

## MODELLAZIONE NUMERICA DELL'EVOLUZIONE DELL'ARTESIANISMO NEL SISTEMA ACQUIFERO DEL SAHARA SETTENTRIONALE

## NUMERICAL MODELING TO ESTIMATE THE ARTESIANISM EVOLUTION IN NORTH-WESTERN SAHARA AQUIFER SYSTEM

GIUSEPPE SAPPA<sup>(\*)</sup> & MATTEO ROSSI<sup>(\*)</sup>

<sup>(\*)</sup>“Sapienza” Università di Roma - Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade - Via Eudossiana 18 - 00184 Roma  
E-mail: giuseppe.sappa@uniroma1.it - matteo.rossi@uniroma1.it

### RIASSUNTO

Nel presente lavoro vengono presentati i risultati ottenuti tramite l'applicazione di un modello numerico di circolazione idrica sotterranea al bacino artesiano del Sistema Acquifero del Sahara Settentrionale al fine ottenere delle realistiche simulazioni relative al trend di abbassamento piezometrico e relativa diminuzione dei fenomeni di artesianismo locale.

L'esperienza effettuata negli ultimi anni nell'ambito di un progetto di cooperazione intergovernativa ha permesso di utilizzare un recente modello numerico regionale, elaborato dall'Osservatorio Sahara Sud, come base per la costruzione di un nuovo modello locale centrato sulla regione dei Chotts tunisini tramite il quale implementare differenti scenari plausibili di sfruttamento della risorsa idrica sotterranea.

Il modello numerico locale si sviluppa su un'area di circa 30000 Km<sup>2</sup>, comprendente parte del territorio algerino accanto al confine con la Tunisia e l'intera regione del Chott el Djerid nel sud della Tunisia.

L'attualizzazione del modello regionale servito come base per la modellazione locale ha richiesto l'utilizzo dei dati raccolti durati un'apposita campagna di misure svolta nel 2007 e incentrata sul monitoraggio piezometrico di alcuni pozzi artesiani e sull'esecuzione di numerose prove di portata.

Le ipotesi fatte sulle possibili evoluzioni dei prelievi nell'area esaminata ha permesso di definire 16 diversi scenari di sfruttamento da implementare nel modello locale.

Il risultato delle simulazioni ha mostrato previsioni di trend di abbassamento piezometrico variabili tra gli 0,8 e gli 1,2 m/a, con relative scomparsa dei fenomeni locali di artesianismo prevista tra il 2015 e il 2035.

**PAROLE CHIAVE:** acque sotterranee, artesianismo, regioni aride, modellazione idrogeologica, Tunisia

### INTRODUZIONE

Il Sistema idrico del Sahara Settentrionale (SASS) è un vasto acquifero che interessa l'area desertica del Nord Africa tra l'Algeria e la Libia.

Il volume complessivo immagazzinato nell'acquifero è stimato in circa  $30 \cdot 10^6$  Mm<sup>3</sup> (OULD BABA, 2005), sebbene una larga parte di esso non sia ancora utilizzato, sia per l'elevata mineralizzazione, sia perché localizzato al di sotto dei territori sahariani più meridionali del profondo Erg, inospitali e di difficile accesso.

### ABSTRACT

This paper presents the latest results obtained by a numerical model of the groundwater circulation in the North Western Sahara Aquifer System (NWSAS). The aim was to obtain some realistic simulations of the piezometric downward trend and the decrease of local artesianism.

On the basis of the experience acquired in the last few years in the framework of an intergovernmental cooperation project, it was possible to use a recent regional numerical model developed by the South Sahara Observatory. This model was used to set up a new local model for the Tunisian Chotts region in order to implement different plausible scenarios for the exploitation of the underground water resources. The local numerical model covers an area of about 30000 Km<sup>2</sup>, including part of the Algerian territory close to the boundary with Tunisia and the whole Chott el Djerid region in South Tunisia.

Adjusting the regional model for the local modeling study required using the data gathered during the 2007 ad-hoc survey focused on the piezometric monitoring of some artesian wells and on several output measurements.

The assumptions on the possible evolution of withdrawals in this area allowed for developing 16 different exploitation scenarios to be implemented in the local model.

The simulations showed a piezometric decline ranging between 0.8 and 1.2 m/a and the disappearance of local artesianism between 2015 and 2035 horizon.

**KEYWORDS:** groundwater management, artesianism, arid regions, hydrogeological modeling, Tunisia

### INTRODUCTION

The North Western Sahara Aquifer System (NWSAS) is a vast aquifer located in the North Africa desert area between Algeria and Libya.

The overall water volume in the aquifer is estimated to amount to about  $30 \cdot 10^6$  Mm<sup>3</sup> (OULD BABA, 2005), although a large part of it has not yet been exploited, because it is high in mineral content and it is located under the Southernmost Sahara Erg region which is inhospitable and difficult to reach.

Per quanto questo acquifero sia stato individuato sin dagli anni '50, il suo primo sfruttamento risale al finire degli anni '80 quando lo sviluppo tecnologico ha reso economicamente accessibile la perforazione di pozzi profondi anche per lo sfruttamento di risorse idriche sotterranee. Nel corso dell'ultimo quindicennio lo sfruttamento ha subito un incremento esponenziale per la crescente pressione demografica dei Paesi interessati e grazie alla economicità di accesso e di utilizzo della risorsa, che si presentava con un artesianismo di alcune decine di metri di pressione sopra il piano di campagna.

Se quindi fino agli anni '80 questo acquifero è rimasto in sostanziale equilibrio, l'importanza strategica che questa risorsa riveste nelle economie dei paesi interessati, soprattutto per lo sviluppo di importanti progetti agricoli in aree desertiche e semidesertiche, ha determinato una velocissima crescita dei prelievi che ne sta compromettendo alcune delle principali caratteristiche, prima tra tutte l'artesianismo stesso (VV.AA., 2003; BESBES *et alii*, 2004; ZAMMOURI *et alii*, 2007; SAPPA *et alii*, 2008; DE VITO *et alii*, 2009).

Non va peraltro dimenticato che questa risorsa garantisce l'alimentazione idrica delle oasi naturali e dei pozzi lungo le principali piste carovaniere, ma anche la parziale alimentazione di più estese falde superficiali che garantiscono la vita alla vegetazione spontanea rappresentante la naturale difesa all'avanzare del deserto.

In questo senso, negli ultimi anni il problema dell'impostazione di corrette strategie di pianificazione dell'utilizzo di questa risorsa si è imposto con forza all'attenzione degli organismi nazionali e sovranazionali determinando un forte impulso a studi regionali e locali dell'evoluzione idrogeologica di questo sistema acquifero (VV.AA., 2003; OSS, 2009).

Nell'ambito di un progetto per la riabilitazione di alcune oasi artificiali di palme da dattero nella zona di Rjim Maatoug, nella Tunisia meridionale (AGOUN *et alii*, 2007; SAPPA *et alii*, 2008; DE VITO *et alii*, 2009), sono state realizzate alcune simulazioni su un modello numerico locale dell'acquifero del Complexe Terminal, al fine di delineare differenti scenari di evoluzione dell'artesianismo in funzione della realizzazione di ulteriori progetti di sviluppo agricolo previsti per i prossimi anni nella regione di studio.

## GEOLOGIA ED IDROGEOLOGIA

Uno schema idraulico concettuale del Sistema Acquifero del Sahara Settentrionale è stato proposto dall'OSS (VV.AA., 2003) al fine di correlare i differenti livelli acquiferi presenti al di sotto del vasto territorio comprendente Algeria, Tunisia e Libia (Tab.1).

Raggruppando per quanto detto all'interno di un unico sistema acquifero multistrato le falde dei Calcari del Cretacico Superiore, quelli dell'Eocene e le sabbie del Mio-Pliocene, il SASS si presenta come insieme di 3 acquiferi sovrapposti:

- Il Continental Intercalaire;
- La falda del Turoniano;
- La falda del Complexe Terminal.

Il bacino idrogeologico del CI, in una sorta di esteso catino circolare, è perimetralmente delimitato a NE dalle formazioni Giurassiche dell'Atlas Sahariano per poi piegare a S nelle formazioni del Senoniano

This aquifer was identified in the 50's, but it was first exploited in the late 80's when technological development allowed for the economically drilling of wells and the exploitation of deep under-water resources. Over the last 15 years, the aquifer has been exploited at exponential rate due to the growing population in these Countries and the economic viability of this resource in terms of access and utilization. In fact, artesianism was some tens of meters of pressure above the ground level.

As a result, while this aquifer remained in equilibrium up to the late 80's, the strategic importance of this resource for the economies of the Countries, involved especially for important agricultural projects in desert and semi-desert areas, has led to a very rapid growth in withdrawals. As a consequence, some of its main hydrogeological features are quickly altering and many problems are rising, like aquifer pressure loss, water salinization, natural oases disappearance (VV.AA., 2003; BESBES *et alii*, 2004; ZAMMOURI *et alii*, 2007; SAPPA *et alii*, 2008; DE VITO *et alii*, 2009).

Moreover, this resource feeds the natural oases and wells along the main caravan trails, but also part of the most superficial water table that is instrumental in keeping the spontaneous vegetation alive which is natural barrier against the spread of the desert. In this connection, in the last few years, adopting correct planning strategies for the use of this resource has become a priority on the agenda of national and supranational organizations, thus providing momentum for regional and local studies of its hydrogeological evolution. (VV. AA., 2003; OSS, 2009).

Within the framework of a project of rehabilitation some artificial date palm oases in the Rjim Maatoug area in Southern Tunisia (AGOUN *et alii*, 2007; SAPPA *et alii*, 2008; DE VITO *et alii*, 2009), some simulations were conducted on the basis of a local numerical model of the Complexe Terminal aquifer so as to develop different scenarios of the evolution of artesianism in view of further agricultural project to be launched in the next few years in this region.

## GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY

A conceptual hydrogeological model of the North Western Sahara Aquifer System was proposed by the OSS (VV.AA., 2003) to correlate the different aquifer levels present under the vast region across Algeria, Tunisia and Libya (Tab.1).

As mentioned above, the SASS is a single multi-layer aquifer running through Upper Cretaceous and Eocene limestones and Mio-Pliocene sands. It is a set of three overlapping aquifers:

- the Continental Intercalaire (CI);
- the Turonian;
- the Complexe Terminal (CT).

The CI hydrogeological basin is similar to a large circular bowl. It is bounded by the NE Jurassic formations of the Saharan Atlas and by the S Senonian formations down to the Libyan territory including the

Algeria	Tunisia	Lybia
Aquitlude		
<i>Sands</i>	<i>Djerid sands</i>	<i>Inferior Miocene sands and limestones</i>
<b>Complexe Terminal</b>		
<i>Limestones</i>	<i>Nefzaoua Limestones</i>	<i>Mizdkeh Superior Cretaceous</i>
Aquitard		
<b>Turonian aquifer</b>		
Aquitard		
<b>Continentale Intercalaire</b>		
<i>Inferior Cretaceous, Jurassic and Trias</i>	<i>Inferior Cretaceous, Superior Jurassic</i>	<i>Inferior Cretaceous, Jurassic and Trias</i>
Aquitlude		

Tab. 1 - Schema idrogeologico del SASS (Fonte: modificato da OSS, 2003) - *The SASS hydrogeological system* (Source: VV.AA., 2003 modified)

ed estendersi fin dentro al territorio libico interessando l'intero altopiano del Tarabulus (Tripolitania) interessato dagli affioramenti dell'Eocene e Paleocene. Sul lato meridionale, il CI si dispone direttamente al di sopra dei depositi marini paleozoici del complesso basale continentale, che affiorano in più parti, innalzandosi in direzione S verso l'Hoggar.

L'acquifero CI è racchiuso, analogamente per quanto avviene per i depositi di combustibili fossili, tra le pieghe Erciniane del Carbonifero-Permiano dove sono andate sedimentando le formazioni continentali di arenarie del Cretaceo inferiore (PNUD, 1983; SIEGFRIED *et alii*, 2002; OULD BABA, 2005).

L'acquifero del CT algero-tunisino comprende invece più acquiferi di natura geologica differente in continuità idraulica tra loro. Ad eccezione della zona dei Chotts, vi sono in tutto il bacino del CT numerosi riscontri di interconnessioni tra le formazioni del Senoniano, Eocene e Mio-Pliocene tanto da giustificare l'utilizzo di una stessa denominazione per l'acquifero multistrato del CT (BEL *et alii*, 1969; BESBES *et alii*, 2004; VV.AA., 2003; OULD BABA, 2005).

L'area investigata dalla modellazione numerica è situata in prossimità del Chott El Djerid, nella Tunisia meridionale e include le regioni della Nefzaoua e del Djerid (Fig.1).

La maggior parte dei prelevi locali interessa l'acquifero del Complexe Terminal, confinato nei Calcari del tardo Senoniano nella zona del Djerid e nei sovrastanti livelli sabbiosi mano a mano che ci si sposta verso l'area di Rjim Maatoug e il confine algerino.

Le caratteristiche idrogeologiche del CT determinano nella zona un artesianismo significativo con pressioni comprese tra i 200 e i 300 KPa negli anni '90 e portate artesiane che, nell'area delle oasi di Rjim Maatoug, raggiungevano i 100-150 l/s (AGOUN, 2005; AGOUN *et alii*, 2007).

Tarabulus (Tripolitania) plateau with outcrops from the Eocene and Paleocene. In the South, the CI is directly above the Paleozoic marine deposits of the basal continental complex that crop up in many areas and rise towards the South and the Hoggar.

Similarly to the deposits of fossil fuels, the CI aquifer is located inside the Carboniferous-Permian Ercinian folds where the Lower Cretaceous continental sand formations have built up. (PNUD, 1983; SIEGFRIED *et alii*, 2002; OULD BABA, 2005).

Instead, the Algerian-Tunisian CT system consists of several hydraulically connected aquifers with a different geological nature. Except for the Chotts area, there are several interconnections between the Senonian, Eocene and Mio-Pliocene formations in the whole CT basin, and this explains the use of the same name for the multi-layer CT aquifer. (BEL *et alii*, 1969; BESBES *et alii*, 2004; VV.AA., 2003; OULD BABA, 2005).

The numerical model study area is located near Chott El Djerid in Southern Tunisia and it includes the Nefzaoua and el del Djerid area (Fig.1).

Most local withdrawals occur in the CT aquifer confined in the late Senonian limestones in the Djerid area and in the towering above sandy layers of the Rjim Maatoug area, near the Algerian boundary.

The CT hydrogeological characteristics produced a significant artesianism in the area, with pressures ranging from 200 and 300 KPa in the 90's and an artesian output of 100-150 l/s in the Rjim Maatoug oases. (AGOUN, 2005; AGOUN *et alii*, 2007).

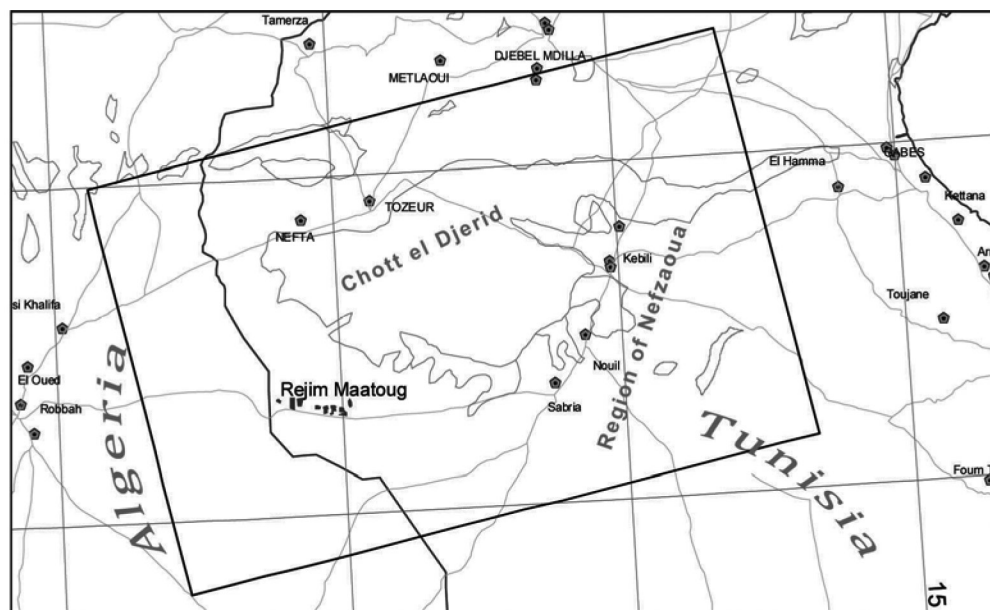


Fig. 1 - Limiti dell'area di studio  
- Investigated region boundaries

### MODELLAZIONI NUMERICHE PREESISTENTI

Il SASS è stato fatto oggetto di numerosi studi di modellazione numerica a cominciare da quello condotto nel 1972 nell'ambito del progetto UNESCO "ERESS" (Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional) con passo di discretizzazione di 15 Km.

Questo primo modello numerico, attualizzato dieci anni dopo con i prelievi registrati nel decennio 1971-1981, è servito da base per la costruzione di un sottomodulo per la zona Nefazoua-Djerid, con passo di 1,875 Km, elaborato dalla Scuola di Ingegneria dell'Università di Tunisi nel 1984 (Armines-ENIT, 1984).

Su questo sottomodulo sono state implementati gli scenari di sviluppo agricolo di tutta la zona del sud tunisino, ivi compreso il progetto di realizzazione delle oasi di Rjim Maatoug, da attuarsi in due tranches, per raggiungere un prelievo complessivo di 2000 l/s entro il 2010.

Le simulazioni effettuate illustravano al 2010 uno scenario con artesianismo residuo in tutta la zona del progetto di Rjim Maatoug e totale assenza di rischi di contaminazione delle acque sotterranee da parte delle acque salmastre superficiali.

Sotto l'impulso della Direzione Generale delle Risorse Idriche del Ministero dell'Agricoltura (DGRE), nel 1997 sono state fatte girare nuove simulazioni per analizzare l'impatto locale dei prelievi della II tranche di Rjim Maatoug alla luce della progressione temporale effettiva del progetto, dei prelievi censiti nel frattempo e della piezometria misurata attraverso le reti di monitoraggio disponibili.

I risultati delle simulazioni, forniti in termini di abbassamenti piezometrici attesi nel periodo 1995-2010, prevedevano valori compresi tra i 2-3 metri per la zona del Djerid, ove il CT è costituito dalle formazioni di calcare detritico altamente permeabili, fino ad un massimo di 6-7 metri per la zona di passaggio alle Sabbie Mioceniche situate in corrispondenza delle oasi di Rjim Maatoug.

### PRE-EXISTING NUMERICAL MODELS

The NWSAS was extensively studied with numerical models, starting from the survey conducted in 1972 within the UNESCO "ERESS" (Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional) project with a discretization step of 15 Km.

This first numerical model - adjusted ten years later with the 1971-1981 withdrawals - was used to develop a submodel for Nefazoua-Djerid, with a 1,875 Km step, developed by the Engineering School of the Tunis University, in 1984. (Armines-ENIT, 1984).

This submodel was used to implement the agricultural development scenarios of the whole South Tunisian area, including the project to create the Rjim Maatoug oases, with an overall withdrawal of 2000 l/s by 2010.

The simulations conducted showed a 2010 scenario with residual artesianism in the whole Rjim Maatoug area, without any risk of contamination of the underground water from superficial brackish water.

By the support of the General Direction of Water Resources of the Ministry of Agriculture (DGRE), new simulations were conducted in 1997 to analyze the local impact of withdrawals of the II stage in the Rjim Maatoug area, in the light of the actual time progression of the project, of the withdrawals monitored in the meantime and of the piezometric levels measured through the available monitoring networks.

The simulation results of the expected 1995-2010 piezometric levels showed a decline by 2-3 meters for the Djerid area, where the CT aquifer consists of highly permeable limestone debris formations, down by a maximum of 6-7 meters for the Miocene Sand area near the Rjim Maatoug oases.

Finally in 2002, under the aegis of the OSS (Observatoire du Sahel et du Sahara), a numerical model of the whole North Western Sa-

Nel 2002 infine, sotto l'egida dell'OSS (Observatoire du Sahel et du Sahara), è stato approntato un modello numerico dell'intero SASS tramite codice MODFLOW, comprendente i due acquiferi del CT e del CI, sulla sua intera estensione, comprendente Tunisia, Algeria e Libia (OSS, 2003). Lo studio, pur confermando i risultati delle simulazioni DGRE del 1997, ha dato la possibilità di implementare la modellazione numerica su piattaforme informatiche più potenti ed aggiornate delle precedenti fattue di mettere a punto lo strumento ufficiale sul quale implementare scenari di sviluppo regionali e locali per la gestione della risorsa transfrontaliera.

Il modello si estende su una superficie complessiva di 2.580.000 Km<sup>2</sup>, discretizzati attraverso una griglia con un passo di 12,5 Km suddivisa in 11 differenti layers secondo il modello idrogeologico concettuale rappresentato in Tab. 1.

La durata adottata per la simulazione è pari a 50 anni, assunto come stato iniziale di riferimento l'anno 2000.

Sul modello sono stati poi calati differenti scenari previsionali per i prelievi dei tre paesi riassumibili secondo lo schema seguente:

- Scenario zero: Prelievi "congelati" all'anno 2000;
- Scenario Forte: Prelievi aumentati progressivamente in Algeria per complessivi 101 m<sup>3</sup>/s e in Libia per 90 Mm<sup>3</sup>/a sulla base dei programmi di sviluppo previsti dai due paesi; in Tunisia, si è adottata l'ipotesi secondo la quale il risparmio idrico conseguente alla messa in opera di strategia di miglioramento dell'efficienza irrigua compensa l'eventuale nuova domanda connessa alla realizzazione di nuove oasi artificiali;
- Scenario Debole: Scenario "zero" per la Tunisia e prelievi aumentati solo parzialmente per Algeria (62 m<sup>3</sup>/s) e Libia.

In dipendenza dello scenario implementato, all'orizzonte 2050 gli abbassamenti piezometrici previsti in Algeria per i diversi acquiferi sono compresi tra i 40 m per lo Scenario Zero e i 300 m per lo Scenario Forte mentre in Libia, nel caso peggiore, questi sono contenuti nei 50 m; in Tunisia, sempre al 2050, gli abbassamenti previsti, dell'ordine dei 200 m, provocano la scomparsa pressoché completa del fenomeno dell'artesianismo in tutto l'area della Nefzaoua e del Djerid ed una parziale rialimentazione dei livelli acquiferi più superficiali da parte dei laghi salati di superficie (Chotts).

## IL MODELLO NDRM

Nell'ambito degli studi idrogeologici condotti per il progetto MAE di Riabilitazione delle Oasi di Palme da Dattero di Rjim Maatoug è stata avviata l'attività di modellazione numerica locale dell'acquifero del CT al fine di implementare nuovi scenari di sviluppo e valutare l'impatto della conclusione del progetto sul sistema acquifero nel suo complesso (AGOUN *et alii*, 2007).

L'attività si è articolata secondo tre differenti fasi:

- Prima fase: attualizzazione del Modello SASS, limitatamente alla porzione tunisina del sistema acquifero, attraverso l'implementazione dei prelievi censiti nell'orizzonte 2000-2006 e la calibrazione con i livelli piezometrici registrati nella regione attraverso la rete di monitoraggio esistente;
- Seconda fase: costruzione e validazione di un nuovo modello di

hara Aquifer System was developed through the MODFLOW code, including the whole CT and CI aquifers in the region across Tunisia, Algeria and Libya (OSS, 2003). The study confirmed the results of the DGRE simulations of 1997 and allowed for implementing the numerical model on more powerful and updated IT platforms, with the aim to refine the official tool for the regional and local development scenarios to manage this transboundary water resource.

The model covers an area of 2,580,000 Km<sup>2</sup>, with a discretization step of a 12.5 Km subdivided into 11 different layers according to the conceptual hydrogeological model presented in Table 1.

The simulation period is 50 years, starting from the year 2000.

Then different scenarios developed on the model for the withdrawals of the three countries can be summarized as follows:

- "Zero Scenario": withdrawals "frozen" at the year 2000;
- Strong Scenario: progressive increase in withdrawals in Algeria up to 101 m<sup>3</sup>/s and in Libya up to 90 Mm<sup>3</sup>/a in view of the development programs planned by the two Countries; in Tunisia, according to the assumption adopted, the water saved due to the strategies to improve the irrigation efficiency compensates for the new demand for additional artificial oases,
- Weak Scenario: "Zero" Scenario for Tunisia and partial increase in withdrawals in Algeria (62 m<sup>3</sup>/s) and Libya.

According to the scenario implemented, by 2050, the piezometric levels in Algeria in the different aquifers are expected to go down by 40 m for the Zero Scenario and by 300 m for the Strong scenario; while in Libya, they are expected to drop by 50 m, in the worst case; in Tunisia, always by 2050, the expected drop in these levels by about 200 m will lead to the almost complete disappearance of artesianism in the whole Nefzaoua and Djerid area and a partial contamination of the more superficial levels by the water from superficial brackish lakes (Chotts).

## THE NDRM MODEL

Within the framework of the hydrogeological studies conducted within the framework of the MAE project for the Rehabilitation of the Rjim Maatoug Date Palm Oases, a local numerical modeling study was launched for the CT aquifer so as to implement new development scenarios and evaluate the impact of the project on the whole aquifer system. (AGOUN *et alii*, 2007).

This activity was subdivided into three different phases:

- First phase: adjustment of the NWSAS model only for the Tunisian part of the aquifer, by implementing the withdrawals recorded between 2000-2006 and by weighing the piezometric levels measured in the region through the existing monitoring network;
- Second phase: set up and validation of a new detailed model of



dettaglio nella regione della Nefzaoua, del Djerid e di Rjim Maatoug (Modello NDRM) come sottomodello del SASS aggiornato per esprimere i risultati della modellazione su scala locale;

- Terza fase: implementazione di differenti scenari previsionali sui modelli di grande scala (SASS) e piccola scala (NDRM) per verificare effetti locali e regionali sull'acquifero del Complexe Terminal dei progetti di sviluppo agricolo regionale tunisino con particolare riferimento a quello di Rjim Maatoug.

Le simulazioni di scenario sono state effettuate sul periodo 2007-2050, inizialmente sul modello SASS per stimare gli effetti regionali dei prelievi e successivamente trasferite sul modello NDRM per affinare i risultati ed ottenere un'interpretazione di dettaglio dell'evoluzione dell'artesianismo nella zona di studio.

Durante la fase di calibrazione ed attualizzazione del modello, nell'ottica di affinare i risultati nella regione di interesse del sottomodello NDRM corrispondente, come detto, alla zona della Nefzaoua, del Djerid e di Rjim Maatoug, è stata utilizzata come riferimento la piezometria registrata nella rete di monitoraggio al 2000; gli scostamenti iniziali in questa regione, forniti dal modello SASS 2000 originale, si attestavano su valori prossimi in media ai 5 metri (Fig.2a).

Tali valori, del tutto accettabili alla scala di modello SASS, sono stati considerati non appropriati per la simulazione locale di piccola scala e pertanto è stato necessario apportare delle modifiche nelle condizioni imposte nel modello originale per meglio approssimare la situazione reale presentatasi nel 2000 nella regione NDRM.

Al fine di non compromettere il modello nella sua interezza, si è scelto di agire esclusivamente sul regime transitorio dello stesso evitando di modificare i valori di conducibilità idraulica che avrebbero influenzato gli scambi tra i diversi livelli acquiferi del SASS e le portate in uscita dal modello: tramite piccole modifiche locali, per approssimazioni successive, della distribuzione del coefficiente di immagazzinamento (Fig.2b), si è arrivati a scarti medi, tra i valori simulati e quelli registrati al 2000, interamente compresi al di sotto di 1,5 metri, valore considerato soddisfacente per il grado di dettaglio del modello locale (Fig.2c).

Relativamente all'aggiornamento dei prelievi censiti al 2006, questo ha riguardato esclusivamente le porzioni di territorio incluse nel dominio del sottomodello NDRM, ovverosia le regioni della Nefzaoua, del Djerid e di Rjim Maatoug; i prelievi "esterni" utilizzati per le simulazioni sono invece stati assunti pari a quelli previsti nel modello SASS per le simulazioni di Scenario 0.

In Tab.2 e Fig.3 vengono riportati il numero dei pozzi e le relative portate estratte suddivisi per settori, così come censiti nell'annuario ufficiale dei prelievi sotterranei elaborato dalle autorità competenti tunisine (DGRE, 2006).

the Djerid and Rjim Maatoug areas (NDRM Model) as a NWSAS submodel updated to express the results of the local modeling;

- Third phase: implementation of different scenarios on large scale NWSAS model and small scale NDRM model to verify the local and regional effects on the CT of the Tunisian regional agricultural development projects, in particular the Rjim Maatoug one.

The scenario simulations were conducted for the period 2007-2050, initially on the SASS model to assess the regional impact of the withdrawals and later on the NDRM model, to refine the results and trace the detailed evolution of artesianism in the area investigated.

During the calibration phase, in order to refine the results in the NDRM submodel region, that is the Nefzaoua, Djerid and Rjim Maatoug area, the piezometric levels obtained during the 2000 survey were used as reference parameters; the initial differences found in this region on the basis of the original 2000 NWSAS model, amounted to 5 meters on average (Fig.2a).

These values - that were acceptable at NWSAS scale - were considered inadequate for the small scale local simulations. Therefore it was necessary to make some changes to the conditions imposed in the original model to better represent the real situation which occurred in the year 2000 in the NDRM region.

In order to avoid a negative impact on the whole model, the decision was made to exclusively consider the transitory condition, without changing the hydraulic conductivity values which would have impaired the exchanges across the NWSAS layers and the output of the model: by means of slight local changes, by subsequent approximations of the storage coefficient distribution, (Fig.2b), the differences obtained between the simulated data and the 2000 data were below

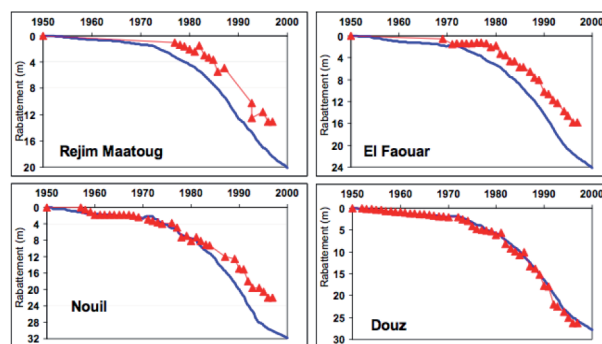


Fig. 2a - Scarti di livello sui punti di osservazione prima della calibrazione - Level differences at test points before calibration

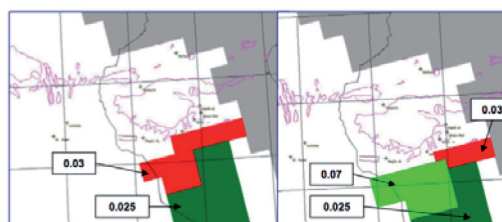


Fig. 2b - Adattamento della distribuzione del coefficiente di immagazzinamento - Storage coefficient distribution adjustment

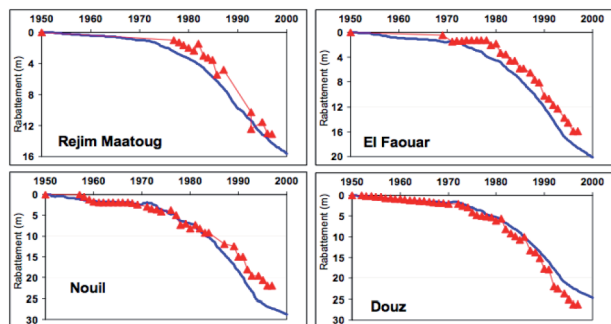


Fig. 2c - Scarti di livello sui punti di osservazione dopo la calibrazione  
 - Level differences at test points after calibration

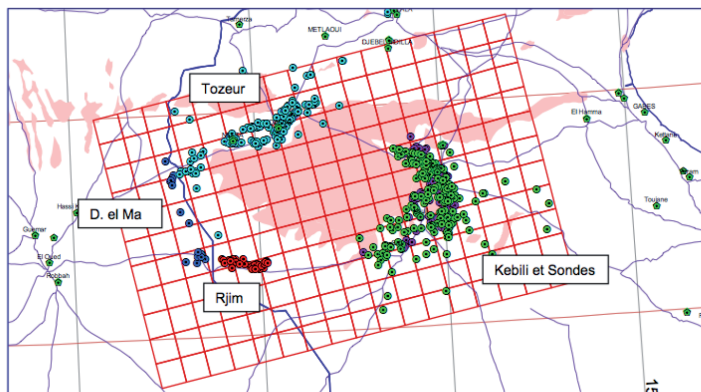


Fig. 3 - Distribuzione dei prelievi nell'area NDRM  
 - Withdrawal location in NDRM area

Tab. 2 - Prelevi nell'area del modello NDRM (AGOUN *et alii*, 2007)  
 - Withdrawal amounts in NDRM area (AGOUN *et alii*, 2007)

Sector	Wells amount	Discharges [m3/s]						
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Kebili + Sondes	340	9,15	9,48	9,38	9,72	9,16	9,45	9,32
Tozeur	175	3,7	4,11	4,17	4,07	4,02	3,99	4,12
Rjim Maatoug	37	0,72	0,67	0,99	0,96	0,89	1,08	1,13
Algérie (Douar el Ma)	22	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
Total	574	13,96	14,65	14,93	15,14	14,46	14,91	14,96

Allo stesso tempo si è proceduto con l'archiviare i dati relativi all'evoluzione piezometrica 2000-2006 sulla base delle registrazioni della rete di monitoraggio esistente al fine della validazione e calibrazione del modello regionale SASS nella zona di studio.

E' il caso di ricordare in questa sede che il modello SASS originale possiede una struttura multilayers della quale l'acquifero del Complexe Terminal, oggetto dello studio in questione, costituisce lo strato più superficiale; con riferimento allo schema idrogeologico presentato precedentemente, le sottostanti formazioni acquifere non vengono interessate dall'aggiornamento del modello e pertanto, le considerazioni effettuate sui prelevi e gli abbassamenti piezometrici riguardano esclusivamente l'acquifero del Complexe Terminal.

Quanto alle condizioni ai limiti, si è fatto ricorso sostanzialmente a condizioni di Dirichlet (potenziale imposto) e Cauchy (miste) secondo il seguente schema:

- limiti a potenziale imposto in corrispondenza delle zone di bordo del CT che sono stati utilizzati per determinare i flussi di alimentazione sotterranea supposti costanti;
- condizioni di tipo "Drain" per rappresentare le sorgenti artesiane naturali (oasi) ancora presenti, in numero assai limitato, nelle zone del Djerid e della Nefzaoua;
- condizioni di tipo "Drain" in corrispondenza dei Chotts (laghi salati): queste sono state scelte, in luogo delle condizioni di potenziale imposto, per evitare una rialimentazione forzosa della falda da parte dei Chotts superficiali che avrebbe avuto il risultato di sottostimare notevolmente gli abbassamenti artesiani registrati.

In Tab.3 sono riportati gli scarti tra i valori simulati e quelli regi-

1.5 meters, which was considered adequate for the level of detail of the local model. (Fig.2c).

The 2006 withdrawals were updated only for the areas included in the NDRM submodel; on the contrary, the "external" withdrawals used for the simulations were assumed to be very close the ones anticipated by the NWSAS model for the 0 Scenario simulations.

Tab.2 and Fig.3 report the number of wells and their relative discharges according to their location, as they are registered in the official directory of the annual underground withdrawals created by the competent Tunisian authorities. (DGRE, 2006).

At the same time, the data on the 2000-2006 piezometric evolution was stored on the basis of the recordings of the existing monitoring network in order to validate and weigh the NWSAS regional model in the study area.

It is worth recalling that the original NWSAS model had a multilayer structure and the Complexe Terminal aquifer investigated in this study is the most superficial layer; as to the hydrogeological configuration presented before, the underlying aquifers are not included in the updated model. Therefore, the considerations on withdrawals and on piezometric downward trends are exclusively related to the Complexe Terminal aquifer.

As to boundary conditions, the model is based on the Dirichlet (imposed) and Cauchy (mixed) conditions, according to the following approach:

- Imposed potential boundaries near the CT edges, used to determine the supposed constant groundwater inflows;
- "Drain" type conditions for the natural artesian sources (oases) that still exist in very small numbers, in the Djerid and Nefzaoua areas;
- "Drain" type conditions for the Chotts (brackish lakes): the-

	NOCLAS	NOM	dh observé	dh modéle	écart
Rjim Maatoug	19781905	Mairouha2	5.4	4.9	-1.4
	19849005	C2N1	3.9	4.5	0.6
	19382905	M. Lafan	6.0	4.3	-1.7
	19894905	C4N1	3.5	4.6	1.1
	20091905	C2N2	6.9	4.3	-2.6
	20368905	C4F2	5.0	4.3	-0.7
	20044905	C6F2	3.7	4.3	0.6
	19944905	C3F1	5.4	4.2	-1.2
	19777905	RM7	3.6	3.9	0.4
	18818905	Ghabbat 3	5.3	4.9	-1.3
Tosour	14385905	Chemaa 1 bis	7.9	4.0	-3.9
	12325905	Ghardaya 3	4.8	4.0	-0.8
	20478905	Hszour PZ 1	4.5	4.9	0.4
	18791905	Tosour 4	4.2	3.6	-0.4
	19834905	Zaouiet El Arab 1 bis	4.3	3.6	-0.5
	15508905	Mrah Lahouar 1	6.5	3.9	-2.6
Kebili	00033905	F. El. Gola 1	3.3	3.0	-0.3
	08758905	F. Ras el ain 1	3.0	3.2	0.2
	18993905	F. Ras el ain 2	3.7	3.1	-0.6
	20194905	Heavy	4.0	3.0	-1.0
	20195905	Oued Dzou	4.1	3.1	-1.0
	20068905	PZ Harbye	3.3	3.2	-0.1
	20558905	PZ Oued El Meiah	2.8	3.4	0.4
	19878905	PZ Ziret Louhichi (O.	3.9	3.0	-0.9

Tab. 3 - Abbassamenti 2000-2006 [m]  
- Drawdown 2000-2006 [m]

strati per i pozzi appartenenti alla rete di monitoraggio locale alla fine dell'aggiornamento del modello SASS all'orizzonte 2006.

Per la costruzione del sottomodulo NDRM si è sfruttata la possibilità offerta dal software utilizzato PMWIN (Chiang *et alii*, 2001) di trasferimento automatico di tutti i parametri del modello regionale a quello locale costruito affinando le maglie del modello SASS nella regione di interesse.

La delimitazione spaziale del sottomodulo è riportata in Fig.4 e copre una superficie di circa 30000 Km<sup>2</sup> attraverso una griglia di discretizzazione regolare con passo pari ad 1/4 di quello del modello SASS2000 per un totale di 68\*44 (=2992) celle.

Sul sottomodulo sono state riprodotte le simulazioni già effettuate per la calibrazione del SASS nel periodo 2000-2006 ridistribuendo i prelievi sulle nuove maglie e ottenendo pertanto risultati più affinati a livello locale in termini livelli, abbassamenti e portate di falda.

Se la rappresentazione delle curve piezometriche non evidenzia, come auspicato, significative differenze tra i risultati delle due simulazioni (Fig.5), gli abbassamenti stimati dal NDRM sembrano adattarsi meglio alla distribuzione e alla concentrazione dei prelievi censiti.

A supporto dell'affidabilità dei risultati della modellazione, si riportano in Fig.6 gli andamenti degli abbassamenti simulati in alcuni punti di osservazione confrontati con quelli registrati nelle campagne di monitoraggio.

### SCENARI IMPLEMENTATI

Il fine ultimo della costruzione dell'attività di modellazione implementata è quello di fornire le probabili evoluzioni dell'artesianismo residuo dell'acquifero del CT in funzione di differenti scenari concernenti i prelievi insistenti sull'area di studio.

Questi sono stati accorpati con criteri geografici secondo il seguente schema:

- prelievi direttamente insistenti sull'area delle oasi di Rjim Maatoug;

se conditions were preferred to the imposed potential ones to avoid a forced recharge of the water table by the superficial water from the Chotts. This would have significantly underestimated the artesian decline.

Tab.3 reports the differences between the data simulated and the data recorded for the wells of the local monitoring network after adjusting the NWSAS model up to 2006.

In order to build the NDRM submodel, the PMWIN software program (Chiang *et alii*, 2001) was used to automatically transfer all the parameters of the regional model to the local one, built by refining the NWSAS model grid in this region.

Fig. 4 illustrates the spatial dimension of the submodel, which covers an area of about 30000 Km<sup>2</sup> with a regular discretization grid and a step equal to 1/4 with respect of the 2000 NWSAS model for a total of 68\*44 (=2992) cells.

The simulations already conducted for weighing the 2000-2006 NWSAS model were reproduced on the submodel, by redistributing withdrawals onto new grids, thus obtaining more refined local results in terms of levels, drawdowns and water table output.

While the piezometric curves do not show the expected significant differences in the results between the two simulations (Fig.5), the drawdowns estimated by the NDRM model seem to be better adjusted to the distribution and identification of the withdrawals identified.

Fig.6 reports the drawdowns simulated in some observation points with respect to the ones of the monitoring surveys in order to support the reliability of the modeling data.

### IMPLEMENTED SCENARIOS

The final aim of the implemented modeling activity was to provide the possible evolution of residual artesianism of the CT aquifer according to the different scenarios on withdrawals in the area.

These scenarios were pooled together with geographical criteria according to the following approach:

- Water consumption in the Rjim Maatoug oasis area;
- Water consumption in the Nefzaoua region (Kebili, East of Chott Djerid);



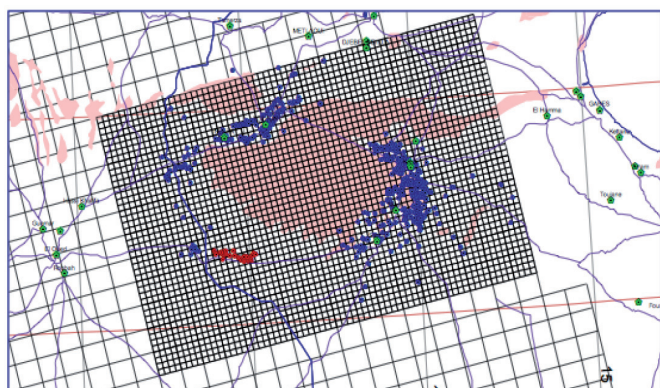


Fig. 4 - Raffinamento telescopico della griglia per il modello NDRM  
- NDRM model grid refinement

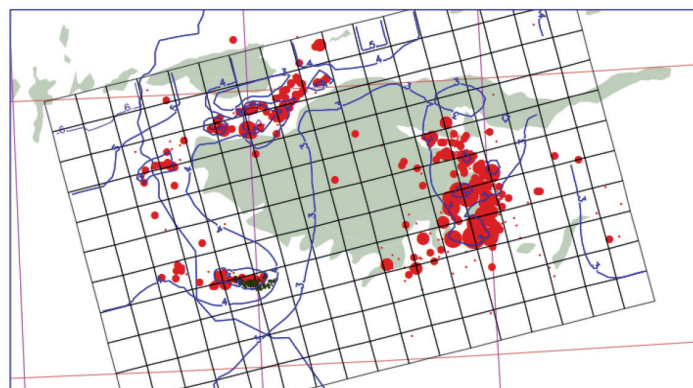
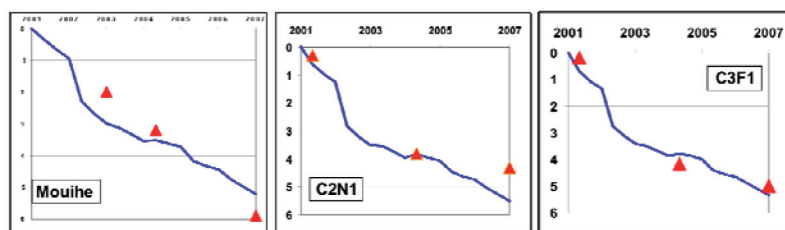


Fig. 5 - Abbassamenti simulati dal NDRM e distribuzione dei prelievi  
- Drawdown simulated by NDRM model and withdrawal distribution

Fig. 6 - Evoluzione degli abbassamenti 2000-2006 in tre punti di osservazione  
- Drawdown evolution 2000-2006 in 3 test points



- prelievi nella regione della Nefzaoua (zona di Kebili, ad Est del Chott Djerid);
- prelievi nella regione del Djerid (zona di Tozeur, a Nord del Chott Djerid);
- prelievi in regioni limitrofe (zona algerina prossima al confine con la Tunisia).

Per ciascuna di queste tipologie, sono state in linea generale individuate due ipotesi: una più debole, di mantenimento dei prelievi alla situazione 2006, ed una più gravosa, che tenesse conto degli scenari di sviluppo, per lo più agricolo, delle regioni interessate.

Ciascuna simulazione è stata fatta girare inizialmente sul modello regionale SASS per determinare il quadro regionale e le condizioni ai limiti nel transitorio per il sottomodello e successivamente su quest'ultimo per l'affinamento dei risultati.

Relativamente alla zona di Rjim Maatoug, i due scenari individuati possono essere brevemente descritti come segue:

- Scenario RM1: il numero dei pozzi esistenti al 2006 rimane costante per un prelievo complessivo di 1597 l/s;
- Scenario RM2: realizzazione di una seconda tranches di oasi con un prelievo annesso che porta l'emungimento a complessivi 2000 l/s.

Per le zone del Djerid e della Nefzaoua:

- Scenario T0: prelievi nella zona di Tozeur fermi al 2006 per complessivi 4,2 m<sup>3</sup>/s;
- Scenario T1: aumento dei prelievi al 2012 fino a 4,5 m<sup>3</sup>/s secondo gli scenari di sviluppo agricolo previsti effettivamente per la regione;
- Scenario K0: prelievi nella zona di Kebili fermi al 2006;
- Scenario K1: creazione di 3 nuove oasi previste nella regione per

- Water consumption in Djerid area (Tozeur, North of Chott Djerid);
- Water consumption in neighbouring areas (Algerian area close to the border with Tunisia).

For each type, two assumptions were formulated: a weaker one with withdrawals unchanged vs. 2006 and a stronger one with (mainly agricultural) development scenarios in the regions at issue.

Each simulation was initially run on the NWSAS regional model to determine the regional situation and the transitory boundary conditions for the submodel and ultimately on the NDRM model to refine the results.

In the Rjim Maatoug area, two scenarios were identified:

- RM1 scenario: the number of existing wells in 2006 does not change with an overall consumption of 1597 l/s;
- RM2 scenario: development of another series of oases with a withdrawal up to 2000 l/s.

for the Djerid and Nefzaoua areas:

- T0 scenario: the amount of water drawn in the Tozeur area remains at 4.2 m<sup>3</sup>/s as it was in 2006;
- T1 Scenario: increase in the amount of water drawn up to 2012 for a total of 4.5 m<sup>3</sup>/s according to the agricultural development scenarios envisaged in this region;
- K0 Scenario: the water consumption in the Kebili area does not change with respect to 2006;
- K1 Scenario: creation of three new oases in the region with a

Année	RM1	RM2	K0	K1	T0	T1	RM1K0T0	RM1K1T0	RM1K1T1	RM1K0T1	RM2K0T0	RM2K1T0	RM2K1T1	RM2K0T1
2007	1.13	1.13	9.32	9.32	4.12	4.20	14.57	14.57	14.65	14.65	14.57	14.57	14.65	14.65
2009	1.60	1.60	9.32	9.32	4.12	4.30	15.04	15.04	15.22	15.22	15.04	15.04	15.22	15.22
2011	1.60	2.00	9.32	9.32	4.12	4.40	15.04	15.04	15.32	15.32	15.44	15.44	15.72	15.72
2012	1.60	2.00	9.32	9.32	4.12	4.50	15.04	15.04	15.42	15.42	15.44	15.44	15.82	15.82
2016	1.60	2.00	9.32	9.82	4.12	4.50	15.04	15.54	15.92	15.42	15.44	15.94	16.32	15.82
2026	1.60	2.00	9.32	10.32	4.12	4.50	15.04	16.04	16.42	15.42	15.44	16.44	16.82	15.82
2036	1.60	2.00	9.32	10.82	4.12	4.50	15.04	16.54	16.92	15.42	15.44	16.94	17.32	15.82
2050	1.60	2.00	9.32	10.82	4.12	4.50	15.04	16.54	16.92	15.42	15.44	16.94	17.32	15.82

Tab. 4 - Ipotesi di prelievi per i differenti scenari  
- *Withdrawal evolution for the different scenarios*

complessivi 1,5 m<sup>3</sup>/s addizionati progressivamente fino all'orizzonte 2030.

Infine, per i prelievi algerini, i due scenari individuati sono i seguenti:

- Scenario S0: viene ripreso lo Scenario 0 del SASS2000, con i prelievi congelati al 2000;
- Scenario S1: viene ripreso lo Scenario "Forte" del SASS2000.

A partire dalle ipotesi formulate, in Tab.4 vengono presentati gli 8 scenari possibili derivati come combinazione di quelli relativi ai prelievi per parte tunisina (Rjim Maatoug, Kebili e Tozeur) con i prelievi corrispondenti nel periodo di simulazione 2007-2050.

Combinati con le due ipotesi per i prelievi algerini, S0 ed S1, risultano in totale 16 differenti scenari da implementare nelle operazioni di modellazione.

Come noto, alla base del codice MODFLOW usato per la modellazione, vi è l'equazione generale di flusso in mezzo poroso saturo, qui di seguito riportata, con evidente significato dei termini:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ T_x(x, y) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ T_y(x, y) \frac{\partial h}{\partial y} \right] = S \frac{\partial h}{\partial t} - q$$

Risultando essa lineare, risulta possibile applicare il principio di sovrapposizione degli effetti che, a somme linee, enuncia come, date due soluzioni particolari h1 ed h2 dell'equazione, una generica combinazione lineare a coefficienti costanti delle stesse risulta anch'essa soluzione dell'equazione.

Questa considerazione permette pertanto di ridurre i 16 scenari individuati a 5 scenari base, i cui risultati, in termini di potenziali e abbassamenti, possono essere combinati in maniera additiva per ottenere le soluzioni desiderate per qualunque scenario si desideri.

In questo senso, gli scenari base utilizzati per le simulazioni sono stati i seguenti:

- a) RM1K0T0S0;    b) RM2K0T0S0;    c) RM2K1T0S0;    d) RM2K0T1S0;    e) RM2K0T0S1

**RISULTATI E DISCUSSIONE**

I risultati delle simulazioni effettuate, congiuntamente ai campi di potenziale ricavati per sovrapposizione degli effetti degli scenari base, vengono in questa sede presentati in termini di livelli piezometrici e di abbassamenti.

Particolare attenzione viene posta all'evoluzione del fenomeno dell'artesianismo nell'area delle oasi di Rjim Maatoug al fine di valutare l'orizzonte temporale oltre il quale si renderà necessaria l'adozione diffusa di tecniche di emungimento meccanico, con conseguenti ricadute in termini di costi e sostenibilità dei prelievi.

progressive increase up to 1.5 m<sup>3</sup>/s by 2030.

Finally, Algeria has the following scenarios:

- S0 Scenario: in line with the SASS2000 0 Scenario, with no change with respect to the year 2000;
- S1 Scenario: in line with the "Severe" Scenario of the SASS2000 model.

Starting from these hypotheses, Tab 4 reports the 8 possible scenarios derived from a combination of those related to Tunisian withdrawals (Rjim Maatoug, Kebili and Tozeur) for the 2007-2050 simulation period.

When combined to the two assumptions for the Algerian withdrawals, S0 and S1, there are 16 different scenarios to be implemented in the numerical modeling.

As well known, the MODFLOW code used for modeling is based on the general flow equation in a saturated porous medium as reported below, with a clear meaning of the terms:

Being a linear equation, it is possible to apply the principle of the superimposition of the effects which states that given two particular solutions h1 and h2, a generic linear combination with constant coefficients is also a solution of the equation.

This consideration makes it possible to reduce the 16 scenarios identified to 5 basic scenarios, whose results can be additionally combined in terms of potentials and drawdowns in order to obtain the desired solutions for any scenario.

In this connection, the basic scenarios used for the simulations are as follows:

**RESULTS AND DISCUSSION**

The results of the simulations conducted together with the potential fields obtained from the superimposition of the effects of the baseline scenario are presented here in terms of piezometric levels and drawdowns.

Particular attention was attached to the evolution of artesianism in the Rjim Maatoug oasis area in order to evaluate when it will be necessary to extensively adopt mechanical pumping techniques with increasing costs and problems in terms of sustainable withdrawals.

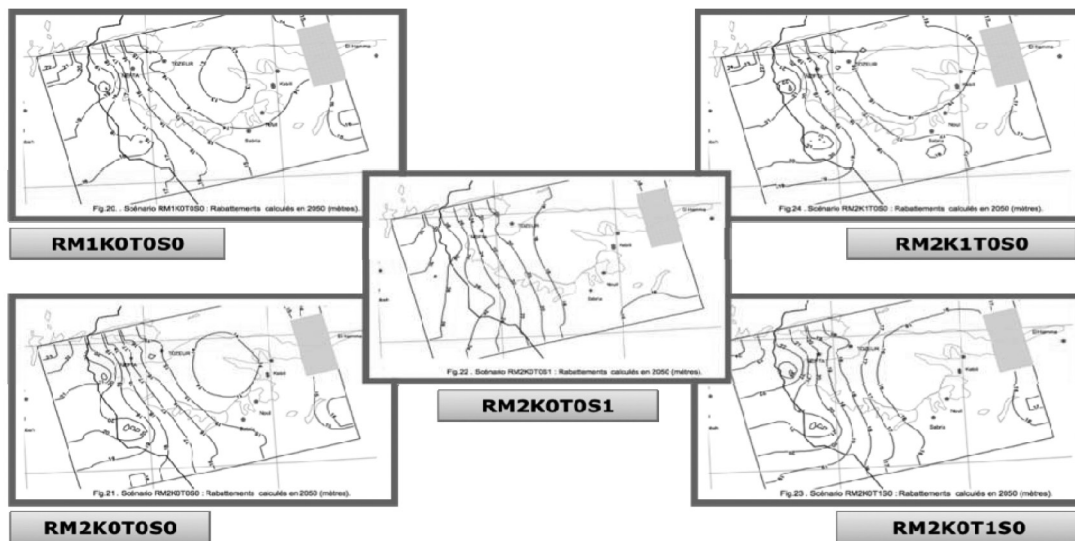


Fig. 7 - Abbassamenti stimati dal modello NDRM al 2050  
 - Drawdown estimated by NDRM model at 2050

	WELL ID	RM1K0T0S0	RM2K0T0S0	RM1K0T0S1	RM1K0T1S0	RM1K1T0S0	RM2T1K1S1	(RM2-RM1)/RM2	(S1-S0)/S1
Rjim Maatoug Area	Mathroua	18,07	20,98	24,43	19,09	18,83	29,14	14%	26%
	Ess1	17,95	21	24,15	18,99	18,74	29,02	15%	26%
	PZ4	18,17	20,8	24,34	19,15	18,95	28,72	13%	25%
	PZ3	18,35	20,53	24,11	19,41	19,2	28,19	11%	24%
	C2N2	18,96	21,08	24,73	19,97	19,79	28,69	10%	23%
	C3N1	18,77	20,67	24,35	19,75	19,62	28,08	9%	23%
	C5F2	18,58	20,35	24,06	19,53	19,43	27,64	9%	23%
	C5F1	18,37	20,07	23,75	19,32	19,24	27,27	8%	23%
	Ferdaous1	17,96	19,67	23,25	18,96	18,86	26,87	9%	23%
	C4F1	17,98	19,57	23,17	18,93	18,88	26,62	8%	22%
	Rj2	17,62	19,22	22,74	18,63	18,55	26,28	8%	23%
Rj4	17,26	18,81	22,28	18,28	18,21	25,8	8%	23%	
Nefzaoua (Kebili)	Franiq	14,72	15,62	17,99	15,77	16,13	21,35	6%	18%
	Faouar	13,78	14,44	16,22	14,76	15,55	19,62	5%	15%
	Rasl1	13,52	14,15	15,83	14,57	15,22	19,21	4%	15%
Djerid (Tozeur)	Hez1	19,51	20,96	26,65	21,52	20,29	30,87	7%	27%
	Toz4	13,92	15,02	18,17	16,78	15,02	23,24	7%	23%

Tab. 5 - Abbassamenti stimati per le differenti simulazioni in corrispondenza dei principali pozzi artesiani della zona  
 - Drawdown estimated for the different simulations at main artesian wells

**RISULTATI IN TERMINI DI ABBASSAMENTI**

La Fig.7 riporta la distribuzione delle curve isopiezometriche per i 5 scenari base all’orizzonte 2050; come già spiegato, sommando opportunamente gli abbassamenti simulati, sono stati ottenuti i risultati rappresentativi di ogni ipotetico scenario previsto.

In Tab.5 vengono riportati, in corrispondenza di alcuni pozzi distribuiti nella regione appartenenti alla rete di monitoraggio, gli abbassamenti calcolati al 2050 per:

**RESULTS IN TERMS OF PIEZOMETRIC LOWERING**

Fig.7 reports the distribution of isopiezometric curves for the 5 baseline scenarios up to 2050; as already explained, by adding the simulated drawdown, it was possible to obtain the results for each hypothetical scenario.

Tab.5 reports the drawdowns calculated up to 2050 near some wells in the monitored areas for:

- le cinque simulazioni di base;
- per lo scenario RM2K1T1S0 con la sovrapposizione degli effetti degli scenari più gravosi nel settore tunisino;
- per lo scenario RM2K1T1S1 costruito con la sovrapposizione degli effetti di tutte le ipotesi più gravose in termini di prelievi.

Ferme restando le note approssimazioni degli approcci di modellazione numerica a contesti idrogeologici di tale vastità e complessità, l'ottica da adottare per la lettura della prima colonna della tabella è quella di considerare i prelievi relativi allo scenario meno gravoso, RM1K0T0S0, come situazione di partenza rispetto alla quale effettuare le considerazioni rispetto alle politiche di ulteriore incremento dei prelievi previste nell'area di studio.

Con riferimento alla tabella è infatti possibile calcolare gli impatti relativi che ogni singolo scenario ha rispetto a quello meno gravoso (RM1K0T0S0), espressi in termini percentuali.

In particolare, si nota come la realizzazione della II tranches delle oasi di Rjim Maatoug, per portare il prelievo complessivo a 2000 l/s, sia quantificabile nell'ordine di un 10-15% massimo di abbassamenti ulteriori nella zona interessata direttamente dal prelievo.

Dal punto di vista della complessità della gestione della risorsa, è interessante notare come nella zona di studio, interamente compresa nel territorio tunisino, l'impatto peggiore sull'acquifero è in realtà correlato al sottoscenario S1 relativo ai prelievi in territorio algerino, che provocano un abbassamento piezometrico ulteriore rispetto allo scenario meno gravoso di oltre il 15% per la zona di Kebili e in media del 25 % nelle zone orientali di Tozeur e di Rjim Maatoug.

Alla realizzazione delle opere previste per le zone della Nefzaoua e del Djerid, nei comparti di Kebili e Tozeur, sono correlati abbassamenti ulteriori in media inferiori al metro.

#### *RISULTATI IN TERMINI DI CARICO PIEZOMETRICO (ARTESIANISMO)*

Le simulazioni effettuate hanno anche permesso, attraverso la restituzione della distribuzione dei carichi sul dominio del modello NDRM, di formulare scenari previsionali di scomparsa del fenomeno dell'artesianismo.

Implementando il modello digitale del terreno (DEM) fornito dall'OSS (OSS, 2003), è automatico per differenza il calcolo dell'aliquota di artesianismo residuo distribuita sulla regione di studio.

In assenza di ulteriori prelievi rispetto alla situazione censita al 2006 (RM1K0T0S0), a fronte di un artesianismo iniziale ancora presente in larga parte della regione di studio e più marcatamente nella zona sud-occidentale del Chott Djerid, limitrofa all'area di Rjim Maatoug, si riscontra già al 2020 una diminuzione sensibile dello stesso delineando una situazione che al 2040 evolve verso una concentrazione delle aree con artesianismo residuo concentrate all'interno della depressione del Chott, area che per ovvi motivi non è interessata da prelievi diretti (Fig.8).

Gli abbassamenti addizionali associati agli ulteriori prelievi caratterizzanti i differenti scenari, avvicinano nel tempo l'orizzonte al quale la disponibilità di portate artesiane sufficienti per i fabbisogni irrigui delle oasi artificiali verrà a cessare imponendo il ricorso diffuso all'installazione di pompe per l'emungimento meccanico delle acque sotterranee.

- The five basic simulations;
- The RM2K1T1S0 scenario with the superimposition of the effects of the most severe scenarios in Tunisia;
- The RM2K1T1S1 scenario with the superimposition of the effects of all the worst scenarios;

Given the well known approximations of the numerical modeling approach to such large and complex hydrogeological contexts, the first column in the table is to be read considering the withdrawals of the weakest scenario, RM1K0T0S0. This the starting point to make further considerations on the planned increase in withdrawals in the area concerned.

In fact, it is possible to calculate the impact of each scenario with respect to the weakest one (RM1K0T0S0), in percentage.

In particular, the creation of the second set of oases in Rjim Maatoug, with an overall estimated withdrawal of 2000 l/s, may lead to a further decline in the water level by a maximum of 10-15% in the withdrawal.

As to the complexity in managing this resource, it is interesting to note that, in the study area located in Tunisia, the worst impact on the aquifer derives from the S1 subscenario related to withdrawals in Algeria. These cause a further decline in the piezometric levels with respect to the weaker scenario by more than 15% for the Kebili area and by 25 % on average in the Eastern areas of Tozeur and Rjim Maatoug.

The implementation of the projects planned in Nefzaoua and Djerid in the Kebili and Tozeur area is correlated to further decreases by less than one meter on average.

#### *RESULTS IN TERMS OF PIEZOMETRIC CHARGE (ARTESIANISM)*

On the basis of these simulations, it was possible to adopt the distribution of charge on the NDRM model domain in order to formulate the scenarios with the disappearance of artesianism.

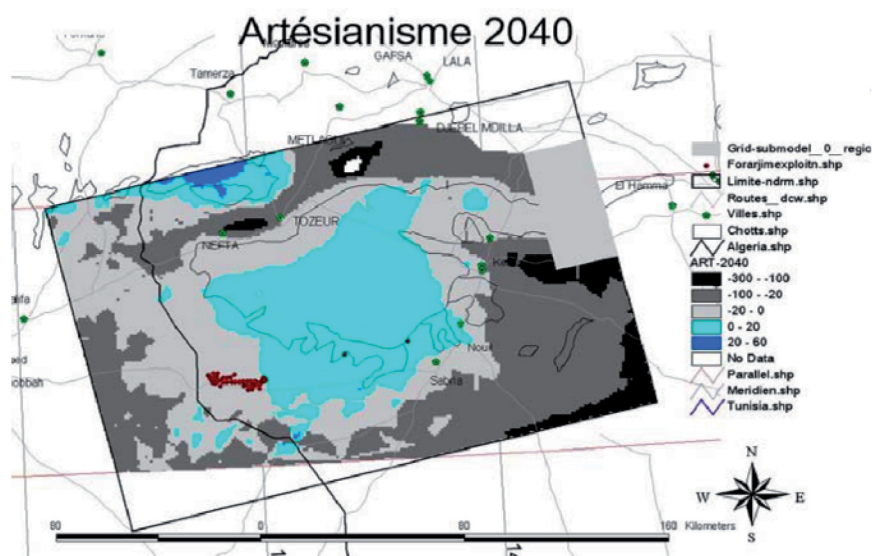
The implementation of the digital model of the terrain (DEM) provided by the OSS (OSS, 2003) made it possible to automatically calculate the amount of residual artesianism in the study region.

Without any additional drawdowns with respect to 2006 (RM1K0T0S0), with a starting artesianism still present in most of the area at issue, especially in the South-Western Chott Djerid area near Rjim Maatoug, a significant decline already occurs by 2020; at 2040 horizon, the little areas with residual artesianism will be concentrated inside the Chott basin, where, for obvious reasons, there is no direct withdrawal. (Fig.8).

The additional decline due to increased withdrawals in several scenarios anticipates the time when there will no longer be sufficient artesian output to meet the irrigation requirements of the artificial oases. As a result, mechanical pumping to draw underground water will be required.



Fig. 8 - Distribuzione dell'artesianismo residuo al 2040 per lo scenario RM1K0T0S0  
 - Artesianism amount at 2040 for the RM-1K0T0S0 scenario



## CONCLUSIONI

L'utilizzo della modellazione numerica dell'acquifero del Complexe Terminal nella regione tunisina della Nefzaoua, Djerid e Rjim Maatoug (NDRM) ha permesso di delineare scenari previsionali di evoluzione del sistema con particolare riferimento al trend di diminuzione del fenomeno dell'artesianismo locale.

In particolare il lavoro ha riguardato l'aggiornamento del modello più recente disponibile del Sistema Acquifero del Sahara Settentrionale (SASS 2000) con i prelievi e i livelli acquiferi censiti e registrati all'orizzonte 2006.

La creazione di un modello locale di flusso, ottenuto per raffinamento telescopico del modello SASS aggiornato nella zona NDRM, ha consentito di aumentare il dettaglio della modellazione al fine di valutare le conseguenze locali che i piani di sviluppo agricolo regionali potrebbero avere sull'acquifero del Complexe Terminal.

Nel modello sono stati implementati diversi scenari di prelievo, riguardanti le oasi artificiali situate nelle zone di Rjim Maatoug, di Tozeur e di Kebili in Tunisia e di quelle situate nelle zone di confine del territorio algerino al fine di calcolare gli abbassamenti ad essi associati all'orizzonte temporale del 2050.

Lo scenario più favorevole, che presuppone i prelievi "congelati" al 2006, prevede una drastica riduzione delle zone interessate dal fenomeno dell'artesianismo già all'orizzonte 2020, con una loro definitiva scomparsa al termine della simulazione; le simulazioni associate alla realizzazione di ulteriori prelievi nelle zone citate, forniscono abbassamenti addizionali al 2050 variabili tra il 15% in più nel caso dei prelievi relativi alla regione della Nefzaoua fino ad un aumento del 25% nel caso di prelievi situati in nel territorio algerino.

In tale ottica, la modellazione idrogeologica si conferma uno strumento fondamentale per aumentare la consapevolezza delle conseguenze delle politiche di sfruttamento delle acque sotterranee a supporto di decisioni concertate in merito alla gestione di un sistema acquifero di tale importanza strategica quale il SASS.

## CONCLUSIONS

The use of a numerical model for the Complexe Terminal aquifer in the Tunisian Nefzaoua, Djerid and Rjim Maatoug (NDRM) area allowed for developing some scenarios to predict the evolution of this system especially in terms of decline of local artesianism.

In particular, the most recent model of the North Western Sahara Aquifer System (2000 NWSAS) was adjusted to the 2006 estimated withdrawals and aquifer levels. A local flow model was designed by means of the telescopic refinement of the adjusted NWSAS model in the NDRM area to enhance the modeling details and evaluate the local consequences derived from the regional agricultural development projects on the Complexe Terminal aquifer.

On the basis of this model, different withdrawal scenarios were implemented for the artificial oases located in the Rjim Maatoug, Tozeur and Kebili areas in Tunisia and for those in the Algerian boundary area, so as to calculate the drawdowns by 2050.

The most favorable scenario- with withdrawals frozen at 2006 - shows a drastic reduction of artesianism in these areas already by 2020 and their disappearance at the end of the simulation period; the simulations associated to further withdrawals in these areas indicate a further decline by 2050 between plus 15% in the Nefzaoua region up to 25% in the Algerian territory.

In this perspective, the hydrogeological model is a fundamental instrument to raise the awareness of the political consequences of the planned exploitation of underground resources and to support decisions on the management of the very important and strategic North Western Sahara Aquifer System.



## RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato finanziato e svolto nell'ambito dell'Accordo di Cooperazione Bilaterale Italia-Tunisia denominato "Programma Sahara Sud". Gli autori vogliono ringraziare sentitamente il Prof. M.Besbes dell'ENIT per il prezioso supporto scientifico che ha voluto gentilmente accordare.

## OPERE CITATE / REFERENCES

- ARMINES-ENIT (1984) - *Modèle mathématique du Complexe Terminal Nefzaoua-Djerid*. Min. Agr. Tunisie.
- AGOUN A. (2005) - *Evolution de la nappe du Complexe Terminal au niveau de Redjem Maatoug "Complexe Terminal aquifer evolution at Redjem Maatoug"*. Rapport DRGE, Ministère de l'Agriculture et des ressources en eaux de la République Tunisienne, Tunis. In French
- AGOUN A., BEN AYED M., DE VITO A. & SAPPÀ G. (2007) - *Rapport Final de la Commission Hydraulique*. Min. du développement et de la Cooperation Nationale Tunisienne, Tunis
- BEL F. & CUCHE D. (1969) - *Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal "State of knowledge on Complexe Terminal aquifer"*, Report ERESS Project, Ouargla, Algérie. In French
- BESBES M., BABASY M., KADRI S., LATRECH D., MAMOU A., PALLAS P. & ZAMMOURI M. (2004) - *Conceptual framework of the North Western Sahara Aquifer System*. In: "Managing Shared Aquifer Resources in Africa" International Workshop Proceedings, 163-169, UNESCO. ISBN 92-9220-028-3
- CHIANG W.H. & KINZELBACH W. (2001) - *3D-Groundwater Modeling with PMWIN*. Springer Ed.. 346 pp.
- DE VITO A., ROSSI M. & SAPPÀ G. (2009) - *Il Sistema Acquifero del Sahara Settentrionale: la gestione complessa di una risorsa strategica condivisa*. L'Acqua, **3**.
- DRGE (2006) - *Annuaire d'exploitation des nappes profondes "Deep aquifer exploitation yearbook"*. Ministère de l'Agriculture et des ressources en eaux de la République Tunisienne, Tunis. In French
- HARBAUGH, A.W., BANTA, E.R., HILL, M.C. & McDONALD, M.G. (2000) - *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process*. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 pp.
- OSS (2003) - *Système Aquifère du Sahara Septentrional*, vol. **4**. Modèle Mathématique. Int. Rep. Projet SASS, OSS. Tunis.
- OULD BABA M. (2005) - *Recharge et paléorecharge du Système Aquifère du Sahara Septentrional "Recharge and paleorecharge of NWSAS"*. Thèse de Doctorat en Géologie, Université El Manar, Tunis, Tunisie.
- PNUD (1983) - *Actualisation de l'étude des ressources en eau du Sahara septentrional*. Rapport final du projet PNUD RAB/80/011 "Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du Nord". 490 pp., New York, USA.
- SAPPÀ G. & ROSSI M. (2008) - *Effetti locali dello sfruttamento del Sistema Acquifero del Sahara Settentrionale*. Rend. Online Soc. Geol. It., **3**.
- SIEGFRIED T. & KINZELBACH W. (2002) - *Management of Internationally Shared Groundwater Resources in Semiarid and Arid Regions*. The Northern African Aquifer System. IAHS Publ., no.278.
- VV.AA. (2003) - *Système aquifère du Sahara Septentrional SASS; Gestion commune d'un bassin transfrontière "The Northern Sahara Aquifer System NWSAS; the cross border aquifer shared management*. Rapport OSS, Tunis, Tunisie.
- ZAMMOURI M., SIEGFRIED T., EL-FAHEM T., KRIÅA S. & KINZELBACH W. (2007)- *Salinization of groundwater in the Nefzawa oases region, Tunisia: results of a regional-scale hydrogeologic approach*. Hydr. J., **15** (7): 1357-1375. DOI : 10.1007/s10040-007-0185-x.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was funded and carried out in the frame of the Italian-Tunisian Bilateral Cooperation Agreement named "Sahara Sud Program". The authors want to gratefully acknowledge the precious scientific support received by Prof. M.Besbes of the Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis (ENIT) who performed all the essential operations on the SASS 2000 model.

Received April 2010 - Accepted July 2010