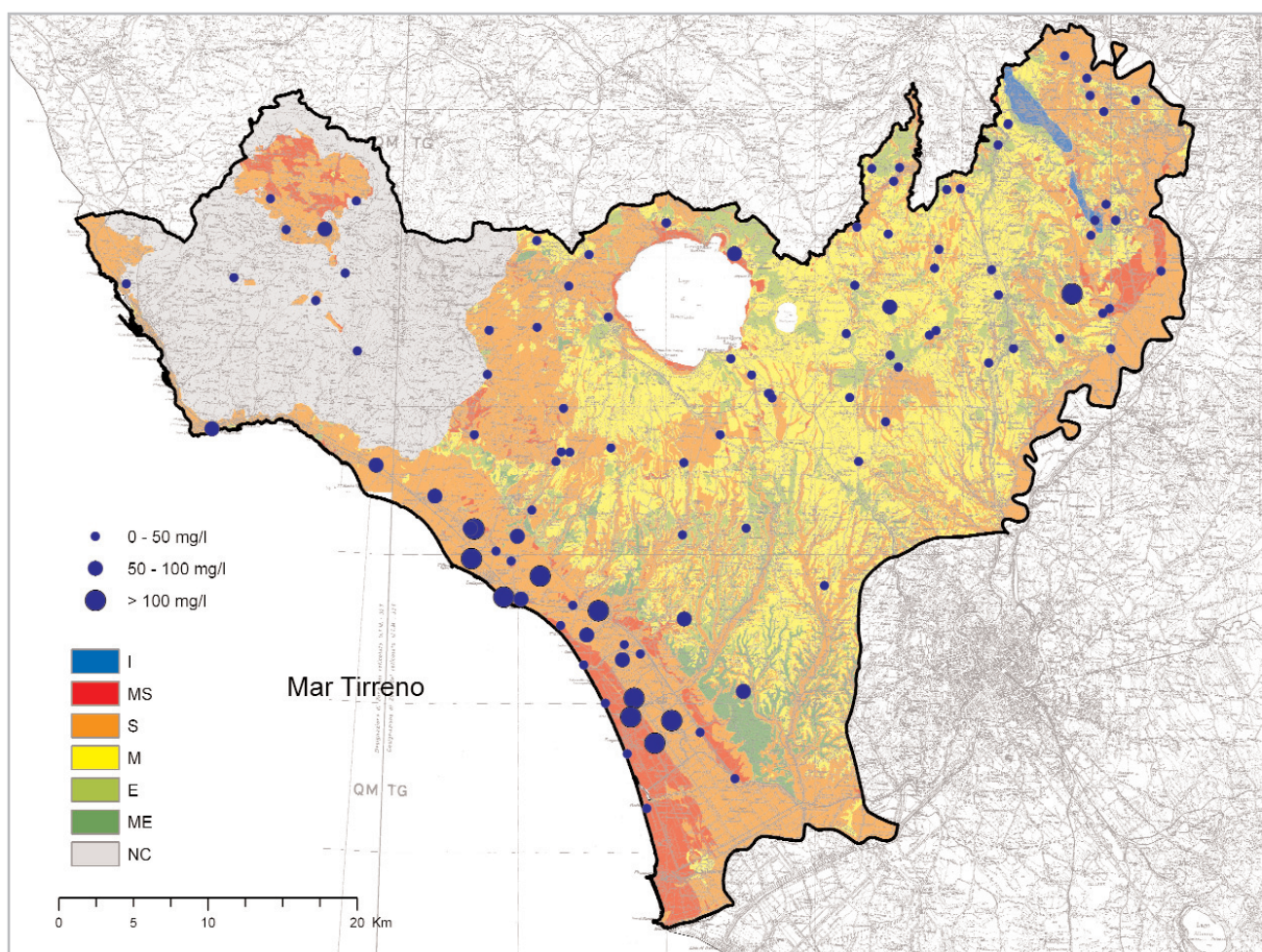


Fig. 29 - Carta della CPNS e concentrazioni di nitrati riscontrate nelle acque sotterranee. In legenda le classi di concentrazione in mg/l. I = irrilevante; MS = molto scarsa; S = scarsa; M = media; E = elevata; ME = molto elevata; NC = non classificata (area di affioramento del complesso dei flysch non considerata perché interessata da circolazione idrica sotterranea discontinua e localizzata). - CPNS map and distribution of nitrate concentrations detected in the sampled ground waters. In the legend concentration classes are expressed in mg/l. I = negligible; MS = very scarce; S = scarce; M = medium; E = high; ME = very high; NC = not classified (flysch outcropping area not considered because characterized by a discontinuous and localised groundwater flow).



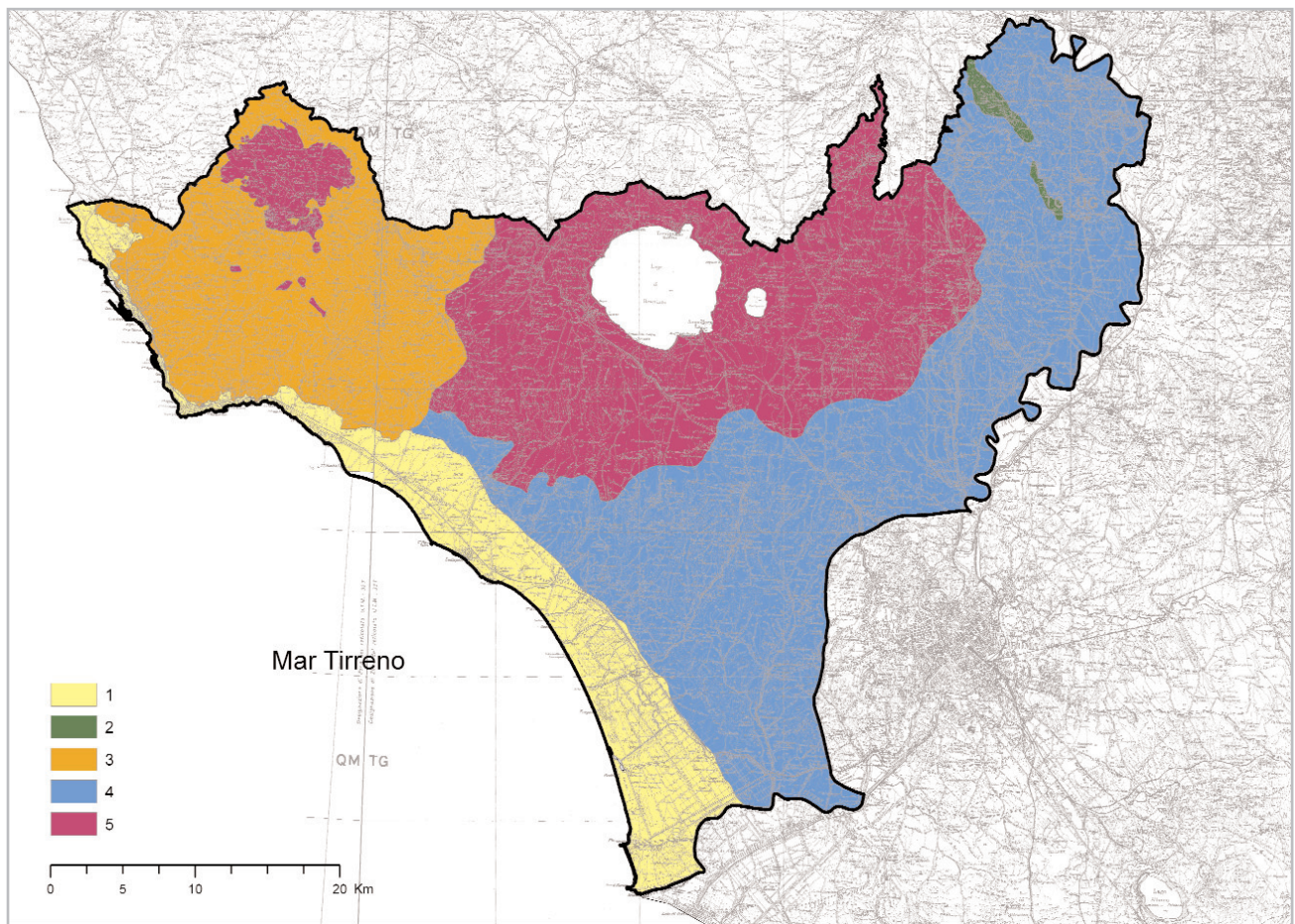


Fig. 30 - Carta della distribuzione spaziale degli acquiferi. 1 = complesso litoraneo-deltizio; 2 = calcari meso-cenozoici del Monte Soratte; 3 = complesso dei flysch; 4 = depositi sedimentari plio-quadernari; 5 = vulcaniti plio-quadernarie. - Map of the aquifers in the study area. 1 = coastal-deltaic complex; 2 = Meso-Cenozoic limestones of Monte Soratte; 3 = flysch complex; 4 = Plio-Quaternary sedimentary deposits; 5 = Plio-Quaternary volcanites.

#### 6.7. - CAPACITÀ DI DILUIZIONE NELLA ZONA SATURA

Come già accennato, a causa della limitatezza di dati sull'assetto idrodinamico delle falde non è stato possibile procedere al completamento della valutazione di vulnerabilità in senso classico, cioè considerando anche i processi di flusso e trasporto nella zona satura. Per tale attività sarebbero necessarie informazioni sulle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero fra cui lo spessore della zona satura, la permeabilità o la trasmissività, la portata, le direzioni di flusso. Queste informazioni, disponibili solo in modo molto limitato nell'area di studio, sono indispensabili in una modellazione della vulnerabilità di tipo strettamente quantitativo, mentre per valutazioni di tipo qualitativo alla scala regionale viene spesso utilizzata una stima basata sulle caratteristiche dell'acquifero (ALLER *et alii*, 1987; CIVITA & DE MAIO, 1997; BEKESI & MCCONCHIE, 2002).

Alcuni Autori fra cui ALLER *et alii*, (1987) e CIVITA & DE MAIO (1997) ai fini della valutazio-

ne della vulnerabilità considerano prevalenti fra i processi che avvengono in falda quelli legati al trasporto, che sono amplificati dalla maggiore conducibilità idraulica del mezzo (il contaminante arriva prima al punto di utilizzazione, i processi di degradazione in falda sono ridotti e la diffusione delle sostanze interessa aree più vaste di acquifero); altri Autori invece attribuiscono notevole importanza ai processi di diluizione dell'eventuale contaminante che raggiunga la falda, considerandoli fattore di mitigazione in relazione alla minore probabilità di superamento di soglie di concentrazione prefissate (BEKESI & MCCONCHIE, 2002).

In relazione all'obiettivo di tutela delle acque sotterranee dell'area, largamente utilizzate a scopo potabile, è stato ritenuto di interesse per questa ricerca tenere conto di quest'ultimo aspetto e di integrarlo nelle precedenti valutazioni di protezione esercitate sulla falda dalla zona non satura.

È stato quindi considerato un parametro, de-



nominato nel seguito “Capacità di diluizione della zona satura” al quale è attribuita una valenza positiva poiché si ritiene che possa contribuire in modo significativo alla mitigazione del rischio di superamento di soglie prefissate di concentrazione. Questo approccio può essere utilizzato nella valutazione del rischio di degrado della risorsa, che prevede la stima della probabilità di superamento del limite normativo per un determinato composto e per un determinato uso (BARCA *et alii*, 2002; CONNELL & VAN DEN DAELE, 2003).

In questa ricerca, stante la limitazione nei dati, la valutazione della capacità di diluizione è stata ottenuta, in via semplificata, dalla classificazione degli acquiferi (tab. 13), sulla base di considerazioni generiche sulla diffusività teorica di ciascuno a partire dalla litologia.

In base all’assunto della valenza positiva della zona satura, la vulnerabilità aumenta col diminuire della capacità di diluizione teorica attribuita a ciascuna tipologia di acquifero.

#### 6.8. - SUSCETTIVITÀ DELLE FALDE AL DEGRADO QUALITATIVO (SDEQ)

A questo punto si è ricercata una valutazione complessiva della possibilità di vulnerazione delle falde attraverso l’integrazione dei parametri sviluppati (CPNS e Capacità di diluizione del saturo) dando luogo ad un nuovo livello informativo denominato “Suscettività delle falde al degrado qualitativo” al fine di non generare confusione con le carte di vulnerabilità ottenute con i metodi classici.

Rispetto alla “Capacità di protezione del non saturo” che si limita a valutazioni relative alla zona vadosa, considerando quindi avvenuto il fenomeno di vulnerazione quando le sostanze potenzialmente inquinanti raggiungono il corpo idrico, la “Suscettività delle falde al degrado qualitativo”, d’ora in avanti denominata SDEQ, considera, anche se in modo semplificato, la capacità di mitigazione dei carichi inquinanti legata ai pro-

cessi di diluizione che avvengono nella zona satura.

L’integrazione dei livelli informativi, realizzata con operazioni di “*Overlay Spaziale*”, è schematizzata nella tabella 14. Analogamente a quanto fatto per la valutazione della CPNS, ai due livelli considerati è stata attribuita una scala di valori da 1 a 6. Poiché la Capacità di diluizione è suddivisa in 5 classi, i valori variano in modo regolare da 1,2 a 6.

I valori ottenuti dalla matrice illustrata in tabella 14, sono stati calcolati secondo la (6.1.), che in questo caso diviene:

$$SDEQ = CPNS \times 0,8 + \text{Capacità di diluizione} \times 0,2 \quad (6.3)$$

Il valore dei pesi, rispettivamente 0,8 per la CPNS e 0,2 per la capacità di diluizione è stato scelto per conferire maggiore importanza alla capacità di protezione del non saturo. La relazione tra i valori ottenuti nella matrice di tabella 14 e la SDEQ è indicata in tabella 15. La denominazione delle classi è stata definita in accordo con la legenda della vulnerabilità relativa al metodo del GNDICI-CNR.

Anche nel caso della SDEQ l’area del Monte Soratte, a causa della presenza di carsismo molto evoluto nella zona vadosa, è stata considerata “estremamente vulnerabile”, a prescindere da altre considerazioni sulla possibilità di diluizione in falda. Per questo motivo, l’intera area del Monte Soratte è stata inclusa nella classe di suscettività “estremamente elevata” (EE).

I risultati cartografici della procedura sono sintetizzati in figura 31 e in tavola 3 f.t. in tasca di copertina in scala 1:100.000.

Si osserva come la suscettività estremamente elevata interessi solo l’area dell’acquifero del Monte Soratte, che comprende non solo la dorsale montuosa ma anche la sua prosecuzione verso SE in corrispondenza di modesti affioramenti talora coperti da spessori ridotti di vulcaniti.

L’introduzione della capacità di diluizione, come fattore di attenuazione rispetto alla probabilità di raggiungere concentrazioni elevate di conta-

TAB. 13 - *Capacità di diluizione degli acquiferi principali.* - Dilution capability of the main aquifers.

Capacità di diluizione		Tipologia di acquifero	↑ vulnerabilità
Molto bassa	MB	FLYSCH	
Bassa	B	COMPLESSO LITORANEO-DEL TIZIO	
Media	M	VULCANICO	
Alta	A	SEDIMENTARIO PLIO-QUATERNARIO	
Molto Alta	MA	CALCARI MESO-CENOZOICI	

TAB. 14 - *Matrice per la valutazione della SDEQ attraverso l'integrazione tra la Capacità di Protezione del Non Saturo (CPNS) e la capacità di diluizione. Le prime due colonne indicano le classi della CPNS ed il relativo valore attribuito; le prime due righe esprimono la classificazione relativa alla diluizione ed il valore associato. Nella matrice la somma dei due parametri, ciascuno moltiplicato per il suo peso, fornisce i valori della SDEQ.*

- Matrix for the evaluation of the SDEQ combining of Protection Capability of the Unsaturated Zone (CPNS) and the dilution capability. The first two columns show the classes of CPNS and corresponding value; the first two rows show dilution classes and the corresponding value. The sum of the two parameters, each multiplied by its weight, provides the SDEQ values.

SDEQ		Capacità di diluizione					
CPNS		Molto Alta	Alta	Media	Bassa	Molto Bassa	Peso 0,2
		1,2	2,4	3,6	4,8	6	
Molto Elevata	1	1,04	1,28	1,52	1,76	2	
Elevata	2	1,84	2,08	2,32	2,56	2,8	
Media	3	2,64	2,88	3,12	3,36	3,6	
Scarsa	4	3,44	3,68	3,92	4,16	4,4	
Molto Scarsa	5	4,24	4,48	4,72	4,96	5,2	
Irrilevante	6	5,04	5,28	5,52	5,76	6	
Peso 0,8							

minanti di origine antropica, modifica parzialmente la situazione che si era delineata con la sola CPNS: l'area litoranea e del delta del Tevere risultano caratterizzate in modo omogeneo da SDEQ alta, scompare quindi la suddivisione in due fasce con caratteristiche leggermente differenti; la zona litoranea in questa valutazione risulta l'unica, ad eccezione dell'area del Monte Soratte e poche altre aree di modesta estensione, caratterizzata da suscettività superiore alla media. La differenza più evidente si identifica in corrispondenza dell'apparato vulcanico che risulta suddiviso in due parti: quella di monte (nord), in cui la suscettività varia da bassa ad alta, e quella di valle (sud) in cui la suscettività è stata valutata da bassa a media. Questo è dovuto alla differente capacità di diluizione attribuita alle vulcaniti, in cui si imposta la falda nella zona settentrionale, rispetto a quella attribuita ai depositi sedimentari plio-quadernari, in cui si imposta la falda nella zona meridionale. La più alta capacità di diluizione attribuita a questi ultimi produce una sensibile diminuzione della suscettività stimata nella parte meridionale.

Il confronto della distribuzione della concentrazione dei nitrati con la SDEQ risulta migliore rispetto a quella con la CPNS mostrata in fig. 29, poiché i valori più elevati di NO<sub>3</sub> si riscontrano nell'area litoranea, caratterizzata da suscettività generalmente più alta del rimanente territorio.

## 7. - CRITERI E METODI DI SELEZIONE DELLA RETE DI MONITORAGGIO INTEGRATA CON LA VULNERABILITÀ

### 7.1. - PREMESSA

Questa parte della ricerca ha come obiettivo la definizione di criteri e metodi per la progettazione di una rete di monitoraggio che sia integrata con la vulnerabilità delle falde.

Sulla base degli elementi conoscitivi raccolti nel corso del censimento preliminare di punti d'acqua nell'area di studio e quelli derivanti dagli studi idrogeologici è stata individuata anzitutto una rete, detta "rete esecutiva", sulla quale è stato possibile eseguire (nell'ambito degli impegni convenzionati) un secondo campionamento delle acque sotterranee.

Questa rete è stata definita attraverso un'analisi effettuata con criteri prevalentemente idrogeologici ed operativi, cioè tiene conto sia delle caratteristiche localizzative e logistiche di ciascun punto sia dello stato reale e potenziale di contaminazione antropica e naturale, quale indicatore proxy di vulnerabilità della falda. La selezione è stata effettuata mediante un processo empirico (descritto al paragrafo 7.2.) cercando di coprire il territorio in modo che le situazioni idrogeologiche individuate fossero rappresentate, aumentando la densità della rete laddove erano evidenziate

TAB. 15 - *Classificazione in 6 classi dei valori di SDEQ ottenuti da tabella 14.* - Classification of SDEQ values (obtained from table 14) in 6 classes.

Valore da Tab. 14	Suscettività delle falde al degrado qualitativo (SDEQ)	
6	Estremamente Elevata	EE
5 – 5,99	Elevata	E
4 – 4,99	Alta	A
3 – 3,99	Media	M
2 – 2,99	Bassa	B
1 – 1,99	Bassissima	BB