

STUDIO 3D DELL'INTRUSIONE SALINA NELLE DUNE A NORD DI RAVENNA: MONITORAGGIO E MODELLIZZAZIONE USANDO DATI LIDAR E SEAWAT

Pauline N. Mollema, Marco Antonellini,
Andrea Minchio, Giovanni Gabbianelli

I.G.R.G. (Integrated Geoscience Research Group), Università di Bologna, Ravenna

Riassunto

Nel lavoro si presenta un modello numerico 3D dell'intrusione salina di un tratto di litorale a nord-est di Marina Romea, Emilia-Romagna, Italia. Per il modello è stata utilizzata la topografia in tre dimensioni, basata su dati LIDAR, per verificare se lo sbancamento delle dune, a seguito della costruzione dei stabilimenti balneari, abbia incrementato l'intrusione salina nell'acquifero freatico. I risultati numerici sono raffrontati con i dati del monitoraggio dei livelli piezometrici e della conducibilità condotto su otto piezometri per un periodo di dodici mesi.

1 - Introduzione

Fino agli anni 1950, il cordone di dune lungo il litorale in esame era continuo, successivamente è stato interrotto per la costruzione delle armature di foce Lamone e, localmente, per la costruzione di stabilimenti balneari. Le pinete retrostanti, piantumate nella prima metà del secolo scorso come difesa dei terreni agricoli dallo 'spray' marino, oggi hanno assunto una grande valenza ambientale.

L'acquifero sottostante è però divenuto sempre più salito, creando grossi problemi alla sopravvivenza dei pini. L'interruzione delle dune (Antonellini et al., in press; Antonellini et al., 2007; Giambastiani et al., 2007), l'intrusione d'acqua salata nell'asta terminale del fiume Lamone, il drenaggio dei canali di bonifica ed il pompaggio illegale d'acqua degli stabilimenti balneari sono le principali cause della salinizzazione dell'acquifero freatico a Marina Romea e, in generale, della costa ravennate.

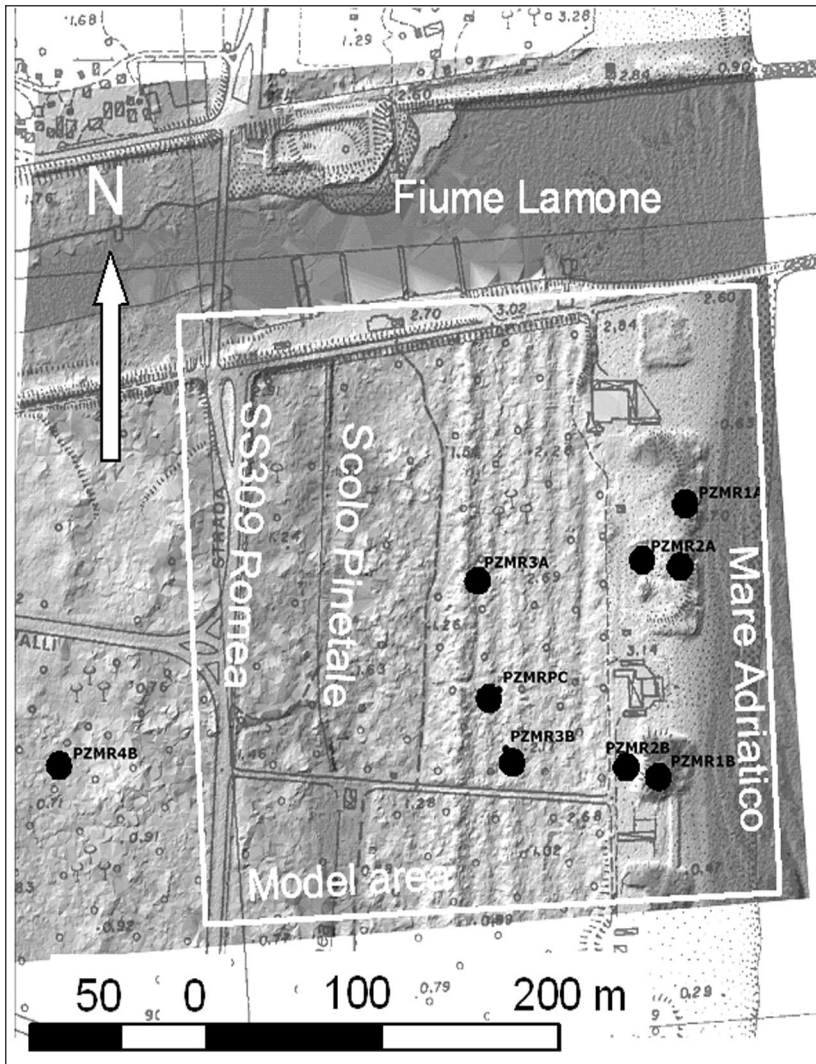


Figura 1 - Carta del territorio con DEM. (Digital Elevation Model) costruito con dati LIDAR che costituisce la base topografica del modello numerico: i piezometri sono individuati dai pallini neri; le quote più basse sono individuate dalle tonalità di verde quelle più alte di marrone. L'immagine tridimensionale mette in chiara evidenza le aree dove le dune sono state sbancate

2 - Inquadramento del territorio

A causa della forte subsidenza del territorio non esistevano altimetrie aggiornate ciò ha reso necessario l'uso dei dati di 'Laser Imaging Detection and Ranging' (LIDAR), ottenuti dagli Enti locali per definire la topografia di dettaglio. Nel lavoro è stata utilizzata una griglia di 10 per 10 m usando l'estensione HAWTH'S TOOLS dall'ESRI ArcGIS 9.0. La carta topografica ottenuta (fig. 4) mette in evidenza un primo cordone dunare con creste fino 5 m ed un secondo cordone più arretrato (140 m dalla linea di riva) continuo e con creste fino a 3 m. Ad ovest del secondo cordone si evidenzia un'area, larga 200 m circa, in cui ha sede un canale di drenaggio che segue i punti più bassi.

L'acquifero freatico dell'area è costituito da due strati sabbiosi: il più superficiale, spesso 10 m, è costituito da sabbia media ed il secondo, spesso 5 m, da sabbia fine. Questi due strati, che si fondono a circa 15 km dalla costa, sono nell'area di studio separati da depositi di pro-delta (strati d'argille-limose e sabbia-limose; fig. 4). La base dell'acquifero è situata a circa 30 m di profondità ed è costituita da argille continentali (Preti, 2002; Giambastiani et al., 2007). I valori della conduttività idraulica usati nella modellizzazione sono riportati nella figura 4.

3 - Monitoraggio

Durante circa un anno (Marzo 2007 - Marzo 2008) è stato monitorato il livello piezometrico in otto piezometri (figg. 1, 2, 3) ed i principali dati raccolti sono rappresentati nei grafici delle figure 2 e 3 assieme alle precipitazioni mensili.

Nelle dune e nell'area retrodunare, dai primi mesi dell'anno la falda cala fino a luglio, poi si rialza fino a novembre, quindi scende di nuovo. La differenza tra il livello minimo e massimo è di 30-40 cm (fig. 2a). I grafici del livello piezometrico di tutte e quattro i piezometri nelle pinete (fig. 2b) hanno lo stessa forma o tendenza: durante i mesi da maggio ad agosto la falda si abbassa lentamente di 20-25 cm e poi si rialza di nuovo con una forma simmetrica.

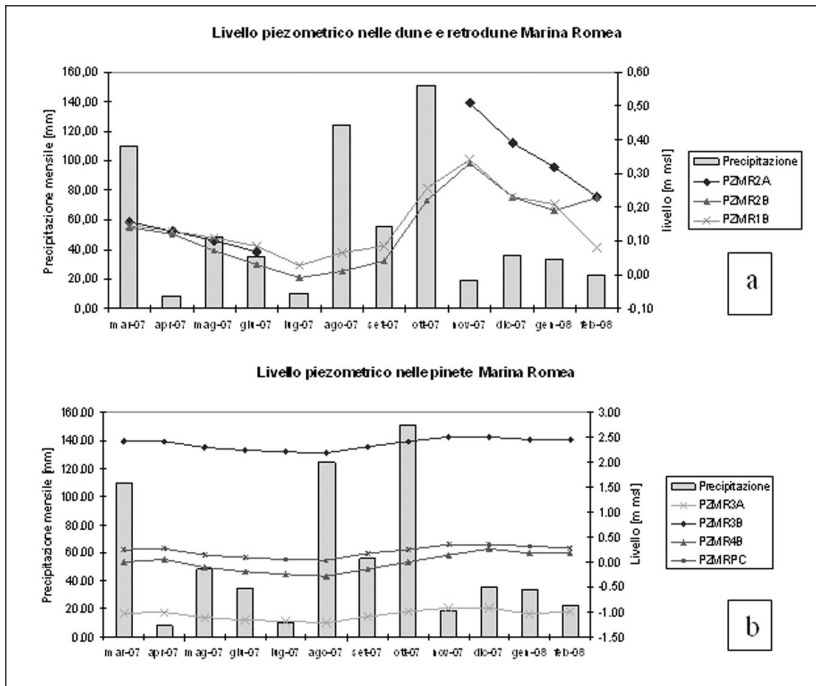


Figura 2 - Livello della falda in tre piezometri ubicati nelle dune e nell’area retrodunare (a) ed in quattro posti all’interno della pineta (b)

I valori assoluti dei piezometri sono diversi e variano molto: ad esempio quello siglato PZMR₃A ha la falda più bassa sotto il livello del mare mentre PZMR₃B presenta valori sopra 2 m.

La salinità dell’acqua in corrispondenza delle dune presenta una grande variabilità durante l’anno: minima (1,1 g/l) nel Marzo 2007 e massima (24,3 g/l) nell’Ottobre 2007 (fig. 3a). Le variazioni della salinità nel piezometro PZMR₂B sembrano seguire quelle delle precipitazioni (si abbassa dopo un mese piovoso e cresce dopo uno secco) mentre negli altri piezometri rimane sempre alta.

Nell’area di pineta la salinità misurata nei piezometri presenta la stessa tendenza (fig. 3b): da maggio ad agosto i suoi valori si alzano lentamente per poi decrescere in autunno. Diversi, invece, sono i valori assoluti registrati: il piezometro PZMR₄A presenta la salinità più bassa (valori intorno al 10g/l) ed il PZMRPC la più alta (15 g/l). I grafici evidenziano un abbassamento notevole a Novembre dopo un Ottobre piovoso.

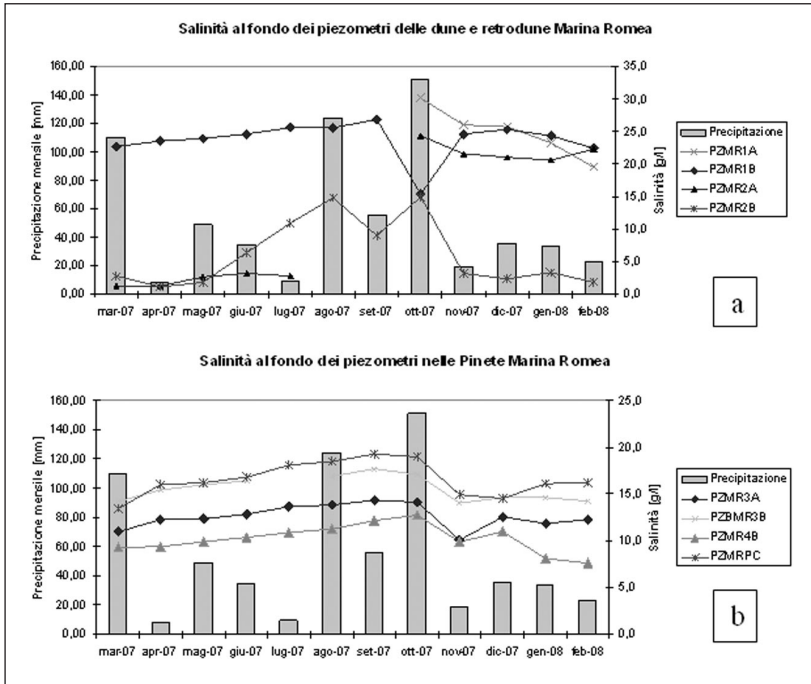


Figura 3 - Salinit  misurata nei piezometri delle dune e retro dune (a) e nella pinete (b)

4 - Modellizzazione 3D

Il modello numerico usato   SEAWAT (Guo et al., 2002), un programma per la simulazione in tre dimensioni di flusso con densit  variabile, basato su due codici (MODFLOW e MT3D) e gestito con l'interfaccia Visual Modflow (Waterloo Hydrogeologic, 2006). Il modello numerico applicato nell'area consiste di 9 strati, 52 colonne e 36 righe (fig. 4). La griglia   pi  fine ai confini col mare (ad est) ed nell'entroterra (ovest). Al modello, sul confine superiore,   applicata una condizione di ricarica che dipende dall'uso del suolo: 15 mm/anno per la pinete, basato su calcoli del bilancio idrologico (Mollema et al.; 2005; Antonellini et al., in press) e 200 mm/anno sulle dune vicino al mare (fig. 4). In alcuni modelli   stata aggiunta una condizione di contorno 'drain' (drenaggio) in direzione nord-sud, per simulare il canale scolante esistente (conduttanza 10 m²/g).

La concentrazione salina iniziale nei modelli da densit  variabile pu  avere una grande influenza sui risultati finali (Oude Essink, 2004), inoltre

poiché l'acquifero in esame era coperto dal mare (circa 320 anni fa; Giambastiani et al., 2007) esiste la possibilità siano ancora presenti acque saline connate. Per questi motivi per la concentrazione salina sono state usate due diverse condizioni iniziali: una con *una concentrazione iniziale bassa* ed uniforme di 1 g/l e l'altra con una *concentrazione iniziale alta* dove i tre strati superiori hanno una concentrazione di 1 g/l, gli strati 4, 5, 6 e 7 di 15 g/l e gli strati 8 e 9 di 30g/l.

5 - Risultati della modellizzazione

Nei modelli senza scolo, e con una *concentrazione iniziale bassa*, l'acqua salina invade soprattutto gli strati sabbiosi con alta conduttività durante i primi 13000 giorni di simulazione. L'interfaccia salina avanza in modo lineare. Dopo circa 18.000 giorni, anche i depositi di Prodelta sono stati invasi e l'interfaccia fra acqua salina e dolce ha la forma tipica di un cuneo, lasciando circa 3 m d'acqua dolce sotto le dune e circa 20 m d'acqua dolce al confine interno. Il tempo totale della simulazione è 22.000 giorni che sono circa 60 anni: il tempo che è passato dal momento in cui la distruzione delle dune è iniziata. Il modello non ha ancora raggiunto condizioni di equilibrio: la concentrazione del sale sta cambiando col tempo alla fine della simulazione. Il modello con *concentrazione iniziale alta* mostra la stessa cosa salvo che dopo solo 5000 giorni i depositi di Prodelta si riempiono con acqua salina.

Nei modelli con scolo e concentrazione iniziale bassa, l'intrusione d'acqua salina è più veloce e più profonda. A 10.000 giorni, l'acqua salina nella sabbia superiore è penetrata di 200 m, formando una lingua con la punta sotto il secondo cordone di dune e lasciando una bolla d'acqua dolce nei depositi di Prodelta. Dopo 22.000 giorni la bolla è quasi sparita e il fronte dell'acqua salina abbassa fino a formare un cuneo (fig. 5). I risultati del modello con lo scolo e *concentrazione iniziale alta* sono molto simili, salvo che gli strati con bassa conduttività idraulica (prodelta) sono invasi più velocemente.

Un'altra serie di modelli, con un'alta dispersività e conduttività idraulica isotropica in tutti gli strati, mostra come, dopo 22.000 giorni di simulazione, l'interfaccia fra acqua dolce e salata sia meno definita. L'intrusione orizzontale dell'acqua salata risulta irregolare con protrusioni che corrispondono alle interruzioni delle dune lungo la costa.

6 - Discussione e conclusioni

Tutti i modelli, con alta o bassa concentrazione salina iniziale e con o senza scolo, mostrano dopo 60 anni uno strato d'acqua dolce sotto le dune. Questo suggerisce che la topografia e la ricarica dalla pioggia attuale dovrebbero essere sufficiente per mantenere uno strato d'acqua

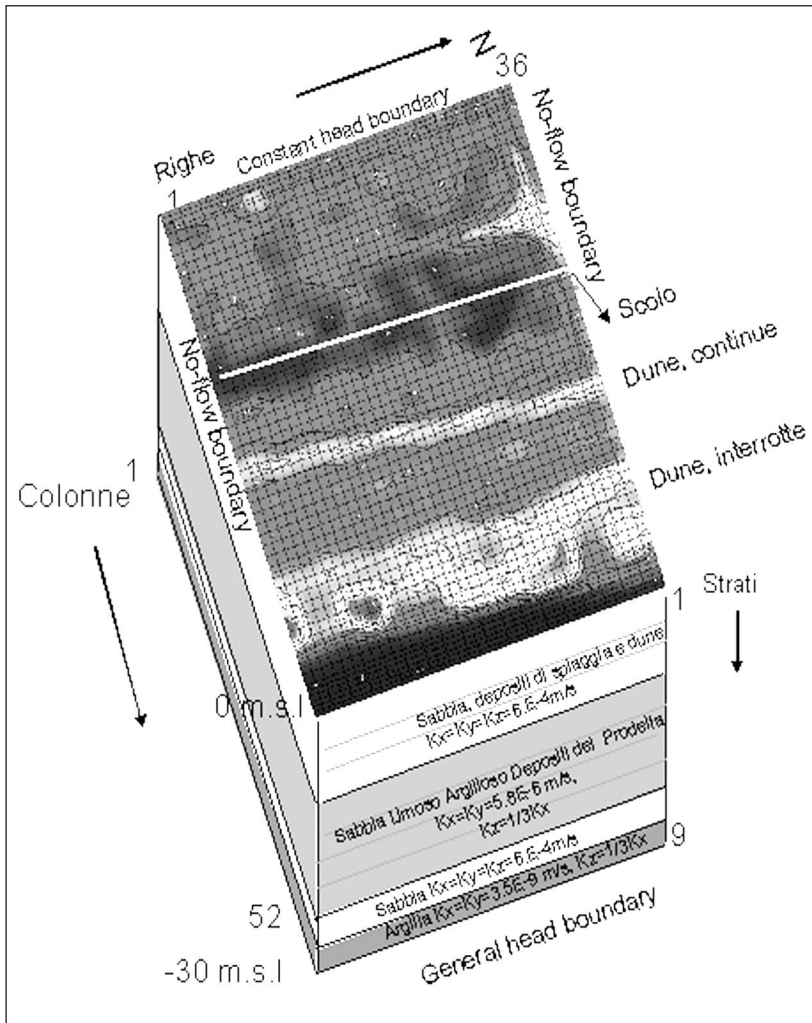


Figura 4 - Schema del modello numerico

dolce. Il secondo cordone di dune, che è molto continuo sembra di avere un ruolo importante nel fermare l'intrusione salina.

Salvo i modelli con alta dispersività, nessun altro mostra salinità alta fra i due cordoni di dune o nelle aree retrodunari. I modelli con alta dispersività evidenziano una salinità maggiore fra i due cordoni (come registrato nei piezometri ubicati nella pineta) ma non vicino al canale di scolo.

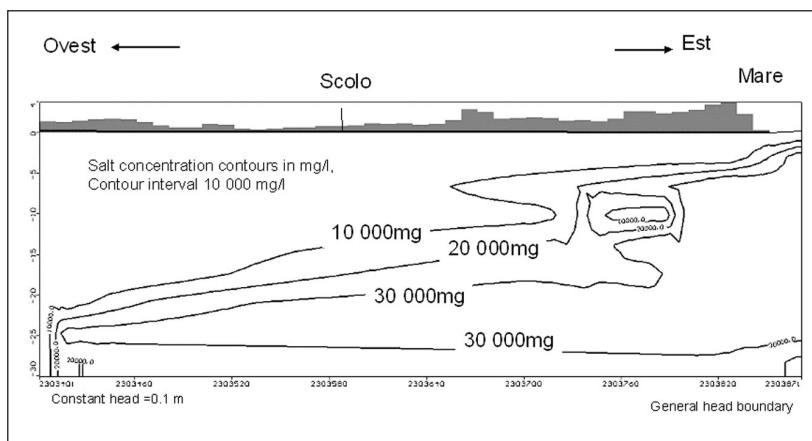


Figura 5 - I risultati del modello con una concentrazione salina iniziale bassa e la presenza dello scolo (22000 giorni di simulazione)

Ciò fa supporre che la dispersività e la conduttività idraulica verticale possono essere più alte di quanto usato nei primi modelli. Il cordone delle dune più vicino a riva può essere sotto l'influenza della marea e delle onde fino a 30 m dalla riva (Nielsen, 1990): ciò può determinare una dispersività apparente più alta. Diverse prove fatte con altri modelli mostrano che i fattori che fanno aumentare l'influenza delle dune sul regime idraulico e sull'intrusione salina sono: un'alta dispersività, un'alta conduttività idraulica verticale ed uno strato di sabbia sotto le dune più sottile.

La salinità misurata nei piezometri sia in area dunare che nella pineta è in genere molto più alta di quella prevista dai modelli. Solo in due piezometri nelle dune (fig. 2a) è stata osservata per un periodo una salinità più bassa di 1 g/l rispetto a quanto calcolato.

Premesso che il monitoraggio è stato di un solo anno mentre i modelli riflettono una simulazione di 60 anni, i dati di campagna raccolti evidenziano che la falda e la salinità sotto le dune e retrodune rispondono fortemente alle variazioni delle precipitazioni, mentre nell'area della pineta si evidenzia una tendenza annuale molto simile alla tendenza del deficit dell'acqua nel suolo (Mollema et al., 2005). Quest'ultimo dato suggerisce che l'evapotraspirazione dei pini influisca significativamente sul livello della falda e la sua salinità. Altri fattori, non inclusi in questo fase di modellizzazione possono contribuire all'intrusione salina e spiegare la differenza fra salinità osservata e calcolata: la presenza del fiume Lamone a est, delle acque salmastre delle Pialasse a est o di quelle della bonifica a sud.

Le considerazioni che emergono da questo studio sono:

- i dati LIDAR sono molti utili per stabilire la topografia indispensabile per definire il confine superiore del modello;
- un'alta concentrazione iniziale di sale influisce sui risultati solo nei primi tempi di simulazione;
- i modelli non evidenziano un'interfaccia fra acqua salina e dolce stabile dopo 60 anni di simulazione;
- per proteggere l'acqua dolce è importante proteggere i cordoni dunari.

Bibliografia

- Antonellini M., Mollema P., Giambastiani B., Banzola E., Bishop K., Caruso L., Minchio A., Pellegrini L., Sabia M., Ulazzi E., Gabbianelli G. (in press) - *Salt water intrusion in the coastal aquifer of the southern Po plain, Italy*, In press by the Hydrogeology Journal.
- Antonellini M., Mischio A., Gabbianelli G. (2007) - *L'intrusione salina negli acquiferi costieri Emiliano-Romagnoli*, In: E.M. Ferucci (Ed.) Ambiente e Territorio, Terzo Forum Nazionale: Pianificazione e tutela del territorio costiero. Questioni, metodi, esperienze a confronto, Maggioli Editore, 105-117.
- Giambastiani B.M.S., Antonellini M., Oude Essink G.H.P., Stuurman, R.J. (2007) - *Salt water intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model*. Journal of Hydrology, **340**, 94-104.
- Guo W, Langevin C. D, (2002) - *User's Guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three dimensional variable - density ground water flow: Techniques of Water-resources investigations*, Book6, Chapter A7, 1-77.
- Mollema P., Giambastiani B., Ulazzi E., Gabbianelli G. (2005) - *The influence of climate change on the water budget in the Regional Park of the Po River Delta*, In: Gabbianelli G., Sangiorgi F. (Eds), Proceedings MEDCOAST 2003, **4**, 69-80.
- Nielsen P. (1990) - *Tidal dynamics of the watertable in beaches*, Water Resources Research, **26**, No 9, 2127-2134.
- Oude Essink G.H.P. (2004) - *Modeling Three-Dimensional Density Dependant Groundwater flow at the Island of Texel, The Netherlands*, In: Cheng A.H.D., Ouazar D. (Eds), "Coastal Aquifer Management: monitoring, modeling and case studies", 77-94.
- Preti D. (2002) - *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50 000. Foglio 223 Ravenna*, a cura di A. Amorosi, Realizzato dalla Regione Emilia Romagna.
- Waterloo Hydrogeologic (2006) - *Now see Schlumberger Waterservices*, www.swstechnology.com .