

La curva isofreatica di quota 0 m s.l.m. sottende anche nel settore romagnolo della pianura porzioni di territorio piuttosto ampie ed estese. Intorno a Ravenna il suo andamento risulta connesso con gli importanti emungimenti per uso civile ed industriale.

Per concludere l'analisi delle caratteristiche generali del deflusso della falda superficiale e delle aree di alimentazione e di drenaggio, sono necessarie alcune osservazioni relative al settore assiale della Pianura Padana, esteso tra Cremona e la linea di costa adriatica e comprendente anche l'area del delta nel suo complesso.

L'elemento idrogeologico di maggiore rilevanza è rappresentato dall'asse di drenaggio impostato sull'attuale corso del fiume Po.

Pur rimanendo valido a livello di rappresentazione cartografica complessiva e di «area vasta» l'assetto drenante del fiume, in particolari situazioni locali – in sinistra e destra idrografica nel tratto compreso tra la confluenza dell'Enza e dell'Oglio e in destra idrografica dalla confluenza dell'Oglio fino a pochi km ad E di Ferrara – il fiume Po svolge una funzione di alimentazione delle acque sotterranee.

Nella figura 5 è riportato l'andamento schematico e semplificato delle isopiezometriche relative alla media e bassa pianura desunte dai lavori specifici di vari enti (REGIONE DEL VENETO, 1985; IDROSER, 1988; REGIONE FRIULI VENEZIA GIULIA, 1987).

Si può notare l'accentuata regolarità che caratterizza l'andamento delle curve isopiezometriche della media e bassa pianura veneta, che può essere posta in relazione con i seguenti elementi:

- per la ricostruzione della piezometria sono stati utilizzati pozzi che interessano acquiferi differenti, reperibili nell'intervallo di profondità 100-320 m dal piano campagna. Le misure prese in considerazione si riferiscono quindi a «valori medi» delle pressioni di strato;

- la rete di controllo di livello di falda è costituita da circa 70 pozzi nel tratto compreso tra il fiume Po e Tagliamento e tra il limite settentrionale della fascia delle risorgive e la linea di costa adriatica;

- la maggior parte degli acquedotti comunali e consortili traggono alimentazione dall'acquifero indifferenziato della zona pedemontana e dalle falde in pressione nell'area compresa tra il limite settentrionale e meridionale della fascia delle risorgive. In questo settore le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche generali consentono forti produzioni unitarie nei pozzi degli acquedotti e riduzioni di carico relativamente modeste negli acquiferi in pressione, con interferenze contenute, che decrescono piuttosto rapidamente.

Nella media e bassa pianura emiliano-romagnola la configurazione piezometrica risulta, in generale piuttosto articolata e complessa.

Sulla base degli elaborati piezometrici disponibili si può in generale identificare in questo settore della pianura una direzione di deflusso diretta, nelle aree più occidentali, verso la media e bassa pianura, da SO a NE; procedendo verso E il deflusso sotterraneo profondo si dispone gradualmente in direzione O-E, fino a convergere in modo piuttosto marcato ed accentuato verso l'area di Ravenna.

L'assetto generale precedentemente descritto dipende dalle caratteristiche geologiche ed idrogeologiche del sottosuolo (litologia, permeabilità, alimentazione, etc.) ma è certamente influenzato dai prelievi di acque sotterranee per i vari usi compresi quelli acquedottistici, che hanno creato depressioni notevoli ed interferenze frequenti a causa della contiguità dei pozzi (VENTURINI *et alii*, 1990a).

7. – CARTA DELLA VULNERABILITÀ REGIONALE (TAV. III f.t.)

7.1. – GENERALITÀ

Come noto con il termine vulnerabilità naturale o intrinseca si intende l'insieme «delle caratteristiche dei complessi idrogeologici che costituiscono la suscettività specifica di essi ad ingerire e diffondere un inquinante fluido o idroveicolato» (CIVITA 1990a, b). Queste caratteristiche sono legate ai diversi processi in grado di modificare, accelerandolo o mitigandolo, l'effetto del decorso di un fenomeno di contaminazione di una certa intensità. Tale definizione si riferisce quindi esclusivamente al sistema naturale e comprende diversi parametri, ciascuno con diverso peso (CNR, 1990a, b).

Le valutazioni di vulnerabilità degli acquiferi non prendono in considerazione le caratteristiche chemio-dinamiche dell'inquinante, assimilandone il comportamento a quello dell'acqua. Comunemente si considera che questo criterio deponga a favore della sicurezza.

L'applicazione del termine vulnerabilità degli acquiferi al sistema naturale esclude inoltre dal novero dei meccanismi, in prima istanza, qualunque interferenza di origine antropica e non viene quindi considerata la possibilità che un acquifero venga vulnerato mediante immissione diretta in falda di inquinanti, come nel caso dei pozzi perdenti.

La vulnerabilità rappresenta anche uno dei parametri che permettono di valutare il «rischio» di in-

quinamento utilizzando la equazione proposta dall'UNDRO (Ufficio delle Nazioni Unite per il coordinamento delle catastrofi) per i rischi naturali:

$$\text{RISCHIO} = \text{PERICOLOSITÀ} \times \text{VULNERABILITÀ} \times \text{VALORE}$$

Applicando tale equazione in idrogeologia (CAVALLIN *et alii*, 1987) la pericolosità si riferisce alla probabilità che si verifichi un evento di contaminazione di una certa intensità con un certo periodo di ritorno; la vulnerabilità è l'attitudine del corpo acquifero a sopportare l'evento; il valore, espresso in termini socio economici, si riferisce alla qualità del corpo idrico che deve subire l'evento.

La ricerca realizzata nella pianura padana, veneta e friulana ha finalità prevalentemente metodologiche, ma nel contempo vuole contribuire alla definizione di un quadro conoscitivo, a grande denominatore di scala, delle condizioni di vulnerabilità naturale e di rischiosità ambientale del sistema acquifero esaminato che, anche per caratteristiche di elevata trasferibilità, possa essere di ausilio nelle analisi delle azioni di pianificazione rivolte alla tutela delle risorse idriche sotterranee.

Si osserva che la vulnerabilità qui esaminata è tendenzialmente riferita ad una situazione di inquinamento generalizzato dell'acquifero, e quindi non immediatamente utilizzabile per le situazioni di inquinamento puntuale che di norma interessano aree ristrette, e risultano strettamente dipendenti dalle specifiche condizioni locali più che dalle caratteristiche del sistema idrogeologico.

La sperimentazione effettuata ha consentito di esaminare i risultati ottenibili mediante differenti metodologie, confrontandone gli aspetti e le specificità applicative. Peraltro, le cartografie realizzate si riferiscono a mappature che devono essere considerate come esemplificative e ciascuna di esse deve essere letta anche tenendo conto delle osservazioni relative agli altri prodotti cartografici ottenuti con differenti metodologie.

Inoltre è opportuno sottolineare che alla mappatura non può essere attribuito un significato operativo, essendo condizionata dalla base dei dati utilizzata e dalla scala di rappresentazione, entrambe inadeguate ad un uso tecnico ed a carattere locale. Nel contempo si evidenzia la possibilità di ottenere una visione complessiva a scala di bacino con metodologie e dati confrontabili sull'intero areale considerato.

7.2. – ASPETTI METODOLOGICI DELLA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ

Le metodologie che si possono utilizzare per valutare la vulnerabilità della risorsa idrica sotterranea

e/o la distribuzione del rischio di degrado qualitativo sono essenzialmente di tre tipi (CIVITA, 1990a):

- analisi matematiche, numeriche od analitiche di un fenomeno, riconducibili a modelli di processi fisici; si tratta di metodi deterministici, che hanno il pregio della grande precisione, ma richiedono una grande quantità di dati e di misure e vengono abitualmente utilizzati per la progettazione di sistemi di approvvigionamento idrico dalle falde acquifere e di interventi di recupero delle stesse o per la determinazione delle aree di protezione delle opere di presa;

- sistemi di giudizi e di valori relativi basati su una conoscenza generale dei processi in esame e dei relativi parametri influenti e che sostituiscono la descrizione della fenomenologia fisica, molto complessa. Tali sistemi richiedono una conoscenza dettagliata delle condizioni del sottosuolo e sono applicabili soprattutto a situazioni idrogeologiche semplici o semplificabili. Sono stati sviluppati originariamente per valutazioni puntuali e successivamente sono stati estesi a valutazioni di tipo areale;

- metodi di zonazione del territorio per aree omogenee in funzione dei complessi e della situazione idrogeologica (CSI). Sono sistemi di tipo universale applicabili in differenti condizioni idrogeologiche, anche con un limitato numero di dati. Mediante l'incrocio di pochi fattori viene rappresentata la vulnerabilità in termini qualitativi, per intervalli preordinati e situazioni tipo. Sono utilizzati per lo sviluppo di cartografie tematiche a piccola e media scala.

È soprattutto sul secondo tipo di metodologie che si accentra la discussione. Tali procedure risultano tanto più precise quanto maggiore è il numero di variabili prese in considerazione, ma è facile comprendere come risulti poi problematico gestire, sovrapporre e pesare un numero di matrici pari al numero di variabili. Esistono diverse proposte di questo tipo (CANTER *et alii*, 1987; LEGRAND, 1983), che si applicano a situazioni differenti, prevalentemente alla valutazione del rischio derivante da discariche, basate sul criterio della indicizzazione (SRM, Site Rating Methodology, KUFS *et alii*, 1980) o della classificazione (HRS, Hazard Ranking System, CALDWELL *et alii*, 1981) delle situazioni indagate; tali criteri sono sempre di valutazione relativa.

Il vantaggio di questi metodi, che concettualmente utilizzano un approccio analitico multicriteriale, è dato dalla possibilità di valutare in modo comparato situazioni differenti strutturalmente e geograficamente.

Si osserva che la vulnerabilità delle falde acquifere può essere schematicamente ricondotta a diversi fattori influenti: caratteristiche dell'orizzonte superficiale, caratteri tessiturali delle unità costituenti il sottosuolo, geometria nonché idrodinamica della falda. Infatti questi concorrono a determinare i tempi di arrivo in falda di un inquinante proveniente dalla superficie e le sue possibilità di diffusione e dispersione una volta in falda, anche in funzione della attenuazione che subisce il carico inquinante.

Tra i metodi parametrici disponibili per la valutazione della vulnerabilità, viene data particolare attenzione a quello conosciuto come DRASTIC, estesamente utilizzato negli Stati Uniti (ALLER *et alii*, 1985). Secondo tale metodologia si giunge ad una quantificazione della vulnerabilità del sistema naturale mediante un complesso insieme di giudizi e di valutazioni applicate a sette parametri che più direttamente risultano influenti nella zonazione del territorio rispetto alla caratteristica in esame:

- 1) Profondità della falda dalla superficie topografica o soggiacenza (D);
- 2) Ricarica del sistema naturale (R);
- 3) Litologia del saturo (A);
- 4) Caratteri primari del suolo (S);
- 5) Topografia (T);
- 6) Litologia del non saturo (I);
- 7) Conducibilità idraulica dell'acquifero (C);

Per ciascuno dei parametri considerati una funzione permette di attribuire un valore ai dati relativi. Ai vari parametri viene assegnato un peso (w), in funzione del diverso ruolo nella determinazione della vulnerabilità. Dal prodotto peso per valore si ottiene un indice di vulnerabilità elementare per ciascuno dei parametri la cui sommatoria fornisce poi un indice di vulnerabilità finale (V). Tale indice è il risultato della seguente formula:

$$V = W_D D + W_R R + W_A A + W_S S + W_T T + W_I I + W_C C$$

L'indice nella formulazione originaria del metodo varia tra un minimo valore di 23 ed un massimo valore di 230.

La metodologia consente di esaminare specifiche tipologie di condizioni idrogeologiche ai fini della loro vulnerabilità intrinseca.

La possibilità di poter effettuare valutazioni comparate, o relative, su un gran numero di situazioni, anche molto differenti, comporta invece un negativo effetto di perdita di sensibilità. Diventa infatti pro-

blematico introdurre ulteriori differenziazioni o zonizzazioni all'interno delle singole situazioni idrogeologiche in cui si opera.

Una seconda limitazione consiste nell'indeterminazione che alcuni tipi di funzione di correlazione dato-valore generano. Esistono infatti due tipi di relazioni: nel primo caso la conversione è univoca; nel secondo caso dal procedimento di conversione non si ottiene un singolo valore, bensì un «range», all'interno del quale, in funzione delle caratteristiche locali, deve essere individuato il valore più significativo.

Nella applicazione di tale metodologia ad un territorio vasto ed articolato come quello della pianura padana e veneto friulana, anche mediante l'uso di tecniche informatiche, si è reso necessario apportare alcune semplificazioni ed aggiustamenti sia per adattarla alla realtà in esame, sia per la tipologia e disponibilità dei dati, sia per le modalità di elaborazione dei singoli indici elementari.

Per questi ultimi, in particolare, sono state introdotte, rispetto agli abachi originali del metodo, delle funzioni linearizzate (CAVALLIN *et alii*, 1995) che consentono di elaborare automaticamente i dati mediante l'uso dei SIT in ambiente raster. In particolare nel caso dei caratteri primari del suolo, della litologia del saturo e della litologia del non saturo, tale sostituzione corrisponde ad una attribuzione, in prima approssimazione, del valore medio del campo di variabilità.

I dati relativi ai parametri in alcuni casi sono stati ottenuti direttamente da cartografie specifiche, in altri casi sono il risultato di elaborazioni di più elementi.

Per poter avere una congruenza, i dati sono stati raccolti ed omogeneizzati ad una scala sinottica prossima a quella utilizzata per la rappresentazione finale. È evidente che ciò da una parte comporta una limitazione per il dettaglio delle informazioni, mentre dall'altra rende possibili elaborazioni e valutazioni su un'area così ampia.

Di seguito vengono illustrate, per i singoli parametri considerati nell'indice di vulnerabilità, le modalità di acquisizione e di utilizzazione dei dati e delle informazioni.

– Topografia

A parità di altre condizioni, ad una maggiore acclività corrisponde un maggior deflusso superficiale, ragion per cui diminuiscono le potenzialità di infiltrazione. Per la sua valutazione sono state utilizzate le informazioni raccolte dal Gruppo di lavoro per la

Carta Geomorfologica della Pianura Padana, con elaborazioni dalle carte tecniche regionali 1:10.000 e per il Piemonte dalle carte IGM in scala 1:25.000 (BONDESAN *et alii*, 1992).

L'acclività è stata ottenuta mediante elaborazioni effettuate sul modello digitale del terreno (DTM-Digital Terrain Model).

– *Ricarica del sistema naturale*

La ricarica, intesa come alimentazione verticale della falda, può aumentare in due modi la vulnerabilità: indirettamente, in quanto ad una maggior ricarica corrisponde un maggior grado di saturazione; direttamente, in quanto l'infiltrazione dall'alto agisce come un agente di trasporto dell'inquinante.

Nell'area studiata per la valutazione della ricarica sono state utilizzate le isoiete medie annue riferite al periodo 1921-1950 (MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI, 1959). Si è tenuto conto solamente delle precipitazioni efficaci e non si sono quindi prese in considerazione altre forme di alimentazione, quali le irrigazioni, che in alcune aree svolgono spesso un ruolo di rilievo.

– *Caratteri primari del suolo*

Nella zona in esame tale parametro è espresso attraverso le caratteristiche tessiturali dei depositi superficiali, comprendendo in esse anche gli aspetti di pedogenizzazione. Come ben noto, tali elementi influiscono da una parte sulle condizioni di infiltrabilità, dall'altra sulla capacità autodepurante del suolo.

Sono stati utilizzati i dati aggregati forniti dal Gruppo di lavoro per la Carta Geomorfologica della Pianura Padana relativi ai caratteri litologico-tessiturali dei sedimenti superficiali, riferiti ad un metro di profondità (BONDESAN *et alii*, 1992). La carta utilizzata per questo lavoro è stata semplificata, rispetto ai dati originali, eliminando anche le aree molto piccole rispetto alle geometrie degli altri elementi oggetto di elaborazione.

Questa carta è costituita da una serie di poligoni ognuno dei quali rappresenta una classe tessutturale.

– *Profondità della falda dalla superficie topografica, o soggiacenza*

Essa corrisponde alla distanza minima che un inquinante deve percorrere per arrivare alla zona satura provenendo dalla superficie topografica. Nel caso in esame la soggiacenza è stata ottenuta mediante

sottrazione della quota della falda libera da quella della superficie topografica; a tal fine sono state utilizzate la carta delle isoipse e quella delle isofreatiche.

Il modello digitale della soggiacenza è stato ottenuto dalla sottrazione algebrica del DEM (Digital Elevation Model) della superficie freatica dal DTM. Nella carta così ottenuta il valore di ogni pixel rappresenta lo spessore del non saturo attribuito allo specifico elemento geometrico.

– *Litologia del saturo*

Le caratteristiche strutturali e tessiturali degli acquiferi risultano determinanti per ciò che concerne la propagazione degli inquinanti, una volta che questi abbiano raggiunto la zona satura. In termini macroscopici i caratteri che si assume possano influenzare negativamente la propagazione sono rappresentati dalla eterogeneità granulometrica e dalla anisotropia dei livelli sedimentari nel caso di serbatoi a permeabilità primaria.

Sono stati utilizzati i dati dedotti dalla letteratura (IRSA 1976; 1978; 1979; 1980) ed in particolare quelli riportati nelle carte in cui sono rappresentate le percentuali di ghiaia, sabbia e limi per intervalli di profondità comprese tra 0 e 30 m, 30 e 60 m, 60 e 90 m. Mediante opportune elaborazioni delle carte sono state ricostruite le tessiture medie delle unità presenti nel sottosuolo in funzione della profondità della falda. Ad esempio nelle aree in cui la superficie freatica è a profondità di 30 m le tessiture del saturo sono state calcolate sulle percentuali delle classi 30-60 e 60-90 metri. Alle tessiture così determinate è stata applicata la funzione corrispondente per calcolarne il valore.

– *Litologia del non saturo*

Vengono considerate in questo caso le caratteristiche tessiturali della porzione di sottosuolo che l'inquinante deve attraversare prima di giungere in falda. Si assume che il grado di protezione di un acquifero sia proporzionale alla presenza di frazione fine, nella zona insatura, dato l'aumento della capacità di attenuazione del carico inquinante e la diminuzione della velocità di percolazione.

Sono stati utilizzati i dati di letteratura (IRSA 1976; 1978; 1979; 1980), con elaborazioni analoghe a quelle utilizzate per valutare la litologia del saturo, però applicate all'intervallo compreso tra la superficie topografica e quella della falda.

– *Conducibilità idraulica dell'acquifero*

La conducibilità idraulica del saturo influenza le modalità di propagazione degli inquinanti in falda in termini di distribuzione spaziale e temporale delle concentrazioni.

Per valutare la conducibilità idraulica sono stati utilizzati i dati tessiturali attribuiti al saturo, secondo le procedure suesposte, applicando successivamente l'algoritmo che associa le tessiture, espresse in percentuali di ghiaie e sabbie, alla conducibilità idraulica. Tale correlazione è congrua essendo i depositi quasi esclusivamente alluvionali s.l.

Ai diversi parametri considerati nell'indice V si possono attribuire pesi diversi in funzione della maggiore o minore importanza che essi possono avere nel determinare la vulnerabilità. Quale elaborazione principale nel presente lavoro sono stati utilizzati i pesi proposti dalla metodologia originale per la valutazione della vulnerabilità in un contesto di contaminazione generica o generale (ALLER *et alii*, 1985); tale elaborazione viene considerata di riferimento e denominata «normale» o standard.

Il metodo e le tecniche informatiche utilizzate hanno inoltre consentito di effettuare numerose elaborazioni sperimentali per verificare come il grado di vulnerabilità finale possa cambiare in funzione dei parametri scelti, delle funzioni dati-valore e dei pesi attribuiti ai vari parametri. In questo modo è possibile ottenere informazioni sulla sensibilità della metodologia, sulla incidenza dei vari parametri, nonché confrontare tra loro i risultati ottenuti con differenti scenari di analisi.

In base a quanto detto, si sono realizzate una serie di carte della vulnerabilità che hanno permesso di analizzare come, a partire dalla stessa base di dati, variano l'entità e la distribuzione dei valori della vulnerabilità nella pianura utilizzando schemi di ponderazione diversi. In particolare sono stati utilizzati sia schemi di ponderazione tradizionali, quali il DRASTIC versione agricola o, semplicemente, agricolo, sia schemi sperimentali, relativi ad un numero ridotto di parametri e/o con pesi variati dei parametri considerati quali: DRASTIC normale a 5 parametri; DRASTIC agricolo a 5 parametri; DRASTIC normale con pesi variati (CAVALLIN *et alii*, 1995).

Il quadro completo delle tecniche di attribuzione dei pesi nei differenti schemi di calcolo è riportato in Tab. 2.

Nei vari casi il valore massimo dell'indice di vulnerabilità (V) può variare da 170 a 420, assumendo in particolare il valore di 230 per lo schema di ponderazione normale.

Nel presente studio al fine di rendere possibile l'esame comparativo dei risultati ottenuti con le differenti elaborazioni l'indice finale di vulnerabilità è stato normalizzato a 100 e quindi la vulnerabilità risulta essere massima a 100 e minima a 0. I valori percentuali sono stati suddivisi in 10 classi equidimensionate per cui la vulnerabilità può variare dalla classe minima (1-10%), alla massima (91-100%) (CAVALLIN *et alii*, 1987). In questo senso viene modificata la forma originaria di espressione dei risultati con punteggio assoluto.

TAB. 2. – *Parametri, funzioni, pesi per il calcolo dell'indice di vulnerabilità V (DRASTIC) nei diversi schemi di valutazione*
– Parameters, functions, weights for computing the vulnerability index V (DRASTIC)
according to the different evaluation schemes

PARAMETRI	FUNZIONI Valore/dato	PESI				
		Normale	Agricolo	Normale a 5 parametri	Agricolo a 5 parametri	Normale con pesi variati
Soggiacenza	$y = -0,3x + 10$	5	5	5	5	5
Ricarica	$y = 0,01x$	4	4	4	4	4
Litologia saturo	$y = 0,05x + 4$	3	3	–	–	3
Caratteri del suolo	(classi)	2	5	2	5	21
Topografia	$y = -0,04x + 10$	1	3	1	3	1
Litologia non saturo	$y = 0,07x + 2$	5	4	5	4	5
Conducibilità idr. saturo	$y = 0,07x + 1$	3	2	–	–	3
	Totale Pesì	23	26	17	21	42

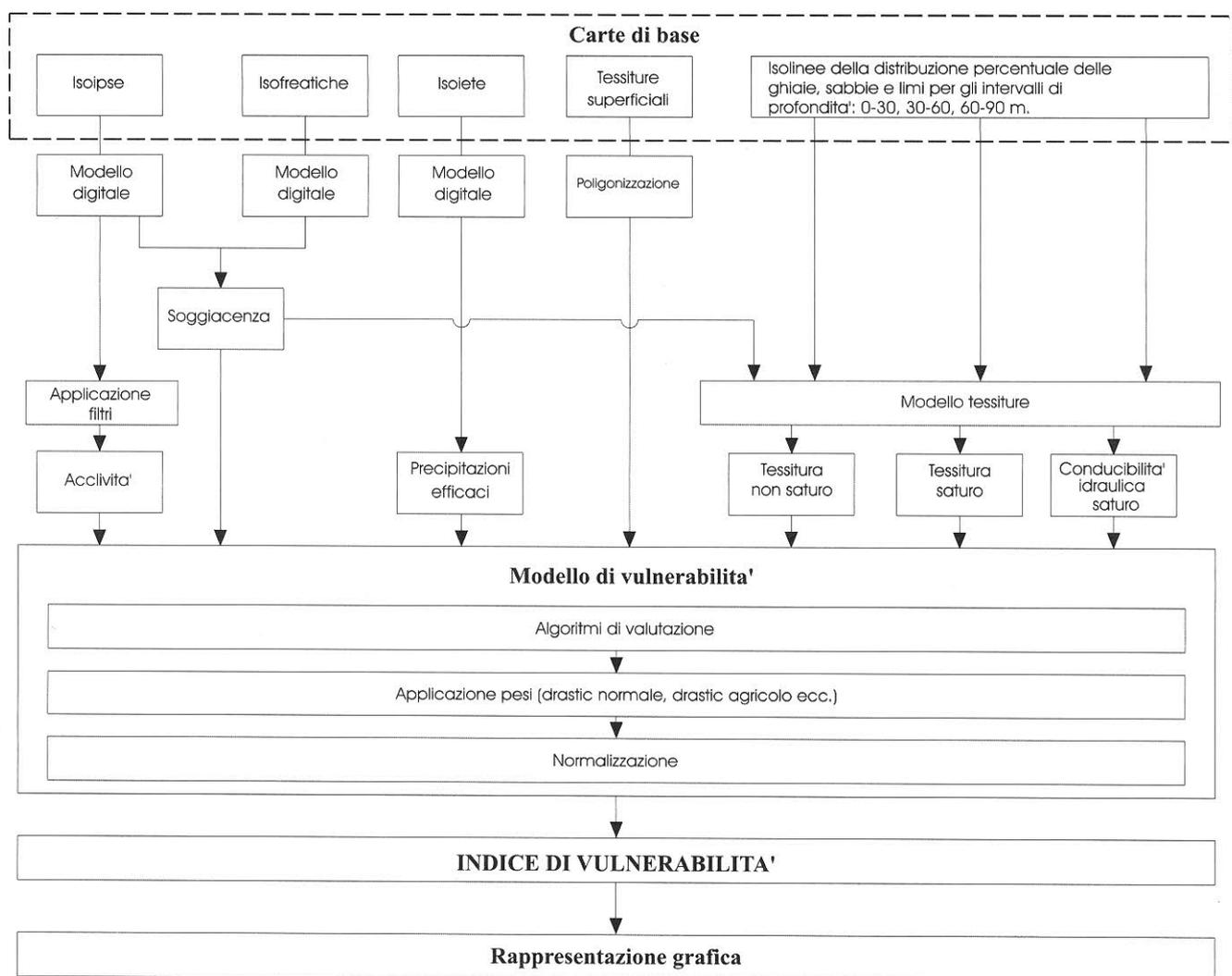


Fig. 6. - Schema di flusso per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi.

- Flow chart of evaluation procedure of aquifer vulnerability.

Il procedimento seguito per la valutazione e la mappatura della vulnerabilità degli acquiferi è complessivamente descritto nello schema logico di figura 6.

Sempre nell'ambito della sperimentazione sulle metodologie per la valutazione della vulnerabilità, si è ritenuto interessante sperimentare anche altri schemi quali SINTACS (CIVITA, 1994b) e CNR-GNDCI. La metodologia proposta dal CNR-GNDCI (Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche) effettua la valutazione della vulnerabilità in base alla zonazione del territorio per aree omogenee in funzione dell'assetto idrogeologico (CSI); essa è stata opportunamente adattata per consentirne la applicazione ad una scala regionale.

Questo metodo (AA.VV., 1988) utilizza un ristretto numero di indici litologici, tessiturali, piezometrici e idrodinamici non rigorosamente quantizzati che identificano situazioni differenti e che, comparati tra

loro, permettono di ottenere una zonazione della vulnerabilità degli acquiferi.

Per il presente studio si sono utilizzati come parametri di base per la realizzazione della Carta della Vulnerabilità la soggiacenza, la tessitura del non saturo, l'infiltrabilità e le tessiture superficiali. I dati utilizzati sono i medesimi che sono serviti per la valutazione della vulnerabilità con il metodo DRASTIC e sue modifiche. A differenza delle applicazioni precedenti, l'elaborazione dei dati è avvenuta mediante un sistema di analisi incrociata dei parametri (GIULIANO *et alii*, 1997).

In primo luogo, l'areale di studio è stato suddiviso in tre aree secondo quanto proposto da CIVITA (1994b) e PINOTTI & VICARI (1995), caratterizzate rispettivamente da condizioni di acquifero non confinato o semiconfinato, acquifero confinato e aree con tratti di alveo a carattere disperdente. Nell'area dove

		PARAMETRI			
		Soggiacenza	Ghiaie e sabbie nel non saturo	Infiltrabilità	Vulnerabilità
A C Q U I F E R O	< 10 m		< 20%	E A M B	E E A M B
			20 ÷ 40 %	E A M B	Ee E E A Ee
			> 60 %	E A M B	E E A A A M B E A A M E E A M M B Bb A M M B A A M B Ee
	> 10 m	10 ÷ 30 m	< 20%	E A M B	E A A A M B E A A M E E A M M B Bb A M M B A A M B Ee
			20 ÷ 40 %	E A M B	
			> 60 %	E A M B	
		> 30 m	< 20%	E A M B	
			20 ÷ 40 %	E A M B	
			> 60 %	E A M B	
Alvei disperdenti		> 60 %	E		
A C Q U I F E R O	C O N F I N A T O	< 20%	E A M B	Bb Bb Bb Bb B B B Bb M M M Bb	
		20 ÷ 40 %	E A M B		
		> 60 %	E A M B		

LEGENDE

Vulnerabilità
Ee = Vulnerabilità estremamente elevata
E = Vulnerabilità elevata
A = Vulnerabilità alta
M = Vulnerabilità media
B = Vulnerabilità bassa
Bb = Vulnerabilità estremamente bassa

Infiltrabilità
E = Infiltrabilità elevata
A = Infiltrabilità alta
M = Infiltrabilità media
B = Infiltrabilità bassa

Fig. 7. – Abaco per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi con il metodo CNR-GNDCI, modificato a scala regionale.

– Classification of aquifer vulnerability according to the CNR-GNDCI method modified for regional scale analysis.

l'acquifero è non confinato o semiconfinito sono stati incrociati tre parametri (soggiacenza, tessitura del non saturo, infiltrabilità); nell'area con acquifero confinato si sono combinate la tessitura del non saturo con l'infiltrabilità mentre nelle zone con alvei disperdenti si è tenuto conto solamente delle tessiture superficiali. La valutazione del grado di vulnerabilità è stata effettuata avvalendosi dell'abaco di figura 7. I risultati sono espressi direttamente in classi a carattere semiquantitativo.

Al fine di confrontare sinteticamente le varie carte della vulnerabilità ottenute con le diverse metodologie, parametriche e non, è stato necessario adottare una classificazione univoca e semplificata per la vulnerabilità e per tale scopo si è scelto di utilizzare quella proposta dal CNR-GNDICI (CIVITA, 1994b) che riconosce 6 gradi di vulnerabilità: Bassissimo o Molto Basso; Basso; Medio; Alto; Elevato; Estremamente Elevato.

Pertanto, i valori percentuali di vulnerabilità ottenuti con i metodi parametrici sono stati riclassificati in sei classi (dalle 10 precedentemente utilizzate) secondo lo schema:

Bb – Grado Bassissimo o Molto Basso (1% ÷ 24%);

B – Grado Basso (25% ÷ 35%);

M – Grado Medio (36% ÷ 49%);

A – Grado Alto (50% ÷ 69%);

E – Grado Elevato (70% ÷ 79%);

Ee – Grado Estremamente Elevato (80% ÷ 100%).

Nelle aree ad elevata concentrazione urbana (centri storici, aree industriali e artigianali, etc.) in cui si è avuta una notevole alterazione delle condizioni naturali dei suoli, la vulnerabilità naturale del sistema acquifero risulta non definibile con le metodologie utilizzate. Tali aree sono state genericamente classificate come *aree urbane*.

In generale si può certamente affermare che per tutte le metodologie utilizzate rimane comunque ben individuata la sinotticità e la sinteticità delle valutazioni ottenute, o comunque ottenibili, mentre rimane anche molto evidente la necessità di ricorrere, per un approfondimento delle situazioni locali, a procedimenti differenti e soprattutto ad indagini specifiche per la raccolta di dati di maggiore dettaglio.

7.3. – RAPPRESENTAZIONI CARTOGRAFICHE DELLA VULNERABILITÀ

La presentazione dei risultati delle elaborazioni viene svolta avendo come riferimento la mappatura ottenuta con lo schema base, cioè il DRASTIC nor-

male, ed esaminando per confronto le altre mappature ottenute con gli schemi parametrici e non. Di tale valutazione «normale» o standard viene riportata nella Tav. III f.t. la rappresentazione cartografica in scala 1:500.000. I valori di vulnerabilità sono espressi in termini percentuali su dieci classi.

Le caratteristiche di distribuzione delle frequenze del valore dell'indice di vulnerabilità, con relativi parametri statistici, nelle varie mappature prodotte con differenti tecniche di ponderazione dello schema DRASTIC sono riportate nella tabella 3. Tutte queste analisi sono relative ad una classificazione dettagliata in 10 classi percentuali dell'indice normalizzato.

Per quanto riguarda la mappatura della vulnerabilità secondo lo schema del DRASTIC normale, si osserva che la distribuzione classata dell'indice complessivo evidenzia, sulla gran parte dell'areale di studio (circa 83%), una situazione di vulnerabilità medio alta (50-80%) delle acque sotterranee. Man mano che si procede dal limite dei rilievi verso l'asse della pianura e verso la costa, l'acquifero principale acquista caratteri di falda differenziata e l'indice viene a limitare il suo significato a quella porzione dell'acquifero in collegamento più o meno diretto con la superficie.

I valori più elevati dell'indice, ma non quelli massimi, che sono limitati a ristrette aree (36 pixel sui 705132 totali), afferiscono ad ampie plaghe (13%) del bacino cuneese, della lomellina, della pianura lombarda (settori milanese e bergamasco) e della pianura friulana.

Sono assenti aree in cui il valore dell'indice normalizzato sia inferiore al 30%.

Considerando i parametri statistici calcolati sull'insieme dei valori dell'indice finale della vulnerabilità si evidenzia una distribuzione di tipo sostanzialmente gaussiano (identità dei valori medio, mediano e modale), con basso grado di variabilità e con ridotta dispersione nella coda positiva. In tal modo viene sottolineata la tendenza ad uniformare nella risposta finale le singolarità delle strutture idrogeologiche. L'impressione generale è che, almeno nel presente caso, la vulnerabilità risulti in qualche modo omogeneizzata dai parametri a peso non elevato e/o relativi al saturo.

Per quanto concerne la distribuzione della vulnerabilità rapportata alle condizioni idrogeologiche, i valori più elevati si rinvergono in corrispondenza di aree con falda a piccola profondità e con tessiture grossolane riferite sia ai depositi superficiali, sia alla zona non satura che a quella satura. Tali condizioni sono tipiche delle aree con risorgive nella pianura veneta-friulana, in quelle con fontanili della pianura milanese e bergamasca, ed in quelle della lomellina

TAB. 3. – *Caratteristiche di distribuzione dei valori dell'indice di vulnerabilità V*
 – Distribution features of values of the vulnerability index V

CLASSE DI VALORI (%)	SCHEMI DI VULNERABILITÀ				
	Normale	Agricolo	Normale a 5 parametri	Agricolo a 5 parametri	Normale con pesi variati
	FREQUENZE (%) DELLA CLASSE				
0- 10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11- 20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21- 30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
31- 40	0,5	0,5	0,1	0,2	2,2
41- 50	3,2	3,5	2,0	2,4	14,8
51- 60	21,6	10,4	13,3	5,6	21,8
61- 70	36,6	30,6	33,4	28,9	11,1
71- 80	24,7	33,1	31,3	32,9	23,7
81- 90	13,4	20,1	18,8	25,8	23,3
91-100	0,0	1,8	1,1	4,2	2,8
	VALORE DEL PARAMETRO				
Media	68	71	71	74	67
Deviazione standard	10,3	10,7	10,0	10,5	15,4
Moda	69	82	79	77	n. u. (*)
Mediana	67	71	70	74	70
Asimmetria	-0,1	-1,0	-0,8	-0,3	-

(*) valore non unico

e del cuneese in cui i depositi grossolani sono molto estesi e la falda ha una modesta profondità.

Rispetto a queste aree i valori di vulnerabilità diminuiscono verso la zona pedemontana, dove la falda si trova a profondità maggiore, e verso la media e bassa pianura poiché le tessiture dei corpi superficiali e del sottosuolo diventano più fini, pur essendo la falda a piccola profondità.

La fascia pedeappenninica è caratterizzata da valori più bassi rispetto a quella pedalpina in quanto la distribuzione dei corpi superficiali e del sottosuolo con tessiture grossolane è modesta, e comunque non interessa le aree ove la falda si trova a piccola profondità. Solo localmente, ed in particolare in corrispondenza delle «conoidi» e delle aste fluviali maggiori, si osservano modeste aree con valori di vulnerabilità più alta.

Nella media e bassa pianura i valori della vulnerabilità sono controllati essenzialmente dalla distribuzione delle tessiture superficiali, le quali sono geneticamente legate all'andamento del sistema idrografico. In queste zone gli altri parametri non presentano una significativa variazione, per cui i valori di vulnerabilità sono compresi nell'ambito di due-tre classi.

L'attribuzione di pesi differenti da quelli previsti dallo schema DRASTIC normale o standard ha prodotto una serie di cartografie di vulnerabilità per la

analisi delle quali si rimanda alla bibliografia specifica (CAVALLIN *et alii*, 1995) riproponendo in questa sede alcune considerazioni generali. Le riproduzioni in scala ridotta di queste cartografie sono riportate nelle figure 8, 9, 10 e 11.

Applicando i parametri e i pesi previsti dalla metodologia originale per le condizioni di «inquinamento da fonti diffuse» tipicamente agricole (fig. 8) viene esaltato il ruolo dei parametri connessi alla funzione di ricarica delle falde dalla superficie.

La distribuzione della vulnerabilità agricola non cambia, come andamento, rispetto a quella calcolata secondo lo schema normale, con una maggiore articolazione della morfologia della superficie di risposta connessa alla evidenziazione delle caratteristiche genetiche dei depositi e, in particolare, con una dilatazione delle aree con vulnerabilità più elevata. Sono inoltre presenti aree con il massimo indice di vulnerabilità anche nella zona delle risorgive della pianura friulana, e lungo alcune aste fluviali. L'aumento dei valori di vulnerabilità si riscontra nelle zone pedemontane essenzialmente lungo le aste fluviali, mentre nella media e bassa pianura è diffuso sia arealmente che lungo le aste fluviali.

Nella fascia pedeappenninica l'aumento dell'indice di vulnerabilità interessa in particolare le «conoidi» con le relative aste fluviali, e gran parte della pianura

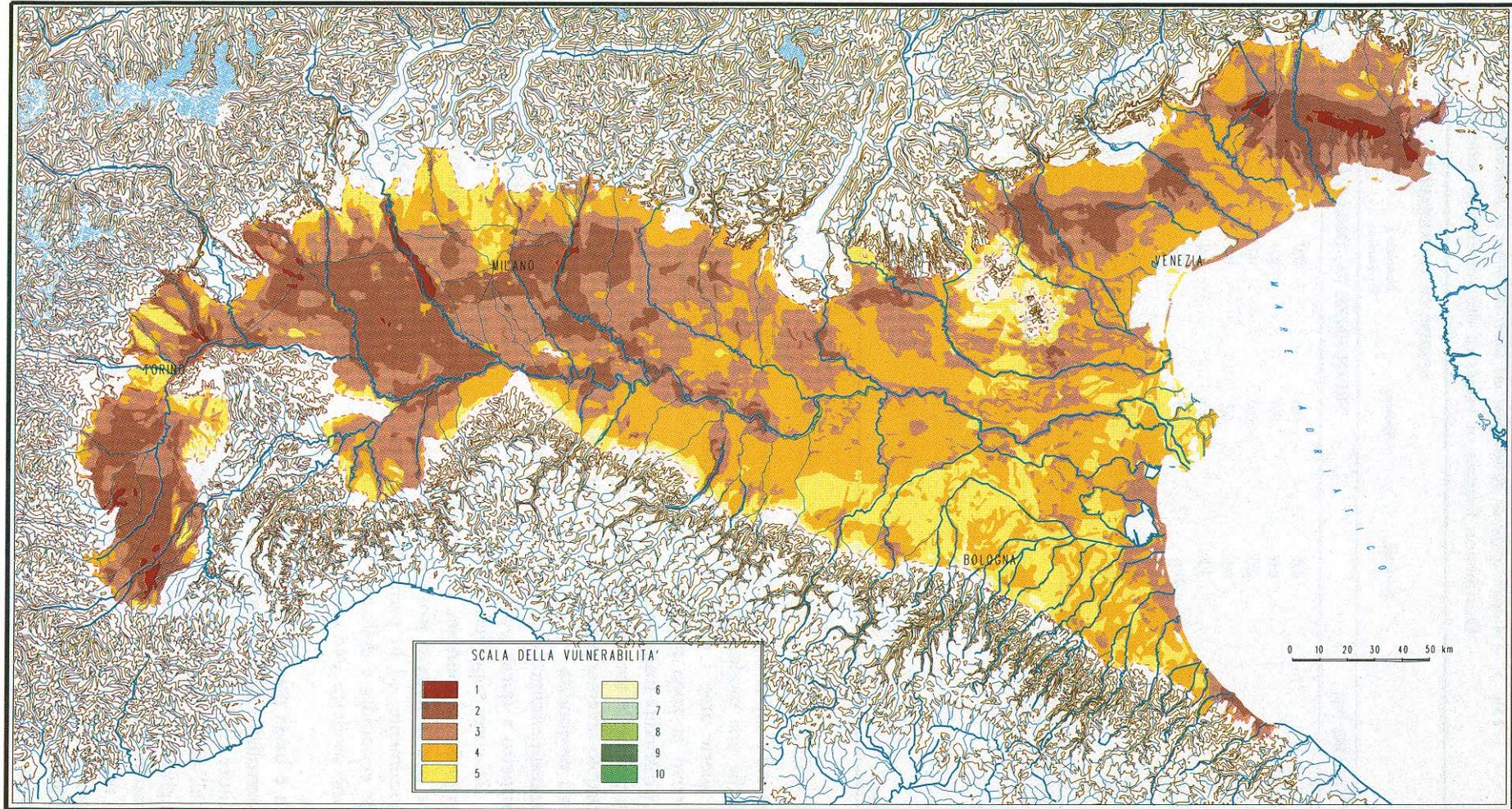


Fig. 8. – Carta della vulnerabilità degli acquiferi secondo il metodo Drastic agricolo (10 classi). Legenda delle classi di vulnerabilità: 1 - massima (91-100%); 2 - estremamente alta (81-90%); 3 - molto alta (71-80%); 4 - alta (61-70%); 5 - mediamente alta (51-60%); 6 - mediamente bassa (41-50%); 7 - bassa (31-40%); 8 - molto bassa (21-30%); 9 - estremamente bassa (11-20%); 10 - minima (0-10%).

– Aquifer vulnerability map according to the agricultural DRASTIC method (10 classes ranking scale). Legend of vulnerability classes: 1 - highest (91-100%); 2 - extremely high (81-90%); 3 - very high (71-80%); 4 - high (61-70%); 5 - average high (51-60%); 6 - average low (41-50%); 7 - low (31-40%); 8 - very low (21-30%); 9 - extremely low (11-20%); 10 - lowest (0-10%).

emiliana-romagnola, in cui l'indice passa da valori «medio alti» ad «alti».

Eliminando dallo schema di calcolo i due parametri relativi alla zona satura (mantenendo per gli altri i pesi previsti rispettivamente nella situazione di contaminazione normale ed in quella riferita all'inquinamento agricolo) si possono poi ottenere informazioni sul ruolo effettivamente svolto nella valutazione dell'indice V dalle caratteristiche idrauliche dell'acquifero.

L'eliminazione dei parametri relativi alla zona satura, che possono essere ritenuti rappresentativi delle caratteristiche di diluizione degli inquinanti una volta raggiunta la falda, conferisce alla stima della vulnerabilità maggiore flessibilità e forse anche una maggiore significatività delle reali condizioni di esposizione delle acque sotterranee soggiacenti.

Rispetto alla distribuzione della vulnerabilità nei casi precedentemente descritti, si osserva (figg. 9 e 10) un'ulteriore dilatazione delle aree con maggiori valori dell'indice di vulnerabilità, particolarmente evidenziata dal vistoso aumento delle aree che presentano il massimo valore di vulnerabilità.

Variando infine nello schema di ponderazione normale il peso del parametro tessiture superficiali e attribuendogli un valore pari alla somma dei pesi relativi agli altri 6 parametri, si osserva (fig. 11) che l'esaltazione assoluta del ruolo delle tessiture superficiali provoca un sostanziale incremento nella variabilità dell'indice di vulnerabilità. La distribuzione delle frequenze diviene bimodale e si ha un incremento della presenza delle classi estreme.

Riguardo alla valutazione degli effetti si possono distinguere due ambiti: nella parte centrale ed orientale della pianura e nel bacino cuneese l'assetto generale della vulnerabilità viene sostanzialmente confermato ribadendo l'importanza del parametro stesso nella valutazione finale. Nella porzione centro occidentale della pianura invece la esaltazione del peso del parametro provoca una modifica della distribuzione dei valori, anche con rapporti contrastanti tra le aree più a nord e quelle più meridionali, a sostegno della ipotesi di un concorso di più fattori nella determinazione della vulnerabilità, ove il parametro in oggetto non è certamente il più importante.

I massimi valori sono sempre in corrispondenza delle zone delle risorgive nella pianura friulana e veneta e lungo le principali aste fluviali nella zona pedemontana. I valori più elevati si estendono più a sud rispetto alle zone con i massimi valori, nella

pianura cuneese, nella lomellina, nella pianura ale-sandrina e lungo l'asse del Po fino alla media-bassa pianura.

Nella zona pedeappenninica sono molto evidenziate le «conoidi», mentre si osserva una inversione di valori nella pianura emiliana e romagnola rispetto alla Carta della Vulnerabilità normale di riferimento. Infatti in quella emiliana i valori appaiono più bassi rispetto a quella romagnola.

In termini sintetici si può affermare che:

- la struttura della mappatura classata dell'indice di vulnerabilità in generale è mantenuta in tutte le ipotesi di distribuzione dei pesi esaminate;

- il maggiore valore dell'indice di vulnerabilità si riscontra nelle zone ove si ha la coesistenza tra tessiture grossolane in superficie e modesta soggiacenza della falda;

- localmente i valori dell'indice di vulnerabilità possono discostarsi a seconda dei parametri e dei pesi scelti.

Dall'analisi effettuata si evidenzia che i parametri che maggiormente influenzano la vulnerabilità nella intera pianura sono riconducibili alle tessiture dei depositi superficiali, a quelle del sottosuolo ed alla profondità della falda.

Per quanto riguarda gli aspetti generali si osserva che per la valutazione regionale della vulnerabilità degli acquiferi il metodo DRASTIC è applicabile essenzialmente nelle situazioni in cui si ha prevalente alimentazione verticale, e conseguentemente alle aree in cui sono presenti falde libere e falde in parziale connessione con la superficie.

È evidente che, non essendo possibile tenere conto a priori di tutte le possibili condizioni idrogeologiche presenti a scala locale, diventa necessario costruire un modello unico di riferimento creando quindi delle ipotesi di lavoro che incidono sui risultati. È altrettanto evidente che tali risultati possono discostarsi da analoghe analisi eseguite a scale di maggior dettaglio.

Dopo aver valutato criticamente la vulnerabilità secondo la metodologia DRASTIC (in differenti configurazioni) si è effettuata una comparazione sinottica della vulnerabilità del sistema idrogeologico della pianura padana e veneto-friulana considerando tre metodologie o modelli differenti (CNR-GNDCl, SINTACS, DRASTIC). È opportuno ribadire che per il confronto diretto dei risultati ottenuti si è adottata un'articolazione univoca delle classi di vulnerabilità (6 gradi di vulnerabilità:

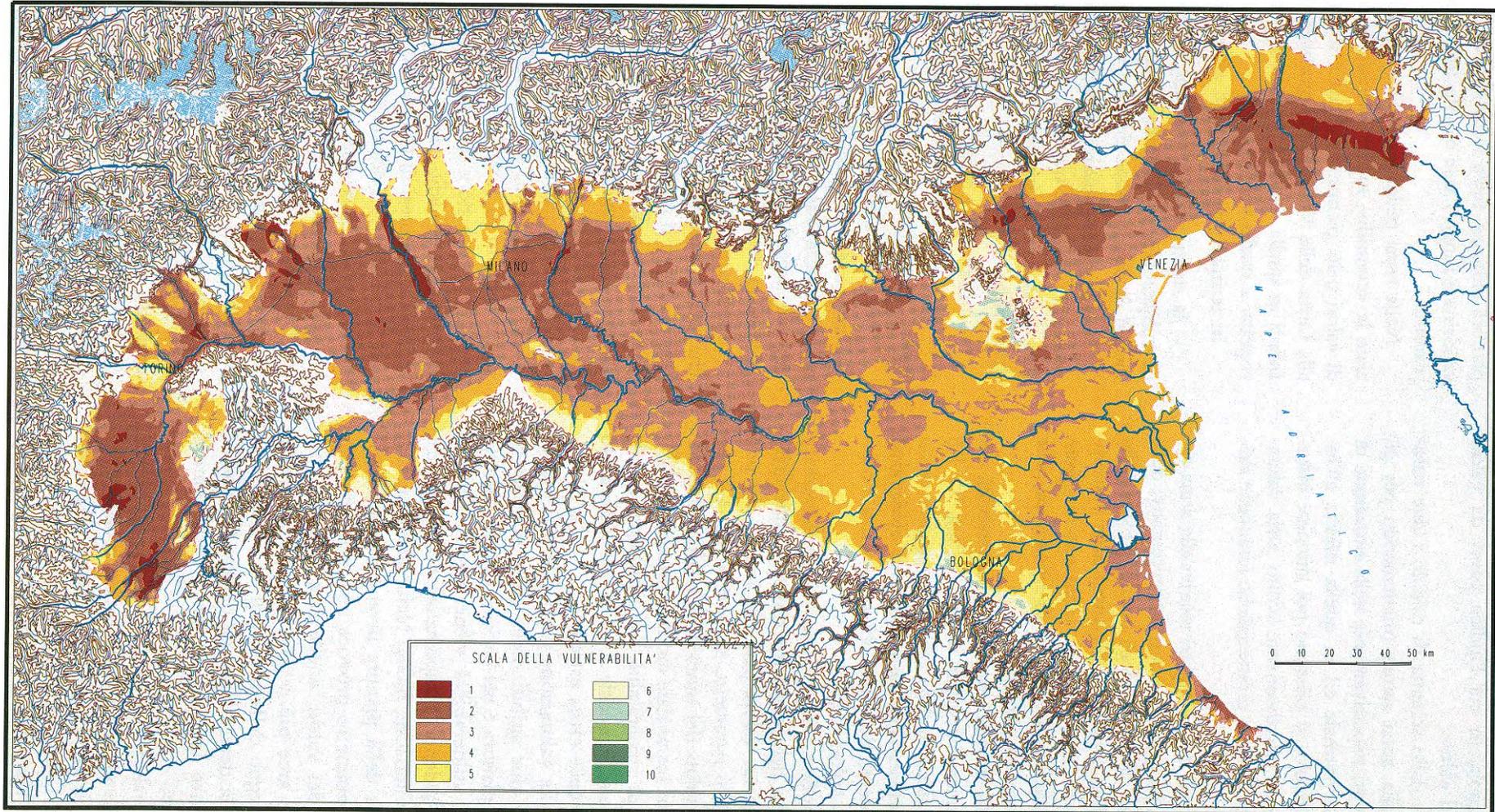


Fig. 9. - Carta della vulnerabilità degli acquiferi secondo il metodo DRASTIC normale con 5 parametri (10 classi). Legenda delle classi di vulnerabilità: 1 - massima (91-100%); 2 - estremamente alta (81-90%); 3 - molto alta (71-80%); 4 - alta (61-70%); 5 - mediamente alta (51-60%); 6 - mediamente bassa (41-50%); 7 - bassa (31-40%); 8 - molto bassa (21-30%); 9 - estremamente bassa (11-20%); 10 - minima (0-10%).
 - Aquifer vulnerability map according to the standard DRASTIC method modified to a 5 parameters set (10 classes ranking scale). Legend of vulnerability classes: 1 - highest (91-100%); 2 - extremely high (81-90%); 3 - very high (71-80%); 4 - high (61-70%); 5 - average high (51-60%); 6 - average low (41-50%); 7 - low (31-40%); 8 - very low (21-30%); 9 - extremely low (11-20%); 10 - lowest (0-10%).

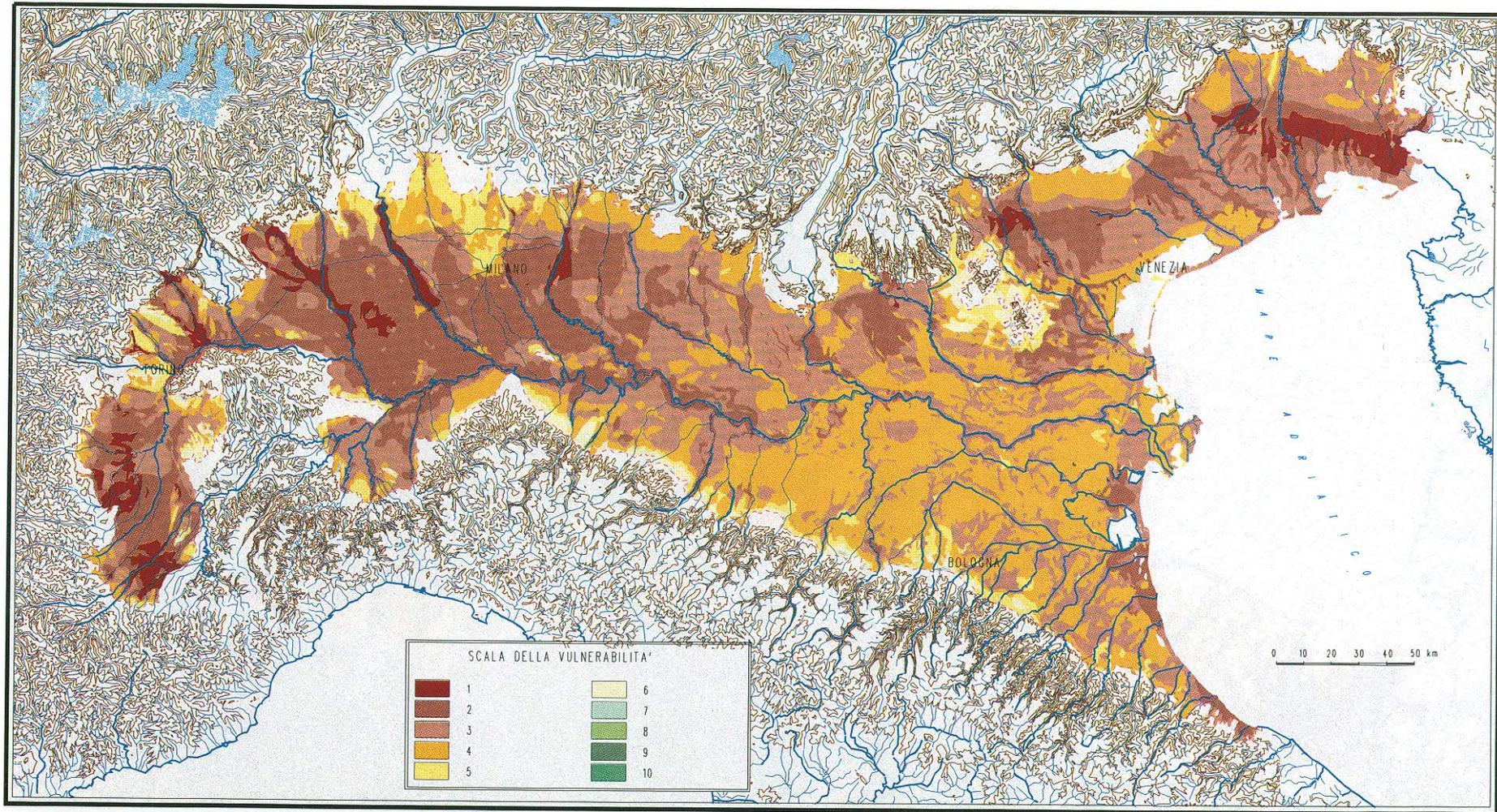


Fig. 10. – Carta della vulnerabilità degli acquiferi secondo il metodo Drastic agricolo con 5 parametri (10 classi). Legenda delle classi di vulnerabilità: 1 - massima (91-100%); 2 - estremamente alta (81-90%); 3 - molto alta (71-80%); 4 - alta (61-70%); 5 - mediamente alta (51-60%); 6 - mediamente bassa (41-50%); 7 - bassa (31-40%); 8 - molto bassa (21-30%); 9 - estremamente bassa (11-20%); 10 - minima (0-10%).

– *Aquifer vulnerability map according to the agricultural DRASTIC method modified to a 5 parameters set (10 classes ranking scale). Legend of vulnerability classes: 1 - highest (91-100%); 2 - extremely high (81-90%); 3 - very high (71-80%); 4 - high (61-70%); 5 - average high (51-60%); 6 - average low (41-50%); 7 - low (31-40%); 8 - very low (21-30%); 9 - extremely low (11-20%); 10 - lowest (0-10%).*

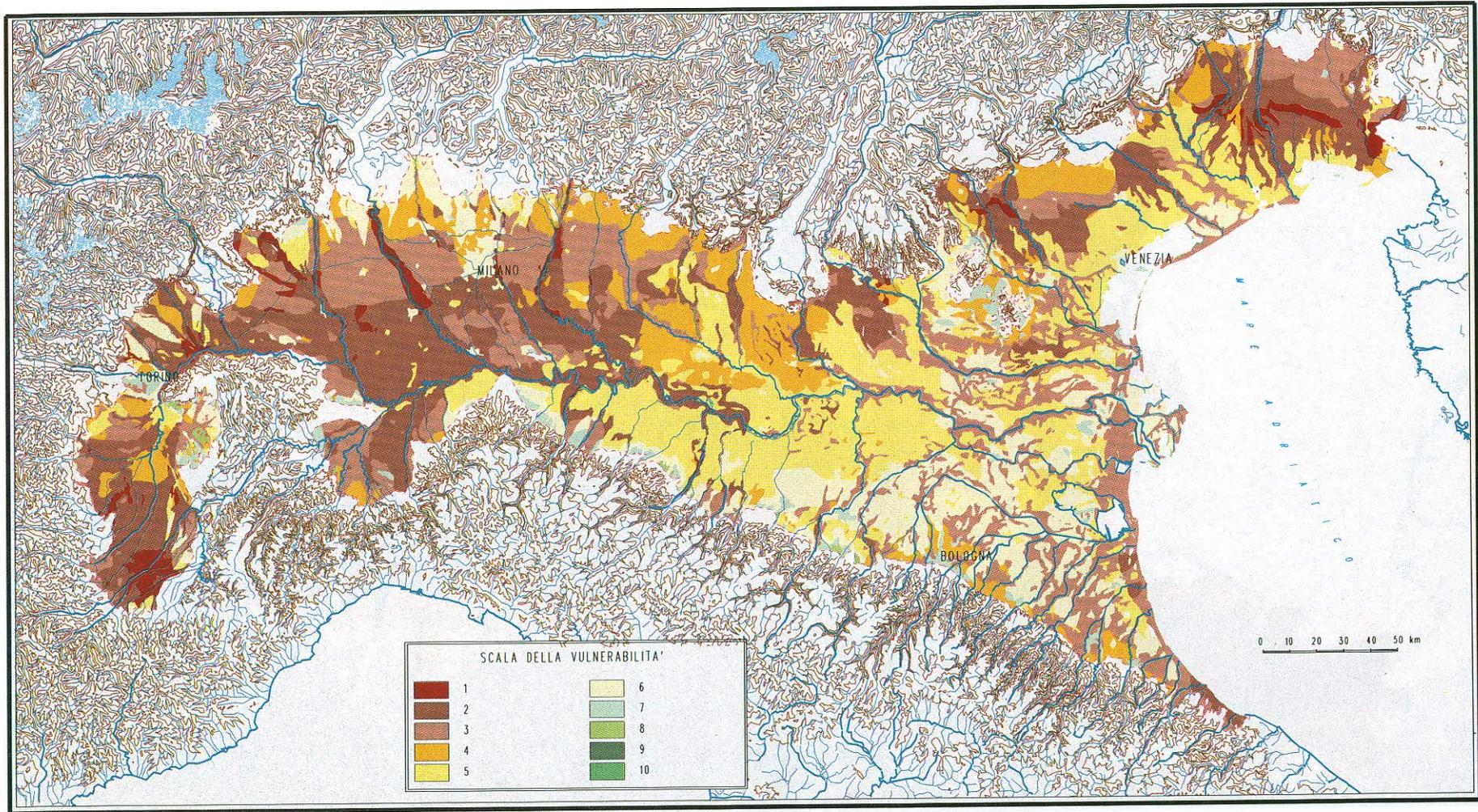


Fig. 11. - Carta della vulnerabilità degli acquiferi secondo il metodo DRASTIC normale con distribuzione variata dei pesi (10 classi). Legenda delle classi di vulnerabilità: 1 - massima (91-100%); 2 - estremamente alta (81-90%); 3 - molto alta (71-80%); 4 - alta (61-70%); 5 - mediamente alta (51-60%); 6 - mediamente bassa (41-50%); 7 - bassa (31-40%); 8 - molto bassa (21-30%); 9 - estremamente bassa (11-20%); 10 - minima (0-10%).

- Aquifer vulnerability map according to the standard DRASTIC method with a modified distribution of weights (10 classes ranking scale). Legend of vulnerability classes: 1 - highest (91-100%); 2 - extremely high (81-90%); 3 - very high (71-80%); 4 - high (61-70%); 5 - average high (51-60%); 6 - average low (41-50%); 7 - low (31-40%); 8 - very low (21-30%); 9 - extremely low (11-20%); 10 - lowest (0-10%).

TAB. 4. — *Caratteristiche di distribuzione dei gradi della vulnerabilità*
— Distribution features of vulnerability grades

GRADO DI VULNERABILITÀ	MODELLO DI VULNERABILITÀ			
	DRASTIC Normale	DRASTIC Agricolo	SINTACS	CNR-GNDICI
	FREQUENZE (%) DELLA CLASSE			
Estremamente Elevato	15,1	22,3	25,7	22,6
Elevato	26,1	31,8	26,3	14,7
Alto	52,4	40,9	43,1	14,4
Medio	2,9	1,6	1,5	5,2
Basso	~ 0,0	~ 0,0	—	11,6
Bassissimo	—	—	—	28,1
Aree Urbane	3,4	3,4	3,4	3,4

Bassissimo o Molto Basso, Basso, Medio, Alto, Elevato, Estremamente Elevato).

I caratteri distributivi di questi gradi di vulnerabilità sull'intera area di studio sono sintetizzati in tabella 4.

Poiché le mappature ottenute con il metodo DRASTIC sono state già esaminate nel dettaglio (rappresentazione con 10 classi) ci si limita a riportare le nuove mappature nelle figure 12 e 13.

Analizzando la carta della vulnerabilità realizzata utilizzando il metodo SINTACS (fig. 14) si nota una maggiore uniformità della distribuzione del grado di vulnerabilità. A livello statistico però la distribuzione areale percentuale delle classi rimane pressochè uguale a quella calcolata con il metodo DRASTIC.

I valori massimi della vulnerabilità si hanno nella zona di pianura in cui la falda si presenta a piccola profondità (area delle risorgive) e le tessiture superficiali sono rappresentate da depositi grossolani (pianura cuneese, novarese-vercellese, milanese-bergamasca e nella zona friulana).

Il grado di vulnerabilità tende a diminuire dal centro della pianura andando sia verso la zona pedemontana sia verso la costa, rimanendo però attestato intorno al valore di grado «alto». Infatti anche in questo caso valgono le considerazioni già fatte per il metodo DRASTIC e cioè che proseguendo dalla zona centrale di pianura verso il mare le tessiture dei depositi superficiali diventano più fini. Nella zona pedemontana la diminuzione del grado di vulnerabilità è dovuta essenzialmente al progressivo approfondimento della falda. La fascia pedeappenninica si presenta con un grado di vulnerabilità «alto» e solo in

presenza delle conoidi dei grandi fiumi, ove le tessiture dei depositi sono più grossolane, si hanno delle aree con grado di vulnerabilità «elevato» ed «estremamente elevato».

La carta realizzata con il metodo CNR-GNDICI (fig. 15) presenta delle differenze rispetto a quelle realizzate con i precedenti metodi a carattere parametrico. Infatti si identificano due zone ben definite: quella in cui l'acquifero considerato si presenta non confinato o semiconfinato in cui il grado di vulnerabilità varia da «basso» a «estremamente elevato», e quella dove l'acquifero è confinato ed il grado di vulnerabilità rientra quasi completamente nelle classi «basso» e «molto basso».

Per quanto riguarda le aree con acquifero non confinato o semiconfinato, le aree con grado di vulnerabilità «estremamente elevato» sono sempre quelle delle risorgive e delle pianure con depositi grossolani e falda a piccola profondità (pianura cuneese, novarese-vercellese, milanese-bergamasca e nella zona friulana). Inoltre procedendo dalla zona centrale di pianura alla fascia pedemontana si ha una graduale diminuzione del grado di vulnerabilità. Valori massimi si hanno anche in presenza di alvei disperdenti, rispetto alla falda sottostante, e con caratteri tessiturali grossolani.

Nella fascia pedeappenninica i valori più elevati si hanno in corrispondenza delle grandi conoidi e dei tratti di fiumi disperdenti.

Nella zona in cui l'acquifero è in condizioni confinate la classe più frequente è quella con grado di vulnerabilità «molto basso» (28.1%). Le classi che presentano un grado di vulnerabilità «basso» e «medio» si trovano generalmente in prossimità degli alvei fluviali principali.

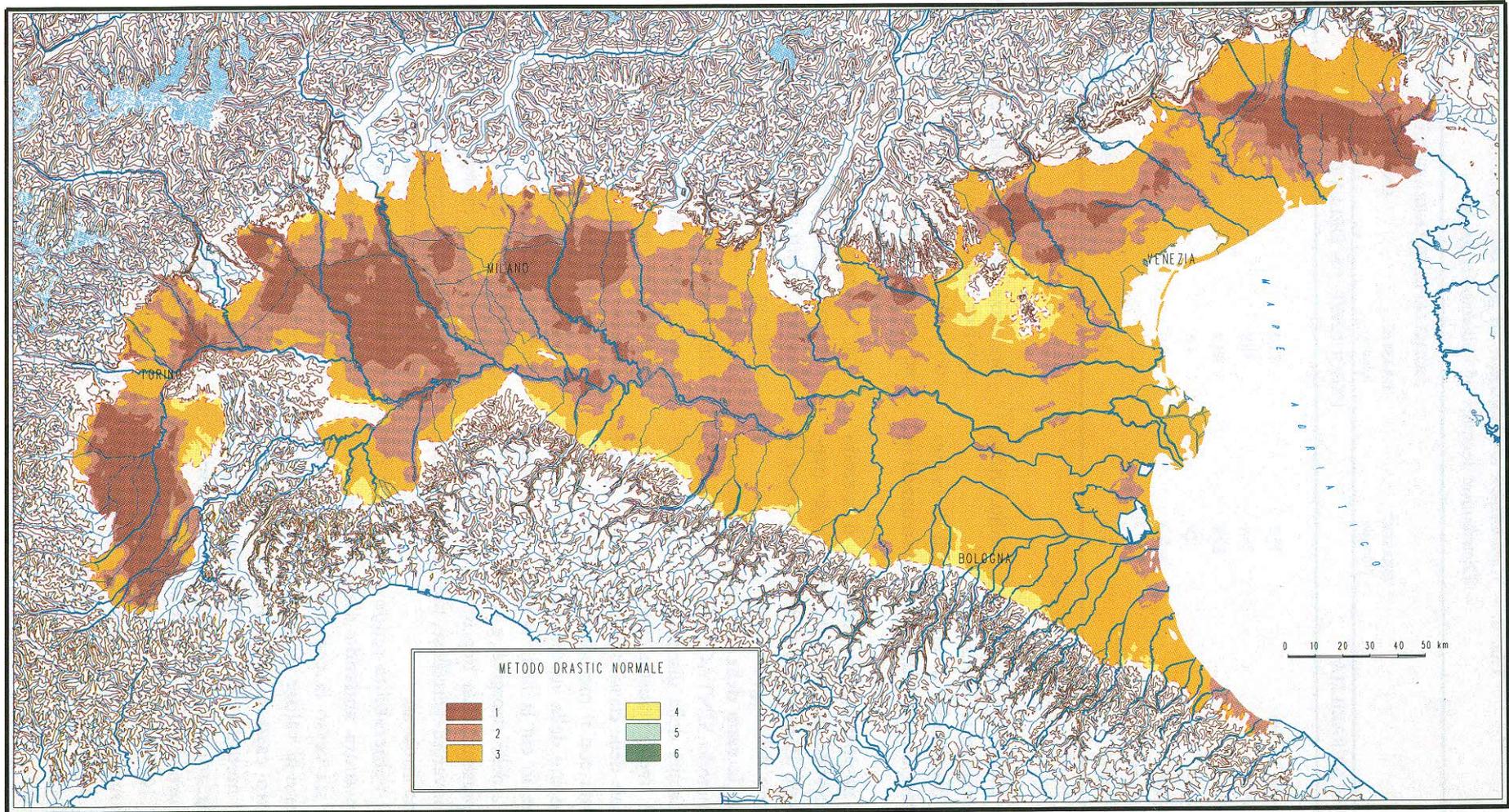


Fig. 12. – Carta della vulnerabilità degli acquiferi secondo il metodo Drastic normale (6 classi). Legenda dei gradi di vulnerabilità: 1 - estremamente elevato, 2 - elevato; 3 - alto; 4 - medio, 5 - basso; 6 - molto basso.

– Aquifer vulnerability map according to the standard DRASTIC method (6 classes ranking scale). Legend of vulnerability grades: 1 - extremely high; 2 - fairly high; 3 - high; 4 - average; 5 - low; 6 - very low.

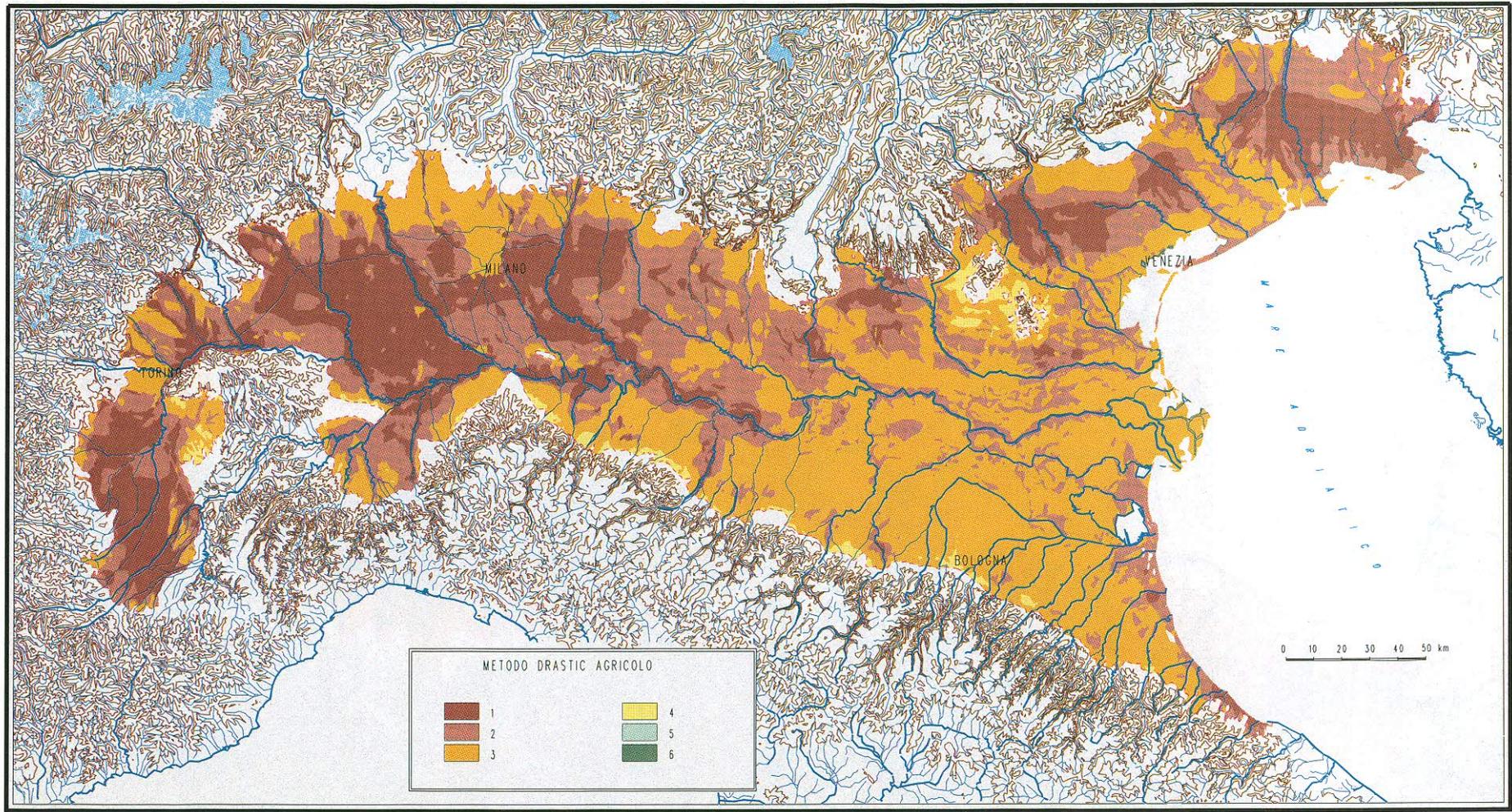


Fig. 13. – Carta della vulnerabilità degli acquiferi secondo il metodo Drastic agricolo (6 classi). Legenda dei gradi di vulnerabilità: 1 - estremamente elevato, 2 - elevato; 3 - alto; 4 - medio, 5 - basso; 6 - molto basso.
 – *Aquifer vulnerability map according to the agricultural DRASTIC method (6 classes ranking scale). Legend of vulnerability grades: 1 - extremely high; 2 - fairly high; 3 - high; 4 - average; 5 - low; 6 - very low.*

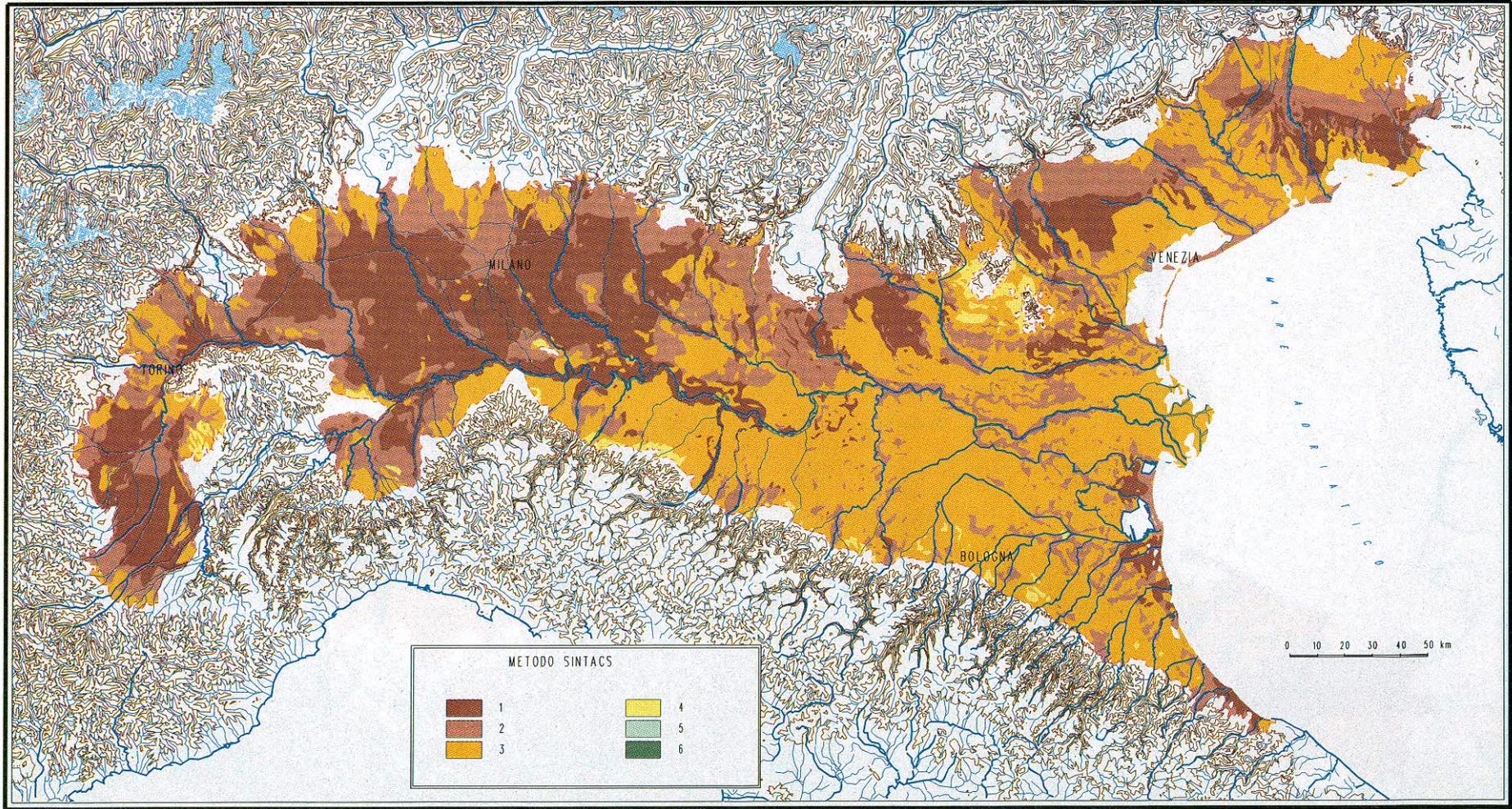


Fig. 14. – Carta della vulnerabilità degli acquiferi secondo il metodo Sintacs (6 classi). Legenda dei gradi di vulnerabilità: 1 - estremamente elevato, 2 - elevato; 3 - alto; 4 - medio, 5 - basso; 6 - molto basso.

– *Aquifer vulnerability map according to the SINTACS method (6 classes ranking scale). Legend of vulnerability grades: 1 - extremely high; 2 - fairly high; 3 - high; 4 - average; 5 - low; 6 - very low.*

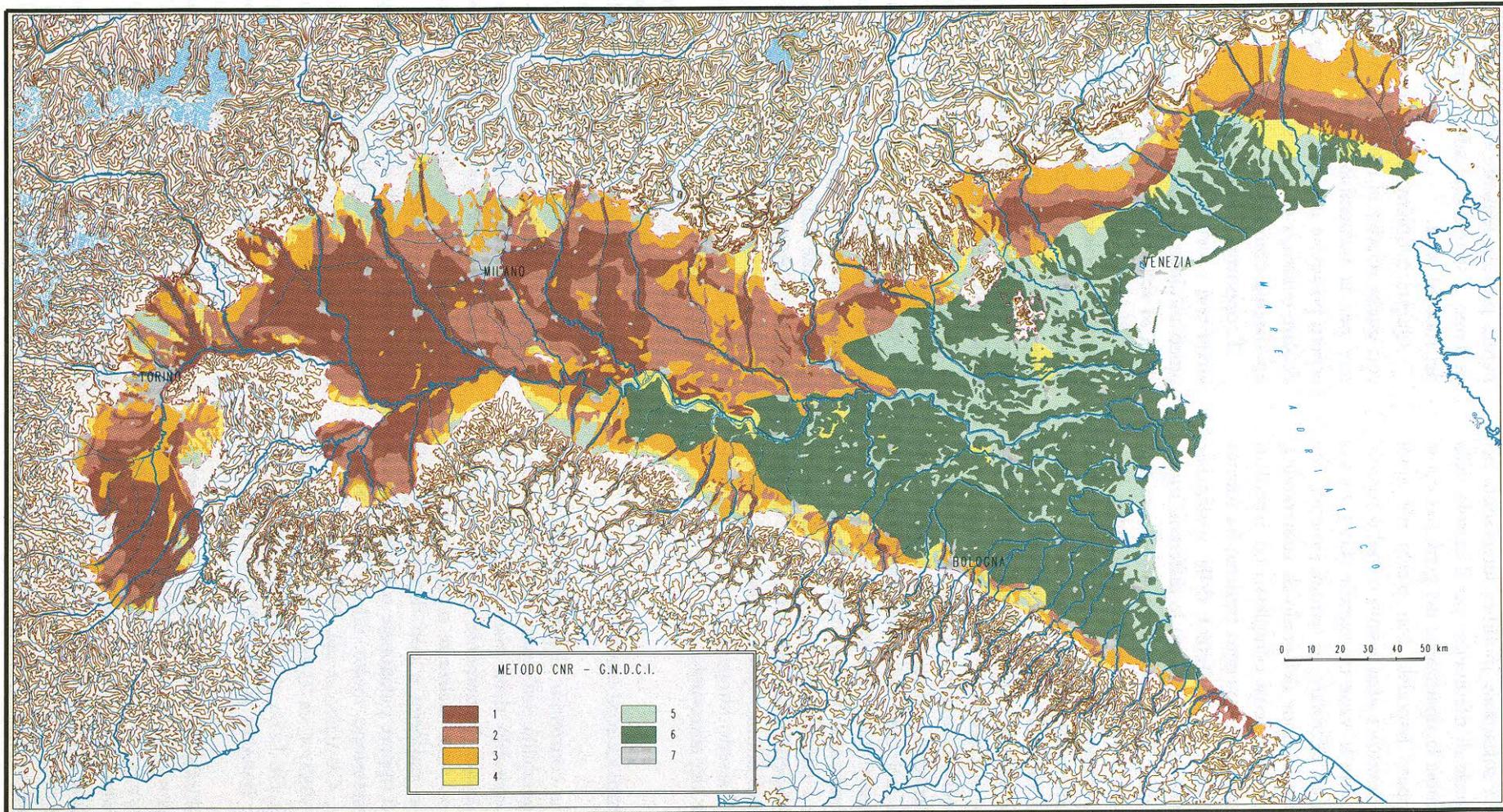


Fig. 15. – Carta della vulnerabilità degli acquiferi secondo il metodo CNR-GNDCI, modificato a scala regionale (6 classi). Legenda dei gradi di vulnerabilità: 1 - estremamente elevato, 2 - elevato; 3 - alto; 4 - medio, 5 - basso; 6 - molto basso; 7 - Aree Urbane.

– Aquifer vulnerability map according to the CNR-GNDCI method modified for regional scale analysis (6 classes ranking scale). Legend of vulnerability grades: 1 - extremely high; 2 - fairly high; 3 - high; 4 - average; 5 - low; 6 - very low; 7 - urban areas.

A causa della sostanziale modifica intervenuta nel modello concettuale di riferimento per il calcolo della vulnerabilità, cambia la ripartizione dei gradi per cui la distribuzione appare bimodale con picchi nei gradi «estremamente elevato» e «bassissimo o molto basso».

Il confronto tra le varie cartografie (GIULIANO *et alii*, 1997) porta ad affermare, in termini sintetici, che l'analisi della distribuzione del grado di vulnerabilità, considerando un areale così complesso ed articolato come la pianura padana e veneto friulana, ha fornito interessanti elementi di conferma della sostanziale analogia tra i risultati ottenuti con le differenti metodologie. Nelle zone delle risorgive e di pianura con depositi grossolani e falda a piccola profondità (pianura cuneese, novarese-vercellese, milanese-bergamasca e parzialmente nella zona friulana) si è ottenuto lo stesso grado di vulnerabilità adottando qualsiasi metodologia. Le aree in cui il grado di vulnerabilità rimane uguale o si discosta di una classe coprono il 90% circa dell'areale esaminato nel caso del confronto tra metodi parametrici e metodo CNR-GNDCI, salendo al 100% nel caso del confronto diretto tra i metodi parametrici. Le variazioni di due classi sono quasi sempre localizzate nelle zone pedealpine e pedeappenniniche e parzialmente lungo gli alvei principali a carattere disperdente e sono limitate ad aliquote percentuali molto ridotte. Queste zone appaiono le più critiche per l'assetto idrogeologico e per le variazioni litologiche del sottosuolo.

7.4. – CONSIDERAZIONI CRITICHE

La ricerca ha consentito di pervenire alla valutazione della vulnerabilità dell'intero sistema acquifero ospitato nel sottosuolo della pianura, permettendo quindi di confrontare direttamente tra loro situazioni che, finora, erano state analizzate separatamente con elaborazioni non uniformi e con diverso livello di dettaglio dei dati oppure paragonate sulla base di aree campione di estensione molto ridotta (ANTONELLI & MARI, 1993; CAVALLIN *et alii*, 1995; GIORGETTI & STEFANINI, 1989; CNR-GNDCI, 1990b; PINOTTI & VICARI, 1995; DE LUCA *et alii*, 1991; CIVITA & DE REGIBUS, 1995; BARALDI *et alii*, 1993; CIVITA *et alii*, 1991).

Tutte le valutazioni sono risultate condizionate dalla rappresentatività del modello idrogeologico adottato: la situazione è complicata, alla scala di lavoro qui impiegata, dalla impossibilità di disporre di modelli di tipo fisico (cioè georeferenziati) della struttura del sottosuolo (che di solito sono invece disponibili alle scale di dettaglio) e dal ricorso a schematizzazioni di

natura prevalentemente concettuale che non sempre riescono a sintetizzare adeguatamente le particolarità del mondo reale.

Questa problematica si sovrappone e si integra con quella relativa al metodo di valutazione da adottare per la vulnerabilità, ciascuno caratterizzato da aspetti positivi e negativi, che vengono messi in particolare evidenza quando si opera a scala sinottica su un sistema complesso come quello padano.

È opportuno sottolineare che la vulnerabilità valutata con i metodi parametrici è stata riferita ad un unico modello concettuale di acquifero, che rappresenta lo schema procedurale per la elaborazione dei dati; la realtà invece si presenta con una notevole varietà di tipologie e situazioni idrogeologiche, quali ad esempio le zone pedealpine e pedeappenniniche, non sempre completamente leggibili attraverso il modello prescelto. La metodologia di zonazione del CNR-GNDCI consente invece di adeguare, di volta in volta, la valutazione alle specifiche situazioni idrogeologiche considerate.

Alla flessibilità delle metodologie di tipo concettuale-idrogeologico ad adattarsi a situazioni strutturalmente diversificate, ma con ampia soggettività nella quantificazione dell'attitudine alla vulnerazione, si contrappone la rigidità intrinseca dei sistemi parametrici a trattare situazioni complesse, mitigata dalla possibilità di pervenire a ordinamenti razionali delle attitudini nell'intero areale.

Si osserva che, per le caratteristiche intrinseche dei differenti metodi, le valutazioni della vulnerabilità non sempre sono completamente comparabili tra loro. In particolare i sistemi parametrici si riferiscono essenzialmente agli acquiferi con falda libera o semiconfinata, mentre la metodologia proposta dal CNR-GNDCI consente di considerare l'acquifero principale, cioè quello utilizzato, che può presentarsi libero, semiconfinato o confinato a seconda delle diverse condizioni idrogeologiche del sottosuolo della pianura.

L'applicazione di diverse metodologie per la valutazione della vulnerabilità, utilizzando gli stessi dati di base, ha messo in evidenza che i risultati, dove il modello concettuale di acquifero utilizzato è lo stesso, sono molto simili e che comunque i rapporti reciproci tra le aree ad alto grado di vulnerabilità e quelle a basso grado di vulnerabilità rimangono pressoché invariati. Infatti, sia le zone pedemontane e pedeappenniniche, sia quelle prossime al mare Adriatico presentano un grado di vulnerabilità sempre inferiore rispetto alle aree centrali della pianura. Le aree con risorgive e con depositi grossolani risultano essere sempre quelle a grado più elevato di vulnerabilità qualunque sia la metodologia adottata. Da ciò deriva

che l'elemento discriminante risulta essere il dato di base utilizzato più che la metodologia adottata. Ciò conferma quanto osservato da altri autori (PINOTTI & VICARI, 1995; DE LUCA *et alii*, 1991; CIVITA & DE REGIBUS, 1995; BARALDI *et alii*, 1993) che, con elaborazioni limitate però a piccole aree di studio, hanno applicato sistemi parametrici complessi (DRASTIC e SINTACS) unitamente a sistemi semplificati come GOD (FOSTER, 1987) e VOC (DE LUCA & VERGA, 1991). Analogamente viene confermata e sottolineata l'esigenza di individuare modelli idrogeologici di riferimento in grado di caratterizzare in maniera soddisfacente le peculiarità delle situazioni esaminate e la loro variabilità spaziale.

I risultati presentati non intendono privilegiare l'uno o l'altro sistema valutativo, avvalorandone l'affidabilità e la rappresentatività, ma consentono di sottolineare gli aspetti problematici della tematica e la necessità di garantire elevati livelli di coerenza e comparabilità dei risultati quando si vogliono ottenere quadri valutativi omogenei di ampi territori a rischio.

I risultati delle elaborazioni hanno particolarmente interesse per la pianificazione delle azioni di utilizzo e tutela delle acque sotterranee sull'intero areale, mettendo in evidenza la sensibilità delle differenti situazioni strutturali e territoriali. È però evidente la necessità di ricorrere a procedimenti differenti e ad indagini di maggiore dettaglio e approfondimento per l'analisi delle situazioni locali. Inoltre l'utilizzazione della vulnerabilità ai fini pianificatori ha validità relativa se non viene incrociata con la disponibilità e qualità delle risorse idriche. Infatti questa combinazione permette di individuare efficacemente le zone critiche che, ad esempio, non necessariamente corrispondono con quelle a maggiore vulnerabilità se in esse vi è una elevata disponibilità di acque (pianura friulana); si può invece verificare il caso in cui aree con medio-bassa vulnerabilità risultino estremamente critiche per una carenza di risorse idriche.

Dalle esperienze svolte si delinea chiaramente il ruolo fondamentale che ha la fase di raccolta dati nella predisposizione delle mappature di vulnerabilità. Infatti una raccolta dati sistematica ed omogenea sull'area oggetto di indagine, sia per quanto riguarda i dati storici sia mediante un adeguato monitoraggio, consente di valutare le variazioni spazio temporali delle grandezze e di eseguire le elaborazioni non solo con parametri statici, ma anche dinamici. Tutto ciò è oggi possibile per il grado di qualificazione raggiunto dalle tecniche informatiche e dai sistemi informativi che permettono il trattamento di notevoli quantità di dati. Tenendo continuamente aggiornate le banche dati è possibile infatti eseguire le elaborazioni

e le rappresentazioni in tempi reali. Oltre a ciò, una raccolta dati omogenea a livello regionale può consentire di passare dall'applicazione di metodi multicriteriali a modelli numerici che richiedono, per un loro corretto utilizzo, una notevole e dettagliata quantità di dati. L'applicazione di tali modelli è solitamente eseguita esternamente al sistema informativo; successivamente con i risultati ottenuti si rientra nel sistema per le ulteriori elaborazioni e/o per la rappresentazione dei risultati in termini di vulnerabilità del sistema idrogeologico.

8. – CONSIDERAZIONI SULLE CARATTERISTICHE DELLA RICERCA E DEI SUOI PRODOTTI

8.1. – ASPETTI GENERALI

Nel lavoro sono stati presentati sinteticamente alcuni risultati di una ricerca promossa dall'Istituto di Ricerca sulle Acque (IRSA) e dal Servizio Geologico Nazionale (SGN) sul sistema acquifero padano e veneto friulano, iniziata oltre 5 anni fa ed ormai in via di completamento.

Questo sistema acquifero, di gran lunga il maggiore in Italia ospitato in sedimenti alluvionali è stato oggetto di storica attenzione da parte dell'IRSA per la coesistenza di un notevole interesse sul piano scientifico e per il ruolo strategico che esso svolge nell'approvvigionamento idrico del territorio afferente, con particolare riguardo agli usi potabili.

In particolare si ricorda l'importante iniziativa di ricerca condotta nella seconda metà degli anni '70 dall'Istituto, in collaborazione con le Università, che ha segnato una fase fondamentale per l'avanzamento delle conoscenze sulle acque sotterranee della pianura padana e veneto-friulana e che è stata occasione per lo sviluppo di competenze scientifiche specialistiche e di schemi concettuali e metodologici nel settore della ricerca idrogeologica. I risultati di questo programma di ricerca hanno costituito per lungo tempo l'intelaiatura di base per gran parte delle iniziative di approfondimento conoscitivo, successivamente attuate dalle Istituzioni di ricerca, e per i quadri programmatori dell'uso delle risorse sotterranee sviluppati da parte degli Enti pubblici.

La coesistenza di un grande patrimonio idrico e della grave situazione di degrado, conseguente ad un uso scorretto del territorio e dell'ambiente, ha indotto ad individuare un'iniziativa di ricerca pluriennale rivolta alla preparazione di cartografie sperimentali a media scala sugli aspetti connessi alla valutazione

della suscettività alla contaminazione e del degrado qualitativo delle acque sotterranee nell'area; tale ricerca doveva privilegiare il taglio pianificatorio rispetto a quello operativo, già affrontato con successo in ambito CNR-GNDICI (Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche) da una specifica Linea di Ricerca coordinata dal Prof. M. Civita.

Per lo svolgimento della ricerca, di cui vanno sottolineate ancora le spiccate connotazioni metodologiche e sperimentali e la valenza tipicamente di livello programmatico, sono state riattivate le connessioni con la rete di istituzioni scientifiche dell'area che avevano prodotto nel passato interessanti risultati.

La produzione di documenti cartografici e monografici è stata cospicua, come dettagliato nelle azioni di informazione effettuate verso la comunità istituzionale e scientifica (IRSA, 1996).

La ricerca intendeva pervenire ad una rappresentazione sintetica e dinamica del sistema idrogeologico padano, veneto e friulano che potesse rappresentare un quadro conoscitivo di riferimento ed uno strumento per la valutazione di alternative di pianificazione territoriale, a scala regionale, riguardo alla tutela delle risorse idriche sotterranee. Essa ha impiegato in modo integrato gli aspetti di attitudine alla vulnerazione delle strutture acquifere, di gravosità del carico antropico che insiste sul territorio, e di distribuzione delle infrastrutture di captazione, facendone derivare il potenziale di inquinamento esistente e i differenti livelli di rischio per le acque sotterranee. Sono stati pertanto esaminati in maniera finalizzata e funzionale le caratteristiche geologiche e idrogeologiche, gli aspetti socio-economici con particolare riferimento all'insediamento urbano e industriale e all'uso agricolo del territorio, la qualità idrochimica delle acque sotterranee e l'idoneità all'uso potabile, l'assetto del sistema di approvvigionamento idropotabile, lo stato di contaminazione delle risorse sotterranee da relazionare a cause antropiche e/o a condizioni geologiche.

8.2. – LA TIPOLOGIA DELL'APPROCCIO

La ricerca, alquanto ambiziosa per l'estensione dell'ambito progettuale, la complessità del sistema idrogeologico esaminato e la diversificazione delle situazioni geoambientali e territoriali coinvolte, è stata realizzata con un approccio metodologico e speculativo nel quale la valorizzazione dei dati disponibili per i differenti comparti tematici, a diverso grado di aggregazione e di affinamento, è da considerare come motivo conduttore.

La predisposizione di una cartografia sinottica a valenza regionale, come ovvio, è ottenibile razio-

nalmente a partire da documenti di dettaglio (basati su un'intensa e puntuale attività di rilevamento sul territorio e di rappresentazione georeferenziata), quale risultato di un procedimento di sintesi progressiva verso livelli di aggregazione sempre maggiore, sostenuto da un adeguato processo di semplificazione e schematizzazione concettuale della realtà.

La conoscenza deve essere disponibile in modo omogeneo sull'intero ambito progettuale e comunque tale da consentire le opportune estrapolazioni nelle zone non coperte, che peraltro devono essere quantitativamente ridotte e comunque marginali rispetto alle situazioni significative.

Una siffatta documentazione di dettaglio che abbracciasse la complessa articolazione della problematica ed i numerosi tematismi componenti non era certamente disponibile all'inizio della ricerca. Nè era sostenibile l'opzione di svolgere un'attività specifica di raccolta delle informazioni e di dati sull'intero areale progettuale, con idonee caratteristiche di significatività e rappresentatività spaziale per tutti i tematismi coinvolti.

Quale scelta progettuale è stato deciso quindi che le informazioni da utilizzare nella ricerca dovevano essere prevalentemente quelle esistenti, disponibili presso gli Istituti promotori (derivanti da attività pregresse o in corso di completamento), presso gli Enti di ricerca pubblica, in forma opportunamente aggregata, presso gli Enti di governo locale con adeguati caratteri di ufficialità, e presso gli Enti pubblici di livello nazionale a carattere tematico e/o settoriale.

Si deve sottolineare, peraltro, che fondamentali sono risultati i contributi originali forniti dalla rete di istituzioni scientifiche che insistono sull'area di studio, senza i quali non si sarebbero potuti raggiungere, soprattutto nel settore idrogeologico, risultati di grande interesse per completezza ed attualità.

Pertanto la predisposizione della cartografia sinottica è stata effettuata a partire da documenti di carattere parimenti sinottici o riassuntivi di documentazioni analitiche, ma comunque in scala numericamente inferiore.

La natura delle fonti di informazione, il buon livello di attendibilità dei dati di base, le procedure di verifica che sono state attuate (campionature, confronti tra diverse fonti, incroci di dati diversi etc.) consentono di garantire la generale «buona qualità» delle informazioni utilizzate per le elaborazioni cartografiche, almeno in relazione alla scala di lavoro; in ogni caso si può affermare che esse sono da ritenere le «migliori» disponibili sull'intera area per omogeneità, grado di copertura e rappresentatività.

I dati di base afferenti ai vari tematismi, ancorché disponibili in forma e scala originale differenziata,

sono stati ricondotti ad una scala di rappresentazione unica (1:500.000) coerente con la valenza essenzialmente pianificatoria dello studio.

L'approccio adottato, che chiameremo di «sintesi diretta» per distinguerlo dall'altro di «sintesi progressiva», è risultato l'unico che potesse consentire lo sviluppo della cartografia di progetto operando in modo attuale, coerente ed omogeneo per tutte le aree tematiche coinvolte, nonostante la differenziazione anche spinta del tipo e della natura delle informazioni da trattare.

Si deve peraltro sottolineare che per poche aree tematiche, nelle quali gli elementi informativi utilizzabili erano praticamente inesistenti, si è dovuto comunque avviare un'attività specifica di raccolta ed elaborazione dei dati necessari ad una scala congruente con quella di lavoro. Ci si riferisce in particolare ai tematismi dell'approvvigionamento idropotabile, della qualità di base e della contaminazione reale delle acque sotterranee.

In definitiva, l'approccio scelto ha consentito di affrontare in maniera rapida e approfondita gli aspetti più spiccatamente metodologici e sperimentali della rappresentazione cartografica e della problematica applicata al caso di studio.

È da sottolineare che, operando sulla specifica realtà territoriale dell'area padana ed impiegando i «migliori» dati disponibili, la ricerca ha consentito di pervenire a quadri conoscitivi, sia pure a carattere generale, che possono essere d'interesse per la valutazione di alternative di pianificazione di area vasta, con specifico riferimento alla tutela delle acque sotterranee, da parte delle istituzioni competenti, in primo luogo le Autorità di Bacino e le Regioni.

Un elenco, peraltro non esaustivo, delle finalità operative della ricerca è riportato nello schema seguente:

- esplorare i percorsi metodologici della costruzione di cartografie sinottiche e a valenza regionale della vulnerabilità e del rischio di degrado qualitativo delle acque sotterranee;
- valutare la potenzialità di metodi differenti di valutazione della vulnerabilità e la loro applicabilità a sistemi idrogeologici complessi a forte impatto antropico;
- sperimentare l'impiego di metodologie e tecnologie informatiche per la gestione dinamica di sistemi integrati di valutazione (banche dati georeferenziate-modelli interpretativi-elaborazioni-restituzioni dei risultati);
- individuare le condizioni necessarie per la utilizzazione delle valutazioni in ambito istituzionale ed i requisiti per una eventuale standardizzazione a fini normativi delle procedure.

8.3. – L'ARTICOLAZIONE DELLA RICERCA ED I PRODOTTI

La ricerca ha esaminato criticamente le varie fasi di costruzione della cartografia tematica a media scala, affrontando le problematiche:

- della idoneità e completezza dei dati di base;
- della potenzialità di differenti metodi di valutazione del comportamento del sistema acquifero nei riguardi della contaminazione;
- della integrabilità dei dati fisici con quelli socio economici relativi alle attività inquinanti;
- della rappresentazione degli attributi di criticità e di rischio delle acque sotterranee.

In termini essenziali la ricerca ha caratterizzato in maniera organica e coordinata l'attitudine alla vulnerazione delle strutture acquifere, il carico inquinante potenziale che insiste sul territorio, e lo stato di contaminazione delle acque sotterranee individuando gli aspetti di criticità e di degrado qualitativo delle acque sotterranee idonee all'uso potabile.

I prodotti della ricerca sono costituiti da una serie di rappresentazioni cartografiche afferenti a tematismi integrati e complessi quali: l'assetto idrogeologico regionale, la vulnerabilità naturale o intrinseca degli acquiferi, la distribuzione dei carichi antropici ed inquinanti, la criticità territoriale; ma anche relative a singoli tematismi ritenuti di maggiore e specifica rilevanza settoriale e/o a contenuto informativo originale quali: le caratteristiche di tessitura ed infiltrabilità dei depositi superficiali, la qualità di base delle acque sotterranee, il grado di contaminazione reale delle stesse relativamente a specifici inquinanti.

Le tematiche dei prodotti cartografici sviluppati nell'ambito dell'intera ricerca sono in particolare:

- strutture e sistemi idrogeologici
- suscettività naturale dei sistemi acquiferi;
- pressione antropica e carichi potenziali sulle acque sotterranee;
- contaminazione reale delle acque sotterranee;
- qualità di base delle acque sotterranee;
- strutturazione dell'approvvigionamento potabile;
- criticità e rischio di degrado qualitativo.

La sequenza di tali prodotti ripercorre idealmente il disegno complessivo della ricerca, sebbene non rifletta compiutamente l'articolazione temporale delle fasi, controllata piuttosto dalla disponibilità effettiva delle informazioni.

Una fase rilevante della ricerca si è concentrata sulla vulnerabilità intrinseca del sistema acquifero; le cartografie sono state costruite utilizzando metodolo-

gie valutative rinvenibili in letteratura e di ampio uso, ovvero procedure di nuovo sviluppo concettuale che, in linea di massima, si presentano alternative a quelle di carattere parametrico.

L'applicazione di queste metodologie ad una realtà geoambientale complessa come quella esaminata, ove coesistono situazioni notevolmente diversificate caratterizzate da transizioni gradualì o talora improvvise, ha posto in evidenza la grande importanza di disporre di una rappresentazione idrogeologica di base affidabile ed articolata, in grado di definire puntualmente le caratteristiche delle diverse strutture acquifere.

Allo scopo, proprio quale contributo finalizzato agli obiettivi della ricerca, è stata messa a punto una Carta Idrogeologica Regionale che consente di avere una visione sinottica delle condizioni al contorno (interne e al limite della pianura) del sistema acquifero padano e veneto-friulano.

È opportuno ricordare che, poiché le valutazioni di attitudine del sistema alla vulnerazione si ottengono mediante complesse operazioni di intersezione, sovrapposizione, combinazione di più strati informativi, prescindendo dalla procedura adottata il grado di affidabilità del prodotto finale è comunque condizionato dalla omogeneità interna di ciascuno strato e dalla comparabilità degli strati tra loro: producendosi sempre derive negative di affidabilità verso le condizioni meno rappresentative, i parametri meno attendibili, le informazioni più carenti.

Ciò pone in evidenza l'opportunità di una analisi preliminare sulla qualità (completezza, omogeneità) comparata degli strati informativi disponibili, da cui può dipendere anche la scelta della procedura di valutazione da privilegiare per garantire livelli accettabili di affidabilità dei risultati; tale scelta può basarsi anche su soluzioni di compromesso.

Un aspetto correlato e di grande rilevanza metodologica è la sperimentazione che è stata effettuata sul ruolo svolto dai vari parametri o grandezze considerate nelle procedure di valutazione. L'elemento che appare con grande evidenza è l'importanza che assume il sottosistema «suolo-non saturo», ampiamente sottostimato nella gran parte delle procedure per carenze di carattere conoscitivo e anche concettuale, il che fa sorgere alcune perplessità sulla completezza metodologica delle valutazioni, soprattutto in relazione alle contaminazioni da fonti diffuse.

La ricerca ha contribuito in modo diretto alla problematica, introducendo elementi conoscitivi originali sulle caratteristiche dei depositi superficiali, messi a disposizione da altri gruppi di ricerca ed in particolare da quello sulla geomorfologia padana. Non è certo la soluzione alla deficienza di informazioni

estensive sulla capacità di attenuazione degli inquinanti da parte di questa «idrozona», ma almeno è un primo segnale di attenzione e di indirizzo.

L'analisi delle componenti antropiche ai fini della stima dei potenziali di contaminazione ha posto in evidenza la non congruenza di siffatto tipo di informazioni rispetto a quelle di carattere fisico, per l'impossibilità di disporre, alla scala di lavoro e sull'intero areale, di dati georeferenziati se non al livello di aggregazione comunale, che quindi diviene il modello concettuale della struttura di questi tematismi.

In assenza di informazioni di altro tipo (peraltro non acquisibili direttamente), l'incrocio della vulnerabilità con le componenti antropiche per l'individuazione delle condizioni di criticità e di degrado potenziale ha consentito di ottenere rappresentazioni di un certo interesse a livello pianificatorio, ma ha ridotto anche il livello del dettaglio dell'analisi a quello proprio del tessuto amministrativo.

Questa esperienza di ricerca porta ad individuare la necessità di provvedere a raccolte ed elaborazioni normative dei dati antropici georeferenziati o comunque di livello confrontabile con quelli di carattere fisico che sono alla base delle valutazioni di vulnerabilità.

La ricerca durante il suo svolgimento ha confermato le proprie caratteristiche di iniziativa pilota, individuando segmenti conoscitivi tuttora privi di elaborazioni sistematiche a carattere estensivo (salvo rari casi corrispondenti ad ambiti territoriali particolarmente conosciuti). Ci si riferisce essenzialmente alle informazioni sulla qualità di base delle acque sotterranee, con specifico riferimento all'uso potabile, e alla contaminazione reale delle falde da inquinanti caratteristici.

Ciò ha comportato l'avvio di specifiche ancorché speditive raccolte di informazioni in modo da ottenere stime sia pure orientative dell'idoneità intrinseca all'uso delle acque sotterranee, da trasformare in valutazioni di merito o ponderate e da correlare con i livelli di criticità potenziale.

Un aspetto che è apparso assolutamente carente nel corso dell'esperimento metodologico riguarda l'impossibilità di gestire il dinamismo delle situazioni reali, sia in riferimento ai comportamenti del sistema acquifero che all'estrinsecarsi dei fenomeni antropici. Tutte le valutazioni svolte fanno riferimento alla singolarità della situazione rilevata, senza fornire indicazioni sulla variabilità o sull'evoluzione degli assetti che invece possono influire in modo determinante su alcuni aspetti relativi all'impatto antropico, ma anche su certi aspetti della vulnerabilità.

Queste considerazioni, congiuntamente a quelle relative alle carenze riscontrabili nei quadri informativi

di componenti primarie delle valutazioni ed alle condizioni di non coerenza tra le forme di disponibilità dei vari tipi di dati, forniscono la misura del modesto livello di controllo dei fenomeni geoambientali e conseguentemente delle scarse possibilità di una gestione realistica della criticità e del rischio.

Nell'attuale quadro di riferimento conoscitivo appare possibile ottenere valutazioni di una certa affidabilità, limitatamente alla tematica della vulnerabilità intrinseca, laddove siano rispettati opportuni requisiti metodologici e vengano impiegati dati affidabili, completi e significativi.

Più complesso appare il problema quando si affrontano gli aspetti rivolti alla quantificazione degli impatti antropici per l'inadeguatezza dei dati di base relativi sia alle fonti di degrado che agli effetti, soprattutto a scala territoriale.

Un sostanziale mutamento potrà realizzarsi solo nell'ambito di un adeguato processo di riqualificazione delle modalità di monitoraggio dei sistemi ambientali, promuovendo la cultura del dato in termini di affida-

bilità, di contenuti informativi finalizzati, di continuità dell'osservazione da utilizzare in una catena informativa ben definita. Ciò vuol dire che incrementi conoscitivi consistenti potranno essere conseguiti solo nell'ambito di progetti finalizzati di raccolta normata e di elaborazione standard delle informazioni con adeguato dettaglio e scansione temporale.

L'utilizzo estensivo durante la ricerca delle metodologie e tecnologie informatiche ha consentito da un lato il trattamento di insiemi poderosi e multidimensionali di dati con messa a punto di procedimenti particolari, ma in relazione al rigore formale di questi strumenti ha anche evidenziato tutto il potenziale di disomogeneità e incertezza presente, a partire dalle basi cartografiche di appoggio.

Dall'esperienza acquisita è altresì possibile prevedere come tali sistemi informatici rappresenteranno l'indispensabile strumento per la gestione di complesse operazioni di valutazione pluritematica, a partire dalla validazione integrata dei dati utilizzati, e di rappresentazione dinamica dei risultati.

COLLABORAZIONI NELLO SVOLGIMENTO DEL PROGRAMMA DI RICERCA

- Elaborazione cartografica dei dati sui depositi superficiali e sulle isoipse della pianura:
Gruppo di lavoro per la Carta Geomorfologica della Pianura Padana;
A. Bondesan, Dipartimento di Geografia, Università degli Studi di Padova.
- Raccolta e restituzione cartografica dei dati idrogeologici:
Singea s.r.l., Ravenna.
- Elaborazione digitale della base topografica dai tipi T.C.I. e digitalizzazione dati:
U. Crucillà - Settore Cartografia Numerica, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- Elaborazione informatica dei dati:
M. De Amicis, B. Floris - Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università degli Studi di Milano, e Centro di Studio per la Geodinamica Alpina e Quaternaria, C.N.R., Milano.
- Elaborazioni informatiche per la rappresentazione cartografica e la preparazione alla stampa:
Disegni e cartografia digitale: S. Falcetti, D. Tacchia;
Coordinamento cartografico: E. Cirese;
Procedure: R. Ventura.
Ufficio Informatica e Produzione Editoriale
Servizio Geologico Nazionale, Roma.