

LA RISALITA DI ACQUE PROFONDE AD ELEVATA SALINITÀ NELL'ACQUIFERO DELL'OLTREPÒ PAVESE: PRIMI RISULTATI

THE UPRISING OF DEEP SALINE WATERS INTO THE OLTREPÒ PAVESE (NORTHERN ITALY) AQUIFER: EARLY RESULTS

MARICA BERSAN, GIORGIO PILLA, GABRIELE DOLZA, PATRIZIO TORRESE & GIANFRANCO CIANCETTI(*)

(*) Università degli Studi di Pavia - Dipartimento di Scienze della Terra - Via Ferrata, 1 - 27100 Pavia (Italy)
e-mail: marica.bersan@dst.unipv.it - tel. +39-0382985840 - fax +39-0382985890

RIASSUNTO

In questo lavoro vengono presentati i risultati preliminari di uno studio condotto sul settore di pianura dell'Oltrepò Pavese, (Lombardia meridionale), laddove si verifica un fenomeno di risalita, all'interno dell'acquifero superficiale, di acque profonde, fortemente mineralizzate, aventi una idrofacies clorurato-sodica.

Avvalendosi del monitoraggio sul chimismo di queste acque, realizzato attraverso periodici campionamenti, effettuati con cadenza circa mensile, sia sui pozzi che sui collettori idrici superficiali che presentassero elevate concentrazioni in cloruri, si è potuta individuare una fascia, parallela ad un importante disturbo tettonico, all'interno della quale il fenomeno è principalmente distribuito.

L'attuazione di un sistema di monitoraggio in continuo dei parametri chimico-fisici delle acque di falda tramite delle sonde multiparametriche, ha invece consentito di evidenziare delle variazioni della salinità delle acque, causate da una maggiore risalita di acque profonde e mineralizzate all'interno dell'acquifero superficiale. L'accentuazione del fenomeno potrebbe essere dovuta ad un incremento del carico idrostatico dei circuiti idrici profondi, indotti dal transfert di pressione da parte dei circuiti idrici sotterranei del vicino margine appenninico, in concomitanza con gli eventi di ricarica rappresentati dalle precipitazioni.

La realizzazione di alcuni logs di conducibilità elettrica e temperatura sulle acque dei pozzi, ha permesso di individuare la profondità a cui si attesta l'interfaccia acqua dolce-acqua salata nelle diverse zone facenti parte dell'area d'indagine, e di determinare la sua eventuale variazione nel corso dell'anno.

Infine, è stata testata la possibilità di impiegare, sull'area di indagine, e in particolare nelle zone caratterizzate da assenza di pozzi idrici da cui campionare le acque, la tecnica VLF-EM (Very Low Frequency Electromagnetic), che consente di individuare la presenza, nel sottosuolo, di anomalie di resistività indotte dalla presenza di corpi conduttori. Le indagini finora condotte con questo metodo, sembrano aver confermato la presenza di aree caratterizzate da risalita, entro l'acquifero superficiale, di acque fortemente mineralizzate, e quindi particolarmente conduttive, cui possono essere associate le intense anomalie rilevate dallo strumento.

TERMINI CHIAVE: *salinizzazione, idrochimica, VLF-EM, Faglia Vogherese, Oltrepò Pavese, Italia*

ABSTRACT

This paper discusses the early results of a study carried out in the Oltrepò Pavese plain sector (Southern Lombardy, Italy) where the uprising of deep, mineralized waters into the shallow aquifer, occurs. These waters are characterized by a Na-Cl hydrochemical facies.

Monitoring of the chemistry of the waters, by periodical sampling, was carried out both on wells and on the lower reaches of the surface water drainage network which are characterized by high chloride concentrations. This permitted the surveying of the area, parallel to an important tectonic discontinuity, where the phenomenon is more diffuse.

We carried out a continuous monitoring of chemical-physical groundwater parameters using multi-parameter datalogger instruments, that allowed us to identify variations in waters salinity, caused by a further uprising of mineralized waters into the shallow aquifer.

The amplification of this phenomenon could be caused by an increase of deep circuit water head increase, induced by the pressures from the Apennine margin's underground water circuits, during recharge events.

Some electrical conductivity and temperature logs were carried out in wells in different zones of the investigated area in order to determine the depth and the variation in time of the fresh water-saline water interface.

Finally, in those areas in which there were no wells to sample groundwater from, we attempted the use of VLF-EM (Very Low Frequency Electromagnetic) geophysical technique. This technique allows the detection of resistivity anomalies caused by conductive bodies. Carrying out some investigations with this method we found some anomalies that could be associated to the uprising of mineralized waters into the shallow aquifer.

KEYWORDS: *saltwater contamination, hydro-chemistry, VLF-EM, Vogherese Fault, Oltrepò Pavese, Italy*

PREMESSA

Nel settore di pianura dell'Oltrepò Pavese si assiste localmente ad un fenomeno di risalita, all'interno dell'acquifero alluvionale, di acque profonde ad elevata salinità aventi un'idrofacies di tipo clorurato-sodica. Si tratta di acque di origine meteorica che, infiltratesi in profondità al di sotto dei sedimenti quaternari padani lungo discontinuità tettoniche, raggiungono il substrato marino ed entrano in contatto con le salamoie profonde della Pianura Padana, di cui i depositi mio-pliocenici sono sede. Le salamoie rappresentano dei fluidi ad altissima densità, residuo di acque marine evaporate nel corso della crisi Messiniana, e successivamente rimaste intrappolate alla base dell'acquifero padano (CONTI *et alii*, 2000). La lisciviazione delle salamoie da parte delle acque di origine meteorica determina la forte mineralizzazione di queste ultime, che risalgono poi lungo le stesse discontinuità e si intrudono nell'acquifero superficiale, mescolandosi con le acque qui presenti.

Nell'Oltrepò Pavese e nelle zone limitrofe, l'esistenza di queste acque dal chimismo particolare è nota già da tempo, tanto da aver dato adito al loro sfruttamento per scopi idrotermali già in epoca romana; ad oggi sorgono numerosi centri termali nella zona (San Colombano al Lambro, Salice Terme e Rivanazzano Terme i più celebri dell'area) che emungono tali acque da pozzi con profondità variabili tra i 15 e i 70 m (CAVANNA *et alii*, 2004; BERSAN *et alii*, 2007). Tale fenomeno, in alcuni settori dell'Oltrepò Pavese, si configura invece come un vero e proprio fenomeno d'inquinamento naturale delle acque sotterranee e determina l'impossibilità di un normale sfruttamento delle risorse idriche sotterranee, non solo per usi idropotabili, ma anche per usi agricoli e industriali.

Se i meccanismi che provocano la contaminazione delle acque sotterranee negli acquiferi sedimentari costieri da parte di intrusioni di acque salate attuali è abbastanza ben conosciuto (BARLOW & WILD, 2002; BARROCU, 2003; COTECCHIA *et alii*, 2005; CAPELLI *et alii*, 2007), in Pianura Padana, nei settori prossimi al margine appenninico, le conoscenze finora acquisite circa i meccanismi che regolano il fenomeno della risalita, entro acquiferi superficiali, delle acque ad elevata mineralizzazione di origine profonda, non sono tuttavia ancora esauritivi. In particolare risultano ancora non ben definiti i ruoli che esercitano, sull'amplificazione o sull'attenuazione di tale fenomeno, gli emungimenti e i carichi idraulici, sia degli acquiferi in cui s'intrudono queste acque salate antiche, sia dei circuiti profondi mineralizzati.

Il fenomeno della risalita di acque profonde altamente mineralizzate, che interessa, oltre che l'Oltrepò Pavese, anche altri acquiferi della Pianura Padana e della fascia pedeappenninica padana (BONORI *et alii*, 2000; TOSCANI *et alii*, 2007; DI SIPIO *et alii*, 2007) e dell'avanfossa marchigiana-abruzzese-molisana (NANNI & ZUPPI, 1986; DESIDERIO & RUSI, 2004), nonché le aree corrispondenti agli alti strutturali affioranti e sub-affioranti della Pianura Padana, è stato messo in relazione alla presenza di importanti discontinuità tettoniche in grado di veicolare tali acque, intrappolate in profondità all'interno dei depositi marini terziari, verso la superficie.

Le indagini realizzate in questo studio sono costituite dal monitoraggio nel tempo del chimismo delle acque interessate da elevata salinità, sia attraverso più campagne di campionamento delle acque

INTRODUCTION

In the Oltrepò Pavese plain sector (Po Valley, Northern Italy), the uprising into the alluvial aquifer of deep saline waters occurs. These waters are characterized by a Na-Cl hydrochemical facies.

These are meteoric waters that deeply infiltrate under Po Plain quaternary alluvial deposits along tectonic discontinuities, reach the marine substratum and contact with the Padana plain deep brines, contained by the Miocene-Pliocene deposits. Brines are very high density fluids, remainder of evaporated marine waters trapped at the bottom of the Po aquifer in the late Messinian (CONTI *et alii*, 2000). Brines leaching made by meteoric waters causes the high mineralization degree of the second ones, that then go up along the same discontinuities and reach the shallow aquifer mixing with fresh waters.

The presence of these particular waters in the Oltrepò Pavese has been known since Roman times, when they were used for thermal purposes; nowadays there are many Spa centers in the area (S.Colombano al Lambro, Salice Terme and Rivanazzano Terme the most famous in the investigated sector), that withdraw these waters from wells 15 to 70 m deep (CAVANNA *et alii*, 2004; BERSAN *et alii*, 2007).

But in some sectors of the Oltrepò Pavese this phenomenon is a kind of natural groundwater pollution, and it prevents the usual exploitation of water resources, not only for potable, but also for agricultural and industrial use.

Nowadays we know quite well the mechanisms that cause the groundwater contamination in the coastal sedimentary aquifers by saltwater intrusions (BARLOW & WILD, 2002; BARROCU, 2003; COTECCHIA *et alii*, 2005; CAPELLI *et alii*, 2007), but not the mechanisms that control the uprising, into the shallow aquifer, of ancient high mineralized waters in the Po Plain sectors close to the Apennine margin.

The effects on amplification and attenuation of this phenomenon, which are caused by abstractions and changes of total heads both in the shallow and in the deep aquifer, are not clear.

The uprising of deep, highly mineralized waters, that is encountered in the Po Plain, in the area at the bottom of the Apennine front (BONORI *et alii*, 2000; TOSCANI *et alii*, 2007; DI SIPIO *et alii*, 2007), in the Central Apennines fore deep (NANNI & ZUPPI, 1986; DESIDERIO & RUSI, 2004), and in the areas of the Po Plain which correspond to bed rock structural reliefs, is connected to the presence of important tectonic discontinuities. These discontinuities convey these waters, which are trapped into the deep tertiary marine deposits, to the surface.

Chemistry of high saline waters was monitored by periodical sampling of groundwater and shallow waters. Continuous monitoring of the water chemical-physical characteristics by a multi-parameter datalogger instrument was also undertaken.

Due to the unfavourable distribution of some sampling wells, some difficulties were encountered for the electrical conductivity and temperature logging. Therefore, we assessed the possibility of using

sotterranee e superficiali, sia attraverso il monitoraggio in continuo, in alcuni periodi dell'anno, delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque di falda tramite sonde multiparametriche. La non ottimale distribuzione dei pozzi campionabili per lo studio idrochimico e la difficoltà di calare in alcuni pozzi le sonde multiparametriche, ha spinto gli scriventi a verificare la possibilità di utilizzare altre metodologie nel tentativo di individuare, anche in assenza di pozzi idrici o sondaggi da cui campionare le acque sotterranee, le aree dove il fenomeno della risalita di acque salate entro l'acquifero alluvionale risulta più pronunciato. In particolare è stata sperimentata la metodologia geofisica VLF-EM che è in grado di individuare quelle zone contraddistinte da anomalie di resistività elettrica indotte dalla risalita di acque mineralizzate, e quindi più conduttive, nell'acquifero dell'Oltrepò Pavese.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO

Il settore di pianura dell'Oltrepò Pavese è contraddistinto, nelle sue linee essenziali, dalla costante presenza di una coltre alluvionale quaternaria, originata dall'azione combinata dei torrenti appenninici, che hanno dato luogo a conoidi coalescenti, e del Fiume Po. Tali depositi ospitano i principali corpi idrici della zona che si sviluppano al di sopra di un substrato d'origine marina di età miocenica-pleiocenica (BRAMBILLA, 1992; PELLEGRINI & VERCESI, 1995), litologicamente costituito da marne sabbiose, arenarie, conglomerati, marne gessifere e marne calcaree, che ne determinano la scarsa conducibilità idraulica.

I depositi di età quaternaria possono essere suddivisi in più unità idrogeologiche: i depositi alluvionali di età pre-wurmiana, i depositi alluvionali del ripiano principale della pianura e i depositi alluvionali recenti e attuali (Fig. 1a) (CAVANNA *et alii*, 1998; PILLA *et alii*, 2007). Le unità idrogeologiche che risultano interessate dal fenomeno di risalita di acque ad elevata salinità sono rappresentate dai depositi alluvionali del ripiano principale della pianura, che contraddistinguono la maggior parte del settore di pianura dell'Oltrepò Pavese, e dai depositi alluvionali recenti e attuali, individuabili principalmente lungo il corso del Fiume Po.

I depositi alluvionali del ripiano principale della pianura sono rappresentati da alternanze di sabbie e ghiaie, con intercalazioni lenticolari di argille o limi argillosi. I depositi alluvionali recenti e attuali corrispondono ai depositi di età postwurmiana, prodotti dall'attività deposizionale più recente del Fiume Po, e alle alluvioni recenti e attuali dei principali torrenti di pertinenza appenninica. Mentre i primi sono costituiti da sabbie, limi sabbiosi e limi, i secondi presentano una granulometria più grossolana, e sono rappresentati da ghiaie e sabbie. La permeabilità che caratterizza queste unità è generalmente medio-alta e consente la presenza di una falda di tipo freatico, a breve profondità dal piano campagna.

Lo spessore dell'acquifero principale dell'Oltrepò Pavese è variabile, con valori compresi tra meno di dieci metri nel settore sud-orientale, dove il substrato marino è meno profondo, ed oltre il centinaio di metri nel settore nord-occidentale, dove il substrato è caratterizzato da un repentino approfondimento (Fig. 1b) (BRAGA & CERRO, 1988; CAVANNA *et alii*, 1998; REGIONE LOMBARDIA & ENI Divisione AGIP, 2002; AGIP, 1994).

alternative investigation methods that would enable the identification of areas of uprising, even in absence of sampling wells, where the phenomenon is stronger.

In particular we tested the VLF-EM (Very Low Frequency Electromagnetic) methodology, that can detect the areas characterized by electrical resistivity anomalies, caused by the uprising of mineralized waters into the Oltrepò Pavese aquifer.

GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL BACKGROUND

The Oltrepò Pavese plain sector is characterized by the constant presence of alluvial quaternary drift deposits, originated from the combined action of Apennine streams, that form coalescent fans, and of the Po river. These deposits form the main water bodies of the area, that overlie a Miocene - Pliocene marine substratum (BRAMBILLA, 1992; PELLEGRINI & VERCESI, 1995), formed by sandy-marls, sandstones, conglomerates, gypsy-marls and calcareous-marls, that condition their low hydraulic conductivity.

These quaternary deposits can be divided into the following hydrogeological units: pre-würmian alluvial deposits, middle-old alluvial deposits, recent and present alluvial deposits (Fig. 1a, CAVANNA *et alii*, 1998; PILLA *et alii*, 2007).

The hydrogeological units involved by the uprising of high saline waters are the middle-old alluvial deposits, present over most of the Oltrepò Pavese plain sector, and the recent and present alluvial deposits, that we can find along the Po river.

The middle-old alluvial deposits are constituted by alternating sand and gravel, with interbedded clays or argillaceous silt.

The recent and present alluvial deposits correspond to post-würmian deposits, sedimented by the most recent depositional activity of the Po river, and to the recent and present deposition from flooding events of the main Apennine streams. The earlier are constituted of sand, sandy-silt and silt, the latter are coarser in nature, and are represented by gravel and sand. The permeability of both these units is medium to high. Therefore, an unconfined aquifer is present at shallow depths.

The Oltrepò Pavese main aquifer has a variable thickness. It varies between less than ten metres in the south-east sector, where the depth to the marine substratum is lower, and over one hundreds metres in the north-west sector, where the substratum is characterized by a sudden deepening (Fig. 1b) (BRAGA & CERRO, 1988; CAVANNA *et alii*, 1998; REGIONE LOMBARDIA & ENI Divisione AGIP, 2002; AGIP, 1994).

A tectonic discontinuity, with a NE-SW direction, known in lit-

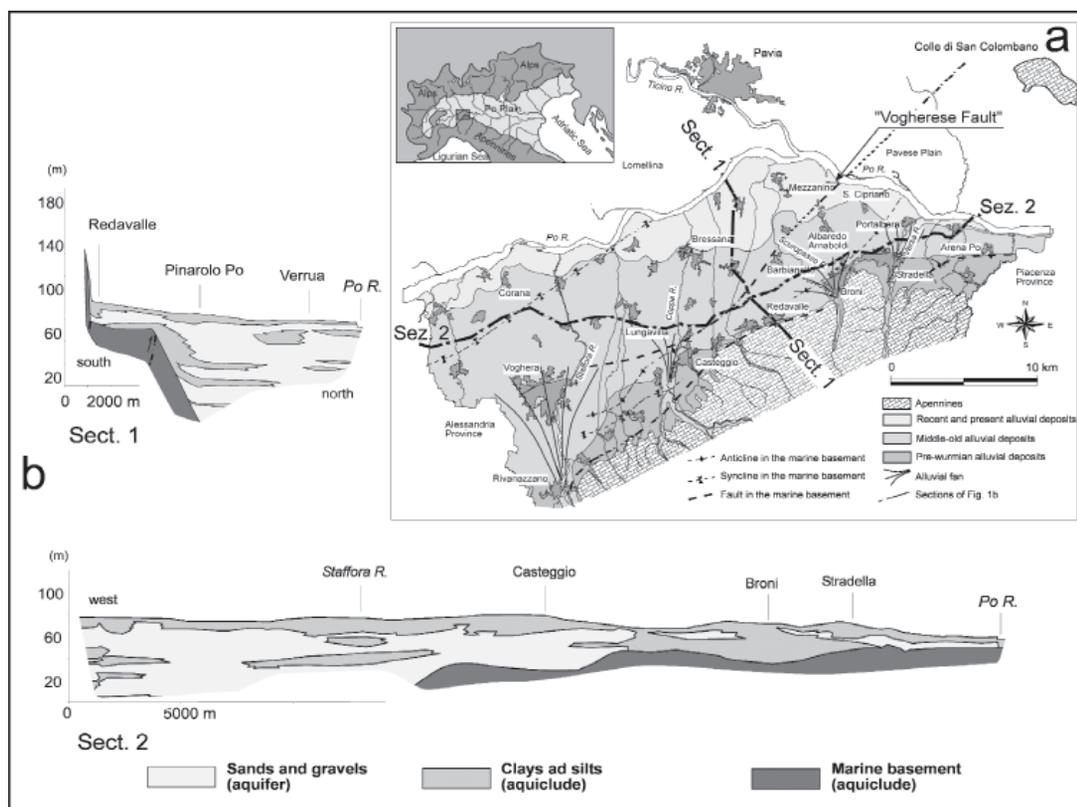


Fig. 1 - Carta geologica (a) e sezioni idrogeologiche (b) (semplificato da CAVANNA *et alii*, 1998)
 - Geological map (a) and hydrogeological sections (b) (simplified from CAVANNA *et alii*, 1998)

A delimitare tali settori è un disturbo tettonico, a direzione NE-SW, conosciuto in letteratura come “Faglia Vogherese” (BONI, 1967), che si sviluppa ad ovest di Casteggio e corre fino al Colle di San Colombano, passando circa in corrispondenza della confluenza del Fiume Ticino nel Fiume Po.

La Faglia Vogherese avrebbe carattere di faglia diretta nel suo tratto NE, fino alla zona di Barbianello, mentre a S di Pinarolo passa a faglia inversa, piegando gradatamente verso W nel tratto a N di Casteggio e di Voghera (BONI, 1967).

Ulteriore caratteristica dell’acquifero di pianura dell’Oltrepò Pavese è la pressochè costante presenza di una coltre superficiale argilloso-limosa che limita fortemente l’infiltrazione delle acque meteoriche nel sottosuolo. Tale coltre mostra spessori che superano sovente i 6-8 m, con valori massimi superiori a 10÷15 m, nei settori prossimi al margine collinare, e minimi, dell’ordine di 2 m, nella fascia di meandreggiamento del Fiume Po (CAVANNA *et alii*, 1998; PILLA *et alii*, 2007). Le aree di ricarica della falda dell’Oltrepò Pavese sono pertanto localizzate in corrispondenza dei conoidi dei principali corsi d’acqua di pertinenza appenninica al loro sbocco in pianura, laddove la granulometria dei depositi risulta essere più grossolana, e viene a mancare la coltre di copertura impermeabile (PILLA *et alii*, 2007). È invece da escludere il contributo di ricarica alla falda da parte del F.Po che, ad eccezione di sporadici periodi di piena, esercita una azione drenante nei confronti delle acque sotterranee (PILLA *et alii*, 2007).

erature as “Vogherese Fault” (BONI, 1967), that runs from the area to the west of Casteggio to the Colle of S. Colombano, passing across the confluence of Ticino and Po rivers, delimits these sectors.

The Vogherese Fault is a direct fault in its NE part, till the Barbianello zone, whereas it becomes inverse S of Pinarolo, folding gradually towards W north of Casteggio and Voghera (BONI, 1967).

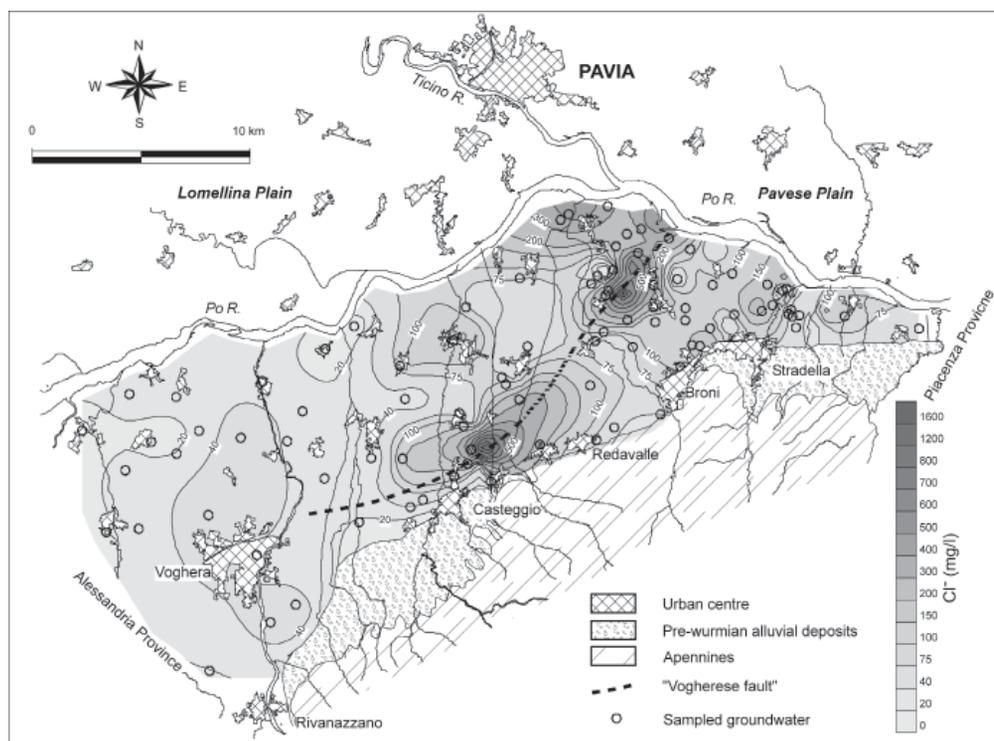
Another characteristic of the Oltrepò Pavese plain aquifer is the constant presence of superficial clayey-silty deposits that strongly limit infiltration. These superficial deposits have a thickness that often exceeds 6-8 m, with maximum values higher than 10-15 m, in the sectors close to the Apennine margin, and minimum values of 2 m, in the Po river meanders zone (PILLA *et alii*, 2007).

The recharge zones of the Oltrepò Pavese aquifer are located in the areas of the alluvial fans of the main Apennine streams due to the presence of coarser deposits in these areas and the lack of impermeable superficial deposits (PILLA *et alii*, 2007).

The groundwater recharge contribution by Po river must be excluded; in fact Po river, with the exception of occasional flood events, drains groundwater (PILLA *et alii*, 2007).

According to previous studies, the Oltrepò Pavese groundwater is characterized by two main hydrochemical facies (ARIATI *et alii* 1996; PILLA *et alii*, 2007): the most common calcium-bicarbonate hydrochemical facies and the highly mineralized sodium-chloride hydrochemical facies.

Fig. 2 - Distribuzione areale della concentrazione in Cl⁻ in relazione all'andamento della "Faglia Vogherese" (da PILLA *et alii*, 2007 ridisegnato)
 - Cl⁻ concentrations in relation to the Vogherese Fault trace (from PILLA *et alii*, 2007, modified)



Per quanto riguarda le caratteristiche idrochimiche delle acque di falda, studi precedenti (ARIATI *et alii* 1996; PILLA *et alii*, 2007) hanno evidenziato la presenza di due idrofacies principali: acque bicarbonato-calciche, che caratterizzano la maggior parte del sottosuolo, e acque clorurato-sodiche ad elevata mineralizzazione, che s'individuano lungo una fascia che corre a cavallo della traccia in superficie della "Faglia Vogherese" (Fig. 2).

L'origine di queste acque è attribuita a mescolamenti più o meno pronunciati tra le acque dolci proprie dell'acquifero alluvionale ed acque ad elevata salinità la cui genesi è da ricollegarsi alle salamoie profonde della Pianura Padana. Questi ultimi fluidi intrappolati nelle porzioni sottostanti l'acquifero padano presentano le caratteristiche delle acque marine evaporate, con un grado di mineralizzazione più elevato delle acque marine attuali (CONTI *et alii*, 2000).

LE INDAGINI EFFETTUATE

Lo studio ha previsto l'utilizzo di indagini idrochimiche, misure piezometriche, monitoraggio multiparametrico in continuo ed indagini geofisiche. In particolare, l'indagine idrochimica ha previsto il campionamento delle acque dai pozzi e dai collettori idrici superficiali, ubicati in una fascia di circa 3 km nell'intorno della "Faglia Vogherese", cioè in quella zona dove sono state evidenziate le maggiori concentrazioni in Sodio e Cloruri (Fig. 3).

Tale ricerca, finalizzata ad una caratterizzazione idrochimica di dettaglio delle acque di falda ed al monitoraggio delle eventuali variazioni del chimismo nel tempo, ha previsto periodiche campagne

The latter facies has been detected in the areas where the Vogherese Fault crops out (Fig. 2). These waters result from mixing of fresh waters from the alluvial aquifer, and waters of high salinity that rise from the Po Plain deep brines. These fluids, trapped at the bottom of the Po plain aquifer, are evaporated marine waters with an higher mineralization degree than the present marine waters (CONTI *et alii*, 2000).

INVESTIGATIONS

Several investigations were undertaken within this study: hydrochemical surveys, piezometric surveys, multi-parametric continuous monitoring and geophysical surveys. In particular, the hydrochemical survey was undertaken through sampling of waters from wells and the waters from the lower reaches of the surface drainage network. The sampling locations were located in an area of 3 km around the Vogherese Fault, where the greater concentrations of sodium and chloride were found (Fig. 3).

The objectives of this study were to undertake a more thorough hydrochemical characterization of aquifer waters, to monitor chem-

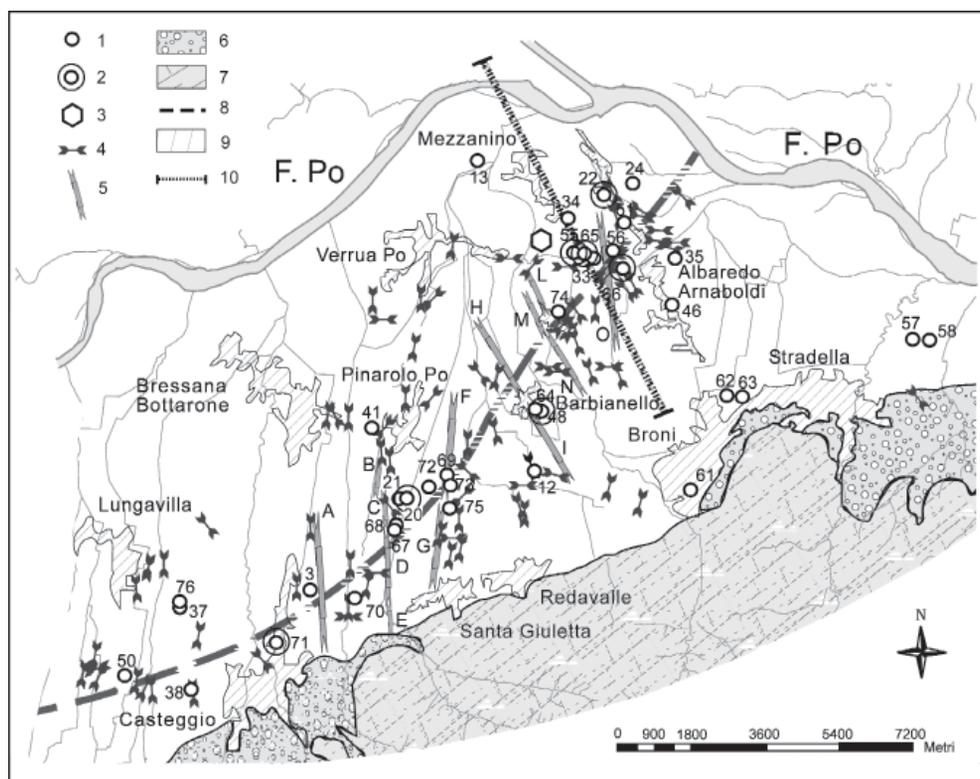


Fig. 3 - Planimetria con indicazione delle indagini effettuate. Legenda: 1) Pozzi campionati; 2) Log; 3) Pozzo di Casanova L. 4) Collettori idrici superficiali campionati; 5) Profilo VLF-EM; 6) Depositi alluvionali pre-wurmiani; 7) Margine appenninico; 8) Faglia Vogherese; 9) Centro urbano; 10) Traccia della sezione di Fig. 10

- Schematical map of the investigation. Legend: 1) Sampled wells; 2) Log; 3) Casanova L. well 4) Sampled surface waters from smaller reaches of the drainage network; 5) VLF profile; 6) Pre-würmian alluvial deposits; 7) Apennines; 8) Vogherese Fault; 9) Urban area; 10) Section of Fig. 10

di campionamento per lo studio idrochimico, misure piezometriche della falda e l'impiego di sonde multiparametriche in pozzo in grado di acquisire in continuo dati relativi a conducibilità elettrica, temperatura delle acque e livello piezometrico. Sono state effettuate inoltre alcune campagne atte ad acquisire, in pozzo, le variazioni di conducibilità elettrica e temperatura con la profondità. Le indagini geofisiche VLF-EM sono state, infine effettuate per mappare le zone a chimismo anomalo anche e soprattutto in aree in cui i pozzi idrici sono assenti (Fig. 3).

Studio idrochimico

Lo studio idrochimico è stato effettuato a partire dalle misure in situ di temperatura, conducibilità elettrica e pH, e dal prelievo di campioni di acque, condotto con cadenza circa mensile, dal luglio 2007 fino al dicembre 2008. Sui campioni di acque prelevati sono stati analizzati i costituenti maggiori (Calcio, Magnesio, Sodio, Potassio, Solfati, Nitrati, Bicarbonati e Cloruri) presso il Laboratorio di Idrologia, Idrogeologia e Idrochimica dell'Università degli Studi di Pavia.

Al monitoraggio condotto sulle acque provenienti dai pozzi è stato affiancato quello sulle acque provenienti dai collettori del reticolo idrografico secondario, sia artificiale che naturale. Accanto ai canali irrigui, tutti caratterizzati da alvei non impermeabilizzati, sono stati campionati anche diversi fontanili e alcuni piccoli corsi d'acqua naturali.

La scelta dei collettori da monitorare si è basata sulla constatazione dell'aumento della conducibilità elettrica delle acque, che le analisi chi-

istry variations of waters and, finally, to verify the real extent of this natural contamination phenomenon. Periodical sampling rounds, piezometric surveys, constant logging of electrical conductivity, temperature and water level data using multi-parameter dataloggers were placed within wells to detect changes of groundwater electrical conductivity and temperature with depth.

VLF-EM geophysical surveys were undertaken to map anomalous chemical groundwater, especially in areas lacking borehole data (Fig. 3).

Hydrochemical study

The hydrochemical study was based on temperature measurements, electrical conductivity, pH and monthly sampling of groundwater from July 2007 to December 2008.

Major ions (Ca, Mg, Na, K, SO₄, NO₃, HCO₃ and Cl) were analysed in the Laboratory of Hydrology, Hydrogeology and Hydrochemistry of the Earth Science Department, University of Pavia.

Both groundwater from boreholes and surface waters from the artificial and natural lower reaches of the drainage network were monitored. We sampled channels for irrigation, characterized by not-cemented beds, and a few natural little waterways. Those surface water location in which the electrical conductivity increased in correspondence of the Vogherese Fault crop out were chosen as monitoring locations; this increase was caused by high chloride and sodium concentrations (700-900 mg/L)(Fig. 3), as we could observe

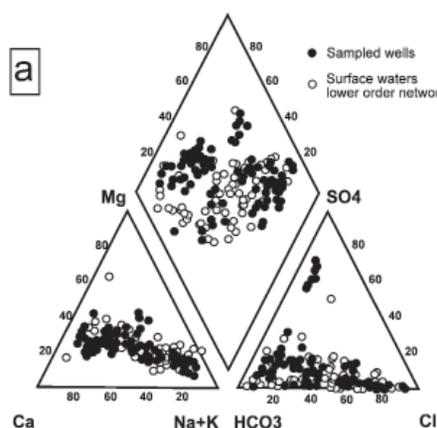
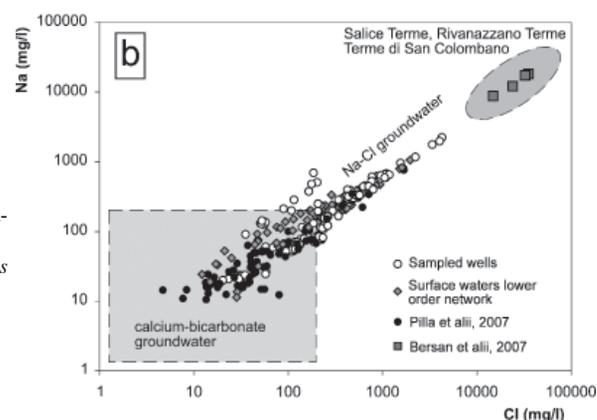


Fig. 4 - Diagramma di Piper (a) e diagramma Cl vs Na (b)
- Piper diagram (a) and Cl vs Na diagram (b)



miche svolte in laboratorio hanno poi confermato essere legato ad elevate concentrazioni in Cloruri e in Sodio (700-900 mg/L), in corrispondenza dell'attraversamento della traccia in superficie della "Faglia Vogherese".

Nel settore investigato le acque, sia sotterranee che superficiali, derivano da mescolamenti più o meno pronunciati di tre idrofacies principali: acque bicarbonato calciche, localmente con un'impronta magnesiaca, acque solfato calciche-sodiche con mineralizzazione medio-elevata e acque clorurato sodiche, generalmente ad elevata mineralizzazione (Fig. 4).

Le prime possiedono un grado di mineralizzazione medio (conduttività elettrica che varia normalmente tra 800 e 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$), con i Bicarbonati che mostrano una concentrazione variabile tra 300 e 700 mg/L, il Calcio con un tenore tra i 50 e i 200 mg/L, e il Magnesio con concentrazione variabile tra 30 e 50 mg/L. I Solfati si mantengono normalmente tra 30 e 100 mg/L mentre i Cloruri non superano normalmente i 100 mg/L.

Le acque connotate a Solfati, riscontrate solamente presso il centro abitato di Barbianello, presentano invece conducibilità anche superiore a 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e concentrazione in Solfati variabile tra 800 e 2700 mg/L e in Calcio compresa tra 200 e 300 mg/L circa. Queste acque mostrano anche una concentrazione non trascurabile in Cloruri (100÷300 mg/L) e in Sodio (200÷700 mg/L). Nell'Oltrepò Pavese, acque con una concentrazione così elevata in Solfati non erano mai state rinvenute nel settore di pianura, ma erano conosciute, nella zona, solamente lungo il basso Appennino, in corrispondenza degli affioramenti della Formazione Gessoso-Solfifera, i cui livelli e lenti evaporitiche ne determinano l'idrofacies chimica (CAVANNA *et alii*, 1995; BERSAN *et alii*, 2007). È evidente che la presenza in falda di tali acque debba essere ricondotta alla presenza di discontinuità tettoniche in grado di collegare idraulicamente i circuiti appenninici mineralizzati a quelli dell'antistante settore di pianura, anche se non si può escludere la presenza nel substrato mio-pliocenico, in corrispondenza della "Faglia Vogherese", di lenti o orizzonti evaporitici della Gessoso-Solfifera.

Le acque clorurato sodiche sono infine contraddistinte da una elevata mineralizzazione, conducibilità elettrica anche superiore a 14000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e una concentrazione in Cloruri a volte superiore a 4000 mg/L (Fig. 4). Le acque a maggior salinità si rinvennero, come già anticipa-

from chemical analysis.

In the investigated area, groundwater and shallow waters come from a mixing among 3 main hydrofacies: calcium-bicarbonate waters, locally marked by magnesium, calcium-sodium-sulphate waters, with moderate to high mineralization, and sodium-chloride waters, generally with high mineralization (Fig. 4).

The first ones have a medium mineralization degree (electrical conductivity that varies normally between 800 and 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) with the carbonates that show concentration variable between 300 and 700 mg/L, the calcium with concentrations between 50 and 200 mg/L, and magnesium with concentrations between 30 and 50 mg/L. Sulphate concentrations vary between 30 and 100 mg/L and chloride concentrations doesn't exceed 100 mg/L.

The sulphate-rich waters, found only in the Barbianello area, show values of electrical conductivity that exceed 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sulphates concentrations that vary between 800 and 2700 mg/L and calcium concentrations between 200 and 300 mg/L. These waters also show high concentrations of chloride (100÷300 mg/L) and sodium (200÷700 mg/L).

Waters with such high concentrations of sulphates had never been identified in the Oltrepò Pavese plain sector, but they were only known along the low Apennine, in correspondence of the Gessoso-Solfifera Formation crop out, where layers and lenses of evaporites determine this hydrochemical facies (CAVANNA *et alii*, 1995; BERSAN *et alii*, 2007).

The presence of these waters within the aquifer can be explained by the presence of tectonic discontinuities that create hydraulic connections between the Apennine mineralized water system and the groundwater system of the downgradient plain areas. However, the presence of lenses or layers of evaporites (gypsum) in the Miocene-Pliocene substratum, in correspondence of the Vogherese Fault, cannot be excluded.

Finally, the sodium-chloride waters are characterized by high mineralization: electrical conductivity that exceeds 14000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and chloride concentrations that sometimes exceeds 4000 mg/L (Fig. 4).

Most of the saline waters can be found, as previously stated,

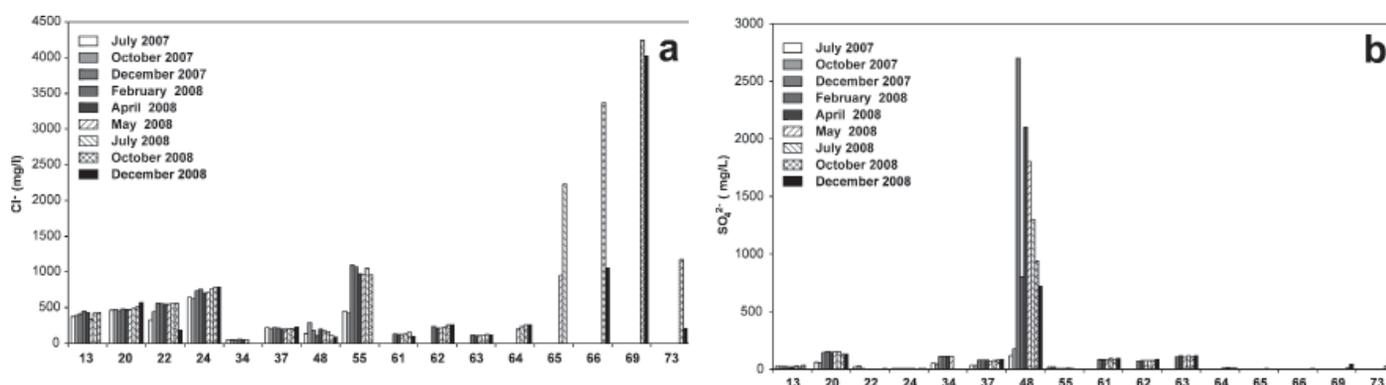


Fig. 5 - Variazione delle concentrazioni in Cloruri (a) e in Solfati (b) nelle acque a maggior salinità di alcuni pozzi monitorati (periodo luglio 2007 - dicembre 2008)
- Variation in chloride (a) and sulphates (b) concentration of high salinity waters from some monitored wells (period July 2007-December 2008)

to, lungo una stretta fascia che corre in modo più o meno continuo da Casteggio fino quasi alla confluenza del F. Ticino con il F. Po, a cavallo della “Faglia Vogherese” (Fig. 2). In particolare sono state individuate tre aree dove tale fenomeno è più diffuso e si presenta con maggiore intensità. Queste aree, localizzate sempre a ridosso della “Faglia Vogherese”, si sviluppano: nel settore posto poco a nord del centro abitato di Casteggio, dove viene raggiunta una concentrazione in Cloruri superiori a 1500 mg/L, nel settore ad ovest di Barbianello, con concentrazione in falda di oltre 4000 mg/L, e nella zona situata nelle vicinanze dei centri abitati di Mezzanino e Albaredo Arnaboldi, dove la concentrazione in Cloruri è mediamente superiore a 3000 mg/L (Fig. 5).

L'elevata mineralizzazione di queste acque era del resto già conosciuta, tanto da essere, in alcune località, loro valso il toponimo di Saline. Il fatto che anche le acque del reticolo idrografico secondario, sia naturale che artificiale, che incide solo per pochi metri i depositi alluvionali, siano contraddistinte da un'elevata mineralizzazione di tipo clorurato sodico, dimostra un'estensione della contaminazione salina della falda fino ad interessare anche zone prossime al piano campagna.

La distribuzione areale del fenomeno d'intrusione, suggerisce la possibilità della presenza di più “pennacchi” di acque molto mineralizzate che risalgono verso la superficie, contaminando in maniera puntuale e più marcata la falda di alcune zone, e determinando un aumento meno significativo in Cloruri nelle acque sotterranee dell'intorno che risultano, pertanto, più diluite dalle acque “dolci” superficiali.

Dal monitoraggio effettuato emerge inoltre che le acque sotterranee, specialmente quelle a maggior mineralizzazione, hanno mostrato variazioni della loro salinità nel tempo, a volte molto evidenti (Fig. 5).

Nel periodo luglio 2007 - dicembre 2007 i Cloruri nelle acque hanno mostrato un sensibile incremento della loro concentrazione; l'incremento non è stato costante per tutti i pozzi. Gli aumenti misurati sono stati di norma dell'ordine di poche decine di mg/L, ad eccezione del pozzo 55, che ha registrato un forte incremento nella concentrazione in Cloruri, superiore a 600 mg/L. Nel periodo successivo (febbraio - maggio 2008) sono state invece rilevate variazioni della concentrazione in Cloruri complessivamente modeste. Nel periodo estivo-autunnale del

along a narrow area that runs, more or less continuously, from Casteggio towards the confluence of the Ticino and Po rivers, across the Vogherese Fault (Fig. 2). In particular we detected the areas where this phenomenon is more widespread and appears with more intensity (higher chloride concentrations). These areas, always localized on the Vogherese Fault superficial trace, develop: to the North of Casteggio, where the chloride concentrations exceed 1500 mg/L, westward of Barbianello, with chloride concentrations of 4000 mg/L, and in an area near Mezzanino and Albaredo Arnaboldi, where the concentration of chloride varies between 750 and 3000 mg/L (Fig. 5).

The high mineralization of these waters was known since ancient times in some of these places that, for this reason, gained the name of “Saline”. Even the smaller reaches of the surface waters natural and artificial drainage network, that cut into the alluvial deposits only for few meters, are characterized by an high sodium-chloride mineralization. This shows that the saline contamination involves the shallow parts of the aquifer.

The spatial distribution of this intrusion phenomenon suggests the presence of highly mineralized water plumes that rise to the shallow aquifer, polluting it. The aquifer pollution is limited to plume areas, where we find waters characterized by higher chloride concentrations, that decrease, going away from that point, because of fresh water dilution.

Groundwater, especially the most mineralized, showed changes of salinity in time, sometimes very apparent (Fig. 5).

During the period July 2007 - December 2007 chloride concentrations increased; this increase wasn't constant for all boreholes.

The measured increases were of few tens of mg/L, with the exception of well 55, that registered a strong increase of concentrations for chloride that exceeded 600 mg/L.

During the next period (February - May 2008) small variations in chloride concentrations were detected.

During summer-autumn 2008, first a considerable increase in waters mineralization was registered, followed by a decrease in salinity

2008 è stato registrato inizialmente un sensibile incremento della mineralizzazione delle acque e poi, a causa delle intense precipitazioni autunnali, una diminuzione della salinità, come testimoniato dal decremento della concentrazione in cloruri, rilevato nelle acque di molti pozzi.

Per quanto riguarda il comportamento idrochimico nel tempo delle acque ad elevata concentrazione in solfati (pozzo 48), anch'esse hanno mostrato significative variazioni nel tempo della concentrazione. Nel periodo investigato la concentrazione in solfati è variata infatti tra un minimo di 115 mg/L (luglio 2007) ed un massimo di 2700 mg/L (dicembre 2007), con un andamento sostanzialmente non molto differente da quello precedentemente descritto per le acque clorurato-sodiche.

Logs di conducibilità elettrica e temperatura

Nei mesi di luglio, ottobre e dicembre 2008 sono stati eseguiti, in alcuni pozzi contraddistinti da un'elevata mineralizzazione (Fig. 3), dei profili verticali della conducibilità elettrica e della temperatura delle acque di falda. Nell'indagine è stata impiegata una sonda multi-parametrica WTW Multiline P4, collegata ad un cavo della lunghezza di 50 m. Questo tipo di indagine è stato ripetuto, su alcuni pozzi, in differenti periodi dell'anno, in concomitanza con il prelievo di campioni sottoposti poi ad analisi idrochimica.

L'indagine ha permesso di individuare, in alcuni settori dell'area investigata, la zona di transizione tra acque dolci superficiali e acque più profonde ad elevata mineralizzazione. In generale si osserva che le acque di falda incominciano ad incrementare la loro salinità a profondità normalmente compresa tra 6 e 8 metri, anche se in alcuni pozzi tale profondità è inferiore (2-4 m come nel pozzo 48) o è maggiore (12-15 m come nel pozzo 20).

I dati acquisiti evidenziano inoltre che, sia le acque poste al di sopra che quelle poste al di sotto della zona di transizione, non presentano la medesima conducibilità elettrica, e ciò è indice del fatto che l'intrusione di acque salate entro l'acquifero non è un fenomeno distribuito uniformemente nell'area investigata (Fig. 6).

In alcuni pozzi (pozzo 66) è stato registrato un forte incremento della salinità delle acque con la profondità (la conducibilità elettrica è aumentata da 3000 a circa 14000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) mentre in altri pozzi l'incremento di salinità si è mantenuto più contenuto, nell'ordine di alcune migliaia di $\mu\text{S}/\text{cm}$. La ripetizione di tale indagine in più periodi dell'anno ha permesso di evidenziare, inoltre, la risposta dell'acquifero agli eventi di ricarica del periodo autunnale. I logs eseguiti mostrano infatti come i settori dell'acquifero contraddistinti da una salinizzazione più accentuata (pozzi 66 e 55), non risentono in modo molto marcato della diluizione prodotta dall'arrivo nell'acquifero di acque di neoinfiltrazione, mentre nei settori più marginali rispetto ai "pennacchi" salini (pozzi 20, 22 e 48) la risposta è rapida e ben evidente. Solamente il pozzo 48 mostra un andamento differenziato rispetto agli altri in quanto, nel mese di dicembre 2008, ad un sostanziale decremento della conducibilità elettrica, riscontrata nei primi metri dell'acquifero, corrisponde invece un sensibile aumento della salinità delle acque profonde.

È verosimile ritenere che tali variazioni della mineralizzazione,

because of the abundant autumnal rainfalls, as confirmed by a decrease of concentrations for chloride within groundwater.

Hydrochemical behaviour of sulphates-rich waters (well 48) also showed important variations of sulphates concentration in time.

In fact, during the monitoring period, the sulphates concentrations varied between 115 mg/L (July 2007) and 2700 mg/L (December 2007), showing a trend similar to the chloride-sodic waters.

Electrical conductivity and temperature logs

On July, October and December 2008, some electrical conductivity and temperature vertical profiles were carried out within a few highly mineralized wells (Fig. 3),

The multi-parameter WTW Multiline P4 probe, connected to a 50 m length cable, was used.

This kind of investigation was repeated, on some wells, during different period of the year, combined with water sampling for hydrochemical analysis.

This investigation allowed to detect, on some sectors of the investigated area, the transition zone between shallow fresh waters and deep mineralized waters.

We can observe increases of groundwater salinity between depths of 6 and 8 m, even if for some wells this depth is lower (2-4 m as for well 48) or higher (12-15 m as for well 20).

Collected data shows that waters localized on either side of the transition zone, don't show the same electrical conductivity within the different areas of the plain. This shows that saltwater intrusion into the alluvial aquifer has a heterogeneous distribution (Fig. 6).

A strong increase in water salinity with depth was registered for some wells (well 66) (electrical conductivity increased from 3000 to about 14000 $\mu\text{S}/\text{cm}$); instead, on other wells, the salinity increase was lower, in the range of some thousands of $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Repeating this investigation for several times a year, allowed to point out the aquifer's response to the autumn's rainfall recharge events.

Logs carried out show that the sectors of the aquifer that are highly saline (wells 66 and 55) are not affected by dilution produced by the arrival of the newly infiltrated waters, whereas in the marginal sectors as regards saline plumes (wells 20, 22 and 48) the reply is quick and well evident.

Only well 48 shows a different trend because, on December 2008, a decrease of electrical conductivity within the shallow parts of the aquifer corresponded to a considerable increase of salinity within the deeper groundwater.

Probably these variations of mineralization detected on well 48 can be attributed to the shallow depth of the well (5 m) and to its poor conditioning which causes anomalous hydrochemical responses

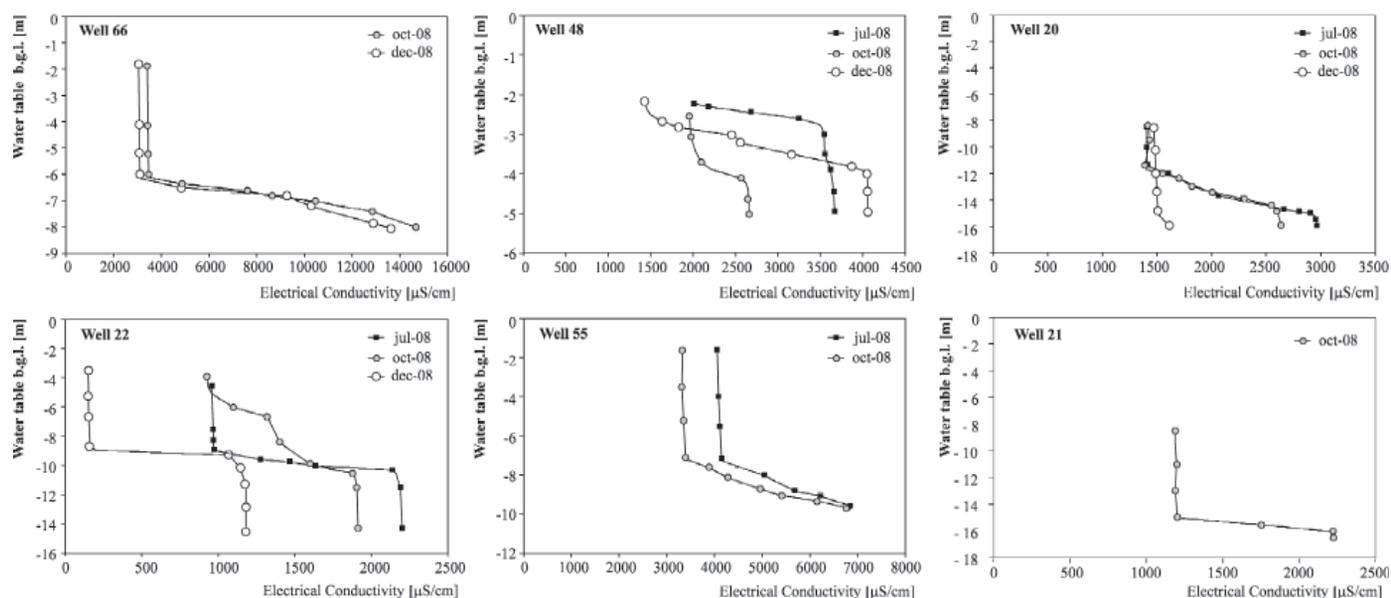


Fig. 6 - Logs di conducibilità elettrica rilevati in alcuni pozzi
- *Electrical conductivity logs for some wells*

riscontrate nel pozzo 48, possano essere imputate alla modesta profondità del pozzo (5 m) e ad un suo non ottimale condizionamento che determinano risposte idrochimiche anomale ai momenti di ricarica.

Anche per quanto riguarda la profondità dell'interfaccia tra acque a maggiore e a minore mineralizzazione, si evidenzia che essa ha subito in alcuni pozzi, nel periodo di ricarica della falda, sostanziali variazioni verticali (pozzi 20 e 48) dovute ad un incremento dei volumi di acque "dolci" di neoinfiltrazione, mentre in altri pozzi (pozzi 22, 55 e 66) la medesima interfaccia è stata individuata, grossomodo, alle stesse profondità.

Monitoraggio in continuo dei parametri fisico-chimici

A partire dal mese di luglio 2008 è stato realizzato un sistema di monitoraggio in continuo sia dei livelli piezometrici, che della conducibilità elettrica e della temperatura delle acque sotterranee, tramite l'utilizzo di due sonde multiparametriche (CTD Diver Schlumberger Product). Le sonde sono state inserite all'interno di due pozzi; una nel pozzo 20 (Fig. 7, pozzo ad uso industriale interessato da una concentrazione medio-elevata in cloruri dell'ordine di ~470 mg/L) e l'altra nel pozzo 48 (Fig. 8, pozzo domestico caratterizzato, come già indicato, oltre che da una medio-elevata concentrazione in Cloruri, anche da una elevata concentrazione in Solfati). Per entrambi i pozzi è stata impiegata una scansione di acquisizione dei dati di 12 ore, mentre la profondità a cui è stata collocata la sonda è stata di 14.50 m circa per il pozzo 20 e di 5 m circa per il pozzo 48.

Per quanto riguarda il pozzo 20 (periodo di osservazione: luglio 2008 - novembre 2008), essendo un pozzo ad un uso industriale il monitoraggio in continuo ha risentito fortemente del disturbo indotto, sia sui livelli piezometrici che sulle caratteristiche idrochimiche delle acque, dai continui emungimenti. Il pozzo è stato in funzione per tempi generalmente brevi (alcuni minuti) ma ravvicinati nell'orario

to recharge events.

With regards to the depth of the fresh water-salt water interface, it shows considerable vertical variation on some wells (wells 20 and 48) during groundwater recharge, caused by an increase of newly infiltrated water volumes, whereas on other wells (wells 22, 55 and 66) this interface was more or less identified at the same depth.

Chemical-physical parameters continuous monitoring

Since July 2008 a continuous monitoring system for groundwater level, electrical conductivity and groundwater temperature was installed, using 2 multi-parameter datalogger instruments (CTD Diver Schlumberger Product). These instruments were installed within 2 wells; the first one was installed in well 20 (Fig. 7, well with an industrial use and concentrations of chloride of approximately 470 mg/L), the second instrument was installed in well 48 (Fig. 8, domestic water supply well with moderate to high concentrations of chlorides and high sulphates).

The instrument's sampling rate was set to 12 hours and were installed at 14.50 m of depth within well 20, and 5 m within well 48.

In well 20 (observation period: July 2008 - November 2008), monitoring was affected by interferences on both water levels and hydrochemical waters characteristics due to on-off abstraction cycles. This well was subject to short abstraction cycles of generally a few minutes, close to one another during working hours (from 08.00 of morning to 18.00 of evening).

The diagram of fig. 7b, which contains part of the acquired data

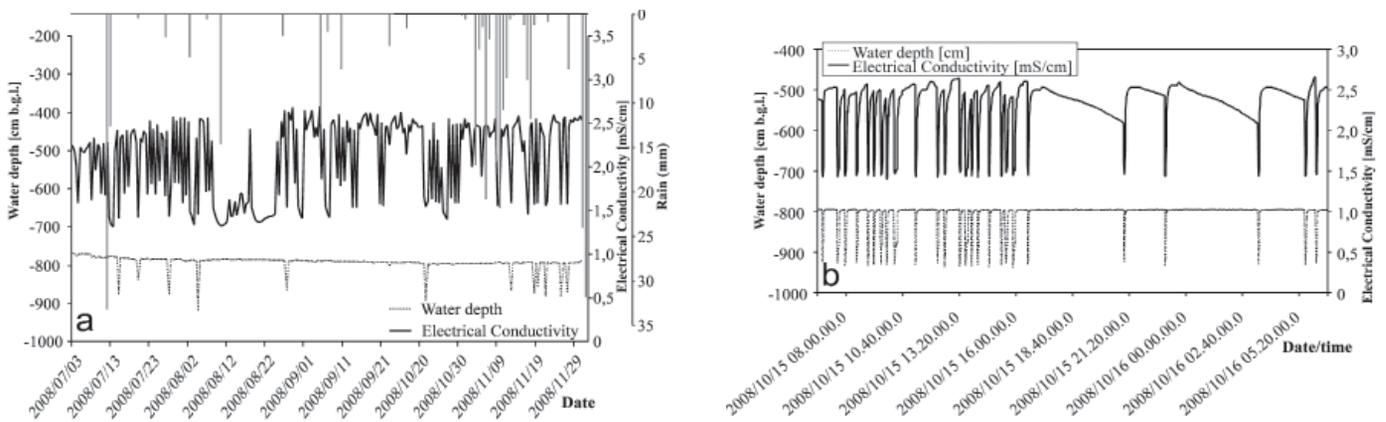


Fig. 7 - Monitoraggio in continuo di livello piezometrico e conducibilità elettrica del pozzo 20 per il periodo luglio-novembre 2008 (a) e per il periodo 15-16 ottobre 2008 (b)
 - Water depth and electrical conductivity values from continuous monitoring (well 20) during the period July-November 2008 (a) and October 15-16 2008 (b)

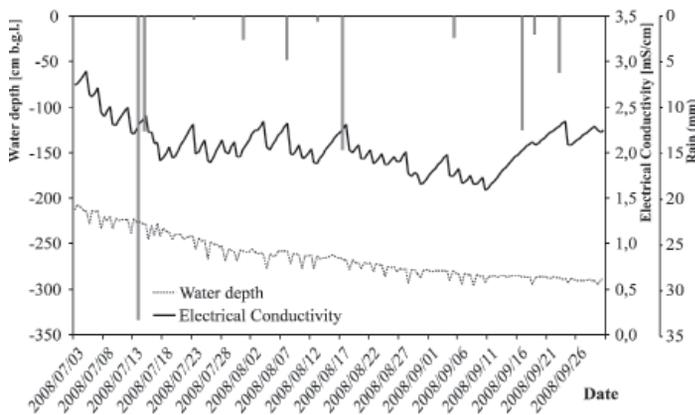


Fig. 8 - Monitoraggio in continuo di livello piezometrico e conducibilità elettrica del pozzo 48 per il periodo luglio-settembre 2008
 - Water depth and electrical conductivity values from continuous monitoring (well 48) during the period July-September 2008

produttivo che va dalle ore 08.00 del mattino alle ore 18.00.

Come è evidente dall’analisi del diagramma di Fig. 7b, che riporta parte dei risultati acquisiti nel medesimo pozzo durante un monitoraggio di alcuni giorni effettuato nell’ottobre 2008 con acquisizione dei dati con cadenza di un minuto, l’effetto dell’emungimento si mostra in modo molto evidente sugli equilibri idrochimici delle acque. All’inizio del pompaggio si osserva un immediato richiamo verso il pozzo di acque “dolci” provenienti lateralmente dalle porzioni più superficiali dell’acquifero, come testimoniato dal forte decremento dei valori della conducibilità elettrica, che passano da 2500 a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ circa, mentre nei momenti immediatamente successivi, l’incremento della conducibilità elettrica delle acque emunte testimonia l’arrivo ritardato in pozzo di acque a maggior salinità provenienti dalle porzioni più profonde dell’acquifero, a causa del richiamo in superficie indotto dallo sviluppo del cono di depressione. Terminato il forte disequilibrio prodotto dall’emungimento, l’acquifero lentamente tende a recuperare le condizioni pre-perturbazione.

Alla luce di quanto detto, diventa certamente più agevole interpretare i dati di Fig. 7a che evidenziano alcuni aspetti significativi cir-

from well 20 during October 2008 (sampling rate of 1 minute), shows that pumping clearly affects the water hydrochemical equilibrium.

At the beginning of pumping we can observe a sudden lateral migration of fresh water from the shallow part of the aquifer, as testified by the strong decrease of electrical conductivity that drops from 2500 to about 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Next, the increase of groundwater electrical conductivity shows the delayed arrival into the well of more mineralized waters coming from the deeper part of the aquifer because of the induced effect related to the development of the cone of depression. Once the strong unbalance produced by withdrawal is over, the aquifer turns slowly back to its previous conditions.

In this way, we can easily understand data of Fig. 7a, that highlight some interesting aspects about the seasonal reply of the aquifer to recharge events and withdrawals, even if only for a few months.

First of all we can observe that during the period July-September 2008, characterized by reduced precipitations, there was a moderate decrease of water levels (from 770 to 790 cm level depth) that corresponded to an increase of electrical conductivity maximum daily

ca la risposta stagionale dell'acquifero, anche se solo per un periodo di alcuni mesi, alle fasi di ricarica e agli emungimenti.

Nel periodo luglio-settembre 2008, contraddistinto da una piovosità relativamente scarsa, ad una modesta diminuzione del livello piezometrico (da 770 a 790 cm di soggiacenza) è corrisposto un sensibile aumento dei valori massimi giornalieri della conducibilità elettrica, da 2250 a circa 2700 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Fig. 7b).

Durante il periodo compreso tra l'8 e il 25 agosto, con attività produttiva ferma e quindi con il pozzo funzionante solo occasionalmente per ripristinare il livello idrico all'interno dei serbatoi di servizio, si è assistito ad un lieve recupero del livello piezometrico (alcuni centimetri), mentre la conducibilità elettrica delle acque non ha mostrato sostanziali variazioni rispetto al periodo precedente.

Nel periodo successivo (ottobre-novembre), complessivamente abbastanza piovoso, ad un incremento del livello di falda di circa 10 cm non sono corrisposte sostanziali diminuzioni della conducibilità elettrica, a probabile testimonianza che questo settore di acquifero non risente in modo evidente, forse a causa della lontananza dalle aree di ricarica (conoide del T. Coppa), delle precipitazioni autunnali.

Il pozzo 48, pozzo domestico, ha invece registrato delle variazioni nella conducibilità elettrica decisamente più pronunciate, comprese tra 2900 e 1590 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ed un livello di soggiacenza che è a poco a poco diminuito, passando da 2.0 m circa nel mese di luglio a 2.9 m nel mese di ottobre (Fig. 8). Le oscillazioni, sia del livello piezometrico sia dei valori della conducibilità elettrica, sono state indotte da modesti emungimenti giornalieri, specialmente nel periodo estivo. Dall'analisi del diagramma di Fig. 8 emerge una risposta abbastanza singolare dell'acquifero agli emungimenti giornalieri. Questi hanno determinato infatti una inaspettata diminuzione della mineralizzazione delle acque dovuta ad un arrivo in pozzo di acque "dolci" provenienti verosimilmente dalle porzioni laterali dell'acquifero, mentre sembra che non richiami acque ad elevata salinità dai settori più profondi dell'acquifero.

Tale comportamento, decisamente anomalo, può essere semplicemente imputabile, come già anticipato, a difetti costruttivi del pozzo.

Indagini VLF-EM

La prospezione geofisica VLF-EM (Very Low Frequency Electromagnetic) è stata sperimentata al fine di individuare le zone dal chimismo anomalo anche in aree in cui l'assenza di pozzi idrici e collettori del reticolo superficiale impedisce il monitoraggio chimico-fisico delle acque di falda. Come è noto, la metodologia VLF-EM (PATERSON & RONKA, 1971; VOZOFF, 1971; FISCHER *et alii*, 1983) è un tecnica speditiva che permette l'individuazione, nel sottosuolo, di corpi conduttivi sub-verticali ed opportunamente orientati rispetto all'antenna sorgente del segnale elettromagnetico. La tecnica infatti utilizza i segnali emessi dai trasmettitori radio militari nelle frequenze comprese tra i 15 KHz e i 30 KHz.

La campagna d'indagine, effettuata nell'estate 2008, nell'area che, a ridosso della traccia della "Faglia Vogherese", si estende da Casteggio fino alla confluenza del F. Ticino con il F. Po, ha dimostrato come la metodologia sia efficace nell'individuare le zone dal chimismo ano-

mallo, from 2250 to about 2700 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Fig. 7b).

During the period between 8 and 25 August, with the interruption of the productive activity and the occasional well abstraction (for filling up of factory tanks), we assist to a water levels increase of a few centimetres whereas the electrical conductivity didn't show considerable variations in comparison to the previous period.

During the next period of reduced precipitations (October-November), a water level increase of about 10 cm was registered, but not important decreases of electrical conductivity. This proves that this sector of the aquifer isn't influenced by autumnal precipitations, probably because of the distance from recharge areas (Coppa Alluvial Fan).

Well 48 showed electrical conductivity variations between 2900 and 1590 $\mu\text{s}/\text{cm}$ and a gradual decrease of water level from 2.0 m below ground water level (bgl) in July to 2.9 m (bgl) in October (Fig.8).

The water level and electrical conductivity variations were caused by daily withdrawals, especially in summer time.

Analysis of the diagram in Fig. 8 shows a strange response of the piezometric head to daily abstractions. The daily abstractions caused a decrease of water mineralization induced by a fresh groundwater flow from lateral sectors of the aquifer, whereas it doesn't seem to draw high saline waters from deeper sectors of the aquifer.

This so anomalous behaviour can be attributed to a bad installation procedure of the well.

VLF-EM survey

The VLF-EM (Very Low Frequency Electromagnetic) survey has been tested to detect anomalous chemical zones, even in those areas where the absence of groundwater wells and surface water drainage network prevent the sampling of aquifer waters.

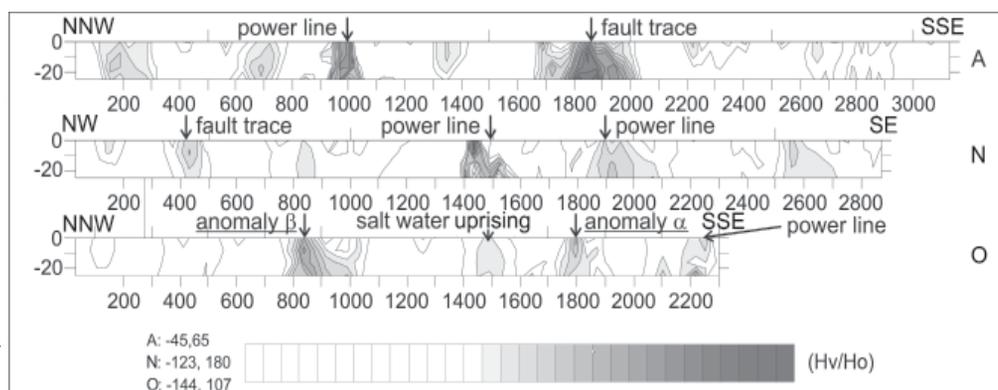
As it is known, the VLF-EM methodology (PATERSON & RONKA, 1971; VOZOFF, 1971; FISCHER *et alii*, 1983) is an expeditious technique for the detection of conductive steeply-dipping bodies, that have to be well coupled with the transmitting station.

Indeed, this technique uses the signals emitted from military radio transmitters in the range of 15 and 30 KHz.

The survey, carried out during summer 2008, into an area along the Vogherese Fault trace, that reaches out from Casteggio to the Ticino-Po rivers confluence, showed how this methodology is effective in detecting anomalous chemistry zones.

Fig. 9 - Pseudo-sezioni di densità di corrente equivalente, costruite a partire dal rapporto percentuale tra la componente verticale e la componente orizzontale della parte reale del campo elettromagnetico (HV/H0). Nella sezione O sono state indicate le due anomalie α e β presenti anche in fig. 10

- Pseudo-sections of equivalent current density from percentage ratio between the vertical and horizontal components of the real part of the electro-magnetic field (HV/H0)



malo. Queste infatti producono un campo magnetico secondario che, interagendo con il primario, dà origine ad un'ellisse di polarizzazione (TORRESE *et alii*, 2009). La registrazione, mediante lo strumento ABEM WADI, della componente reale ed immaginaria dell'anomalia magnetica così prodotta ha permesso, dopo opportuno filtraggio (FRASER, 1969, 1981; KAROUS & HJELT, 1977, 1983; OGILVY & LEE, 1991; SUNDARARAJAN *et alii*, 2006) di ottenere pseudosezioni di densità di corrente equivalenti per i primi 20 m circa di profondità (Fig. 9).

In considerazione del fatto che la contaminazione della falda superficiale da parte dell'acqua salata profonda, che risale lungo la "Faglia Vogherese", non presenta alcuna direzionalità preferenziale ("pennacchi" isolati), è stato possibile verificare che tale indagine non richiede necessariamente l'attraversamento delle zone salinizzate con direzioni trasversali rispetto all'andamento della "Faglia Vogherese". Le sezioni VLF-EM, tarate mediante indagini elettriche SEV (Sondaggi Elettrici Verticali) effettuate nella stessa area (BRAGA & CERRO, 1988), mostrano la presenza di anomalie ad elevata conducibilità elettrica, alcune delle quali sono state interpretate come anomalie prodotte dai disturbi elettromagnetici di origine antropica (come quelle riscontrate nelle sezioni A, N e O di Fig. 9, dovute all'attraversamento di elettrodotti ad alta tensione, e indicate col termine "power line"), mentre altre sono state ricondotte alla presenza di corpi conduttivi naturali nel sottosuolo. Questi corpi conduttivi, che si localizzano lungo la traccia della "Faglia Vogherese" nei pressi di pozzi idrici caratterizzati da acque ad elevata salinità, corrispondono alle anomalie (α e β) a bassa resistività elettrica (10-25 Ω m) che la sezione elettrostratigrafica, costruita in base alle indagini SEV, mostra al di sotto della copertura argilloso-limoso, nell'acquifero ghiaioso-sabbioso, fino al substrato (Fig. 10); sarebbero pertanto da mettere in relazione con il fenomeno di risalita, all'interno dell'acquifero alluvionale, delle acque profonde ad elevata salinità provenienti dai depositi mio-pliocenici di origine marina.

La distribuzione delle anomalie di conducibilità elettrica rilevate dalle indagini VLF-EM, può essere legata alla presenza di più discontinuità tettoniche minori sepolte nel sottosuolo, geneticamente connesse all'esistenza della Faglia Vogherese, che determinerebbero l'insorgere del fenomeno di risalita delle acque profonde.

The last ones, in fact, produce a secondary magnetic field that, interacting with the primary field, gives rise to an ellipse of polarization (TORRESE *et alii*, 2009).

The registration, by means of ABEM WADI instrument, of the real part and the imaginary part of the produced magnetic anomaly, allowed us, after filtering (FRASER, 1969, 1981; KAROUS AND HJELT, 1977, 1983; OGILVY & LEE, 1991; SUNDARARAJAN *et alii*, 2006), to obtain pseudo-sections of equivalent current density for about the first 20 m of depth (Fig. 9).

Given that the contamination of the shallow groundwater with uprising mineralized waters along the tectonic discontinuity forms a plume that should not be oriented, it was not necessary to intersect the Vogherese Fault with rigorously perpendicular transects.

These sections, calibrated using resistivity depth soundings carried out in the same area (BRAGA & CERRO, 1988), show the existence of high electrical conductivity anomalies, some of which were interpreted as anomalies produced by human electromagnetic interferences (as the ones found in sections A, N and O of Fig. 9, caused by high voltage electroducts, and indicated as "power line"), whereas the others have been brought back to the occurrence of natural buried conductive bodies.

These conductive bodies, localized along the Vogherese Fault trace, near wells characterized by high saline waters, correspond to low electrical resistivity anomalies (α e β) (10-25 Ω m), that the electro-stratigraphic section, created from resistivity depth soundings data, shows within the gravely-sandy aquifer under the fine deposits, to the depths of the substratum (Fig. 10). These conductive bodies should be related to the uprising phenomenon, into the alluvial aquifer and along the tectonic discontinuity, of the deep high saline waters coming from the Miocene-Pliocene marine deposits. The distribution of the high electrical conductivity anomalies, detected by VLF-EM surveys, can be connected to the occurrence of different buried minor tectonic discontinuities, genetically connected to the Vogherese Fault, and that could cause the deep waters uprising phenomenon.

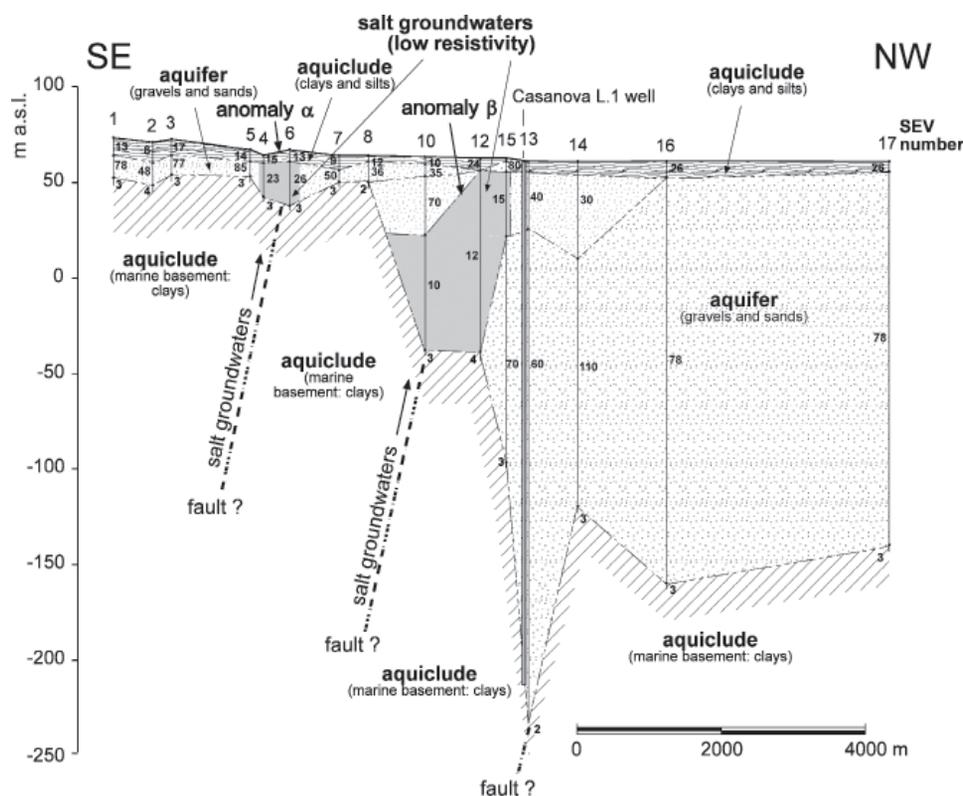


Fig. 10 - Sezione elettrostratigrafica da indagini SEV (valori in Ωm)
 - Electro-stratigraphic section from resistivity depth soundings (values in Ωm)

CONCLUSIONI

Il settore di pianura dell'Oltrepò Pavese è localmente contraddistinto da una significativa contaminazione naturale dell'acquifero superficiale da parte di acque, di provenienza profonda, ad elevata salinità, con connotazione clorurato sodica.

Dagli studi condotti è emerso che tale fenomeno si manifesta principalmente in corrispondenza della traccia in superficie di un'importante discontinuità tettonica sepolta, la "Faglia Vogherese", che disloca il substrato marino terziario. Tale discontinuità gioca un ruolo determinante in quanto veicola verso l'acquifero superficiale le acque salate di origine profonda. Dai dati fino ad ora acquisiti, non si può comunque escludere che, anche discontinuità tettoniche minori, possano giocare un ruolo non trascurabile nella contaminazione delle acque di falda superficiali.

Le indagini condotte hanno evidenziato, nel sottosuolo dell'area indagata, una distribuzione disomogenea, sia arealmente che verticalmente, delle acque salate. Tale fenomeno tende pertanto a manifestarsi puntualmente, con isolati "pennacchi" di risalita di acque salate, in grado, una volta penetrate nell'acquifero superficiale, di diffondersi e mescolarsi con le acque "dolci" superficiali, determinando così un grado di contaminazione variabile all'interno del medesimo acquifero. Il fenomeno si verifica con maggiore intensità e più superficialmente solo in alcuni settori. Allontanandosi da queste zone la contaminazione tende ad interessare solo le porzioni più profonde dell'acquifero e a manifestarsi quindi con minore intensità.

CONCLUSIONS

The shallow aquifer of the Oltrepò Pavese plain sector is locally involved by a significant natural contamination of deep, highly saline groundwater, characterized by a sodium-chloride hydrochemical facies.

This study pointed out that this phenomenon has been mainly identified in correspondence of the cropping out of an important buried tectonic discontinuity, the "Vogherese Fault", that displaces the tertiary marine deposits sequence.

This discontinuity conveys up to the upper aquifer the deep saline waters.

On the basis of data collected to date, even other minor tectonic discontinuities could be having a significant role on the contamination of shallow groundwater.

Early results, indicate that the area's subsurface is characterized by a heterogeneous spatial and vertical saltwater distribution.

The saltwater uprising is locally constituted by isolated flows into the shallow aquifer, which spread and mix with freshwaters, causing a variable degree of contamination within the same aquifer.

Only some sectors of the plain experience this phenomenon with greater intensity and usually affects only the shallower portion of the aquifer.

Going away from this zones, the contamination involves only the deeper parts of the aquifer and so shows itself with less intensity.

Entro l'area d'indagine sono state individuate più zone, poste sempre lungo la traccia della "Faglia Vogherese", in cui il fenomeno sembra essere più intenso e diffuso. Ciascuna di queste zone è caratterizzata dalla presenza di acque ad elevata salinità, ma con una profondità diversa dell'interfaccia tra l'acqua dolce superficiale e l'acqua salata, che contraddistingue la porzione inferiore dell'acquifero. A volte, già nei settori prossimi alla superficie, la falda risulta fortemente mineralizzata; a volte invece, lo spessore dello strato di acqua dolce sovrastante quello di acqua salata è presente e consistente. In queste ultime zone, l'estrema fragilità tra gli equilibri esistenti tra le acque "dolci" più superficiali e quelle salate più profonde viene evidenziata, in taluni casi, dalla forte variazione della profondità che tale interfaccia assume nei vari periodi dell'anno, specialmente nei momenti di ricarica della falda.

Il ruolo che invece assumono gli emungimenti sull'aumento o meno della salinità delle acque non è tuttora chiaro; i dati finora raccolti sembrano confermare un'intensificazione solo temporanea della contaminazione salina delle acque sotterranee. Sulla base del breve periodo di osservazione non si possono pertanto prevedere gli effetti a lungo termine sull'amplificazione del fenomeno.

Particolarmente utili si sono dimostrati sia il monitoraggio in continuo dei livelli piezometrici e della conducibilità elettrica, che i logs di conducibilità elettrica effettuati in pozzo. Tali indagini permettono infatti di avere un maggior controllo sull'interpretazione delle variazioni stagionali dei vari parametri chimici e chimico-fisici ottenuti con l'indagine idrochimica.

Per quanto riguarda infine l'indagine geofisica, è stato possibile verificare che, in tale contesto geologico, la tecnica VLF-EM permette l'individuazione nel sottosuolo dei corpi conduttivi dovuti alla presenza di acque ad elevata mineralizzazione.

Some zones, located along the Vogherese Fault trace, where the phenomenon appears more intense, were detected.

Each zone is characterized by the presence of saltwater, that occupies the lower part of the aquifer, but has a variable depth to the fresh water-salt water interface.

Sometimes, shallow groundwater is already strongly mineralized; other times the freshwater layer thickness above the mineralized groundwater is high.

In the latter zones, the extreme fragility of the existing equilibrium between shallow freshwater and deeper groundwater is highlighted by the strong changes in depth that this interface assumes over the year, especially during groundwater recharge.

The role of groundwater abstractions is not yet clearly understood. Data collected till now seem that confirm a temporary worsening of groundwater saline contamination. On the basis of this brief monitoring period we can't foresee the long term effects on the amplification of the phenomenon.

Both continuous monitoring of water levels and electrical conductivity were particularly useful. These investigations allow a higher degree of control on the interpretations about seasonal variations of the chemical and physical-chemical parameters obtained by hydrochemical investigation.

Finally, with regards to the geophysical survey, it was possible to verify that, on this geological setting, the VLF-EM technique allows to detect conductive bodies that can be related to the presence of highly mineralized waters.

OPERE CITATE/REFERENCES

- AGIP (1994) - *Acque dolci sotterranee*. AGIP S.p.A.. Direzione Generale Servizi Centrali per l'Esplorazione, 515.
- ARIATI L., MARCHETTI R. & FERRARI R. (1996) - *Alterazione delle acque sotterranee: situazioni locali*. Quaderni di "Acque sotterranee", **5**: 75-91, Geo-Graph. ed., Milano/Segrate.
- BARLOW P.M. & WILD E.C. (2002) - *Bibliography on the Occurrence and Intrusion of Saltwater in Aquifers along the Atlantic Coast of the United States*. Open-File Report 02-235, U.S. Geol. Survey.
- BARROU G. (2003) - *Seawater intrusion in the coastal aquifers of Italy*. In: CALAFERRA J (ed) State of seawater intrusion in coastal aquifers of the Mediterranean Coast. SWIM-SWICA, Alicante, Spain.
- BERSAN M., BOCCA B., CIANCETTI G., DOLZA G., MEISINA C. & PILLA G. (2007) - *Deep chemical anomalous groundwaters of the Pavia-Piacenza Apennine and its foreland (Po Plain)*. Geitalia 2007, Rimini 12-15 sett. 2007, Epitome 2, 180.
- BONI A. (1967) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia. F. 59 Pavia*, 68 pp., Roma.
- BONORI O., CIABATTI M., CREMONINI S., DI GIOVAMBATTISTA R., MARTINELLI G., MAURIZI S., QUADRI G., RABBI E., RIGHI P.V., TINTI S. & ZANTEDESCHI E. (2000) - *Geochemical and geophysical monitoring in tectonically active areas of the Po Valley (Northern Italy). Case histories linked to a gas emission structures*. Geog. Fis. e Din. Quater., **23**: 3-20.
- BRAGA G. & CERRO A. (1988) - *Le strutture sepolte della pianura pavese e le relative influenze sulle risorser idriche sotterranee*. Atti Tic. Sc. Terra, **31**: 421-433.
- BRAMBILLA G. (1992) - *Prime considerazioni cronologico-ambientali sulle filliti del Miocene superiore di Portalbera (Pavia - Italia settentrionale)*. Atti del Convegno di Casteggio (PV): 109-113, Casteggio (PV).
- CAPELLI G., MAZZA R & PACICCO C. (2007) - *Intrusione salina nel delta del Fiume Tevere. Geologia, idrologia e idrogeologia del settore romano della piana costiera*. Giornale di Geologia Applicata **5**: 13-28.
- CAVANNA F., GUADO P. & VERCESI P.L. (1995) - *Assetto strutturale del margine appenninico pavese-piacentino e connessione con la mineralizzazione delle acque*. Quaderni di Acque sotterranee, **5**: 193-233, Geo-Graph. ed., Milano/Segrate.

- CAVANNA F., MARCHETTI G. & VERCESI P.L. (1998) - *Idrogeomorfologia e insediamenti a rischio ambientale. Il caso della pianura dell'Oltrepò Pavese e del relativo margine collinare*. Fondazione Lombardia Ambiente, 14 72, Isabel Litografia, Gessate (MI).
- CAVANNA F., GUADO G., GUADO P., PILLA G., SACCHI E. & VERCESI P.L. (2004) - *Il bacino idrotermale di Salice Terme: sintesi delle conoscenze e dati derivati da nuove ricerche*. *Geologia dell'Ambiente*, **3**: 37-46.
- CONTI A., SACCHI E., CHIARLE M., MARTINELLI G. & ZUPPI G.M. (2000) - *Geochemistry of the formation water of the Po plain (northern Italy): an overview*. *Applied Geochemistry*, **15**: 51-65.
- COTECCHIA V., GRASSI D. & POLEMIO M. (2005) - *Carbonate Aquifers in Apulia and Seawater Intrusion*. *Giornale di Geologia Applicata*, **1**: 219-231.
- DESIDERIO G. & RUSI S. (2004) - *Idrogeologia e idrogeochimica delle acque mineralizzate dell'Avanfossa Abruzzese Molisana*. *Boll. Soc. Geol. It.*, **123**: 373-389.
- DI SPIO E., GALGARO A. & ZUPPI G.M. (2007) - *Contaminazione salina nei sistemi acquiferi dell'entroterra meridionale della laguna di Venezia*. *Giornale di Geologia Applicata*, **5**: 5-12.
- FISCHER G., LE QUANG B.G. & MULLER I. (1983) - *VLF round surveys, a powerfull tool for the study of shallow two-dimensional structures*. *Geophysical Prospecting*, **31**: 977-991.
- FRASER G. (1969) - *Contouring of VLF-EM data*. *Geophysics*, **34**: 958-967.
- FRASER D.C. (1981) - *A review of some useful algorithms in geophysics*. *Canadian Institute of Mining Transactions*, **74** (828): 76-83.
- KAROUS M. & HJELT S.E. (1977) - *Determination of apparent current density from VLF measurements: Report*. Department of Geophysics, Univeristy of Oulu, Finland, Contribution No. **89**: 19 pp.
- KAROUS M. & HJELT S.E. (1983) - *Linear filtering of VLF Dip-Angle measurement*. *Geophysical Prospecting*, **31**: 782-794.
- NANNI T. & ZUPPI G.M. (1986) - *Acque salate e circolazione profonda in relazione all'assetto strutturale del fronte adriatico e padano dell'Appennino*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **35**: 979-986.
- OGILVY R.D. & LEE A.C. (1991) - *Interpretation of VLF-EM inphase data using current density pseudosections*. *Geophysical Prospecting*, **39**: 567-580.
- PATERSON N.R. & RONKA V. (1971) - *Five years of surveying with the very low frequency electromagnetic method*. *Geoexploration*, **9**: 7-26.
- PELLEGRINI L. & VERCESI P.L. (1995) - *Considerazioni morfotettoniche sulla zona a sud del Po tra Voghera (PV) e Sarmato (PC)*. *Atti Tic. Sc. Terra*, **38**.
- PILLA G., SACCHI E. & CIANCETTI G. (2007) - *Studio idrogeologico, idrochimico ed isotopico delle acque sotterranee del settore di pianura dell'Oltrepò Pavese (Pianura lombarda meridionale)*. *Giornale di Geologia Applicata*, **5**: 59-74.
- REGIONE LOMBARDBIA & ENI DIVISIONE AGIP (2002) - *Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia*. A cura di Carcano C, Piccin A (eds), S.E.L.C.A. Firenze.
- SUNDARARAJAN N., RAMESH BABU V., SHIVA PRASAD N. & SRINIVAS Y. (2006) - *VLFPROS-A Matlab code for processing of VLF-EM data*. *Computers & Geosciences*, **32**: 1806-1813.
- TORRESE P., PILLA G., BERSAN M., RAINONE M. L., CIANCETTI G. (2009) - *Mapping the uprising of highly mineralized waters occurring along a fault zone in the "Oltrepò Pavese" plain upper aquifers (northern Italy) using VLF-EM survey*. *Proceeding of SAGEEP 22nd Annual Meeting*, Fort Worth, TX, 29 March-2 April 2009.
- TOSCANI L., BOSCHETTI T., MAFFINI M., BARBIERI M. & MUCCHINO C. (2007). *The groundwaters of Fontevivo (Parma Province- Italy): redox processes and mixing with brine waters*. *Geochemistry, Exploration, Environment, Analysis*, **7**: 23-40.
- VOZOFF K. (1971) - *The effect of overburden on vertical component anomalies in AFMAG and VLF-EM exploration: a computer model study*. *Geophysics*, **36**: 53-57.

Received March 2009 - Accepted May 2009