Previsione e monitoraggio degli effetti sull'acquifero, nel corso della realizzazione di una importante opera ferroviaria in sotterraneo nella città di Torino

V.M. Civita[1]
A. Danese[2]
E. Nicola[3]
S. Pizzo[4]

[1] Ordinario di Idrogeologia Applicata – Politecnico di Torino
[2] Direttore di Commessa – Astaldi S.p.A.
[3] Responsabile Tecnico-Amministrativo – TER Elettronica – Grugliasco (TO)
[4] Responsabile dei sistemi di monitoraggio idrogeologici e strutturali – S.P.T S.c.r.l.

Il "Passante ferroviario" di Torino nel tratto tra le stazioni Porta Susa e Stura deve affrontare il non facile attraversamento in sottopasso del Fiume Dora Riparia con una galleria artificiale. Per poter procedere, è in costruzione un sistema di paratie che si addentra nell'acquifero libero soggiacente e connesso al fiume.
Già in fase di studio di fattibilità è stato considerata la possibilità di un dam effect *sull'acquifero, con conseguenza intumescenza piezometrica a monte del sistema di paratie e depressione a valle di esse. Per poter gestire un simile problema che potrebbe portare un impatto sull'urbanizzato, l'ITALFERR S.p.A. e, per essa, il raggruppamento d'imprese che effettuano l'importante opera (SPT Scrl) hanno chiesto la collaborazione del GLIA – Politecnico di Torino per svolgere uno studio idrogeologico completo della situazione coinvolta, sia dal punto di vista strutturale e idrodinamico che da quello idrochimico.*
Sulla base dello studio, effettuato tra il 2003 ed il 2005, si è passati alla fase di realizzazione di un sistema di monitoraggio completo che ha previsto l'installazione di alcune stazioni idrometriche sul corso del fiume, la misura in continuo dei livelli piezometrici su una ventina di piezometri attrezzati, il prelievo di numerosi campioni d'acqua in diversi momenti del tempo e le relative analisi interpretate ai fini di prevenzione di eventuali inquinamenti non ascrivibili alle attività del cantiere. Una stazione pluviometrica è stata,quindi, installata per fornire l'input infiltrativi ai modelli di flusso sotterraneo.
Vengono descritti in questo lavoro i diversi mezzi di acquisizione dei dati, i sistemi di trasmissione via INTERNET *in tempo reale, i risultati e le elaborazioni sin qui ottenuti sia relativi al campo di moto dell'acquifero ed alle sue variazioni spazio-temporali, sia sulle escursioni del livello del fiume e relativi eventi di piena.*
Il piano di monitoraggio ed i mezzi impiegati sono decritti nel dettaglio, unitamente alle problematiche d'installazione ed alle soluzioni utilizzate ed alle caratteristiche del sistema GeoGprs approntato per la raccolta ed elaborazione automatica dei dati.
In tal maniera tutte le Società e gli Enti interessati possono essere al corrente dell'evoluzione della situazione idrogeologica connessa con l'opera.

Forecasting and monitoring of the effects on the aquifer during the realisation of important underground railway works in the city of Turin. *The "Underground Railway Link" of the city of Turin between the Porta Susa and Stura stations entails the difficult problem of crossing, through an underpass, the Dora Riparia River with an artificial tunnel. In order to proceed with the construction of the tunnel, a system of bulkheads penetrating in the free aquifer below and related to the river is being built.*
During the feasibility study, the possibility of a dam effect *on the aquifer was considered with consequent drawdown intumescence upstream the bulkhead system and depression downstream. In order to manage such a problem, which could have an impact on the urban area, ITALFERR S.p.A. and on its behalf the group of companies in charge of the construction of the important work, (SPT Scrl) have requested the cooperation of the GLIA – Polytechnic of Turin in order to carry out a complete hydrogeological study of the involved situation, both from a structural – hydrodynamic and hydro-chemical point of view.*
The study, carried out between 2003 and 2005, led to the creation of a complete monitoring system involving the installation of some hydrometric stations along the river, the continuous measurement of the groundwater levels on about twenty equipped piezometers and the collection of

1. premessa

Il progetto per la realizzazione del quadruplicamento ferroviario del Nodo di Torino, nel tratto cittadino compreso tra le attuali stazioni di Torino Porta Susa e Torino Stura, prevede l'attraversamento in subalveo della Dora Riparia per mezzo di una galleria artificiale situata in corrispondenza dell'attuale ponte ferroviario, adiacente al ponte stradale *Alberto del Belgio* su Corso Principe Oddone.

L'interferenza di tale opera con l'acquifero soggiacente ha necessitato di una completa indagine idrogeologica tesa alla progettazione di un piano di monitoraggio dell'intera linea d'intervento, compatibilmente con la presenza della rete viaria e ferroviaria di superficie oltre che dei sottoservizi a queste direttamente interconnessi. Anche a tale scopo, è stato effettuato dal GLIA) GLIA = Gruppo di Lavoro in Idrogeologia Applicata, DITAG, Politecnico di Torino, Coordinatore: Prof. M.V. Civita) del Politecnico di Torino, per Contratto di Ricerca, uno studio dell'idrodinamica e dell'idrogeochimica delle acque sotterranee, al fine di inquadrare i caratteri idrostrutturali dell'area di stretto interesse.

La costruzione della galleria in subalveo richiede necessariamente la realizzazione di alcune opere in alveo, a carattere provvisionale, per consentire le operazioni di cantiere e salvaguardare l'incolumità dei lavoratori in opera. A tale scopo è stata approntata anche una stazione idrometrica

numerous water samples at different times. The related analyses have been interpreted in order to prevent possible pollution not attributable to the construction activities. A pluviometric station has been installed in order to supply the infiltrative inputs *to the underground flow models.*
The work describes the different data acquisition tools, the real time INTERNET transmission systems, the results and the elaborations obtained up to know both in relation with the aquifer flow and its space-time variations and the river level ranges and related floods.
The monitoring plan and the employed tools are described in detail, together with the installation problems and the employed solutions and the characteristics of the GeoGprs system designed for the automatic collection and processing of data.
This allows all the involved Companies and Bodies to be informed about the evolution of the hydrogeological situation related to the work.

Prévision et monitorage des effets sur la nappe phreatique durant les travaux d'un important ouvrage ferroviaire souterrain a Turin. *Le "Passage ferroviaire souterrain", à Turin, entre la gare de Porta Susa et la gare de Stura doit affronter un obstacle difficile: traverser la rivière Dora à travers la construction d'une galerie artificielle. Pour pouvoir procéder aux travaux, est actuellement en cours de construction un système de parois qui pénètre dans la nappe phréatique libre sous-jacente et qui est relié au cours d'eau.*

Alors que l'étude de faisabilité a d'ores et déjà été entamée, a été prise en compte la possibilité d'un dam effect *ou effet de barrage sur la nappe phréatique, accompagné d'intumescence piézométrique en amont du système de parois et de dépression en aval de ces dernières. Afin de gérer un tel problème susceptible de conduire à un impact sur le tissu urbain, ITALFERR S.p.A. et, pour le compte de cette même société, le regroupement d'entreprises chargé de la réalisation de cet ouvrage (SPT Scrl), ont sollicité la collaboration du GLIA (Politecnico di Torino) pour mener une étude hydro-géologique complète de la situation, tant au plan structurel et hydrodynamique qu'au plan hydrochimique.*

*Sur la base de cette étude, réalisée entre 2003 et 2005, a pu être entamée la phase de réalisation d'un système de monitorage complet qui a prévu l'installation de quelques stations hydrométriques sur le cours de la rivière, la mesure constante des niveaux piézométriques sur une vingtaine de piézomètres équipés à cet effet, le prélèvement de nombreux échantillons d'eau à différents moments suivi d'analyses visant la prévention d'éventuelles phénomènes de pollution non causés par les activités du chantier. Une station pluviométrique a par conséquent été installée pour fournir aux modèles de flux souterrain l'*input *en termes d'infiltrations.*
Dans le présent rapport, sont décrits les différents instruments mis en œuvre pour la collecte des données, les systèmes de transmission via INTERNET *en temps réel, les résultats et les élaborations obtenus jusqu'à présent, aussi bien en ce qui concerne le champ de mouvement de la nappe phréatique et ses variations spatio-temporelles, qu'en ce qui concerne les variations de niveau du cours d'eau et des éventuelles crues.*
Le plan de monitorage et les moyens mis en œuvre sont décrits en détail, de même que les problématiques d'installation, les solutions d'installation utilisées et les caractéristiques du système GeoGprs mis en place pour la collecte et le traitement automatique des données.
De la sorte toutes les sociétés et les organismes concernés peuvent être informés de l'évolution de la situation géologique liée à l'ouvrage.

sulla Dora Riparia, a monte rispetto al settore d'intervento, in ambito extra-urbano nel territorio del Comune di Caselette, a circa 27 Km dall'area d'intervento, con lo scopo di studiare e controllare i tempi di arrivo delle onde di piena a carattere impulsionale, caratteristiche del fiume in esame e già ampiamente monitorate mediante la stazione Dora 1, appositamente installata immediatamente a valle del Ponte *Alberto del Belgio*.

2. Assetto litostratigrafico dell'area sottesa dai lavori

Per la definizione dell'assetto litostratigrafico dell'area esaminata sono stati utilizzati i dati desunti da una serie di stratigrafie relative a perforazioni effettuate lungo il tracciato dell'opera in progetto e nelle aree limitrofe. Le indagini geognostiche direttamente correlate con l'opera infrastrutturale nei suoi iniziali propositi progettuali hanno avuto inizio già dal 1985 e si sono conclusi con la campagna geognostica del 2005 per un totale di oltre 80 sondaggi. Il 25% di questi, sono stati necessari per la realizzazione della rete di monitoraggio idrogeologico e geochimico dell'area interessata dal progetto di sottoattraversamento del Fiume Dora Riparia.

Nel complesso, le stratigrafie esaminate hanno in comune la presenza di un modesto spessore di suolo, seguito da una successione di ghiaie con sabbia, di spessore variabile da 10 ad oltre 20 m, confermata in dettaglio dai risultati dei sondaggi della campagna 2002-2003 e da quelli dell'ultima campagna (2005). Questi ultimi sono stati realizzati quasi tutti nelle immediate vicinanze del tracciato dell'opera in progetto, ad eccezione di 6 perforazioni, poste ad una distanza compresa tra 200 e 700 m dal tracciato per particolari finalità idrogeologiche e di monitoraggio dell'acquifero soggiacente.

I sedimenti riscontrati sono attribuiti ai depositi alluvionali del livello fondamentale della pianura torinese (corrispondenti al fluviale e fluvioglaciale del Riss *Auct.*), separati dalle sottostanti unità plioceniche da un'importante superficie di erosione.

Attraverso il contributo dei dati stratigrafici relativi agli ultimi sondaggi realizzati nell'estate 2005, quest'ultima unità litostratigrafica, riscontrata in quasi tutti i sondaggi, risulta essere costituita da una successione di potenti orizzonti di sabbie con matrice limosa, non di rado fossiliferi (rinvenuti nei primi sei sondaggi SA1÷SA6). Localmente, il passaggio è segnato da un livello schiettamente limoso che raramente supera il metro (SA1, 2, 5, 6, 9, 15). Tali sedimenti sono attribuiti ai depositi marini pliocenici in *facies* Sabbie d'Asti (Fig. 1).

Tre sondaggi, due dei quali appartenenti alla serie realizzata nel 2003, adiacenti alla traccia dell'opera in progetto e l'SA14 (quello più

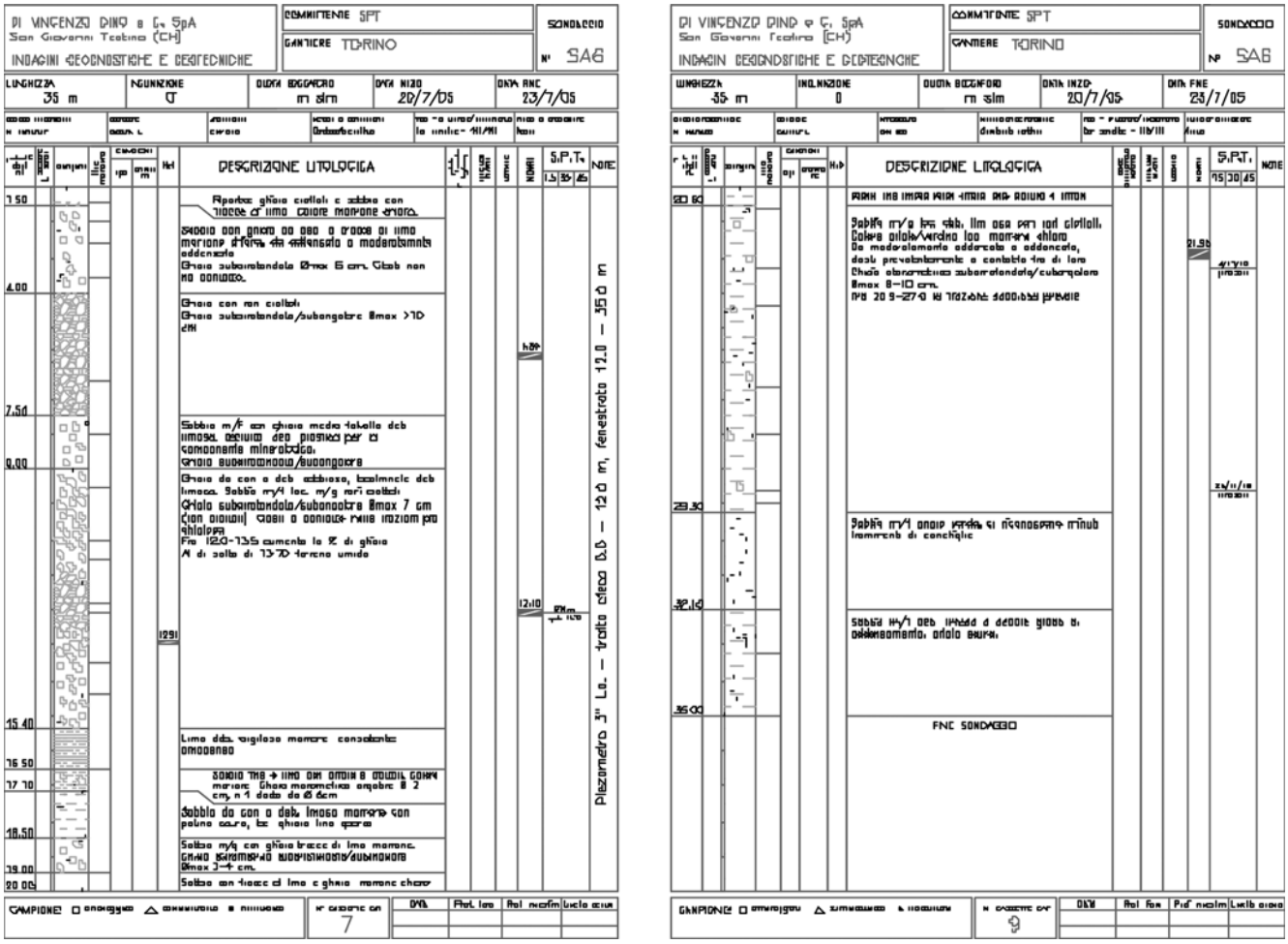

Fig. 1. Stratigrafia relativa ad un sondaggio poi attrezzato a piezometro ed oggi completato con trasduttore di pressione e trasmissione dei dati acquisiti.

occidentale tra i sondaggi realizzati nel 2005) segnalano la presenza di livelli torbosi, tipici di ambienti lacustri e palustri, caratteri che ben si adattano ai depositi fluvio-lacustri in facies Villafranchiana. Ciò evidenzia con chiarezza il passaggio in eteropia di *facies* tra le successioni plioceniche continentali (Villafranchiane) e quelle Plioceniche marine (Astiane) su le quali insistono i settori più profondi della realizzanda opera di sottoattraversamento in subalveo della Dora. Questa intercetterà nel corso del suo sviluppo, i depositi alluvionali del complesso ghiaioso–sabbioso pel l'intera sua lunghezza e nel settore centrale del tracciato, dove la struttura va più in profondità, anche il complesso sabbioso-limoso dato da sabbie e sabbie in matrice limosa.

Sulla base delle conoscenze dei caratteri geologici dell'area e dalle informazioni messe in luce dalle diverse perforazioni esaminate, si può quindi evidenziare la seguente situazione stratigrafica, dai depositi più recenti ai più antichi:

Depositi alluvionali recenti, con ghiaie fresche e sabbie, suolo, ove presente, molto ridotto; spessori intorno alla decina di metri, presenti in prossimità dei principali corsi d'acqua e limitati da un primo ordine di terrazzi con una altezza variabile da 2 a oltre 15 m.

Depositi alluvionali del livello fondamentale della pianura torinese, corrispondenti al fluviale e fluvioglaciale del Riss *Auct.*, costituiti da ciottoli, ghiaie e sabbie con matrice scarsamente limosa e locali orizzonti conglomeratici, sovrastati da un suolo con spessore compreso tra 1 a 2 m. Lo spessore dell'intera sequenza, piuttosto variabile, è compreso tra i 10 m ed oltre 20 m.

Depositi argilloso-ghiaiosi, corrispondenti ai depositi pliocenici in *facies* villafranchiana. Alternanze di potenti orizzonti argillosi con strati di ghiaie e sabbie che superano anche i 100 m di potenza. Si sviluppano al di sotto della copertura quaternaria nel settore W e NW dell'area in esame. Nell'area di Venaria-Borgaro, i livelli produttivi vengono sfruttati dal locale campo pozzi per l'approvvigionamento idrico di buona parte della città di Torino.

Depositi sabbioso-argillosi, localmente fossiliferi, corrispondenti ai depositi pliocenici in *facies* prevalentemente astiana. Si tratta di sabbie, localmente cementate, spesso con

matrice limosa, con spessori elevati, superiori alle centinaia di metri. Si estendono al di sotto della copertura quaternaria e si trovano lungo una fascia, larga circa 1500 m orientata NNE-SSW, che comprende anche l'area di stretto interesse. Ad W, tali depositi passano in eteropia ai suddetti depositi in *facies* villafranchiana.

3. Scenario idrogeologico

Nelle grandi linee, l'idrostruttura della Pianura torinese s'impernia su un acquifero libero, l'alimentazione del quale è strettamente collegata all'idrografia superficiale, tanto da presentare localmente oscillazioni piezometriche importanti.

Tenendo conto delle diverse caratteristiche idrostrutturali delle varie unità litostratigrafiche ed integrando tali dati con quelli idrodinamici, è stato possibile riconoscere tre complessi idrogeologici[1] di seguito descritti, dal più antico al più recente:

Complesso sabbioso-limoso: sabbie in matrice limosa con permeabilità da media a bassa: tale complesso ospita l'acquifero profondo della zona pedecollinare di Torino ed interessa la porzione centrale e centro-orientale dell'area in esame. Il complesso è intercettato dal tracciato dell'opera in progetto al di sotto del livello quaternario. Il valore di conducibilità idraulica che viene associato a tale complesso idrogeologico è K ≈ 2,7E-05 m/sec, tale valore deriva *slug test*.

Complesso delle alternanze: livelli di argille alternati con orizzonti di ghiaie e sabbie, il grado di permeabilità dei livelli produttivi è media. Tale complesso, che si riferisce ai sedimenti del Pliocene medio-superiore, caratterizzanti la facies villafranchiana, non affiora nell'area in esame, ma viene di norma raggiunto dalle perforazioni ad una profondità maggiore di 30 m nel settore occidentale dell'area in esame. Tale profondità aumenta man mano che ci si sposta verso W e NW (fuori area), raggiungendo e superando i 60 m. Le potenze per l'intero settore di pianura in esame sono variabili: non sono rari spessori di 150 ÷ 200 m, come testimoniano le stratigrafie del campo pozzi SMAT di Venaria-Borgaro, distante dal limite superiore dall'area in esame circa 4 km verso N. I valori medi di conducibilità idraulica (K) e trasmissività (T) dei livelli produttivi di tale complesso idrogeologico, ottenuti mediante l'applicazione del codice di calcolo Q_{spec}[2] ai dati costruttivi e ai relativi, numerosi test di pozzo del campo – pozzi di Venaria-Borgaro forniscono un valore di K = 2,7E-04 m/s e un T = 5,3E-03 m^2/s.

Complesso ghiaioso-sabbioso: ghiaie e sabbie con matrice debolmente limosa. La conducibilità idraulica, (K) ottenuta da prove di acquifero, è medio-alta (1,4E-03 m/s), la trasmissività (T) è pari a 1,32E-02 m^2/s. Tale complesso comprende i depositi alluvionali del livello fondamentale della pianura torinese, ai quali vanno aggiunti i sistemi terrazzati alluvionali più o meno recenti, interessanti le fasce fluviali dei corsi d'acqua dell'area in esame (depositi alluvionali recenti ed attuali).

4. Identificazione degli acquiferi

Sulla base dello schema idrogeologico dell'area in esame e dalla ricostruzione dell'assetto idrostrutturale, è possibile identificare due corpi acquiferi più o meno interconnessi tra loro e con il Fiume Dora Riparia, il quale rappresenta, in questo particolare contesto, l'elemento cardine del bilancio idrogeologico dell'area in esame. Si distinguono, pertanto:

– un acquifero libero;
– un multiacquifero.

L'**acquifero libero** ha sede principalmente nel complesso ghiaioso-sabbioso ma comprende, data l'assenza di elementi strutturali di separazione, anche il complesso sabbioso-limoso ad esso soggiacente e direttamente interconnesso, a meno di limitati settori separati da livelli limosi discontinui e poco spessi (~1 m) presenti al passaggio tra i due complessi;

Il complesso ghiaioso-sabbioso è alimentato direttamente dalle precipitazioni meteoriche e dalle perdite dei corsi d'acqua principali e non. A più ampia scala, sembra trovare estensione nei complessi *morenico e fluviale antico* che si estendono a N dell'area studiata fino al limite occidentale col basamento lapideo alpino. La geometria dell'acquifero libero è improntata da spessori variabili tra i 50 ÷ 60 m della zona prossima al basamento lapideo del settore occidentale della pianura ed i 15 ÷ 20 m in prossimità del settore orientale della stessa, direttamente interessato dall'opera in progetto. La ricostruzione della geometria è basata sulle molte stratigrafie del data-base del GLIA, ritenute valide ed attendibili, e che interessano l'intera sequenza alluvionale quaternaria, fino ad intercettare i complessi sottostanti (*Complesso delle alternanze* e *Complesso sabbioso-limoso*). La giacitura della superficie di erosione quaternaria, lungo la quale è stato individuato il limite tra l'acquifero libero e quelli sottostanti, condiziona solo in parte il campo di moto dell'acquifero libero. Infatti, il Fiume Dora Riparia è il vero regolatore di tale campo di moto nell'area in esame, poiché impone una notevole dominanza sull'acquifero con il

[1] L'insieme di una o più associazioni di *facies* definisce un ambiente deposizionale e questo, a sua volta, può essere riferito ad un *complesso idrogeologico* formato da più orizzonti con una comprovata unità spaziale e giaciturale ed un campo di permeabilità relativa che si mantiene in un intervallo di variazione abbastanza ristretto (Civita, 1973).

[2] Il codice di calcolo citato (Civita, 1997), permette la definizione dei parametri idrodinamici K, T ed S utilizzando i dati di portata Q, il livello statico, quello dinamico, il diametro del pozzo, lo spessore del saturo, la lunghezza dei tratti filtrati ed il coefficiente d'immagazzinamento, se conosciuto.

suo andamento meandriforme nel settore più occidentale dell'area e le sue irregolari oscillazioni di livello, legate alla notevole estensione del suo bacino idrografico, che riguarda l'intera Valle di Susa, valutato in oltre 1000 km^2.

Il settore in esame rappresenta la parte terminale di tale sistema idrografico, essendo a poche centinaia di metri dal Fiume Po, del quale la Dora Riparia, insieme allo Stura di Lanzo a N ed ai torrenti Sangone e Chisola a S, rappresentano gli affluenti principali del settore torinese.

Nel profilo idrogeologico NNE-SSW che segue la traccia dell'opera in progetto e nella rappresentazione del campo di moto dell'acquifero libero (Fig. 2), si osserva il moderato effetto di richiamo della Dora nei confronti dell'acquifero. Tale effetto risulta, da un'attenta analisi del campo di moto, in parte invertito in alcuni settori nell'intorno dell'asta fluviale. In detti settori, infatti, sono frequenti le inversioni dei rapporti afflusso-deflusso in funzione delle variazioni di quota del fiume Dora Riparia. Ciò è da collegarsi alle variazioni di portata alle quali la Dora è naturalmente soggetta nel corso dell'anno ideologico ($5 < Q < 50$ m^3/s) in virtù delle precipitazioni e dell'ampiezza del suo bacino idrografico.

Sottostante al livello acquifero ghiaioso-sabbioso, nel settore orientale dell'area in esame (compresa l'area che verrà direttamente interessata dall'opera) vi è un livello sabbioso, la conducibilità idraulica del quale è medio-bassa. Questo livello produttivo, data l'assenza di accertati elementi strutturali di separazione, è direttamente interconnesso con il sovrastante. La conformazione idrostrutturale, nel suo complesso, si configura come un *acquifero multilivello*, ossia due livelli acquiferi sovrapposti con livello piezometrico unico.

Un importante **multiacquifero** in pressione, che ha sede nel complesso delle alternanze, è presente nella parte occidentale dell'area in esame (all'incirca dal meandro della Dora verso W e NW). Esso è caratterizzato da livelli produttivi ghiaiosi (sabbiosi nei livelli più profondi) con conducibilità idrauliche medie di 2,7E-04 m/s, intervallati da livelli argillosi. Tali livelli acquiferi mostrano strutture lenticolari variamente estese e spesse, date principalmente da ghiaie e subordinatamente anche da sabbie, con immersone degli strati di alcuni gradi verso W. Tale assetto giaciturale condiziona quindi localmente il flusso sotterraneo con fenomeni d'interscambio (*leakage*) tra i diversi livelli.

5. *campo di moto dell'acquifero libero*

Per quantificare le informazioni inerenti l'acquifero libero del settore di pianura corrispondente all'area in esame, ossia per definire correttamente le aree di ricarica, il panneggio piezometrico, le direzioni di flusso, ci si è basati su Civita & Pizzo, (2001), lavoro basato sui dati GLIA raccolti nel tempo. Tali dati hanno permesso di raggiungere lo scopo prefissato, ossia quello di fornire uno *schema interpretativo del campo di moto* dell'acquifero libero (Fig. 2). Risulta evidente che i dati utilizzati non sono temporalmente omogenei ma che, comunque, anche alla luce delle recenti misure piezometriche, sono ampiamente affidabili. Pertanto, il risultato conseguito deve essere considerato orientativo ai fini della definizione del campo di moto dell'acquifero libero dell'area in esame.

La Fig. 2 mostra, nel suo insieme, l'andamento del flusso dell'acquifero libero. Il reticolo di flusso è ottenuto dall'intersezione delle curve isopiezometriche con intervallo di 2,5 metri, con le direzioni del flusso. La rete di flusso tiene conto delle quote del pelo libero del Fiume Dora Riparia in modo da descrivere ed evidenziare i rapporti tra tale corpo idrico e l'acquifero soggiacente.

Da un'analisi più generale dell'ampio settore sotteso dal corso della Dora Riparia, la morfologia della superficie piezometrica è radiale complessa con concavità poco accentuata verso valle ed un graduale aumento dell'interasse tra le isopiezometriche contigue. Il flusso tende abbastanza uniformemente verso il corso del Po, che costituisce il livel-

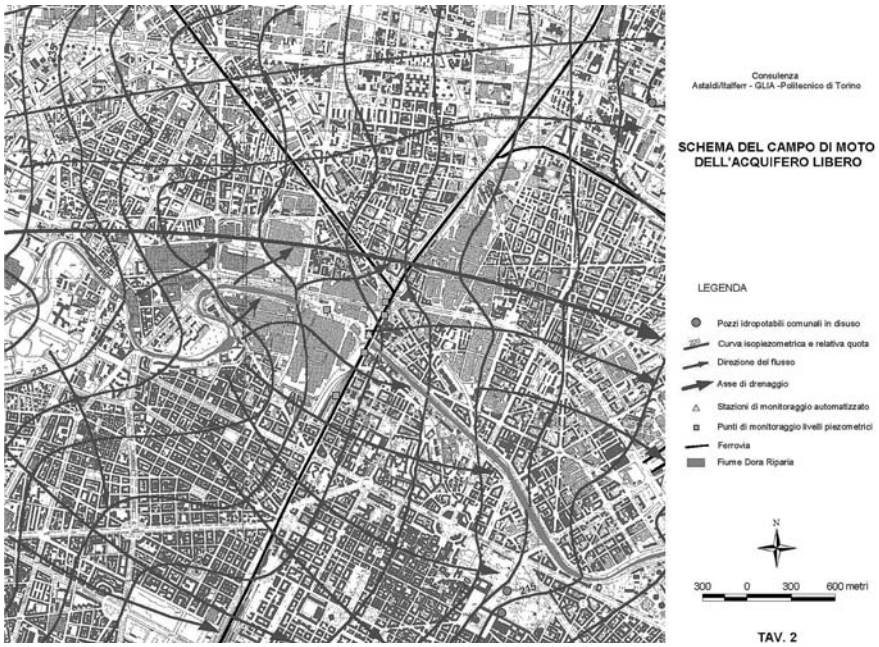

Fig. 2. Campo di moto dell'acquifero libero (stralcio da Civita & Pizzo, 2001).

lo di base locale e riceve il flusso sotterraneo in drenaggio passivo.

Dal limite nord-occidentale dell'area in esame, l'interasse tra le curve isopiezometriche risulta essere abbastanza regolare con direzione di flusso W-E e gradiente idraulico dell'ordine del 6 ‰. In tale settore, la soggiacenza è abbastanza costante, attestandosi su valori di circa 18÷20 m, in diminuzione di qualche metro nella parte più orientale del settore in esame, dove raggiunge i 16,5 m (SA 10). Procedendo verso S, risulta chiara l'influenza della Dora Riparia sul flusso idrico sotterraneo. Infatti, nel settore centro-orientale dell'area in esame, contraddistinto dalla conformazione meandriforme del corso d'acqua, la Dora ha una chiara funzione perdente a beneficio del sistema acquifero che, di concerto, contribuisce a smaltire le acque indirizzandole, secondo una conformazione radiale divergente, verso il vicino livello di base locale rappresentato dal Fiume Po a circa 4.000 m verso E rispetto al lobo centrale del meandro della Dora Riparia.

Caratteristica è l'origine del *ventaglio* divergente delle direzioni del flusso che s'irradiano dall'apice del meandro, che chiarisce la funzione di erogatore/regolatore che ha la Dora Riparia in questo settore. Tale funzione è enfatizzata dalla presenza di due importanti traverse le quali, oltre a regolarizzarne il flusso, diminuiscono di fatto l'azione erosiva verso le sponde esterne dell'alveo, contribuendo in maniera sostanziale attraverso sovralzi significativi del profilo fluviale, a generare e gestire il campo di moto dell'acquifero libero nel settore centrale dell'area.

Il gradiente idraulico nel settore centrale è di 3,6 ‰. Si tratta di un valore tra i più bassi registrati nell'intera area, testimone questo dell'effetto delle traverse. Oltre tale settore, infatti, il gradiente cresce, raggiungendo il 11,2 ‰, poco a monte dell'opera, per poi regolarizzarsi, attestandosi a tra 4,5 e 7 ‰. Come atteso, il gradiente idraulico tende a diminuire nel settore più orientale (2 ‰ ÷ 4 ‰), dove incomincia a risentire dell'influenza del Po. Da tale settore, infatti, verso E il panneggio mostra un più ampio interasse tra le isopiezometriche, data anche la concomitante presenza dei depositi alluvionali recenti, dotati di elevata permeabilità.

Nel settore meridionale, il gradiente idraulico mostra valori piuttosto costanti, attestandosi su valori di circa 5 ‰, crescendo localmente dalla isopiezometrica 220 alla 215 m, raggiungendo poi un minimo di circa il 5 ‰ nell'estremo settore SE dell'area in esame. Le direzioni del flusso hanno, il linea di massima, una vergenza da W a E. Nel settore meridionale, il sistema acquifero risente dell'azione drenante della Dora Riparia: le direzioni del flusso, infatti, inizialmente da NW a SE, virano verso la destra orografica della Dora evidenziando, nel sistema corso d'acqua/acquifero, un'azione drenante, mentre in corrispondenza del versante sinistro, i valori piezometrici registrati sono leggermente più bassi ed impongono, pertanto, il deflusso dalla Dora all'acquifero.

A questo punto, si deve stabilire che il Fiume Dora e l'acquifero soggiacente sono interconnessi e rappresentano un sistema in mutua evoluzione: *saranno, pertanto, le ordinarie oscillazioni stagionali delle acque della Dora a gestire il sistema afflussi/deflussi nell'area in esame*. A tale giudizio va aggiunto anche che il Fiume Dora, come in precedenza descritto, drena un bacino idrografico di oltre 1000 km^2 ed è suscettibile pertanto di notevoli variazioni di portata, talvolta repentine, come ben evidenziano i dati monitorati con cadenza oraria da maggio 2003 ad oggi (Staz. Dora 1).

6. Rapporti fiume-acquifero

Nell'anno 2003, in un'area ristretta del cantiere in oggetto furono realizzate due perforazioni che interessavano in modo autonomo l'acquifero superficiale ghiaioso-sabbioso e quello più profondo più schiettamente sabbioso, a cui è seguito il confronto tra i livelli registrati nei suddetti piezometri nominati "differenziali" SI 11 (superficiale) e SI 12 (profondo) ed i livelli idrometrici della Dora Riparia (Staz. Dora1); il grafico di Fig. 3 ne raccoglie gli andamenti.

Il confronto tra l'andamento dei livelli registrati nei due piezometri mostra la contemporaneità delle variazioni, evidenziando l'unicità dell'acquifero sotteso dall'opera in progetto, ossia il fatto che si tratta, nel complesso, **di un sistema acquifero multilivello (**due livelli acquiferi sovrapposti ma un unico livello piezometrico comune). Questo coincide con l'assenza di elementi strutturali di separazione tra il livello acquifero inferiore sabbioso-limoso e quello superiore ghiaioso-sabbioso. Il confronto di questi andamenti con i livelli idrometrici della Dora, prova con estrema chiarezza, i mutui rapporti fiume-acquifero, evidenziando una strettissima correlazione, data la coincidenza tra le variazioni di livello registrate ai due piezometri, rispetto all'incremento impulsionale del livello idrometrico registrato per la Dora.

Il monitoraggio del piezometro SI11 da giugno 2003 a settembre 2004 (Fig. 4) evidenzia come il livello piezometrico, in questo prolungato periodo di osservazione, ha subito incrementi stagionali che restano entro i 50 cm rispetto al valore minimo registrato nel mese di agosto 2003.

6.1. Caratteri idrometrici della Dora Riparia a Torino

Il livello idrometrico misurato sul corso d'acqua in esame dipende dalle precipitazioni meteoriche, dallo scioglimento delle nevi ed

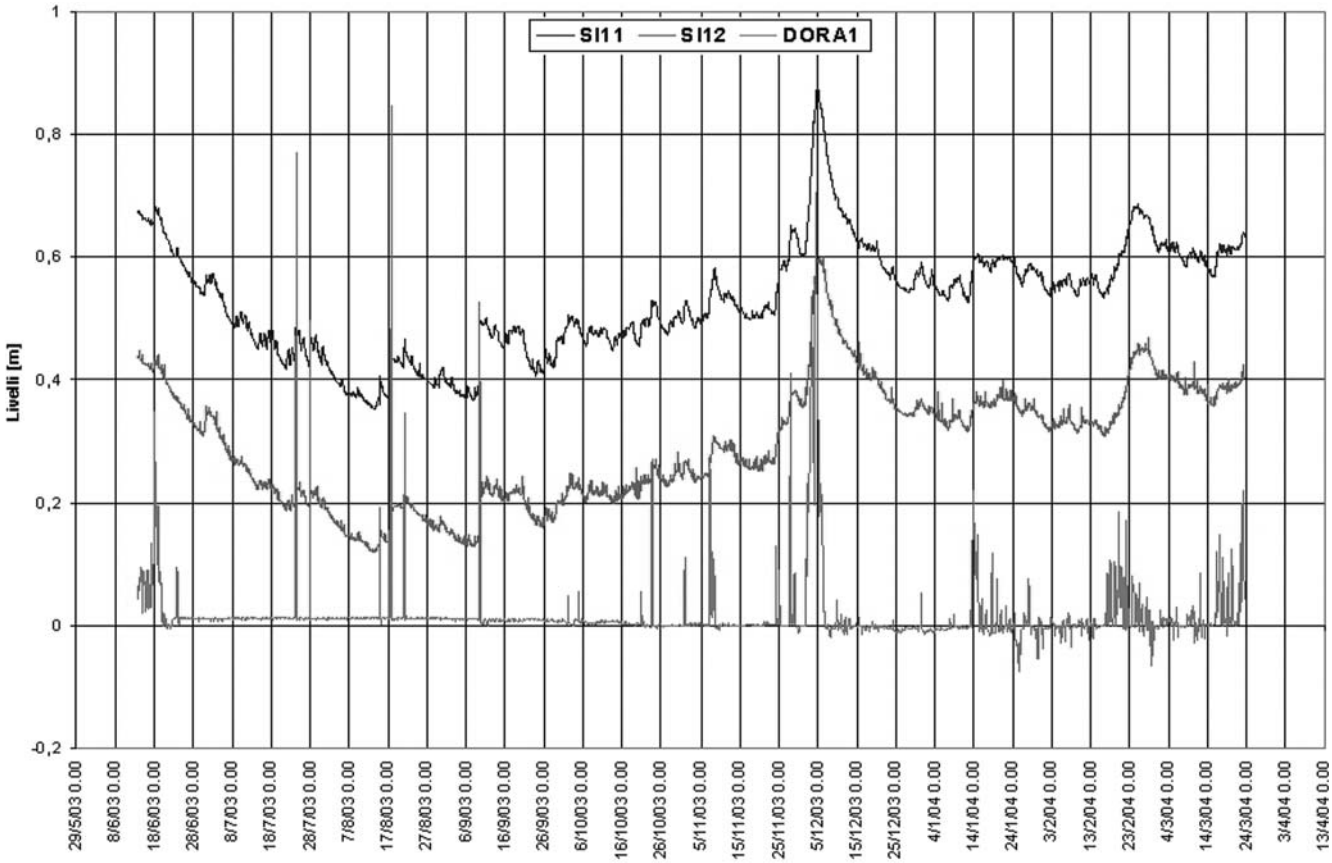

Fig. 3. Confronto tra i livelli piezometrici dei piezometri differenziali SI11 ed SI12 e il F. Dora alla Stazione 1.

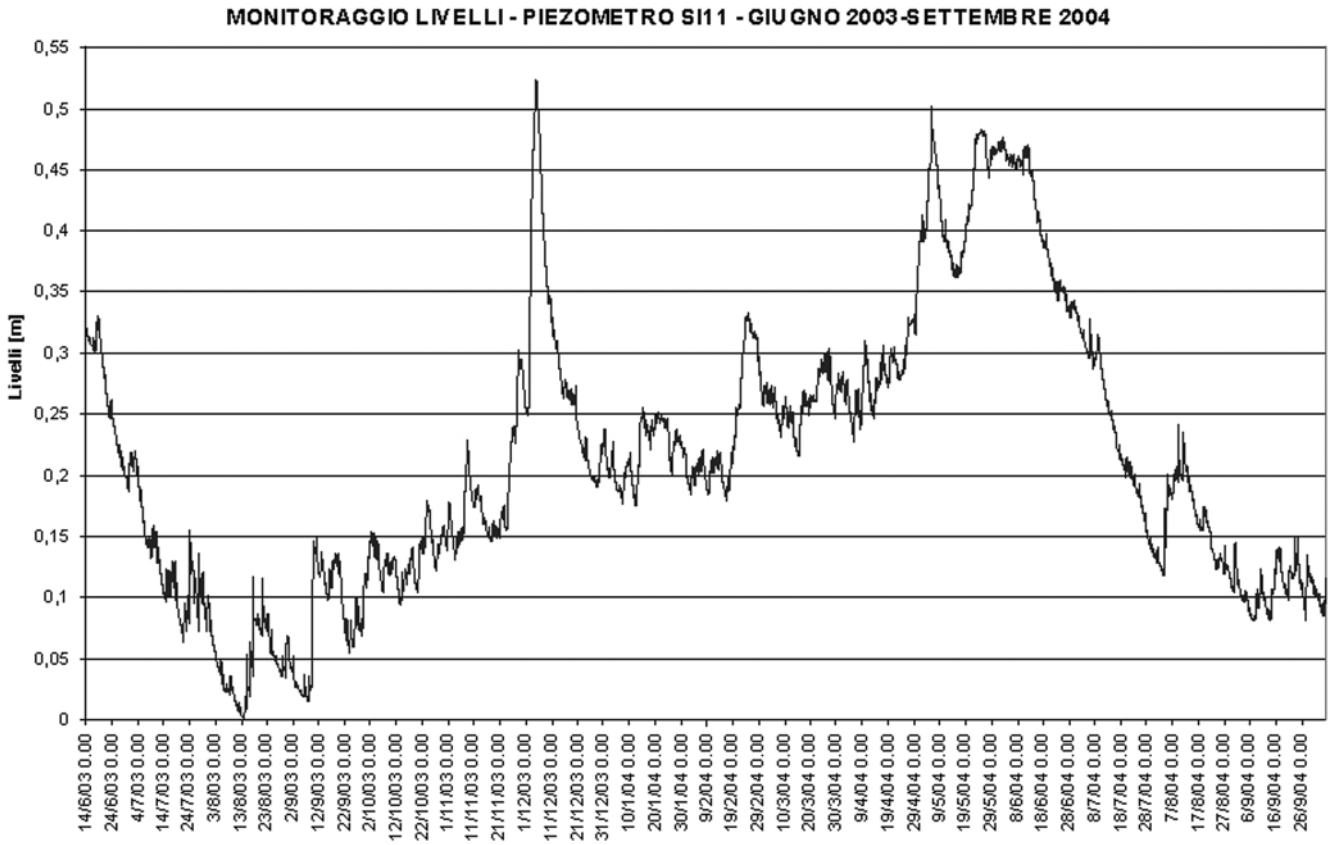

Fig. 4**.** Andamento stagionale dei livelli al piezometro SI11.

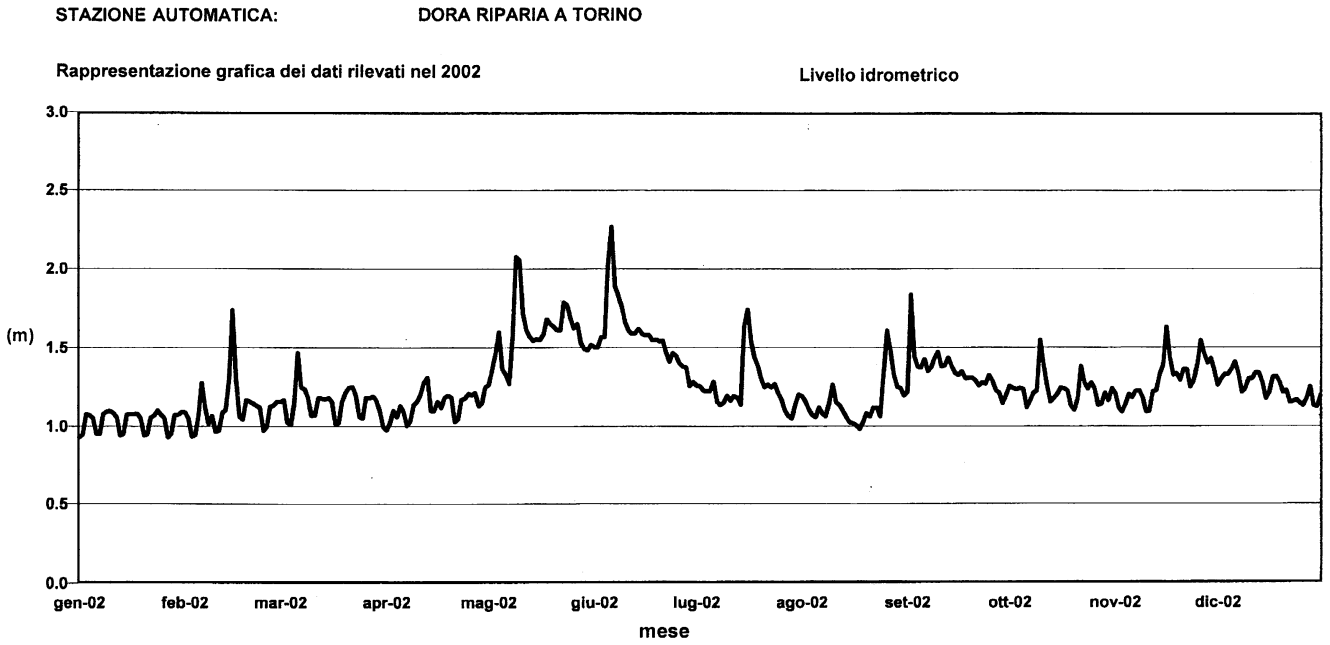

Fig. 5. Livello idrometrico del Fiume Dora Riparia, stazione DRITO – Ponte Washington Torino – anno 2002.

anche dall'alimentazione da parte dell'acquifero. Le portate istantanee indicano la quantità d'acqua che passa attraverso una sezione nota del corso d'acqua nell'unità di tempo, nota la scala di deflusso specifica della sezione. I dati ufficiali della Regione Piemonte relativi all'asta terminale del fiume si riferiscono alla Stazione Idrometrica "Dora Riparia a Torino" (cod. DRITO), ubicata al Ponte Washington (ultimo ponte che attraversa il Fiume Dora prima della confluenza con il Fiume Po). La quota dello zero idrometrico è 210,68 m.s.l.m.m; l'anno d'inizio delle osservazioni è il 2002.

L'analisi del grafico, relativo alle variazioni del livello idrometrico della Dora Riparia nel corso dell'anno 2002 (Fig. 5), rappresenta l'andamento tipico della Dora Riparia e permette le seguenti osservazioni. Durante il mese di gennaio, il livello idrometrico mostra delle moderate oscillazioni che non superano i 20 cm. Queste hanno un carattere ciclico della durata di 8÷10 giorni. Tale intervallo temporale viene mantenuto anche nel mese di febbraio, dove però, si segnala un moderato generale incremento del livello idrometrico che, in un'unica occasione, raggiunge e supera i 60 cm. Tale andamento si riscontra anche nel mese di marzo ed aprile. Nei primi quattro mesi dell'anno, in definitiva, l'andamento dei livelli segna un *trend* moderatamente crescente con rari picchi dovuti principalmente all'effetto di intense precipitazioni di breve durata. Le portate registrate (Fig. 6) nei primi quattro mesi dell'anno, raramente superano i 14 m^3/s e si mantengono sempre sopra i 5 m^3/s. Per il mese di gennaio, si registra il minimo annuale della portata, le oscillazioni della quale si mantengono entro un *range* di 6 m^3/s con un minimo di 3,6 m^3/s e un massimo di 9,6 m^3/s.

Nel mese di maggio diventa importante l'incremento della temperatura che provoca lo scioglimento delle nevi dei rilievi alpini che bordano il bacino idrografico della Dora Riparia; inoltre diventano rilevanti le precipitazioni meteoriche, spesso di notevole entità.

Per l'intero mese di maggio e per la quasi totalità di giugno, il livello idrometrico si mantiene oltre i 60 cm rispetto a quello medio dei primi quattro mesi dell'anno, tale caratteristica porta conseguentemente ad un corrispondente, notevole incremento della portata (Q), quantificabile in oltre 40 m^3/s.

Dalla metà del mese di giugno, il livello idrometrico decresce sino a raggiungere, entro la fine dello stesso mese, valori paragonabili ai massimi registrati nei primi quattro mesi dell'anno. Nella prima decade del mese di maggio e di giugno, sono da segnalare due importanti picchi di oltre 60 cm del livello idrometrico rispetto ai livelli medi in questo bimestre. Tali picchi superano in entrambe le occasioni, i due metri d'altezza rispetto al valore medio dei primi quattro mesi dell'anno. In termini di portata massima raggiunta dai due picchi, questa si traduce rispettivamente in 80 e 120 m^3/s. La durata di tali eventi è quantificabile, considerando l'intero ciclo (incremento-decremento) in circa 8÷10 giorni ciascuno. La parte centrale del mese di luglio è dominata di un notevole incremento del livello idrostatico, quantificabile in circa 50 cm, a cui corrisponde un incremento di portata pari a circa 40 m^3/s e che in valore assoluto supera al suo massimo i 60 m^3/s. La durata è, come per le altre occasioni, ristretta a circa 7 giorni, sino all'esaurimento dell'effetto ed il ritorno a valori di portata

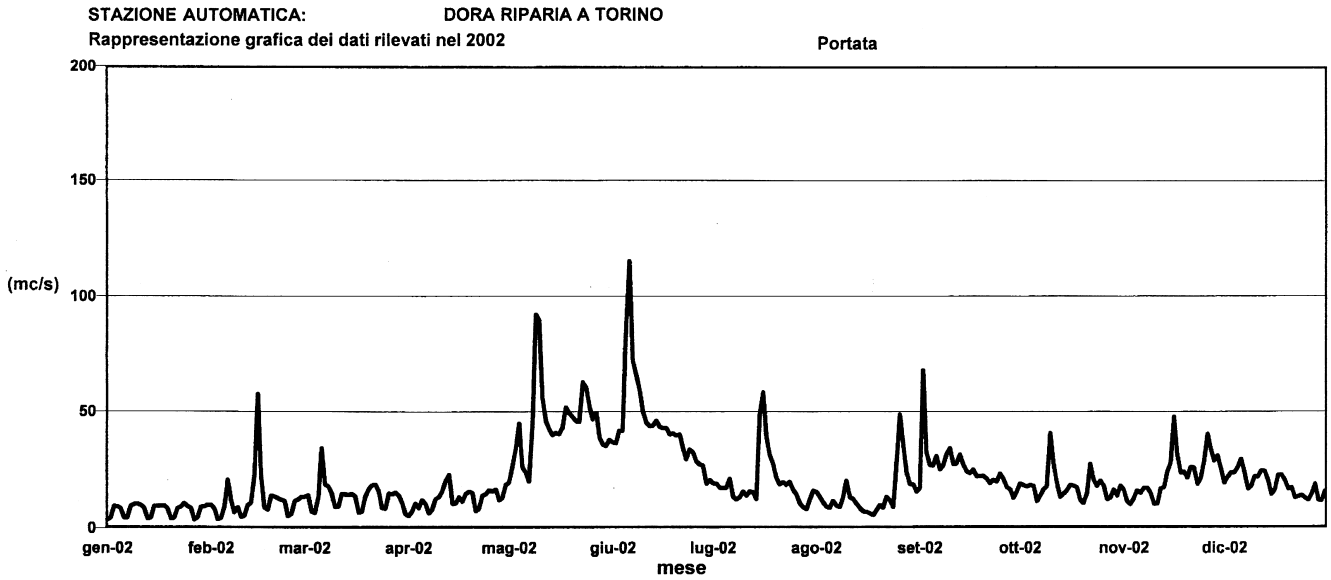

Fig 6. Portata del Fiume Dora Riparia, stazione DRITO – Ponte Washington Torino – anno 2002.

che, per il mese di luglio e quasi l'intero mese di agosto, si mantengono mediamente sui 16-18 m^3/s.

Dall'ultima parte dl mese di agosto e per tutto il mese di settembre si ripete l'andamento registrato per i mesi di maggio e giugno, anche se con un minor incremento di livello e relativa portata. Dai valori minimi quasi assoluti, registrati nelle prime due decadi del mese di agosto, si ha infatti un notevole incremento dei livelli con la presenza di due massimi, il primo alla fine di agosto ed il secondo all'inizio del mese di settembre, corrispondenti sicuramente a due eventi precipitativi rilevanti. Dissipato quest'effetto, il livello idrometrico per l'intero mese di settembre resta elevato, con un moderato *trend* discendente, che comunque mantiene valori di portata tra i 20 e i 25 m^3/s.

Nel mese di ottobre i livelli idrometrici subiscono l'effetto delle precipitazioni con un moderato incremento delle portate che solo occasionalmente (due) superano i 18 m^3/s e che mai scendono sotto i 10 m^3/s. Dalla seconda decade del mese di novembre, diventa importante l'effetto delle precipitazioni che si straduce in un notevole innalzamento dei livelli, pari a circa 40 cm ai quali corrisponde un incremento di portata quantificabile in circa 30 m^3/s. Smaltito l'effetto di tale notevole precipitazione, i livelli si mantengono comunque elevati per effetto delle intense e prolungate precipitazioni che interessano il mese di novembre e la prima metà del mese di dicembre che tengono le portate tra 16 e 28 m^3/s. Da questo momento in poi (mutuando l'andamento del gennaio dello stesso anno) e fino almeno a tutto il mese di gennaio dell'anno successivo, inizia un *trend* discendente per i livelli e di conseguenza per le portate. Tale effetto è dovuto all'abbassamento della temperatura al quale corrisponde la pressoché totale assenza di precipitazioni liquide a favore di quelle nevose, irrilevanti queste, ai fini dell'incremento dei livelli idrometrici e di conseguenza delle portate.

Il mese di aprile, come è possibile verificare dai successivi diagrammi pluviometrici relativi all'ultimo decennio del secolo scorso, indica una elevata variabilità e di conseguenza anche i livelli idrometrici risentono di tale effetto.

I mesi di maggio e giugno risultano essere quelli per i quali si è registrata la portata maggiore nel corso dell'anno in esame (2002) valutata in oltre 40 m^3/s, con picchi di 80 m^3/s e 120 m^3/s. Tale andamento è confermato anche per l'anno 2004 monitorato alla stazione Dora1 di Astaldi/Italferr installata subito a valle dell'opera di sottoattraversamento in progetto..

Nei mesi di luglio ed agosto la portata media è dell'ordine di 14 m^3/s, ma vengono rilevati due picchi attribuibili ad intense e non trascurabili periodi precipitativi.

Il mese di settembre segnala portate medie dell'ordine di 22 m^3/s con picchi di portata non trascurabili.

Ottobre e novembre, sono tristemente noti in Piemonte per gli effetti di importantissimi eventi alluvionali che hanno segnato l'intera regione piemontese nel novembre 1994 e nell'ottobre del 2000. Gli effetti di quest'ultimo, che ha avuto, nella Dora Riparia uno dei sistemi veicolanti principali, ha direttamente interessato la città di Torino che ne ha subito l'azione devastante. Il mese di dicembre segna marcatamente il decremento delle portate, legato alle scarse precipitazioni e alla notevole diminuzione di temperatura che impedisce, di fatto, precipitazioni liquide a favore di quelle nevose.

In base alla suddetta analisi idrometrica, ritenuta statisticamente probante, si è arrivati alla considera-

zione che sono i primi tre mesi dell'anno quelli più adatti ad effettuare azioni antropiche che interferiscano direttamente con l'alveo della Dora Riparia, dove, eccetto che per rari quanto brevi incrementi del livello idrometrico, la corrispondente portata si mantiene mediamente sui minimi annuali compresi tra 5 e 14 m^3/s e le variazioni di livello raramente superano i 25 cm.

La stagione invernale 2006/07 è stata particolarmente favorevole alle lavorazioni in alveo, infatti, la pressoché totale assenza di precipitazioni meteoriche degli ultimi sette mesi (l'ultima precipitazione degna di nota è da ricondurre a metà settembre 2006) ha completamente appiattito l'andamento del livello idrometrico registrato, raggiungendo livelli minimi che potrebbero compromettere l'approvvigionamento idrico per la imminente stagione estiva 2007, a meno di intense e prolungate precipitazioni primaverili.

In Fig. 7 vengono riportate alcune quote significative in corrispondenza del ponte Re Alberto del Belgio, posto immediatamente a valle dell'opera in progetto. Tali livelli si riferiscono al minimo registrato nell'estate 2003 dalla stazione automatica Dora 1; a questo, in scala, vengono aggiunti i livelli registrati in occasione di due eventi meteorici estremi, riferiti all'alluvionale del 16/06/1957 ed i più recenti dell'evento del 14-15 ottobre 2000 (dati non ufficiali).

Fig. 7. Quote significative registrate in corrispondenza del ponte Re Alberto del Belgio in Corso Principe Oddone.

Tab. 1. Eventi alluvionali significativi della dora Riparia e dei suoi affluenti.

Dora Riparia – eventi alluvionali significativi	
18-21/ottobre/1857 (*)	20/giugno/1955
giugno/1878	13-16/giugno/1957 (*)
giugno/1887	18/luglio/1963
giugno/1891	13-15/agosto/1972
23-24/settembre/1920	5/maggio/1973
3-4/maggio/1947	6/giugno/1973
25-26/settembre/1947	19-20/maggio/1977
13-15/maggio/1948	31-3/01/ aprile/1981
3-5/settembre/1948	1/luglio/1987
2-3/maggio/1949	22-24/settembre/1993
26-28/maggio/1951	3-6/novembre/1994 (*)
7-9/giugno/1955	13-16 novembre/2000 (*)

(*) Eventi alluvionali catastrofici

Nella Tabella 1 sono riportati i dati storici relativi ad eventi alluvionali della Dora Riparia e dei suoi affluenti, significativi degli ultimi due secoli relativi.

Per quanto attiene alle condizioni meteorologiche, le precipitazioni nell'area centro occidentale del Piemonte hanno un regime di tipo "litoraneo subalpino", con due massimi e due minimi di precipitazione nell'anno medio con moderata prevalenza del massimo primaverile sull'autunnale con minimo invernale inferiore a quello estivo.

Per il bacino della Dora Riparia il regime dei deflussi segue, in termini assoluti, l'andamento degli afflussi meteorici. In generale la portata massima (Q_{MAX}) della Dora Riparia a Torino è valutata in 500 m^3/s. (Tr incerto – 200 anni?). Alcune portate storiche possono costituire un utile riferimento:

- Ottobre 1857 – Q = 750 m^3/s (Ponte Mosca)
- Giugno 1957 – Q = 502 m^3/s (Ponte Emanuele Filiberto)

Il modello idraulico della Dora (dalla confluenza al Po al ponte F.S.) costruito mediante HEC-2 suggerisce una portata di piena di 590 m^3/s corrispondente ad un Tr = 500 anni. Nel caso dell'alluvione del 2000 è stato possibile stimare un valore di 700 m^3/s per la portata di picco a Torino. Le misure del 16/10/2000 danno per la Dora Riparia a Torino 626 m^3/s (fonte: ARPA Piemonte).

7. Il piano di monitoraggio

Allo scopo di valutare la possibile interferenza che l'opera prevista in progetto definitivo può generare con l'acquifero soggiacente e le criticità che ne possono derivare, è stato impostato lo studio e il progetto di monitoraggio di seguito illustrato.

L'opera in progetto impegnerà per tutta la sua lunghezza il comples-

so ghiaioso-sabbioso, e nella sua porzione centrale anche il più profondo complesso sabbioso-limoso. La struttura delle gallerie (paratie e tappo di fondo) è previsto che impegni l'acquifero sabbioso sino a profondità variabili da 25 a 35 m ca. dal p.c. per uno spessore che nel settore centrale dell'opera in progetto è compreso tra 15 e 20 metri.

La presenza dell'opera, prevede una sorta di adattamento dell'acquifero alla presenza di questa struttura che, almeno inizialmente, interferirà con l'acquifero provocando un moderato rialzo piezometrico. Tale effetto (*dam effect*) deve poter essere mitigato *naturalmente* cercando, nei limiti imposti dalla sicurezza strutturale, di favorire il deflusso idrico da W verso E.

7.1. Le stazioni di monitoraggio esistenti

In considerazione del fatto che l'opera in progetto, interferirà direttamente, oltre che con l'acquifero soggiacente, anche con il corso d'acqua superficiale ad esso idro-geologicamente interconnesso, in accordo con ASTALDI S.p.A sono stati installati 2 acquisitori automatici di livello sulla Dora Riparia a Torino.

L'ubicazione delle due stazioni di monitoraggio, denominate: Dora 1 (Fig. 8), quella ubicata a circa 70 m a valle del ponte Alberto del Belgio di Corso Principe Oddone e la stazione Dora 3 a circa 850 m ad ovest rispetto l'asse del tracciato dell'opera, in corrispondenza del lobo inferiore del meandro della Dora.

La stazione idrometrica automatica Dora 1 è stata approntata già nel maggio 2003, la cella di pressione è collocata dentro una tubazione di protezione, a circa 30 cm dal greto del fiume, in modo da risultare permanentemente immersa in acqua, a meno di periodi siccitosi come verificatesi nell'estate 2003 e nel periodo attuale.

Il sistema di alimentazione dello strumento di acquisizione, è allocato entro un pozzetto protettivo ubicato al top dell'argine (Fig. 8) che confina l'alveo del fiume. Il cavo di collegamento tra i due elementi della strumentazione citata, corre all'interno di un tubo corrugato Ø 3", fissato alla banchina di base e poi al muro/argine sino a raggiungere il citato pozzetto.

Le due foto in Fig. 9 mettono in evidenza le caratteristiche di installazione della stazione idrometrica consentendo di confrontare visivamente il livello della Dora nel periodo estivo con portata media stagionale rispetto allo stesso periodo in condizioni di magra eccezionale (estate 2003).

Nel settembre 2005 è stata approntata la stazione di misura denominata Dora 3, essa è ubicata a circa 850 m a W della traccia dell'opera in progetto, in corrispondenza del primo sistema di meandro, a monte di due importanti traverse, collocte allo scopo di mitigare l'energia della corrente fluviale che naturalmente in quel tratto porterebbe all'ampliamento del meandro. Tale sistema, data la maggior quota assoluta imposta delle traverse, permette la distribuzione a raggiera delle acque del Fiume Dora verso l'acquifero soggiacente.

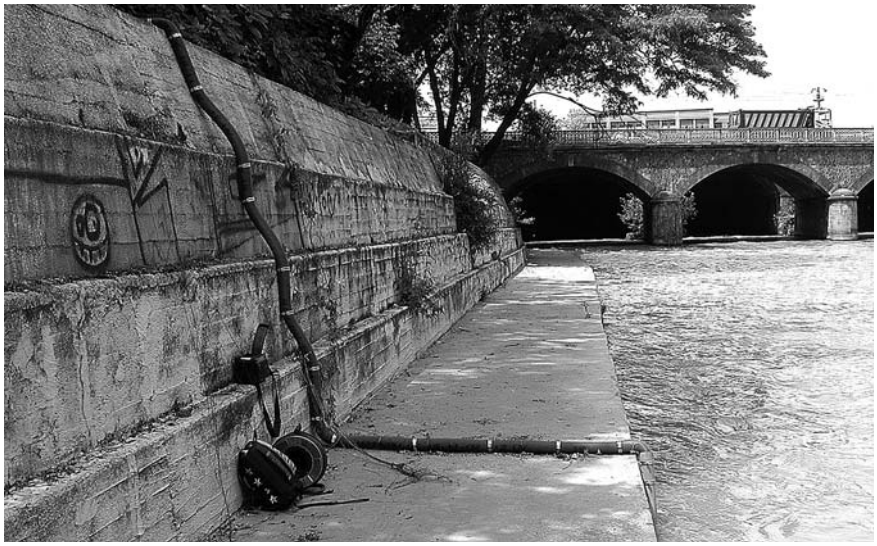

Fig. 8. Stazione di monitoraggio automatico Dora 1.

Fig. 9. Stazione Dora 1 – periodo estivo, confronto tra condizioni tipiche normali e siccitose.

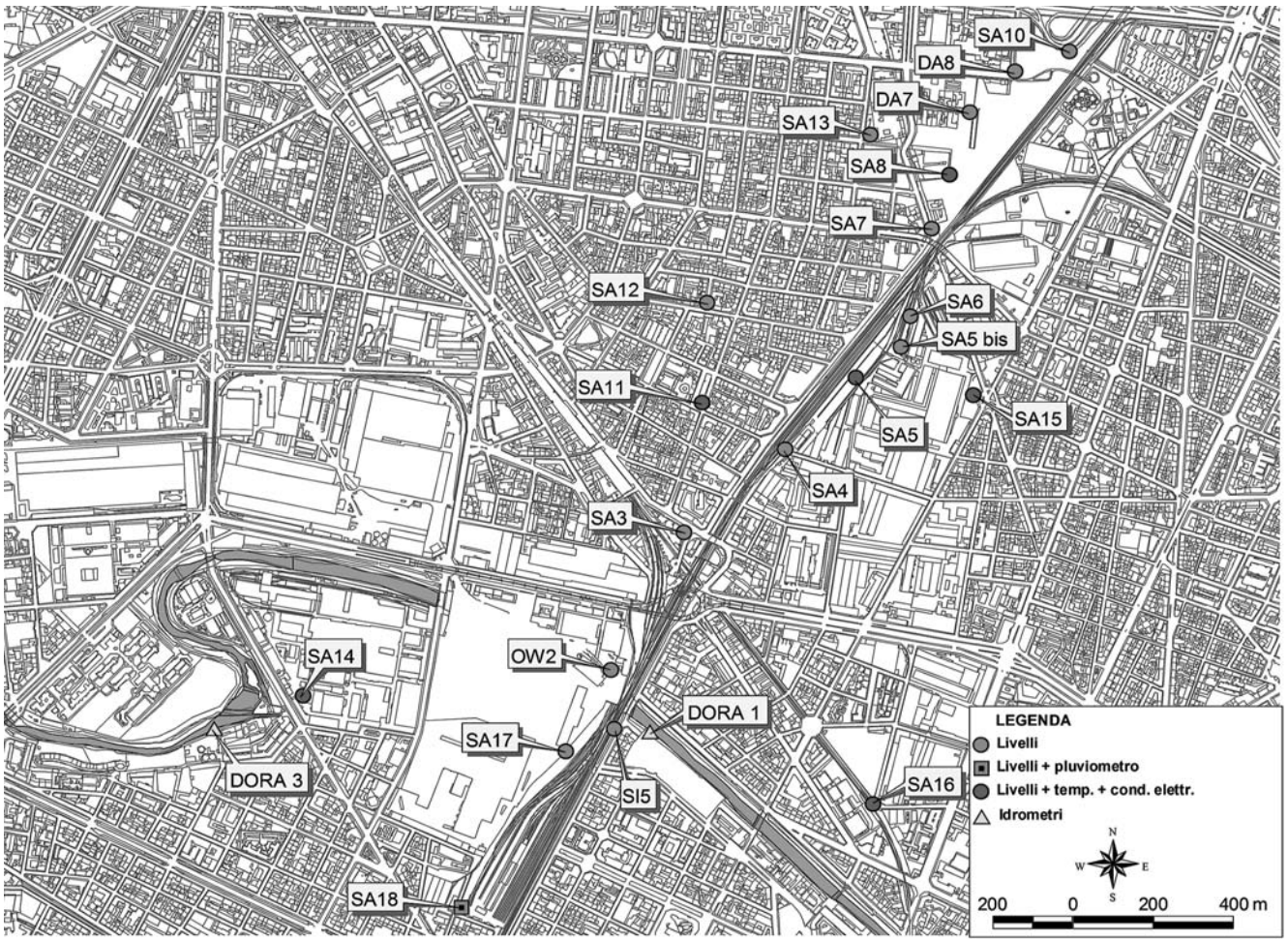

Fig. 10. La rete di monitoraggio piezometrico.

7.2. IL quadro del monitoraggio

Data la conformazione strutturale dell'opera in esame, essa interferirà in modo diverso con l'acquifero che interseca, a seconda dei diversi mutui rapporti tra profondità di incisione e direzione di flusso. Tali caratteri sono diversi da luogo a luogo, pertanto l'acquifero reagirà, almeno inizialmente, in modo diverso nei diversi settori. Date le possibili implicazioni legate ad un eventuale sopralzo del livello piezometrico dell'acquifero a monte flusso (rispetto al tracciato dell'opera), è di fondamentale importanza la progettazione di un sistema di monitoraggio dei livelli piezometrici, tale da controllare le modifiche idrodinamiche indotte dall'opera all'acquifero.

La rete di monitoraggio consta attualmente di 22 punti di misura (Fig. 10), così distribuiti per tipologia e ubicazione:

- 13 a monte flusso (10 controlleranno i livelli piezometrici e 3 i livelli, la temperatura e la conducibilità elettrica);
- 7 a valle flusso (4 controlleranno i livelli e 3 i livelli, la temperatura e la conducibilità elettrica);
- 1 stazione pluviometrica associata all'acquisitore installato nella postazione più a sud all'interno del cantiere di ex Scalo Valdocco.
- 2 stazioni idrometriche sul fiume Dora: Staz. Dora 3 a monte e Staz. Dora 1 a valle della costruenda opera.

Recentemente è stata installata una terza stazione idrometrica (Dora 4) in posizione extraurbana, in bassa valle di Susa, nel Comune di Ca-

Fig. 11. Idrofresa in sede fluviale (foto A. Quaglietti).

selette, allo scopo di controllare la velocità di trasmissione di eventi idrometrici importanti, che possano avere ripercussioni direttamente nell'opera in corso di costruzione nell'alveo della Dora Riparia e nei mezzi e maestranze ad essa direttamente collegate (Fig. 11). Tale stazione di misura, risulta avere un'importanza strategica nelle lavorazioni che avverranno in alveo della Dora a Torino, dato che il sistema nella sua completezza, potrà allertare contemporaneamente il capocantiere, l'assistente di cantiere ed il responsabile dei sistemi di monitoraggio mediante un messaggio SMS di allarme, inviato in automatico al telefono cellulare del suddetto personale quando il sensore di misura acquisirà dei dati idrometrici i cui livelli superano un preimpostato valore di soglia.

Tale postazione è a carattere sperimentale: infatti si prevedono controlli e tarature dei dati acquisiti e trasmessi in automatico allo scopo di ottimizzare i tempi di allarme e che a seconda degli effetti ottenuti, potrà essere passibile di spostamenti (più prossimi a Torino) aventi lo scopo di ottimizzare il sistema.

7.3. *Il sistema di monitoraggio*

Il sistema di monitoraggio approntata, comprende oltre al controllo della variazione del livello piezometrico, anche i possibili cambiamenti dei caratteri chimico-fisici dell'acquifero eventualmente associabili alla realizzazione delle strutture sotterranee, tale da richiedere anche il controllo dei parametri temperatura e conducibilità elettrolitica.

Il sistema realizzato, pertanto, nella sua interezza richiede un esame dei suddetti parametri, *ante operam* e *post operam* in modo da controllare in dettaglio le evoluzioni ed il processo di adattamento idrodinamico del sistema acquifero alla nuova struttura nella successione delle varie fasi realizzative.

La rete di monitoraggio (20 piezometri + 2 idrometri), ha lo scopo di controllare i livelli piezometrici dell'acquifero nell'area circostante l'opera di sottoattraversamento in subalveo della Dora Riparia e quelli della Dora stessa.

Fig. 12. Acquisitore automatico di livello.

Tutti i piezometri preposti al monitoraggio, sono strumentati con acquisitori automatici di livello (Fig. 12), o di livello + temperatura + conducibilità elettrolitica. La quasi totalità delle stazioni di misura è dotato di trasmissione dati a mezzo sistema GPRS.

7.4. *Dettaglio delle scelte dei sistemi impiegati nel monitoraggio*

7.4.1. Acquisizione veloce

Di anno in anno il settore della prevenzione, del monitoraggio e del controllo remoto hanno manifestato esigenze sempre più ampie, sia in termini quantitativi (le reti strumentate sono infatti in costante crescita), sia in termini qualitativi (viene richiesta una maggior copertura temporale delle acquisizioni).

I sistemi tradizionali, basati sull'interrogazione sequenziale delle centraline di monitoraggio tramite moduli GSM, faticano a rispondere alla costante crescita della richiesta di informazione.

Questo è dovuto al fatto che il sistema tradizionale incontra ostacoli insormontabili nella necessità di effettuare in successione i cicli di interrogazione della strumentazione distribuita sul territorio, e nei tempi morti legati ai protocolli di connessione e di autenticazione, che vanno a sommarsi ai tempi, spesso consistenti, necessari alla stabilizzazione dei sensori.

Si è ritenuto di utilizzare pertanto un sistema di comunicazione largamente diffuso quale quello GPRS che permette di accedere alle varie postazione tramite un a semplice connessione Internet.

Il *server* centralizzato, infatti, provvede a mantenere *always-on* la connessione GPRS con le centrali di monitoraggio, che risultano pertanto costantemente pronte a rispondere alla richiesta di effettuare letture.

La struttura *multi-tasking* utilizzata dal server permette inoltre l'acquisizione contemporanea dei dati provenienti da un numero virtualmente illimitato di stazioni di lettura: in tal modo il tempo totale dell'intero ciclo di monitoraggio è pari al tempo richiesto per l'acquisizione della centrale che, per numero e velocità dei sensori, risulta essere la più lenta.

Tale struttura, in molte situazioni permette di ridurre drasticamente il tempo necessario a completare un singolo ciclo di acquisizione, passando letteralmente dalle diverse ore richieste dai sistemi tradizionali ai pochi minuti consentiti dall'innovativa architettura del sistema

7.4.2. Accessibilità distribuita

Un'altra vulnerabilità dei sistemi tradizionali consiste nella difficoltà di rendere disponibili i dati acquisiti, sia nel caso in cui si verifichi una condizione di allarme, sia per le normali operazioni di trattamento ed analisi dei dati.

Per la sua stessa natura di progetto basato sul protocollo *TCP/IP*, invece, il sistema rende immediata l'integrazione delle procedure di pubblicazione in tempo reale dei dati.

Il sistema, infatti, mantiene costantemente aggiornate le tabelle ed i grafici di ciascun acquisitore, rendendole disponibili sul *WEB* e di conseguenza accessibili da qualunque postazione, persino ai palmari ed ai telefoni cellulari più evoluti, in tal modo diventa quindi possibile l'accesso ad informazioni critiche ad una molteplicità di persone indipendentemente dalla loro presenza fisica in sede, consentendo così uno scambio di conoscenze e di valutazioni rapido ed efficace.

La grande efficienza del sistema nell'effettuare le acquisizioni, inoltre, permette di ridurre drasticamente gli intervalli tra letture successive e quindi fornisce uno strumento potenzialmente molto efficace nell'anticipare decisioni che in talune situazioni possono rivelarsi vitali.

Il sistema di gestione dei dati permette inoltre il trattamento intelligente delle condizioni di allarme e di preallarme, prevedendo la possibilità di configurare l'emissione di messaggi SMS, di *e-mail* (sistema utilizzato per la stazione Dora 4, allo scopo di allertare le maestranze che operano direttamente in alveo a Torino) ed eventualmente, di messaggi vocali.

Il *meta-linguaggio* di configurazione degli allarmi utilizzato e istintivo e naturale e permette, di prevedere situazioni arbitrariamente complesse attraverso allarmi differenziali, confronti tra valori, allarmi contemporanei, operazioni logiche ed algebriche.

7.4.3. Flessibilità operativa

Il sistema *hardware-software* è realizzato in modo tale da permettere un elevato livello di flessibilità, infatti è possibile realizzare pagine di ingresso separate e personalizzate per gli utenti finali, i quali, attraverso una gerarchizzazione dei livelli di *password*, potranno avere accesso esclusivamente ai dati finali o a tutte le possibili opzioni di amministrazione del sistema.

8. *Strumentazione*

La tipologia e la posizione degli strumenti sono stati definiti tenendo conto delle possibili variazioni del livello dell'acquifero a seguito della realizzazione dell'opera in progetto e delle esigenze di monitorare la presenza e le variazioni di eventuali inquinanti. Ciò si realizza mediante l'installazione di una specifica strumentazione che permette, oltre al rilevamento del livello piezometrico, di rilevare anche il contemporaneo valore di temperatura e di conducibilità elettrolitica dell'acquifero nell'area controllata. Tali strumenti comprendono:

- sensore di pressione **STS – DL 64,** utilizzato per misura di livello piezometrico e dei livelli idrometrici del Fiume Dora.
- sensori di pressione **STS – DL 70**, per misurare la temperatura e conducibilità elettrolitica dell'acquifero.
- Pluviometro per il controllo delle precipitazioni che interessano direttamente l'area in esame.

8.1. *Sensori di pressione*

Il sensore di pressione utilizzato è costituito fondamentalmente da due parti di cui una è quella che verrà immersa e l'altra, invece, rimarrà in superficie.

La parte che verrà immersa, contiene il sensore di pressione vero e proprio, costituito da una cella sensibile di tipo piezoresistivo, che converte la pressione della colonna d'acqua che grava su di esso, in un segnale elettrico standardizzato, proporzionale alla pressione stessa, esso è racchiuso in un corpo cilindrico in acciaio *Inox*, al cui interno trova anche alloggiamento l'elettronica di alimentazione/condizionamento/conversione e memorizzazione dei dati.

Nella seconda parte dello strumento, anch'essa costituita da un contenitore in acciaio Inox di forma cilindrica, trovano alloggiamento la batteria di alimentazione e il connettore per la comunicazione verso il sistema di scarico dei dati acquisiti (Personal Computer o sistema di trasmissione).

Il collegamento fra le due parti è realizzato tramite cavo di tipo elettropneumatico, composto nello spe-

Tab. 2. Caratteristiche tecniche del sensore di pressione STS – DL 64.

Trasduttore	a ponte resistivo
Tipo di misura	relativa
Campo di misura	da 100 mBar a 25 bar
Sovrapressione	3 volte il f.s.
Precisione	+/– 0,1% f.s.
Dimensioni	Ø 24 mm x 160 mm Ø 24 mm x 177 mm (parte superficiale)
Materiale	Acciaio AISI 316
Capacità di memoria	130.000 letture, ognuna correlata con data e ora
Tipo di memoria	non volatile con batteria propria
Interfaccia di comunicazione	RS485
Alimentazione	batteria al Litio, 3,6V 1,9A/h,tipo AA

cifico da una guaina in poliuretano che fascia i vari conduttori elettrici e il tubicino in teflon preposto alla compensazione atmosferica, il colloquio con periferiche esterne avviene tramite porta di comunicazione seriale RS485.

La parte di memorizzazione, denominata *Data Logger*, può essere programmata al fine di effettuare letture a tempi prestabiliti, compresi tra 2 secondi e 24 ore, il valore del dato acquisito può essere memorizzato o come valore assoluto di colonna d'acqua o come distanza dal piano campagna.

Lo scarico dei dati, in assenza di sistema di trasmissione, viene effettuato tramite collegamento seriale ad un PC che, mediante un software dedicato permette di effettuare lo scarico e/o le programmazioni necessarie.

Il sistema è alimentato da batteria al Litio da 3,6 V che garantisce un'autonomia di funzionamento di almeno tre anni con cadenza di acquisizione oraria.

Tab. 3. Caratteristiche dei sensori STS – DL 70.

Trasduttore di pressione	a ponte resistivo
Tipo di misura	relativa
Campo di misura	da 100 mBar a 25 bar
Sovrapressione	3 volte il f.s.
Precisione	+/– 0,1% f.s.
Trasduttore di temperatura	elemento sensibile Pt100
Campo di misura	-5 a +50°C
Risoluzione	0,01°C
Misura della Conducibilità	cella al Pt; K= 1
Campo di misura	20 µS ÷ 20 mS autocalibrante
Dimensioni	Ø 24 mm x 220 mm Ø 24 mm x 177 mm (parte superficiale)
Materiale	Acciaio AISI 316
Capacità di memoria	400.000 letture, ognuna correlata con data e ora
Tipo di memoria	non volatile con batteria propria
Interfaccia di comunicazione	RS485
Alimentazione	batteria al Litio, 3,6V 1,9A/h,tipo AA

8.2. Sensori di pressione, temperatura, conducibilità elettrica

Anche la strumentazione avente i sensori di pressione, temperatura, conducibilità, come quello avente il solo sensore di pressione, è costituito fondamentalmente da due parti di cui una sarà immersa e la seconda sarà ubicata in superficie.

Il sensore di pressione è analogo a quello sopra descritto, mentre quello di temperatura è costituto da un elemento resistivo le cui caratteristiche di variazione elettrica in funzione della temperatura sono note e normalizzate da tabelle riconosciute.

La misura della conducibilità elettrolitica, si effettua misurando il valore di resistenza della soluzione compresa tra gli elettrodi di una cella conduttimetrica, il sensore di conducibilità è costituito da una serie di 4 elettrodi in Platino, annegati in corpo in materiale isolante Epoxy.

Questo tipologia di sensore permette di raggiungere campi di misura comprese tra 20 µS e 20 mS.

L'elettronica di alimentazione e condizionamento è di tipo autoranging, ciò permette (senza problemi di configurazione e programmazione) di lavorare sul massimo del segnale in funzione del campo di misura di quel momento.

Il colloquio con periferiche esterne avviene tramite porta di comunicazione seriale RS485.

Il collegamento fra le due parti componenti lo strumento, la programmazione, memorizzazione e l'alimentazione e autonomia di funzionamento sono analoghe al sistema di sola pressione.

8.3. Misura delle precipitazioni

In corrispondenza della stazione piezometrica SA18 ubicata all'interno del Cantiere ex Scalo Valdocco è associato un pluviometro (Fig. 13), che usufruisce delle strumentazioni appartenenti al sistema di acquisizione livelli installato nel locale piezometro per memorizzare i dati pluviometrici il cui scarico è unicamente deputato al collegamento diretto mediante notebook, mentre lo scarico dei dati piezometrici è assolto in tempo reale dal sistema automatico e trasmesso al sistema WebData che raccoglie i dati inviati da tutte le stazioni della rete di monitoraggio.

Fig. 13. Stazione pluvio-piezometrica.

8.4. Installazione delle strumentazioni

La strumentazione è posizionata all'interno dei piezometri eseguiti nell'ambito del progetto di monitoraggio, essi hanno profondità variabili da 20 a 50 m, sono microfessurati da circa 10 m dal p.c. sino a f.f. (in genere), il diametro interno è di 3", sufficiente per alloggiare le strumentazioni atte al monitoraggio in continuo e a permettere periodicamente il campionamento delle acque a scopo geochimico.

La parte contenente i sensori di misura è allocata all'interno del tubo piezometrico ad un'altezza tale da assicurare una perenne immersione in acqua a prescindere dalle oscillazioni, positive o negative del livello piezometrico.

La testa di ciascun tubo piezometrico culmina all'interno di un pozzetto di protezione di dimensioni adeguate, con coperchio carrabile ed è assicurata alla testa tubo mediante apposito gancio che svincola la testa dello strumento permettendone il collegamento al PC per lo scarico/programmazione oppure il collegamento permanente al sovrastante sistema di trasmissione se presente.

9. Sistema di acquisizione dati

9.1. Acquisizione e trasmissione dei dati acquisiti

La quasi totalità delle stazioni di misura è dotata del sistema WebData, il quale permette di collegare direttamente alla rete Internet qualsiasi dispositivo dotato di porta di comunicazione seriale RS232.

La scheda WebData è stata sviluppata dalla TER Elettronica sia per svolgere le funzioni di un *data-logger* (dispone infatti di quattro canali analogici e di quattro canali digitali) sia per mantenere attiva, attraverso un modulo GPRS, la connessione Internet tra una centralina di acquisizione

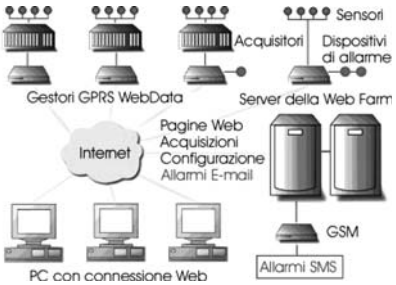

Fig. 14. Schema di funzionamento del sistema di trasmissione dati.

ed il server centrale, come illustrato nella figura ***sottostante*** (Fig. 14).

Le piccole dimensioni e il basso consumo della scheda WebData la rendono perfettamente compatibile con un impianto che necessiti di essere alimentato con una batteria od un pannello fotovoltaico.

La scheda dispone di 4 canali analogici di ingresso cui è possibile collegare qualsiasi tipo di trasduttore che generi in uscita segnali in corrente nel range 4-20 mA oppure in tensione nel range 0-5V.

La scheda WebData dispone inoltre di una porta di comunicazione RS232 a cui è possibile collegare *data-logger* esterni che utilizzino tale standard; nel caso specifico è possibile connettere il dispositivo scelto per il monitoraggio.

L'apparecchiatura completa (ad eccezione del sensore di misura) è stata collocata all'interno di una scatola con protezione IP65, ed è stata fissata al palo che sostiene il pannello fotovoltaico che alimenta l'intero sistema (Fig. 15).

La connessione fra sensori, dispositivi esterni di alimentazione e centralina avviene a mezzo di conduttori, che entrano all'interno della cassetta tramite pressacavo a tenuta stagna.

Fig. 15. Sistema di trasmissione a corredo di ciascuna stazione piezometrica e idrometrica.

Fig. 16. Sistema di trasmissione e di alimentazione.

Tab. 4. Caratteristiche della scheda WebData.

Scheda	Dotata di due microprocessori della famiglia AD 8xx, Low Power che lavorano in tandem
Memoria di programma	16 KB Flash
Memoria dati	1,2 KB Flash
RAM	512 Byte
Porte di comunicazione	3 RS232, disponibili su connettori DB9
Input Digitali	8 – disponibili su connettore tipo AMP Modu
Output Digitali	4 + 4 – disponibili su morsetti a vite
Dispositivi interni	2 RTC/Timer; 2 UART; 1 Bus SPI/I^2C
Alimentazione	12Vcc, 20 mA
Dimensioni indicative	100 x 100 mm

L'alimentazione a 12 Vcc è fornita da un pannello solare e da una batteria tampone dotata di regolatore di carica, in grado di garantire un'autonomia di funzionamento, in assenza di ricarica, di circa due settimane, ed è alloggiata all'interno della scatola contenente il sistema di trasmissione (Fig. 16).

9.2. Sistema di gestione GeoGprs

Il sistema GeoGprs prevede un servizio *chiavi in mano* per la gestione automatizzata della raccolta e dell'elaborazione dei dati della rete di monitoraggio.

Tale servizio comprende:

- se necessario, la registrazione di un nome di dominio attraverso il quale accedere al sistema;
- la realizzazione della pagina principale di accesso al sistema;
- l'impostazione delle pagine di interrogazione del sistema, generate automaticamente, graficamente congruente alla pagina principale;
- la predisposizione e configurazione della connettività TCP/IP per le centraline di acquisizione dati che costituiscono l'impianto;
- la configurazione dell'impianto e degli allarmi, in collaborazione con i responsabili della gestione dell'impianto di monitoraggio.

Il sistema centrale dispone di due server dedicati al sistema GeoGprs (un server principale ed uno di *backup* che subentra in caso di eventuali malfunzionamenti), sotto gruppo di continuità; quando possibile le centraline vengono predisposte per effettuare un *backup* di sicurezza acquisendo e memorizzando localmente, con cadenza oraria, anche durante i periodi in cui dovessero verificarsi cadute del segnale della rete cellulare con conseguente perdita temporanea della connettività, garantendo in tal modo che anche nelle condizioni peggiori il procedimento di acquisizione dei dati prosegua in modo regolare.

Previa configurazione dell'impianto, un software di gestione che risiede sul Web Server, amministra i dati acquisiti da ciascuna stazione di misura. Il colloquio fra centraline e sistema centrale viene realizzato tramite rete Internet in modo automatico: esse vengono interrogate secondo la cadenza programmata dal gestore dell'impianto ma possono anche essere interrogate in tempo reale (sotto password) da un qualsiasi personal computer connesso ad Internet. I dati acquisiti sono disponibili sia in forma tabellare che in forma grafica (Fig. 17) e vengono aggiornati in tempo reale ad ogni acquisizione.

Secondo le specifiche necessità è possibile definire espressioni algebrico-booleane che descrivano condizioni di allarme in funzione dei diversi valori acquisiti, al verificarsi delle quali possono essere inviati

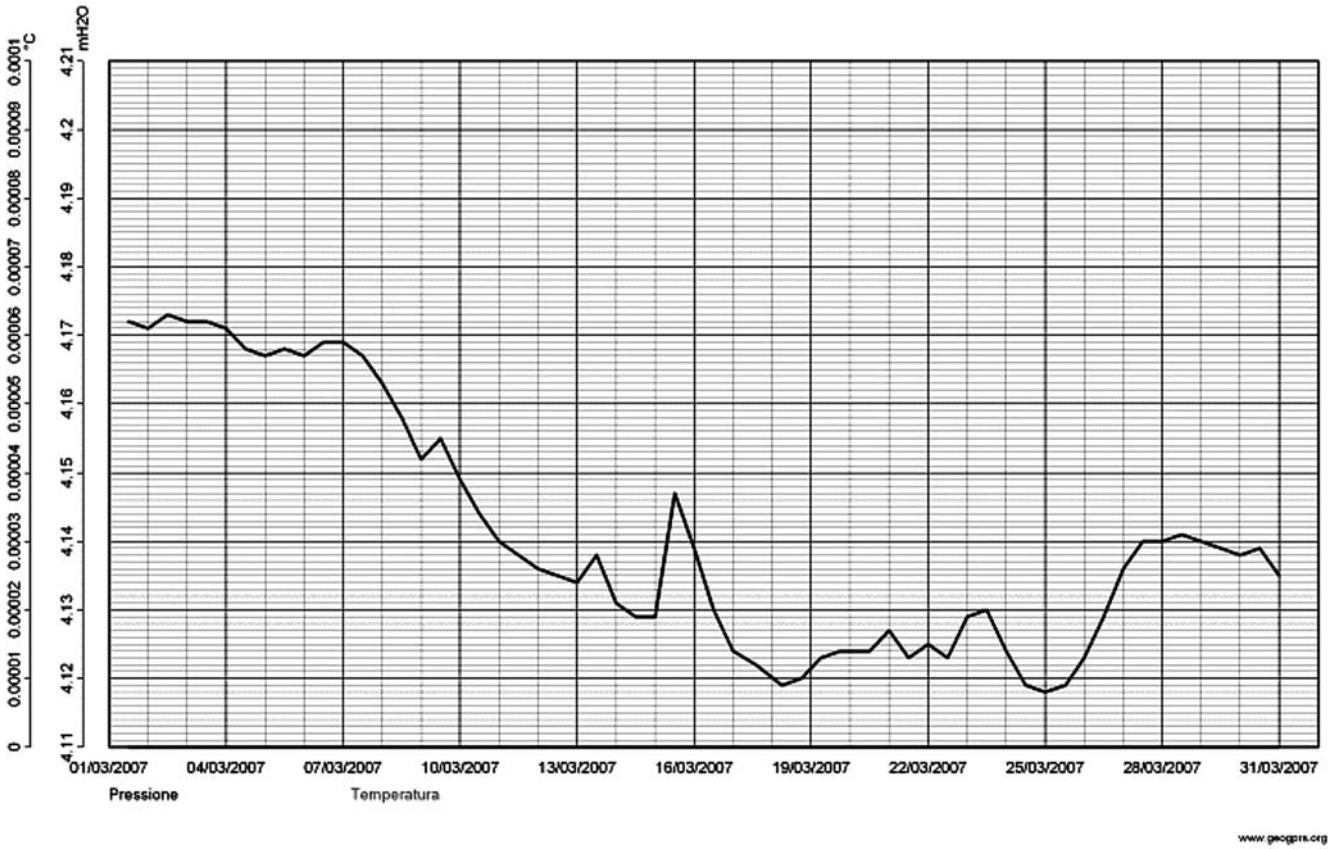

Fig. 17. Grafico generato direttamente dal sistema di acquisizione dati piezometrici.

SMS ed e-mail di allarme a tre diversi numeri telefonici ed indirizzi di posta elettronica.

Il sistema di gestione GeoGprs è in grado di incrementare automaticamente la frequenza di esecuzione delle letture in funzione del superamento di determinate soglie di preallarme e di allarme;

Da qualsiasi postazione Internet, utilizzando differenti livelli di password, è possibile consultare i dati aquisiti o accedere alle procedure di configurazione delle centraline e degli allarmi.

9.3. Controllo chimico

I *data-logger* modello STS-DL70, sono in grado di acquisire contemporaneamente il livello piezometrico, la temperatura e la conducibilità elettrica specifica di un acquifero.

In particolare il monitoraggio continuo di quest'ultima grandezza fisica, estremamente sensibile alla variazioni di concentrazione di sostanze chimiche disciolte e di conseguenza eccellente indicatore della qualità delle acque nei punti di controllo (Fig. 18), opportunamente associato al controllo chimico-fisico di laboratorio completa il quadro informativo idrogeochimico preposto ai controlli chimici di routine.

9.4. Sistema installato

La rete di monitoraggio prevista consentirà la lettura automatica ed in tempo reale delle grandezze relative agli strumenti installati.

L'architettura (Fig. 19) prevede un sistema in grado di garantire l'acquisizione dei dati anche in mancanza di energia elettrica, in quanto costituita da due parti complementari ma separate:

- **A – unità di conversione/memorizzazione DL64 – DL70** (è il dispositivo costituito da sensore e sistema di acquisizione locale);
- **A1 – unità di raccolta e trasmissione** (è l'unità che permette di interfacciare i dispositivi, cui al punto A, al sistema di alimentazione e di trasmissione dati);
- **B** – unità di centralizzazione ed elaborazione.

In dettaglio, l'unità A, dotata di propria batteria, effettua le letture e la relativa memorizzazione a tempi programmati.

È costituita da un robusto contenitore di forma cilindrica in acciaio Inox al cui interno trovano alloggiamento i sensori di misura e la circuiteria elettronica di condizionamento e memorizzazione.

La comunicazione con il mondo esterno avviene tramite porta di comunicazione RS485 con collegamento via cavo.

L'unità B, tramite la comunicazione su rete Internet effettuata

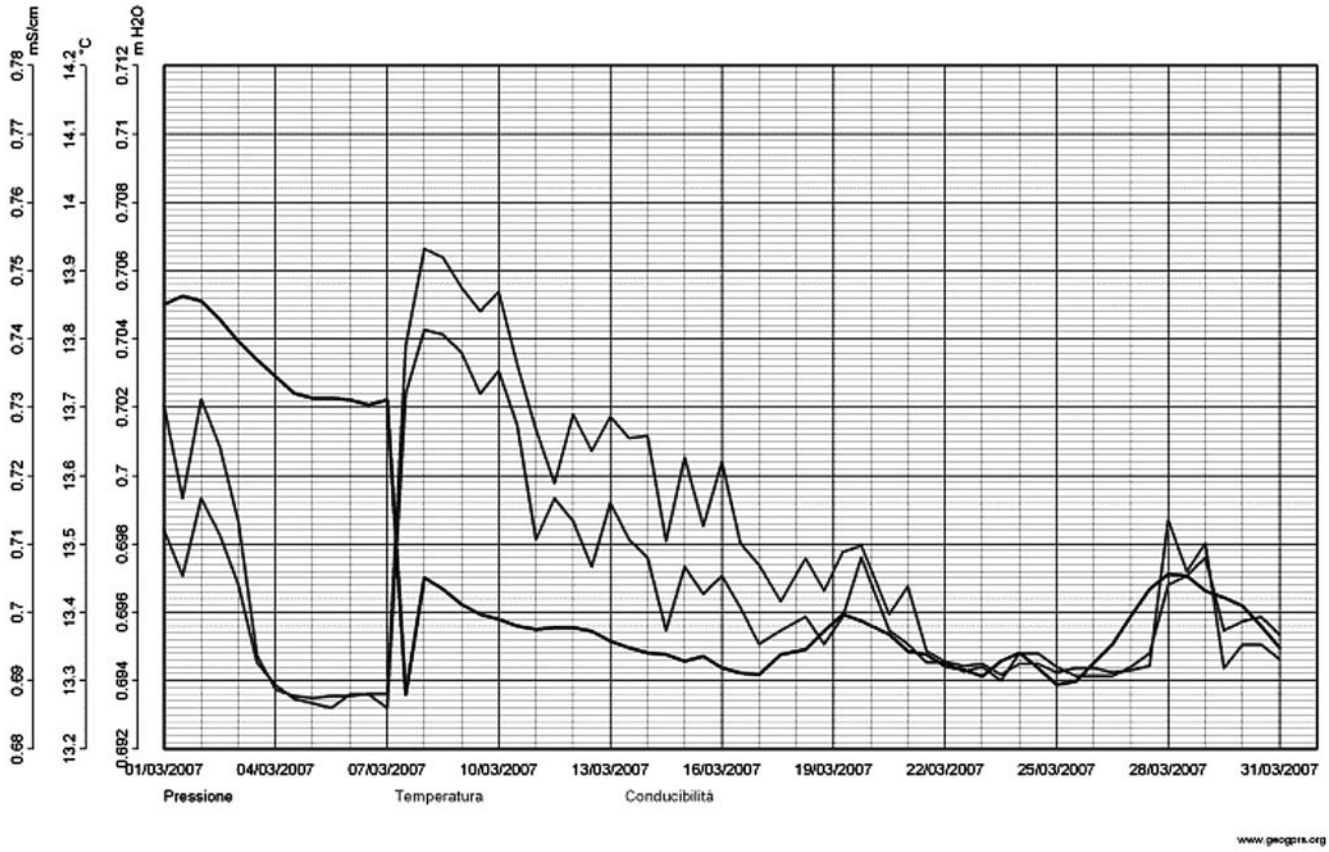

Fig. 18. Grafico generato direttamente dal sistema di acquisizione dati piezometrici, di temperatura e di conducibilità elettrolitica.

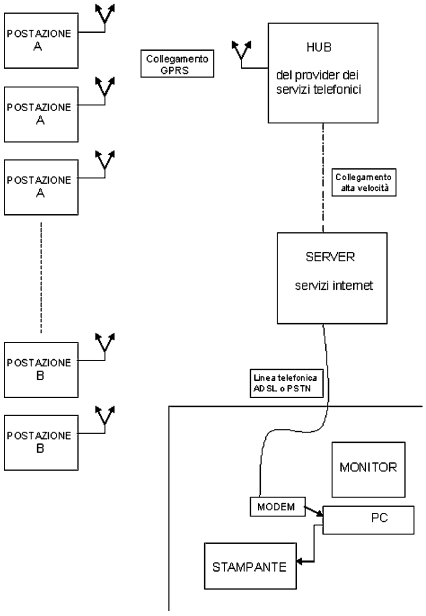

Fig. 19. Architettura del sistema.

per mezzo dell'unità A1, interroga ciclicamente il sensore (A), e ne memorizza i valori sulla postazione PC server.

In caso di mancanza di comunicazione fra server (B) e sensore (A), i dati non vengono persi in quanto comunque sono memorizzati a bordo del sensore (A) stesso.

La costruzione, realizzata in modo compatto, è costituita da un robusto contenitore in materiale sintetico, con grado di protezione agli agenti atmosferici IP65, con portella di chiusura e serratura a chiave, contenente.

La batteria di alimentazione, del tipo al Pb con elettrolita al gel, senza manutenzione, da 12Vcc, 12A/h. È in grado di garantire un'autonomia di funzionamento in assenza di ricarica per circa due settimane;

Modulo di interfaccia WD03: costituito da una scheda a microprocessore la cui funzione principale è di interfacciare:

- un dispositivo, normalmente un data-logger, dotato di porta di comunicazione RS232 ad un modem GSM/GPRS;
- modem di comunicazione GPRS, con antenna;
- regolatore di carica per pannello solare;
- pannello solare (esterno al contenitore).

Modulo di interfaccia A1: Di dimensioni contenute, l'unità di raccolta e trasmissione dei dati è realizzata nel rispetto dei bassi consumi, al fine di poter essere utilizzata in impianti alimentati da batteria con ricarica da pannello solare.

È dotata di 3 porte seriali RS232 (Rx, Tx, Gnd) che andranno collegate rispettivamente al Modem GPRS (porta Master) e due verso dispositivi (porte Slave).

Dispone di 8 uscite, di cui 4 dedicate alla commutazione di tensioni di alimentazione – ad esempio accensione/spegnimento dispositivi esterni – e 4 di tipo Open Collector, utilizzabili come segnali di allarme.

Sono disponibili 8 ingressi digitali, utilizzabili per selezione o predisposizioni, e 6 ingressi analogici, non condizionati, di cui 4 disponibili dall'utilizzatore ed 1 cablato per monitorare la tensione di alimentazione.

È presente inoltre una porta SPI per il collegamento ad eventuali dispositivi dotati di porta di analoga comunicazione.

Unità di centralizzazione ed elaborazione B: L'unità di centralizzazione basata su Pc è dotata di software per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati ed è installata presso la sala controllo impianto.

Il pacchetto di acquisizione, gestione, elaborazione dei dati permetterà e sarà in grado di:

- effettuare il colloquio con le postazioni remote tramite rete Internet con l'implementazione dei protocolli di comunicazione delle centraline remote;
- realizzare la pagina principale di accesso al sistema, in uno stile grafico congruente con il sito istituzionale;
- impostare le pagine di interrogazione del sistema, generate automaticamente, con richiami grafici alla pagina principale;
- effettuare la predisposizione e configurazione della connettività TCP/IP per le centraline di acquisizione dati che costituiscono l'impianto;
- impostare la configurazione dell'impianto e degli allarmi, con possibilità di decidere per ciascun sensore condizioni di allarme e preallarme anche complesse, definibili tramite formule algebriche e/o booleane;
- interrogare in tempo reale le centraline di acquisizione dati da un qualsiasi personal computer connesso ad internet (sotto tre livelli di password);
- effettuare il backup dei valori letti dai sensori direttamente sugli acquisitori, con cadenza oraria, durante i periodi in cui dovessero verificarsi cadute del segnale della rete cellulare con conseguente perdita temporanea della connettività;
- stampa dei dati in forma tabellare e grafica.

10. Considerazioni finali

Il sottopasso della Dora Riparia della linea del Passante ferroviario di Torino rappresenta un'opera di tutto rispetto e di non piccole difficoltà di progettazione e di esecuzione. La galleria artificiale che sottopassa il fiume può provocare un'interferenza dell'opera con l'acquifero soggiacente in quanto prevede l'esecuzione di paratie e di un tappo di fondo che provocheranno un *effetto diga* sull'acquifero libero che fluisce in direzione quasi ortogonale al costruendo complesso. L'ITALFERR S.p.A. e le Imprese costruttrici si sono immediatamente rese conto della possibilità di impatto con l'ambiente idrico sotterraneo ed hanno provveduto ad affidare al GLIA – Politecnico di Torino uno studio idrogeologico a largo raggio che facesse da prodromo e contesto alla progettazione ed alla esecuzione di un sistema di monitoraggio molto articolato per tenere sotto controllo i movimenti dell'acquifero, i rapporti con il fiume e con

le precipitazioni.

Pertanto, è stato messo a punto uno schema di monitoraggio di tutti i parametri idrogeologici, idrologici e idrochimici che possono in qualche modo raccordarsi con la costruenda opera. Le molte stazioni, gran parte delle quali sono dotate di teletrasmissione dei dati, rendono il sistema estremamente snello e totalmente sotto controllo in qualsiasi momento agli utenti preposti all'esame dei dati di monitoraggio.

Bibliografia

ARPA PIEMONTE, (2000): Banca dati meteorologica – Dati dal 1990 al 2000 Rilevati dalla rete regionale gestita dal Settore Meteoidrografico e reti di monitoraggio. (CD)

CIVITA M., DE MAIO M., FIORUCCI A., PIZZO S., VIGNA B., (2002): *L'ambiente idrogeologico: l'importanza della prognosi preliminare.* Atti MIR 2002 "Le opere in sotterraneo e il rapporto con l'ambiente" – Torino, p. 73-106 – Ed. Patron, Bologna.

CIVITA M., FIORUCCI A., (1999): *Diagrammi di qualità delle acque sotterranee aggiornamenti e discussioni.* Atti 3° Conv. Naz. Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio, Parma, 1, p. 207-215.

CIVITA M., FIORUCCI A., PIZZO S., VIGNA B., (1999): *Utilizzazione estensiva delle prove rapide di acquifero per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento.* Atti 3° Conv. Naz. Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio, Parma, 1, p. 105-113

CIVITA M., FIORUCCI A., PIZZO S., SAPPA G., (2003): Caratterizzazione idrodinamica dell'acquifero soggiacente il sito di bonifica di un'area industriale della provincia di Milano. IGEA, 17, p. 45-56 (2002).

M. CIVITA, LO RUSSO S., VIGNA B., (2004): *Hydrogeological sketch map of Piemonte (NW Italy) 1: 250.000.* 32nd Intern. Geological Congress. Firenze 20-28 agosto 2004.

CIVITA M., PIZZO S., (2001): L'evoluzione spazio-temporale del livello piezometrico dell'acquifero libero nel sottosuolo di Torino. GEAM 104, 4 (2001), p 271-287

CIVITA M., PIZZO S., (2003): *Hydrogeological interference areas: the importance of preliminary prognosis in the designing of a high velocity railway line.* – Proc. AVR 03 "First International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk" – Salamanca, Messico, p. 182-193.

CIVITA M., ZAVATTI A., (2006): Un manuale per l'analisi di sito e la valutazione del rischio d'inquinamento. Pitagora Editrice, Bologna, 367 pp.

CIVITA M., (2005): *Idrogeologia applicata e ambientale* – Ed. CEA, Milano, 794 pp.

REGIONE PIEMONTE, (2003): MARIUS – risultati del monitoraggio idrometrico e della qualità delle acque dell'anno 2002 – Direzione Pianificazione delle Risorse Idriche – N° 10 Novembre 2003

HARBAUGH A.W., BANTA E.R., HILL M.C., and MCDONALD M.G., (2000): *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process:* U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.

HVORSLEV M.J., (1951): *Time lag and soil permeability in ground-water observations.* U.S. Army Corps of Engr. Waterways Exp. Stat. Bull. 36, Vicksburg, MS.

Ringraziamenti

Si ringraziano per gli utili confronti di idee, l'Ing. G.M. Cavallero, *Construction Manager* – ITALFERR, Nodo di Torino; il Dott. S. Ciufegni, Responsabile Geologia Centro-Nord – Direzione Tecnica – C.P. Firenze ITALFERR S.p.A; l'Ing. E. Piovano, Assistente Lavori – ITALFERR, Nodo di Torino.