

Influenza dei parametri idrogeologici sull'intrusione salina e sua caratterizzazione in un'area industriale costiera

Luca Alberti, Vincenzo Francani, Ivana La Licata, Dario Scott Rigamonti

luca.alberti@polimi.it, vincenzo.francani@polimi.it, ivana.lalicata@polimi.it, dario.rigamonti@geco-env.it

Hydrogeologic parameters influence on sea water intrusion and its characterization at a refinery site

ABSTRACT: In the National Priority List of the Italian contaminated sites (Siti di Interesse Nazionale) compiled by the Minister of the Environment, about 50% of industrial areas are located in coastal regions. In these sites, hydraulic barriers represent today the most diffuse technology of intervention, both as an emergency intervention and for the remediation of polluted groundwater. In these cases, to understand the relationship between groundwater and sea water is a fundamental requirement to comprehend the system behavior. This paper focuses on a seawater intrusion study at local scale, for a refinery site located along the sea coast. In spite of the position of the site facing the sea, quite low chloride concentrations have ever been gathered in groundwater, showing that seawater intrusion is very low. A density-dependent flow model has been implemented and calibrated using the Feflow 5.1 code in order to understand the influence of the hydrogeologic structure, of the presence of industrial activities and of the Esino river on the position of the freshwater-salt water interface. Field data have been used to calibrate the model and to control its results, in particular chemical analysis data and field conductivity measures at different depths, taken from the monitoring wells network in the upper aquifer and in the underlying confined aquifer. The study faces also the difficulties on the analysis of groundwater chloride distribution in active industrial sites and highlights that the closeness to the sea borders is not the enough condition for saltwater intrusion occurrence. On the basis of the experience made in this study, it has been possible to collect and present some suggestions about intrusion wedge characterization.

Key Terms: Salt water, Chlorides, Intrusion, Hydraulic barriers, Feflow, Characterization
Termini chiave: Acqua salata, Intrusione, Barriere idrauliche, Caratterizzazione

Riassunto

L'Italia ha circa 9000 km di costa e molti siti industriali sono situati in prossimità del mare. Quasi il 50% delle aree industriali elencate nella lista dei Siti di Interesse Nazionale (SIN) è localizzato in aree costiere. In questi siti, le barriere idrauliche rappresentano ad oggi la più diffusa tecnologia di intervento, sia per la messa in sicurezza di emergenza sia per la bonifica delle falde contaminate.

Gli enti predisposti alla gestione delle acque sotterranee ed i soggetti utenti spesso sono portati a credere che nelle zone costiere, indipendentemente dalla specifica condizione idrogeologica e dall'uso del suolo, lo sfruttamento della risorsa idrica sotterranea provochi l'intrusione delle acque salate del mare nell'entroterra. Questo può produrre scelte errate per la gestione delle acque sotterranee e non condurre allo sviluppo sostenibile e alla protezione delle stesse.

In questo studio si è voluto esaminare un caso nel quale coesistono più fonti che agiscono contemporaneamente e in varia misura nel provocare un aumento della concentrazione di cloruri in falda: le oscillazioni idrometriche di un corso d'acqua in un settore

che mostra un ben definito cono di intrusione marina, l'influenza delle perdite di una rete antincendio e delle mareggiate.

L'articolo inoltre rimarca le difficoltà che sussistono nell'analisi della distribuzione dei cloruri nelle acque di falda e mette in evidenza il fatto che la vicinanza alla costa non è condizione sufficiente affinché si verifichi il fenomeno dell'intrusione salina.

Sulla base di questo studio vengono presentati alcuni suggerimenti utili alla caratterizzazione del cono di intrusione.

In particolare, il lavoro mostra, attraverso alcune simulazioni ed un'ampia serie di dati di campo, che solo un modesto fenomeno di intrusione salina è presente nel sottosuolo dell'area indagata, a dispetto del fatto che il sito si trovi proprio in riva al mare. Nell'area di studio solo nei pressi della foce del fiume Esino è stata rilevata, e simulata mediante modellazione matematica, una distribuzione di cloruri in falda tale da ritenere essere presente un fenomeno d'intrusione salina legato alla posizione dell'interfaccia acqua dolce-salata. Questo mostra che, anche se il fiume produce una diluizione dell'acqua salata alla foce, può anche favorire il flusso di questa verso l'entroterra a causa della variazione dei

livelli piezometrici ed in funzione dell'entità del fenomeno di drenaggio. Una distribuzione di cloruri può quindi, in alcuni casi, non essere indipendente dalla precedente collegata ad un differente rapporto tra la falda ed il fiume, in funzione del livello di quest'ultimo. In questi casi, una più lunga indagine della correlazione tra i livelli del fiume e la concentrazione di cloruri può aiutare a migliorare la conoscenza del modello fisico e raggiungere quindi una migliore calibrazione.

Oltre all'effetto del fiume Esino, sono state identificate altre sorgenti "secondarie" di acqua salata che hanno un'influenza rilevante sull'acqua salmastra presente nell'acquifero non confinato: gli eventi di mareggiata e le perdite della rete antincendio che, avendo la pescante in mare, può veicolare l'acqua salata anche a distanze notevoli dalla costa.

Alla luce di tutto questo si può concludere che la gestione delle acque nei siti contaminati in prossimità del mare richiede una buona comprensione del modello concettuale e della relazione tra acqua dolce e acqua salata. Un approccio semplicistico al problema potrebbe non condurre allo sviluppo sostenibile e alla protezione dell'acquifero costiero.

Introduzione

Gli enti predisposti alla gestione delle acque sotterranee ed i soggetti utenti spesso sono portati a credere che nelle zone costiere, indipendentemente dalla specifica condizione idrogeologica e dall'uso del suolo, lo sfruttamento della risorsa idrica sotterranea provochi l'intrusione delle acque salate del mare nell'entroterra. Convinzioni errate o interpretazioni estremamente semplificate del fenomeno di intrusione salina, chiamate "idromiti" da Custodio (2005), portano di frequente le autorità pubbliche a considerare che un'anomala concentrazione di cloruri sia direttamente collegata ad un avanzamento del cono di intrusione salina determinato esclusivamente dai pozzi. Gli idromiti possono produrre scelte errate per la gestione delle acque sotterranee e non condurre allo sviluppo sostenibile e alla protezione delle stesse. Tra i più diffusi idromiti ci sono quelli secondo i quali il passaggio da acqua salata ad acqua dolce è repentino e rappresentato da una netta interfaccia, la linea di costa è l'unico contatto tra l'acqua di falda e l'acqua di mare, ed i fiumi hanno sempre un ruolo di contenimento dell'intrusione salina a causa del loro flusso di acqua dolce. Un altro idromito è quello che porta ad attribuire l'aumento della salinità solamente all'azione del mare: esistono infatti "fattori litologici (es. rocce evaporitiche presenti nel substrato), strutturali (es. risalita di acque salate nelle zone di frattura connesse con linee tettoniche) e antropici" (Nanni e Vivalda, 1986) capaci di determinare più o meno importanti incrementi dei cloruri anche nelle falde superficiali.

In questo studio si è voluto esaminare un caso nel

quale coesistono più fonti che agiscono contemporaneamente in varia misura nel provocare un aumento della concentrazione di Cl: le oscillazioni idrometriche di un corso d'acqua in un settore che mostra un ben definito cono di intrusione marina, l'influenza delle perdite di una rete antincendio e delle mareggiate.

Lo studio esamina dapprima gli effetti delle oscillazioni idrometriche del F. Esino. Pertanto, al fine di una migliore comprensione del rapporto fiume-falda-mare, si deve premettere che è da sempre noto che i corpi d'acqua superficiali e le acque sotterranee costituiscono sistemi intrinsecamente legati tra loro (Glover, 1959; Cooper, 1959; Clement et al., 1996; Simpson et al., 2003) e che le aree in prossimità di canali, fiumi, laghi e ambienti costieri rappresentano le zone di interazione e transizione di questi due sistemi. L'interazione tra acque superficiali e acque sotterranee in questi ambienti è influenzata da un grande numero di fattori che rendono complessa la descrizione del fenomeno. Sebbene non ci sia ancora una definizione concettuale per le zone di mescolamento superficiale, i termini "zona iporeica" e "interfaccia acqua superficiale/profonda" sono sempre più comuni nel linguaggio scientifico. White (1993) ha definito concettualmente la zona iporeica come l'area satura interstiziale, presente al di sotto del letto dei fiumi e compresa all'interno delle sponde, che contiene parte dell'acqua del canale o che viene interessata dai fenomeni di infiltrazione della stessa. Questa definizione può essere estesa anche ai laghi e alle zone costiere dove le acque superficiali si infiltrano nei sedimenti sottostanti ed interagiscono con quelle sotterranee. Nonostante siano stati effettuati numerosi studi sull'interazione tra acque sotterranee e corpi d'acqua superficiali (Harvey et al., 1987; Gallagher et al., 1996; Portney et al., 1998; Krabbenhoft et al., 1990, Lorah e Olsen, 1999; Winter, 2000; Tobias et al., 2001), pochi sono quelli relativi a zone prossime alla costa. In queste zone, la differenza di densità tra l'acqua dolce e quella salata induce il fenomeno di intrusione salina all'interno dell'acquifero. Recenti pubblicazioni di Bear et al. (1999) e Barlow (2003) forniscono un'eccellente sintesi di concetti e metodi per lo studio e l'analisi degli acquiferi costieri. Qui, le maree spesso inducono fluttuazione della tavola d'acqua nonché infiltrazioni delle acque superficiali all'interno dei sedimenti litoranei, formando zone di mescolamento superficiale (Ataie-Ashtiani et al., 1999; Boudreau e Jorgensen, 2001; Acworth e Dasey, 2003). Robinson et al. (1998) presentano i risultati di uno studio basato sui dati di campo relativi ad un acquifero non confinato e mostrano che esiste un forte legame tra la portata di acqua dolce di falda in uscita verso il mare e l'infiltrazione delle acque superficiali nei sedimenti soggetti all'azione di marea. Nei loro studi Simpson et al. (2003) hanno concluso che la zona fronte mare, dominata da forti gradienti idraulici, gioca un ruolo fondamentale sui processi di flusso e trasporto di soluti negli acquiferi

superficiali. Smith e Turner (2001) hanno mostrato che la differenza di densità tra le zone di sbocco della falda in mare ed il sistema delle acque dolci sotterranee sono sufficienti a provocare un moto convettivo e di mescolamento che dà origine alla diffusione dell'acqua del fiume nell'acquifero. Desiderio e Rusi (2003) dimostrano anche che in alcuni subalvei abruzzesi, caratterizzati da permeabilità medio-bassa e con presenza di più assi di drenaggio principali, l'intrusione salina risulta essere relativamente pronunciata. Infine, gli studi di Westbrook et al. (2005) mostrano che le maree rivestono un ruolo importante provocando fluttuazioni nel carico idraulico e la formazione di una zona iporeica dovuta all'infiltrazione dell'acqua salata superficiale nei sedimenti litoranei. Anche per quanto riguarda le Marche, Nanni e Vivalda (1986) rimarkano che "gli alti valori di conducibilità elettrica riscontrati in prossimità della zona costiera, sono imputabili all'intrusione marina dovuta all'eccessivo emungimento cui la falda è sottoposta..." e ancora "le acque qualitativamente peggiori sono in prossimità della fascia costiera, a causa dell'intrusione marina dovuta agli emungimenti eccessivi cui sono state sottoposte le falde di tali zone, ed in aree nelle quali si ha la risalita delle acque salate plioceniche. Generalmente comunque le acque di qualità scadente sono in relazione con l'attività antropica. [...] le falde del F.Tronto e probabilmente quelle del F. Esino, sono sfruttate al limite delle loro possibilità."

L'Italia ha circa 9000 km di costa e molti siti industriali sono situati in prossimità del mare. Quasi il 50% delle aree industriali elencate nella lista dei Siti di Interesse Nazionale (SIN) è localizzato in aree costiere. In questi casi, rimuovere gli idromiti e comprendere le relazioni che sussistono tra acqua dolce e acqua salata diventa un aspetto fondamentale per conoscere il comportamento del sistema.

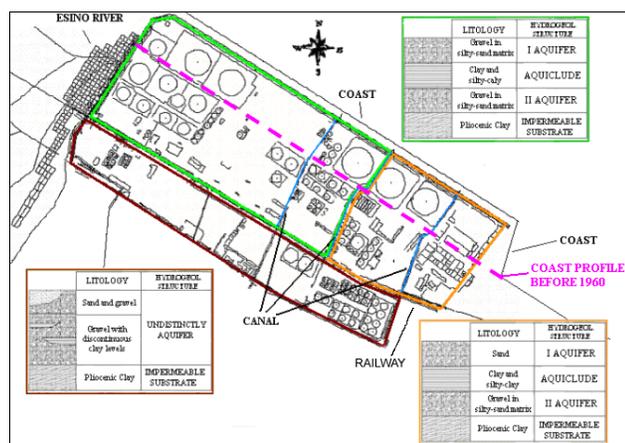


Figura 1: Struttura idrogeologica della raffineria
 Figure 1: Hydrogeological structure of the refinery

Questo articolo presenta un modello di flusso densità-dipendente riguardante un sito industriale costiero

annoverato tra i SIN, la raffineria API di Falconara M.ma, e focalizza l'attenzione sull'influenza del fiume Esino e delle sorgenti "secondarie" di salinità. Il modello di flusso densità dipendente è stato implementato e calibrato usando il codice Feflow 5.1 (Diersh, 2002) allo scopo di capire l'influenza della struttura idrogeologica, della presenza delle attività industriali e del fiume sulla posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata.

Definizione del problema

La raffineria oggetto di studio si estende per circa 1300 m lungo la costa del mare Adriatico ed è larga 600 m. Al confine Nord-Ovest il fiume Esino ha un effetto drenante sulla falda di acqua dolce. La struttura idrogeologica dell'area è costituita da un unico acquifero regionale che, nell'area della raffineria, viene diviso in due differenti acquiferi da uno strato semipermeabile argilloso-limoso denominato Livello di Separazione Idraulica (LSI). Questo livello di separazione acquista maggiore spessore e continuità procedendo da SW verso NE dove assume le caratteristiche di un vero e proprio livello impermeabile (aquiclude).

Nell'area della raffineria è possibile distinguere due differenti acquiferi: il primo risulta essere libero mentre nel secondo, più profondo, la falda è confinata per 2/3 dell'area. Il I Acquifero, nel settore S-SE, presenta una conducibilità idraulica medio-bassa (da $5 \cdot 10^{-3}$ m/s a $1 \cdot 10^{-5}$ m/s) a causa della presenza di materiale sabbioso o sabbioso-limoso. Il II Acquifero, più omogeneo, è costituito da ghiaia in matrice sabbiosa e ghiaia in matrice sabbioso-limoso con conduttività idraulica compresa tra $5 \cdot 10^{-3}$ m/s e $1 \cdot 10^{-4}$ m/s. Le Figure 1 e 2 descrivono la struttura idrogeologica del sito. Le argille Plioceniche costituiscono a scala locale il substrato impermeabile che presenta una morfologia irregolare. Questa unità idrogeologica si estende tra i 28 e i 40 m di profondità e raggiunge la profondità massima nella zona in corrispondenza del fiume. Al di sopra dello strato impermeabile, il II Acquifero presenta uno spessore compreso tra 20 m e 5 m (nell'area nella quale lo strato Pliocenico impermeabile risale). Sopra il II Acquifero si trova lo strato composto da limo e argilla (LSI). Questo livello è continuo in circa 2/3 del sito e ha una profondità compresa tra 8 e 9 m nel settore Est della raffineria mentre si approfondisce fino a 17-20 m nella zona Ovest.

Lo spessore minimo è 2 m, il massimo 12.5 m. Il LSI scompare procedendo verso il fiume e nella zona della raffineria posta a sud della linea ferroviaria dove si trovano, invece, due lenti di argilla spesse e discontinue. Questo consente la comunicazione idraulica tra i due acquiferi. Al di sopra del LSI si trova la presenza di sabbia, nella zona Est, che viene sostituita da ghiaia in matrice sabbiosa con sporadiche lenti di limo e argilla a Ovest. In superficie, queste litologie vengono sostituite da

Tabella 1: Valori di conducibilità elettrica misurati alla foce del fiume Esino

Table 1: Electrical conductivity values measured at Esino's mouth

P.ti misura	Conducibilità ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		
	profondità 0,5 m	profondità 1,0 m	profondità 1,5 m
A	813	800	900
B	808	820	-
C	49100	-	-
D	49000	48000	-
E	48800	48900	48500

Questa campionatura risulta alquanto dettagliata grazie alla fitta rete di monitoraggio esistente, ed è stata elaborata la carta delle isoaline rappresentata nella Figura 5. Si osserva come le concentrazioni dei cloruri siano elevate lungo il litorale e alla foce del F.Esino, ma vadano diminuendo allontanandosi dalle ripe del corso d'acqua e dal mare in direzione del retroterra. Il cono di intrusione marina, che risulta così ben definito, è quindi molto limitato nella sua estensione verso l'interno, molto probabilmente per l'elevata portata unitaria della falda. Nella carta si distinguono inoltre aree ben distinte e lontane dalla costa nelle quali il tenore di cloruri è elevato.

La raccolta dei dati idrochimici che hanno permesso la ricostruzione delle isoaline del cono di intrusione, il confronto con le segnalazioni degli Autori di studi sulla falda della regione posta a monte dello stabilimento, la restituzione di un profilo di concentrazione lungo il tratto terminale dell'Esino e di una cartografia della salinità della falda dello stabilimento stesso è stata importante, oltre che per comprendere la natura e la distribuzione della salinità, anche per definire la densità delle acque nei diversi punti dell'area oggetto di modellazione numerica. Sulla base di questi dati, è stato infatti possibile implementare e calibrare il modello di flusso densità-dipendente, necessario per analizzare le variazioni di salinità del cuneo di intrusione all'interno della zona industriale.

Modellazione

Per la modellazione si è impiegato un programma di calcolo particolarmente indicato per la soluzione di problemi di flusso e trasporto in condizioni densità-dipendenti. Il modello è stato implementato in Feflow ver. 5.1 (Wasy GmbH).

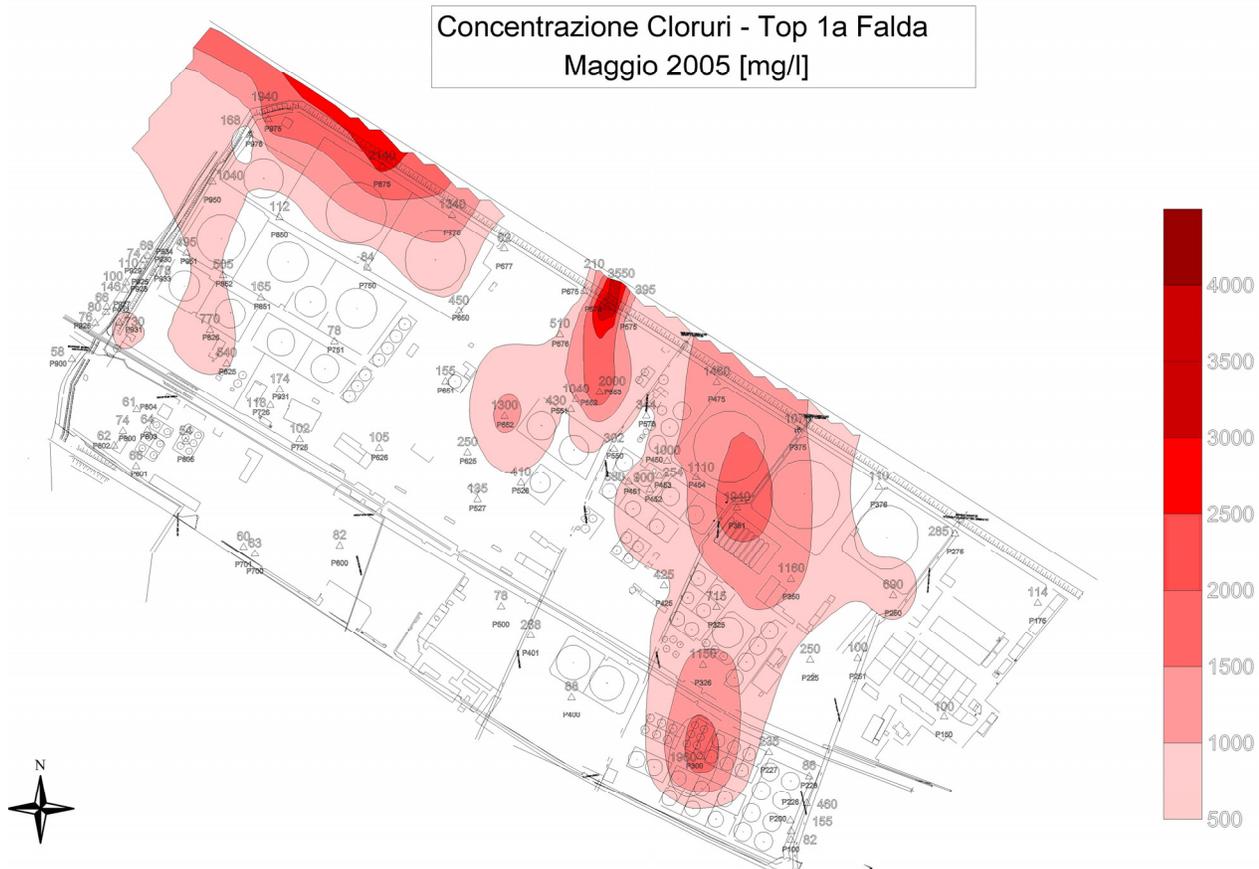


Figura 5: Distribuzione dei cloruri in falda
Figure 5: Groundwater chloride distribution

Il limite Nord-Est è stato esteso per circa 200 m oltre la linea di costa al fine di simulare il proseguimento dell'acquifero al di sotto del mare (Figure 6 e 7) perchè si suppone che il proseguimento del LSI oltre la costa possa giocare un ruolo fondamentale nella posizione del cuneo di acqua salata nel II Acquifero.

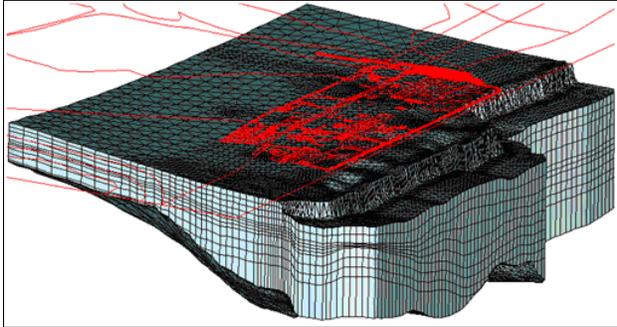


Figura 6: Griglia di discretizzazione – visualizzazione 3D
 Figure 6: Mesh - 3D visualization

La Figura 7 mostra la discretizzazione orizzontale: la *mesh* è costituita da 144060 elementi prismatici a base triangolare, con 6 nodi, e soddisfa interamente il criterio di Delaunay. La lunghezza dei lati degli elementi è circa 60 m là dove la *mesh* è poco fitta e diminuisce fino a 5 m dove l'infittimento è maggiore, in corrispondenza cioè di condizioni al contorno quali la costa, il fiume e i pozzi. Al fine di simulare l'interfaccia acqua dolce-acqua salata, è necessaria una spinta discretizzazione verticale; a questo scopo, il dominio è stato suddiviso in 13 *layers* il cui spessore è circa 2.5 m in corrispondenza della costa. Oltre la linea di costa i *layers* proseguono a profondità costante (in accordo con il basso gradiente che il fondo del mare presenta in questa zona) ad eccezione della prima e della seconda *slice* che invece subiscono un repentino approfondimento in modo da simulare la scarpata della scogliera ed il fondo del mare (Figura 6).

Le condizioni al contorno sono state assegnate come mostrato nella figura sottostante (Figura 7). Al limite Sud-Ovest del dominio di modellazione è stata applicata una condizione di carico (CH) costante con la profondità. Il potenziale idraulico assegnato è il risultato di una precedente simulazione effettuata con il codice Modflow. A Nord-Est, invece, è stato applicato un carico costante pari a 0 m sulla linea di costa e sui nodi rappresentanti il fondo del mare; la stessa condizione è stata assegnata al bordo del dominio nelle altre *slices*.

Infine, al fiume ed ai canali è stato assegnato il potenziale idraulico utilizzando la condizione di Cauchy. La calibrazione è stata raggiunta per condizioni stazionarie e la piezometria risultante rappresenta correttamente la distribuzione del carico misurato con un errore medio assoluto di 0.11 m ed una deviazione standard residua di 0.15 m (Figura 8).

Simulazione dell' intrusione salina

Il modello densità-dipendente è stato implementato a partire dalla simulazione calibrata con il solo flusso. Le condizioni al contorno riguardanti il carico idraulico non sono state cambiate ad eccezione di quelle rappresentanti il fondo del mare e la linea di costa nella prima *slice* e il limite Nord-Est del dominio in tutte le altre *slices*. Il nuovo potenziale idraulico, rappresentante il mare, è stato assegnato come carico equivalente di acqua dolce, secondo la relazione $\eta = \alpha * z$ con $\alpha = (\rho_s - \rho_f) / \rho_s$.

Infine, è stata assegnata la concentrazione di 30.000 mg/l ai nodi rappresentanti il mare; alla foce del fiume, in base ai rilevamenti di campo (Tabella 1), la concentrazione di sale impostata varia tra 250 e 30.000 mg/l. Nella prima *slice*, inoltre, è stata assegnata la condizione di *constraint*, solo però sulla prima fila di nodi a concentrazione specificata come mostrato in Figura 9.

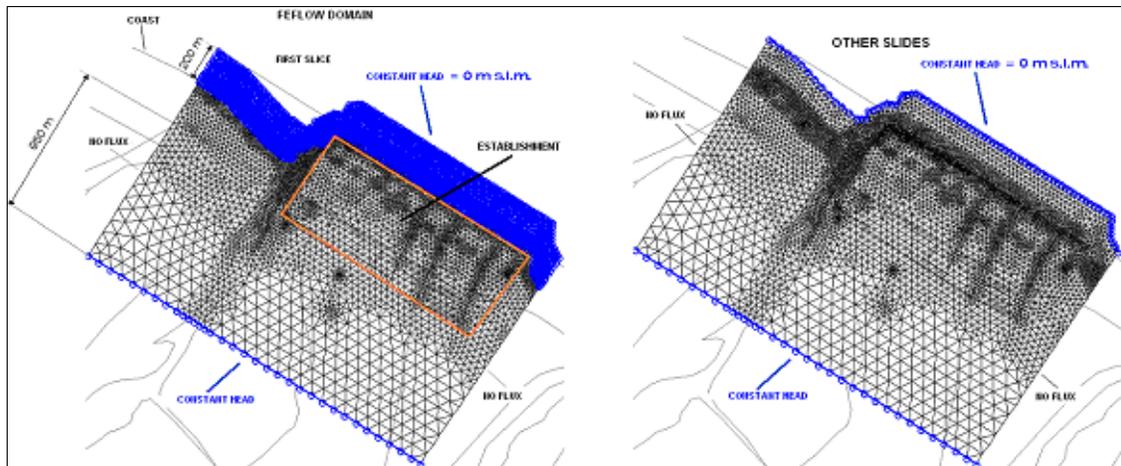


Figura 7: Dominio di modellazione e condizioni al contorno
 Figure 7: Model domain and boundary conditions

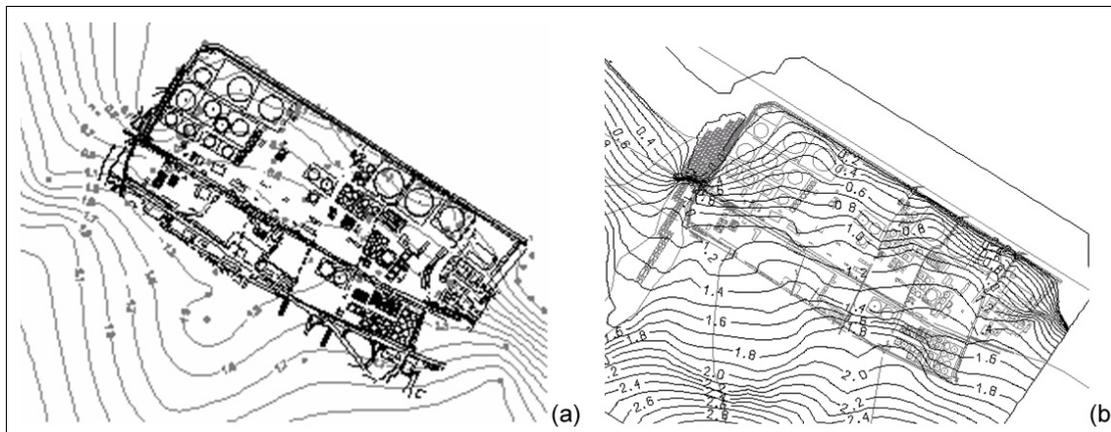


Figura 8: Piezometria reale (a) e piezometria simulata (b) nell'area della raffineria
 Figure 8: Real (a) and simulated (b) heads contours in refinery area

Ai nodi posti a monte idrogeologico del modello è stata invece assegnata una concentrazione di salinità totale costante pari 400 mg/l per tenere conto di quegli apporti salati di origine naturale a cui si è fatto riferimento in precedenza.

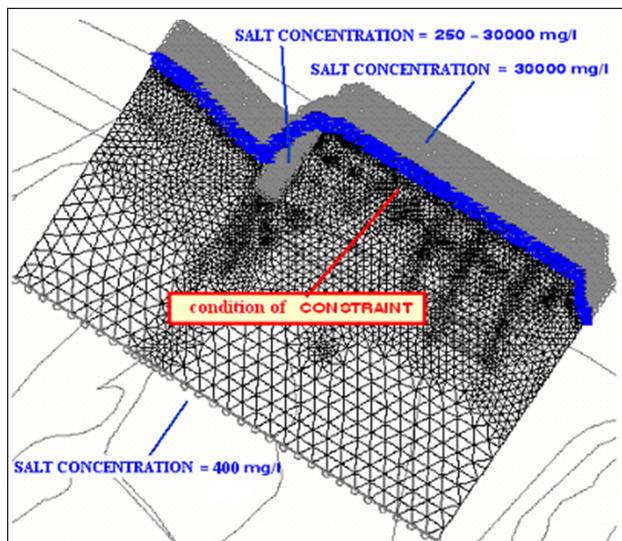


Figura 9: Condizioni di concentrazione di sale assegnate
 Figure 9: Assigned salt concentration conditions

Il primo passo dello studio è stata una simulazione di 100 anni in transitorio, allo scopo di ricreare la formazione naturale del cono di intrusione salina in assenza di perturbazioni di origine antropica. La simulazione mostra due diverse interfacce, una per ogni acquifero, che seguono l'approfondimento del layer di argilla di separazione procedendo verso il fiume. Quindi, sono state effettuate diverse simulazioni al fine di calibrare il modello sulla base della distribuzione di cloruri misurata in campo. Quello che risulta, in accordo con i dati di campo, è che l'area non è caratterizzata da

uno spiccato fenomeno di intrusione salina che è presente solo nella zona della raffineria posta in prossimità del fiume

Risultati e discussione

Il primo passo dello studio è stata una simulazione di 100 anni in transitorio, allo scopo di ricreare il cono di intrusione salina presente nell'area in assenza di stress antropici (Figura 10).

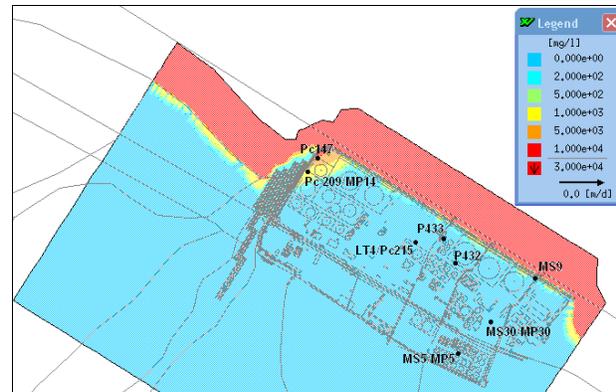


Figura 10: Distribuzione di cloruri simulate in condizioni indisturbate nella prima slice; i punti indicano la posizione di alcuni pozzi di monitoraggio
 Figure 10: Simulated chloride distribution in the first slice under undisturbed conditions; black dots indicate the position of some monitoring wells

La simulazione mostra che l'area di studio non risulta caratterizzata da uno spiccato fenomeno di intrusione salina e che si vengono a formare due diverse interfacce, una per ogni acquifero, che seguono l'approfondimento del layer di argilla di separazione procedendo verso il fiume. L'interfaccia tra acqua dolce e acqua salata si trova in corrispondenza della linea di costa e si presenta molto verticale, con un repentino passaggio da concentrazioni

tipiche dell'acqua salata a quelle proprie dell'acqua dolce. Il cono di intrusione marina, che risulta così ben definito, è quindi molto limitato nella sua estensione verso l'interno, molto probabilmente per l'elevata portata unitaria della falda. La zona di transizione risulta più spessa nell'area prossima al fiume (Figura 10), l'unica nella quale è visibile un incremento della concentrazione di cloruri all'interno dell'acquifero (max concentrazione 4.000 mg/l). Le concentrazioni di cloruri simulate risultano molto simili a quelle misurate in campo, come mostra la Figura 11. Alcuni punti però mostrano delle profonde differenze in concentrazione; alcuni di questi punti si trovano proprio in prossimità del fiume mentre altri sono posti in una zona centrale della raffineria. E' apparso quindi utile concentrare lo studio sulla comprensione del motivo di queste differenze tra le concentrazioni di cloruri simulate e quelle misurate e per fare questo sono state effettuate delle ulteriori simulazioni allo scopo di individuare i parametri verso i quali il modello risulta più sensibile.

Influenza del fiume

Le analisi sugli *output* di simulazione dimostrano che l'effetto drenante del fiume nei confronti della falda è la causa principale dell'avanzamento del cono di intrusione salina. Il fiume, comportandosi come un campo pozzi, contribuisce a diminuire la spinta che l'acqua dolce esercita su quella salata costringendo il sistema in un nuovo equilibrio. Come descritto precedentemente, solo nella zona prossima al fiume il modello simula una più larga interfaccia che contribuisce all'aumento della concentrazione di cloruri in quest'area. Questa situazione è stata riscontrata anche sui dati reali, tuttavia il modello simula concentrazioni di cloruri più elevate di quelle realmente osservate. Per questo motivo, alcune simulazioni sono state implementate allo scopo di

valutare la sensibilità del modello alla conducibilità idraulica dei sedimenti del letto del fiume ad al livello piezometrico dello stesso. Alcune prove di pompaggio, effettuate su 4 pozzi profondi 20 m e situati in prossimità del fiume, hanno fornito valori di conducibilità idraulica compresi tra $9 \cdot 10^{-3}$ m/s e $1 \cdot 10^{-3}$ m/s. La difficile interpretazione dei *pumping tests*, fortemente influenzata dagli effetti di marea sul carico idraulico, lascia inevitabilmente qualche incertezza sul valore esatto della permeabilità. A partire dal valore calibrato di $7 \cdot 10^{-3}$ m/s, risultante dal modello di flusso, la conducibilità idraulica è stata progressivamente ridotta, nelle prime 6 *slices*, in modo da ridurre l'effetto drenante funzione anche dell'alta trasmissività dell'acquifero nei pressi dell'alveo del fiume. In Figura 12 vengono confrontati i risultati ottenuti dalle simulazioni con i valori di permeabilità di $7 \cdot 10^{-3}$ m/s e $2 \cdot 10^{-3}$ m/s. Come previsto, le concentrazioni di sali risultano minori quando vengono usati valori di conducibilità più bassi, ma il modello non sembra essere particolarmente sensibile alla variazione di questa proprietà.

Nel modello calibrato il livello piezometrico usato alla foce del fiume (lunga 300 m) è pari a 0 m, corrispondente al livello medio marino. Nel secondo *step* dell'analisi di sensitività questo valore è stato incrementato fino a +0.1 m, una piccola variazione se si considera che i cambiamenti stagionali del flusso, gli effetti di marea e le mareggiate sono in grado di cambiare il livello del fiume da -0.5 m a +1 m. Eppure, sebbene la variazione di carico applicata sia modesta, i risultati mostrano una elevata sensibilità del modello densità-dipendente a questo parametro (Figura 13); la concentrazione di sali simulata subisce una forte diminuzione (circa 50%) lungo lo spessore dell'acquifero.

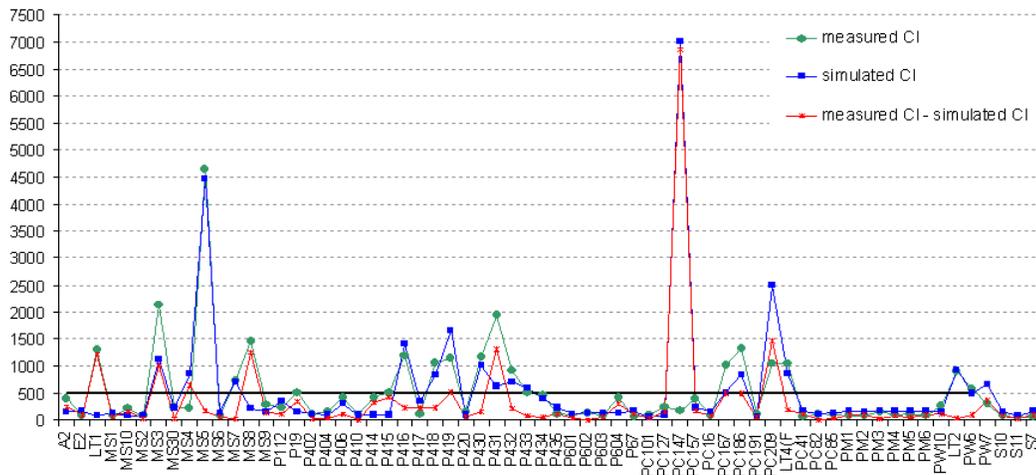


Figura 11: Confronto tra la concentrazione di cloruri calcolata dal modello e quella misurata nei pozzi di monitoraggio nell'Aprile 2005

Figure 11: Simulated vs. measured chloride concentrations in monitoring wells in April 2005

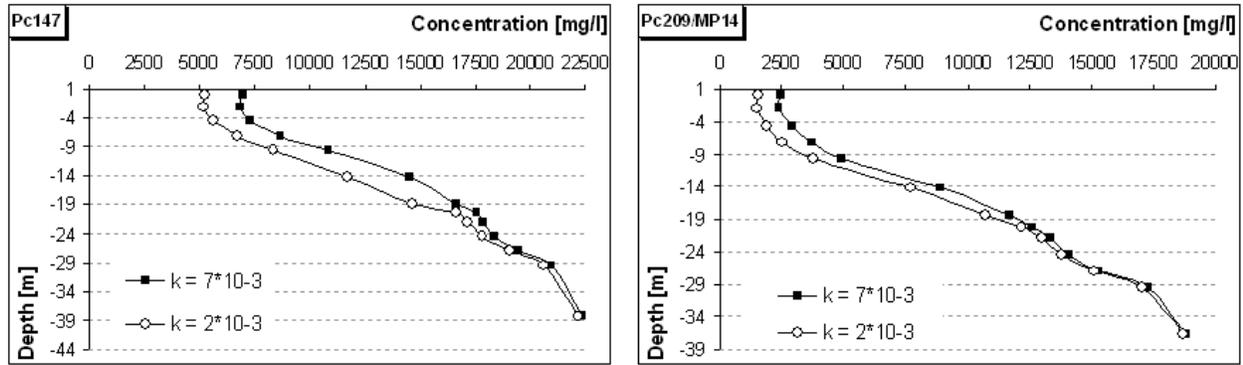


Figura 12: Confronto tra concentrazioni di sale relative ai valori di k usati in prossimità del fiume sulle prime 6 slices
 Figure 12: Comparison between salt concentrations related with different values of hydraulic conductivity in first 6 slices in the area around the river

Questo vuol dire che la distribuzione di salinità e l'interfaccia acqua dolce-acqua salata sono particolarmente sensibili alle condizioni al contorno rappresentanti il livello del fiume, le quali a loro volta dipendono dall'influenza dei tre fattori indicati sopra. Nonostante il livello del fiume utilizzato sia stato misurato ad Aprile 2005, contemporaneamente alla campagna piezometrica, questo non è stato sufficiente ad evitare le difficoltà nel raggiungimento di una buona rappresentazione della salinità da parte del modello. Si deve difatti tenere in considerazione che le concentrazioni di cloruri misurate durante una campagna di raccolta dati si riferiscono ad uno specifico giorno ed ad uno specifico rapporto di scambio idrico tra il fiume e la falda. Comprendere e ben rappresentare la tipologia di connessione idraulica è indispensabile per capire l'evoluzione delle concentrazioni di cloruri nel tempo e nello spazio. La distribuzione di salinità di un certo istante non può essere indipendente dalle precedenti potenzialmente legate a un differente rapporto tra la falda ed il fiume, in funzione del livello di quest'ultimo.

Un lungo monitoraggio riguardante le variazioni del carico piezometrico del fiume ha dimostrato che il livello è normalmente al di sotto di quello della falda, così le condizioni di drenaggio possono essere ritenute la

condizione media durante il corso dell'anno. Pertanto nel caso in esame il modo in cui è stato rappresentato il fiume consente una soddisfacente rappresentazione delle condizioni di flusso e della distribuzione della salinità, tuttavia una più approfondita indagine sulle variazioni temporali delle concentrazioni in funzione delle variazioni dei livelli del fiume consentirebbe di perfezionare la conoscenza del modello fisico e raggiungere quindi una calibrazione ancora più aderente alla realtà.

Influenza delle mareggiate

L'ampia rete di pozzi di monitoraggio e la possibilità di raccogliere dati durante alcune campagne di monitoraggio settimanali ha permesso di mettere in evidenza un'altra importante sorgente di acqua salata in grado di provocare veloci cambiamenti nella concentrazione di cloruri in falda. Infatti, è stato osservato in alcuni piezometri un incremento della conducibilità elettrica al verificarsi di eventi di mareggiata e al frangersi di onde più alte del muro della raffineria che corre lungo la costa. La conducibilità elettrica risultava più elevata nella parte più superficiale dell'acquifero e tendeva a diminuire procedendo verso il fondo dei piezometri (Figura 14).

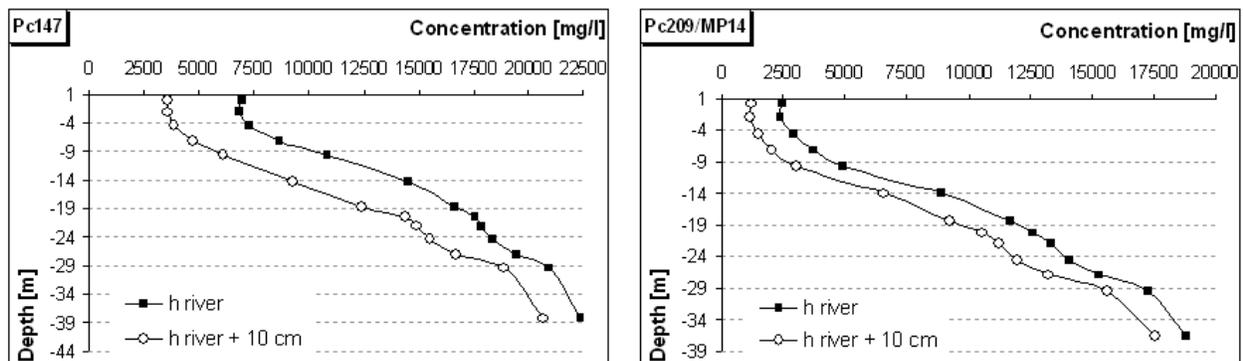


Figura 13: Confronto tra le concentrazioni di sale relative a differenti valori del livello del fiume
 Figure 13: Comparison between salt concentrations related with different water river levels

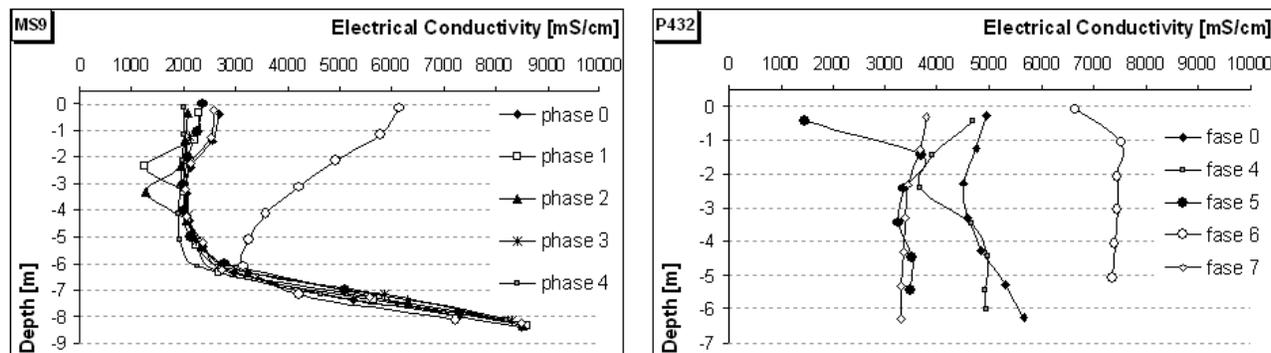


Figura 14: Dati relativi ad un monitoraggio di 40 giorni della conducibilità elettrica nei pozzi; i dati della fase 6 sono relativi a due giorni dopo un evento di mareggiata

Figure 14: 40 day electrical conductivity survey in monitoring wells; phase 6 is two days after a rough sea period

Questo effetto è causato dalla infiltrazione diretta dell'acqua salata dal suolo e da un incremento del carico idraulico del mare durante la mareggiata; risulta più marcato nei pozzi di monitoraggio posizionati nelle vicinanze della linea di costa (MS9) anche se se ne osservano evidenze fino a 100 m di distanza (P432) a causa della dispersione di acqua salata sul terreno determinata dagli spruzzi. Questo fenomeno crea veloci variazioni di concentrazione e una presenza diffusa di cloruri (500-800 mg/l) nell'acquifero freatico, due eventi che non sono legati alla portata dei pozzi industriali in pompaggio e all'avanzamento del cono di intrusione salina.

Conclusioni

L'articolo mostra, attraverso un modello di flusso densità-dipendente ed ad un'ampia serie di dati di campo, che solo un modesto fenomeno di intrusione salina è presente nel sottosuolo dell'area indagata, a dispetto del fatto che il sito si trovi proprio in riva al mare. Nell'area di studio solo nei pressi della foce del fiume Esino è stata rilevata, e simulata mediante modellazione matematica, una distribuzione di cloruri in falda tale da ritenere essere presente un fenomeno d'intrusione salina legato alla posizione dell'interfaccia acqua dolce-salata. Qui era da molti esperti atteso l'effetto opposto, ovvero l'arretramento dell'interfaccia a causa del flusso di acqua dolce del fiume stesso e la presenza di un ampio cono d'intrusione per la restante parte del sito. I corpi di acqua superficiali non possono essere considerati sempre delle barriere naturali al fenomeno di intrusione salina negli acquiferi. Infatti, anche se il fiume produce una diluizione dell'acqua salata alla foce, può anche favorire il flusso di

questa verso l'entroterra a causa della variazione dei livelli piezometrici ed in funzione dell'entità del fenomeno di drenaggio. Buoni risultati di calibrazione di modelli di flusso densità-dipendente possono essere ottenuti mediante una campagna piezometrica effettuata in concomitanza con le indagini sulla conducibilità elettrica, ma l'ottimizzazione delle simulazioni richiederebbe l'osservazione ed analisi nel tempo di serie di dati piezometrici e di conducibilità. Difatti in alcuni casi una distribuzione di cloruri può non essere indipendente dalla precedente collegata ad un differente rapporto tra la falda ed il fiume, in funzione del livello di quest'ultimo. In questi casi, una più lunga indagine della correlazione tra i livelli del fiume e la concentrazione di cloruri può aiutare a migliorare la conoscenza del modello fisico e raggiungere quindi una migliore calibrazione.

Oltre all'effetto del fiume Esino, sono state identificate altre sorgenti "secondarie" di acqua salata che hanno un'influenza rilevante sull'acqua salmastra presente nell'acquifero non confinato: gli eventi di mareggiata.

La gestione delle acque nei siti contaminati in prossimità del mare richiede quindi una buona comprensione del modello concettuale e della relazione tra acqua dolce e acqua salata.

Un approccio semplicistico al problema può non condurre allo sviluppo sostenibile e alla protezione dell'acquifero costiero.

Ringraziamenti

Si ringrazia API Raffineria di Ancona per la preziosa collaborazione al presente studio.

Bibliografia

Acworth, R.I., Dasey, G.R., 2003, Mapping of the hyporheic zone around a tidal creek using a combination of borehole logging, borehole electrical tomography and cross-creek electrical

imaging. New South Wale, Australia. *Hydrogeology Journal* 11, 368-377.

Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E., Lockington,

D.A., 1999, Tidal effects on sea water intrusion in unconfined aquifers. *Journal of Hydrology* 216, 17-31.

- Barlow, P.M., 2003, Ground water in fresh water-salt water environments of the Atlantic Coast. U.S. Geological Survey Circular, 1262.
- Bear, J., Cheng, A.H.D., Sorek, S., Quazar, D., Hervera, I., 1999, Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-Concepts, Methods and Practices. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Boudreau, B.B., Jorgensen, B.B. (Eds), 2001, The Benthic Boundary Layer: Transport Processes and Biogeochemistry. Oxford University Press, Oxford.
- Clement, T.P., Wise, W.R., Molz, F.J., Wen, M., 1996, A comparison of modelling approaches for steady-state unconfined flow. *Journal of Hydrology* 181, 189-209.
- Cooper, H.H., 1959, A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer. *Journal of Geophysical Research* 64, 461-467.
- Custodio, E., 2005, Myths about seawater intrusion in coastal aquifers: In: *Groundwater and Saline Intrusion (18 SWIM, Cartagena 2004)*. Instituto Geológico y Minero de España. Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Series 15, Madrid: 599-608.
- Desiderio, G., Rusi, S., 2003, Il fenomeno dell'intrusione marina nei subalvei della costa abruzzese. *Quaderni di geologia applicata* 10-1(2003), 17-31.
- Diersh, H.J., 2002, *Feflow: Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System: Reference manual*, Wasy, Institute for Water Resources Planning and System Research Ltd., Berlin, Germany.
- Gallagher, D.L., Dietrich, A.M., Reay, W.G., Hayes, M.C., Simmons Jr., G.M., 1996, Ground water discharge of agricultural pesticides and nutrients to estuarine surface water. *Ground Water Monitoring and Remediation* 16 (1), 118-129.
- Glover, R.E., 1959, The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer. *Journal of Geophysical Research* 64, 457-459.
- Harvey, J.W., German, P.F., Odum, W.E., 1987, Geomorphological control of subsurface hydrology in the creekbank zone of tidal marshes. *Estuarine and Coastal Shelf Science* 25, 677-691.
- Krabbenhoft, D.P., Bowser, C.L., Anderson, M.P., Valley, J.W., 1990, Estimating groundwater exchange with lakes: 1. The stable isotope mass balance method. *Water Resources Research* 26 (10), 2445-2453.
- Lorah, M.M., Olsen, L.D., 1999, Natural attenuation of chlorinated volatile organic compounds in a freshwater tidal wetland: field evidence of anaerobic biodegradation. *Water Resources Research* 35 (12), 3811-3827.
- Nanni T., Medi P., 1979 - *Idrogeologia della bassa valle del fiume Esino*. Stud. Geol. Cam., Vol. V, pp. 39-66, Camerino.
- Nanni T., Vivalda P., 1986 - *Inquadramento idrogeologico ed influenza della tettonica sugli acquiferi di subalveo delle pianure marchigiane*. Stud. Geol. Cam., Vol. Spec. "La geologia delle Marche". 73° Congr. Soc. Geol. It., 30 settembre-4 ottobre, Roma.
- 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., Vol. 35, Roma.
- Portney, J.W., Nowicki, B.L., Roman, C.T., Urish, D.W., 1998, The discharge of nitrate-contaminated groundwater from developed shoreline to marsh-fringed estuary. *Water Resources Research* 34 (11), 3095-3104.
- Robinson, M.A., Gallagher, D.L., Reay, W.G., 1998, Field observations of tidal and seasonal variations in groundwater discharge to estuarine surface waters. *Ground Water Monitoring and Remediation* 18 (1), 83-92.
- Simpson, M.J., Clement, T.P., Gallop, T.A., 2003, Laboratory and numerical investigation of flow and transport near a seepage face boundary. *Ground Water* 41 (5), 690-700.
- Smith, A.J., Turner, J.V., 2001, Density-dependent surface water-groundwater interaction and nutrient discharge in the Swan-Canning Estuary. *Hydrological Processes* 15, 2595-2616.
- Tobias, C.R., Harvey, J.W., Anderson, I.C., 2001, Quantifying groundwater discharge through fringing wetlands to estuaries: seasonal variability, methods comparison, and implications for wetland-estuary exchange. *Limnology and Oceanography* 46 (3), 604-615.
- Westbrook, S.J., Rayner, J.L., Davis, G.B., Clement, T.P., Bjerg, P.L., Fisher, S.J., 2005, Interaction between shallow groundwater, saline surface water and contaminant discharge at seasonally and tidally forced estuarine boundary. *Journal of Hydrology* 302, 255-269.
- White, D.S., 1993, Perspectives on defining and delineating hyporheic zones. *Journal of North American Benthological Society* 12 (1), 61-69.
- Winter, T.C., 2000, Interaction of Ground Water and Surface Water, *Proceeding of the Ground-Water/Surface-Water Interactions Workshop*. US Environmental Protection Agency. EPA/542/R-00/007. July 2000.