

La struttura idrogeologica e le variazioni piezometriche: elementi critici nella gestione delle acque sotterranee

Tullia Bonomi¹, Angelo Cavallin²

¹Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università degli Studi di Milano-Bicocca, Piazza Scienza 1, I - 20126 Milano
tullia.bonomi@unimib.it

²CNR – IDPA Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali, Sezione di Milano, angelo.cavallin@unimib.it

Hydrogeological structure and groundwater levels: critical element for groundwater management

ABSTRACT: The natural and/or human hydrogeological balance changes determine modifications of the groundwater resources, both from a quantitative and qualitative point of view and must be evaluated in their reciprocal synergy in order to propose adequate management of the resources themselves. The Lombardy Regional Authority has the greatest rate of industrialization and population density in the European Union; these factors determine high levels of water exploitation as well as an intense use of the subsoil. The most important exploitation of the underground water reserve which occurred in the last decades in particular in urban zones, for drinkable and industrial use, has contributed towards determining a qualitative degradation of the water resources and a strong reduction in availability. Adequate management of the water resources requires careful monitoring of field data and also the use of innovative tools, as mathematical hydrogeological models, to produce significant time and space data processing.

Key terms: groundwater levels, three-dimensional hydrogeological model, groundwater model, GIS

Termini chiave: variazioni piezometriche, modelli idrogeologici tridimensionali, modelli idrogeologici di simulazione di flusso e di trasporto, GIS

Riassunto

La necessità di una adeguata gestione delle risorse idriche, sia superficiali sia sotterranee, al fine di garantirne un uso e uno sfruttamento corretto, richiede una conoscenza completa del sistema idrogeologico e idrologico in esame ottenibile non solo mediante una raccolta dati in situ accurata e continua nel tempo ma anche attraverso l'uso di strumenti innovativi che consentano di integrare al meglio i dati raccolti e di produrre elaborazioni temporali e spaziali significative. La conoscenza dettagliata e approfondita di un acquifero, della sua struttura, della proprietà idrogeologiche e dei fattori esterni che su di esso influiscono è particolarmente utile ai fini della gestione delle acque sotterranee. In un sistema idrogeologico il bilancio di massa è funzione della quantità d'acqua in entrata ed in uscita e la piezometria è il risultato di un equilibrio tra queste voci di bilancio, in relazione alle unità che costituiscono il sottosuolo, alle loro geometrie ed alle loro caratteristiche tessiturali ed idrogeologiche. Lo studio della sinergia tra questi elementi permette di ricostruire il comportamento della falda e di cogliere quali elementi incidano maggiormente sul contesto generale. Gli usi civili ed agricoli dell'acqua rappresentano i principali fattori antropici che influiscono sul bilancio di un sistema idrogeologico; stabilirne l'accettabilità per tali usi è quindi strettamente connesso con la valutazione delle interazioni

presenti in un territorio tra i processi naturali e le attività antropiche. Risulta fondamentale anche una ricostruzione dettagliata della struttura idrogeologica e dei parametri idraulici che la caratterizzano che consente un significativo miglioramento nella simulazione dell'evolversi dei pennacchi di contaminazione. La metodologia proposta unisce le conoscenze geologiche, le informazioni cartografiche georeferenziate e i dati codificati ed archiviati, mediante un utilizzo integrato di una banca dati idrogeologica, di GIS e di opportuni software di calcolo 3D, per effettuare ricostruzioni molto dettagliate sulla distribuzione delle tessiture e dei parametri idrogeologici nel sottosuolo, funzionali a modelli di trasporto eterogenei.

Analisi generale del problema

Le variazioni naturali e/o antropiche in un bilancio idrologico, a scala regionale o sovra-regionale, determinano cambiamenti delle risorse idriche, superficiali e sotterranee, sia da un punto di vista quantitativo che qualitativo e devono essere valutate nella loro sinergia reciproca per proporre una adeguata gestione delle risorse stesse. Il grande sfruttamento della riserva idrica sotterranea avvenuto nei decenni scorsi, ad uso potabile ed industriale, in particolare nelle zone urbane di pianura, ha contribuito a determinare una degradazione qualitativa della risorsa idrica per uso potabile ed un forte depauperamento della sua

disponibilità. Contemporaneamente si è assistito ad una utilizzazione della zona non satura a profondità sempre maggiori per lo sviluppo di sistemi di trasporto, parcheggi ed anche attività legate a servizi primari, quali la metropolitana o gli ospedali, talvolta senza la previsione progettuale di adeguate opere di protezione. Le recenti evoluzioni socioeconomiche di molte aree urbane, per esempio nell'area milanese, hanno prodotto una inversione di tendenza del trend della falda che ha comportato effetti positivi sulla ricostruzione della risorsa, ma effetti negativi sulle infrastrutture ormai presenti.

La necessità di una adeguata gestione delle risorse idriche, sia superficiali sia sotterranee, al fine di garantirne un uso e uno sfruttamento corretto, richiede una conoscenza completa del sistema idrogeologico e idrologico in esame ottenibile non solo mediante una raccolta dati in situ accurata e continua nel tempo ma anche attraverso l'uso di strumenti innovativi che consentano di integrare al meglio i dati raccolti e di produrre elaborazioni temporali e spaziali significative. I modelli matematici applicati all'idrogeologia costituiscono un potente mezzo, ancora limitatamente diffuso in Italia ma molto diffuso all'estero, per sintetizzare in un'unica struttura tutte le informazioni ricavate sul campo, per testare le ipotesi circa il funzionamento del sistema reale, per coadiuvare nello studio di un sistema e per predire scenari futuri. I dati idrogeologici derivati da reti di monitoraggio sono una informazione fondamentale per validare i modelli e renderli quindi strumenti previsionali affidabili e vanno gestiti in idonee banche dati integrate. La specificità nello sviluppo di questi sistemi integrati sta nell'utilizzare al meglio le potenzialità delle banche dati georeferenziate per archiviare in modo organizzato sia i dati temporali riferiti ad indicatori di qualità e quantità delle acque, sia quelli spaziali mediante l'utilizzo dei GIS.

Approccio integrato e grandi sfide

La gestione delle acque sotterranee necessita di sostenibilità ed equità (Direttiva 2000/60/CE) che devono divenire obiettivi fondamentali della strategia di pianificazione della risorsa idrica. Si deve tenere conto da un lato dei profondi mutamenti nelle scale di valori, sia nel modo di intendere l'ambiente naturale che nei rapporti tra uomo e l'ambiente naturale, e dall'altro della nuova cultura dell'acqua, come patrimonio comune dell'umanità, da affrontare con un approccio olistico (ambientale, sociale, economico e culturale). Si devono anche considerare i principi enunciati nei trattati europei per la gestione delle risorse idriche: principio di prevenzione, di riduzione delle cause, chi inquina paga, della integrazione, di precauzione, di incoraggiamento.

La protezione di tutti i corpi idrici in Europa è uno dei progetti più ambiziosi, per giungere al 2015 con la definizione di un buono stato delle acque europee (Direttiva 2000/60/CE). Uno dei principali problemi italiani è riuscire a fare in modo che la pluralità di soggetti coinvolti possa

lavorare in sinergia con accordi comuni per una buona qualità delle acque, al di là dei confini amministrativi. Sono inoltre da sviluppare metodologie comuni per definire la "buona" qualità ambientale, con investimenti da inventare.

I sistemi informativi, coordinati ed integrati con i piani di monitoraggio possono essere l'esempio di una *best practice* per verificare la funzionalità e la reale capacità di *management* delle amministrazioni nazionali, regionali, locali. Ne sono alcuni esempi il Piano di Tutela delle Acque della Regione Piemonte (adottato in forma definitiva nel maggio 2006) e della Regione Emilia Romagna (approvato nel dicembre 2004).

Le azioni necessarie per effettuare tale tipo di approccio sono:

- monitoraggio;
- programmazione;
- realizzazione di interventi;
- adozione di misure e definizione di vincoli;
- verifica dell'efficacia degli interventi.

Le fasi della metodologia prevedono quindi una raccolta dati ed una adeguata archiviazione funzionale alle successive elaborazioni che devono fornire ai decisori informazioni utili ad intraprendere azioni significative.

In particolare gli studi scientifici devono sviluppare alcuni aspetti necessari per una efficace integrazione (De Giorgio, 2005), tra i quali:

- analisi e sintesi organica di studi e dati di monitoraggio disponibili;
- elaborazioni idrologiche ed idrogeologiche mediante modellistica numerica integrata;
- ricognizione e analisi pressioni antropiche;
- informatizzazione dati mediante banche dati e GIS;
- formulazione criteri e proposte di intervento;
- analisi di sostenibilità economica;
- definizione criteri e sistemi di verifica dell'efficacia degli interventi.

Risorsa idrica da salvaguardare in pianura padana: approccio modellistico tridimensionale

Il sottosuolo padano lombardo contiene una grande riserva di acqua dolce valutabile volumetricamente nell'ordine del miliardo di metri cubi.

Questa immensa riserva di acqua è relativamente facile da recuperare e abbastanza ben protetta naturalmente ma è soggetta a numerose pressioni antropiche sia in ambito urbano che agricolo.

La continua evoluzione del sistema necessiterebbe che i dati relativi alle caratteristiche socio economiche, (espansione /riduzione di aree agricole, migrazioni delle popolazioni dei centri urbani alle periferie, dismissioni o spostamenti di centri industriali di prelievo) che possono andare ad interagire direttamente con il sistema idrico sotterraneo venissero raccolti ed organizzati sistematicamente in apposite banche dati. Questi dati, uniti ad un database prettamente idrogeologico, con dati

litostratigrafici, piezometrici e chimici estesi nel tempo, aggiornati con continuità nell'ambito di un sistema GIS, permetterebbero un monitoraggio dinamico del sistema e costituirebbero il punto di partenza per assicurare un futuro sostenibile ai sistemi idrici sotterranei, come evidenziato anche in Custodio, 2005.

La successiva fase di elaborazione, consentirebbe di utilizzare le simulazioni di flusso e di trasporto come una buona base conoscitiva disponibile ed aggiornata.

E' in particolare su questo aspetto che si basa da tempo l'attività del gruppo di ricerca degli autori. Le esperienze acquisite hanno confermato che il livello di dettaglio con cui è rappresentato l'acquifero condizionano scopo ed obiettivi dell'attività modellistica e ne segnano anche il grado di attendibilità, sia in sede di calibrazione che nelle successive fasi di simulazione. La disponibilità di dati, inoltre, condiziona sia il dettaglio sia la possibilità di valutare e modellizzare i fenomeni degradativi in atto.

D'altra parte la modellistica numerica è disciplina di alta specializzazione da tempo specialmente in ambito internazionale (Anderson e Woesseneer, 1992, Spitz e Moreno, 1996, D'Agnese et al., 2002, Tiedeman et al., 2003, Facchi et al., 2004), fatto questo che la condanna spesso ad un ruolo ambivalente; da un lato se ne reclamano le potenzialità di analisi e predittive, riconducibili di fatto alla formulazione matematica del problema anche in contesti complessi e fortemente anisotropi, mentre dall'altro la carenza di dati e di specifiche professionalità spesso ne limita le effettive potenzialità, nonché la verifica di qualità e la validazione.

Considerando che l'elaborazione del modello concettuale di un sistema idrogeologico è complessa e che nella definizione dell'assetto geometrico e della distribuzione dei parametri idrogeologici, qualità, rappresentatività e densità spazio/temporale dei dati ne segnano il grado di attendibilità, la fase relativa alla ricostruzione della distribuzione delle caratteristiche idrogeologiche costituisce il punto di partenza fondamentale per la riuscita dei modelli (Haitjema, 1995).

La ricostruzione di un modello di dettaglio 3D della struttura idrogeologica e la definizione di dettaglio dei parametri idraulici che la caratterizzano consente una migliore simulazione delle direzioni delle linee di flusso nello spazio e dell'evolversi dei pennacchi di contaminazione. L'approccio statistico proposto basato su un kriging spaziale delle caratteristiche tessiturali e una parametrizzazione da esse derivata, ottiene una quantificazione il cui dettaglio, alla maglia del modello, migliora sostanzialmente la precisione dei risultati attesi.

La modellizzazione su tale base prevede l'implementazione di un modello di flusso a scala regionale, in accordo a quanto sviluppato in Feinstein et al, 2003, con il codice di calcolo Modflow (Mc Donald e Harbaugh, 1988; Harbaugh e McDonald 1996) dal quale estrarre un modello a scala locale seguendo la metodologia del *Telescopic Mesh Refinement* (Leake e Claar, 1999) sul

quale applicare uno specifico modello di trasporto (per esempio, MT3DMS, Zeng e Wang, 1999) e a catena un modello comprensivo dell'attenuazione naturale (per esempio RT3D, Clement, 1997) la cui taratura, effettuata mediante prove di campo e monitoraggio, può apportare un approfondimento della conoscenza dei meccanismi degradativi.

L'aspetto innovativo che si sta sviluppando risiede nell'intero approccio modellistico che basa l'applicazione di modelli di flusso e di trasporto comprensivi del fenomeno degradativi ad una struttura idrogeologica 3D dell'acquifero rappresentativo dell'estremo dettaglio delle eterogeneità tessiturali e parametriche, offrendo un innovativo contributo alla simulazione dell'evoluzione reale di pennacchio di inquinamento. La metodologia è completamente sviluppata con l'uso integrato di banche dati, GIS e modelli tridimensionali.

Elementi critici nella ricostruzione del modello concettuale: esempio nell'area milanese

Da un punto di vista idrogeologico, in base alla classificazione introdotta da Mazzarella e Martinis (1971), il sottosuolo di Milano è suddiviso, sulla base dei caratteri tessiturali dominanti, identificando, dall'alto verso il basso, tre unità litostratigrafiche, dette litozone, con granulometria decrescente dall'alto al basso.

Litozona ghiaioso-sabbiosa costituita prevalentemente da ghiaie e sabbie, talora conglomerati, con intercalazioni e lenti di argilla, di deposizione continentale, fluvio-glaciale. E' caratterizzata da una tessitura non costante, con variazioni granulometriche decrescenti sia da nord verso sud, sia verso il basso, sia longitudinalmente. E' la più importante da un punto di vista dello sfruttamento perché sede di un acquifero monostrato da considerare freatico, oggetto di sfruttamento da parte di tutti i pozzi della zona ed è quindi quella a cui si fa riferimento quando si valuteranno i consumi idrici.

Litozona sabbioso-argillosa. E' costituita da argille, argille-sabbiose, sabbie e sabbie-argillose, talvolta con livelli torbosi, di ambiente fluvio-lacustre, transizionale, raggiunge sempre una profondità di circa 250 m ed è riferita al Villafranchiano. Comprende abbondanti e talvolta estese lenti sabbiose, che costituiscono sedi di acquiferi artesiani o semi-artesiani, potenzialmente sfruttabili per usi civili. Ai fini idrogeologici viene spesso considerata il substrato impermeabile della litozona superiore, in realtà la variazione granulometrica a cui si associa la diminuzione di permeabilità può essere ritenuta progressiva, almeno a scala regionale.

Litozona argillosa. Essa è costituita da argille e limi con subordinati livelli di sabbie, con fossili di ambiente marino, si rinviene a Milano oltre i 250 m di profondità. Si colloca a profondità che non vengono quasi mai raggiunte dai pozzi per acqua.

Nella analisi del sistema idrogeologico punti critici

sono: la valutazione dei volumi di acqua coinvolti e la ricostruzione della struttura idrogeologica

Valutazione dei volumi di acque sotterranee

Il grande sfruttamento ad uso potabile ed industriale della risorsa idrica sotterranea nell'area metropolitana milanese avvenuto nei decenni scorsi, ha contribuito ad una evoluzione negativa della qualità, con conseguente degrado della risorsa idrica per uso potabile ed un forte depauperamento della sua disponibilità (Fig. 1).

Contemporaneamente si è assistito ad una utilizzazione della zona non satura a profondità sempre maggiori per lo sviluppo di sistemi di trasporto, parcheggi ed anche attività sociali e commerciali, senza la previsione progettuale di adeguate opere di protezione. Le recenti evoluzioni socioeconomiche dell'area hanno prodotto una inversione di tendenza del trend della falda che ha comportato effetti positivi sulla ricostruzione della risorsa, ma effetti negativi sulle infrastrutture ormai presenti, anche legate a servizi primari, quali la metropolitana o gli ospedali (Airoidi et al., 1997; Provincia di Milano 1995, Provincia di Milano 1996, Provincia di Milano 1997; Raffaelli et al., 1996).

La dinamica piezometrica qui analizzata si riferisce al comune di Milano e l'attenzione è stata posta sui fattori antropici legati all'evoluzione socioeconomica dell'ultimo ventennio che hanno determinato oscillazioni molto marcate nei prelievi idrici sotterranei.

Le variazioni di prelievo pubblico (civile e terziario) nel comune di Milano sono sicuramente attribuibili in buona parte all'evoluzione demografica della città. In Figura 2 sono confrontati i prelievi pubblici ed il numero dei residenti nel comune di Milano.

I dati sui residenti, prima del 1980, si riferiscono solamente agli anni dei censimenti ISTAT (Servizi statistici del Comune di Milano), mentre in seguito sono annuali.

Il rapporto fra il prelievo pubblico ed il numero di residenti non è costante nel tempo bensì variabile di anno in anno. Espresso in litri d'acqua al giorno per abitante, il suo valore medio attuale è di circa 500 l/abitante*giorno mentre l'indice di consumo procapite, legato cioè solamente all'utilizzo civile dell'acqua, è stimato attualmente in 250 l/abitante*giorno.

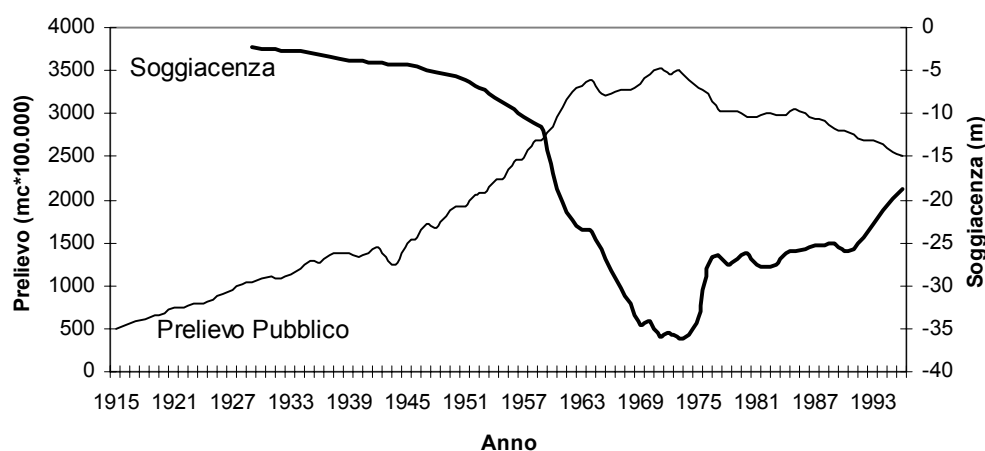


Figura 1. Andamento dei prelievi pubblici e della soggiacenza nel comune di Milano, dal 1915 al 1997.
Water depth and yearly pumping in Milan town, for the period 1915-1997.

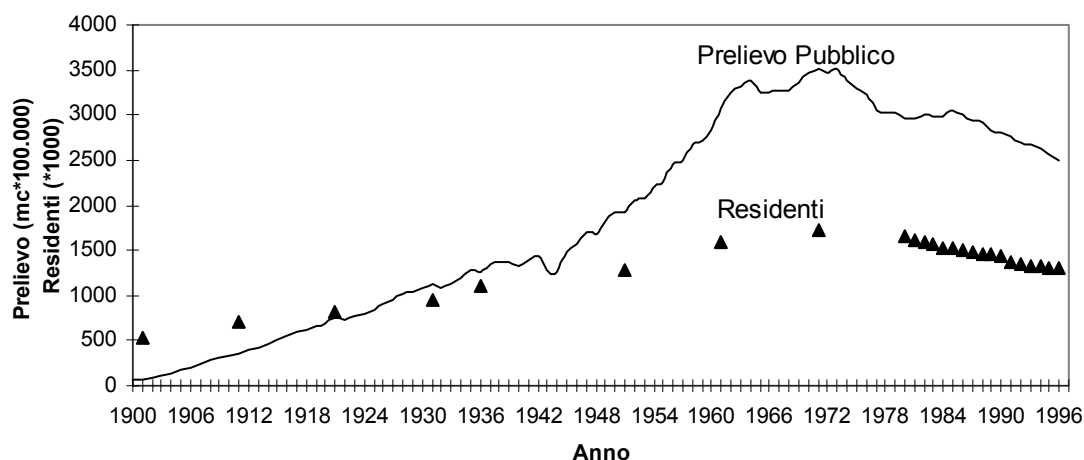


Figura 2. Andamento dei prelievi pubblici e della popolazione residente nel comune di Milano, dal 1900 al 1997.
Yearly public pumping and inhabitants, in Milan town, for the period 1900-1997.

Quest'ultimo è funzione della richiesta di acqua da parte della popolazione e dunque delle sue esigenze che hanno subito, nel tempo, dei notevoli cambiamenti legati all'evoluzione del contesto sociale, economico e culturale dell'area. In particolare le stime dell'*indice di consumo procapite* indicano per il 1931 un valore di circa 25 l/abitante*giorno, per il 1950 di 100 litri/abitante*giorno e per il 1970 di 200 l/abitante*giorno.

La differenza che esiste attualmente tra il valore dell'*indice di consumo procapite* stimato e quello del rapporto prelievo/residenti, nonché la variabilità di quest'ultimo, è dovuta all'inserimento, fra gli utenti serviti dall'acquedotto, di attività produttive e terziarie; questi nuovi allacciamenti, iniziati negli anni '50, sono aumentati nel tempo e non è possibile risalire con precisione al vero consumo pro capite ad uso civile. Questo spiega perché il trend dei prelievi e quello demografico, benché concordi, non siano strettamente correlati. L'andamento dei prelievi non dipende quindi solamente dall'evoluzione della popolazione ma, più in generale, da tutti i fattori che hanno concorso a determinare i cambiamenti del contesto socio-economico milanese.

La presenza industriale sul territorio, molto forte negli anni '70, in seguito alla dismissione o trasferimento di

molte attività, ha infatti ora lasciato spazio ad altri settori economici in particolare quelli legati al terziario, provocando una diminuzione dei consumi (pubblici, privati e di spurgo), pari a circa 70 milioni di m³ dal 1990 al 1996 (Fig. 3). Questo aspetto probabilmente è solo una delle componenti che hanno contribuito alla risalita delle acque di prima falda negli ultimi anni, stimata in circa 140 milioni di m³ (Cavallin et al., 1999).

La diminuzione dei consumi totali è infatti attenuata dall'aumento del consumo derivante dal pompaggio negli acquiferi residenti nella litozona sabbioso-ghiaiosa, dei quali non si hanno dati di prelievo.

Gli effetti socio-economici connessi con questo innalzamento possono essere distinti in effetti diretti sulle infrastrutture presenti sul territorio ed effetti indiretti (Cavallin et al., 1999), legati agli interventi attuati dagli enti pubblici preposti alla salvaguardia delle strutture a rischio (Provincia di Milano, 1996). La prima tipologia di effetti può essere identificata nei problemi di esercizio delle linee metropolitane oltre a gravi problemi legati all'infiltrazione d'acqua e alla staticità delle strutture costruite nei periodi in cui il trend della piezometria era in fase di discesa. La seconda tipologia di effetti è legata agli interventi attuati o attuabili per contrastare la risalita.

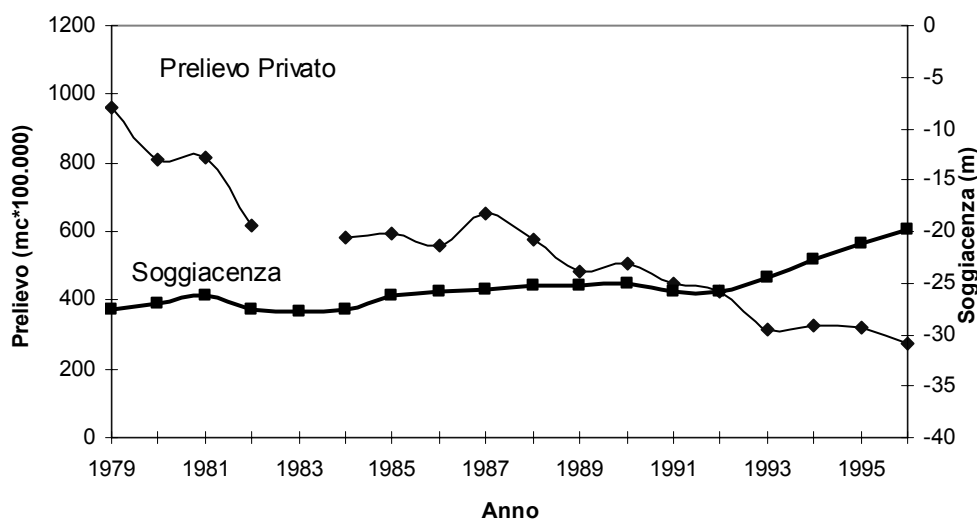


Figura 3. Andamento dei prelievi privati e della soggiacenza nel comune di Milano, durante il maggior periodo di decentramento delle aree industriali dalla città.

Yearly private pumping and water depth, in Milan town, while many activities are going out from the town.

Ricostruzione della struttura idrogeologica

La ricostruzione delle potenziali eterogeneità riscontrabili in un acquifero avviene attraverso un uso integrato di banche dati e modelli di interpolazione tridimensionali. Il nodo centrale del percorso è quello di superare le spesso semplicistiche descrizioni idrogeologiche e di introdurre, al loro posto, una elaborazione tridimensionale delle caratteristiche tessiturali ed idrogeologiche dell'acquifero. Questo passaggio è possibile grazie alla codifica e alla georeferenziazione delle numerose stratigrafie dei pozzi per

acqua presenti sul territorio. La codifica di tale dato consente di superarne il normale uso unicamente qualitativo e di introdurre un uso quantitativo.

Ciò è fondamentale per il raggiungimento dell'obiettivo, in quanto solamente con una buona ricostruzione delle reali eterogeneità degli acquiferi è possibile una modellizzazione dei pennacchi di contaminazione più aderenti ai fenomeni reali.

La ricostruzione della struttura idrogeologica richiede molteplici fasi di lavoro.

- Archiviazione delle informazioni idrogeologiche dei pozzi in apposite banche dati, TANGRAM (Bonomi e al., 1995) nelle quali i dati stratigrafici dei pozzi sono codificati e georeferenziati. Lo sviluppo di tale metodologia vuole sfruttare la grande potenzialità dei dati stratigrafici dei pozzi per acqua che sono spesso considerati una mera descrizione litologia dei livelli. Essi non sono mai usati in modo quantitativo per quantificare la distribuzione dei parametri idrogeologici del sistema. Si sfrutta in tal modo la grande potenzialità informativa dei dati stratigrafici dei pozzi per acqua superando la tradizionale semplice descrizione litologia dei livelli. La qualitatività dei dati utilizzati viene superata dalla densità degli stessi.
- Estrazione, dalla banca dati, in coordinate spaziali, delle percentuali dei termini tessiturali e delle caratteristiche idrogeologiche di permeabilità e porosità attribuite ad ogni singolo livello stratigrafico attraversato dai pozzi.
- Elaborazione degli stessi secondo intervalli normalizzati, identificati sulla base della scala di dettaglio prescelta.
- Ricostruzione in GOCAD (Geologic Object Computer Aided Design) (Gocad Suite, 2005) delle geometrie di riferimento del sistema idrogeologico in esame (per esempio superficie topografica, base degli acquiferi).
- Conversione dei dati archiviati nella banca dati in punti XYZ e creazione di una griglia tridimensionale in GOCAD, delimitata dalle superfici di controllo del sistema ed

interpolazione tridimensionale con l'uso di tecniche kriging.

- Ricostruzione tridimensionale delle caratteristiche tessiturali ed idrogeologiche del sottosuolo.

Per riprodurre nel modello di flusso e di trasporto la complessità idrogeologica sono stati utilizzati precedenti lavori nei quali è stata definita la metodologia per elaborare modelli tessiturali tridimensionali di dettaglio, al fine di predisporre idonei dati di input nei modelli di flusso e trasporto (Bonomi et al., 2002, Bonomi 2006). Tale ricostruzione è stata realizzata mediante un uso integrato di una banca dati idrogeologica, Tangram (nella quale oltre 3550 dati stratigrafici dei pozzi per acqua sono stati archiviati, codificati e georeferenziati, su tutta la provincia di Milano su un'area di circa 2000 km²), di GIS e di un modello tridimensionale, GOCAD.

Dopo una prima fase di creazione della banca dati, nella seconda fase si sviluppa una ricostruzione di dettaglio tridimensionale delle caratteristiche tessiturali ed idrogeologiche di un sito, utilizzando il software GOCAD (Geological Object Computer Aided Design); si ricostruiscono le geometrie di riferimento del sistema idrogeologico in esame (superficie topografica e base degli acquiferi, Fig. 4) e si crea una griglia tridimensionale (Sgrid) delimitata da tali superficie.

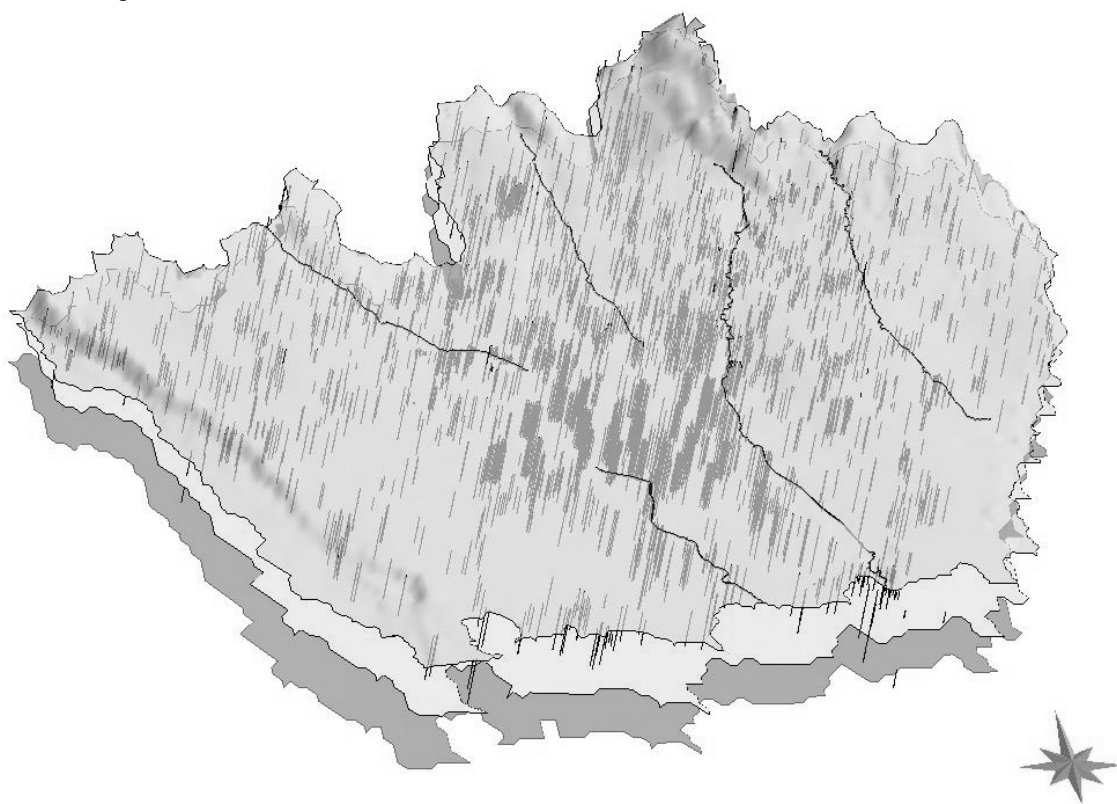


Figura 4. Superfici di riferimento della Provincia di Milano: dall'alto, topografia, base acquifero tradizionale e base acquifero profondo. I punti proiettati indicano i pozzi considerati nell'analisi.

Boundary surfaces of the hydrogeological Milan system: from the top, DTM, traditional aquifer bottom and deeper aquifer bottom. The points indicate the wells.

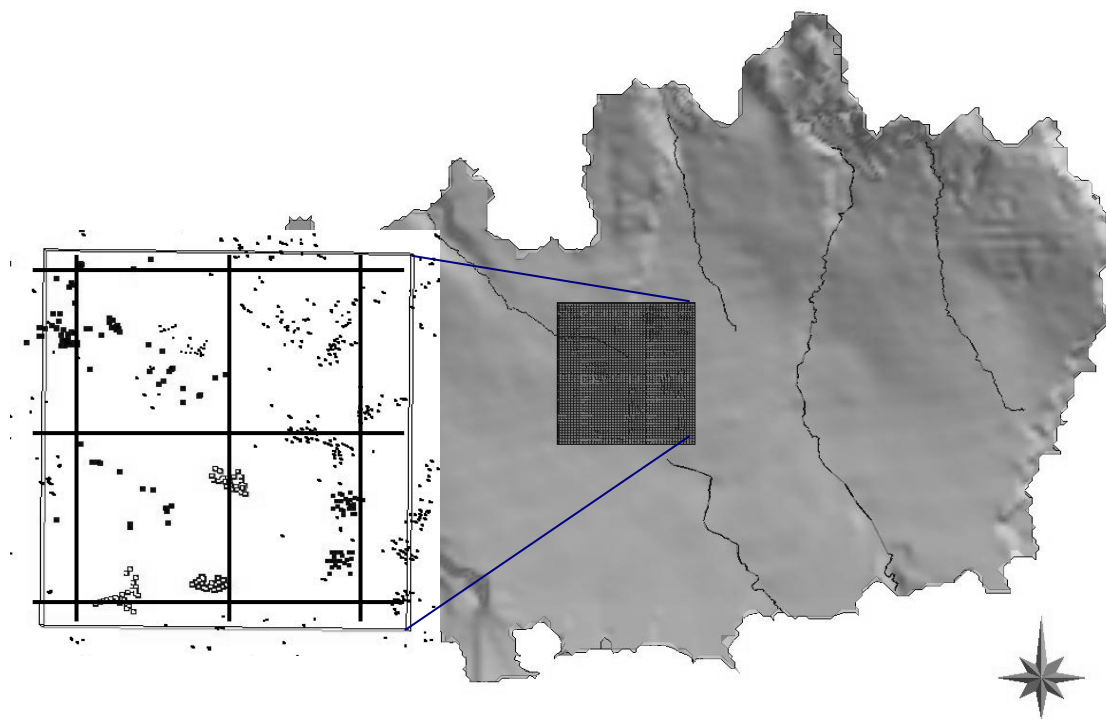


Figura 5. Estrazione dall'intera provincia di Milano, di un settore di km 10 x 11. I punti indicano i pozzi presenti nel settore interessato; nel riquadro sono indicate le tracce delle sezioni riportate nelle figure 6 e 7.

*Small area extracted from Milan province area (10 Km * 11 Km). The points indicate the wells. The sections shown in figure 6 and 7 are located in the zoom.*

La base dell'acquifero superficiale è desunta da Provincia di Milano, 2001. Dalla banca dati sono stati selezionati, per ogni pozzo georeferenziato, i valori percentuali dei termini grossolani, medi e fini, ogni due metri di profondità e successivamente elaborati nel software GOCAD come PointsSet, unitamente ai dati relativi alle superfici di riferimento del sistema (superficie topografica, base del primo acquifero, e base degli acquiferi profondi). I punti XYZ ricavati dalla banca dati vengono interpolati tridimensionalmente, secondo tale griglia, con l'uso di tecniche geostatistiche (kriging). Con questi elementi è stata elaborata una griglia tridimensionale su un'area di 10 km * 11 km costituita da celle di 250m * 250m e circa 2 m di profondità (Fig. 5). Lo spessore totale considerato è circa 200 m. L'attribuzione dei valori percentuali delle tessiture dei singoli pozzi a tutte le celle che costituiscono l'SGrid ha consentito di elaborare tridimensionalmente le distribuzioni delle caratteristiche tessiturali e di interpretarle in dettaglio; la costruzione di sezioni lungo le tre direzioni (x,y,z) ha consentito l'individuazione dei principali livelli permeabili del sottosuolo provinciale e del loro andamento spaziale (Figg. 6 e 7).

In queste sezioni sono rappresentate in gradazione di grigio le percentuali di una singola frazione tessiturale (ghiaia o argilla) rappresentandone la distribuzione spaziale.

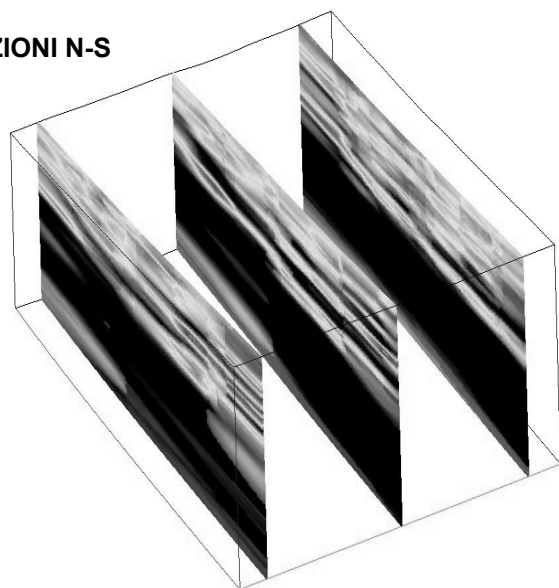
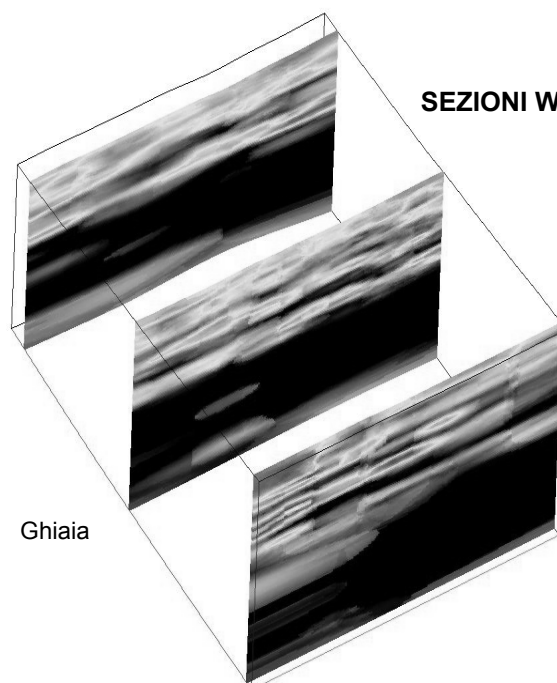
Lo spessore verticale è circa 200 m ed interessa sia

l'acquifero superficiale tradizionale, sfruttato dalla maggior parte dei pozzi, sia gli acquiferi profondi confinati e semiconfinati. Quest'ultimi sono essenzialmente sabbiosi, come si può desumere dalla bassissima percentuale di ghiaia presente nella parte inferiore delle sezioni. L'acquifero tradizionale è invece prevalentemente ghiaioso-sabbioso, ma si osserva la presenza di lenti di argilla che sfumano in tessiture differenti che possono consentire il passaggio di acqua contaminata in alcune zone piuttosto che in altre, mentre la presenza di orizzonti a maggiore permeabilità potrebbe determinare variazioni locali della direzione di flusso idrico profondo. Inoltre si è osservato come la discontinuità e lo spessore stesso degli orizzonti argillosi consenta una maggiore protezione di alcuni settori alla migrazione verticale, ma anche orizzontale, dei contaminanti.

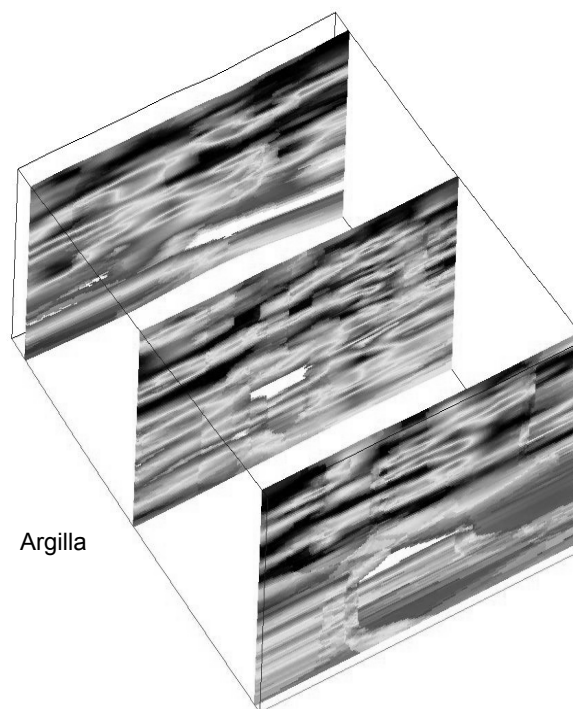
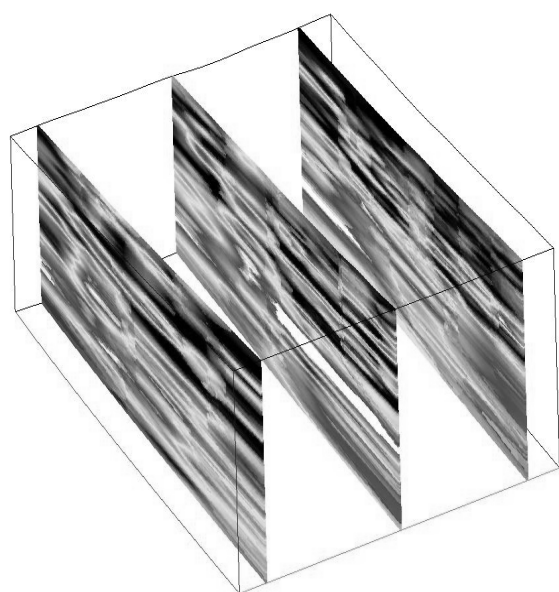
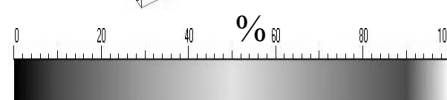
Integrazione nel modello concettuale

L'interpretazione della superficie piezometrica come l'effetto della struttura idrogeologica del sistema in esame e delle voci di bilancio che su di esso agiscono, vincola ad un approccio integrato nell'affrontare le tematiche relative all'evoluzione della superficie piezometrica stessa.

La valutazione dei volumi di acqua sotterranea coinvolti, consente di interpretare l'evoluzione piezometrica in funzione delle variazioni idroesigenti che su un territorio intervengono.

SEZIONI N-S**SEZIONI W-E**

Ghiaia



Argilla

Figura 6. Distribuzione percentuale della ghiaia (in alto) e dell'argilla (in basso) N-S. Dimensioni di riferimento: km 10 x 11, spessore circa m 200. La traccia delle sezioni è indicata in figura 5. *Three-dimensional distribution of gravel (up) and clay (down) in percent terms in N-S sections. The area is 10 Km * 11 Km, thickness is about 200 m. The section path is located in fig. 5*

Figura 7. Distribuzione percentuale della ghiaia (in alto) e dell'argilla (in basso) W-E. Dimensioni di riferimento: km 10 x 11, spessore circa m 200. La traccia delle sezioni è indicata in figura 5. *Three-dimensional distribution of gravel (up) and clay (down) in percent terms in W-E sections. The area is 10 Km * 11 Km, thickness is about 200 m. The section path is located in fig. 5.*

Gli scenari revisionali a scala provinciale devono integrare le previsioni di sviluppo degli attori che utilizzano la risorsa idrica, a monte di una dettagliata ricostruzione parametrica del sottosuolo.

I modelli di trasporto a scala locale, soprattutto per interventi di bonifica, sono meno influenzati dalle voci di bilancio ma sono molto influenzati da una ricostruzione di dettaglio delle eterogeneità del sistema idrogeologico.

Applicazioni specifiche

La studio della propagazione degli inquinanti assume un significato molto importante per la gestione delle risorse idriche ed è di ampio interesse per gli amministratori del territorio. Perché abbia una reale riscontro applicativo è però necessario che tale studio venga realizzato mediante strumenti che permettano di riprodurre le situazioni esistenti, ipotizzare le sorgenti di contaminazione, con la ricostruzione di un percorso a ritroso e simulare scenari evolutivi della situazione degradata, in funzioni di determinate ipotesi. Nella pratica la applicazione di modelli di trasporto fornisce spesso risultati molto semplici, poco dettagliati e spesso generici da cui ne deriva una scarsa affidabilità e diffusione. Allo stato attuale delle conoscenze i modelli di trasporto degli inquinanti hanno una capacità di previsione minore rispetto a quelli di flusso idrico. Ciò è dovuto ad alcune lacune nella conoscenza dei fenomeni ed in particolare (Beretta, 1992): la velocità di filtrazione non è sufficientemente conosciuta negli acquiferi eterogenei; una scarsa conoscenza e difficoltà di misura dei parametri dispersivi; le caratteristiche della sorgente inquinante in fase iniziale spesso non sono note; i processi chimici, la presenza di fasi separate. A questo si aggiunge che una eccessiva semplificazione del modello idrogeologico comporta una semplificazione nella ricostruzione dei percorsi dei pennacchi di contaminazione.

L'obiettivo dell'approccio proposto è proprio il miglioramento delle risposte nei modelli di trasporto. Su queste specifiche applicazione si sta lavorando, in collaborazione con ARPA Milano, sulla simulazione dell'evoluzione reale di un pennacchio di DNAPL (Dense Non Aqueous Phase Liquids), già studiata con modelli bidimensionali in Provincia di Milano, 2004. Il modello ottenuto viene tarato nelle varie fasi sulla base del lavoro svolto in campo. La prima parte del processo di modellizzazione tridimensionale, dal modello di flusso fino al modello di trasporto, è già stata sviluppata in Bonomi et

al, 2006 riferito ad un caso di inquinamento da solventi clorurati in Provincia di Milano, ed è in sviluppo quella relativa alla fase degradativi.

Considerazioni conclusive

Le variazioni naturali e/o antropiche in un bilancio idrogeologico, a scala regionale o sovraregionale, determinano cambiamenti delle riserve idriche, superficiali e sotterranee, sia da un punto di vista quantitativo che qualitativo e devono essere valutati nella loro sinergia reciproca per proporre una adeguata gestione delle risorse stesse. E' inoltre fondamentale che la modellistica idrogeologica possa diventare strumento revisionale e conoscitivo di base, introducendola in tutte le pratiche idrogeologiche per la gestione delle risorse idriche. Perché possa diventare un valido strumento gestionale deve però evitare eccessive semplificazioni della realtà ma puntare ad un estremo dettaglio nella ricostruzione delle caratteristiche del sistema.

La metodologia proposta nasce dalla necessità di migliorare le risposte dei modelli idrogeologici sia di flusso che di trasporto. Questa importante branca dell'idrogeologia stenta infatti ad essere diffusamente utilizzata come strumento gestionale per i risultati spesso poco particolareggiati e specificatamente legati ad un sito che essa fornisce. La ricostruzione di un modello di dettaglio 3D della struttura idrogeologica e la definizione di dettaglio dei parametri idraulici che la caratterizzano ottiene un consistente miglioramento nella simulazione delle direzioni delle linee di flusso nello spazio e dell'evolversi dei pennacchi di contaminazione.

L'approccio integrato nella analisi del sistema idrogeologico permette:

- il miglioramento del modello concettuale del territorio in esame;
- lo sviluppo e il mantenimento di un database idrogeologico, con dati litostratigrafici, piezometrici e chimici estesi nel tempo, aggiornati con continuità nell'ambito di un sistema GIS (Custodio, 2005);
- la verifica dei modelli di simulazione di flusso e trasporto per rappresentare la migliore base conoscitiva disponibile (Custodio, 2005);
- la valutazione delle quanto le attività umane modificano la qualità e la quantità delle componenti del bilancio.

Bibliografia

Airoldi R., Casati P., De Amicis M., Peterlongo G., 1997. Oscillazioni del livello sotterraneo della falda idrica sotterranea milanese nel periodo 1990-1995. Acque sotterranee, Segrè (Mi).

Anderson M.P., Woessner W.W., 1992., Applied Groundwater Modeling- Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press Inc. San

Diego (CA).

Beretta, G.P. 1992. Idrogeologia per il disinquinamento degli acquiferi. Indagini, metodologie ed esempi di intervento. Pitagora Ed. Bologna.

Bonomi T., Fumagalli L., Dotti N., 2006. Fenomeno di inquinamento da solventi: elaborazioni idrogeologiche ed idrochimiche e

modellizzazione idrogeologica tridimensionale del flusso e del trasporto. Relazione interna, Università Milano Bicocca-ARPA Dip. Provinciale Milano, 150 pp.

Bonomi, T., 2006. Database and 3D modeling of the textural variations in heterogeneous aquifer media: application to the Milan plain. Computers and Geosciences, accettato con revisioni. In

stampa

- Bonomi, T., Cavallin A., De Amicis M., 1995. Un database per pozzi: Tangram. Quaderni Geologia Applicata, suppl. n. 31/95, 3.461 - 3.465.
- Bonomi, T., Cavallin A., Marchetti M., Sironi S. 2006. 3-D geology and geomorphology in the Brescia plain. "Geological Mapping in Italy". Editors Venturini & Pasquarè. APAT, Selca, Roma, 114-122.
- Bonomi, T., Cavallin A., Stelluti G., Guerra G. 2002. 3-d subsoil parameterisation in a plan region of North Italy. Mem. Soc. Geol. It., 57 (2002), 543-550.
- Cavallin A., Bonomi T., De Amicis M., Rizzi S., Trefiletti P., Tizzone R. 1999. Evoluzione della dinamica piezometrica nell'area milanese in funzione di alcuni fattori socio-economici. Atti della Giornata Mondiale dell'acqua: acque sotterranee: risorsa invisibile. 23 marzo 1998. Pubblicazione CNR-GNDICI n. 1955, 9-17.
- Clement, T.P., 1997. RT3D - A Modular Computer Code for Simulating Reactive Multi-Species Transport in 3-Dimensional Groundwater Aquifers. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington. PNNL-11720.
- Custodio E., 2005. Intensive use of ground water and sustainability. Ground Water, V. 43, n. 3, 291-291.
- D'Agnese F.A., O'Brien G.M., Faunt C.C., Belcher W.R., San Juan C., 2002. Three-dimensional numerical model of predevelopment conditions in the Death Valley Regional Ground-Water Flow System, Nevada and California, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4102, 114 pp.
- De Giorgio, S., 2005. Le strategie della Regione Piemonte. Atti del convegno "Valorizzazione e tutela delle risorse idriche tutela delle risorse idriche". Milano, 24/01/2005.
- Direttiva 2000/60/CE del Parlamento europeo. Gazzetta ufficiale L 327 del 22.12.2000.
- Facchi A., Ortuali B., Maggi D., Gandolfi C., 2004. Coupled SVAT- groundwater model for water resources simulation in irrigated alluvial plain, Environmental Modelling and Software 19 (11), pp. 1053-1063
- Feinstein D.T., Saad D., Hart D., Zeiler K., 2003. Reconciling Recharge and Discharge in a Regional Flow Model, In MODFLOW and MORE 2003: Understanding through Modeling - Conference Proceedings, ed. E.P. Poeter, C. Zheng and M.C. Hill, Vol. 1, pp. 351-355.
- Gocad Suite, 2005. Earth Decision.
- Haitjema H.M., 1995. Analytic Element Modeling of Groundwater Flow, Academic Press Inc.
- Harbaugh, A.W., and McDonald M.G., 1996. User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model: USGS Open-File Report 96-485, 56 pp.
- Leake, S.A., Claar, D.V., 1999. Procedures and computer programs for telescopic mesh refinement using MODFLOW, U.S. Geological Survey Open-File Report 99-238, 53 p.
- Martinis B. e Mazzarella S., 1971. Prima ricerca idrica profonda nella Pianura Lombarda. Società cooperativa tipografica, Padova, v. 28, 54 pp.
- McDonald M.G., Harbaugh A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, USGS TWRI, 586 pp.
- Provincia di Milano, 1995. Le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano. Volume I: Lineamenti idrogeologici. Assessorato all'Ambiente-Settore Ecologia, Milano.
- Provincia di Milano, 1996. Brevi considerazioni relative all'innalzamento della falda in Provincia di Milano. Assessorato all'Ambiente-Settore Ecologia, Milano.
- Provincia di Milano, 1997. Sintesi delle elaborazioni predisposte dagli uffici provinciali per la progettazione di massima degli interventi di propria competenza. Assessorato all'Ambiente-Settore Ecologia, Milano.
- Provincia di Milano, 2001. La base dell'acquifero tradizionale. Quaderni Direzione Centrale Ambiente, pp. 23, Provincia di Milano.
- Provincia di Milano, 2004. Biorisanamento in situ di falde contaminate da solventi clorurati: un caso di studio in Provincia di Milano.
- Raffaelli L., Raimondi P., Rosti G., 1996. Valutazioni sull'innalzamento della falda nella città di Milano nei primi anni '90. Provincia di Milano.
- Spitz K., Moreno J.(1996), A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- TiedemaN C.R., Hill M.C., D'agnese F.A., Faunt C.C., 2003. Methods for using groundwater model predictions to guide hydrogeologic data collection, with application to the Death Valley regional ground-water system, Water Resour. Res. 39(1), 1010.
- Zheng C., Wang, P.P., 1999. MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center Contract Report SERDP-99-11.