

INSTABILITA' DEL CENTRO URBANO DI CASALABATE (LECCE, ITALIA): ANALISI DELLE CONDIZIONI DI RISCHIO

INSTABILITY OF CASALABATE VILLAGE (LECCE, ITALY): ANALYSIS OF RISK CONDITIONS

GIUSEPPE CESAREO CALÒ^(*), FABIO MACRÌ^(**), FERRUCCIO PICCINNI^(*) & ROCCALDO TINELLI^(*)

^(*) Politecnico di Bari - Dipartimento di Ingegneria delle Acque e di Chimica - Via Orabona 4 - 70125 Bari, Italy

^(**) Studio Geologico Macrì - Via Brenta 31 - 73024 Maglie, Lecce, Italy

RIASSUNTO

Il borgo di Casalabate, frazione marina di Lecce sita sulle sponde del Mar Adriatico, è stato interessato da notevoli fenomeni di dissesto con crollo di alcune abitazioni ed inagibilità di varie altre. Per indagarne le cause è stato condotto un dettagliato piano di indagini multidisciplinari, costituito da un rilievo geologico integrato dalla trivellazione di 23 sondaggi e da una indagine georadar nonché da analisi chimico-fisiche, carotaggi termosalinometrici e misure di velocità di filtrazione sulle acque di falda. Si è così potuto definire che i litotipi presenti nella maggior parte del territorio sono ascrivibili a depositi di Duna fossile, rappresentati da calcareniti irregolarmente cementate rinvenibili fino a 4-9 m sotto il livello mare, ma di qualità fisico-meccanica prevalentemente scadente e variabile dal luogo a luogo; al di sotto dei depositi dunari fossili seguono depositi francamente marini rappresentati da biocalcareni e biocalciruditi di colore biancastro, riccamente fossilifere e irregolarmente cementate. Non sono state rilevate cavità e/o condotti riconducibili a fenomenologie di dissoluzione paracarsica, mentre sussiste un'elevata variabilità litologica, sia in senso verticale che orizzontale, dei terreni su cui poggiano le fondazioni degli edifici.

Le acque sotterranee, con carichi idraulici oscillanti fra i 30 cm e gli 80 cm s.l.m., defluiscono liberamente a mare e presentano la tipica stratificazione salina degli acquiferi costieri con valori di salinità crescenti, nel giro di 5-6 m, da pochi mg a 3-4 g/l; il deflusso a mare, inoltre, esclusivamente orizzontale interessa principalmente solo alcuni livelli dunari con velocità di filtrazione, V_f , di circa 250 cm/g.

Nel complesso, le indagini hanno evidenziato che, contrariamente a quanto era stato ipotizzato, i fenomeni di dissesto statico non sono imputabili al cedimento della volta di cavità ipogee, ma all'incidenza e al concorso dei seguenti fattori: le cattive e, in alcuni casi, pessime caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione degli edifici; la mancata preventiva caratterizzazione geotecnica degli stessi e la conseguente inadeguatezza strutturale delle tipologie di fondazione adottate; l'immissione nel sottosuolo di acque pluviali che hanno determinato il dilavamento e l'asportazione della frazione fine dei terreni di fondazione.

TERMINI CHIAVE: idrogeologia, rischio idrogeologico, acquiferi costieri

ABSTRACT

Casalabate is an outlying ward of Lecce located on the Adriatic Sea shore, over the time this small village has undergone remarkable hydrogeologic disturbance resulting in the collapse of some dwellings and the condemn of many others. In order to find out the causes, an accurate multidisciplinary investigation planning has been implemented. This includes a geological survey with 23 boreholes, a georadar investigation, as well as chemical-physical analyses, thermo-saline logging and groundwater flow velocity measurements. The above led to the determination that lithotypes in most territory are related to fossil Dune deposits, formed by irregularly cemented calcarenites which can be found up to 4-9 m below sea level whose physical-mechanical quality is basically poor and varies from place to place. Beneath fossil dune deposits, pure marine deposits of abundantly fossiliferous and irregularly cemented whitish biocalcareni and calcirudites are encountered. No cavity and/or channel associated with parakarstic dissolution phenomena has been found, but grounds underlying the foundations of buildings greatly vary in their lithologic structure both vertically and horizontally.

Groundwater, whose hydraulic heads range from 30 cm and 80 cm a.s.l., flows unimpeded to the sea and shows the typical saline stratification of coastal aquifers with salinity values which, in the space of 5-6 m, increase from a few mg to 3-4 g/l. Moreover, the exclusively horizontal outflow to the sea takes place only through some dune levels whose groundwater flow velocity, V_f , is about 250 cm/g.

As a whole, investigations proved, contrary to the assumptions, that static disturbance phenomena cannot be due to the collapse of the underground cavities vault, but because of the incidence and combination of the following factors: poor, and in some cases, very poor geotechnical characteristics of foundation grounds; the lack of a preliminary geotechnical characterization of buildings leading to the choice of improper practice in laying down foundations; the letting of rainwater into the subsoil which caused the leaching and the removal of the fine fraction of the foundation grounds.

KEY WORDS: hydrogeology, hydrogeological hazard, coastal aquifer

PREMESSA

Casalabate è una frazione del Comune di Lecce, da cui dista circa 15 km, adagiata sulle sponde del Mar Adriatico e sita nella parte più alta del Salento a ridosso della provincia di Brindisi.

È un piccolo borgo marino caratterizzato prevalentemente da una edilizia “povera” costituita da case basse in muratura, edificate in economia, poggianti direttamente sul terreno sabbioso-arenaceo tramite modeste fondazioni in materiale tufaceo. Proprio in virtù di tale tipologia edilizia, il borgo si è sviluppato nel tempo in maniera disordinata e non è mai stato interessato da studi di carattere geologico-tecnico o urbanistico, tanto che ancora oggi è privo di fogna bianca per lo smaltimento delle acque meteoriche, spesso immesse direttamente nel sottosuolo tramite pozzi; l'andamento ondulato della superficie dunare, infatti, non sempre consente il loro deflusso diretto a mare.

Negli ultimi anni questo borgo, in particolare l'area circostante via delle Conchiglie, è stato interessato da notevoli fenomeni di dissesto che hanno comportato il crollo di alcune abitazioni e l'inagibilità di varie altre; le demolizioni conseguenti hanno dato luogo, fra l'altro, alla creazione di piazza Padre Pio.

La mancanza di qualsiasi informazione geologica e geotecnica del sottosuolo e la costante esposizione all'azione erosiva del mare hanno alimentato da sempre la convinzione che tali crolli fossero dovuti alle cavità carsiche create dall'effetto sinergico delle acque sotterranee e del moto ondoso.

La necessità di definire in maniera chiara la causa di questi dissesti che minacciano anche altre abitazioni, ha condotto alla definizione del presente piano di indagini multidisciplinari integrate.

INQUADRAMENTO GEO-MORFOLOGICO

La struttura geologica della fascia costiera salentina comprendente il borgo di Casalabate è caratterizzata, nelle sue linee essenziali, dalla presenza di un basamento carbonatico di età mesozoica (*piattaforma carbonatica apula*), localmente dislocato nel sottosuolo a profondità variabili tra 30-50 metri e ricoperto da sedimenti calcarei e calcarenitici riferibili al Miocene ed al Plio-Pleistocene (COTECCHIA, 1977; CIARANFI *et alii*, 1992).

Tutta l'area interessata è caratterizzata da una superficie dolcemente degradante, da quote di 15-20 m dell'entroterra verso quote di poco superiori al livello mare in prossimità della costa, e dalla presenza in affioramento di calcareniti organogene di colore giallo-bruno (“carpari”), a granulometria grossolana, ben cementate e tenaci, a stratificazione fitta con intercalazioni di livelli calciruditi fossiliferi, a luoghi fortemente fratturati.

Questa morfologia tabulare è il prodotto di una genesi complessa dominata da un ciclico alternarsi di fenomeni di modellamento di ambiente marino e subaereo: soprattutto durante il Quaternario, infatti, il tratto di fascia costiera adriatica in esame ha subito numerosi eventi di ingressione marina alternati a periodi, più o meno lunghi, di riemersione; invece, i blandi avvallamenti di forma sub-circolare e/o ellittica testimoniano la presenza di strutture di tipo dolinare, manifestazioni carat-

INTRODUCTION

Casalabate is an outlying administrative division of Lecce Municipality, some 15 km away, on the shore of the Adriatic Sea and situated on the highest zone of the Salento by the Brindisi province.

It is a small sea village whose built-up area is ultra-working-class in type constituted by masonry low houses realized on a time and materials basis laying directly on the sandy-arenaceous ground by means of poor tufaceous foundations. Right because of its low-class nature, the village developed in an uncontrolled way over the time, thus skipping all geological-technical or town-planning studies. In fact, still up to date it lacks in drainage system for meteoric water which is often conveyed directly underground through wells, this is because the undulated conformation of the dunal surface does not allow meteoric water to directly flow into the sea.

In the last few years this village, in particular the area surrounding “Via delle Conchiglie” has undergone considerable environmental disturbance resulting in the collapse of some houses and the condemn of many others. The consequent demolitions gave place, among other things, to Padre Pio square.

The lack of any geological and geotechnical information of the subsoil being exposed constantly to the sea erosive action has always supported the assumption that such collapses were due to karstic cavities created by the synergic effect of groundwater and the wave motion.

Hence, the need to clearly define the causes of such disturbances threatening also further houses by implementing the present planning of integrated multidisciplinary investigations.

GEOMORPHOLOGIC SETTING

The geological structure of the Salento coastal strip including Casalabate village is basically characterized by the presence of a carbonate bedrock of the Mesozoic (*Apulian carbonate platform*) locally seated in the subsoil at depths between 30-50 m and overlain by calcareous and calcarenite sediments. Age is between Miocene and Plio-Pleistocene (COTECCHIA, 1977; CIARANFI *et alii*, 1992).

The whole area is characterized by a surface gently sloping down from the inland 15-20 m to values very close to sea level near the coast, and by brown-yellow, coarse grain-sized, well cemented and strong, thick-stratified intercalated with fossiliferous calcirudite layers, strongly fractured at sites, outcropping organogenic calcarenites (“carpari”).

This tabular morphology results from a complex genesis ruled by moulding phenomena of the marine and subaerial environment, which alternated cyclically above all during the Quaternary. In fact, the Adriatic coastal strip under study has been intruded by seawater number of times, with fairly long periods of coming up again a.s.l.. Conversely, the sub-circular and/or elliptic-shaped gentle sinks evidence the presence of doline-like structures typical of the karstic morphogenesis developed in the mainland environment.

The area is also characterized by “collapse structures”, that is

teristiche della morfogenesi carsica evolutasi in ambiente continentale.

Tipiche della zona sono alcune particolari strutture da collasso, ovvero derivanti dal crollo della volta di cavità assai prossime alla superficie, che assumono il nome caratteristico di "aisi": si tratta in genere di piccole depressioni dal contorno sub-circolare, spesso caratterizzate dalla presenza, sul fondo, di fenomeni di affioramento di acque di falda sotto forma di polle sorgive. Altro elemento peculiare della carsogenesi di questi depositi calcarenitici è la scarsa produzione di terra rossa, quasi sempre assente all'interno delle cavità ipogee.

Inoltre, il paracarsismo assume uno sviluppo prevalentemente ipogeo, ma comunque poco profondo e spesso epidermico (a causa anche del modesto spessore delle calcareniti quaternarie), con reticoli di cavità e condotti in stadio giovanile, di norma poco diramati e caratterizzati da interruzioni improvvise del loro sviluppo.

Tali forme paracarsiche si sviluppano principalmente in senso orizzontale e l'estensione delle singole forme risulta normalmente limitata in senso areale sia per i tempi relativamente brevi in cui ha agito la dissoluzione carsica (Quaternario) sia a causa delle oscillazioni glacio-eustatiche del livello marino: durante le fasi di trasgressione si è senz'altro verificata una stasi nell'evoluzione del fenomeno paracarsico (COTECCHIA *et alii*, 1969; CALÒ *et alii*, 2005). Tuttavia, la rilevanza di tale fenomeno risulta notevole sotto l'aspetto applicativo (crolli, dissesti nelle fondazioni, ecc.).

LINEAMENTI IDROGEOLOGICI

La buona permeabilità media delle formazioni affioranti, la presenza e la distribuzione di strutture di origine carsica (dolines, aisi, ecc.) e, non ultimo, l'andamento pianeggiante della superficie topografica, condizionano notevolmente anche l'idrografia superficiale, che risulta complessivamente poco sviluppata. Gli unici elementi idrografici di rilievo sono costituiti dai canali di bonifica di origine antropica che, pur contribuendo anche alla raccolta delle acque pluviali incidenti su taluni piccoli bacini costieri, svolgono essenzialmente la funzione di drenaggio della falda superficiale, soprattutto in quelle aree più depresse, ove la stessa affiora attraverso scaturigini di tipo sorgentizio, generalmente in forma di polle sorgive.

Particolarmente complessa ed articolata si presenta la circolazione delle acque sotterranee, il cui deflusso si esplica in regime di acquifero costiero, dunque in presenza di delicati e mutevoli equilibri di interazione tra acque dolci continentali ed acque marine di intrusione continentale (CALÒ & TINELLI, 1995). Il quadro idrogeologico è caratterizzato dalla presenza nel sottosuolo di due corpi acquiferi sovrapposti: la "falda profonda", avente sede nei calcari del Cretaceo permeabili per fessurazione e carsismo, e la "falda superficiale", localizzata all'interno dei terreni di età neogenica e quaternaria (COTECCHIA, 1977).

Le acque della "falda profonda" sono sostenute, alla base, dalle acque marine di invasione continentale: poiché nell'area in esame l'acquifero carbonatico mesozoico è dislocato ben al di sotto del livello mare. Tale falda viene mantenuta in pressione e, fino a circa 1,5 km dalla linea di costa risulta completamente sostituita dalle acque marine di invasione continentale (fenomeno, questo, che interessa

resulting from the collapse of vaults in cavities very close to the earth surface, named "aisi". Generally they are small depressions with a sub-circular boundary, often characterized at the bottom by the insurgence of groundwater in the form of springs. One more factor peculiar to the karst genesis of these calcarenite deposits is the poor production of terra rossa which is almost always absent in the underground cavities .

Moreover, the parakarsticism mostly has an underground development, but shallow and often superficial (also owing to the modest thickness of the Quaternary calcarenites), with networks of infancy cavities and channels, basically scarcely branched off and characterized by sudden breaks in their development.

Such parakarstic forms mainly develop horizontally and the extension of each of them is normally reduced aerially, both due to the relatively short times karst dissolution (Quaternary) occurred and because of glacio-eustatic fluctuations of the sea level. It is firmly believed that during transgression phases, a standstill period of the parakarstic phenomenon evolution has taken place. (COTECCHIA *et alii*, 1969; CALÒ *et alii*, 2005). Nevertheless, the significance of said phenomenon is really important from the applicative point of view (collapses, foundations unbalance, etc.).

HYDROGEOLOGICAL OUTLINE

The good average permeability of outcropping formations, the occurrence and the distribution of karstic structures (dolines, aisi, etc.) and, not the least, the level trend of the topographic surface, also influence considerably the hydrography on the surface, which is underdeveloped. Anthropoc drainage channels account for the only important hydrographic elements. In fact, not only do they contribute to collect rainwater falling on some little coastal basins, but also allow the shallow aquifer to be drained, especially in those lower-lying areas, where it emerges to the surface generally in the form of springs.

Groundwater circulation appears particularly complex and articulated. For, by discharging under coastal aquifer regime, groundwater comes across delicate and changeable interaction equilibria between fresh groundwater and intruding seawater (CALÒ & TINELLI, 1995). The hydrogeological framework is characterized by two superimposed water bodies: the "deep aquifer" seated into the limestones of the Cretaceous permeable by fissuration and karsticism, and the "shallow aquifer" within grounds of the age of Upper Tertiary and Quaternary (COTECCHIA, 1977).

The "deep aquifer" waters float on intruding seawater because the Mesozoic carbonate aquifer, in the area under investigation, is seated far below the sea level. The groundwater keeps confined, and as far as 1.5 km from the coastline it is totally replaced by intruding seawater (this a phenomenon characterizing almost the whole Casalabate built-up area).

The "shallow aquifer" flows within Quaternary calcarenite

praticamente l'intero centro abitato di Casalabate).

La "falda superficiale" è posizionata all'interno dei depositi calcarenitici quaternari ed è sostenuta, alla base, dal livello calcarenitico marnoso del Miocene ("Pietra Leccese") praticamente impermeabile. Il suo livello di base, anche in questo caso, è rappresentato dal livello del mare; tuttavia, a differenza di quanto avviene per la falda profonda, l'ingressione del mare in questo secondo acquifero è molto limitata, sicché anche in prossimità della costa si riscontrano valori del contenuto salino relativamente bassi. La superficie freatica di tale falda subisce oscillazioni periodiche indotte dalle variazioni del livello del mare (maree, moto ondoso). Tale "comunicabilità" tra falda superficiale e mare non è costante, ma varia in rapporto alle condizioni di permeabilità dell'acquifero calcarenitico: vi sono pertanto delle "zolle" di acquiferi calcarenitici, a ridotta permeabilità, che costituiscono uno sbarramento al deflusso a mare delle acque di falda. Analogamente esistono delle vie preferenziale di deflusso sotterraneo normalmente convergenti verso sorgenti costiere. Le variazioni di permeabilità in seno all'acquifero calcarenitico non avvengono solo in senso orizzontale, ma anche in senso verticale, pertanto la falda è formata da una serie di livelli sovrapposti caratterizzati da velocità di filtrazione assai variabili (da pochi centimetri a numerosi metri al giorno). Conseguentemente i vari livelli acquiferi sono caratterizzati da carichi idraulici diversi l'uno dall'altro (CALÒ *et alii*, 1992).

La presenza della falda superficiale rappresenta il fattore principale che ha consentito lo sviluppo del paracarsismo. La notevole anisotropia della permeabilità all'interno dell'acquifero calcarenitico che la contiene è responsabile, infatti, del localizzarsi di fenomenologie paracarsiche in corrispondenza di livelli maggiormente aggredibili da parte delle acque.

Il paracarsismo nelle calcareniti quaternarie si è generato per alterazione e soluzione chimica soprattutto del cemento contenuto nelle rocce ed è proceduto secondo i ben noti cicli dell'evoluzione speleogenetica per erosione meccanica, tenendo conto che le caratteristiche del livello interessato dalla presenza della falda superficiale (ampia estensione areale e breve distanza dalla superficie topografica) ne hanno condizionato lo sviluppo. Gli stadi più evoluti si manifestano con lesioni, sfaldamenti e crolli delle bancate calcarenitiche, sino ad arrivare alla completa emersione delle stesse cavità paracarsiche.

Inoltre, l'evoluzione del fenomeno per la zona in esame, prospiciente la fascia costiera, è stata sensibilmente accelerata dall'azione erosiva e demolitrice operata dal mare. Prova ne sia il fatto che tali manifestazioni paracarsiche, sviluppandosi nell'area in esame a breve profondità dalla superficie topografica, evolvono spesso in forme di crollo.

PIANO DI INDAGINE

Da quanto esposto emerge chiaramente come per l'area di Casalabate si disponga solo di informazioni geologiche ed idrogeologiche di carattere generale che non possono, data la notevole variabilità da luogo a luogo dei depositi calcarenitici, costituire le conoscenze necessarie per definire le cause del dissesto né, tanto meno, la base scientifica per un intervento di consolidamento.

deposits underlain by marly calcarenites of the Miocene ("Pietra Leccese") which are practically impermeable. Its base level, here too, is represented by the sea level. However, contrary to what happens to the deep aquifer, seawater intrusion in this second aquifer is very poor, so salinity is relatively low even close to the coast. The hydraulic head of this groundwater undergoes periodic and aperiodic oscillations induced by sea level (tides, swell). Such a "communicability" between shallow aquifer and sea is not constant, but it varies according to the permeability of calcarenites. There are, then, some low-permeable "clods" of calcarenites acting as an effective barrier to the seaward outflow of the groundwaters. Similarly, there are some preferential flow paths which do normally converge toward coastal springs. The permeability variations inside the calcarenites take place both horizontally and vertically, hence the aquifer is constituted by a series of superimposed levels characterized by greatly variable flow velocities (from a few centimetres to number of metres a day). Consequently, groundwater levels are characterized by hydraulic heads being different one from the other (CALÒ *et alii*, 1992).

The shallow aquifer accounts for the main factor favouring parakarstism. The considerable anisotropy of permeability inside the calcarenites causes parakarstic phenomena to occur near levels the waters mostly come in contact with.

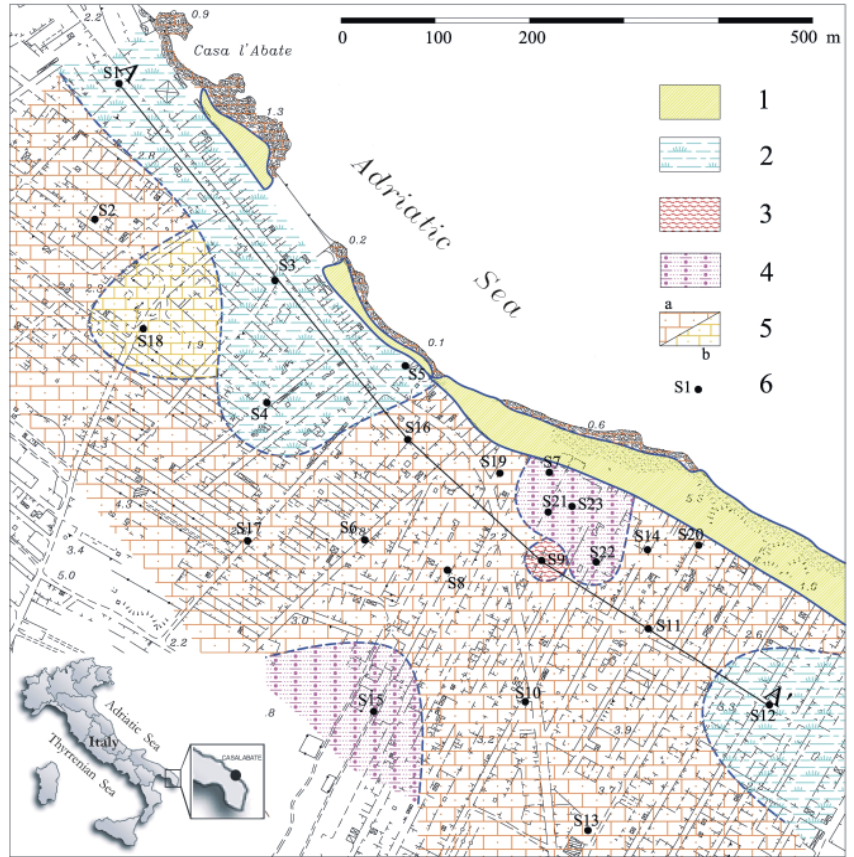
The parakarstism in Quaternary calcarenites originated by alteration and chemical solution above all of the cement in the rocks, and it proceeded according to the well known cycles of the speleogenetics by mechanical erosion, considering that the characteristics of the level concerned by the presence of the shallow aquifer (large areal extension and short distance from the topographic surface) did influence its development. The most evolved stages evidence cracks, cleavage and collapses of the calcarenitic banks, up to the full emersion of the parakarstic cavities

Furthermore, the phenomenon in the area under investigation, overlooking the coast strip, was fairly speeded up by the erosive and demolishing action of the sea. As proof of this one can see that the parakarstic occurrence, in the investigated area at short depth from the topographic surface, often results in forms of collapse.

INVESTIGATION PLANNING

According to the above, one can realize that the Casalabate area can only rely on general hydrogeologic and geologic information which fail to provide needed knowledge to establish the causes of the disturbance, and the scientific data to allow consolidation actions, owing to the considerable variability of the calcarenitic deposits from one place to the other.

Fig. 1 - Schema geolitologica: 1) sabbie e dune costiere; 2) sabbie limose palustri; 3) terre rosse; 4) depositi di duna fossile sciolti; 5) calcareniti irregolarmente cementate (duna fossile)
 - *Geolithologic map. 1: sands and coastal dunes 2: slimy and marsh sands 3: terra rossa 4: deposits of loose fossil dune 5: irregularly cemented calcarenites (fossil dune)*



Inoltre, le rocce calcarenitiche quaternarie sono interessate, come si detto, da forme di paracarsismo che si manifesta con un ampio intervallo di intensità, passando da piccoli condotti carsici posti in corrispondenza della linea di riva fino al crollo di cavità sotterranee poste a breve profondità dal piano campagna.

Pertanto, per ricostruire nel dettaglio il complesso paracarsismo-circolazione idrica sotterranea, si è impostato un piano di indagine multidisciplinare, costituito da un rilievo geologico di dettaglio, integrato dalla trivellazione di sondaggi meccanici e da una indagine geofisica estesa a tutta l'area edificata (Fig. 3). Sulle acque di falda sono state, inoltre, eseguite analisi chimico-fisiche e batteriologiche, carotaggi termo-salinometrici e misure di velocità di filtrazione.

Per quanto attiene le indagini indirette, trattandosi di un ambiente completamente urbanizzato, si è escluso il ricorso ai metodi di telerilevamento; infatti, le alterazioni e le manomissioni che ha subito il primo metro di sottosuolo (ovvero quello che risulta il più importante in tale tipo d'indagine), sono tali che certamente si sarebbero avute "risposte" fortemente disturbate se non fuorvianti. Così come altrettanto sconsigliabili risultano, per la presenza dei fabbricati e di oggetti metallici interrati (fondazioni, serbatoi, condutture), i metodi geofisici che utilizzano campi naturali (gravimetria, potenziale spontaneo) ed i metodi elettromagnetici a bassa frequenza.

Moreover the Quaternary calcarenitic rocks, as said before, are concerned by parakarstic forms with a wide range of intensity from little karst channels, cut level to the shoreline, to the collapse of underground cavities located at short depth from the topographic surface.

Hence, in order to reconstruct in detail the parakarstism - groundwater circulation system, a multidisciplinary investigation planning has been worked out. It includes a detailed geological survey integrated with drilling of boreholes and by a geophysical investigation covering the whole built-up area (Fig. 3). In addition, chemical-physical and bacteriological analyses, temperature, salinity, and flow velocity measurements were carried out to groundwaters.

As for indirect investigations, being this a fully urbanized environment, no remote surveying method has been resorted to. In fact, alterations and violations occurred to the first metre of the subsoil (that is the most important portion in this type of investigation) are such provide markedly distorted and even misleading "responses". As well as geophysical methods using natural fields (gravimetry, spontaneous potential) and low frequency electromagnetic methods are unadvisable, owing to the presence of buildings and underground metal objects (foundations, reservoirs, pipes).

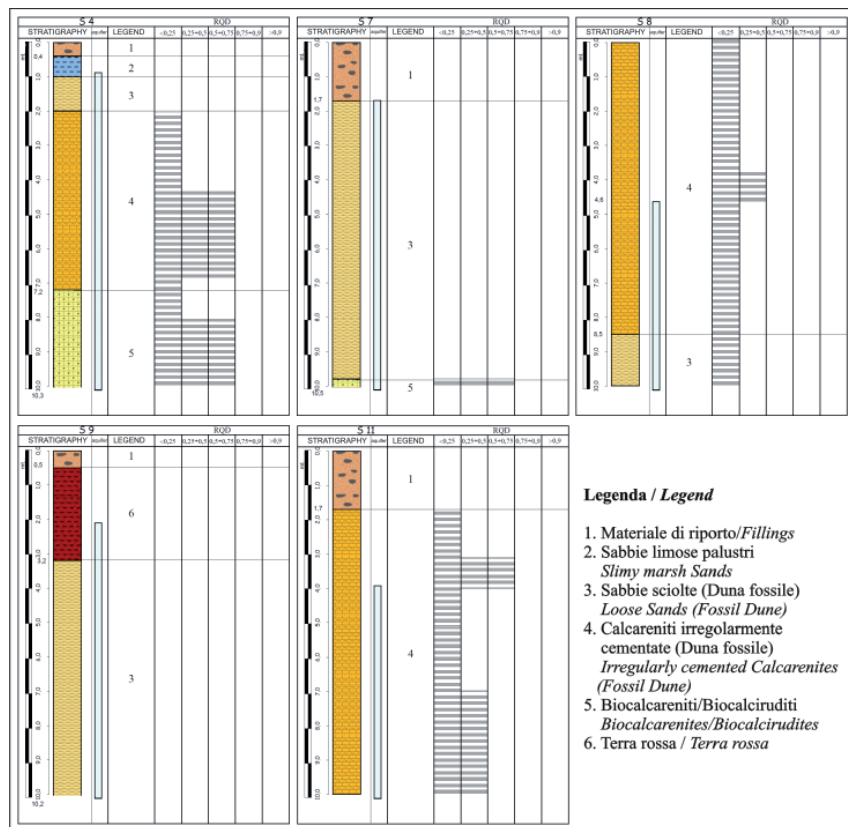


Fig. 2 - Litostratigrafia dei pozzi S4, S7, S8, S9 e S11
- Lithostratigraphy of monitoring boreholes S4, S7, S8, S9 and S11

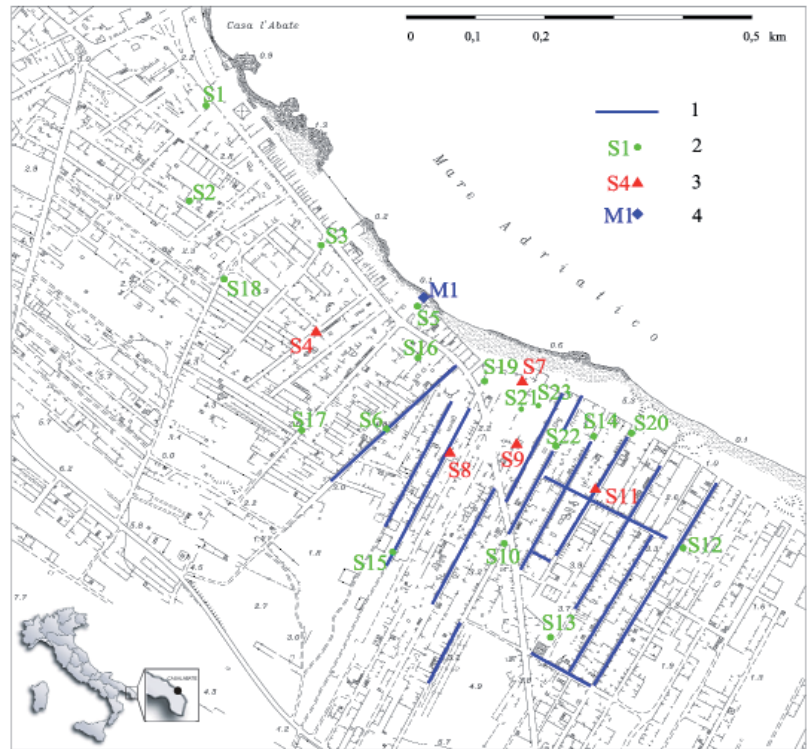
Alla luce di tali considerazioni, vista la natura calcarenitica del sottosuolo, le piccole profondità implicate ed i motivi occulti di fallacità dei singoli metodi, sempre possibili in ambiente urbano, si è ritenuta più idonea una esplorazione georadar (DANIELS, 1996; MAGALDI *et alii*, 2006), avendo cura di depurare i segnali riconducibili alle reti di sottoservizi esistenti e le riflessioni in aria dei fabbricati, dell'illuminazione pubblica, di cavi elettrici esterni, ecc..

Ovviamente tale indagine ha rappresentato la necessaria integrazione di quelle dirette, costituite da una rete di 23 sondaggi geognostici (Fig. 2) eseguiti a rotazione con carotaggio continuo con i quali è stato possibile definire dettagliatamente la geologia dell'area in esame (Figg. 1 e 4); tale rete è stata poi integrata da un pozzo di monitoraggio della falda superficiale attrezzato con un idrometrografo per il rilievo, in continuo, delle variazioni del livello della falda superficiale mentre su tutti gli altri pozzi sono state eseguite misure periodiche del livello freatico (Fig. 5) e del contenuto salino nonché carotaggi termosalinometrici (Fig. 6) ed analisi chimiche delle acque di falda. Contestualmente le variazioni del livello marino sono state registrate mediante un mareografo. Infine, per acquisire informazioni sulla velocità di filtrazione delle acque sotterranee su 5 sondaggi geognostici (Fig. 7) sono state condotte altrettante determinazioni utilizzando il metodo della "diluizione puntiforme" in pozzo singolo con l'impiego del KI come tracciante (LOPEZ *et alii*, 2009).

In the light of the above considerations, given the calcarenitic nature of the subsoil, the occurrence of short depths, and the unknown reasons causing the single methods to be deceptive, always likely in an urban environment, a georadar investigation (DANIELS, 1996; MAGALDI *et alii*, 2006) is deemed more suitable but taking care it is stripped of any signals related to smaller services and the reflections in the air of buildings, public lighting, outer cables etc.

Clearly, the investigation has been integrated with a network of 23 direct geognostic surveys (Fig. 2) carried out in turn by continuous boring which made known in detail the geology of the area under study (Figs. 1 and 4). Said network, then, has been integrated with an observation borehole monitoring the shallow aquifer, equipped with a hydrometeorograph to continuously detect level variations of the shallow aquifer, while periodic measurements of water level (Fig. 5), of salinity, thermosalinometric measurements (Fig. 6) and groundwater chemical analyses have been conducted for all the other logs. At the same time seawater level variations have been recorded by means of a tide gauge. In the end, to obtain information on the velocity of groundwater flow, on 5 boreholes as many determinations have been carried out by adopting the single-borehole - tracer dilution method with the use of KI as tracer.

Fig. 3 - Ubicazione dei sondaggi e dei profili georadar: 1) prospezione georadar; 2) pozzo; 3) pozzo per monitoraggio; 4) mareografo
 - Site of geognostic and georadar profiles. 1: georadar survey, 2: geognostic survey by piezometer, 3: observation well, 4: borehole monitoring the tide level



RISULTATI E CONCLUSIONI

Dall’analisi integrata delle informazioni desunte dai sondaggi geognostici e dall’indagine georadar si è potuto rilevare che:

1. i litotipi normalmente presenti nella maggior parte del territorio indagato sono classificabili come depositi di origine eolica appartenenti ad un sistema di Dune Fossili costituito da calcareniti di colore giallo-marroncino, irregolarmente cementate, a grana medio-grossolana, con evidenti tracce di laminazione incrociata, tipica di questo tipo di depositi subaerei (Figg. 1 e 4);
2. tali calcareniti si presentano più o meno sottilmente stratificate e manifestano un grado di cementazione variabile sia in senso orizzontale che verticale, sicché, dal punto di vista delle proprietà fisico-meccaniche, il loro grado di “qualità” varia da “molto scadente” a “buono”(Fig. 2);
3. i litotipi calcarenitici di duna fossile presentano spessori di diversi metri, giacché sono stati rinvenuti nel sottosuolo sino a profondità comprese tra -4 e -9 metri sotto il l.m.m (Fig. 4);
4. al di sotto dei depositi dunari fossili (Fig. 4) seguono depositi francamente marini rappresentati da biocalcareniti e biocalciruditi di colore biancastro, riccamente fossilifere e irregolarmente cementate;
5. non sono state rilevate cavità e/o condotti riconducibili a fenomenologie di dissoluzione paracarsica, mentre, viceversa, esiste un’elevata variabilità litologica, sia in senso verticale che orizzontale, dei terreni su cui poggiano le fondazioni degli edifici.

RESULTS AND CONCLUSIONS

The integrated analysis of information obtained from logs and the georadar investigation evidences that:

1. lithotypes normally present in most investigated territory can be classified as deposits of Aeolian origin belonging to a system of fossil Dunes formed by medium-coarse grained, irregularly cemented, yellow-light brown calcarenites with clear cross lamination traces, typical of this kind of subaerial deposits (Figs. 1 and 4);
2. these calcarenites are more or less thinly stratified with a variable degree of cementation both horizontally and vertically, their “quality” degree ranges from “very poor “ to “good” (Fig.2);
3. the calcarenitic lithotypes of fossil dune are several metres thick: they were encountered underground at depths between -4 and -9 below sea level (Fig.4);
4. beneath fossil dune deposits (Fig.4) merely marine deposits follow, they are represented by richly fossiliferous whitish biocalcarenites and biocalcirudites;
5. no cavities and/or channels referable to parakarstic dissolution phenomena have been detected, while, on the contrary, grounds bearing buildings foundations, appear highly variable both vertically and horizontally from the lithologic standpoint.

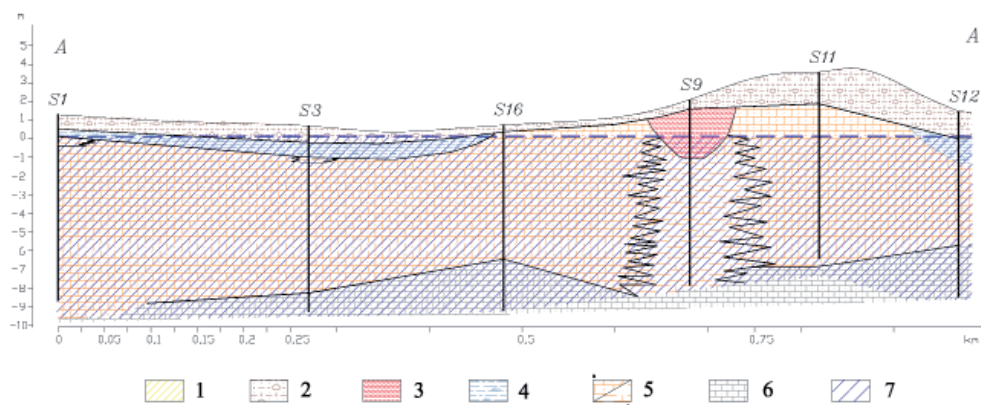


Fig. 4 - Sezione idrogeologica: 1) sabbie e dune costiere; 2) materiale di riporto/terreno vegetale; 3) terre rosse; 4) sabbie limose palustri; 5) duna fossile; 6) biocalcarenes, biocalciruditi
 - Hydrogeological section: 1) sands and coastal dunes; 2) fillings/top soil; 3) terra rossa; 4) slimy marsh sands; 5) fossil dunes; 6) biocalcarenes and biocalcirudites

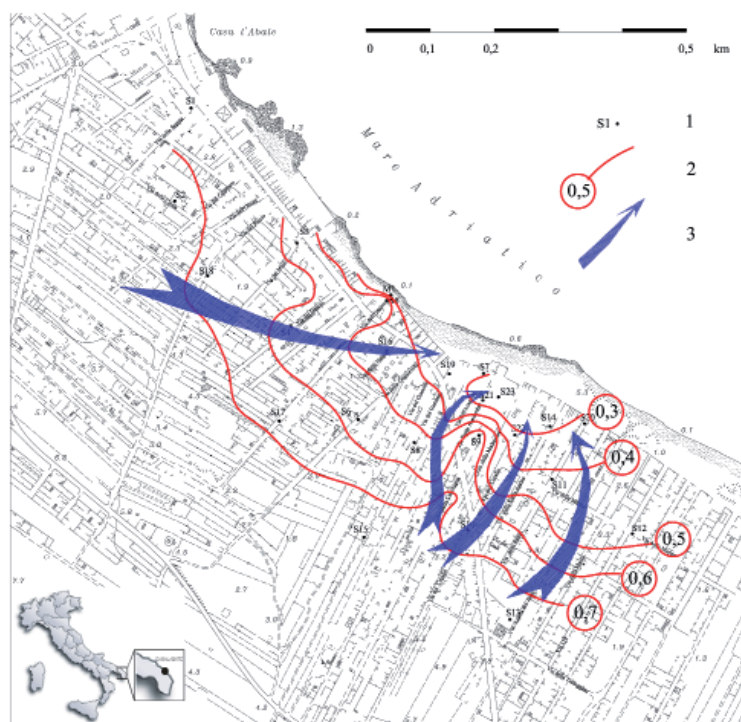


Fig.5 - Carta delle isofreatiche; 1) piezometro; 2) isofreatica; 3) direzione principale di flusso.
 - Map of water-table contour; 1) piezometer; 2) water-table contour (m a.s.l.); 3) underground flow direction

- Dalle indagini idrochimiche ed idrodinamiche è inoltre emerso che:
- le acque sotterranee, che denotano carichi idraulici oscillanti fra i 30 cm e gli 80 cm s.l.m.(Fig 5), defluiscono liberamente a mare e presentano una netta stratificazione salina con valori di salinità crescenti, nel giro di 5-6 m, da pochi mg a 3-4 gr/l;
 - detta stratificazione salina (Fig. 6) è ovviamente imputabile alla presenza degli equilibri idrostatici tipici degli acquiferi costieri, laddove le acque dolci di falda galleggiano, in virtù della propria minore densità, sulle sottostanti acque marine di intrusione continentale;
 - il libero deflusso a mare delle acque di falda, rilevato con le mi-

Hydrochemical and hydrodynamic investigations also evidenced that:

- groundwaters with hydraulic heads ranging from 30 cm to 80 cm a.s.l. (Fig. 5) flow freely to the sea and show a clear-cut saline stratification with salinity values which, in the space of 5-6-m, increase from a few mg to 3-4 gr/l;
- said saline stratification (Fig. 6) is obviously to be referred to the presence of hydrostatic equilibria typical of coastal aquifers, where fresh groundwaters, owing to their lesser density, float on top of intruding seawaters;
- the unimpeded discharge to the sea of groundwaters, detected by

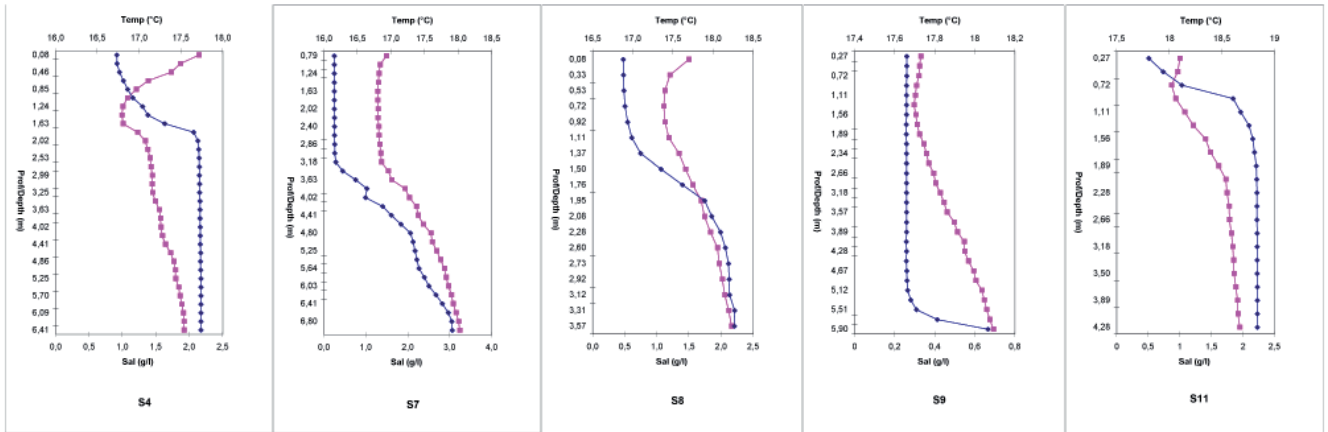


Fig. 6 - Carotaggi termosalinometrici nei pozzi S4, S7, S8, S9, e S11
 - Thermosalinometric logs on S4, S7, S8, S9 and S11 boreholes

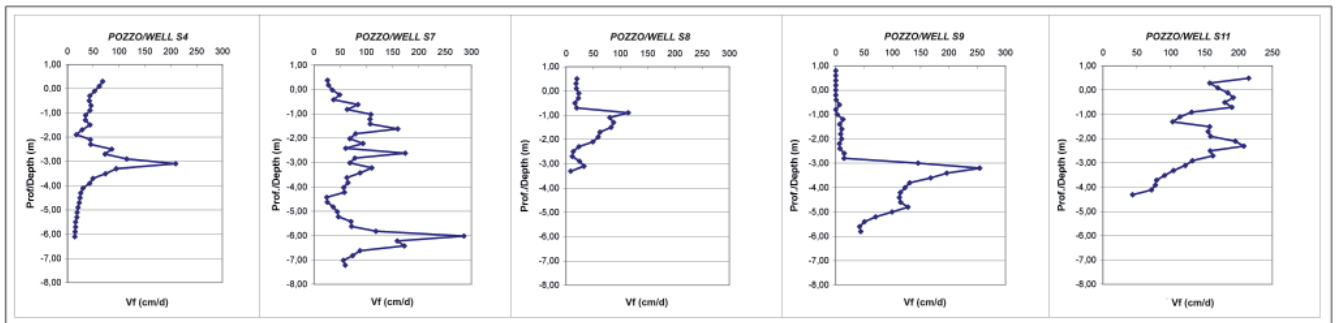


Fig. 7 - Velocità di filtrazione rilevate nei pozzi S4, S7, S8, S9, e S11
 - Groundwater flow measurements on S4, S7, S8, S9 and S11 boreholes

sure della velocità di filtrazione (Fig. 7), si esplica lungo tutta la colonna idrica in maniera disomogenea, giacché gli orizzonti più permeabili, che fanno riscontrare valori di V_f dell'ordine di 200-300 cm/g; risultano localizzati a circa 3 m sotto il livello statico, mentre sopra e sotto tale livello si rilevano V_f di circa 50 cm/g se non addirittura inapprezzabili.

Nel complesso, i risultati della campagna di indagine hanno evidenziato che, contrariamente a quanto era stato ipotizzato inizialmente, i fenomeni di dissesto statico che hanno lesionato irrimediabilmente un gran numero di edifici, non sono stati causati dal cedimento della volta di cavità ipogee, ma dall'incidenza e dal concorso di vari fattori, tra cui:

- le cattive e, in alcuni casi, pessime, caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione degli edifici;
- la mancata preventiva caratterizzazione geotecnica degli stessi e la conseguente inadeguatezza strutturale delle tipologie di fondazione adottate;
- l'immissione nel sottosuolo di acque pluviali che hanno determinato il dilavamento e l'asportazione della frazione fine dei terreni di fondazione.

measuring the velocities of the groundwater flow (Fig. 7) takes place along the whole water column in a not homogeneous way, given that the most permeable levels, with V_f values of the order of 200-300 cm/d are located at about 3 m below the static level, while above and below this level, V_f values are about 50 cm/d or even negligible.

As a whole, contrary to previous assumptions, the results of the investigation campaign pointed out that the static disturbance phenomena which irremediably damaged number of buildings, were not provoked by the collapse of the cavities vaults in the subsoil, but by the incidence and combination of different factors among which:

- the poor, and in some cases, very poor geotechnical characteristics of the foundations of buildings;
- the lack of preventive geotechnical characterization of foundations and the resulting structural inadequacy of foundations resorted to;
- the letting of rainwater into the subsoil causing the fine fraction of the foundations grounds to be leached and carried away.

Se ne conclude che il rischio idrogeologico incidente sull'area di Casalabate sia imputabile in prima istanza alle pessime proprietà fisico-meccaniche del terreno e che tale rischio può essere affrontato tramite una puntuale caratterizzazione geotecnica del suolo che consenta, di conseguenza, una idonea progettazione delle strutture di fondazione.

In conclusion, the hydrogeological risk of Casalabate area is likely to be firstly ascribed to the very poor physical-mechanical properties of the ground, and it can be tackled by means of an accurate geotechnical characterization of the ground thus allowing an appropriate projecting of foundations to be worked out.

OPERE CITATE/REFERENCES

- CALO' G.S., GNONI R. & STANI M. (1992) - *Caratteri idrogeologici delle falde superficiali della Penisola Salentina e valutazione della vulnerabilità degli acquiferi*. Amministrazione Provinciale di Lecce, Lecce, Italia.
- CALO' G.S. & TINELLI R. (1995) - *Systematic Hydrogeological Study of Hypothermal Spring (S. Cesarea Terme, Apulia), Italy*. Journal of Hydrology, **165**: 185-205. Amsterdam, The Netherlands.
- CALO' G.C., TINELLI R., LUCREZIO D. (2005) - *Riscontri delle oscillazioni eustatiche flandriane nelle acque profonde degli acquiferi salentini (Puglia)*. Giornale di Geologia Applicata, Udine, Italia.
- CIARANFI N., PIERI P. & RICCHETTI G. (1992) - *Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centromeridionale)* Mem. Società Geologica Italiana, **41**, 449-460.
- COTECCHIA V. (1977) - *Studies and investigations on Apulian groundwater and intruding seawater (Salento Peninsula)*. C.N.R. - Quaderni Istituto di Ricerca Sulle Acque, n. **20**, Roma, Italia.
- COTECCHIA V., DAI PRA G. & MAGRI G. (1969) - *Oscillazioni tirreniane e oloceniche del livello del mare nel Golfo di Taranto, corredate da datazioni col metodo del radiocarbonio*. Geol. Appl. Idrogeol., **6**, 93-148, Bari, Italia.
- DANIELS D.J. (1996, Eds.) - *Subsurface-penetrating radar*. The Institution of Electrical Engineers, London, U.K.
- LOPEZ N., SCIANNAMBLO D., SPIZZICO M. & TINELLI R. (2009) - *L'impiego del KI come tracciante nelle misure di velocità di filtrazione*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **2/2009**, Roma, Italia.
- MAGALDI D., SPIZZICO M., LOPEZ N., RANALLI D., SCIANNAMBLO D. & SCOZZAFAVA M. (2006) - *Ricostruzione stratigrafica mediante indagini georadar: area campione di S. Vito dei Normanni (Brindisi, Italia)*. Giornale di Geologia Applicata, **4**: 92-100, Udine, Italia.

Received October 2010 - Accepted December 2010