

Una metodologia multivariabile per la calibrazione di alcuni parametri idrogeologici Portoscuso (Sardegna)

Authors: Pierluigi CAU & Simone MANCA

CRS4, VI Strada OVEST Z.I. Macchiareddu, C.P. 94, 09010 UTA (CA - Italy). Email: plcau@crs4.it.

Riassunto

Nella presente nota si mostra l'applicazione di una metodologia di calibrazione per la valutazione di alcuni parametri idrogeologici. La metodologia si basa su un approccio multivariabile ed è sviluppata attraverso l'integrazione del GIS con modelli numerici. I dati, implementati in un GIS, costituiscono l'input di un modello tridimensionale agli elementi finiti (CODESA 3D) per la valutazione di fenomeni di trasporto di inquinanti in falda. La metodologia permette, variando opportunamente alcuni parametri del sistema attraverso l'analisi comparata degli scenari simulati, di determinare le configurazioni che meglio riproducono il sistema reale. In particolare si considera un algoritmo di ottimizzazione, implementato in Arcview, che minimizza gli scarti tra le misure campionate e quelle simulate. L'insieme delle configurazioni in grado di riprodurre il comportamento del sistema è poi discusso in termini probabilistico-statistici. Obiettivo del presente lavoro è, oltre alla parametrizzazione del sistema fisico in studio, l'implementazione all'interno del GIS di una metodologia automatica di gestione e analisi dei dati simulati. Il sito su cui viene testata la procedura è un settore della piana di Portoscuso (Sardegna Sud Occidentale) inquinata da residui inorganici provenienti da industrie metallurgiche e chimiche.

Abstract

An extensive quality assessment of the data has been carried out to characterize the area overlying the aquifer system of Portoscuso (Southern Sardinia). In this context we set up a geographical information system and applied an environmental model to study contaminant migration. A critical point of our study is the data crossing between the measured data and the simulated ones. In this context a methodology for testing the accuracy of the model and to calibrate hydro-geological parameters has been implemented in the GIS.

Introduzione

L'attenzione dell'opinione pubblica in relazione al tema del trattamento e smaltimento dei rifiuti si è rivolta, fino ad un recente passato, principalmente verso i Rifiuti Solidi Urbani, le cui problematiche interessano direttamente la popolazione. La stessa normativa storicamente ha rivolto maggiormente la sua attenzione su tale tipologia di rifiuti, mediante diverse disposizioni in termini di raccolta differenziata e trattamenti di inertizzazione, ponendo in subordine le altre categorie di rifiuti quali gli Speciali, non assimilabili agli urbani, e soprattutto i Tossico-nocivi. La situazione italiana è allarmante, se si tiene conto del fatto che nel periodo 01/01/93 - 31/12/96 durante i controlli effettuati su 4573 discariche pubbliche e private sono state accertate 4912 infrazioni mentre 1324 discariche sono risultate prive di autorizzazione (Ministro dell'Ambiente: Relazione sullo stato dell'ambiente del 1997). Anche nell'area di Portoscuso lo smaltimento dei rifiuti provenienti dall'area industriale è avvenuto in maniera non coordinata, ricorrendo talvolta a soluzioni non ottimali, con il conseguente impoverimento dello stato di qualità del territorio e della falda idrica sottostante.

Nel presente studio viene applicato un modello numerico di simulazione agli elementi finiti per studiare fenomeni di trasporto di inquinanti inorganici inerti nel sottosuolo e, al fine di comprendere con maggior chiarezza le dinamiche del fenomeno e l'incertezza legata all'applicazione del modello idrologico, è stata implementata nel GIS una procedura automatica di analisi incrociata tra i dati misurati e i dati simulati (data-crossing). L'obiettivo è, oltre allo studio sistematico del territorio, l'individuazione dei punti possibili d'immissione dell'inquinante, il relativo tempo di permanenza e la quantificazione dell'attendibilità del modello.

Descrizione dell'area in studio e temi d'interesse

Lo studio interessa l'area su cui si sviluppa il polo industriale di Portovesme, nel Sulcis-Iglesiente, Sardegna Sud-Occidentale (figura 1). La produzione di rifiuti tossico-nocivi in Sardegna supera le centinaia di migliaia di tonnellate/anno, di queste più della metà deriva proprio dall'area industriale di Portovesme. L'agglomerato si estende su circa 350 ettari e comprende importanti insediamenti industriali per la produzione di allumina, alluminio (tramite elettrolisi dell'allumina), laminati di alluminio, piombo, zinco, cadmio, mercurio, argento, oro e ossidi di magnesio.

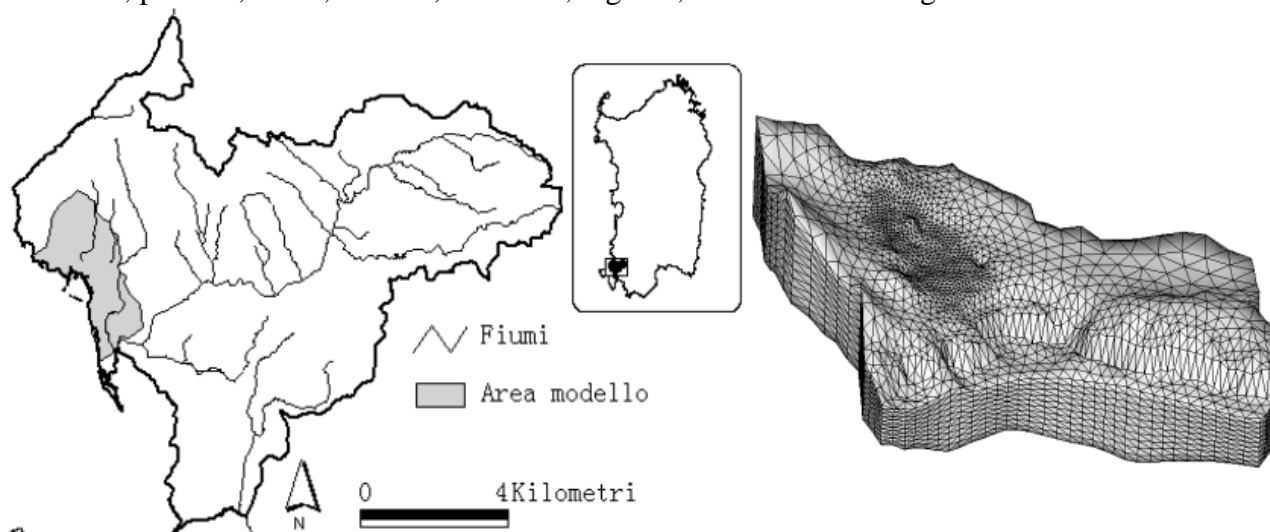


Figura 1 . Localizzazione dell'area in studio e ricostruzione 3D del dominio di calcolo.

Per quanto riguarda lo smaltimento dei rifiuti, le diverse industrie hanno operato in modo non coordinato, individuando ciascuna proprie soluzioni, ricorrendo comunque a discariche nelle quali è

sempre più difficile individuare aree di stoccaggio adeguate. Il 30 Novembre 1990, con una delibera della Presidenza del Consiglio dei Ministri, l'area investigata è stata dichiarata "ad elevato rischio di crisi ambientale". La delibera è ampiamente giustificata se si tiene conto dei volumi di rifiuti in gioco, del loro grado di pericolosità e soprattutto della mancanza di una tecnologia definitiva di trattamento, considerando che lo stoccaggio in discarica del rifiuto tal quale costituisce la pratica comune. Nella piana sono presenti tre sistemi acquiferi differenti. Il primo acquifero (freatico) e il secondo, detti entrambi superficiali, sono impostati sui sedimenti sabbiosi di potenza variabile e separati da uno strato di argilla, di potenza limitata, posto ad una profondità media di 15 metri rispetto al piano di campagna (Barbieri, Ghiglieri, 1998). Le analisi delle superfici piezometriche misurate evidenziano che il flusso di falda di entrambi questi acquiferi è mediamente in direzione Nord-Est Sud-Ovest e solo localmente, a causa degli emungimenti, si evidenziano coni di richiamo che comunque non si richiudono mai al di sotto del livello medio del mare. La base del secondo acquifero è costituita da vulcaniti, che si trovano ad una profondità progressivamente crescente in direzione N-NW S-SE. L'acquifero profondo è impostato nelle fratture della formazione ignimbratica ad una profondità variabile da 110 a 170 m dal piano di campagna ed è caratterizzato da un grado di artesianesimo variabile (Barbieri, Ghiglieri, 1994). I primi due sistemi acquiferi sono interessati da un forte inquinamento e per le evidenti interconnessioni idrauliche, nelle applicazioni modellistiche sono stati trattati come un unico sistema multistrato (Cau, Gallo, 2002). Analisi effettuate dal Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Università di Cagliari, nel periodo 1989 - 1999 hanno evidenziato livelli di inquinamento preoccupanti anche in considerazione dei limiti di legge imposti dal Dlgs 152/99. Sono state rilevate, ad esempio, concentrazioni di piombo nell'acqua di falda 94 volte maggiori del limite massimo di 10 µg/l imposto dalla normativa italiana.

Pozzo id	Hg [µ g/L]	As [µ g/L]	Cd [µ g/L]	Pb [µ g/L]	Mn [µ g/L]	Zn [µ g/L]	Cond. [µS/cm]	pH
Pz 9	0,40	1,50	0,70	15,40	86,30	129,66	8300	12,1
Pz 20	2,20	6,40	7,00	158,00	58,20	13990,00	5050	7,4
Pz 22	0,60	1,40	6,10	60,00	455,80	46380,00	2200	7
Pz 23	10,20	2,50	19,10	940,90	173,40	13800,00	1900	7,1
Pz 28	3,00	33,40	2,6	24,80	115,50	1214,50	2500	8,4
Pz 33	6,00	64,20	83,96	510,50	1095,60	18230,00	4000	9,1
P 324	1,90	1,56	0,63	6,32	95,91	187,00	/	/

Figura 2. Concentrazioni di metalli pesanti in alcuni pozzi di controllo [1999]

II CODESA 3D

Il CODESA-3D è un modello accoppiato di flusso di acque sotterranee a densità variabile e di trasporto di inquinanti inerti sia nei suoli insaturi che negli acquiferi (Lecca, 2000). Si basa su una discretizzazione agli elementi finiti tetraedrici e consente l'attribuzione dei parametri idrogeologici del dominio tridimensionale con variazioni degli stessi nello spazio e nel tempo. Il modello matematico è descritto dalle seguenti equazioni di bilancio di acqua [1] e soluto [2]:

$$\sigma \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \nabla \cdot v - \phi \cdot S_w \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\rho}{\rho_0} \quad [1] \quad \phi \frac{\partial (S_w c)}{\partial t} = -\nabla \cdot (c v) + \nabla \cdot (D \nabla c) + q c^* + f \quad [2]$$

dove il carico totale $h = \psi + z$, e $\psi = p / (\rho_0 g)$ è il carico di acqua dolce, p è la pressione, ρ_0 è la densità dell'acqua dolce, g è l'accelerazione di gravità, e z è la coordinata verticale diretta verso l'alto. La densità della soluzione è $\rho = \rho_0 (1 + \varepsilon \cdot c)$, con c [l] la concentrazione relativa del soluto, normalizzata rispetto ad un valore soglia di concentrazione per litro d'acqua [g/l], e

$\varepsilon = (\rho_s - \rho_0) / \rho_0 \ll 1$. La velocità di Darcy è data da $\vec{v} = -K[\nabla \Psi + (1 + \varepsilon \cdot c)\nabla z]$ e $K = K_s(1 + \varepsilon \cdot c)k_r$. Sono state eseguite due serie di simulazioni: la ricostruzione della superficie piezometrica in condizioni indisturbate in regime stazionario (steady state) e, a partire da questa, un transitorio di 10 anni per la ricostruzione della concentrazione dell'inquinante nel sistema acquifero multistrato. Per la calibrazione del modello di flusso si sono utilizzate conducibilità idrauliche K isotrope dell'acquifero freatico (I acquifero) pari a 1×10^{-3} m/s mentre per il II acquifero sono stati adottati valori di un ordine di grandezza inferiore. Si è tenuto conto inoltre della presenza di uno strato di confinamento argilloso a caratteristiche isotrope ($K = 1 \times 10^{-8}$ m/s) posto ad una profondità media di 10 m. La porosità n e il coefficiente di immagazzinamento elastico S sono stati assunti rispettivamente pari a 0.3 e 1×10^{-5} 1/m. Dal bilancio idrologico del bacino idrografico è stata stimata la ricarica verticale omogenea pari a 110 mm/anno. La seconda serie di simulazioni individua la posizione della pozza d'immissione dell'inquinante e il relativo tempo di permanenza. I diversi run del modello sono stati eseguiti facendo variare la posizione di immissione dell'inquinante, al fine di coprire tutte le possibili configurazioni del sistema (2238 configurazioni possibili). Il tempo totale di cpu per simulazione è variabile da 6 minuti a più di 3 ore; ciò significa che, utilizzando un pc totalmente dedicato, occorrono più di 20 giorni. Al fine di ridurre sensibilmente i tempi è stata utilizzata una macchina parallela, IBM RS/6000 SP a 16 processori POWERPC_Power3, 16 GB di memoria condivisa, tramite la quale, con un sistema di code (*first in first out*) e la possibilità processare più simulazioni in contemporanea (teoricamente fino a sedici), le 2238 simulazioni sono state processate in 2 giorni. Il data base delle simulazioni ha richiesto uno spazio disco di circa 12 Giga byte di memoria. In figura 3 si mostra l'evoluzione temporale del *plume* dell'inquinante simulato con pozza di immissione situata internamente ad un'area industriale potenzialmente pericolosa.

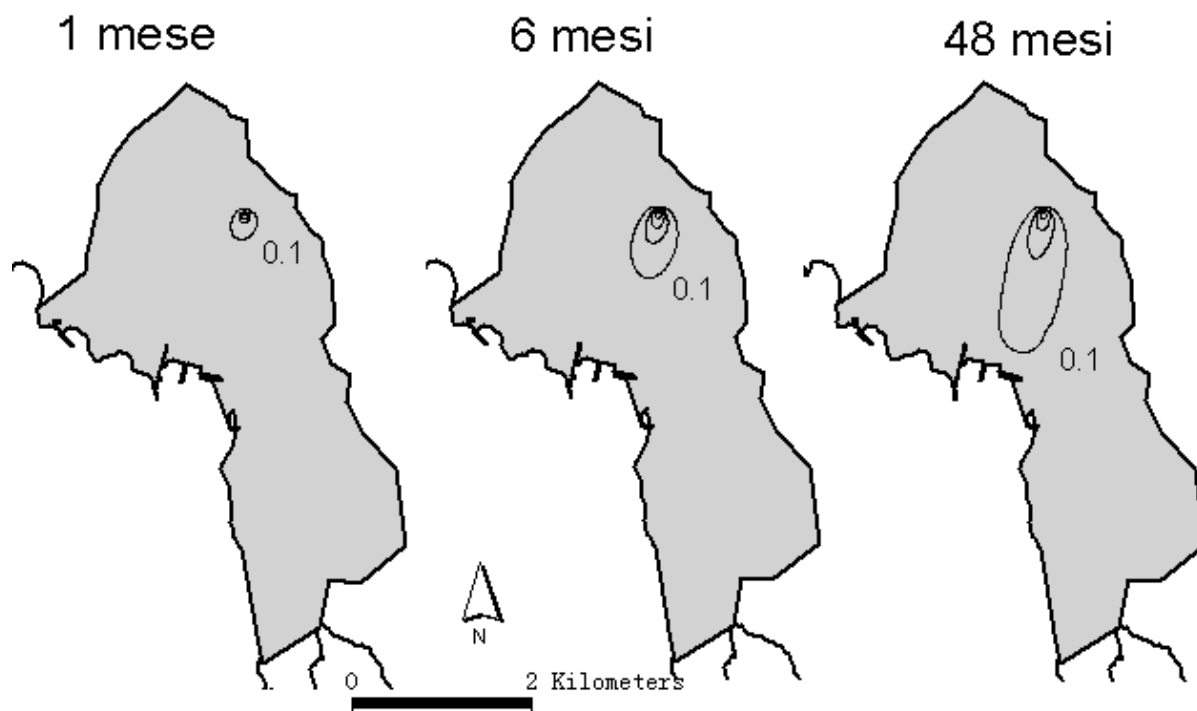


Figura 3. Andamento temporale delle concentrazione simulata dopo 1, 6 e 48 mesi con immissione dell'inquinante nell'elemento 251.

La procedura *^Data crossing~*.

Gli output del codice CODESA, come quelli di altri codici numerici, sono dei file di testo che contengono listati di numeri, soluzioni numeriche del problema fisico implementato. Le soluzioni sono gli $n * m$ (n = numero di nodi della mesh 2D, m = numero di strati della mesh 3D) valori delle pressioni e delle concentrazioni associati ad ogni nodo della mesh 3D, per più *timestep*. Anche se l'ausilio della visualizzazione, 2D o 3D, è indispensabile per l'analisi qualitativa dei risultati, essa risulta deficitaria allorché le simulazioni da comparare sono tante e soprattutto quando si vuole rappresentare numericamente le differenze tra diversi scenari simulati. Sovente, inoltre, si rende necessario eseguire analisi spaziali sui risultati delle simulazioni e sovrapporre gli scenari di possibile degrado della risorsa ad altre informazioni territoriali al fine di inquadrare il problema ambientale in maniera organica ed avere una misura-quantificazione dei possibili danni.

Il lavoro è stato organizzato affinché i risultati delle simulazioni potessero essere rappresentati in maniera adeguata all'interno del GIS. È stata creata un'estensione di Arcview in grado di gestire in automatico le simulazioni del modello CODESA 3D, tuttavia la metodologia può essere estesa ad un qualsiasi modello che si appoggia a *grid* o *mesh*. In ArcView è stato creato un ambiente idoneo alla visualizzazione dei risultati del modello e capace di relazionare i dati acquisiti nelle misurazioni di campagna a quelli simulati, fornendo in automatico le statistiche più rappresentative. Tramite algoritmi di ottimizzazione sono inoltre ricercati gli scenari che meglio approssimano il set di misure a disposizione e gli n migliori (n è scelto dall'utente) sono poi inseriti in automatico in un progetto Arcview. La procedura di calibrazione consiste nel far variare un parametro di input con legge prefissata e confrontare i valori simulati con le misure campionate nei pozzi. Viene creata la tabella *^result~* che contiene, nei punti di controllo (pozzi campionati), l'errore commesso nella simulazione del *plume* d'inquinante ai diversi *timestep*. A partire dal *^result~* è creata la tabella *^statistica Γ*, nella quale sono memorizzati per ogni simulazione la media delle differenze e lo scarto quadratico medio, tra il campione delle concentrazioni misurate e quelle simulate ai diversi *timestep*. La configurazione, che è in grado di riprodurre meglio il sistema, è quella che produce la differenza minima tra il *plume* d'inquinante simulato e quello misurato (valore minimo della norma euclidea degli scarti).

Risultati

Nel tematismo *^mesh~* (*layer* di poligoni creato a partire dalla *mesh* bidimensionale), l'errore misurato dal parametro di riferimento varianza ad ogni *timestep* per ogni simulazione è associato all'elemento d'immissione dell'inquinante. La varianza, funzione dello spazio e del tempo, $Var = f(X,Y,t)$, possiede un minimo e un massimo assoluto e più minimi e massimi relativi.

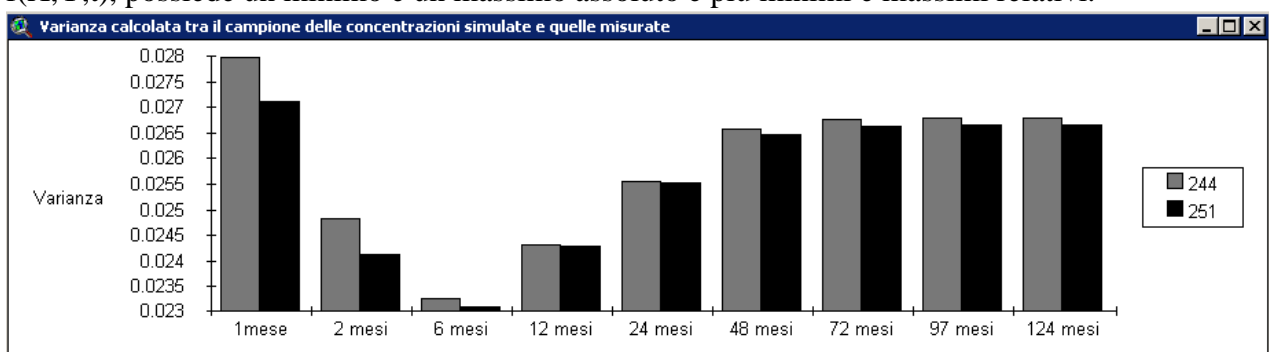


Figura 5. Andamento temporale della varianza delle migliori 2 simulazioni aventi come aree di immissione gli elementi 244 e 251.

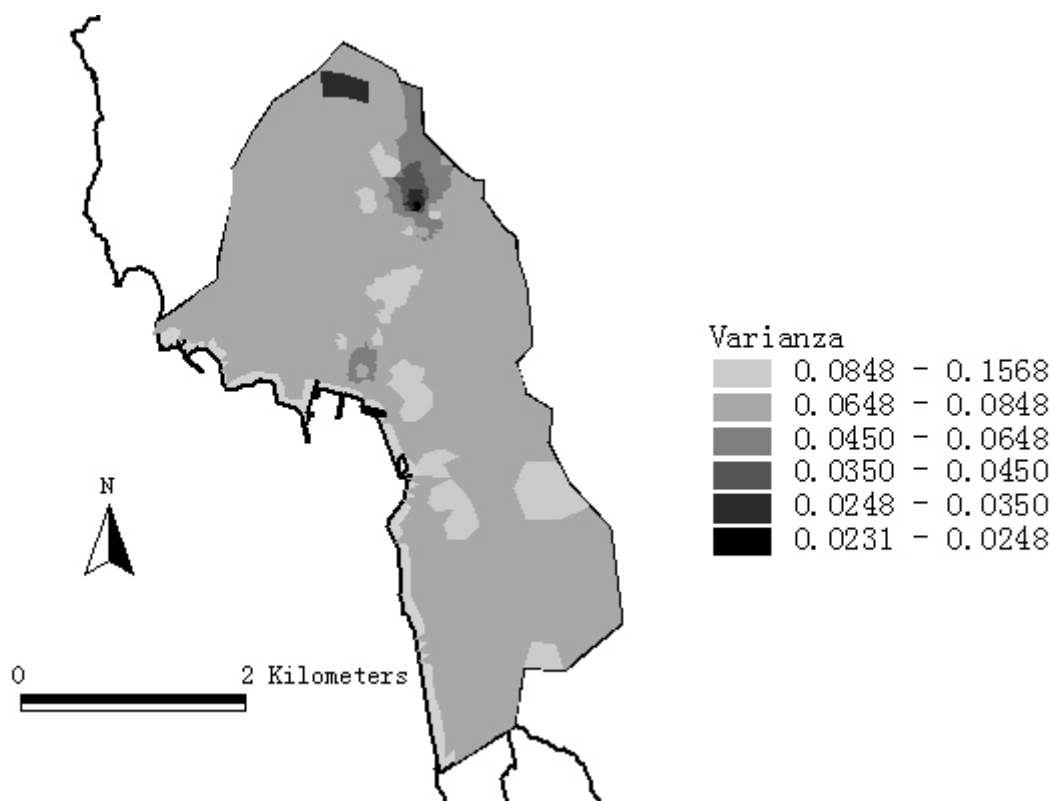


Figura 6. Le zone più scure individuano le aree dove con maggior probabilità si ha avuto lo sversamento dell'inquinante (varianza minima), viceversa le zone più chiare individuano le aree meno probabili.

Le zone di minimo (varianza più piccola) individuano le aree di immissione al relativo *timestep* che, nella configurazione del modello di flusso e trasporto, producono il *plume* che si discosta meno da quello misurato. Viceversa le zone con varianza più grande sono quelle che hanno minore probabilità di essere le aree di immissione dell'inquinante. I risultati più importanti sono evidenziati nelle figure 5 e 6, che mostrano rispettivamente l'andamento temporale della varianza per le prime due migliori simulazioni e la mappa della probabilità associata allo sversamento dell'inquinante in ogni punto del dominio di calcolo. Il tempo di permanenza della pozza di inquinamento più probabile è di sei mesi. L'area di sversamento, individuata in maniera univoca, situata internamente ad un'area industriale che produce prodotti potenzialmente pericolosi, evidenzia la validità della procedura implementata. Il fenomeno di dispersione e diffusione dell'inquinante diventa stazionario dopo un periodo di tempo dell'ordine dei 72 mesi, quindi la concentrazione è funzione solo del punto ma non del tempo (particolarità emersa dall'analisi delle simulazioni).

Conclusioni

Particolarmente interessante si è rivelata la possibilità d'integrare, mediante tecnologie GIS, le misure campionate con i risultati di un modello numerico tridimensionale per la simulazione di fenomeni d'idroveicolazione d'inquinanti in falda. La metodologia implementata è risultata efficace nell'individuazione dell'area sede dello sversamento dell'inquinante e il relativo tempo di sversamento. La possibilità di prevedere l'andamento spazio temporale del plume dell'inquinante idroveicolato dalla falda idrica consente di individuare le aree a maggiore rischio di inquinamento e la possibilità di mettere in allarme l'utenza che si avvale dei pozzi potenzialmente a rischio. Altresì si possono definire in tempo reale scelte ottimali per la mitigazione del fenomeno con interventi alla fonte ovvero con pozzi di cattura. La metodologia implementata consente di quantificare le incertezze nell'applicazione del modello di acque sotterranee. L'utilizzo di un modello numerico per la previsione di fenomeni di idroveicolazione di inquinante in falda, infatti, deve essere sempre preceduto dalla quantificazione dell'affidabilità del modello stesso. Il degrado della piana evidenzia la necessità di un uso più attento del territorio nonché l'indispensabilità di dotarsi di strumenti previsionali idonei per la definizione d'obiettivi credibili nel processo di pianificazione o ripianificazione.

Ringraziamenti. Si ringrazia la Regione Sardegna per il contributo offerto per la realizzazione del presente lavoro.

Bibliografia

- P. Cau & C. Gallo, 2002. Estimating interconnections between a phreatic and confined aquifer using a data crossing method: the Portoscuso plain (Sardinia, Italy) case. *Atti della conferenza Model Care*, Praga Czech.
- P. Cau, C. Gallo, L. Muscas, G. Ghiglieri, & G. Barbieri, 2001. Integrazione GIS–software modellistici per l'analisi di qualità ambientale della piana di Portovesme. (Sardegna sud–occidentale). *Atti della V Conferenza di ASITA*, Rimini, Italy.
- Lecca, G., 2000. Implementation and testing of the CODESA–3D model for density–dependent flow and transport problems in porous media. *Rapporto tecnico CRS4–Tech*. Rep. 00/40, Cagliari, Italia.
- Barbieri G. Ghiglieri G. (1998), ^Inquinamento degli acquiferi sabbiosi nell'area industriale di Portovesme (Sardegna Sud–Occidentale)~. *Associazione Mineraria Sarda, Iglesias, Digita Università di Cagliari*. Cagliari 9–10–11 Ottobre 1998. *Atti della Facoltà d'Ingegneria*, Vol. 42, n. XXVII ottobre 1999 (pag. 27–35).
- Barbieri G. Ghiglieri G., 1994. Artificial recharge tests in a sandy aquifer. *Water Down Under 1194*, Adelaide, South Australia.