

Titolo della tesi: Modellazione numerica della ricarica artificiale nella piana costiera di Dar Es Salaam (Tanzania)

Tipo di Laurea: Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Sessione di Laurea: Gennaio

Anno accademico: 2014/2015

Nome Candidato: Antonella Cella

Matricola: 1403766

Relatore: Prof. Giuseppe Sappa

SSD Relatore: GEO/05

A partire dalla comprensione delle caratteristiche geologiche e idrogeologiche della regione di Dar Es Salaam in Tanzania, questo studio si pone l'obiettivo di costruire un modello a scala regionale in condizioni stazionarie dell'acquifero in questione e di simulare gli effetti di possibili interventi di ricarica artificiale sulla superficie piezometrica dell'area di studio.

A tale scopo si è usato MODFLOW, elaborato dall'USGS (United States Geological Survey), riferimento a livello internazionale per la modellizzazione tridimensionale delle acque sotterranee. In particolare, nel lavoro effettuato si è usata la sua interfaccia grafica ModelMuse, scaricabile gratuitamente dal sito dell'USGS.

Scelta sulla base dei confini idrogeologici, l'area di studio è bagnata ad Est dall'Oceano Indiano, ad Ovest delimitata dall'altopiano di Dar Es Salaam che si estende fino alle Pugu Hills, e i limiti a Sud e Nord sono individuati rispettivamente dai fiumi Mzinga e Mpiji. Dal punto di vista topografico, la zona è fondamentalmente pianeggiante e le quote maggiori sono nell'area Sud Ovest. L'acquifero ha uno spessore di circa 150 m; al suo interno si distinguono due acquiferi, il superiore non confinato, spesso fino a 50 m, e quello inferiore semi confinato, al massimo di 100 m, entrambi costituiti principalmente di sabbia e separati da un acquitardo argilloso. Il dominio di quasi 260 km² è stato discretizzato in celle quadrate di lato 250 m in orizzontale e in tre layer verticali. Sono state inserite le condizioni al contorno di carico costante in corrispondenza dell'Oceano e di assenza di flusso sulla zona della griglia esterna all'area di interesse. La ricarica per infiltrazione di precipitazioni, tratta da studi precedenti, è 200 mm all'anno, ed è stata ridotta localmente in corrispondenza delle aree urbanizzate per considerare l'effetto dell'impermeabilizzazione dei suoli. Si è considerato anche l'apporto della ricarica sotterranea laterale proveniente dalle quote più elevate presenti a Ovest dell'area di studio. Per la simulazione del flusso delle acque sotterranee i due acquiferi sono stati schematizzati come un unico acquifero sabbioso, all'interno del quale sono stati aggiunti depositi alluvionali e calcari, letti dalla carta geologica degli affioramenti, e tre lenti di acquitardo a minore permeabilità, ricavate da tre stratigrafie tratte da letteratura, non avendo informazioni più precise sulla sua estensione all'interno della formazione sabbiosa.

Lo sfruttamento della riserva idrica sotterranea si realizza con la presenza diffusa di pozzi, alcuni privati, altri deputati all'approvvigionamento idrico, altri ancora ad un uso industriale. Nel modello

sono stati inseriti quelli visitati nell'ambito del progetto ACC DAR (Adapting to Climate Change in Coastal Dar Es Salaam), di cui si avevano anche misure di carico piezometrico. Queste rivelano che il flusso va dall'area delle Pugu Hills, a Sud Ovest, verso l'Oceano Indiano, ad Est. La direzione generale del flusso, inoltre, è confermata dal modello dell'area che è stato realizzato. Dalla simulazione del modello calibrato si è ottenuto che il livello di acqua varia da circa 26 m s.l.m. nella zona Sud Ovest, dove il carico è massimo, a 0 in corrispondenza del confine orientale dato dall'Oceano Indiano.

Il modello è stato calibrato in maniera automatica con il codice UCODE, supportato dall'interfaccia grafica ModelMate, per ottenere le conducibilità idrauliche delle formazioni idrogeologiche principali. Per indirizzare il processo di calibrazione verso una soluzione significativa, si sono stimate le conducibilità idrauliche dell'acquifero sabbioso e dei calcari. Quella delle lenti di acquitardo è stata fissata ad un valore dello stesso ordine di grandezza della conducibilità del substrato impermeabile dell'acquifero. Quanto ai depositi alluvionali, la loro conducibilità è stata inserita nel processo di stima come funzione della conducibilità dell'acquifero, in particolare, considerata la loro granulometria, si è supposto che abbiano una conducibilità idraulica di un ordine di grandezza maggiore di quella dell'acquifero, stimata con la calibrazione.

Dall'analisi di sensitività sui parametri, effettuata dallo stesso UCODE, emerge che la conducibilità dell'acquifero è il parametro più sensibile ai valori delle osservazioni, e anche quello che più contribuisce al calcolo dei valori di carico simulati. Sul modello calibrato così ottenuto sono stati simulati interventi di ricarica artificiale, che potrebbero essere effettuati per rimpinguare la risorsa idrica sotterranea. Un intervento di questo tipo sarebbe utile, considerato l'abbassamento della superficie piezometrica negli ultimi anni, fenomeno legato a due fattori fortemente interconnessi tra loro: la riduzione dell'infiltrazione superficiale, che si realizza parallelamente all'aumento delle aree impermeabili, e un crescente sfruttamento della risorsa idrica sotterranea per usi pubblici e privati, dovuto all'incremento demografico.

Le acque di piena fluviale potrebbero essere le principali fonti di acqua da utilizzare per la ricarica artificiale. Sono state individuate come possibili luoghi di applicazione dell'intervento tre aree verdi vicine ai fiumi che più spesso sono protagonisti di eventi alluvionali: i fiumi Mbezi e Msimbazi potrebbero fornire l'acqua da immettere nella zona più a Nord, il Kizinga alimenterebbe la zona centrale con le sue portate maggiori, e il Mzinga potrebbe sostenere l'area di ricarica più a Sud.

Sulla base di dati di letteratura relativi al fiume Kizinga (sono note la portata di picco e la media delle portate nelle stagioni piovose), si è ipotizzato un idrogramma delle portate medie mensili nell'arco di un anno. I volumi disponibili annualmente per la ricarica potrebbero essere quelli prelevati dal fiume nel periodo compreso tra il picco della stagione autunnale e quello della stagione primaverile, che non dovrebbe compromettere il deflusso minimo vitale del fiume. Considerando disponibile per la ricarica anche soltanto una minima frazione di questo volume, il

solo fiume Kizinga potrebbe fornire un apporto significativo, introdotto costantemente nell'arco dell'anno dalla zona centrale delle tre individuate.

Non avendo dati sulle portate degli altri fiumi che generano esondazioni, si è assunto che alle altre due aree si possa applicare una portata di ricarica pari ai $\frac{3}{4}$ di quella ricavata per l'area centrale, alimentata dal fiume Kizinga, che ha le portate maggiori nell'area di studio.

I volumi prelevati dai fiumi, una volta raccolti, vanno trattati e introdotti in sistemi superficiali di infiltrazione, ovvero vasche scavate sulla superficie del suolo e poco profonde, che costituiscono la soluzione di minimo costo per interventi simili; tale sistema risulta applicabile nel caso in esame poiché il suolo nell'area è sufficientemente permeabile. Indagini in situ e progetti pilota aiuterebbero a comprendere meglio il comportamento del sistema e quindi a capire come disegnare e gestire l'intervento a grande scala. I valori simulati dal modello con l'aggiunta delle tre portate di ricarica rivelano mediamente un innalzamento della superficie piezometrica; il carico massimo dell'area aumenta di 1 m e in corrispondenza delle tre zone di applicazione della ricarica artificiale la superficie piezometrica si alza in misura sensibilmente maggiore.

Infine, è stata condotta un'analisi di sensitività manuale sul modello, variando singolarmente di piccole frazioni percentuali i parametri di conducibilità stimati dalla calibrazione e le condizioni interne al sistema. Il valore del carico massimo resta compreso tra 25 e 27 m s.l.m. (il carico massimo del modello calibrato in assenza di ricarica artificiale è di circa 26 m s.l.m.) per variazioni del 30% dei volumi estratti dai pozzi di pompaggio, per variazioni del 30% della ricarica sotterranea proveniente dalle Pugu Hills, per variazioni del 20% e del 40% delle portate immesse con la ricarica artificiale, per variazioni dei parametri di conducibilità idraulica stimati da UCODE di quantità di due ordini di grandezza più bassi dei valori stessi (si tratta di variazioni suggerite dal codice stesso). Il modello è risultato più sensibile alle variazioni dell'infiltrazione legata agli eventi meteorici, perché per variazioni del 20% e del 30% del valore di partenza il carico massimo si alza a 32 e 35 m s.l.m. rispettivamente. Ciò suggerisce che sarebbe stato positivo inserire nel modello un maggiore dettaglio sulla distribuzione delle precipitazioni nell'area, su cui non vi sono dati noti. In conclusione, si è ottenuto un modello piuttosto stabile rispetto a piccole variazioni dei parametri di input e delle sollecitazioni interne.

Un modello del sistema delle acque sotterranee, se associato a misure di campo che permettano di validarlo, può rivelarsi utile nel definire una corretta politica di gestione della risorsa idrica sotterranea, che attualmente nella regione di Dar Es Salaam costituisce la principale fonte di approvvigionamento idrico, perché la più facilmente accessibile per la gran parte della popolazione, che non è collegata alla rete idrica locale. Considerando che l'utilizzo delle risorse idriche è un fattore fondamentale per la valorizzazione sociale ed economica di una regione, monitorare la disponibilità delle risorse idriche superficiali e sotterranee e valutarne le possibilità di sfruttamento anche con l'ausilio di modelli sono condizioni alla base dello sviluppo quantitativo e qualitativo del territorio.