

Ricerca sulla vulnerabilità naturale e sul rischio di inquinamento delle acque sotterranee nella Pianura Padana e Veneto Friulana

A research on groundwater natural vulnerability and contamination risk in the Po and Veneto - Friuli Plain

GIUSEPPE GIULIANO (*), GIANLUIGI MARIA MARI (**), ANGELO CAVALLIN (***), MATTIA DE AMICIS (***)

RIASSUNTO. – Il lavoro riferisce di alcuni risultati conseguiti in una ricerca sulla vulnerabilità e sul rischio di inquinamento delle acque sotterranee della pianura padana e veneto friulana promossa congiuntamente dall'Istituto di Ricerca sulle Acque del CNR e dal Servizio Geologico Nazionale e svolta dalle Istituzioni medesime in collaborazione con il Centro di Studio per la Geodinamica Alpina e Quaternaria del CNR.

I prodotti principali della ricerca sono rappresentati da tre cartografie originali, in scala 1:500.000, dell'area esaminata relative ai tematismi dell'infiltrabilità, delle caratteristiche del sistema idrogeologico e della vulnerabilità naturale (valutata secondo il metodo DRASTIC normale o standard). Sono presentati inoltre, in forma sintetica, i risultati di un'indagine sperimentale sull'applicazione all'area di studio (oltre 45.000 km²) di differenti procedure e metodologie per la mappatura della vulnerabilità; sono stati impiegati il metodo DRASTIC con differenti configurazioni di parametri e di pesi, il metodo SINTACS ed un metodo del tipo CNR-GNDICI applicato a scala regionale.

I dati utilizzati sono quelli disponibili all'inizio della ricerca sull'intera area di studio, riconducibili agli studi IRSA, opportunamente revisionati ed aggiornati, al Modello Strutturale d'Italia del CNR per gli aspetti idrogeologico-strutturali, all'attività di studio del Gruppo di lavoro per la Carta Geomorfologica per gli aspetti morfologici e di tessitura dei depositi superficiali, ed all'attività conoscitiva di vari Enti e Istituzioni per gli aspetti idrodinamici delle acque sotterranee.

Nella ricerca è stato fatto uso estensivo degli strumenti informatici e dei sistemi informativi territoriali (SIT), dalla raccolta e georeferenziazione dei dati, alla costruzione di banche dati, all'elaborazione finalizzata dei dati, alla restituzione automatizzata dei risultati e alla produzione delle cartografie tematiche.

PAROLE CHIAVE: acquiferi, vulnerabilità all'inquinamento, idrogeologia, acque sotterranee, cartografia tematica, sistemi informativi territoriali, pianura padana e veneto-friulana, Italia.

ABSTRACT. – The paper concerns some results obtained in a research on natural vulnerability and contamination risk of groundwater in the Po and Veneto-Friuli Plain.

The research has been promoted by the Water Research Institute (IRSA) of the National Research Council (CNR) conjunctively with the National Geological Survey (SGN) and carried out by the two Institutions in collaboration with the Study Centre for the Alpine and Quaternary Geodynamics of CNR.

The products, here presented, consist in three original maps (scale 1:500.000) concerning regional infiltrability, regional features of the hydrogeological system and natural vulnerability (according to the standard DRASTIC method). The results of an experimental study on the application to the study area (45.000 km²) of different procedures and methods of vulnerability evaluation and mapping are also presented in a concise form. The DRAS-

(*) Istituto di Ricerca sulle Acque (IRSA) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.), via Reno, 1, 00198 Roma

(**) Servizio Geologico Nazionale, Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali, via Curtatone 3, 00185 Roma

(***) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università degli Studi di Milano, e Centro di Studio del CNR per la Geodinamica Alpina e Quaternaria - Sezione di Geologia Ambientale, via Emanuelli 15, 20132 Milano.

TIC method, with different parameters and weights patterns, the SINTACS method and a method according to CNR-GNDICI criteria, fitted to a regional scale analysis, were applied.

The data used for the research are those promptly available all over the area originating from a previous IRSA study, revised and updated, as well as from the Structural Model of Italy of CNR for hydrogeological features, from the studies of the Working Group for the Geomorphological Map of the Plain for morphological and surface deposits textural features, and from the activity of several Institutions for groundwater hydrodynamics.

Computer devices and GIS tools were extensively used throughout the research from the collection and georeferentiation of data, to data bases development, to data processing, to output production and thematic mapping.

KEY WORDS: aquifers, vulnerability to contamination, hydrogeology, groundwater, thematic mapping, GIS, Po and Veneto-Friuli Plain, Italy.

1. – INTRODUZIONE

L'Istituto di Ricerca sulle Acque del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IRSA - C.N.R.) ed il Servizio Geologico Nazionale (SGN) hanno promosso ed avviato, a partire dal 1990, una ricerca finalizzata alla realizzazione di cartografie sperimentali della vulnerabilità e del rischio di inquinamento del sistema acquifero padano e veneto-friulano.

Questo sistema acquifero assume un ruolo strategico nell'approvvigionamento idrico del territorio afferente, con particolare riferimento alle utilizzazioni idropotabili, e riveste anche un notevole interesse sul piano scientifico in relazione alla complessità delle condizioni idrogeologiche ed ambientali.

I numerosi casi di inquinamento delle acque sotterranee che si sono manifestati nel recente passato, spesso rilevanti per estensione e durata dei fenomeni e per abitanti complessivamente coinvolti, hanno confermato la necessità di promuovere iniziative di ricerca finalizzate alla analisi delle condizioni di vulnerabilità naturale o intrinseca e del rischio di inquinamento del sistema acquifero, anche in considerazione delle recenti disposizioni normative relative alla difesa del suolo ed alle risorse idropotabili (L. 183/89; L.36/94; DPR 18/7/95; DPCM 4/3/96).

Con riferimento alla domanda conoscitiva proveniente dal comparto istituzionale, caratterizzata da una spiccata valenza programmatica, ed in relazione ai compiti istituzionali dell'IRSA – organo di ricerca e consulenza scientifica – e del Servizio Geologico Nazionale – organo cartografico dello Stato – la ricerca ha assunto una preminente connotazione me-

todologica e sperimentale. Essa si è sviluppata in una area caratterizzata da un elevato profilo in termini di pianificazione sovragiografica ed a scala di bacino e dalla presenza di un cospicuo patrimonio di dati e di conoscenze già disponibili, derivanti in gran parte dagli studi condotti nella seconda metà degli anni '70 dall'IRSA in collaborazione con le università interessate (IRSA, 1976; 1980) e dalle indagini finalizzate svolte dagli enti locali (ad es. IDROSER, 1988).

L'attività di ricerca è stata realizzata in collaborazione con il Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio della Università degli Studi di Milano e con il Centro di Studio per la Geodinamica Alpina e Quaternaria del CNR di Milano. Su specifiche tematiche di ricerca, di fondamentale importanza sono stati i contributi scientifici forniti dai Politecnici di Torino e di Milano, dall'Università di Modena, dal Presidio Multizonale di Prevenzione - A.S.L. di Modena e dall'Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato (IPZS).

Una raccolta esemplificativa ed in scala ridotta delle cartografie tematiche prodotte nell'ambito della ricerca è contenuta negli Atti di una apposita Giornata di Studio organizzata recentemente a Milano (IRSA, 1996). Tutte le cartografie sono disponibili in scala ridotta 1:1.000.000; peraltro alcune di maggiore rilevanza in ambito idrogeologico e pianificatorio, particolarmente significative dell'intero programma di ricerca, sono state stampate nella scala originale 1:500.000 a cura del Servizio Geologico presso l'Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato.

Il presente lavoro si rivolge alla presentazione di queste ultime cartografie.

2. – AREA DI STUDIO: INQUADRAMENTO TERRITORIALE E GEOAMBIENTALE

L'area di studio comprende la pianura padana e le sue estensioni verso NE – la pianura veneta e friulana – e verso SE – la pianura romagnola. Essa ospita il sistema fluviale del Po, a partire dal margine della pianura fino alla foce, ed i tratti inferiori di numerosi corsi d'acqua alpini ed appenninici che recapitano direttamente nell'alto Adriatico, tutti però di minore importanza per sviluppo dei bacini idrografici e per portate (fig. 1). Il perimetro dell'area è costituito dalla linea di costa verso il mare Adriatico e dal limite pianura – rilievi lungo il margine alpino ed appenninico: esso pertanto si adatta alle diverse condizioni geomorfologiche presenti nei differenti settori geografici.

L'area oggetto di studio ha una estensione di circa 45.000 km², comprende le zone di pianura delle regioni Piemonte, Lombardia, Emilia Romagna, Veneto,

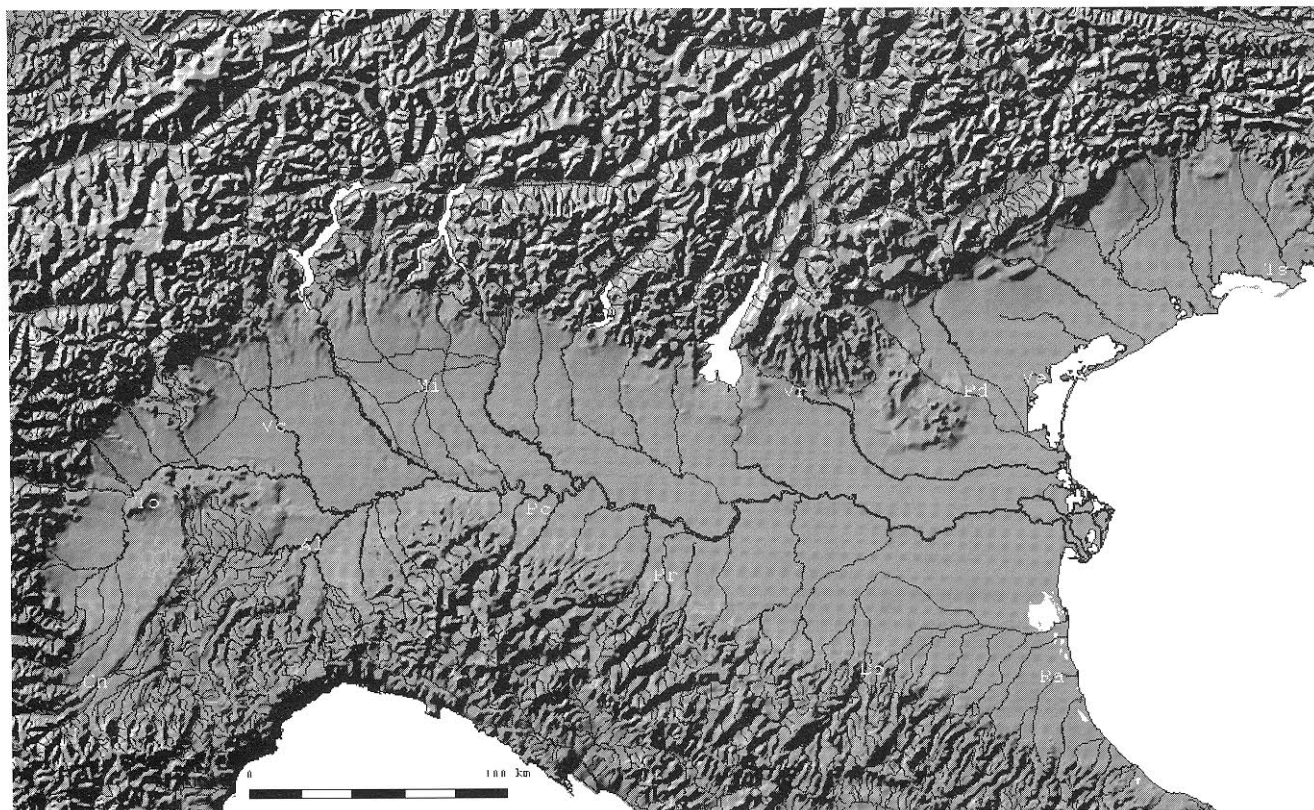


Fig. 1. – Modello digitale del terreno (DTM) dell'areale di studio.
– *Digital Terrain Model (DTM) of the study area.*

Friuli-Venezia Giulia e afferisce territorialmente ad oltre 2100 Comuni. Dalle valutazioni tematiche e dalle rappresentazioni cartografiche sono state escluse le aree relative ai rilievi interni alla pianura (Berici, Euganei, etc.) e i corpi idrici interni con maggiori dimensioni (Valli di Comacchio, laghi di Mantova, laghi lombardi, etc.).

Nella pianura esaminata è presente una delle più elevate concentrazioni di attività civili ed economiche (industriali, agricole e zootecniche) d'Europa; esse rappresentano un rilevante potenziale di contaminazione delle risorse idriche sotterranee, sia in termini di occupazione ed uso del suolo che in relazione allo smaltimento dei rifiuti solidi e liquidi.

Alcune caratteristiche insediative dell'area oggetto di studio sono presentate in Tab. 1 e confrontate con quelle del bacino del Po – che rappresenta l'elemento fisiografico di maggiore rilevanza dell'Italia settentrionale – e dell'intero territorio nazionale (GIULIANO, 1996).

La popolazione residente, per il 90% concentrata nei centri urbani, è di 19 milioni di abitanti e co-

stituisce il 33% del totale nazionale. La densità di popolazione risulta di 364 abitanti/km² con valori di oltre 940 abitanti/km² per le aree urbane, mentre nelle zone agricole si attesta su un valore di 63 abitanti/km².

La superficie agricola utilizzata si estende per oltre il 65% dell'area e rappresenta un quinto (21%) del valore nazionale. Gli allevamenti zootecnici, anche solo considerando i capi bovini, ovini e suini, hanno una consistenza di circa 11 milioni di capi, con una densità media di 330 capi/km² di superficie agricola. Le attività manifatturiere a carattere idroesigente coinvolgono 3,2 milioni di addetti, pari al 54% del totale nazionale, distribuiti in 260.000 unità locali.

In termini di abitanti equivalenti totali, il carico inquinante potenziale dell'area è dell'ordine di 118 milioni di unità, con una densità di carico di 2261 unità/km². Il comparto industriale e quello zootecnico contribuiscono al carico inquinante potenziale dell'area con aliquote analoghe, dell'ordine di 50 milioni di unità ciascuno.

TAB. 1. - *Alcune caratteristiche sintetiche dell'areale esaminato*
 - Several global characteristics of the study area

Caratteristiche	u. m.	Areale	Bacino Po	Italia
Superficie territoriale (SUP TER)	km ²	52.089 (17%)	67.217 (22%)	301.268
Comuni	n	2.153 (27%)	3.116 (39%)	8.086
Popolazione residente (POP RES)	n 10 ³	18.940 (33%)	15.457 (27%)	56.557
Addetti industriali (ADD TOT)	n 10 ³	3.191 (54%)	2.717 (48%)	5.941
Superficie agricola utilizzata (SAU TOT)	km ²	33.104 (21%)	32.034 (20%)	158.481
Capi animali	n 10 ³	10.981 (43%)	9.658 (38%)	25.393
Abitanti equivalenti industriali	n 10 ³	48.705 (51%)	41.280 (43%)	95.996
Abitanti equivalenti zootecnici	n 10 ³	50.137 (49%)	44.233 (43%)	102.137
Abitanti equivalenti totali (AET)	n 10 ³	117.783 (46%)	100.970 (40%)	254.689
(ADD TOT/POP RES) 100	%	16,8 (160%)	17,6 (168%)	10,5
(SAU TOT/SUP TER) 100	%	63,5 (121%)	47,7 (91%)	52,6
Densità popolazione	n/km ²	364 (194%)	230 (122%)	188
Densità industriale	n/km ²	61 (305%)	40 (200%)	20
Densità zootecnica	n/km ²	330 (206%)	300 (188%)	160
Densità AET	n/km ²	2.261 (268%)	1.502 (178%)	845

Le percentuali tra parentesi sono riferite al valore nazionale

Per quanto concerne l'uso del suolo (fig. 2) in tutta la pianura padana, veneta e friulana sono ampiamente rappresentate le aree a seminativo prevalente, comprendente una varietà di colture alternate e stabili. Le aree a vocazione colturale particolare si individuano nel comprensorio vercellese e novarese, con risaie prevalenti, e nella parte centrale ed orientale della pianura emiliano-romagnola, con vigneti e/o frutteti dominanti o associati a foraggiere.

Sotto il profilo dell'occupazione insediativa del suolo spicca l'impressionante estensione raggiunta dall'urbanizzazione in Lombardia, ove Milano ed i centri satelliti costituiscono, nell'insieme, un unico esteso agglomerato urbano, che copre una cospicua parte dell'alta pianura. Un intenso processo di urbanizzazione si osserva anche nella regione Veneto, fra Padova, Treviso e Mestre con tipiche geometrie radiali, nella regione Emilia Romagna secondo allineamenti multipolari NO-SE ed infine nell'agglomerato urbano del torinese. Sul fronte appenninico una estesa fascia dell'alta pianura centro emiliana è occupata da una conurbazione policentrica (Bologna, Modena, Reggio Emilia e Parma).

Una situazione di occupazione continua del territorio, ma con intensità di livello subordinato, si registra anche su alcuni settori dell'alta pianura lombarda e veneta, a ridosso del bordo del rilievo alpino, e della pianura romagnola. Sul resto del territorio si individuano numerose altre polarità che in genere però non riescono a saldarsi tra loro e quindi non producono aggregati significativi a scala territoriale. Le aree urbane rappresentano il 3,4% del totale dell'areale esaminato.

Il sistema acquifero ospitato nel sottosuolo della pianura padana, veneta e friulana rappresenta la

principale fonte di approvvigionamento potabile delle popolazioni insediate nell'area, con un volume di acqua annualmente estratto dal sottosuolo dell'ordine di 2×10^9 m³; il prelievo si realizza attraverso pozzi diffusi nel territorio o raccolti in centri di pompaggio in relazione alle caratteristiche locali delle reti acquedottistiche. Il prelievo dai pozzi contribuisce al fabbisogno idropotabile dell'area per l'82%, mentre le sorgenti, prevalentemente concentrate negli ambiti idrografici montani, contribuiscono per circa il 15%.

L'emungimento ad uso potabile delle acque sotterranee nella pianura viene effettuato in gran parte attraverso pozzi privati o di tipo comunale (con una densità fino a 10 pozzi per km²), dal momento che le reti acquedottistiche sono di norma frammentate e con una gestione prevalentemente a scala locale. Solo in un numero limitato di casi si è in presenza di grandi utenze cui corrispondono reti complesse, organizzate a scala comprensoriale (PASSINO, 1993).

Secondo stime recenti la sommatoria dei volumi di acque sotterranee utilizzati da parte delle varie tipologie d'utenza (civile, industriale, irrigua) è oggi valutabile intorno a $6,0 \cdot 10^9$ m³ con decisa prevalenza dell'utilizzo irriguo (o comunque agrozootecnico).

Sul territorio padano soprattutto negli anni '50 - '60 si è realizzato un poderoso insediamento residenziale e produttivo che è responsabile, più o meno direttamente, del progressivo degrado qualitativo dei corpi idrici sotterranei. Tale condizione è stata favorita dalla scarsa sensibilità ai problemi ambientali in un periodo di tumultuoso sviluppo economico, dalla debole strumentazione normativa e dall'insufficiente sistema infrastrutturale di prevenzione dell'inquinamento.

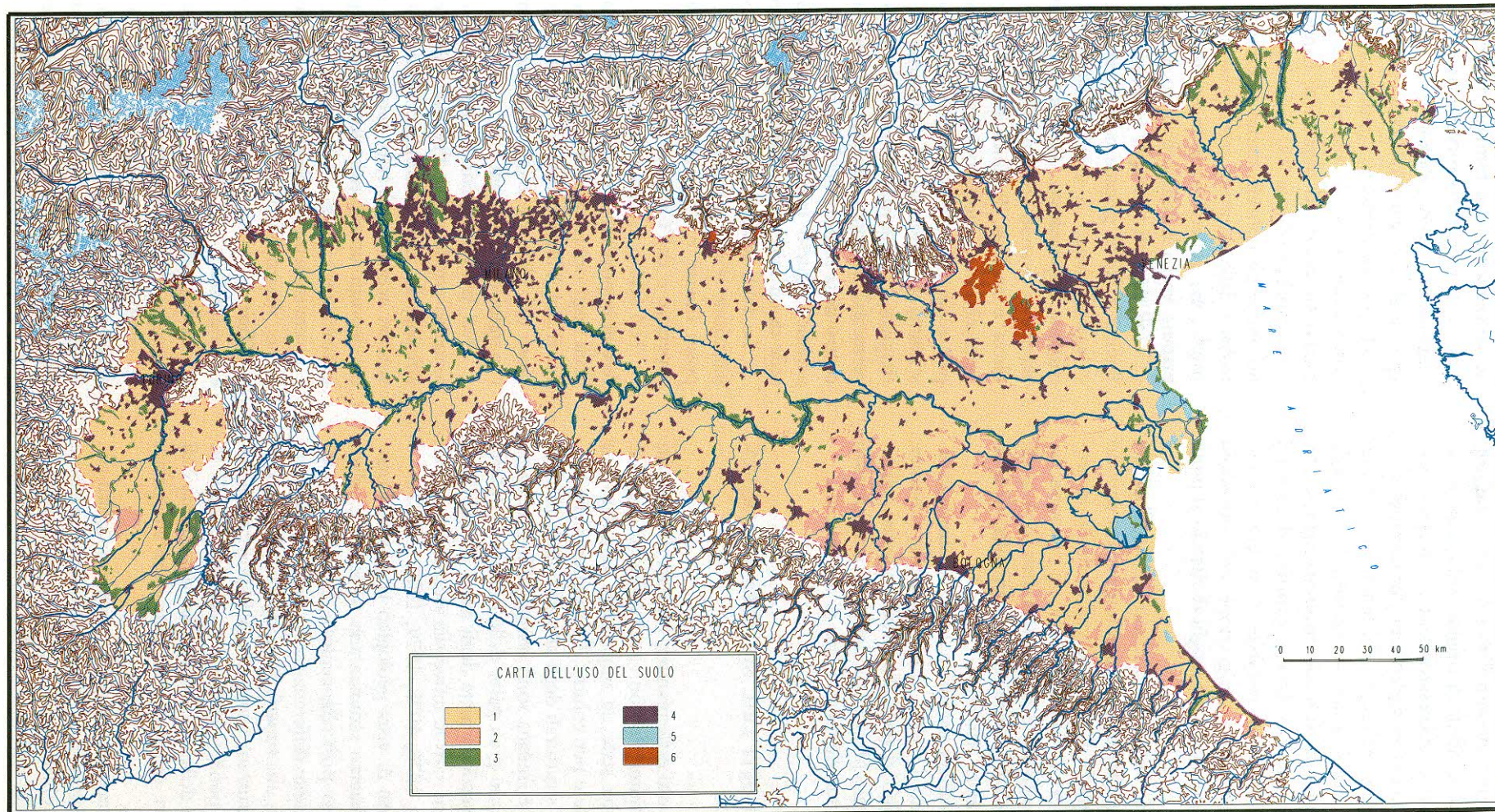


Fig. 2. – Carta dell'uso del suolo. Legenda: 1 - risaie e/o seminativi e foraggere prevalenti; 2 - Vigneti e frutteti prevalenti; 3 - aree cespugliate, vegetazione palustre, boschi di latifoglie, pioppeti; 4 - aree urbanizzate; 5 - laghi e paludi; 6 - rilievi interni alla pianura.

– Soil utilization map. Legend: 1 - prevalent rice-fields and/or crops and fodders; 2 - prevalent vineyards and orchards; 3 - bushes, marsh vegetation, deciduous forest, poplar-groves; 4 - urban areas; 5 - lakes and swamps; 6 - relieves in the plain.

Lo smaltimento incontrollato sul suolo e nel sottosuolo di reflui e rifiuti di origine industriale avvenuto nel passato e, successivamente, l'eccessivo uso di sostanze chimiche in agricoltura (fertilizzanti, erbicidi, pesticidi) sono all'origine dei fenomeni di contaminazione dei corpi idrici sotterranei, la cui reale consistenza e gravosità si rende manifesta mano a mano che si realizzano più rigorosi controlli delle fonti di approvvigionamento potabile e si esauriscono i tempi necessari per la migrazione nel sottosuolo delle sostanze inquinanti dai luoghi di rilascio ai punti di controllo.

Tra i fattori che contribuiscono all'estendersi del degrado della qualità dell'acqua sotterranea si devono ricordare le migliaia di pozzi scavati in modo improprio che mettono in comunicazione gli orizzonti acquiferi più superficiali, e spesso inquinati, con quelli più profondi, relativamente più protetti sulla verticale per loro condizioni naturali.

Anche le attività estrattive hanno considerevolmente aumentato il rischio di inquinamento mediante l'escavazione fino al tetto dei livelli acquiferi, eliminando la naturale protezione dell'orizzonte insaturo e dei processi autodepurativi che vi si esplicano.

3. – LINEAMENTI DEL SISTEMA IDROGEOLOGICO

Nel sottosuolo della pianura, formata dai depositi alluvionali del fiume Po con i suoi affluenti e di altri corsi d'acqua, ha sede un importante acquifero per continuità areale e per volume. Le caratteristiche litostratigrafiche e strutturali degli acquiferi della pianura padana, veneta e friulana sono ormai sufficientemente note e derivano in gran parte dalle ricerche condotte a partire dalla seconda metà degli anni '70 dall'IRSA in collaborazione con le università ricadenti nell'area di studio (IRSA, 1976, 1978, 1979, 1980 e 1981).

Da un punto di vista geologico la pianura corrisponde ad un bacino sedimentario fortemente subsidente (avanfossa post-oligocenica), anche se in maniera marcatamente differenziata: la base del Pliocene presenta, infatti, una superficie molto articolata e controllata dalle strutture tettoniche del substrato, e supera in alcuni punti i 6.000 metri di profondità; lo spessore medio della successione plio-quadernaria è di circa 3500 metri, di cui oltre la metà sono attribuibili al Quaternario.

La sedimentazione del dominio marino (golfo padano) è generalizzata e continua dal Pliocene inferiore (ciclo Pliocene-Quaternario) e si conclude mediamente con la fine del Pleistocene inferiore-medio, anche

se, ovviamente, tale termine non è sincrono in tutta l'area e si registrano successivamente diversi cicli di ingressione e regressione in concomitanza dei diversi episodi glaciali (almeno 4 cicli principali). Anche i depositi prevalentemente continentali di chiusura, che corrispondono per lo più all'intervallo pleistocenico medio-superiore ed olocenico, hanno uno spessore assai variabile (fino a 300 metri e oltre, comprendendo anche gli episodi marini intercalati), ancora controllato dalle strutture tettoniche del substrato profondo, ma generalmente crescente dai margini della pianura verso il centro e verso il mare.

Tali depositi sono per la maggior parte di origine fluviale e fluvio-glaciale nella zona pedealpina, litorali e lagunari lungo la costa adriatica e talora lungo il margine appenninico. Essi formano una complessa alternanza di strati ghiaiosi, sabbioso-ghiaiosi, sabbiosi, siltosi e argillosi. In linea generale, le litofacies più permeabili si distribuiscono lungo l'alta pianura pedealpina e lungo quella pedeappenninica, anche se in quest'ultima le intercalazioni limo-argillose risultano più frequenti. I sedimenti diventano via via più fini, con permeabilità proporzionalmente decrescente, verso il centro della pianura del Po e verso la linea della costa adriatica. Questi imponenti depositi quaternari sono sede di un importante e complesso sistema acquifero.

Le falde acquifere utilizzate o suscettibili di utilizzazione sono in massima parte contenute nei depositi fluviali e fluvio-glaciali del Pleistocene medio superiore e dell'Olocene.

Nel settore occidentale della pianura falde acquifere di importanza prevalentemente locale sono reperibili negli orizzonti permeabili dei depositi fluvio-lacustri del Villafranchiano e nelle intercalazioni sabbiose del Pliocene e del Pleistocene inferiore lungo i margini della pianura.

Nel settore appenninico le formazioni prevalentemente argillose del Pliocene e/o del Pleistocene inferiore in facies marina costituiscono la base del sistema acquifero. Verso ovest essa è rappresentata dai depositi lacustri prevalentemente argillosi del Villafranchiano. Lungo il margine alpino il substrato è essenzialmente costituito da formazioni preplioceniche: magmatiti e metamorfiti nel settore a ovest del Ticino e rocce sedimentarie nella zona centrale ed orientale.

La base dell'acquifero secondo una stretta accezione del termine non corrisponde ad un limite fisico-geologico ben preciso, ma piuttosto all'interfaccia acque dolci - acque «salate» di fondo, il cui andamento è a sua volta controllato dalle strutture tettoniche sepolte, che determinano fenomeni di «squeezing» differenziato delle acque connate.

In alcune aree (culminazioni di anticlinali sepolte) poste anche al centro della pianura, lo spessore dell'acquifero si riduce anche a meno di 50 metri, mentre altrove, per lo più in corrispondenza di sinclinali, raggiunge i 700 metri (province di Modena e Mantova). Si può stimare che lo spessore medio dell'acquifero sia di circa 300 metri.

Da un punto di vista strutturale ed a scala regionale, l'acquifero padano, veneto e friulano costituisce un sistema «monostrato» (CASTANY & MARGAT, 1977) anche se in ampi tratti, soprattutto al centro della pianura e presso la linea di costa, esso appare nettamente suddiviso in più strati. Ai piedi delle catene delle Alpi e dell'Appennino, le ghiaie e sabbie dei depositi fluviali e fluvio-glaciali formano uno strato indifferenziato, spesso senza coperture a bassa permeabilità e con falda libera. Verso valle esso si suddivide in più strati («monostrato compartimentato»), presenta consistenti coperture limo-argillose a bassa permeabilità ed è caratterizzato, quasi ovunque, da falde in pressione.

Nella parte centrale della pianura padana e in quella costiera le acque, entro i pozzi, risultano salienti, talora anche fino ad oltre il piano di campagna. Nella zona di mare prospiciente le coste è possibile rinvenire acque dolci sino a circa 300 m al di sotto del livello marino. Lungo la linea di riva (delta del Po, pianura di Ravenna e Ferrara) l'acqua marina tende ad ingredire e salare gli orizzonti freatici più superficiali (PELLEGRINI, 1991; IRSA, 1981).

Acque salate si diffondono praticamente sino alla superficie topografica nella bassa pianura modenese e dell'Oltrepò Mantovano, dai sedimenti marini del substrato sollevati a poche decine di metri di profondità, in corrispondenza del fronte sepolto della catena appenninica («dorsale ferrarese», S. Colombano al Lambro).

Localmente, connesse con particolari condizioni strutturali, si rinvenivano acque calde, anche oggetto di sfruttamento ed utilizzazione ai fini termali (Abano Terme, etc.).

L'acquifero viene ricaricato dalle precipitazioni, dalle acque irrigue e da quelle dei corsi d'acqua, in maniera differenziata nei diversi settori. Tenendo conto della distribuzione dei depositi, si può affermare che l'alimentazione della falda avviene, soprattutto, nell'alta pianura. Le infiltrazioni efficaci delle acque meteoriche possono raggiungere anche il 25-30% del totale annuo, naturalmente in funzione della permeabilità dei terreni affioranti e delle condizioni meteorologiche locali. Le dispersioni della rete dei canali irrigui costituiscono, soprattutto nella pianura piemontese e lombarda, un'aliquota fonda-

mentale della ricarica della falda freatica (GIULIANO & PELLEGRINI, 1993).

Per quanto riguarda i rapporti con le catene montuose circostanti e con i corsi d'acqua la situazione appare molto differenziata nei diversi settori. Scambi idrici con gli acquiferi posti al contorno sono possibili ed accertati solo per la pianura nord orientale ai piedi delle Alpi, per la presenza di massicci carbonatici fessurati e spesso di tipo carsico; in altri settori (ad esempio Piemonte meridionale), questi scambi hanno carattere episodico e locale o sono del tutto assenti (pianura sud, presso il margine appenninico).

Nella pianura piemontese e lombarda (settore nord ovest), per la presenza di depositi alluvionali terrazzati con superfici anche notevolmente rilevate rispetto ai fondi vallivi (sino a 50 metri), si hanno importanti acquiferi freatici superficiali che sono drenati dai corsi d'acqua.

Nella pianura veneta e pedeappenninica, in relazione alle diverse condizioni morfologiche, i corsi d'acqua disperdono le loro portate nel materiale estremamente permeabile di subalveo, in corrispondenza del settore apicale delle conoidi agli sbocchi vallivi. Insieme ai canali irrigui, i corsi d'acqua svolgono un ruolo determinante ai fini dell'alimentazione dell'acquifero, contribuendo quasi ovunque per almeno il 30% alla costituzione delle riserve idriche.

In gran parte della pianura pedea alpina, molto più limitatamente in quella pedeappenninica, tra il Parmense e il Modenese, la falda, in corrispondenza di variazioni di trasmissività dei depositi alluvionali, emerge sotto forma di risorgive o «fontanili», cioè di sorgenti isolate o costituenti una fascia continua di emergenze idriche che esercitano una azione di drenaggio della falda superficiale ed alimentano una fitta rete idrografica.

Tutta l'alta pianura posta ai piedi delle catene, per caratteristiche di permeabilità dei depositi superficiali, per la presenza di un acquifero affiorante o subaffiorante e per condizioni di ricarica della falda, appare caratterizzata da un elevato grado di vulnerabilità: d'altra parte proprio in questa parte di pianura si registrano i più elevati valori di trasmissività e, in assenza di fenomeni di inquinamento, si estrae l'acqua migliore da un punto di vista qualitativo.

Nella parte centrale della pianura e presso la linea di costa gli orizzonti acquiferi in pressione sono senz'altro, almeno in parte, rialimentati per fenomeni di drenanza attraverso «acquitardi» semipermeabili, o per limitati contatti fisici diretti tra mezzi a permeabilità significativa, per cui si registrano tempi molto lunghi di permanenza dell'acqua nel sottosuolo (anche oltre 25.000 anni nel Ravennate; VENTURINI *et alii.*, 1990b).

Lo strato costituito da materiali permeabili ed acquifero, solitamente intercettato dai pozzi idrici, ha generalmente uno spessore ridotto (rispetto allo spessore totale dei sedimenti) per lo più nei primi 50-150 m di profondità, ove cioè si hanno le condizioni di ricarica immediata, ed ospita acqua di falda con scarse modificazioni chimiche rispetto a quella di infiltrazione.

Per condizioni idrogeologiche, di trasmissività (acquiferi più produttivi) e di qualità delle acque, i pozzi più importanti per gli usi idropotabili sono situati nei settori della alta pianura alpina e appenninica, laddove si hanno anche i maggiori centri urbani, la massima densità di popolazione e le attività produttive industriali ed agricole più rilevanti. Frequentemente i centri di emungimento che erano stati originariamente localizzati nelle aree periferiche, oggi ricadono all'interno del tessuto urbano.

Si viene pertanto a delineare una coincidenza tra insediamenti residenziali e produttivi, e cioè le fonti di inquinamento, aree idrogeologicamente ottimali per l'estrazione e, quindi, i centri di prelievo più importanti delle acque sotterranee ad uso acquedottistico.

Da un punto di vista gestionale i maggiori problemi derivano dal fatto che i punti di captazione sono molto dispersi nel territorio, spesso localizzati in aree densamente popolate, con conseguente difficoltà per lo svolgimento di una corretta azione di tutela (CIVITA, 1994a).

Sotto il profilo chimico le acque sotterranee dei livelli superficiali sono classificabili in generale come bicarbonato-calciche con residuo fisso e durezza aventi un certo grado di variabilità. In generale, residuo e durezza sono più bassi nel settore alpino occidentale (residuo fisso compreso tra 200 e 400 mg/l, durezza tra 5 e 15 °F) rispetto a quello alpino orientale ed appenninico (residuo compreso tra 400 e 900 mg/l, durezza tra 25 e 50 °F).

Negli orizzonti più profondi, in pressione, soprattutto nella parte centrale della pianura e presso la costa, in relazione con gli elevati tempi di permanenza delle acque nel sottosuolo, si instaurano potenziali ossidoriduttivi bassi o negativi con insorgenza di facies idrochimiche particolari caratterizzate da elevate concentrazioni di NH_4 , Fe, Mn, abbondantemente superiori ai limiti fissati per le acque potabili: si stima che almeno il 30% della riserva idrica sotterranea della Pianura Padana sia purtroppo caratterizzata da queste condizioni chimiche naturali sfavorevoli.

I problemi di inquinamento antropogenico più caratteristici del territorio padano si riferiscono soprattutto a quattro gruppi di sostanze: i composti organo-clorurati, i metalli pesanti, i nitrati, i fitofarmaci. I primi due gruppi sono evidentemente connessi

a fonti inquinanti di tipologia puntuale e di natura industriale; gli altri fanno riferimento prevalentemente a situazioni di tipo estensivo e diffuso legate all'uso agricolo e zootecnico (GIULIANO & PELLEGRINI, 1993).

Un altro aspetto dell'inquinamento delle acque sotterranee, rilevato recentemente nell'area oggetto di studio, è relativo alla comparsa nei pozzi ad uso potabile nella fascia centro-meridionale della pianura di sostanze non desiderabili, quali l'arsenico, presumibilmente mobilizzate dalle zone più profonde del serbatoio acquifero o nei livelli acquiferi interessati dall'emungimento per modificazioni dell'ambiente geochimico generale (ZAVATTI, 1990; ZAVATTI *et alii*, 1995).

4. - CARATTERISTICHE GENERALI DELLA RICERCA

4.1 - FINALITÀ E PRODOTTI

In considerazione della estensione e complessità del sistema idrogeologico e della diversificazione delle situazioni geoambientali, la ricerca, finalizzata alla produzione di cartografie sinottiche a valenza regionale, è stata imposta e realizzata con un approccio di tipo metodologico e speculativo basato sulla valorizzazione dei dati disponibili per i diversi comparti tematici, anche se con diverso grado di aggregazione ed affinamento. Infatti non sarebbe stato sostenibile l'onere relativo ad una attività sistematica di raccolta dati sull'intero areale progettuale mantenendo per tutti i tematismi la stessa significatività spaziale e rappresentatività areale. Inoltre tale attività avrebbe interessato un arco di tempo pari o superiore a quello previsto per il progetto e comunque sarebbe stata immotivata sotto il profilo delle competenze e delle finalità istituzionali dell'IRSA. Tale attività trova la sua naturale collocazione all'interno dei Servizi Tecnici dello Stato, dei vari Enti locali e di tutti gli Enti preposti istituzionalmente alla gestione e salvaguardia del territorio.

Pertanto è stato deciso che gli elementi informativi da utilizzare per la ricerca dovevano essere prevalentemente quelli esistenti, disponibili presso gli istituti promotori e derivanti da attività di ricerca pregresse e/o in corso di completamento, presso gli Enti di ricerca pubblici, in forma opportunamente aggregata, presso gli Enti di governo locale, e infine presso Enti pubblici di livello nazionale a carattere tematico e/o settoriale.

Fondamentali sono risultati i contributi originali ed i dati inediti forniti dalla rete di istituzioni scientifiche che insistono sul territorio esaminato, in particolare quelle universitarie, che hanno consentito di raggiungere, specialmente nel settore idrogeologico,

risultati di particolare interesse per completezza ed attualità (GIULIANO, 1996).

In linea generale, quindi, la realizzazione delle cartografie tematiche sinottiche è stata effettuata utilizzando documenti della stessa tipologia o riassuntivi di documentazioni analitiche, ma comunque in scala numericamente inferiore.

Le caratteristiche delle fonti delle informazioni ed il livello di attendibilità dei dati di base, unitamente alle procedure di verifica che sono state attuate – in particolare il confronto tra fonti diverse, l'incrocio dei dati, le campionature – garantiscono, con riferimento alla scala di lavoro, una generale buona qualità delle informazioni utilizzate per le elaborazioni cartografiche. Se si prendono in esame le caratteristiche di omogeneità e rappresentatività dei dati ed il grado di copertura territoriale, le informazioni utilizzate possono senza dubbio essere considerate «le migliori» disponibili sull'intera area di studio.

Gli elementi informativi relativi ai diversi tematismi, reperiti in forma e scala originale differenziata, ma sempre numericamente inferiore, sono stati ricondotti alla scala di rappresentazione 1:500.000, in linea con la finalità e con le caratteristiche principalmente pianificatorie dello studio effettuato.

Le metodologie di georeferenziazione sulla base cartografica di riferimento, utilizzate nelle operazioni di trasferimento di strati informativi di maggiore o uguale dettaglio, insieme alla generale qualità delle informazioni disponibili, garantiscono della rispondenza territoriale e topografica degli elementi informativi stessi.

Una attività specifica di raccolta e di elaborazione di dati è stata realizzata per alcune aree nelle quali gli elementi di conoscenza relativi all'approvvigionamento idropotabile, alla qualità di base ed alla contaminazione delle acque sotterranee erano particolarmente carenti o addirittura inesistenti.

In generale, la ricerca ha consentito di definire una serie di quadri conoscitivi, sia pure di carattere generale, relativi alle caratteristiche naturali del sottosuolo, alla distribuzione ed alla tipologia delle attività umane, ed ai carichi inquinanti ad esse connessi; essi possono essere utilizzati dalle Autorità di bacino e dalle Regioni per la valutazione di differenti ipotesi di pianificazione territoriale con specifico riferimento alla gestione ed alla tutela delle acque sotterranee.

Le principali finalità operative della ricerca possono essere così sintetizzate (GIULIANO, 1996):

- esplorare i percorsi metodologici della costruzione di cartografie sinottiche a valenza regionale della vulnerabilità naturale o intrinseca e del rischio di degrado qualitativo delle risorse idriche sotterranee;

- valutare la potenzialità di differenti metodologie di valutazione della vulnerabilità e la loro applicabilità a sistemi idrogeologici complessi caratterizzati da un forte impatto antropico;

- sperimentare l'impiego di metodologie e strumenti informatici per la gestione dinamica di sistemi integrati di valutazione (banche dati georeferenziate - modelli interpretativi - elaborazioni - restituzione dei risultati);

- individuare le condizioni necessarie per la utilizzazione delle valutazioni in ambito istituzionale, ed i requisiti per una eventuale standardizzazione delle procedure ai fini normativi.

Nel complesso, con la realizzazione della ricerca si è voluto integrare e coniugare le caratteristiche di vulnerabilità naturale delle strutture acquifere, quelle di pressione antropica e di carico inquinante potenziale che insiste sul territorio e di distribuzione delle infrastrutture di approvvigionamento, derivandone una valutazione della criticità e del potenziale di degrado qualitativo per le acque sotterranee utilizzate ai fini idropotabili.

I prodotti della ricerca sono costituiti da una serie di rappresentazioni cartografiche relative a tematismi integrati e complessi, quali ad esempio l'assetto idrogeologico regionale e la vulnerabilità naturale degli acquiferi, e da rappresentazioni cartografiche relative a tematismi di maggiore e specifica rilevanza settoriale, quali le caratteristiche di tessitura e di infiltrabilità dei depositi superficiali, la qualità di base delle acque sotterranee, etc. (IRSA, 1996).

4.2 – METODOLOGIE E TECNICHE DI ELABORAZIONE ADOTTATE

La ricerca si è avvalsa dell'impiego sistematico di strumenti e metodologie informatiche per tutte le fasi del lavoro, dall'input dei dati georeferenzati, alla costituzione di banche dati, alla applicazione di algoritmi e modelli di valutazione, fino alla restituzione cartografica. Inoltre è stata sviluppata e articolata secondo fasi così sintetizzabili (CAVALLIN *et alii*, 1996):

- censimento delle fonti di documentazione, delle informazioni e dei dati esistenti presso Enti di Ricerca e Enti pubblici, ed integrazione;

- archiviazione dei dati con scansione e/o digitalizzazione georeferenzata di carte di base nell'ambito di un sistema informativo territoriale, e caricamento degli attributi in banche dati e fogli elettronici;

- elaborazione dei dati con interpolazione di dati spaziali e successive elaborazioni con modelli; le el-

borazioni vengono effettuate in ambiente vettoriale e/o raster, all'interno di un sistema informativo territoriale e/o esternamente ad esso;

– rappresentazione dei risultati con metodi di cartografia automatizzata, in grado di risolvere le problematiche connesse con il numero e la densità dei dati da trattare e con la necessità di un loro continuo aggiornamento.

Le esigenze di archiviazione, analisi e rappresentazione di quantità sempre maggiori di dati spaziali hanno imposto l'utilizzo di un sistema informativo territoriale (SIT). Un SIT può essere considerato come «un potente sistema integrato, comprendente strumenti hardware e software, in grado di archiviare, gestire, trasformare e rappresentare dati spaziali relativi al mondo reale, per qualunque particolare scopo» (ARONOFF, 1989; BURROUGH, 1986; MAGUIRE *et alii*, 1991; PEVERIERI, 1995; SALVEMINI, 1989). I dati spaziali sono caratterizzati da una univoca posizione spaziale e da attributi, che possono anche essere codici di riferimento per valori contenuti in altri data base. Il software o i software che costituiscono il sistema sono generalmente raggruppabili in quattro categorie, che seguono le corrispondenti fasi di lavoro: l'acquisizione, l'archiviazione e l'elaborazione dei dati e infine la rappresentazione dei risultati.

Il lavoro, dall'input dei dati fino alla rappresentazione cartografica, è stato svolto da vari enti in base alle proprie competenze, sia di carattere istituzionale, sia scientifiche. In particolare, il Servizio di Cartografia Numerica dell'Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato si è occupato dell'elaborazione digitale della base topografica, della digitalizzazione di alcuni dati e della stampa; l'Ufficio Informatica e Produzione Editoriale del Servizio Geologico Nazionale ha impostato la veste grafica delle varie cartografie ed eseguito tutte le elaborazioni informatiche legate alla rappresentazione cartografica, mentre il Centro di Studio per la Geodinamica Alpina e Quaternaria del CNR di Milano si è occupato delle elaborazioni analitiche dei dati.

Tutte le cartografie prodotte hanno come base topografica la carta 1:500.000 del Touring Club Italiano (TCI) fornita dal Servizio Geologico Nazionale nella versione già utilizzata per la Carta Geologica d'Italia alla stessa scala (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1983).

L'acquisizione dei dati dalle carte di base è stata effettuata tramite scanner e digitalizzazione manuale. I dati acquisiti mediante scanner sono stati successivamente vettorializzati in modo che si potesse assegnare ai singoli elementi gli attributi di propria perti-

nenza. Le carte, a varia scala, non acquisite tramite scanner sono state digitalizzate con il software ARC-INFO[®].

Tutta la cartografia costituente la base dati è stata georeferenziata secondo un sistema di coordinate univoco. Non sempre è stato possibile effettuare questa operazione in modo automatico mediante un algoritmo di trasformazione e, per ovviare a tali inconvenienti, è stata eseguita una trasposizione da un sistema di coordinate all'altro (UTM, Gauss Boaga) attraverso l'uso di numerosi (da 120 a 4000) punti omologhi.

Le elaborazioni analitiche dei dati sono state realizzate presso il Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio – Centro di Studio per la Geodinamica Alpina e Quaternaria del CNR di Milano, dove esiste una rete hardware e software costituita da un sistema integrato DOS[®]-UNIX[®] che permette contemporaneamente una facile operatività da parte di più utilizzatori, una articolata elaborazione con diversi gradi di complessità sia in ambiente raster che vettoriale ed una rappresentazione che si avvicina il più possibile alla cartografia classica, sfruttando al meglio le tecniche informatiche soprattutto per ciò che concerne le correzioni e gli aggiornamenti (DE AMICIS & CIONI, 1996).

La struttura operativa è costituita materialmente da un sistema a due livelli (fig. 3). Un livello inferiore costituito da personal computers in ambiente DOS[®] e un livello più elevato, inteso come capacità di elaborazione, costituito da tre workstation in ambiente UNIX[®], due delle quali hanno installate licenze ARC-INFO[®] (ESRI, 1994), mentre la terza, collegata ad uno scanner A0, ha installato il sistema INTERGRAPH[®] (INTERGRAPH, 1987). Nel livello dei personal computers sono utilizzati programmi CAD, un SIT (ILWIS[®]; ITC, 1993), fogli elettronici e programmi di elaborazione di dati spaziali che permettono la ricostruzione della distribuzione areale dei parametri trattati ed i cui risultati possono essere a loro volta ricondotti nell'ambito dei SIT. Per tutti questi strumenti è stato studiato un sistema di completa intercambiabilità dei dati in modo da permettere di passare da un programma all'altro in funzione delle elaborazioni da farsi. Ciò è reso possibile dalla messa in rete di tutte le macchine, in modo che i dati, archiviati e/o elaborati, vengono trasferiti direttamente da una macchina all'altra via cavo, permettendo così la gestione di elevate quantità di informazioni. Pertanto, viene garantita la massima flessibilità di lavoro per i diversi utenti e, aggiungendo nuovi moduli interni o nuovi software esterni, è possibile adattarsi rapidamente a qualsivoglia applicazione.

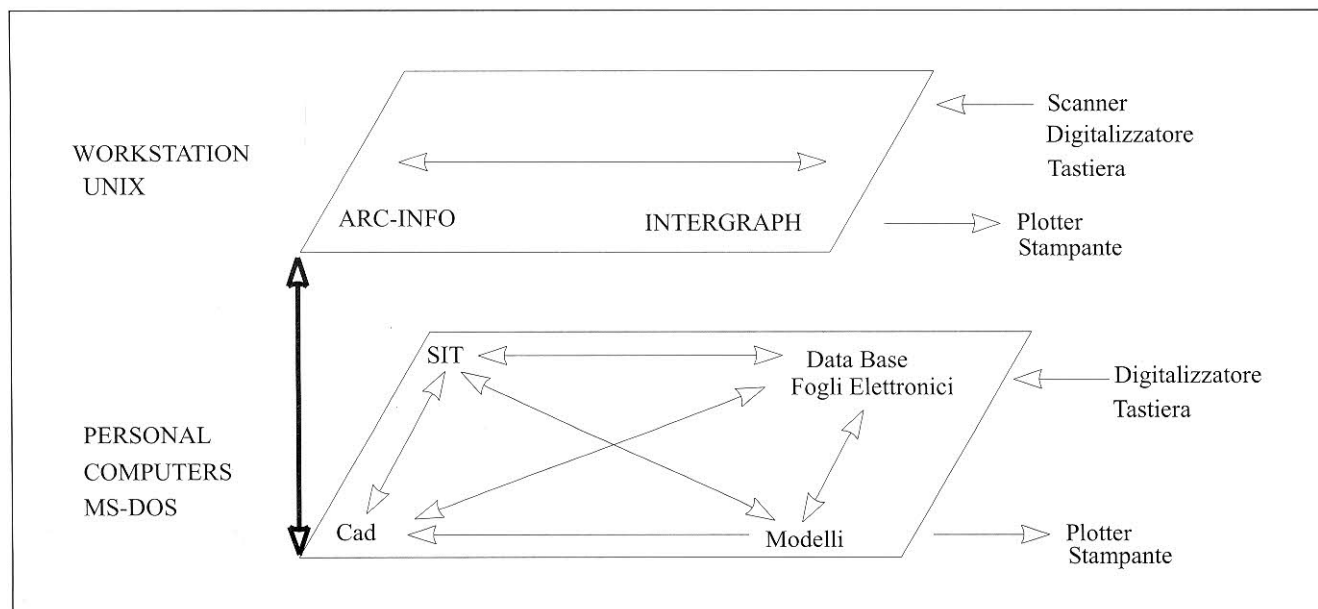


Fig. 3. – Schema della struttura hardware e software utilizzata.

– Scheme of HW and SW structure used in the research.

Ai vari sistemi sono poi associate periferiche per l'acquisizione e la restituzione grafica e numerica delle informazioni raccolte ed elaborate nel sistema (scanner, digitalizzatore, plotter, stampanti, driver per nastri magnetici, etc.).

Le elaborazioni analitiche dei dati, che hanno portato alla realizzazione delle varie cartografie, sono state realizzate mediante l'uso sistematico dei sistemi informativi territoriali scelti tra quelli a disposizione a seconda della complessità delle elaborazioni da svolgere. All'interno del sistema informativo le elaborazioni sono state svolte nell'ambiente vettoriale e/o in quello raster in base alla possibilità di effettuare determinate operazioni con un sistema piuttosto che con l'altro. Nel dominio vettoriale gli oggetti sono rappresentati da punti, linee e poligoni. La posizione di ciascun oggetto, assoluta o relativa, è definita all'interno del sistema di coordinate adottato e a ciascun oggetto è associato uno o più attributi. Nel dominio raster un tematismo è rappresentato da una matrice estesa quanto l'area studiata, in cui ciascuna cella elementare (pixel), risultato della intersezione di una riga con una colonna, è caratterizzata da un attributo. I sistemi raster, per quanto implicino il trattamento di estese matrici, consentono elaborazioni molto complesse dei dati spaziali (sovrapposizione di tematismi; aggregazione di informazioni riferite ad elementi areali; utilizzo di modelli sia interni che esterni al sistema informativo), difficilmente realizzabili nel dominio vettoriale.

5. – CARTA DELLA INFILTRABILITÀ REGIONALE (TAV. I f.t.)

5.1 – GENERALITÀ

La Carta della Infiltrabilità Regionale è stata predisposta con la precipua finalità di caratterizzare la suscettività della superficie del territorio di pianura riguardo alla migrazione (potenziale) verso il basso e la falda delle sostanze sversate o applicate sul suolo. Tale caratterizzazione costituisce uno degli elementi tematici che concorrono alla valutazione della vulnerabilità naturale degli acquiferi (CAVALLIN & GIULIANO, 1992), ma assume un ruolo e una valenza autonoma di rilevante profilo anche nell'ambito di un quadro pianificatorio di area vasta (bacino idrografico, ambito amministrativo, comprensorio, etc.).

Essa può fornire importanti elementi di valutazione per la criticità delle differenti porzioni di territorio in riferimento alle attività e pratiche inquinanti svolte sulla superficie che possono creare le condizioni favorevoli per la percolazione di sostanze inquinanti presenti al suolo e che di conseguenza possono anche interessare le falde acquifere sottostanti. Ovviamente tale valutazione discriminante ha tanto maggiore validità quanto più l'ambito di applicazione è compatibile con la scala della rappresentazione considerata, quale diretta espressione del dettaglio spaziale delle informazioni considerate per la elaborazione.