

## MODELLAZIONE DEGLI ACQUIFERI CARSICI COSTIERI A SUPPORTO DELLA GESTIONE: IL CASO DEL SALENTO (PUGLIA)

### MODELLING OF COASTAL KARST AQUIFERS FOR MANAGEMENT SUPPORT: A CASE STUDY OF SALENTO (APULIA, ITALY)

ANDREA ROMANAZZI(\*) & MAURIZIO POLEMIO(\*\*)

(\*) Ph.D. Student - Università degli Studi di Bari "A. Moro" - Dipartimento di Scienze Agro-Ambientali e Territoriali - DISAAT - Bari, Italy

E-mail: romanazziandrea@gmail.com

(\*\*) Ricercatore CNR - IRPI - Bari, Italy

#### RIASSUNTO

A scala globale si assiste a una sempre maggiore concentrazione della popolazione nelle aree costiere. Tale tendenza si associa alla crescente domanda di acqua che viene prevalentemente soddisfatta utilizzando le risorse idriche locali, soprattutto sotterranee. Il fenomeno dell'intrusione marina diviene così sempre un più serio problema per la maggior parte degli acquiferi costieri le cui risorse idriche sono soggette a non trascurabili rischi di degradazione quali-quantitativa. Il problema è particolarmente rilevante nel caso degli acquiferi carsici, come osservato in diversi paesi del Mediterraneo e in alcune regioni italiane (Friuli, Sardegna, Sicilia e Puglia). Scopo della nota è descrivere la ricerca svolta per conseguire la concettualizzazione e la modellazione numerica di un acquifero carsico costiero significativo per la rilevanza delle acque sotterranee e per l'intensità delle modificazioni dei prelievi, in assenza di una politica gestionale scientificamente basata. Selezionata l'area di studio (Salento, Puglia), sono state caratterizzate le modificazioni occorse nell'arco di 80 anni, dagli inizi dello sfruttamento della falda. Complesse acquisizioni e elaborazioni di dati climatici, idrologici, geologici, idrogeologici e agrocolturali sono divenuti input per una modellazione numerica del flusso idrico e del trasporto a densità variabile, utilizzando i codici di calcolo MODFLOW e SEAWAT. In particolare sono state definite le condizioni di flusso idrico sotterraneo in condizioni naturali, mediante una simulazione in condizioni stazionarie. Tale simulazione ha permesso di definire l'entità delle risorse e il campo della salinità ovvero la qualità delle acque sotterranee allorquando i prelievi erano nulli o trascurabili (anni 30 del XX secolo). Le realizzazioni di simulazioni in transitorio si sono concentrate nel ventennio 1980-1999, con il fine di quantificare gli effetti dei crescenti prelievi per scopi potabili, industriali e soprattutto irrigui. La validazione dei risultati è stata accurata grazie alla disponibilità di dati storici piezometrici provenienti dalle banche dati del CNR IRPI-BA. Il quadro complessivo dei risultati dimostra che il livello di utilizzo delle acque sotterranee del Salento e le modalità di prelievo non razionali richiedono un'inversione di tendenza che si basi su criteri gestionali definiti a scala di acquifero, verificati con un modello numerico, le cui potenzialità sono mostrate da questa esperienza scientifica.

#### SUMMARY

We are witnessing an increasing concentration of the human population in coastal areas on a global scale. This trend is associated with a growing demand for water, which is satisfied mainly by using local water resources and groundwater in particular. The phenomenon of seawater intrusion is therefore becoming a more serious problem for most coastal aquifers, whose water resources are obviously at risk of being subject to considerable degradation of quality and quantity. The problem is particularly relevant to karst aquifers, prevalent in the entire Mediterranean area and some Italian regions (Friuli, Sardinia, Sicily and Apulia). The purpose of this paper is to describe research that was performed to conceptualise and numerical model a coastal karst aquifer. This research is significant because of the importance of groundwater resources and the high intensity of changes made to well discharge in the absence of scientifically based management when considering effects on quantity and quality. Salento (Apulia) was selected as a case study, and the changes that occurred over 80 years, starting from the beginning of its exploitation, were characterised. Complex acquisitions, together with climatic, hydrological, geological and agricultural data processing, served as the inputs for a numerical model of variable-density flow and transport created using MODFLOW and SEAWAT codes. In particular, groundwater flow under natural conditions was defined using a simulation in a steady-state condition. Through this simulation, it was possible to define the natural resource quantities and the salinity field, or the quality of groundwater that existed when withdrawals were null or negligible (during the 1930s). The transient simulations that we carried out were focused on the twenty years between 1980 and 1999, with the goal of quantifying the effects of the increased discharge used for drinking, industrial and especially irrigation purposes. The validation of the results was accurate due to the availability of high-quality historical piezometric data stemming from the IRPI-BA databases. The overall results demonstrated that the level of groundwater usage from Salento and the increasing discharge trend, due mainly to the global effect of individual water demand, will require a reversal of trends based on management criteria, defined on an aquifer scale and verified with a numerical model, whose potential can be shown by scientific expertise.

**TERMINI CHIAVE:** *intrusione marina, modellazione idrogeologica, gestione acquifero, acquifero carsico costiero*

## INTRODUZIONE

Gli acquiferi carsici, includendo tra questi quelli costieri, sono tra le principali fonti di risorse idriche di elevata qualità. Si stima che il 25% della popolazione mondiale utilizzi tali risorse a scopi idropotabili, in particolare nei paesi del sud-est asiatico, negli Stati Uniti e nei paesi del bacino del Mediterraneo (VAN BEYNEN *et alii*, 2012). Per quest'ultimi le risorse idriche sotterranee hanno una grande rilevanza strategica per supportare non solo le esigenze della sempre più vaste aree urbane, ma anche le attività economiche agricole e turistiche. Queste esigenze spesso entrano in conflitto con le caratteristiche di tali acquiferi, altamente suscettibili al sovrasfruttamento e ai cambiamenti naturali ed antropici (COST, 2003). L'intrusione marina può enfatizzare i rischi di degradazione qualitativa delle acque sotterranee dovuti alla vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi carsici, in genere elevati (POLEMIO *et alii*, 2010), favorendo la salinizzazione. Primo effetto di tale fenomeno è la riduzione della disponibilità di acqua dolce (una soluzione al 3% di acqua marina comporta un incremento della salinità di circa 1,2 g/l, tale da rendere l'acqua non potabile, con riferimento alla normativa italiana, e inutilizzabile per numerose colture). In realtà la salinizzazione per intrusione marina può modificare la chimica dei suoli, riducendo la loro fertilità (DARWISH *et alii*, 2005) nonché, oltre all'impatto socio-economico, può incidere negativamente sull'ambiente, con effetti sugli ecosistemi costieri e sulla flora locale (SAHA *et alii*, 2011). Per quanto riguarda i paesi del bacino del Mediterraneo, problematiche connesse all'intrusione marina si verificano per gli acquiferi carsici costieri di Spagna, Francia, Slovenia, Croazia, Grecia, Turchia, nonché in Italia (EEA, 1999; BARROCU, 2003; COST, 2005; DAVRAZ *et alii*, 2009; CUSTODIO, 2010). Per quanto riguarda l'Italia, acquiferi costieri carsici sono presenti in Friuli, Sardegna, Sicilia, Lazio, Campania e Puglia. In particolare, la Puglia, con i suoi 800 km di costa, è la regione con i più vasti acquiferi carsici costieri della nazione. Il fenomeno preoccupa per il prossimo futuro soprattutto alla luce dei recenti cambiamenti climatici che si estrinsecano nella riduzione delle precipitazioni meteoriche e nell'incremento della temperatura, oltre alla tendenza all'innalzamento del livello del mare, fattori tutti questi che concorrono ad enfatizzare gli effetti dell'intrusione marina, come verificato nel caso dell'Italia meridionale (POLEMIO & CASARANO, 2008; LAMBECK *et alii*, 2011). In Puglia il carsismo rende la regione estremamente povera di acque superficiali ma ricca di risorse idriche sotterranee di importanza strategica per lo sviluppo economico-sociale, essendo le uniche in grado di soddisfare la domanda diffusa delle attività produttive, in prevalenza agricole e turistiche. Le variazioni delle condizioni naturali che determinano la ricarica e delle condizioni al contorno nonché la crescente domanda idrica, non adeguatamente gestita, hanno contribuito non poco a un preoccupante degrado quali-quantitativo delle risorse idriche pugliesi, degrado il cui trend negativo non sembra esaurirsi (POLEMIO, 2000; POLEMIO & LIMONI, 2001; BARROCU, 2003; MAGGIORE & PAGLIARULO, 2003; COTECCHIA *et*

**KEY WORDS:** *seawater intrusion, hydrogeological modelling, groundwater management, coastal karst aquifer*

## INTRODUCTION

Karst aquifers, including coastal karst aquifers, are among the main sources of high-quality water for humans. It is estimated that 25% of the world's population uses such resources for drinking purposes, especially in Southeast Asia, the United States and Mediterranean countries (VAN BEYNEN *et alii*, 2012). Groundwater resources are of strategic importance in Mediterranean countries, to support not only the needs of increasingly large urban areas but also agricultural and tourism activities. These needs are often in conflict with the characteristics of these aquifers, which are highly susceptible to overexploitation and natural and anthropic changes (COST, 2003). Seawater intrusion can emphasise the risk for groundwater quality degradation due karst aquifers' vulnerability to pollution, which is generally high (POLEMIO *et alii*, 2010) and favours salinisation. A reduction in the availability of freshwater is the first effect of this phenomenon (a 3% solution of seawater leads to a salinity increase of approximately 1.2 g/l, rendering the water unfit for drinking according to Italian legislation and unusable for many crops). In fact, salinisation due to seawater intrusion can change the chemistry of soils, reducing their fertility (DARWISH *et alii*, 2005), and, apart from its socioeconomic impact, can negatively influence the environment by affecting coastal ecosystems and local flora (POLEMIO & LIMONI, 2004; SAHA *et alii*, 2011). In the Mediterranean countries, problems related to seawater intrusion have occurred in the coastal karst aquifers of Spain, France, Slovenia, Croatia, Greece, Turkey, and Italy (EEA, 1999; BARROCU, 2003; COST, 2005; DAVRAZ *et alii*, 2009; CUSTODIO, 2010). Coastal karst aquifers exist in different Italian region, Friuli, Sardinia, Sicily, Lazio, Campania, and Apulia. Apulia, with its 800 km of coastline, has the most extensive coastal karst aquifers in the country. The salinisation phenomenon is causing concern about the near future, above all in relation to recent climate change that has led to rainfall reduction and increases temperature that have caused sea levels to rise, both of which have contributed to increasing the effects of seawater intrusion in Southern Italy (POLEMIO & CASARANO, 2008; LAMBECK *et alii*, 2011). Apulia's karst phenomena make this region extremely poor in surface water but rich in groundwater resources, which have proved to be of strategic importance for economic and social development because they can meet the widespread demands of productive activities, which are mainly in the fields of agriculture and tourism. The variations in natural conditions that determine the recharge and boundary conditions, along with the growing demand for water that has not been properly managed, have greatly contributed to a worrying degradation in the quality and quantity of Apulian water resources, a trend that continues today (POLEMIO, 2000; POLEMIO & LIMONI, 2001; BARROCU, 2003; MAGGIORE & PAGLIARULO, 2003; COTECCHIA *et alii*,

alii, 2005; POLEMIO *et alii*, 2009; WERNER *et alii*, 2012). Diviene così estremamente importante la definizione di nuove strategie di gestione delle risorse idriche sotterranee (COTECCHIA & POLEMIO, 1998; POLEMIO, 2000; POLEMIO *et alii*, 2009a), strategie da validarsi con l'utilizzo di codici di calcolo per la simulazione del fenomeno. Scopo di questo studio è la concettualizzazione idrogeologica di una vasta porzione di acquifero carsico costiero. Sulla base di tale concettualizzazione, è stata perseguita l'implementazione di un modello numerico del flusso idrico sotterraneo che tenga conto degli effetti della densità dovuti alla salinizzazione. L'obiettivo posto alla modellazione è stato quello dell'accurata caratterizzazione delle variazioni di quantità e qualità osservate in 80 anni, a partire dagli anni Trenta del secolo scorso, che diverrà la base per la definizione di scenari predittivi che siano di supporto alla definizione di criteri di gestione razionali e sostenibili a lungo termine.

**INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI STUDIO**

La Puglia può essere suddivisa in quattro strutture idrogeologiche: Tavoliere, Gargano, Murgia e Salento, le ultime tre di natura carsica (Fig.1).

In particolare Murgia e Salento sono molto simili dal punto di vista geologico, costituite entrambe da rocce calcaree e dolomitiche del Mesozoico, ma presentano un comportamento idrogeologico differente a causa delle diverse litofacies, del grado di fratturazione e carsismo e delle condizioni al contorno molto diverse (COTECCHIA *et alii*, 2005; POLEMIO *et alii*, 2009b). L'elemento morfostrutturale che segna il limite

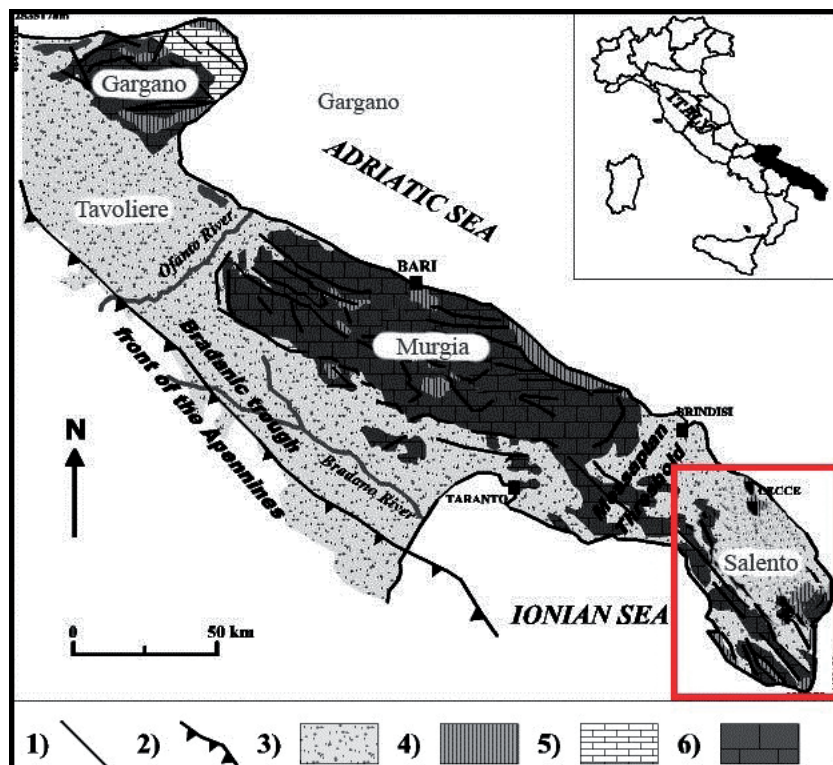
2005; POLEMIO *et alii*, 2009; WERNER *et alii*, 2012). New management strategies for groundwater resources are therefore extremely important (COTECCHIA & POLEMIO, 1998; POLEMIO, 2000; POLEMIO *et alii*, 2009a) and must be validated by the use of numerical models for the simulation of the relevant phenomena. This study was based on the hydrogeological conceptualisation of a wide portion of a coastal karst aquifer. On this basis, the implementation of a numerical model of the groundwater flow was carried out that accounted for the effects of density due to salinisation. The goal of the modelling was to create an accurate characterisation of the variations in quantity and quality observed over a period of 80 years, starting in the 1930s, and the result forms a basis for the definition of predictive scenarios that can support the definition of rational and sustainable long-term management criteria.

**HYDROGEOLOGICAL CONTEXT OF THE STUDY AREA**

Apulia can be divided into four hydrogeological structures: Tavoliere, Gargano, Murgia and Salento. The last three are of karst origin (Fig. 1).

Murgia and Salento are geologically very similar. Both are composed of dolomite and calcareous rocks of the Mesozoic but have differing hydrogeological behaviour due to different lithofacies, degree of fracturing and karst, and boundary conditions (COTECCHIA *et alii*, 2005; POLEMIO *et alii*, 2009b). The morphostructural element marking the boundary between Murgia and Salento is called "Soglia Messapi-

Fig. 1 - Schema geologico 1 Faglia, 2 Fronte degli Apennini, 3 Coperture clastiche recenti (Pliocene-Pleistocene), 4 Rocce carbonati che bioclastiche (paleogene) e calcareniti (Miocene), 5 Rocce carbonati che (Giurassico Superiore - Cretaceo), 6 Piattaforma carbonatica (Giurassico Superiore - Cretaceo). Linea rossa: area di studio  
 - Geological scheme. 1 Fault, 2 Front of the Apennines, 3 Recent clastic cover (Pliocene- Pleistocene), 4 Bioclastic carbonate rocks (Paleogene) and calcarenites (Miocene), 5 chert-carbonate rocks (Upper Jurassic- Cretaceous), 6 carbonate platform rocks (Upper Jurassic- Cretaceous). Red Line: study area



Murgia-Salento è rappresentato dalla Soglia Messapica, una paleostruttura sepolta che mette in contatto laterale masse rocciose differenti tra loro per fratturazione e carsismo e lungo la quale la Penisola salentina è in condizione di drenare le acque sotterranee della Murgia (COTECCHIA, 1979). Non esistendo un limite idrogeologico definito tra le due contigue strutture idrogeologiche e soprattutto per delimitare un'area di studio in cui si possano considerare nulli i travasi o perdite provenienti dalla Murgia, è stata ricostruita la superficie piezometrica media dell'acquifero profondo (includendo per intero Murgia e Salento) utilizzando dati provenienti da serie storiche piezometriche che si estendono dagli anni trenta agli anni settanta, raccolti nei data-base del CNR-IRPI e provenienti da diverse fonti (POLEMIO *et alii*, 2011). Sulla base dell'andamento delle isopiezometriche, è stato tracciato il limite a flusso nullo che si estende dalla costa ionica a quella adriatica, delimitando così l'area di studio. L'area individuata ha una estensione di 2328 km<sup>2</sup> e un perimetro costiero di 175 km con un morfologia tabulare a Horst e Graben, costituita dai calcari mesozoici e da coperture cenozoiche interposte tra questi rilievi (Fig. 2).

I calcari del Cretaceo superiore sono attribuiti ad una successione carbonatica di mare basso nota col nome di *Calcare di Altamura*, costituita prevalentemente da calcari micritici bianchi a grana fine e media, ben litificati e stratificati. Sono molto ricorrenti le strutture biogeniche come le stromatoliti e bancate biostromali a rudiste. Si alternano inoltre dolomie grigio-nerastre organizzate in strati e banchi. L'ambiente di deposizione è riferibile ad una piattaforma interna. Le unità paleogeniche affioranti nell'area di studio sono rappresentate da successioni a prevalentemente composizione calcarenitica, di ambiente di piattaforma. Queste successioni sono riconducibili a due unità stratigrafiche, tra loro sovrapposte: *Calcari di Castro* (Eocene-Oligocene) e *Calcareniti di Porto Badisco* (Oligocene). I *Calcari di Castro* sono rappresentati da calcari bioclastici talora porcellanacei e subcristallini, di colore grigio chiaro, a frattura generalmente concorde. Le *Calcareniti di Porto Badisco* sono rappresentate da un calcare bioclastico, di norma poroso e tenero, a stratificazione poco evidente, con abbondanti fossili, tra cui *Melobesie* e in minore misura *Coralli* (Rossi, 1969). Al tetto dei calcari preneogenici si rinvengono trasgressivamente le calcareniti e le calcilutiti mioceniche, rappresentate dalla *Pietra Leccese* e dalle *Calcareniti di Andrano* (CIARANFI *et alii* 1988). La *Pietra leccese* è costituita da calcareniti fini e da calcilutiti, con abbondanti microfaune planctoniche. La base è contrassegnata da un conglomerato con ciottoli calcarei e da depositi continentali argillosi grigio-giallastri o nerastri con livelli di lignite. Le *Calcareniti di Andrano* sono costituite da calcari molto fossiliferi (*Molluschi*, *Echinidi* e *Coralli*) con abbondante matrice e da calcareniti e calciruditi in strati di 30 - 40 cm o in banchi di oltre 1m; il loro spessore raggiunge diverse decine di metri (CIARANFI *et alii*, 1988). La formazione plio-pleistocenica è rappresentata dalle *Calcareniti del Salento* (Pleistocene inferiore). Tale formazione è costituita da calcareniti grossolane avana-giallastre più o meno friabili e porose classificabili come biolititi, biospariti e biomicriti e da calcari detritico-organogeni compatiti. Talora a questi litotipi si alternano livelli di sabbie organogene.

ca", a buried paleostructure that laterally connects rock masses that differ due to fracturing and karst phenomena, and along which the Salento peninsula drains the groundwater of the Murgia (COTECCHIA, 1979). Because there is no defined hydrogeological limit between the two adjacent hydrogeological structures, and for the purpose of delimiting a study area in which the outflow and losses from the Murgia could be considered null, the medium piezometric surface of the deep aquifer was reconstructed (including the entire Murgia and Salento) using the data stemming from piezometric historical series extending from the 1930s to the 1970s and collected in the CNR-IRPI database (POLEMIO *et alii*, 2011). Following the pattern of the piezometric contour lines, the null flow limit that extends from the Ionian to the Adriatic coast was traced, delimiting the study area, which extends

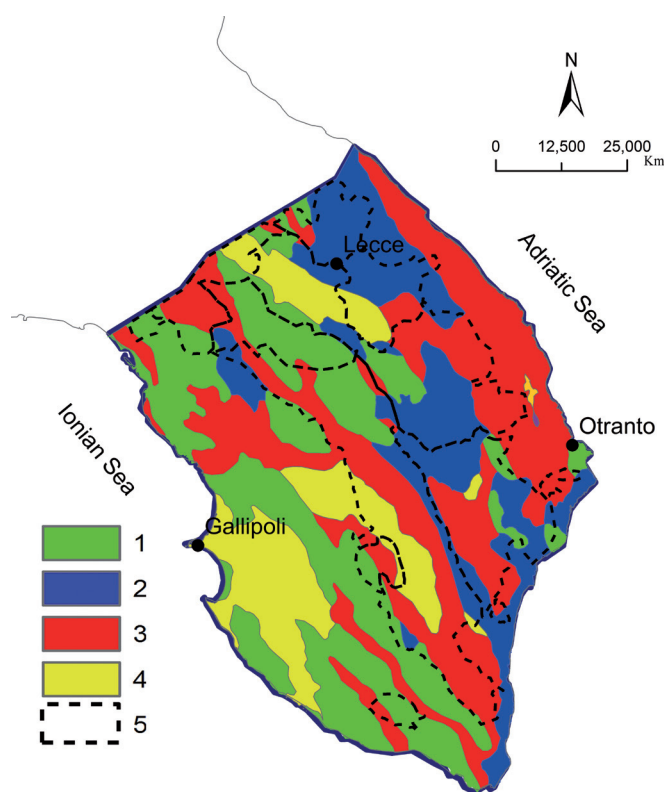


Fig. 2 - Carta dei complessi idrogeologici: 1) Calcari (che includono i calcari preneogenici del Calcare di Altamura, del Calcare di Castro e della Calcarenite di Porto Badisco) 2) calcareniti e calcilutiti (riferibili alla Pietra Leccese e alle Calcareniti di Andrano) 3) calcareniti (riferibili alle Calcareniti del Salento o di Gravina) 4) sabbie (riferibili ai Depositi marini terrazzati) 5) con il tratteggio sono individuate le aree endoreiche

- Map of hydrogeological complexes: 1) Limestones (including pre-neogene limestones of Altamura Limestone, Castro Limestone and Porto Badisco Calcarenite) 2) calcarenites and calcilutites (referable to Lecce Stone and Andrano Calcarenites) 3) calcarenites (referable to Gravina Calcarenites or Salento Calcarenites) 4) sands (referable to marine terrace deposits) 5) the dotted line identifies the endoreic areas

Sulla base di una serie di considerazioni stratigrafiche e ambientali si ritiene che la formazione delle *Calcareniti del Salento* possa essere assimilata alle *Calcareniti di Gravina* (CIARANFI *et alii*, 1988). In continuità di sedimentazione sulle *Calcareniti del Salento* (o di *Gravina*) troviamo la formazione delle *Argille sub-appennine* (Pleistocene inferiore). Sono depositi costituiti da argille grigio-azzurre, caratterizzate da intercalazioni di marne e/o sabbie calcaree, non affioranti nell'area di studio. Infine l'area è caratterizzata dalla presenza in affioramento dei depositi pleistocenici sabbioso-calcarenitici costituiti da una successione di sedimenti marini detti *Depositi marini terrazzati* (Pleistocene medio e superiore) (RICCHETTI, 1972) sui quali si rinvengono, a luoghi, coperture recenti di origine eluviale e colluviale. In tale contesto geologico, possono essere distinti cinque complessi idrogeologici: calcari, calcareniti e calcilutiti, calcarenite, argille e sabbie. I calcari includono le successioni calcaree pre-neogene, che fanno riferimento sostanzialmente a i *Calcari di Altamura*, i *Calcari di Castro* e le *Calcareniti di Porto Badisco*, che, raggruppate nello stesso complesso idrogeologico, per la similarità delle caratteristiche idrogeologiche, presentano alto grado di permeabilità per carsismo e fratturazione. Tale complesso è la sede dell'acquifero profondo e funge da basamento dell'intera regione fino a profondità di migliaia di metri sotto il livello del mare (AGIP, 1977). Il complesso idrogeologico delle "calcareniti e calcilutiti", sostanzialmente rocce mioceniche della *Pietra Leccese* e delle *Calcareniti di Andrano*, con spessori variabili tra i 50 e i 150 metri, è caratterizzato da un grado di permeabilità medio-basso. Il complesso idrogeologico "calcarenite" include i depositi plio-pleistocenici, rappresentati dalla *Calcarenite di Gravina*, che sono caratterizzati da un grado medio di permeabilità e spessori variabili tra 50 e 100 metri. Le "argille", riferibili alle Argille Subappennine, possono essere classificate come praticamente impermeabili (permeabilità molto bassa). Infine, il complesso idrogeologico "Sabbie", riferibile ai Depositi marini terrazzati, presenta grado di permeabilità da medio-alto a medio e spessori modesti, fino ad un massimo di 50 metri. Nel complesso idrogeologico dei calcari la falda idrica sotterranea risulta in pressione laddove il complesso delle calcareniti e calcilutiti si spinge al di sotto della quota mare, in particolare nel settore orientale della penisola. Sempre nei calcari, a luoghi il flusso idrico sotterraneo avviene in pressione nell'ambito della stesso complesso, in relazione al diverso grado di fratturazione e carsismo, ed è freatico nelle restanti parti, in particolare man mano che ci si approssima alla costa (COTECCHIA & POLEMIO, 1999; MARGIOTTA & NEGRI, 2005). Il gradiente piezometrico è in genere basso (0,3-0,5% quale valore medio), le quote piezometriche sono in genere basse con quote massime tra i 3-5 m s.l.m. Laddove non affiorano i calcari, si distinguono alcuni acquiferi superficiali, spesso di modesta estensione e in genere interconnessi con l'acquifero profondo (CALÒ *et alii*, 1992; MAGGIORE & PAGLIARULO, 2003). Tali falde idriche sotterranee si rinvengono in relazione al complesso idrogeologico delle sabbie, laddove hanno a letto il complesso delle argille, e secondariamente delle calcareniti e calcilutiti.

for 2328 km<sup>2</sup> and has a coastline of 175 km. This area has, like the entire Salento, a Horst and Graben tabular morphology, the reliefs of which are constituted by Mesozoic limestones (Fig. 2).

The Upper Cretaceous limestones are attributed to a shallow-marine carbonate succession known as *Altamura Limestone*, composed mainly of average and fine-grained white micritic limestones that are well lithified and stratified. Biogenic structures such as stromatolites and rudist biostrome banks occur frequently and alternate with blackish-grey dolomites that are organised in layers and banks. The environment of the deposition can be related to an inner platform. The Paleogene unit outcroppings in the study area are represented by successions that have a mainly calcarenite platform environment composition. These successions are related to two overlapping stratigraphic units: *Castro Limestone* (Eocene-Oligocene) and *Porto Badisco Calcarenites* (Oligocene). *Castro limestones* are represented by bioclastic limestones that are light grey with a generally conchoidal fracture. *Porto Badisco calcarenites* are represented by a bioclastic limestone, usually porous and soft, with minimally evident stratification and abundant fossils, including corals to a lesser extent. Miocene transgressive calcarenites and calcilutites are found at the top of the pre-Neogene limestones and are represented by *Pietra Leccese* (Lecce Stone) and *Andrano Calcarenites* (CIARANFI *et alii*, 1988). *Pietra Leccese* consists of fine-grained calcarenites and calcilutites, with abundant planktonic microfaunas. The bottom is marked by a conglomerate of calcareous pebbles and continental clay deposits that are yellowish or blackish-grey in colour, with layers of lignite. *Andrano Calcarenites* consist of very fossiliferous limestones (molluscs, echinoids and corals) with abundant matrices and calcarenites and calcirudite in layers of 30-40 cm or in banks of more than 1 m; their thickness reaches several tens of meters (CIARANFI *et alii*, 1988). The Plio-Pleistocene formation is represented by *Salento calcarenites* (Lower Pleistocene), more or less friable and porous, coarse, yellowish-brown calcarenites, which are classified as biolites, biosparites and biomicrites and compact organogenic-detrital limestone. Sometimes, these lithotypes alternate with levels of organogenic sands. Based on a number of environmental and stratigraphic considerations, it is believed that the formation of *Salento Calcarenites* may be assimilated to the *Gravina Calcarenites* (CIARANFI *et alii*, 1988). The formation of *Sub-Appennine clays* (Lower Pleistocene) is found in continuity with *sedimentation on Salento* (or *Gravina*) Calcarenites. These deposits are composed of grey-blue clays, characterised by intercalations of marl and/or calcareous sands, that are not found in outcroppings in the study area. Finally, this area is characterised by outcroppings of Pleistocene sandy-calcarenite deposits made up of a *succession of marine sediments*, called terraced marine deposits (Middle and Upper Pleistocene) (RICCHETTI, 1972), on which recent covers of eluvial and colluvial origin can be found in places. In this geological context, five hydrogeological complexes can be distinguished: limestones, calcarenites and calcilutites, calcarenite, clays and sands. The limestones include the pre-Neogene limestone successions, which refer mainly to the *Altamura Limestone*, *Castro Limestone* and *Porto Badisco Calcarenites*. These varieties are

Gauge	N.	T (°C)	P (mm/y)	Altitude (m asl)
Copertino	1	-	662	34
Galatina	2	-	736	73
Gallipoli	3	17.2	580	12
Lecce	4	16.7	717	48
Maglie	5	-	773	82
Minervino di L.	6	16.3	843	98
Nardò	7	16.9	634	43
Otranto	8	16.8	711	27
Presicce	9	16.3	836	114
Ruffano	10	-	846	125
San Pancrazio	11	-	671	36
San Pietro Vern.	12	-	634	62
S. Maria di Leuca	13	16.8	724	65
Taviano	14	16.9	701	61
Vignecastri	15	16.2	820	94

Tab. 1 - Nome della stazione, numero identificativo, altitudine, media annuale delle precipitazioni (P), e delle temperature (T) dal 1925 al 1975  
 - Gauge name, number, altitude and mean annual precipitation (P) and temperature (T) from 1925 to 1975

## IL BILANCIO IDROLOGICO

Negli acquiferi carsici il bilancio idrologico è particolarmente condizionato dal ruolo delle forme carsiche epigee e dalla presenza di aree endoreiche, fattori che riducono non poco il deflusso superficiale complessivo a favore dell'infiltrazione efficace e quindi della ricarica delle falde idriche sotterranee. I fattori che concorrono a determinare l'infiltrazione efficace e dunque la ricarica sono molteplici, tra i principali troviamo: la distribuzione spaziale e temporale della piovosità, la distribuzione delle temperatura atmosferica, le caratteristiche idrogeologiche delle formazioni affioranti e l'acclività. Per conseguire una stima accurata della ricarica, il territorio è stato discretizzato in celle utilizzando un DEM ASTER con risoluzione di 25 metri, celle per ciascuna delle quali sono stati sviluppati i calcoli idrologici nel seguito descritti. Sono stati utilizzati dati mensili dal 1915 al 2000 relativi a 15 stazioni pluviometriche, di cui 9 termometriche, ricadenti nell'area di studio o nell'immediato intorno (Fig. 3). Sulla base delle conoscenze del trend climatico in Italia meridionale (POLEMIO &

grouped in the same hydrogeological complex because of the similarities in their hydrogeological characteristics, and they have a high degree of permeability for karst and fracturing. This complex corresponds to the deep aquifer and is the basement of the entire region, up to thousands of meters below sea level (AGIP, 1977). The hydrogeological complex of "calcarenites and calcilutites", which is substantially composed of the Miocene rocks *Pietra Leccese* and *Andrano Calcarenites*, with thicknesses varying between 50 and 150 meters, is characterised by a medium-low permeability degree. The "calcarenite" hydrogeological complex includes the Plio-Pleistocene deposits, represented by *Gravina Calcarenite*, which are characterised by an average permeability degree and thicknesses varying from 50 to 100 m. The "clays" complex, represented by Sub-Apennine clays, can be classified as practically impermeable (very low permeability). Finally, the hydrogeological complex of "sands", represented by terraced marine deposits, has a permeability degree ranging from medium to medium-high and modest thicknesses of up to 50 m. The groundwater aquifer is under pressure in the limestone hydrogeological complex, in the top of which there is a complex of calcarenites and calcilutites, below or close to sea level, particularly in the eastern part of the peninsula. The groundwater flow in the limestones takes place under pressure within the same complex in some places, in relation to the different degrees of fracturing and karst phenomena, and is phreatic in the remaining parts, particularly approaching the coast (COTECCHIA & POLEMIO, 1999; MARGIOTTA & NEGRI, 2005). The piezometric gradient is generally low (mean value of 0.3-0.5%), and the piezometric heads are also low, with maximum altitude values lower than 5 m a.s.l. Where limestones do not outcrop, some shallow aquifers can be distinguished and are often limited in extension and generally interconnected with the deep aquifer (CALÒ *et alii*, 1992; MAGGIORE & PAGLIARULO, 2003). These aquifers occur in the hydrogeological complex of sands, mainly where the clays complex lies at its bottom, but also occur in the calcarenites and calcilutites complex.

## HYDROLOGICAL BALANCE

The hydrological balance in karst aquifers is particularly influenced by the role of epigeal karst forms and the presence of endorheic areas. These factors reduce total surface runoff and increase effective infiltration and hence aquifer recharge. The factors contributing to effective infiltration and recharge are manifold: the spatial and temporal distribution of rainfall, the distribution of atmospheric temperature, the hydrogeological characteristics at the ground surface, and acclivity are the main factors. To obtain an accurate evaluation of recharge, the area was divided into cells using an ASTER DEM with a resolution of 25 m. The hydrological calculations described below were developed for each of these cells. Monthly data from 1915 to 2000, relating to 15 rain gauges (9 of which were thermometric), in the study area or its immediate surroundings were used (Fig. 3). Based on knowledge of climate trends in southern Italy (POLEMIO & CASARANO, 2008) and the actual availability of time series free from gaps, the 1925-1975

CASARANO, 2008) e dell'effettiva disponibilità di serie storiche sceve da lacune, è stato selezionato il periodo 1925-1975 per determinare valori medi mensili ed annui per caratterizzare i fattori idrologici da applicare nelle simulazioni in condizioni stazionarie (Tab. 1).

Per il calcolo dei valori di piovosità e temperatura sono state effettuate regressioni lineari multiple, in funzione della quota (q) e della distanza dall'Adriatico (d),  $P=f(q,d)$  e  $T=f(q,d)$  con un valore di  $R^2$  rispettivamente pari a 0.94 e 0.93. Da tale analisi si è così dedotto che i valori delle piovosità media annua, pari a 730 mm quale media spaziale nell'area, in buon accordo con altre fonti (COST, 2005). La piovosità aumenta nell'area procedendo da NW a SE, mentre la temperatura varia da punto a punto da 16 a 17.5 °C. Il calcolo dell'evapotraspirazione reale con il metodo Turc con le temperature modificate (TURC, 1974), già applicato in Puglia con ottimi risultati nel caso dell'unità idrogeologica carbonatica del Gargano (POLEMIO *et alii*, 2000). Cella per cella, l'evapotraspirazione reale media annua è risultata compresa tra 473 e 602 mm, con un valore medio di 553 mm nell'area di studio, pari al 75% delle precipitazioni. La piovosità efficace, pari alla differenza tra le piovosità l'evapotraspirazione reale, è stata quindi calcolata cella per cella. Per il calcolo dell'infiltrazione efficace, si è tenuto conto anche del-

periodo was selected to determine the monthly and annual average values and characterise those hydrological factors to be applied in the steady-state simulations (Tab. 1).

Multiple linear regressions were carried out for the values of rainfall and temperature as a function of altitude (q) and distance from the Adriatic Sea (d),  $P = f(q, d)$  and  $T = f(q, d)$ , with  $R^2$  values equal to 0.94 and 0.93, respectively. From this analysis, the average annual rainfall value was equal to 730 mm as a space average in the area. This value is in accordance with other sources, such as COST (2005), which estimates that the average rainfall in the entire Salento is 700 mm, including portions of the territory north of the study area with less rainfall. The rainfall increased in the area moving from NW to SE, while the temperature varied from point to point, ranging from 16 to 17.5 °C. The real evapotranspiration calculation following the Turc method with modified temperatures had already been applied in Apulia, with excellent results for the carbonate rocks in the hydrogeological unit of Gargano (TURC, 1974; POLEMIO *et alii*, 2000). Cell by cell, the average annual real evapotranspiration ranged between 473 and 602 mm, with an average value of 553 mm in the study area, 75% of which was rainfall. The effective rainfall, which is the difference between the real or effective rainfall and the real evapotranspiration, was then calculated cell by cell, and the presence of endorheic basins was taken into account when calculating the effective infiltration. The study area is characterised by the presence of an extended surface karst morphology that can create a direct link between rainwater and the deep karst system. Endorheic areas were thus bounded in the GIS environment, which analysed the altimetry, the geomorphological cartography (RICCHETTI, 1988) and all of the information derived from the available geological and topographical cartography. An interval of variability for the effective infiltration coefficient was assigned to each hydrogeological complex based on the bibliographical knowledge and the authors' direct experiences (COTECCHIA *et alii*, 1990; POLEMIO *et alii*, 2000; CIVITA, 2005). For the endorheic areas, a unit value of the effective infiltration coefficient was assigned regardless of the hydrogeological complex. The variation between the minimum and the maximum value of the effective infiltration coefficient for each cell was determined using an inverse linear regression with the slope based on the outcropping complex. The average value of the effective infiltration coefficient in the study area was 0.6 (the resulting average values for each complex were 0.9 for limestones, 0.6 for calcarenites and calcilitites, 0.7 for Salento calcarenites and 0.4 for sands), in full accordance with the results from COST (2005). The infiltration value was determined in the GIS environment, multiplying the effective rainfall by the value of the effective infiltration coefficient (Fig. 3).

Due to the lack of surface water resources and irrigation networks fed with external sources, only groundwater is used for irrigation in this region. The exact quantity of groundwater discharge for irrigation purposes is not directly known due to the high number of unauthorised wells and because the authorised discharge is not monitored. The irrigation discharge water has only been es-

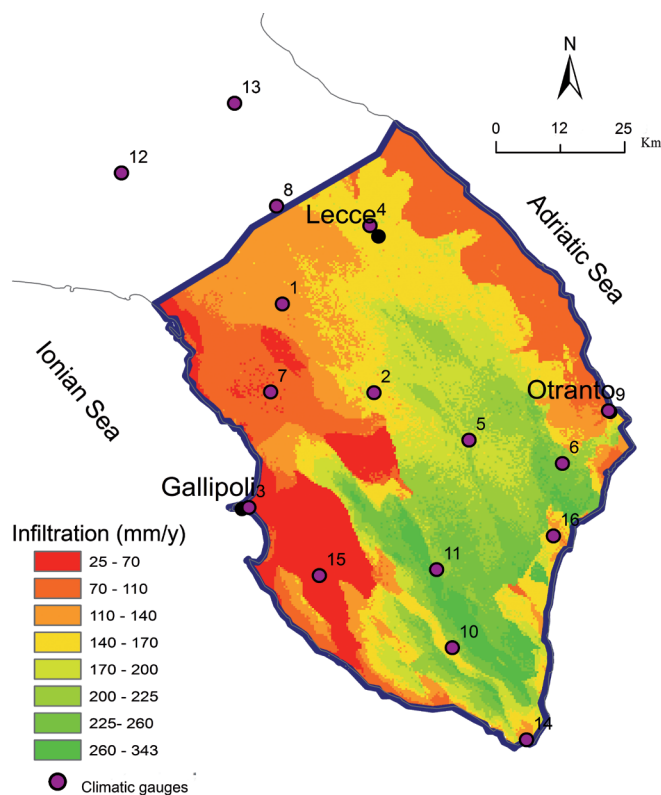


Fig. 3 - Mappa dell'infiltrazione efficace (mm/a). Sono riportate le 15 stazioni termopluviometriche (cfr. Tab.1)  
 - Map of the effective infiltration (mm/y). It shows the 15 thermo-pluviometric stations (see Tab. 1)

la presenza di bacini endoreici. L'area di studio è caratterizzata dalla presenza di una estesa morfologia carsica superficiale in grado di creare un collegamento diretto tra acque meteoriche e il sistema carsico profondo. Sono così stati perimetrati in ambiente GIS le aree endoreiche analizzando l'altimetria, la cartografia geomorfologica (RICCHETTI, 1988) e tutte le informazioni rinvenienti dalla cartografia geologica e topografica disponibile. A ciascun complesso idrogeologico è stato assegnato un intervallo di variabilità del coefficiente di infiltrazione efficace, sulla base delle conoscenze bibliografiche e le esperienze dirette degli autori (COTECCHIA *et alii*, 1990; POLEMIO *et alii*, 2000; CIVITA, 2005); per le aree endoreiche è stato assegnato valore unitario del coefficiente di infiltrazione, a prescindere dal complesso idrogeologico. Cella per cella, la variazione tra minimo e massimo del valore del coefficiente di infiltrazione efficace è stata determinata in modo lineare inverso rispetto alla pendenza della superficie topografica osservata nel medesimo complesso. Il valore medio del coefficiente di infiltrazione efficace nell'area di studio è pari a 0.6, (i valori medi per ciascun complesso sono: 0.9 calcari, 0.6 per calcareniti e calcilutiti, 0.7 per calcareniti del Salento, 0.4 per sabbie), in perfetto accordo con i risultati di COST (2005). Il valore dell'infiltrazione è stato quindi calcolato cella per cella moltiplicando la piovosità efficace per il valore del coefficiente di infiltrazione efficace (Fig. 3).

Stante l'indisponibilità di risorse idriche superficiali e di reti irrigue alimentate da fonti esterne, l'irrigazione utilizza esclusivamente acque sotterranee. Il prelievo di tali acque a scopi irrigui non è noto in modo diretto sia perché vi sono numerosi pozzi abusivi sia perché per quelli legali non esistono misure affidabili dei prelievi. Il prelievo irriguo è quindi stato stimato ponendolo uguale alla domanda irrigua nell'area di studio. In realtà, il ricorso limitato a pratiche irrigue razionali e moderne, in grado di applicare i volumi idrici strettamente necessari, permette di ipotizzare che il criterio adottato approssimi per difetto i prelievi effettivi. D'altra parte, la gran parte degli eccessi irrigui sono destinati a re-infiltrarsi, riducendo così enormemente la rilevanza dell'inaccuratezza della stima. In Puglia esiste una irrigazione pubblica gestita dai Consorzi di Bonifica, ed una privata gestita direttamente dagli agricoltori, che da sola copre il 95% del fabbisogno irriguo delle aree coltivate (INEA, 2001). L'area di studio rientra in quella gestita da due Consorzi di bonifica (Arneo e Ugento li Foggi). Per individuare i fabbisogni agricoli e le aree irrigate, rimuovendo l'effetto di eventuali dichiarazioni mendaci che affligge i dati ISTAT (trattasi di dati raccolti mediante questionari somministrati agli agricoltori), si è operato incrociando i dati INEA (2001) e ISTAT (2001), riferiti al medesimo orizzonte temporale. Le diverse specie coltivate sono state aggregate in 6 tipologie di coltivazioni: oliveti, vigneti, fruttiferi, colture orticole ed erbacee (cereali e foraggiere). Gli elaborati INEA (2001) sono stati determinati usando il telerilevamento da satellite e la verifica al suolo con sopralluoghi: in tal modo sono state individuate tutte le aree effettivamente irrigate, a prescindere dalle dichiarazioni degli agricoltori all'ISTAT, potenzialmente influenzate

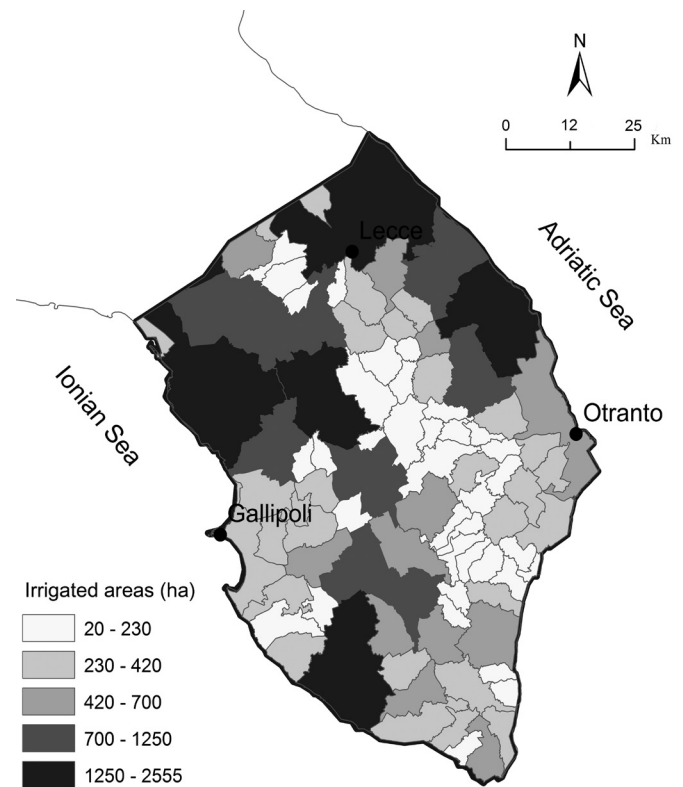


Fig. 4 - Mappa della superficie irrigata totale in ciascun comune (ha)  
- Map of the total irrigated surface in each municipality

timated by assuming that it is equal to the irrigation demand in the study area. In fact, because of the low use of modern and rational irrigation practices that can irrigate with the minimum necessary water volumes, it was possible to hypothesise that the criterion used would underestimate the actual quantity of discharge. On the other hand, most of the irrigation excesses re-infiltrate, greatly reducing the importance of the inaccuracy of this assumption. Apulia has a public irrigation system that is managed by land reclamation syndicates and a private irrigation system directly that is managed by farmers, which alone covers 95% of the irrigation needs of cultivated areas (INEA, 2001). The study area is part of the region administered by two land reclamation syndicates (Arneo and Ugento li Foggi). To identify the agricultural needs and irrigated lands, removing the effect of any false statements affecting the ISTAT data (as these data were collected through questionnaires administered to the farmers), we combined the INEA data (2001) and ISTAT data (2001) because they all referred to the same period. The cultivated species were grouped into 6 types of plants: olive groves, vineyards, fruit trees, horticultural crops and herbaceous plants (grain and forage). The INEA data (2001) were determined using satellite remote sensing and then verified by the collection of ground truth data. All of the heavily irrigated areas were identified in this way, avoiding the effect of unauthorised wells on the ISTAT answers



da numerosi fattori, tra i quali la diffusa presenza di pozzi abusivi. Quindi è stato calcolato il coefficiente culturale  $C_c$  quale rapporto tra l'irrigato INEA e le superfici coltivate (quindi incluse quelle non irrigate) dell'ISTAT, operando per ciascun tipo di coltura. Moltiplicando  $C_c$  per la superficie coltivata comunale, è stata determinata la superficie irrigata comunale per ciascuna coltura (Fig. 4).

Per una corretta individuazione dei fabbisogni irrigui unitari il territorio è stato suddiviso in zone climatiche omogenee. A tale scopo è stata utilizzata la suddivisione ACLA2 (REGIONE PUGLIA, 2005) che divide l'area in due zone omogenee. Una prima zona, posta in prevalenza a nord-ovest, comprende buona parte del versante jonico della penisola salentina, coprendo circa il 54% dell'area di studio, mentre la restante parte è posta grossomodo a sud-est della congiungente Gallipoli-Otranto. Per ciascuna zona è stato determinato il fabbisogno irriguo unitario ( $m^3/ha$ ) per tipologia di coltura. Procedendo per aggregazione comunale, totalizzando il prodotto tra il fabbisogno irriguo unitario e l'area della superficie irrigata per ciascun tipologia di coltura, si è ottenuto il fabbisogno irriguo annuale al 2000, pari a un totale di 58.477 milioni di  $m^3$ . Tale valore è stato assunto pari al prelievo irriguo nel 2000 (Fig. 5).

### IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

I modelli numerici idrogeologici sono oggi sempre più utilizzati come supporto alla gestione delle risorse idriche e il loro utilizzo è

given by farmers. The cultural coefficient ( $C_c$ ) was calculated as the ratio of INEA irrigated lands to ISTAT cultivated lands (also including non-irrigated lands) for each type of cultivation. The municipal irrigated area for each cultivation type was determined by multiplying  $C_c$  by the municipal cultivated surface (Fig. 4).

To assess the specific irrigation demand (annual water demand per unit of surface), the area was divided into homogeneous climatic zones. The ACLA2 subdivision was used for this purpose (APULIA REGION, 2005), dividing the area into two homogeneous zones. The first, mainly located in the north-west, included most of the Ionian side of the Salento peninsula, covering approximately 54% of the study area, while the second was roughly located south-east of the line linking Gallipoli to Otranto. The specific irrigation demand ( $m^3/ha$ ) was determined for each type of cultivation in each zone. The product of the specific irrigation demand and the area of the irrigated land for each type of cultivation in all of the municipalities was equal to the annual irrigation demand and measured 58,477 million  $m^3$  for the year 2000. This value was assumed equal to the irrigation discharge in 2000 (Fig. 5).

### IMPLEMENTATION OF THE NUMERICAL MODEL

Numerical hydrogeological models are increasingly used to support the management of water resources. Their use is encouraged by the Water Framework Directive of the European Commission (EU, 2000). The proposed modelling was based on the hypothesis of the "equivalent porous medium", which is considered to be the most flexible approach for the representation of flow and transport on a regional scale (SCHWARZ & SMITH, 1988; LANGEVIN, 2003a; RIVERA, 2007) and is used in karst areas (ANDRESSON & WOESSER, 1992; DUFRENCE & DRAKE, 1999; ABBO *et alii*, 2003; SCANLON *et alii*, 2003), especially for resource management purposes (SMITH & SCHWARZ, 1984; SCHWARZ & SMITH, 1988). SEAWAT (LANGEVIN *et alii*, 2003b) is a numerical code meant to be integrated with the MODFLOW code (MCDONALD & HARBAUGHT, 1988), and together, they permit the three-dimensional modelling of flow and solute transport that considers density effects due to salinity. The concept of "thrif" was applied when defining the model (VOSS, 2012), meaning that mesh geometry was defined as simply as possible but, at the same time, was detailed enough for the purposes of the model. The model used only square cells, typical for the purposes of resource management, that measured 770 m on each side and accounted for the need to ensure stability and convergence in the numerical solution while also considering the size of the study area, the boundary conditions and the characteristics of the hydrogeological complexes (MORENO & SPITZ, 1996). The active domain (active cells) covered an area of approximately 2,300  $km^2$  with 45,925 cells (Fig. 6). To define the surface morphology, a DEM ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) was used with a resolution of 25 meters (altitude from 0 to 214 m a.s.l. in the study area). Twelve layers were used verti-

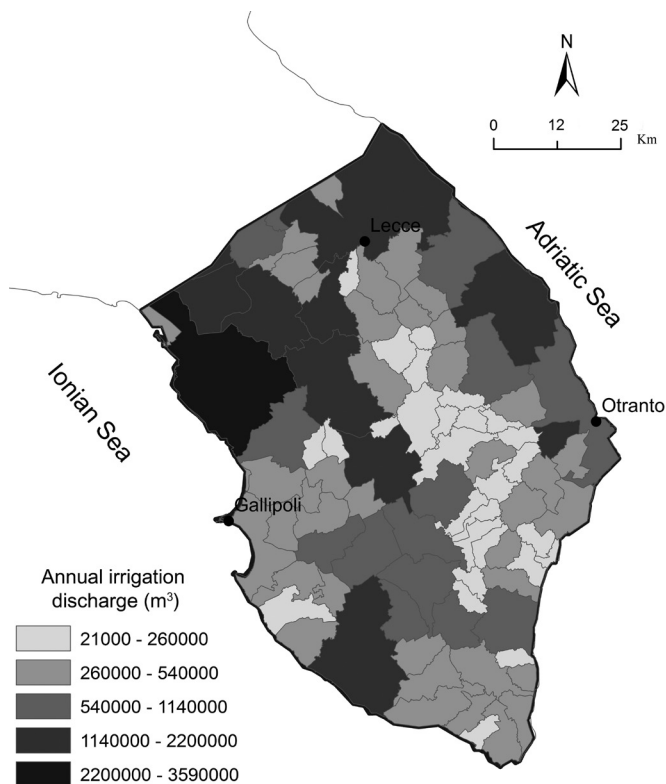


Fig. 5 - Mappa dei prelievi irrigui annuali suddivisa per Comuni  
- Municipality map of annual irrigation discharge (assessed at 2000)

incoraggiato anche dalla Direttiva Quadro sulle acque della Commissione Europea (EU, 2000). La modellazione qui presentata si basa sull'ipotesi del "poroso medio equivalente", considerato il metodo più flessibile per la rappresentazione del flusso e del trasporto in aree a scala regionale (SCHWARZ & SMITH, 1988; LANGEVIN, 2003a; RIVERA, 2007), ed utilizzato anche in aree carsiche (ANDRESONN & WOESSER, 1992; DUFRENESE & DRAKE, 1999; ABBO *et alii*, 2003; SCANLON *et alii*, 2003), soprattutto per scopi di gestione della risorsa (SMITH & SCHWARZ, 1984; SCHWARZ & SMITH, 1988). Il codice di calcolo utilizzato è SEAWAT (LANGEVIN *et alii*, 2003b), scritto per integrarsi con il codice MODFLOW (MCDONALD & HARBAUGHT, 1988); insieme permettono una modellazione tridimensionale del flusso e del trasporto di soluti tenendo conto degli effetti di densità dovuti alla salinità. Nella definizione del modello si è applicato il concetto della "parsimonia" (VOSS, 2012) ovvero si è fatto ricorso alla geometria della mesh più semplice possibile che risulti però sufficientemente dettagliata per rispondere e agli scopi del modello. Il modello utilizza esclusivamente celle quadrate, scelta tipica per scopi di gestione della risorsa, di 770 m di lato, dimensione che tiene conto della necessità di assicurare alla soluzione numerica stabilità e convergenza, nonché delle dimensioni dell'area di studio, delle condizioni al contorno e delle caratteristiche dei complessi idrogeologici (MORENO & SPITZ, 1996). Il dominio attivo (active cells) copre una superficie pari a circa 2300 km<sup>2</sup>, per un totale di 45925 celle (Fig. 6). Per la definizione della morfologia superficiale è stato utilizzato un DEM ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), con una risoluzione di 25 metri (altitudine da 0 a 214 m s.l.m. nell'area di studio). Verticalmente, si è fatto ricorso a 12 layers in genere di 50 m di spessore, partendo da -350 m s.l.m. fino ad una quota massima di 210 m s.l.m. (si consideri che secondo l'approccio tradizionale di Ghyben-Herzberg, l'interfaccia netta nell'area di studio si dovrebbe collocare a una profondità massima dal livello del mare pari a circa 140 m (HERZBERG, 1901; HUBBERT, 1940).

La discretizzazione della concettualizzazione idrogeologica fa ricorso ai 5 complessi idrogeologici precedentemente individuati (Fig. 7a-b). Ad ogni complesso idrogeologico è stato associato un valore di conducibilità idraulica determinato considerando i valori desunti dagli autori, discutendo prove emungimento (disponibili per i calcari), da relazioni idrogeologiche, redatte da professionisti nell'interesse di privati o a corredo di strumenti di pianificazione, da dati di letteratura (CIVITA, 2005). I valori così determinati sono stati soggetti alla calibrazione (Tab. 2), descritta nel seguito.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, l'area è stata delimitata con celle a carico costante (*Constant Head Boundary*) lungo la costa e a flusso nullo lungo il limite di separazione dalla restante parte della Puglia. In tutte le restanti celle attive poste in affioramento è stata applicata la condizione *Recharge*, per simulare appunto la ricarica precedentemente calcolata.

In corrispondenza della linea di costa, la zona attiva del modello si chiude verticalmente, semplificando notevolmente la geometria del

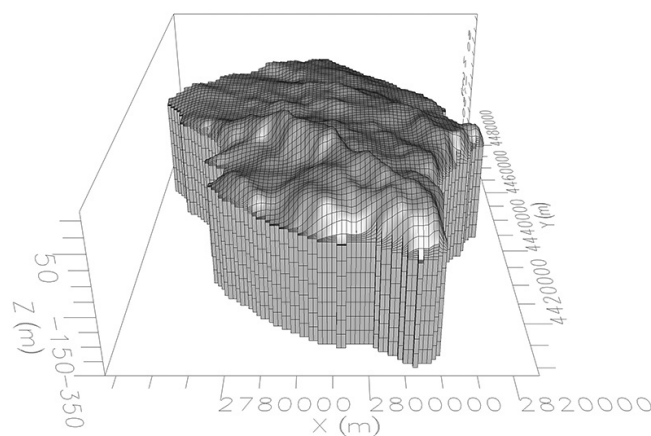


Fig. 6 - Mesh di discretizzazione 3D  
- 3D Mesh discretization

Hydrogeological complex	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)	Ss (l/m)	Sy	Por
Limestones	$9 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-6}$	0.18	0.25
Calcarenites and calcilutites	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5}$	0.21	0.4
Calcarenites	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5}$	0.26	0.4
Clays	$10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^{-3}$	0.09	0.45
Sands	$9 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$10^{-4}$	0.2	0.32

Tab. 2 - Parametri dei complessi idrogeologici, definiti a seguito della calibrazione: conducibilità idraulica (Kx, Ky, Kz.), coefficienti di immagazzinamento (Ss, Sy) e porosità efficace (Por)  
- Parameters of the hydrogeological complexes, defined with reference to calibration: hydraulic conductivity (Kx, Ky, Kz.), storage coefficients (Ss, Sy) and effective porosity (Por)

usually, usually with a thickness of 50 m, starting from -350 m a.s.l. and extending to 210 m a.s.l. (It should be noted that according to the traditional Ghyben-Herzberg approach, the sharp interface in the study area should be located at a maximum depth of approximately 140 m from sea level (HERZBERG, 1901; HUBBERT, 1940).)

Conceptual hydrogeological discretization refers to the five complexes previously identified (Fig. 7a-b). The hydraulic conductivity value was defined for each hydrogeological complex and was determined by considering the values calculated discussing pumping tests (available for limestones), hydrogeological reports written by professionals in the interest of private citizens or annexed to town planning documents, and data in the literature (CIVITA, 2005). The values so determined were subject to calibration (Tab. 2).

In terms of boundary conditions, the area was delimited by constant head cells (a constant head boundary) along the coast and no flow cells along the boundary with the rest of Apulia. The recharge condition was applied to all of the remaining outcropping active cells. Along the coastline, the active zone of the model ended vertically, greatly simplifying the geometry of the model itself when compared to the natural geometry. Put simply, the geometry of the cells did not account for the

modello rispetto alla realtà. In sostanza la geometria delle celle non tiene conto che il tetto dell’acquifero si approfondisce oltre linea di costa e che sul fondo del mare sono presenti depositi poco permeabili. Tale semplificazione geometrica può essere compensata nel modello idrogeologico introducendo, in corrispondenza del limite costiero della zona attiva, celle con la condizione al contorno GHB (General Head Boundary). Volendo applicare tale condizione, sono stati elaborati i dati batimetrici fino a quota -350 m s.l.m ed è stato considerato l’andamento verticale in zona marina dei complessi idrogeologici. A prescindere dalle modalità di calcolo dei parametri di input della GHB, la presenza di tali tipi di celle per la simulazione del confine marino ha creato problemi di convergenza, tanto che nella pratica modellistica viene utilizzato per tale tipologia di condizione al contorno, ovvero quella del confine marino, la più semplice condizione CHD (condizione di Dirichlet) (SCNEIDER & HRUSE, 2005; WANG *et alii*, 2008; LIN *et alii*, 2009; EL-BIHERY, 2009; ROZALL & WONG, 2010). Tale scelta se semplifica di molto le procedure di calcolo numerico, si discosta molto dalle condizioni naturali, inducendo artificiosi scambi idrici in entrata e/o in uscita non necessariamente trascurabili. Per ovviare a tali problemi, si è fatto ricorso a un semplice artificio. Mantenendo per tali celle la condizione di carico costante (condizione di Dirichlet), la conducibilità idraulica delle celle attive poste a contatto con la linea di costa o con la relativa proiezione verticale, dalla quota zero alla quota -350 metri s.l.m. è stata ridotta di un ordine di grandezza ogni 50 metri in modo da tener conto dell’effettiva resistenza al flusso nella porzione di acquifero reale non rappresentata geometricamente dal modello. La prima fase delle

fact that the aquifer top deepened seaward beyond the coastline and lay below the low permeability deposits constituting the sea bottom. This geometric simplification was compensated for in the hydrogeological model by introducing, in correspondence with the coastal boundary of the active zone, cells with the boundary general manager (GHB) boundary condition. In applying this condition, bathymetric data up to an altitude of 350 meters were processed, and the vertical distribution of the hydrogeological complexes in the marine area was taken into account. Regardless of the calculation procedures of the GHB input parameters, the presence of such cell types created convergence problems. The simplest constant head (CHD) in the modelling practice is not used for this type of boundary condition, namely, that of the coastal boundary (SCNEIDER & HRUSE, 2005; WANG *et alii*, 2008; LIN *et alii*, 2009, EL-BIHERY, 2009; ROZALL & WONG, 2010). While this choice greatly simplifies the numerical calculation procedures, these conditions differ greatly from the natural conditions, inducing artificial water exchanges in both the inflow and outflow that cannot necessarily be neglected. A simple strategy was used to overcome these problems. The hydraulic conductivity of the active cells, which were in contact with the coast line or its vertical projection, was reduced by an order of magnitude every 50 meters from the zero level up to -350 meters to consider the effective resistance of the flow in the real portion of the aquifer that was not geometrically represented by the model. The first simulation phase consisted of defining the conditions of the flow and the salinity field in steady-state conditions. Historical knowledge of the changes in the piezometric surface and the discharge levels during the previous century

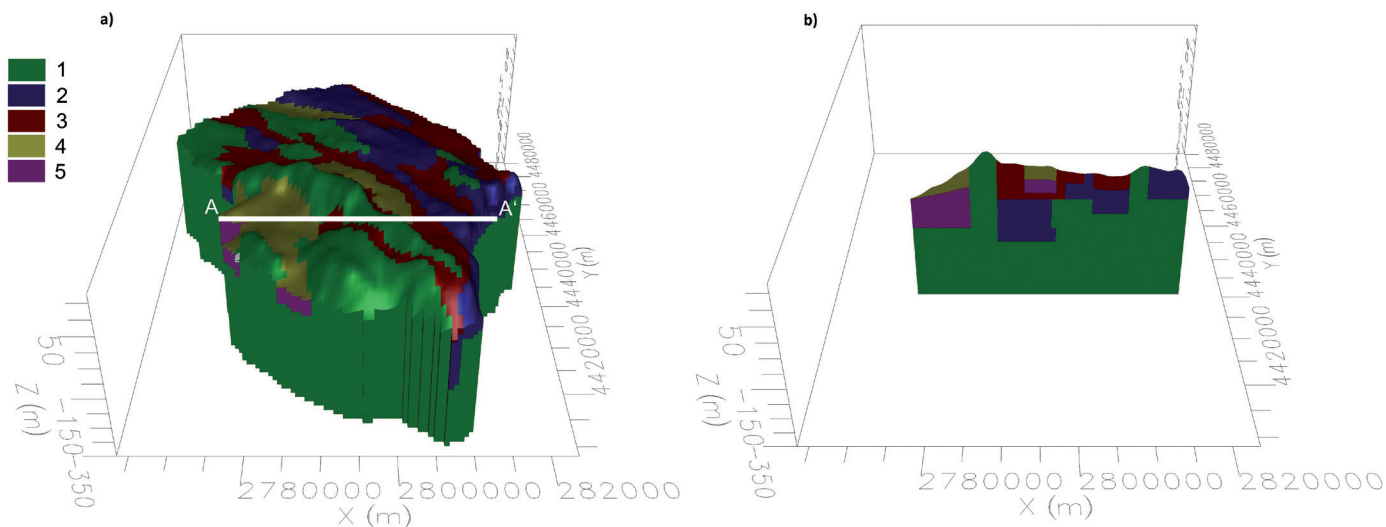


Fig. 7 - Rappresentazione dei complessi idrogeologici implementati nel codice di calcolo. A) vista 3D e traccia della sezione A-A'; Complessi idrogeologici: 1) Calcari (che includono i calcari preneogenici del Calcare di Altamura, del Calcare di Castro e della Calcarenite di Porto Badisco) 2) calcareniti e calcilutiti (riferibili alla Pietra Leccese e alle Calcareniti di Andrano) 3) calcareniti (riferibili alle Calcareniti del Salento o di Gravina) 4) sabbie (riferibili ai Depositi marini terrazzati) 5) Argille subappenniniche. b) Sezione A-A'

- Representation of the hydrogeological complexes implemented in the computer programme. A) 3D view and track of the A-A' section; Map of hydrogeological complexes: 1) Limestones (including pre-neogene limestones of Altamura Limestone, Castro Limestone and Porto Badisco Calcarenite) 2) calcarenites and calcilutites (referable to Lecce Stone and Andrano Calcarenites) 3) calcarenites (referable to Gravina Calcarenites or Salento Calcarenites) 4) sands (referable to marine terrace deposits) 5) Sub-Apennine clays b) Section A-A'

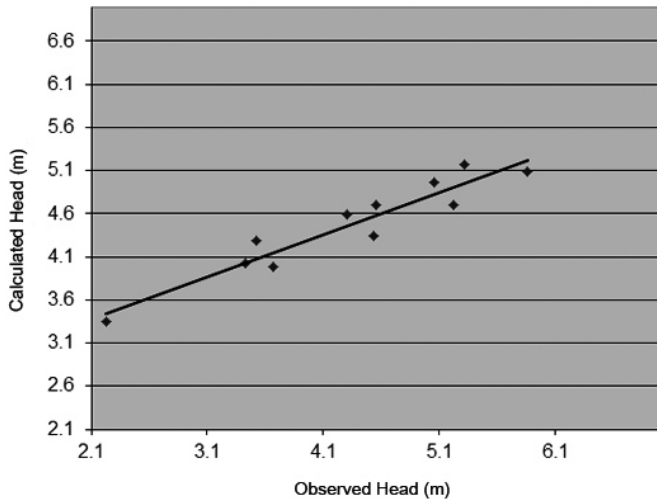


Fig. 8 - Diagramma di calibrazione del modello: altezza o carico potenziometrico misurato a confronto con quello calcolato  
 - Calibration diagram of the model: height or potentiometric load measured in comparison with the calculated one

simulazioni è consistita nella definizione delle condizioni di flusso e del campo della salinità in condizioni stazionarie. Le conoscenze storiche in merito alle modificazioni della superficie piezometrica e dei livelli di prelievo nello scorso secolo hanno permesso di assumere la superficie piezometrica relativa agli anni trenta quale andamento tipico delle condizioni pressoché naturali essendo in quel decennio praticamente trascurabile l'entità dei prelievi da pozzi (POLEMIO *et alii*, 2010; POLEMIO *et alii*, 2011). I risultati conseguite con le simulazioni in condizioni stazionarie servono per valutare le variazioni determinatesi in condizioni transitorie in relazione alle recenti modificazioni climatiche e all'entità dei prelievi. Tornando alla soluzione in stazionario, i risultati del modello di flusso ottenuti in MODFLOW sono stati utilizzati come input per il modello densità-dipendente, utilizzando il codice di calcolo SEAWAT (GUO & LANGEVIN, 2002). A tale scopo sono state aggiunte ulteriori condizioni al contorno: ovunque del tipo *Initial Concentration* salvo le celle poste a contatto con il mare, dove si è fatto ricorso alla *Constant Concentration*. Per quanto riguarda la salinità (total dissolved solid o TDS), per il mar Adriatico si è assunta pari a 38.0 g/l mentre per lo Jonio 39.5 g/l (JANEKOVIC *et alii* 2006; GRAUEL & NERNASCONI, 2010). Il modello è stato successivamente calibrato attraverso l'uso del codice di calcolo PEST, "Non-Linear Parameter ESTimation". Per la calibrazione sono stati selezionati 11 pozzi (Tab. 3), alquanto omogeneamente distribuiti nel territorio, per cui sono disponibili misure potenziometriche (POLEMIO *et alii*, 2011).

Il grafico in Figura 8 mostra la correlazione delle piezometrie calcolate con quelle osservate per tutti i pozzi di osservazione dell'area: tutti ricadono nell'intervallo di confidenza del 95%. Per l'insieme dei pozzi di calibrazione sono stati considerati come parametri di controllo il coefficiente di correlazione, risultato pari a 0.903, la deviazione standard, pari a 0.33, la media assoluta dei residui pari a 0.45.

allowed for the assumption that the piezometric surface conveyed a typical pattern of almost natural conditions from the 1930s because the amount of withdrawal from wells was actually negligible in that decade (POLEMIO *et alii*, 2010; POLEMIO *et alii*, 2011). The results obtained from the steady-state simulations were used to evaluate the variations that occurred in the transient conditions based on recent climatic changes and the withdrawal quantities. In terms of the steady-state solution, the results of the flow pattern obtained in MODFLOW were used as input for the density-dependent model using the SEAWAT code (GUO & LANGEVIN, 2002). Other conditions were added to the boundary conditions for this purpose: they were of the initial concentration type everywhere, except in cells in contact with the sea, where the constant concentration was used. Salinity (total dissolved solid or TDS) was assumed to be 38.0 g/l in the Adriatic Sea and 39.5 g/l in the Ionian Sea (GRAUEL & NERNASCONI, 2010; JANEKOVIC *et alii*, 2006). The model was then calibrated through the use of the Non-Linear Parameter Estimation (PEST) code. Eleven wells were selected for the calibration (Tab. 3) and were evenly distributed over the territory for which potentiometric measurements were available (POLEMIO *et alii*, 2011).

Figure 8 shows the correlation between the calculated and observed heads. All points fell within a confidence interval of 95%. A correlation coefficient equal to 0.903 a standard deviation equal to 0.33, a residual absolute mean equal to 0.45 and a normalised RMS equal to 15.5 % were taken as the control parameters for the calibration.

The results show the presence of an interface positioned at approximately 120 meters below sea level (Fig. 9a), in compliance with the law of Ghyben-Herzberg, and seawater intrusion effects along the coast with values lower than 20,000 mg/l within the first 700 meters from the coast (Fig. 9b).

## TRANSIENT SIMULATIONS

The transient simulations were defined to reproduce the effects of the main changes occurring in recent decades in terms of climate changes and the utilisation of groundwater resources as accurately as possible. The changes over two different decades were determined, from 1980 to 1989 and from 1990 to 1999. A declining trend in rainfall and a rising trend in temperature were observed, particularly since 1980, and there were also changes in monthly rainfall and temperature conditions that further contributed to worsening the decrease in effective precipitation over all of southern Italy and Apulia (POLEMIO & CASARANO, 2008). Using the results from POLEMIO & CASARANO (2008) and the relevant database of monthly rainfall and temperature data, made available by CNR-IRPI, the effective rainfall and recharge were calculated for each available rainfall and temperature gauge (Tab. 1) in the two abovementioned decades. The recharge was 63% of the mean annual recharge (in the period 1925-1975) for the decade 1980-89, assumed to be steady-state for the model, and 87% for the decade 1990-99. Regarding discharge, 72 drinking wells were implemented (Fig. 10) using the geometrical and discharge data provided by AQP (Acquedotto Pugliese, the Apulian

I risultati mostrano la presenza di una interfaccia posizionata a circa -120 metri dal livello mare (Fig. 9a), in accordo con la legge di Ghyben-Herzberg, ed una intrusione lungo tutta la costa con valori comunque minori di 20.000 mg/l, entro i primi 700 metri dalla costa (Fig. 9b).

**SIMULAZIONI IN TRANSITORIO**

Le simulazioni in transitorio sono state definite per riprodurre nel modo più accurato possibile gli effetti delle principali modificazioni occorse negli ultimi decenni, in termini di modificazioni climatiche e di livelli di utilizzo delle risorse idriche sotterranee. A questo scopo sono state determinate le modificazioni in due distinti decenni: 1980-1989 e 1990-1999. Per quanto concerne le variazioni climatiche e la relativa variazione di ricarica si è osservato un calo tendenziale della piovosità e un trend crescente della temperatura, in particolare a partire dal 1980 circa, oltre a modificazioni dei regimi mensili termopluviometrici che hanno ulteriormente contribuito ad aggravare il calo delle precipitazioni efficaci, sia a scala di Italia meridionale che per l'intera Puglia (POLEMIO & CASARANO, 2008). Valorizzando i risultati di POLEMIO & CASARANO (2008) e il relativo database di dati termopluviometrici mensili, reso disponibile da CNR-IRPI, per ciascuna stazione termopluviometrica disponibile (Tab. 1) sono state calcolate le precipitazioni efficaci nei due suddetti decenni e da queste l'aliquota destinata a ricarica naturale. Per il decennio 1980-89 la ricarica è risultata pari al 63% di quella media (nel periodo 1925-1975), assunta per il modello stazionario, mentre per il decennio 1990-99 è risultata pari all'87%. Per quanto riguarda i prelievi, per quanto concerne il consumo potabile, sono stati implementati 72 pozzi di captazione ad uso potabile (Fig. 10), utilizzando i dati geometrici e di portata emunta forniti da AQP (Acquedotto Pugliese). La stima dei prelievi potabili è pari a circa 40.4 milioni di m<sup>3</sup> per il primo decennio (1980-89) e 98.1 milioni di m<sup>3</sup> per il secondo, valori coerenti con quanto descritto dal Piano di Tu-

Location	X	Y	Observed Head (m)	Calculated Head (m)	Residuals (m)
Lecce	2797063	4476115	2.23	3.35	-1.12
Nardò	277916	4450835	3.43	4.02	-0.59
Veglie	2771804	4465437	3.67	3.99	-0.32
Spongano	2806481	4435082	3.52	4.29	-0.77
S. Cesario	2789829	4466494	4.56	4.7	-0.14
Ruffano	2797410	4431194	4.31	4.59	-0.28
Lecce_2	2791475	4470661	4.53	4.34	0.19
Martano	2801421	4455554	5.22	4.7	0.52
Cutrofiano	2792910	4446008	5.32	5.17	0.15
Martano_2	2798902	4453885	5.06	4.96	0.10
Supersano	2795526	4437301	5.86	5.09	0.77

Tab. 3 - Localizzazione dei pozzi utilizzati per la calibrazione, valori piezometrici osservati, calcolati e residui  
 - Location of wells used for calibration, observed, calculated and residuals piezometric values

water company). The evaluation of drinking water discharge was approximately 40.4 million m<sup>3</sup> for the decade 1980-89 and 98.1 million m<sup>3</sup> for 1990-99, values that were consistent with those described in the Plan of Water Protection (APULIA REGION, 2009).

As for manufacturing consumption, the water supply from wells was estimated at 14.2 million m<sup>3</sup> (APULIA REGION, 2009) and was considered steady-state and evenly distributed over the two decades of interest. The changes in irrigation discharge were estimated using the ISTAT data related to the irrigated areas for the years 1971, 1982,

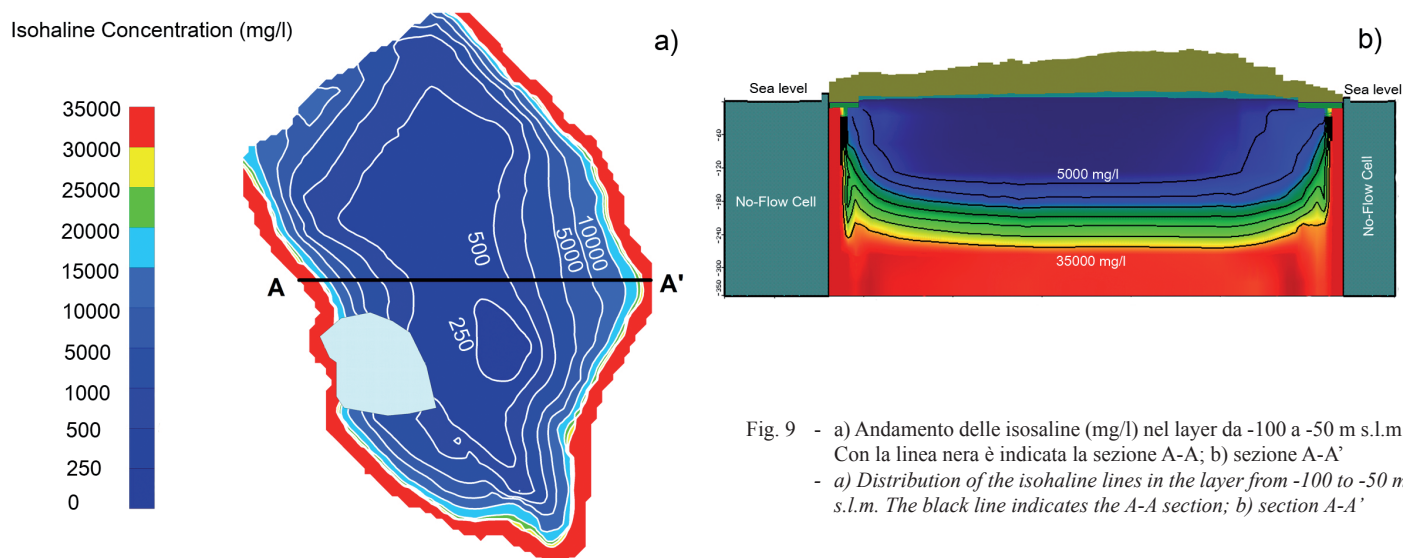


Fig. 9 - a) Andamento delle isosaline (mg/l) nel layer da -100 a -50 m s.l.m. Con la linea nera è indicata la sezione A-A'; b) sezione A-A'  
 - a) Distribution of the isohaline lines in the layer from -100 to -50 m s.l.m. The black line indicates the A-A section; b) section A-A'

Well Id	Location	X	Y	Observed Conc. (g/l)	Calculated Conc. (g/l)	Residual (m)
ILR	Galatina	2789347	4459468	0.32	0.30	0.02
4IIS	Nardò	2771558	4455086	0.30	0.89	-0.59
PIUGE	Ugento	2793524	4426287	0.41	0.53	0.41
LS21LE	Supersano	2794462	4435874	0.44	0.36	0.08
14IIS	Lecce	2797503	4475082	1.15	1.24	-0.09
PISAL	Salve	2802856	4418366	0.32	0.51	-0.19
PIPRE	Presicce	2800145	4423762	0.34	0.50	-0.16
PS17LE	Corigliano	2794960	4448954	0.38	0.28	0.10
PS24LE	Miggiano	2802300	4429367	0.44	0.62	-0.18
NC4	Leverano	2773002	4458950	0.88	0.81	0.07

Tab. 4 - Localizzazione dei pozzi utilizzati per la validazione  
- Location of validation wells

tela delle Acque (REGIONE PUGLIA, 2009).

Per quanto concerne il consumo manifatturiero, l'approvvigionamento da pozzi è stimabile in circa 14.2 milioni di m<sup>3</sup> (REGIONE PUGLIA, 2009); tale prelievo è stato considerato uniformemente distribuito e stazionario nei due decenni. Le modificazioni dei prelievi irrigui sono state stimate utilizzando i dati relativi alle aree irrigate dell'ISTAT, relativi agli anni 1971, 1982, 1990 e 2000. In sostanza, stimata l'entità dei prelievi per scopi irrigui al 2000, i dati ISTAT sono stati utilizzati per stimare a ritroso la riduzione percentuale, nei due decenni di riferimento, delle aree irrigate e quindi dei prelievi irrigui, valori questi infine applicati nei due scenari di simulazione in transitorio. Il modello è stato fatto girare in transitorio per un periodo pari a 10 anni, ovvero per le decadi 1980-89 e 1990-99. Per quanto riguarda le condizioni iniziali e al contorno, per la prima decade sono stati utilizzati i valori del carico e della concentrazione salina ottenuti dello stazionario per il periodo 1990-99 sono stati utilizzati come input i risultati del precedente transitorio. Per quanto riguarda invece gli input di ricarica e prelievo irriguo è stato implementato nel modello un valore medio della decade esaminata. In particolare i dati desunti dal modello nel periodo 1989-99 sono stati utilizzati per la validazione del modello. L'output è stato infatti confrontato con i dati sperimentali di salinità dello stesso periodo di 10 pozzi presenti sull'area di studio (Tab. 4), riferiti ad una profondità tra 0 e -60 m s.l.m., ovvero la fascia interessata dall'acqua dolce, al fine di validare la modellazione attraverso un approccio "predict existing conditions" (SPITZ & MORENO, 1996). I valori di concentrazione salina osservati sperimentalmente e riportati in Tabella IV sono riferiti ad una media delle letture dei log sperimentali nell'intervallo di profondità esaminato (0/-60 m s.l.m.).

I dati sperimentali così ottenuti sono stati confrontati punto per punto con quelli calcolati per l'ultimo anno della decade in esame (Fig. 11).

Per descrivere le variazioni piezometriche e di salinità osservate nei transitori rispetto allo stazionario, si è scelto qui di considerare, per brevità, lo strato più rappresentativo, quello posto tra -50 e -100 m s.l.m., interessato in genere dalla presenza di acque sotterranee dolci ma più

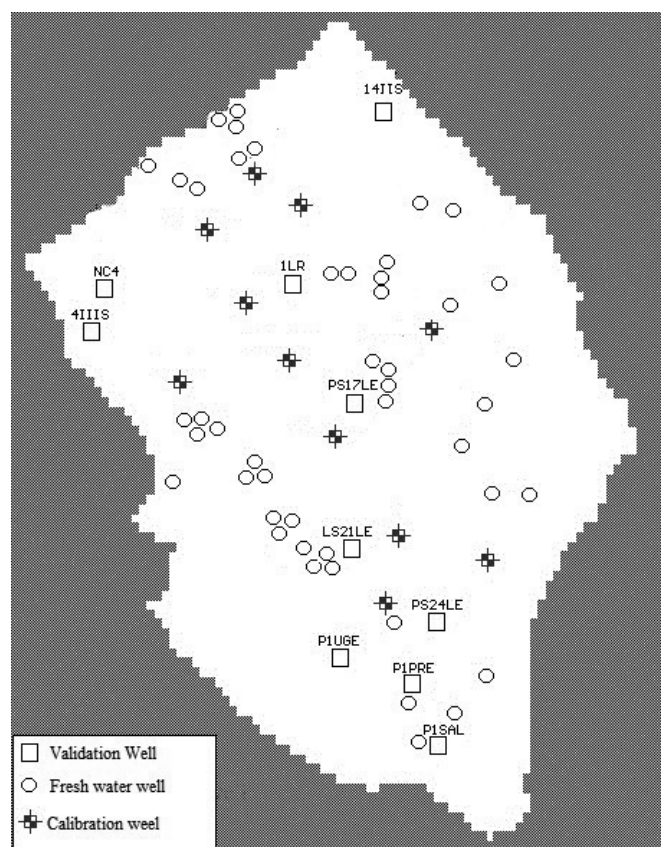


Fig. 10 - Distribuzione dei pozzi idropotabili e dei pozzi di osservazione nell'area di studio  
- Distribution of drinkable water wells and observation wells in the study area

1990 and 2000. In short, the ISTAT data were used to evaluate, going backwards, the percentage decrease in the irrigated areas and irrigation discharge for the two reference decades based on the discharge used for irrigation purposes in the year 2000. These values were then applied to the two simulated transient scenarios. The model with the new conditions were run transiently for a period of 10 years with annual steps. The data so derived from the model for the period 1989-99 were compared with the experimental salinity data for 10 wells in the study area over the same period (Tab. 4) and used a depth between 0 and -60 m a.s.l., or the area affected by fresh water, as a reference depth to validate the modelling through a "predict existing conditions" approach (ASTM, 1993; SPITZ & MORENO, 1996).

The experimental data were therefore successfully compared with those obtained from the model regularly for the last year of the decade in question (Fig. 11).

To describe the piezometric and salinity variations observed in the transient models and compared to the steady-state model, the most representative layer located between -50 and -100 m a.s.l. and generally affected by the presence of fresh groundwater, but closer

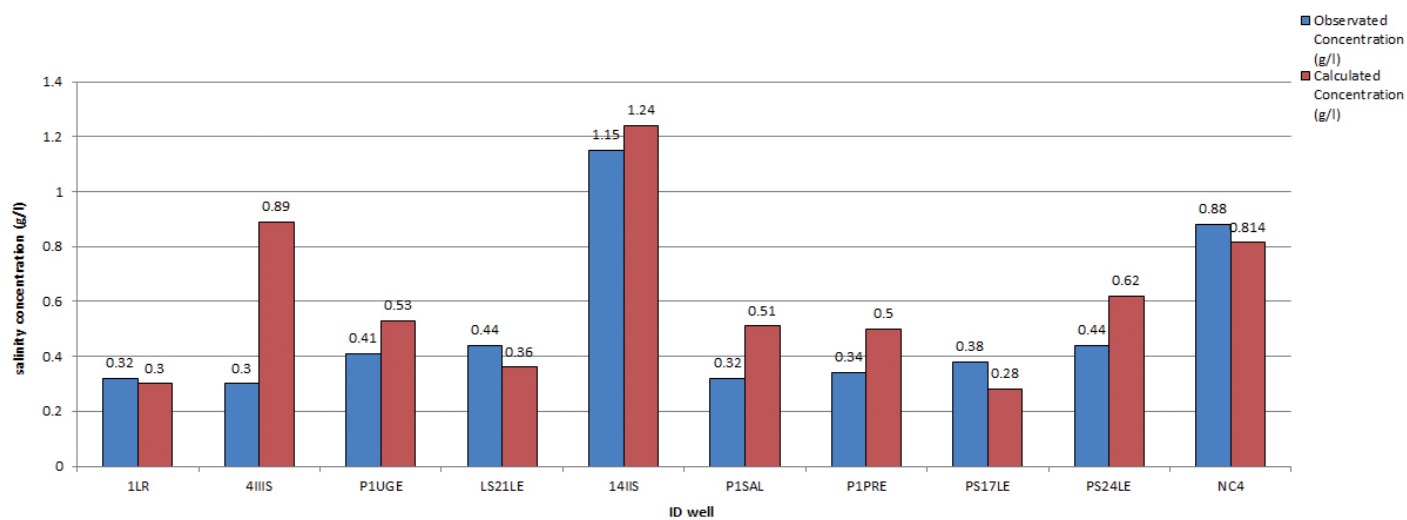


Fig. 11 - Confronto tra i dati di salinità osservati sperimentalmente e i valori calcolati dal modello  
 - Comparison between the experimentally observed salinity data and values calculated from the model

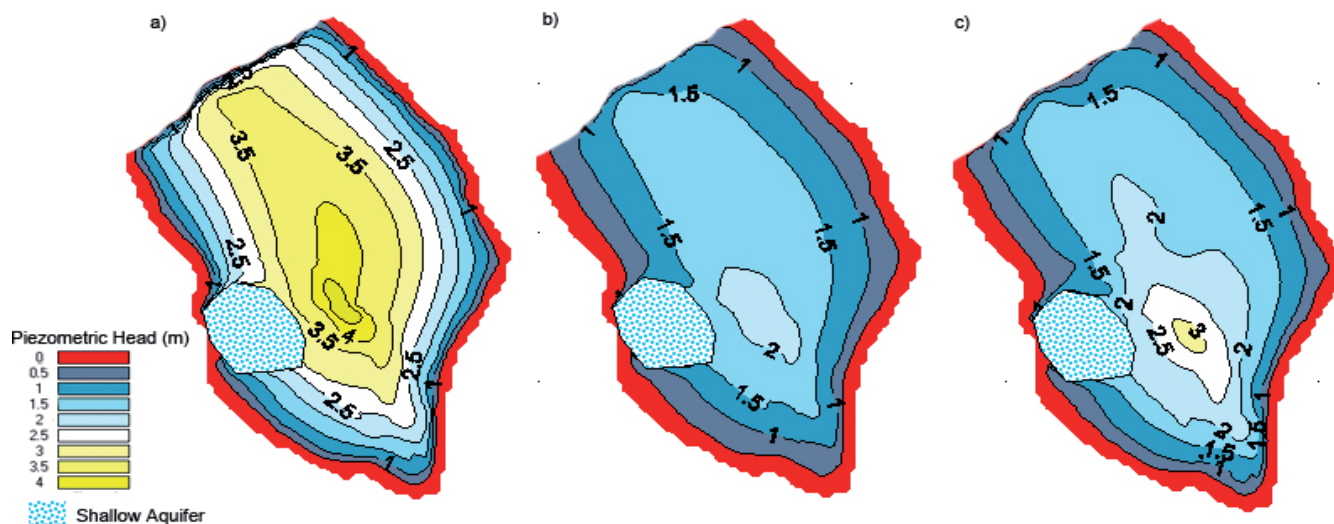


Fig. 12 - Carta piezometrica relativa allo strato posto da -50 a -100 m s.l.m. a) Stazionario; b) Scenario 1980-89, risultati relativi all'ultimo anno; c) Scenario 1990-99, risultati relativi all'ultimo anno  
 - Piezometric map relating to the layer located from -50 to -100 m a.s.l. a) Stationary b) Scenario for the period 1980-89, results for the latest year, c) Scenario the period 1990-99, results for the latest year

prossimo alla zona di transizione (POLEMIO & ROMANAZZI, 2013). In tale livello è presente anche un acquifero superficiale di modeste dimensioni che risiede nella formazione dei depositi terrazzati ma che risulta influente nello studio dell'acquifero profondo. Dal confronto tra lo scenario anni '30 e anni novanta si è stimato un abbassamento piezometrico variabile da 0.1 a i 2.5 metri, nelle aree più interne (Fig. 12).

E' stata eseguita una seconda elaborazione per valutare le variazioni della concentrazione salina. Scelta una profondità tra i -50 e i -100 metri, si sono così confrontati i dati ottenuti dalla simulazione in stazionario con quelli provenienti dai due transitori 1980-89 e 1990-99 (Fig. 13).

to the transition zone, was selected for the sake of brevity. There was also a shallow aquifer of modest size in this level in the form of terraced marine deposits, but that was of no consequence to the deep aquifer under study. A drawdown ranging from 0.1 to 2.5 meters in the innermost parts was estimated by comparing the scenarios for the 1930s and 1990s (Fig. 12).

A second processing was carried out to evaluate changes in saline concentration. Choosing a depth between -50 and -100 meters, the data obtained from the steady simulation were compared with those of the two transient simulations for 1980-89 and 1990-99 (Fig. 13).

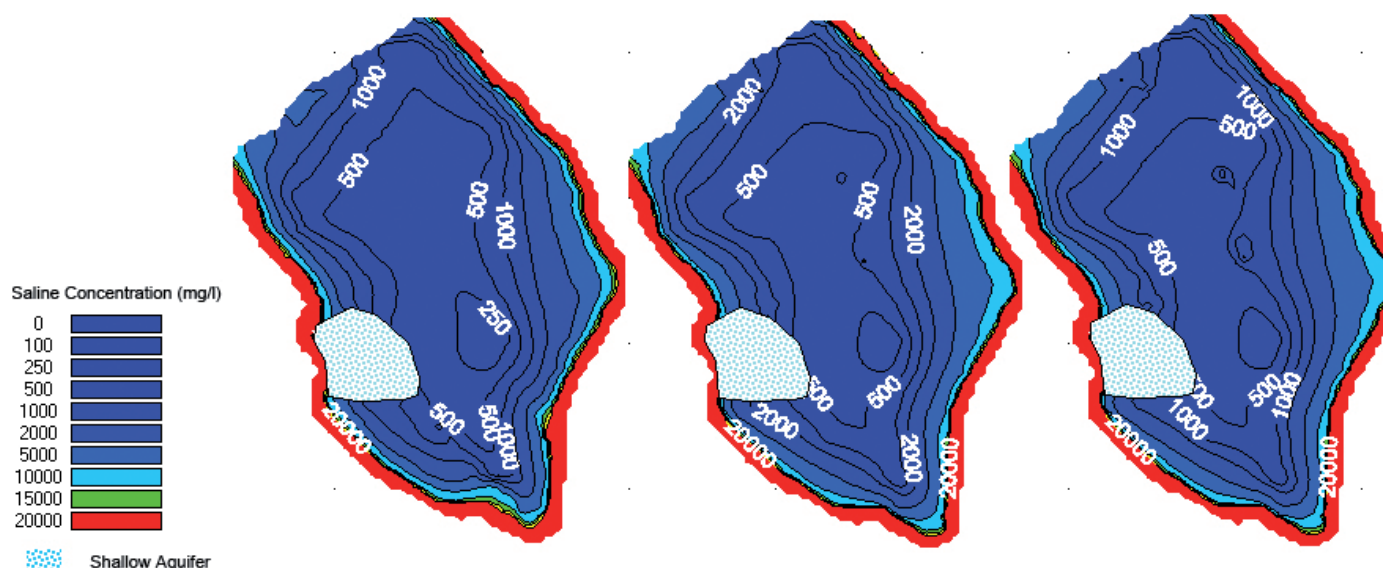


Fig. 13 - Carta delle isosaline (mg/l) relativa allo strato posto da -50 a -100 m s.l.m. a) Stazionario; b) Scenario 1980-89, risultati relativi all'ultimo anno; c) Scenario 1990-99, risultati relativi all'ultimo anno

- Map of the isohaline (mg/l) related to the layer located from -50 to -100 m a.s.l. a) Stationary b) Scenario of the period 1980-89, results for the latest year; c) Scenario of the period 1990-99, results for the latest year

Si è valutato un importante incremento della salinità, con valori anche maggiori di 1000 mg/l, non solo localizzato nelle fasce costiere e nelle aree dei campi pozzi, ma anche fino a 6 km dalla costa, soprattutto sul versante Adriatico.

## CONCLUSIONI

Scopo della nota qui descritta è stato quello di illustrare le fasi della realizzazione di un modello numerico tridimensionale del flusso idrico sotterraneo, che considera l'effetto della densità idrica, in un vasto acquifero carsico costiero, nel caso di studio costituito da parte della Penisola Salentina. La nota mostra come, a partire da una attenta concettualizzazione idrogeologica, analizzando un complesso insieme di dati, sia stata possibile la riproduzione delle principali modificazioni occorse negli ultimi decenni a partire dagli anni Trenta del XX secolo. A tale fine, è stato realizzato il bilancio idrologico nonché sono stati determinati i parametri idrogeologici di input del sistema acquifero, di cui la conducibilità idraulica è il principale. Successivamente, per validare il modello e al contempo valutare la variazione quali-quantitativa delle risorse idriche sotterranee sono stati implementati due scenari in transitorio per i decenni, 1980-89 e 1990-99. A tale scopo sono stati determinati i valori annui dei prelievi di vario tipo, tra i quali prevale quello irriguo, che è stato calcolato a scala comunale in funzione dell'estensione coltivata e del tipo di coltura. Si è così ottenuto, anno per anno, il campo potenzimetrico (che considera l'effetto della salinità e delle altezze piezometriche), in modo da conseguire la conoscenza accurata nel tempo delle variazioni della distribuzione tridimensionale della salinità. L'implementazione e la validazione del modello descritto, oltre che migliorare la conoscenza del fenomeno dell'intrusione marina

An important increase in salinity was estimated, with values higher than 1000 mg/l, that was located not only in coastal areas and close to main well fields but also up to 6 km from the coast, especially along the Adriatic coast.

## CONCLUSIONS

The purpose of the note here described is to illustrate the realization of a three-dimensional numerical model of groundwater flow density driven, of a large coastal karst aquifer, in this case, including a part of the Salento Peninsula. The note shows how, starting from an accurate hydrogeological conceptualization, and analyzing a complex set of data, it is possible to simulate the main changes that occurred in the area since the thirties of the twentieth century. For this purpose, the water balance was assessed and the hydrogeological parameters were determined, among which hydraulic conductivity is the main one. In order to validate the model and, at the same time, to assess quantitative and qualitative variation of groundwater resources, two transient scenarios were implemented for the decades 1980-89 and 1990-99. For this reason, the annual values of discharge of various types were determined, among which irrigation prevails, and it was calculated on a municipal scale as a function of the type of cultivation, and of the vegetation needs. Year by year, the potentiometric field was thus obtained, (which considers the effect of salinity and of piezometric head), so as to achieve the accurate knowledge of the variations in time of the three-dimensional distribution of salinity. The implementation and validation of the model improve the knowledge of the phenomenon of seawater intrusion in the Salento and it could be useful to assess the groundwater dis-



nell'area di studio, permettono di caratterizzare in termini quantitativi gli scambi tra falda profonda e il mare, di stimare l'età delle acque sotterranee e il tempo intercorrente tra infiltrazione e efflusso. Future ricerche prevedono inoltre l'implementazione di scenari previsionali a medio e lungo termine con finalità gestionali dell'acquifero per valutare a vasta scala l'interrelazione tra corpi idrici sotterranei, le variazioni antropiche e i cambiamenti climatici.

## RINGRAZIAMENTI

Questo articolo scientifico è stato sviluppato all'interno di un percorso di Dottorato in "Scienze della Pianta e Tecnologie per l'Ambiente", svolto presso il Dipartimento DISAAT - Dipartimento di Scienze Agro-Ambientali e Territoriali dell'Università degli Studi di Bari "A. Moro" e il CNR - IRPI, sede di Bari. Si ringrazia il Coordinatore della Scuola di Dottorato, prof. F. Gentile, la prof.ssa G. Trisorio Liuzzi, il dott. F. Milillo.

charge to the sea, to estimate the age of groundwater and the time elapsing between infiltration and outflow. Further research activities for the implementation of medium and long-term scenarios with the purpose to test different management approaches in order to evaluate on a large-scale the interrelation between groundwater bodies, anthropogenic variations, and climate changes.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This paper was developed during a research activity conducted in Ph.D. School of "Plant Science and Technology for the Environment", of the University of Bari" A. Moro and carried out among Department DISAAT - Department of Agro-Environmental and Territorial Sciences, and the CNR - IRPI (Bari). Thanks to prof. F. Gentile, Prof. G. Trisorio Liuzzi, Dr. F. Milillo.

## OPERE CITATE / REFERENCES

- ABBO H., SHAVIT U., MARKEL D. & RIMMEL A. (2003) - *A numerical study on the influence of fractured regions on lake/groundwater interaction; the Lake Kinneret (Sea of Galilee) case*. Journal of Hydrology, **283**: 225-243.
- AGIP (1977) - *Temperature sotterranee. Inventario dei dati raccolti dall'Agip durante la ricerca e la produzione di idrocarburi in Italia*. F.lli Brugora, Segrate.
- ANDRESON M.P. & WOESSER W.W. (1992) - *Applied groundwater modelling*. Academic Press, San Diego.
- BARROCU G. (2003) - *Seawater intrusion in coastal aquifer of Italy, in Coastal Aquifers intrusion technology in Tecnología de la intrusión marina de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos [Technology of marine intrusion in coastal aquifers: Mediterranean countries]*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- CALÒ G., GNONI R. & STANI M. (1992) - *Caratteri idrogeologici delle falde superficiali della penisola salentina e valutazione della vulnerabilità degli acquiferi*. Amministrazione Provinciale di Lecce.
- CIARANFI N., PIERI P. & RICCHETTI G. (1988) - *Carta geologica delle Murge e Salento*. Mem. Soc. Geol. It., **42**.
- CIVITA M. (2005) - *Idrogeologia applicata ed ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana, Milano.
- COST (2003) - *Cost Action 620, vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. European Commission, Directorate-General for Research, Report EUR 20912, Luxembourg.
- COST (2005) - *Cost Action 621, Groundwater management of coastal karstic aquifers*. European Commission, Directorate-General for Research, Report EUR 21366, Luxembourg.
- COTECCHIA V. & POLEMIO M. (1998) - *Apulian groundwater (southern Italy) salt pollution monitoring network*. 15° SWIM, Salt Water Intrusion Meeting, Ghent (Belgium), 25-26 May.
- COTECCHIA V. (1979) - *Survey and monitoring groundwater in salinity problems in steams using automatic radioisotope gauges*. J. Hydrogeology, **47**: UNESCO IHP Project 5.6.
- COTECCHIA V., GRASSI D. & POLEMIO M. (2005) - *Carbonate aquifers in Apulia and seawater intrusion*. Giornale di Geologia Applicata, **1**: 219-231.
- CUSTODIO E. (2010) - *Coastal aquifers of Europe: an overview*. Hydrogeology Journal, **18**: 269-280.
- DARWISH T., ATALLAH T., EL MOUJABBER M. & KHATIB N. (2005) - *Salinity evolution and crop response to secondary soil salinity in two agro-climatic zones in Lebanon*. Agric. Water Manage, **78**: 152-64.
- DAVRAZ A., KARAGUZEL R., SOYASLAN I., SENER E., SEYMAN F. & SENER S. (2009) - *Hydrogeology of karst aquifer systems in SW Turkey and an assessment of water quality and contamination problems*. Environmental Geology, **58**: 973-988.
- DUFRENSE D.P. & DRAKE C.W. (1999) - *Regional groundwater flow model construction and wellfield site selection in a karst area, Lake City, Florida*. Engineering Geology, **52**: 129-139.
- EEA (1999) - *Groundwater quality and quantity in Europe, in Environmental assessment report, N°3 report 'Groundwater quality and quantity in Europe'*: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/groundwater-overexploitation-and-saltwater-intrusion-in-europe>.
- EL-BIHERY M.A. (2009) - *Groundwater flow modeling of Qaternary aquifer Ras Sudr, Egypt*. Environmental Geology, **58**: 1095-1105.
- EU (2000) - *European Water Framework Directive - 2000/60/EC*.
- GRAUEL A.L. & NERNASCONI S.M. (2010) - *Core-top calibration of  $\delta^{18}O$  and  $\delta^{13}C$  of *G. ruber* (white) and *U. mediterranea* along the southern Adriatic coast of Italy*. Marine Micropaleontology, **77**: 175-186.

- GUO W. & LANGEVIN C.D. (2002) - *User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow*. U.S. Geological Survey Open-File Report 01-4340.
- HERZBERG A. (1901) - *Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder*. J Gasbeleuch Wasserversorg **44**: 815-819.
- HUBBERT M.K. (1940) - *The theory of ground-water motion*. Journal Geology, **48** (8): 785-944.
- INEA, ISTITUTO NAZIONALE DI ECONOMIA AGRARIA (2001) - *Stato dell'irrigazione in Puglia*, 1, Roma.
- ISTAT, ISTITUTO NAZIONALE DI STATISTICA (2001) - *Rapporto annuale*, Roma.
- ISTAT, ISTITUTO NAZIONALE DI STATISTICA (2011) - *Rapporto annuale*, Roma.
- JANEKOVIC I., ANTONIC O., KRIZAN J., BUKOVEC D. & BAKRAN-PETRICIOLI T. (2006) - *Modelling basic physical parameters in the Adriatic Sea as the basis for marine benthic habitats mapping*. Ecological Modelling, **194**: 6-69.
- LAMBECK K., ANTONIOLI F., ANZIDEI M., FERRANTI L., LEONI G., SCICCHITANO G. & SILENZI S. (2011) - *Sea level change along the Italian coast during the Holocene and projections for the future*. Quaternary International, **232**: (1-2) 250-257.
- LANGEVIN C.D., SHOEMAKER W.B. & GUO W. (2003a) - *MODFLOW 2000: the US Geological Survey modular groundwater model*. Documentation of SEAWAT 2000 version with the variable density flow process (VDF) and the integrated MT3DMS transport process (IMT), US Geol. Survey Open-File Report 03-426.
- LANGEVIN C. D., (2003b) - *Simulation of Submarine Ground Water Discharge to a Marine Estuary: Biscayne Bay, Florida*. Ground Water, **41** (6): 758-771.
- LIN J., SNODSMITH B., ZHENG C. & WU J. (2009) - *A modelling study of seawater intrusion in Alabama Gulf Coast, USA*. Environmental Geology, **57**: 119-130.
- MAGGIORE M. & PAGLIARULO P. (2001) - *Groundwater vulnerability and pollution sources in the Apulian region (southern Italy)*. Proceedings 2<sup>nd</sup> Symposium "Protection of Groundwater from Pollution and Sea-water Intrusion", Bari (Italy), September 27 - October 1, 1999, 9-20.
- MARGIOTTA S. & NEGRI S. (2004) - *Alla ricerca dell'acqua perduta : nuove conoscenze del sottosuolo nel Salento*. Congedo, Galatina, Lecce.
- MARGIOTTA S. & NEGRI S. (2005) - *Geophysical and stratigraphical research into deep groundwater and intruding seawater in the Mediterranean area (the Salento Peninsula, Italy)*. Natural Hazards and Earth System Sciences, **5**: 127-136.
- MCDONALD M.G. & HARBAUGH A.W. (1988) - *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, book 6.
- MORENO J. & SPITZ K. (1996) - *A practical guide to groundwater and solute transport modeling*. John Wiley and Sons Inc.
- POLEMIO M. (2000) - *Degradation risk owing to contamination and overcraft for apulian groundwater resources (southern Italy)*. Water Resources Management in a vulnerable environment for sustainable development, published by K. ANDAH, UNESCO - International Hydrological Programme, Grifo Publishers, Perugia, 185-194.
- POLEMIO M., DI CAGNO M. & VIRGA R., (2000) - *Le acque sotterranee del Gargano: Risorse idriche integrative e di emergenza*. Acque Sotterranee, XVII, **68**: 35-41.
- POLEMIO M. & CASARANO D. (2008) - *Climate change, drought and groundwater availability in southern Italy*. In DRAGONI W. & SUKHIA B.S., eds., Climate Change and Groundwater, Special Publications: London, The Geological Society, **288**: 39-51.
- POLEMIO M., CASARANO D., & LIMONI P.P. (2009a) - *Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy)*. Natural Hazards and Earth System Sciences, **9**: 1461-1470.
- POLEMIO M., DRAGONE, V., & LIMONI P.P., (2009b) - *Monitoring and methods to analyse the groundwater quality degradation risk in coastal karstic aquifers (Apulia, Southern Italy)*. Environmental Geology, **58**: 299-312.
- POLEMIO M., CASARANO D., & LIMONI P.P., (2010) - *Apulian coastal aquifers and management criteria*. In CONDESSO DE MELO M.T., LEBBE L., CRUZ J.V., COUTINHO R., LANGEVIN C. & BUXO A., EDs., 21° SWIM, Salt Water Intrusion Meeting, Azores (Portugal) , 25-26 May.
- POLEMIO M., DRAGONE V. & LIMONI P. P. (2011) - *La disponibilità di acque sotterranee in Puglia negli ultimi 80 anni*. In POLEMIO ED., vol. Le modificazioni climatiche e i rischi naturali, Bari, 201-204.
- POLEMIO M. & ROMANAZZI A. (2013) - *Numerical model to support the management of groundwater resources of a coastal karstic aquifer (southern Italy)*. EGU General Assembly, Vienna (Austria), 7-12 April, id. EGU2013-4061.
- REGIONE PUGLIA (2005) - *Progetto ACLA 2 - Caratterizzazione agro ecologica della Regione Puglia in funzione della potenzialità produttiva*. A cura di CALIANDRO A., LAMADDALENA N., STELLUTI M. & STEDUTO P., Opuscolo Divulgativo.
- REGIONE PUGLIA (2009) - *Piano di Tutela delle Acque*. Servizio Tutela Acque Regione Puglia, Relazione Generale.
- RIVERA A. (2007) - *Groundwater modelling: From geology to hydrogeology, in three dimensional geologic mapping for groundwater application*. Minnesota Geological Survey, St. Paul, Open-File Report 07-4.
- ROZALL D.J. & WONG T. (2010) - *Effects of change on groundwater resources at Shalter Island, New York State, USA*. Hydrogeology Journal, **18**: 1657-1665.
- SAHA A.K., SAHA S., SADLE J., JIANG J., ROSS M.S. & PRICE R.M. (2011) - *Sea level rise and South Florida coastal forests*. Climatic Change, **107**: 81-108.
- SCANLON E.R., MACE R.E., BARRETT M.E. & SMITH B. (2003) - *Can we simulate regional groundwater flow in karst system using equivalent porous media? Case study Barton Springs Edwards aquifer, USA*. Journal of Hydrology, **276**: 137-158.
- SCHWARZ F.W. & SMITH L. (1988) - *A continuum approach for modelling mass transport in fractured media*. Water Resource Res., **24** (8): 1360-1372.
- SCNEIDER J.C. & HRUSE S.E. (2005) - *Assessing selected natural and anthropogenic impacts on freshwater lens morphology on small barrier Islands: Dog Island and St. George island, Florida, USA*. Hydrogeology journal, **14**: 131-145.
- SMITH L. & SCHWARZ F.W. (1984) - *An analysis of the influence of fracture geometry on mass transport in fractured media*. Water Resource Res., **20** (9): 1241-125.

**MODELLING OF COASTAL KARST AQUIFERS FOR MANAGEMENT SUPPORT: A CASE STUDY OF SALENTO (APULIA, ITALY)**

- TURC L. (1954) - *Le bilan d'eau des sols : relation entre les précipitations, l'évapotranspiration et l'écoulement*, Ann. Agron., **A**: 491-595.
- VAN BEYNEN P.E., NIEDZIELSKI M.A., BIALKOWSKA-JELINSKA E. & MATUSICK ALSHARIF J. K. (2012) - *Comparative study of specific groundwater vulnerability of a karst aquifer in central Florida*. Applied Geography, **32**: 868-877.
- VOSS C. (2012) - *Using groundwater models for coastal management: why simple modeling is best*. 22° Salt Water Intrusion Meeting, 17-22 July, Buzios, Brazil.
- WANG S., SHAO JONG X., ZHANG Y., HUO Z. & ZHOU X., (2008) - *Application of MODFLOW and geographic information system to groundwater flow simulation in North China Plain, China*. Environmental Geology, **55**: 1449-1462.

*Received February 2013 - Accepted May 2013*

