

## Contaminazione salina nei sistemi acquiferi dell'entroterra meridionale della laguna di Venezia

Eloisa Di Sipio<sup>a</sup>, Antonio Galgaro<sup>b</sup>, Giovanni Maria Zuppi<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Dipartimento di Scienze Ambientali, Università Cà Foscari di Venezia, S. Marta-Dorsoduro 2137, Venezia  
eloisa@unive.it, zuppi@unive.it

<sup>b</sup>Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica, Università di Padova, Via G. Matteotti 32, Padova, antonio.galgaro@unipd.it

### *Salt water contamination in groundwater systems of the southern Venice lagoon mainland*

**ABSTRACT:** In the southern sector of the Venice Lagoon mainland groundwater near the coastline is affected by salt water contaminations. Geophysical research recognized salty water within the Holocene unconfined aquifers and detected within Pliocene deposits (300-450 m depth) fossil brines and a deep buried tectonic lineament controlling salt-groundwater distribution. Brines when mobilised by infiltrating superficial fresh water and by intensive withdrawal rate, can reach the surface and can contribute to salt contamination of the lagoon mainland. Water chemistry (major dissolved ions) and environmental isotopes ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  and  $^{13}\text{C}$ ) associated with Electrical Conductivity describe the movement of fresh and continental water toward the Adriatic Sea and confirm the influence of fossil brines on the unconfined aquifers. Salt anomalies in groundwater are also due either to sea water intrusion or to lagoon waters ingression as consequence of the combined action of tectonics and to the intensive anthropic actions.

**Key terms:** Venice Lagoon, Groundwater Salination, Geophysics, Geochemistry, Environmental Isotopes

**Termini chiave:** Laguna di Venezia, salinizzazione delle acque di falda, geofisica, geochimica, isotopi ambientali

### **Riassunto**

Nel settore meridionale dell'entroterra lagunare veneziano le acque di falda vicino alla costa sono interessate da contaminazione da acqua salata. Le indagini geofisiche hanno riconosciuto la presenza di acqua salata all'interno degli acquiferi non confinati di età olocenica e, all'interno dei depositi Pliocenici (300-450 m di profondità) hanno individuato "brines" fossili e un lineamento tettonico sepolto che governa la mobilità delle acque sotterranee salate. Le salamoie, quando mobilizzate dall'infiltrazione di acque dolci superficiali e dagli intensi tassi di emungimenti, possono raggiungere la superficie e, di conseguenza, contribuire alla contaminazione dell'entroterra lagunare. La chimica delle acque (ioni principali disciolti) e gli isotopi ambientali ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  and  $^{13}\text{C}$ ) associati ai valori di conducibilità elettrica permettono di definire il movimento dell'acqua dolce continentale verso il Mar Adriatico e di confermare l'influenza delle acque fossili sulla qualità delle acque presenti negli acquiferi più superficiali. Le anomalie in tenore salino delle acque di falda sono dovute, quindi sia all'intrusione di acqua marina sia all'ingressione di acque lagunari come conseguenza dell'intensa attività umana e, inoltre, alla presenza di acque fossili in grado di raggiungere la superficie per azione combinata della tettonica e della circolazione sotterranea delle acque.

### **Introduzione**

Le ricerche si sono concentrate nel settore meridionale dell'entroterra lagunare veneziano, e in particolare, hanno interessato il territorio limitato dalla Laguna di Venezia a nord, dal Mare Adriatico a est e, per circa 20 km, dal corso del fiume Adige a sud (tra gli abitati di Chioggia, Cavarzere e Piove di Sacco) (Fig. 1).

L'intrusione salina e, di conseguenza, la salinizzazione degli acquiferi costieri e lagunari costituisce un problema grave e diffuso a causa della reciproca azione di mare e laguna, favorita dalla presenza di condizioni critiche particolari del territorio, quali la subsidenza ed il rapido progredire verso l'entroterra della isopieza 0, accentuatasi nel corso del tempo in seguito ai vari interventi di bonifica. Tali interventi sono stati eseguiti in modo sistematico a partire dalla fine del secolo XIX. Essi portano gli alvei pensili a disperdere l'acqua marina che risale dalla foce verso l'entroterra (Carbognin e Tosi., 2003). Bisogna ricordare inoltre l'esistenza di paleoalvei ad elevata Conducibilità Idraulica, che costituiscono i vettori preferenziali di trasmissione di acque ad alto tenore salino e il forte sfruttamento della risorsa sotterranea che richiama in superficie acqua salata dagli acquiferi Pliocenici. Si evidenziano, inoltre, numerosi fenomeni di subsidenza, sia naturale sia antropica, storicamente riconoscibili nell'area (Benvenuti et al., 1972; Galgaro et al., 2000; Ciavola et al., 2002; Brambati et al., 2003; Carbognin and Tosi, 2003;

Comerlati et al., 2004; Carbognin et al., 2004). Dal punto di vista tettonico il substrato della Pianura Veneta risente dell'andamento a gradoni (horst e graben) prodotto dalle

faglie ad andamento scledense (NW-SE) che interessano la regione dalla zona prealpina fino al margine lagunare (Fig.2) (AA. VV., 1982).

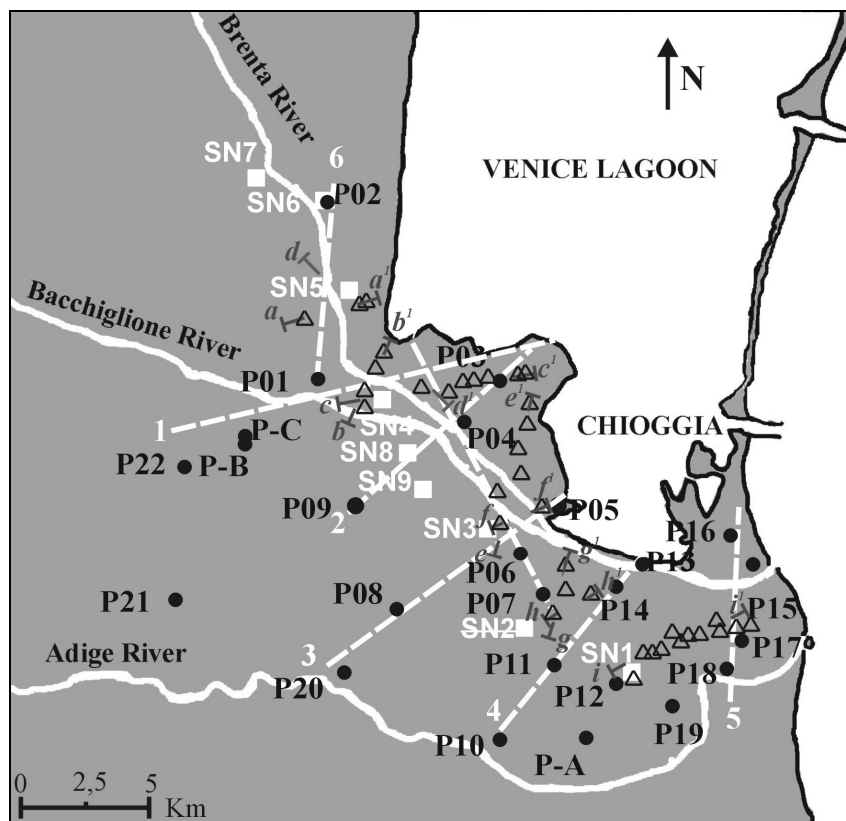


Fig. 1: Area di indagine e localizzazione dei punti di misura: P (cerchi) = piezometri; SN (quadrati) = SEV di nuova esecuzione; triangoli = SEV eseguiti dall'Università di Padova a partire dal 1970. Localizzazione dei profili elettrostratigrafici (aa<sup>1</sup>-ii<sup>1</sup>) e posizionamento dei profili di conducibilità (1-7, linee bianche)

Fig. 1: Area of interest and location of measurement points. P (circled points) = piezometers; SN (square points) = new VES; triangle points = some VES conducted by Padua University during the 1970s. Location of VES profiles (aa<sup>1</sup>-ii<sup>1</sup>) and location of conductivity profiles (1-7, white lines)

Gli studi condotti nel territorio circumlagunare fin dal 1970 hanno dimostrato da un lato l'esistenza dell'intrusione salina superficiale legata alla falda freatica (primi 20 m circa) lungo tutto il margine interno della laguna, e dall'altro la presenza di acque salate fossili. L'analisi della contaminazione salina deve coinvolgere quindi anche i depositi Pliocenici profondi, presenti in tutta la Pianura Padana le cui acque sono caratterizzate in genere da elevate concentrazioni di Na e Cl (Brambati et al., 2003; Conti et al., 2000; Zuppi and Sacchi, 2004). Queste acque sono state riscontrate nell'area meridionale a profondità variabili tra i 300 ed i 450 m come visibile nel pozzo di Codevigo (AGIP, 1994). Inoltre, la litostratigrafia del sottosuolo, formata da due distinti complessi deposizionali, quello lagunare-litoraneo olocenico e quello sottostante continentale pleistocenico superiore, è caratterizzata da una notevole eterogeneità orizzontale e verticale, che rende complessa la correlazione e l'interpretazione in un quadro

paleoambientale a scala regionale.

Lo studio si propone di definire l'effettiva origine delle acque salate presenti sul bordo meridionale della laguna di Venezia, la loro distribuzione ed estensione nell'entroterra e i loro vettori preferenziali di movimento all'interno del sottosuolo, opportunamente correlati con le informazioni di tipo geologico, geomorfologico e stratigrafico caratteristiche dell'area di studio.

## Metodologia

La ricerca è stata caratterizzata dal continuo confronto di due diverse tipologie di indagine: la geofisica (logs e sondaggi elettrici verticali) e l'idrogeochimica (raccolta e analisi di campioni di acqua). Questo confronto permette di conferire un carattere multidisciplinare allo studio.

Inizialmente sono stati selezionati dei piezometri, corredati di relativa stratigrafia, distribuiti il più possibile omogeneamente all'interno del territorio in esame, in cui,

durante campagne ripetute nel tempo, sono state effettuate misurazioni del livello piezometrico, della temperatura e del pH. L'esecuzione di logs di conducibilità ha permesso di individuare l'interfaccia tra acque dolci e salate e di valutare la variazione della conducibilità con la profondità, mentre l'ausilio di tecniche geofisiche di tipo elettrico ha consentito di analizzare i rapporti fra caratteristiche degli acquiferi, assetto idrogeologico, paleogeografia e tettonica. Inoltre sono stati prelevati dei campioni di acque per poterne determinare, mediante analisi di laboratorio, le caratteristiche fisico-chimiche ed isotopiche. Da un lato le acque sono state caratterizzate da un punto di vista geochimico per mettere in luce eventuali differenze composizionali tra di esse; dall'altro se ne è voluto determinare età ed origine, per poter distinguere l'eventuale presenza di acque di origine fossile da quelle di origine marina e di origine meteorica.

In ultimo è stata utilizzata la strumentazione geofisica (SEV), per monitorare la presenza di acque salate nei sedimenti superficiali del territorio esaminato, individuando estensione e diffusione del fenomeno, e per valutare, soprattutto in prossimità della linea di costa e in corrispondenza degli alvei fluviali disperdenti, la presenza di eventuali variazioni temporali delle condizioni di contaminazione salina rispetto a quanto riscontrato in letteratura. In particolare è stata effettuata la revisione critica di alcuni dati geofisici ottenuti intorno agli anni '70, volgendo particolare attenzione all'esistenza dell'elettrostrato conduttore profondo, che individua in profondità le acque fossili. I risultati dei SEV sono stati sottoposti a modellazione inversa e diretta mediante l'uso di due software, rispettivamente Gandalf e Sondelec, che hanno permesso di valutare spessori e resistività apparenti dei terreni a partire dalle curve di resistività ottenute in campagna. Secondo queste informazioni, è stato possibile ricostruire le elettrostratigrafie del sottosuolo mediante definizione di classi di resistività. In alcuni casi i sondaggi elettrici hanno rilevato la presenza di paleoalvei nel sottosuolo e di dune lungo la fascia costiera, ospitanti lenti di acqua dolce superficiale sovrastanti il cuneo salino.

Logs di conducibilità insieme a valori di temperatura, pH e livello piezometrico sono stati raccolti in corrispondenza di 25 piezometri durante tre diversi periodi di campionamento (settembre 2001, giugno 2002, dicembre 2003) per verificare l'esistenza di variazioni significative delle misure nel tempo. Dal momento che la maggior parte dei piezometri a disposizione, profondi all'incirca 15-20 m, risulta completamente fenestrata, è stato possibile individuare, con buona approssimazione, l'interfaccia acqua dolce-acqua salata. Il contenuto di cationi e anioni dei campioni d'acqua raccolti è stato determinato rispettivamente con il metodo della spettrometria di emissione atomica al plasma induttivo (ICP-MS) e della cromatografia ionica. L'esecuzione di alcuni nuovi SEV ha permesso di individuare l'estensione della contaminazione salina nell'entroterra e di valutarne le possibili variazioni

nel tempo mediante confronto con i dati storici (anni '70). Inoltre, il confronto tra prospezioni geofisiche superficiali e profonde ha permesso di individuare nel sottosuolo la presenza dell'acquifero quaternario ospitante le brines plioceniche. Le variazioni di profondità di tali livelli acquiferi, riscontrate mediante la modellazione dei dati geofisici, sono state messe in relazione con lo schema strutturale della regione (Fig.2) valutando la possibile continuità meridionale di alcuni lineamenti tettonici alpini in grado quindi di influenzare a scala regionale il movimento delle acque saline presenti in profondità. (Fig.2).

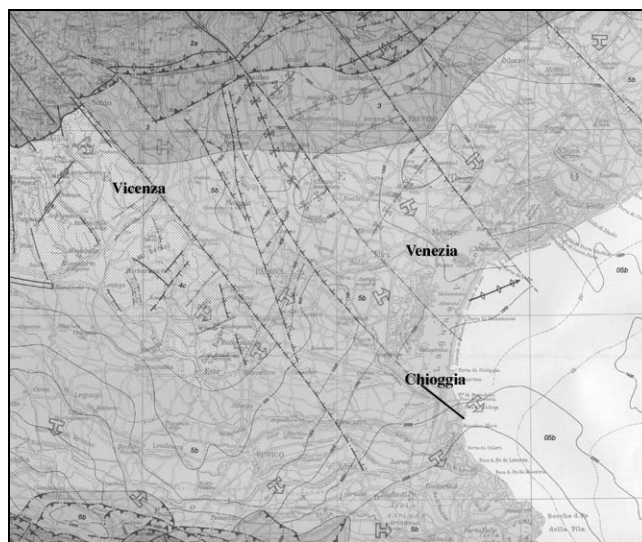


Fig.2: Schema tettonico della Pianura Veneta prodotto dal sistema di faglie ad andamento scledense (NW-SE) (dalla Neotectonic Map of Italy, 1982, modificato)

*Fig. 2: Tectonic map of Venetian Plain due to Schio-Vicenza faults systems (NW-SE) (from the Neotectonic Map of Italy, 1982, modified)*

## Risultati

La falda superficiale risulta interessata da oscillazioni del livello freatico inferiori a 1 m, da piccole variazioni di temperatura valutabili nell'ordine di 1°C e da valori di pH leggermente basici, variabili tra 7.2 e 8 (Di Sipio et al., 2005).

Considerando i valori di conducibilità elettrica (EC) è possibile osservare che lontano dal margine lagunare i piezometri (esempio P1) mostrano bassi tenori di salinità con un andamento simile in tutte le stagioni (EC tra 0.5 e 1.1 mS/cm), caratteristico dell'acqua dolce, o comunque poco inquinata, mentre i piezometri posti in prossimità della laguna e del mare (esempio P15) con valori di EC compresi tra 20 e 36 mS/cm, così come quelli disposti nell'immediato entroterra parallelamente alla costa (esempio P4) con EC pari a circa 8 mS/cm, testimoniano della presenza di acque salate, non sfruttabili pertanto né per fini agricoli né per altro uso (Fig. 3).

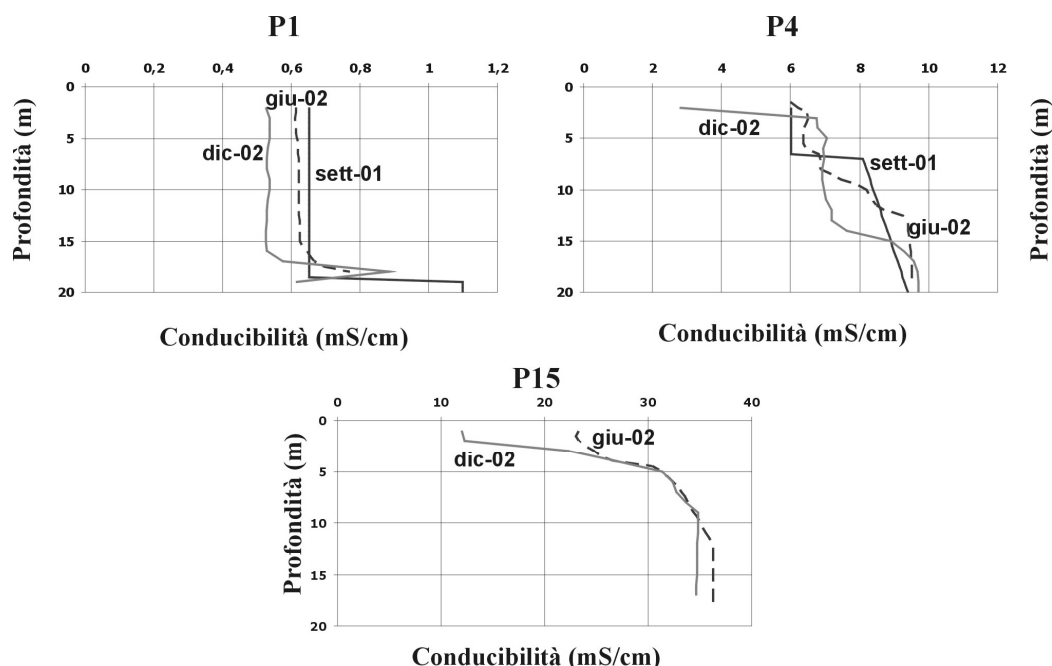


Fig. 3: Logs di conducibilità tipici dell'area in esame: P1, piezometro dell'entroterra caratterizzato da valori di acqua dolce per tutta la durata dell'anno e da un andamento simile in tutte le stagioni; P4, piezometro dell'immediato entroterra, presenta tenori tipici delle acque salate ( $>8$  mS/cm) in tutti i periodi dell'anno, condizione favorita anche dall'emungimento di acqua dal sottosuolo per scopi irrigui; P15, situato in prossimità del mare, raggiunge valori tipici delle acque marine (35 mS/cm) sia in estate che in inverno

Fig. 3: Conductivity logs collected in the study area: P1, inland piezometer characterized by fresh water all over the year and by a similar conductivity trend in all seasons; P4, mainland piezometer, shows values typical of salt water ( $> 8$  mS/cm) all over the year, condition favoured also by exploitation of water from the subsoil for irrigation purposes; P15, located near the sea, reaches values typical of marine water (35 mS/cm) during both the summer and winter seasons

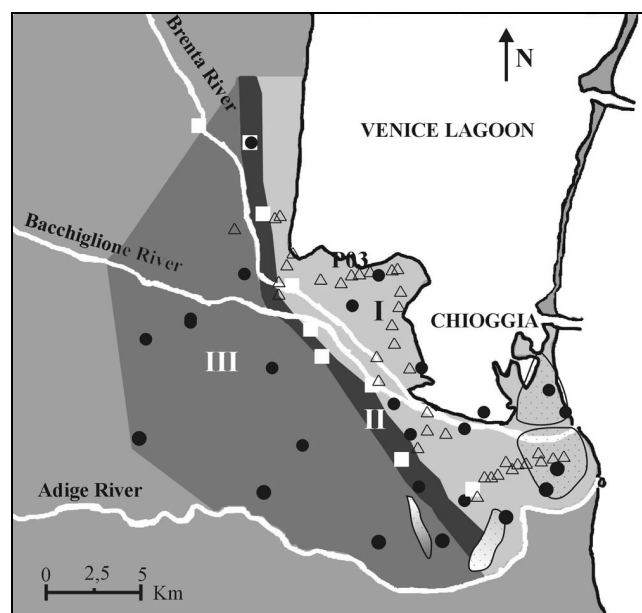


Fig. 4: Determinazione del limite di contaminazione salina negli acquiferi superficiali. I = area ad elevato rischio di contaminazione salina ( $1,5 < \rho < 5-6$ ); II = area di transizione ( $5-6 < \rho < 15$ ); III = area a basso rischio di contaminazione salina ( $\rho > 15$ ). Aree puntinate: dune e paleo dune costituenti alti morfologici e riserve di acqua dolce.

L'analisi congiunta dei dati geoelettrici e dei logs di conducibilità ha permesso la determinazione del limite di contaminazione salina nell'acquifero superficiale freatico. Il confronto identifica tre zone distinte: a) il settore adiacente al mare caratterizzato dai più alti valori di EC (da 20 a 36 mS/cm) e dalle più basse indicazioni di resistività elettrica – ER – ( $\rho$  variabile da 1.5 a 5-6 mS/cm), ad alto rischio di contaminazione salina; b) l'entroterra con alti valori di ER (superiori ai 15 mS/cm) e bassi tenori di TDS, a basso rischio di contaminazione salina e c) la zona di transizione con valori di ER variabili tra 5-6 e 15 mS/cm. Il limite si sviluppa parallelamente alla costa individuando i fiumi come altro elemento di diffusione dell'acqua marina verso l'interno (Fig. 4). A causa della dispersione dal letto dei fiumi si può rinvenire dell'acqua salata, principalmente durante periodi di alta marea, fino a 20 km dalla costa (Di Sipio et al., 2006).

Fig. 4: Determination of salt water contamination limit in the phreatic aquifers. I = area with high risk of salt contamination ( $1,5 < \rho < 5-6$ ); II = transition zone ( $5-6 < \rho < 15$ ); III = area with low risk of salt contamination ( $\rho > 15$ ). Dots area = dune complex and paleo longshore bars that hold a morphologic prominence and constitute fresh water reserves

Inoltre, la revisione critica dei SEV profondi a disposizione mostra l'esistenza di una dislocazione del basamento dell'acquifero profondo: l'elettrostrato conduttivo profondo presenta una differenza di elevazione di circa 100 m in direzione E-W: il settore occidentale (elettrostrato conduttivo profondo individuato a circa 450 m di profondità), è ribassato rispetto a quello orientale che costituisce quindi un alto strutturale in cui l'elettrostrato conduttivo profondo viene a trovarsi a circa 350 m di profondità. Un lineamento tettonico nascosto e sepolto,

orientato NW-SE (sistema tettonico della Schio-Vicenza), individuato lungo l'alto corso del Brenta (AA.VV., 1982; Antonelli et al., 1990; Selli, 1998; Pilli, 2005) che determina in zona prealpina l'esistenza di un alto strutturale nel settore orientale della regione, sembra influenzare, pertanto, la distribuzione delle acque di formazione salate, che, mobilizzate a scala regionale dalle acque dolci di infiltrazione possono contribuire in prossimità di Chioggia alla contaminazione salina dell'entroterra lagunare (Fig. 5) (Di Sipio et al., 2006).

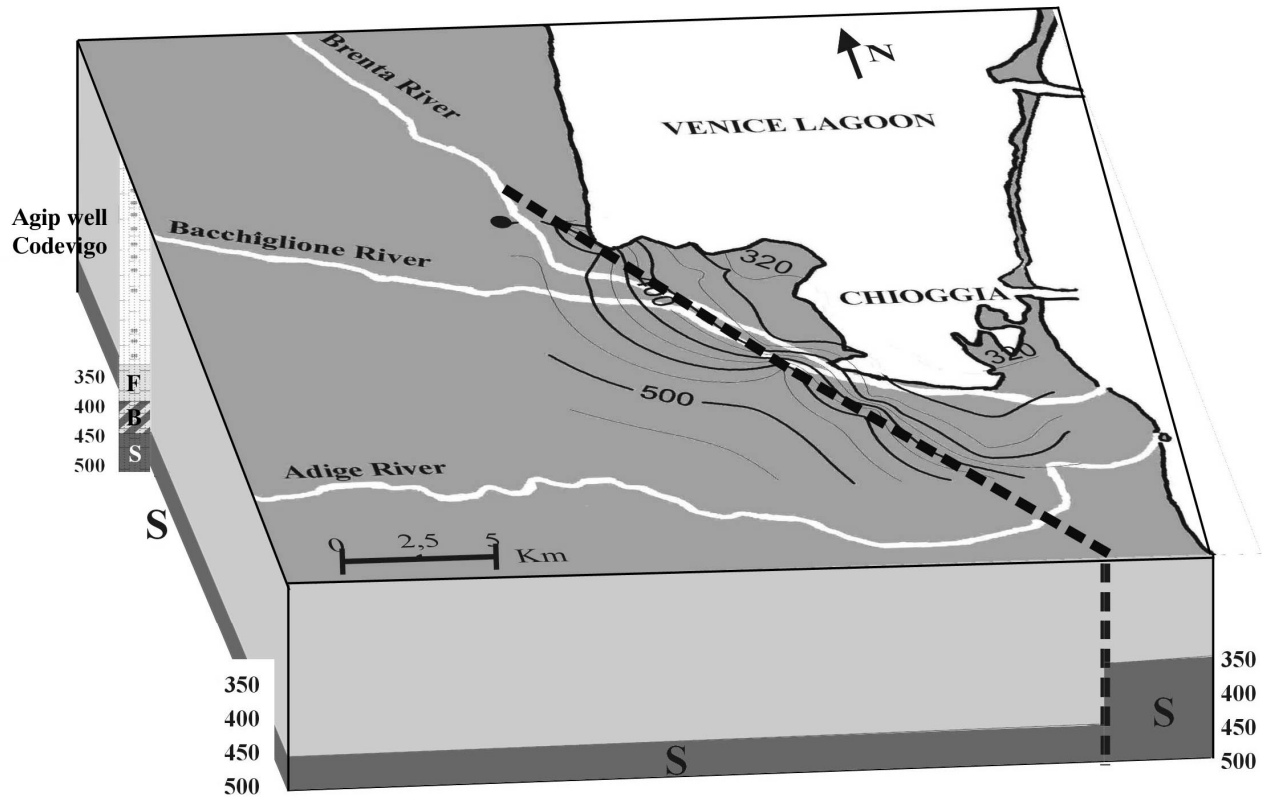


Fig. 5: Rappresentazione 3-D della profondità del top dell'elettrostrato conduttivo profondo ottenuta dall'elaborazione dei SEV con localizzazione del pozzo AGIP-Codevigo (punto nero), che mostra la presenza dell'acquifero salato profondo (F = fresh water, B = brackish water, S = salt water). Linea tratteggiata: presunto lineamento tettonico sepolto

Fig. 5: 3-D representation of the deep conductive layer top (from VES data) and AGIP well in Codevigo (black dot) highlighting the presence of the deep salt water aquifer (F = fresh water; B = brackish water; S = salt water). Black line: supposed fault direction

Le facies idrochimiche ottenute dall'analisi chimica delle acque opportunamente campionate sono essenzialmente NaCl per le acque più mineralizzate e CaCO<sub>3</sub> per le meno mineralizzate (Fig. 6). Altre facies, quali MgCl e CaCl sono secondarie. Dalla rappresentazione grafica dei dati chimici si possono distinguere acque caratterizzate da un'elevata concentrazione di HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> con valori di Na e Cl tipici delle acque dolci (nei piezometri distanti dalla linea di costa come P2); acque con contenuti di Na e Cl superiori a quelli delle acque dolci, ma con ancora un valore apprezzabile di HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (nei piezometri in

posizione intermedia tra costa ed entroterra come P18); ed infine acque con valori elevati di Na e Cl tipici dell'acqua marina, in cui l'anione HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> presenta contenuti quantitativamente minori (nei piezometri vicino alla costa e lungo il lineamento tettonico sepolto, come P6). Inoltre, per comprendere meglio i processi idrodinamici esistenti all'interno dell'acquifero, sono stati considerati alcuni traccianti ambientali come Br e Cl. Il rapporto ponderale Br/Cl (w) per alcuni campioni risulta molto simile a quello dell'acqua marina ( $2.86 \times 10^{-3}$ ), mentre in altri campioni un aumento del rapporto Br/Cl (w) suggerisce il rilascio del Br

durante l'ossidazione di materia organica all'interno dell'acquifero (Di Sipio et al., 2006); inoltre questo processo spiega la rapida riduzione di  $\text{SO}_4^{2-}$  e di  $\text{NO}_3^-$  disciolti per la contemporanea diminuzione del potenziale redox. L'ossidazione batterica dei composti del carbonio ha una funzione ausiliaria nella trasformazione di zolfo e azoto.

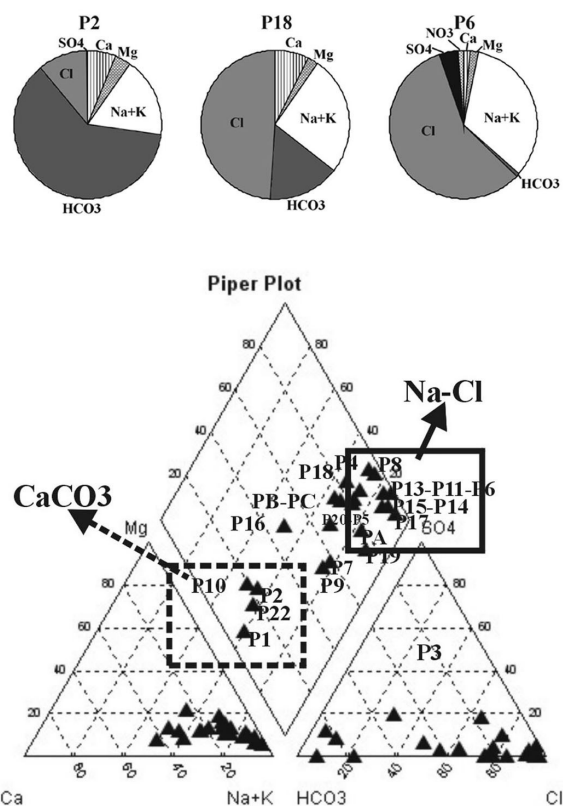


Fig. 6: Le facies idrochimiche ottenute sono essenzialmente NaCl per le acque più mineralizzate e  $\text{CaCO}_3$  per le meno mineralizzate. P1 = piezometro ad elevato tenore di  $\text{HCO}_3$ , con valori tipici delle acque dolci; P18 = piezometro con concentrazioni di Na e Cl superiori a quelle delle acque dolci con valori di  $\text{HCO}_3$  ancora apprezzabili; P6 = contenuti di Na e Cl tipici dell'acqua marina con tenori di  $\text{HCO}_3$  poco rilevanti

Fig. 6: The chemical hydrofacies obtained are essentially NaCl for the more mineralised waters and  $\text{CaCO}_3$  for the less mineralised ones. P1 = piezometer with high  $\text{HCO}_3$  content, with values typical of fresh water; P18 = piezometer with Na and Cl concentration higher than those of fresh water, with a  $\text{HCO}_3$  content still relevant; P6 = Na and Cl tenors typical of marine water with  $\text{HCO}_3$  content not relevant

Questi agiscono come un accettore di elettroni aggiuntivo quando l'ossigeno libero viene consumato. La decomposizione di materia organica è associata in primo luogo alla riduzione dello zolfo, che comporta la formazione di solfuro di idrogeno. Le velocità di riduzione dei solfati e la successiva formazione di  $\text{HS}^-$  sono controllate principalmente sia dalla qualità sia dalla quantità

di composti organici disponibili. L'insieme di questi processi caratterizza l'ambiente delle "brines" plioceniche sempre legate ai campi a gas della Pianura Padana (Brambati et al., 2003; Conti et al., 2000; Zuppi and Sacchi, 2004) (Fig. 7a). Inoltre, il confronto dei logs di conducibilità elettrica con le concentrazioni dei cationi maggiori (Na, Cl e Mg, tipici delle acque a forte contenuto salino) permette di seguire il movimento delle acque dolci e continentali verso il Mar Adriatico, confermando la complessità del processo di salinizzazione. L'entroterra veneziano, infatti, è caratterizzato da una sequenza litostratigrafia localmente molto complessa e di difficile interpretazione a scala regionale, caratterizzata da notevoli variazioni bidimensionali dei sedimenti depositati. Per comprendere al meglio la circolazione sotterranea delle acque, pertanto, è necessario considerare la litostratigrafia di dettaglio del territorio in esame, in quanto la maggiore o minore permeabilità dei sedimenti può contribuire ad un rinnovamento intenso o minimo delle acque, favorendone rispettivamente la circolazione o la stagnazione ed influenzandone anche il tenore salino (Di Sipio et al., 2005).

Le analisi isotopiche, invece, evidenziano l'esistenza di un processo di diluizione dalle acque continentali e di formazione verso le acque marine, e permettono di distinguere le diverse età ed origine delle acque campionate. In particolare, la relazione tra  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  conferma a scala regionale l'allineamento dei campioni lungo la lineetta meteorica mondiale (GWML, Craig, 1961) rivelando l'esistenza di un processo di diluizione. I grafici  $\delta^{18}\text{O}/\text{Cl}$  e  $\text{SO}_4/\text{SI}_{\text{gys}}$  (indice di saturazione del gesso) confermano l'esistenza di un processo di diluizione che coinvolge le acque dolci continentali e l'acqua marina (Fig. 7b), mentre l'acqua di formazione contenuta nel basamento Pliocenico viene diluita insieme a paleoacque e acque continentali chiaramente prive di solfati disciolti e, di conseguenza sottosature. La presenza di tre diversi gruppi di acque (di formazione, dolce e marina), appare evidente considerando le relazioni tra  $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{13}\text{C}/\text{SI}_{\text{calc}}$  (indice di saturazione della calcite). Nel grafico  $\delta^{13}\text{C}/\text{SI}_{\text{calc}}$  l'acqua dolce e l'acqua di formazione, chiaramente distinguibili, si muovono progressivamente verso i valori tipici delle acque marine, mentre, considerando il rapporto  $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ , a parte l'identificazione di tre diverse tipologie di acque (acqua di formazione, acqua dolce e acqua marina), viene confermata la presenza in acque superficiali di  $\text{CO}_2$  geogenica formatasi per ossidazione delle diverse molecole di carbonio ridotto (Fig. 6c) (Conti et al., 2002; Zuppi and Sacchi, 2004; Di Sipio et al., 2005).

## Conclusioni

L'intenso sfruttamento agricolo e turistico del territorio comporta un incremento dei prelievi di acqua dal sottosuolo, favorendo il processo di contaminazione salina degli acquiferi costieri, con conseguente declino della qualità delle acque. La presenza di tenori salini nella falda

freatica è nota a partire dal 1970, epoca a cui risalgono i primi studi specialistici nella zona, e la conoscenza delle dinamiche principali all'origine di tale fenomeno si rivela

pertanto un utile strumento per una corretta pianificazione territoriale.

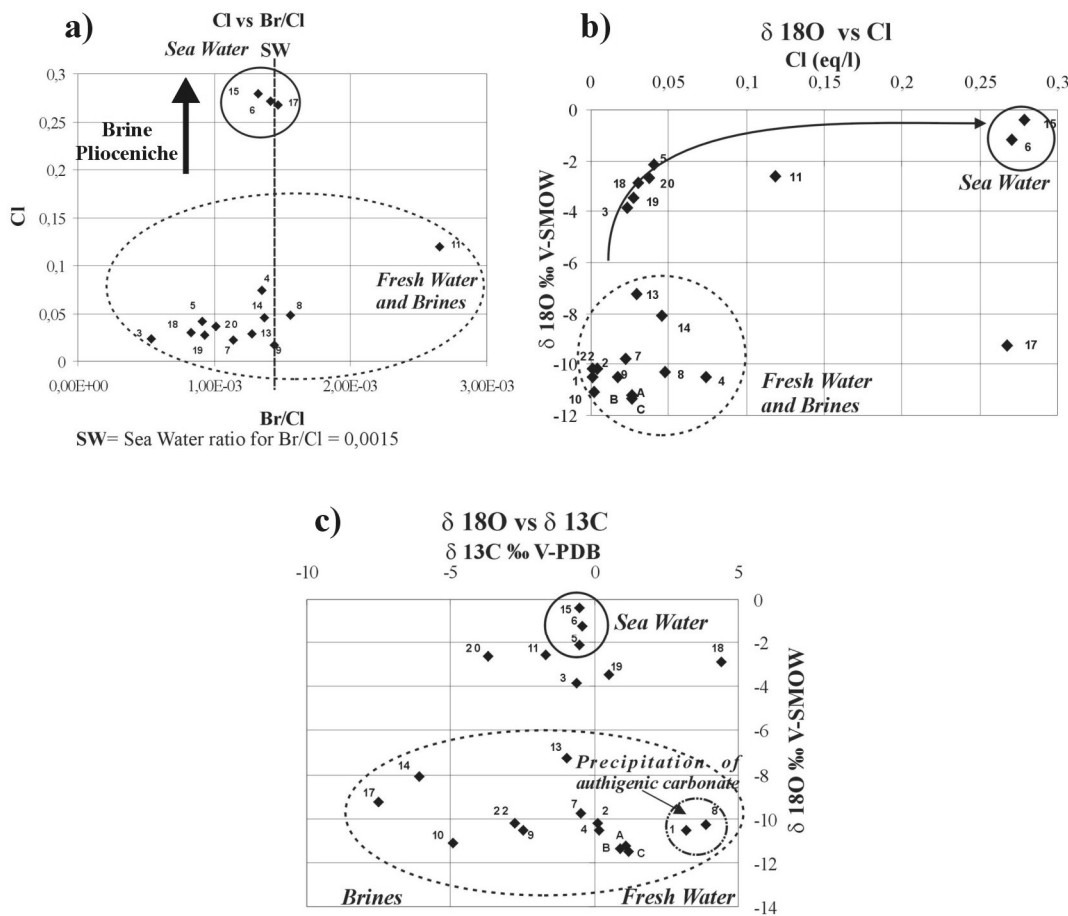


Fig. 7: a) La correlazione Cl/Br-Cl suggerisce l'esistenza di un'evoluzione chimica dalle acque dolci continentali e di formazione verso le acque marine; b) il grafico  $\delta^{18}O$ /Cl mostra la tendenza locale di mescolamento delle acque dolci continentali con le acque salmastre di origine pliocenica e le acque marine; c) il grafico  $\delta^{18}O$ /  $\delta^{13}C$  supporta l'esistenza di tre gruppi di acque: le acque di formazione Pliocenica, le acque dolci continentali e le acque di origine marina

Fig. 7: a) The Cl/Br-Cl correlation suggests the existence of a chemical evolution from continental fresh-water and formation water towards sea water; b) the  $\delta^{18}O$ /Cl graphs shows the local mixing process of fresh continental water with the Pliocene formation waters and the marine water; c) the  $\delta^{18}O$ /  $\delta^{13}C$  plot supports the existence of three different groups of water: Pliocene formation water, fresh-continental water and sea water

Lo studio multidisciplinare condotto nel settore meridionale dell'entroterra della laguna di Venezia ha evidenziato: i) l'esistenza di contaminazione salina diffusa nell'entroterra circumlagunare e costiero, imputabile all'ingressione di masse d'acqua salata dal mare e dalla laguna; ii) la presenza di settori interessati dalla mobilitazione di "brine" fossili per fenomeni di "up coming"; iii) l'evidenza del proseguimento di un lineamento tettonico che interessa l'intera pianura padana orientale.

Le analisi chimiche e isotopiche delle acque e i valori di resistività elettrica del sottosuolo ottenuti in questa ricerca contribuiscono alla comprensione dell'effettiva origine e dei

modi in cui la contaminazione si diffonde nel territorio creando un nuovo modello concettuale di flusso per l'intero settore. La distribuzione dei valori di conducibilità elettrica, invece, permette di confermare la presenza di acqua salata nell'entroterra e di verificare l'esistenza di dispersioni di acqua dolce continentale in prossimità di alvei fluviali e paleoalvei, vie preferenziali di scorrimento delle acque data la loro maggiore permeabilità. Inoltre, i sondaggi geofisici di recente acquisizione mostrano lungo la costa l'intrusione di cunei salini, provenienti da mare e laguna, all'interno degli acquiferi costieri e lagunari. Le zone in prossimità di mare e laguna sono quindi le aree soggette ad elevato

rischio di contaminazione salina, il cui limite si sviluppa parallelamente alla fascia costiera, nonostante in corrispondenza degli alvei fluviali si possano registrare, in condizioni di alta marea, dispersioni di acqua marina nel territorio circostante. La revisione dei dati geofisici storici unita alle conoscenze geostrutturali a scala regionale esistenti, invece, ha permesso di individuare in pianura il proseguimento del sistema tettonico che caratterizza le province di Padova e Vicenza, agente sui depositi Pliocenici del basamento prequaternario, situati nel settore meridionale dell'entroterra lagunare veneziano ad una profondità di circa 300-450 m, che, ospitano, come in tutta la pianura padana, acque salate di origine fossile (brines). Le analisi geochimiche e isotopiche, infatti, associate ai dati di conducibilità elettrica confermano la presenza di acque fossili negli acquiferi non confinati, permettendo di

distinguere tra acque dolci continentali, acque di formazione (brines Plioceniche) e acqua di origine marina.

L'assetto litostratigrafico così ricostruito e le evidenze geochimiche delle acque hanno permesso di definire, nel settore meridionale della laguna di Venezia due diverse cause di salinizzazione: l'ingressione del cuneo salino dal mare e dalla laguna e la mobilitazione delle acque di formazione di origine fossile caratterizzanti i livelli pliocenici. Queste salamoie diluite (fino ad un rapporto 1:100) possono raggiungere i livelli più superficiali grazie all'azione combinata dell'attività tettonica (lineamento sepolto), antropica (sfruttamento intensivo degli acquiferi superficiali), dell'acqua dolce di infiltrazione (che "pistona" queste risorse fossili) e delle condizioni litostratigrafiche del sottosuolo.

## Bibliografia

- AGIP - Attività Mineraria (1994). Acque dolci sotterranee. Inventario dei dati raccolti dall'Agip durante la ricerca di idrocarburi in Italia (dal 1971 al 1990). Roma.
- Antonelli R., Barbieri G., Dal Piaz G.V., Dal Prà A., De Zanche V., Grandesso P., Mietto P., Sedeo R., Zanferrari A., 1990. Carta Geologica del Veneto 1:250.000. Regione Veneto, Segreteria Regionale per il Territorio, Università di Padova
- AA. VV. (1982). Neotectonic Map of Italy (scale 1:500.000). CNR, Progetto finalizzato geodinamica, sottoprogetto neotettonica
- Benvenuti G., Norinelli A. and Zambrano R., 1972. Contributo alla conoscenza del sottosuolo dell'area circumlagunare veneta mediante sondaggi elettrici verticali. Bollettino di geofisica teorica ed applicata, 57 (XV), 23-38
- Brambati A., Carbognin L., Quaia T., Teatini P. and Tosi L., 2003. The Lagoon of Venice: geological setting, evolution and land subsidence. Episodes Journal of International Geoscience, 26 (3), 264-268
- Carbognin L. and Tosi L., 2003. Il progetto ISES per l'analisi dei processi di intrusione salina e subsidenza nei territori meridionali delle province di Padova e Venezia. Istituto di Scienze Marine - Consiglio Nazionale delle Ricerche (ISMAR - CNR), Venezia, Italy
- Carbognin L., Teatini P. and Tosi L., 2004. Eustasy and land subsidence in the Venice lagoon at the beginning of the new millennium. Journal of Marine Systems, 51, 345-353
- Ciavola P., Organo C., Lèon Vintrò L. and Mitchell P.I., 2002. Sedimentation processes on intertidal areas of the Lagoon of Venice: identification of exceptional floods events (acqua alta) using radionuclides. Journal of Coastal Research, 36, 139-147
- Comerlati A., Ferronato M., Gambolati G., Putti M. and Teatini P., 2004. Saving Venice by seawater. Journal of Geophysical Research, 109, 1-14. F03006, doi:10.1029/2004JF000119
- Conti A., Sacchi E., Chiarle M., Martinelli G. and Zuppi G. M., 2000. Geochemistry of the formation waters in the Po Plain (Northern Italy): an overview. Applied geochemistry 15 (1), 51-65, doi:10.1016/S0883-2927(99)00016-5
- Conti A., Stefanon A. and Zuppi G.M., 2002. Gas seeps and rock formation waters in the Northern Adriatic Sea. Continental Shelf Research, 22, 2333-2344
- Di Sipio E., Galgaro A., Zuppi G.M. and Zangheri P., 2005. Detecting the origin of salt water contamination in groundwater in a lagoon area by the combined use of geophysical and geochemical tools: the example of the southern Venice Lagoon mainland. Araguás L.; Custodio, E. and Manzano, M. (eds). Groundwater and saline intrusion. Selected papers from the 18th Salt Water Intrusion Meeting. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, Spain, Hidrogeología y Aguas Subterráneas Series, 15, 373-384
- Di Sipio E., Galgaro A., Zuppi G.M., 2006. New geophysical knowledge of groundwater systems in complex estuarine environment. Estuarine Coastal and Shelf Science, 66, 6-12, DOI information: 10.1016/j.ecss.2005.07.015
- Galgaro A., Finzi E. and Tosi L., 2000. An experiment on a sand-dune environment in Southern Venetian coast based on GPR, VES and documentary evidence. Annali di Geofisica, 43 (2), 289- 295
- Pilli A., 2005. Conceptual flow model of the plain Pre-Alps system in the area between Vicenza and Trento (northeastern Italy). Tesi di dottorato a.a. 2004-2005, relatore Prof. G.M. Zuppi, Università Ca' Foscari Venezia
- Selli L., 1998. Il lineamento della Valsugana fra Trento e Cima d'Asta: cinematica neogenica ed eredità strutturali permo-mesozoiche nel quadro evolutivo del Subalpino Orientale. Memorie della Società Geologica Italiana, 53, 503-541
- Zuppi G.M. and Sacchi E., 2004. Dynamic processes in the Venice region outlined by Environmental Isotopes, P. Krumbergel (Ed.), Isotopes in Environmental and Health Studies, 40, 35-44