

INDIVIDUAZIONE DI AREE A RISCHIO SINKHOLE: NUOVI CASI DI STUDIO NEL LAZIO MERIDIONALE

Stefania Nisio¹ & Fabiana Scapola²

¹Apat- Dipartimento Difesa del Suolo - V. Curtatone, 3 - 00185 Roma. E-mail stefania.nisio@apat.it

²Stage di Formazione Apat - Via Littorio19, 03038 Roccasecca (FR)

RIASSUNTO: S. Nisio & F. Scapola, *Individuazione di aree a rischio sinkhole: nuovi casi di studio nel Lazio meridionale*. (IT ISSN 0394-3356, 2005).

Distribuiti sul territorio italiano sono presenti molti laghetti di forma sub-circolare originatisi in epoca storica, le cui modalità di formazione, la morfologia e il contesto geologico-strutturale potrebbero essere compatibili con fenomenologie di *piping sinkhole*.

Tali laghetti presentano in genere diametro variabile da pochi metri al centinaio di metri e profondità fino ad un massimo di cinquanta metri. Su alcuni si narrano leggende che ne farebbero risalire la formazione ad un evento catastrofico.

La correlazione tra questi e gli sprofondamenti catastrofici, tipo *piping sinkholes*, è suggerita dall'osservazione del fenomeno più frequente dopo la formazione di un sinkhole: il processo di "annegamento" della cavità. Nella maggior parte dei casi, infatti, le acque di infiltrazione si riversano all'interno della cavità di sprofondamento dandole la fisionomia di un piccolo lago di forma sub-circolare. In altri casi, invece, al fondo della cavità vi sono delle sorgenti che colmano rapidamente la voragine, nell'arco di pochi giorni, alimentandola perennemente.

Per alcuni fenomeni le ricerche effettuate hanno permesso di acquisire informazioni precise circa la data e le modalità di formazione, come è avvenuto per il Lago di Caira, nei pressi di Cassino, di cui è stato possibile proporre una ipotesi genetica.

Il Lago di Caira, non noto sino ad oggi nella letteratura geologica, si è formato in seguito ad un evento calamitoso ed in maniera altrettanto repentina si è ricolmato, dopo circa due secoli. È stato possibile effettuare una ricostruzione accurata del contesto geologico, geomorfologico e idrogeologico al contorno nell'area di Cassino-Caira, e ricostruire la profondità del *bedrock*. La natura dello sprofondamento risulta compatibile con quella di un fenomeno di erosione dal basso, *sinkhole s. s.*; *la cavità infatti si è originata in un'area di pianura al di sopra di una copertura continentale con spessori superiori a 100 metri*.

La scoperta della presenza del lago ha suscitato la necessità di indagare a fondo tutto il territorio del Lazio meridionale, al fine individuare altri possibili episodi di *deep piping*. Le ricerche hanno confermato che anche nelle aree limitrofe si sono manifestati in passato questi episodi calamitosi. È stato, inoltre, individuato un allineamento NNE (Faglia Theodicea) lungo il quale si concentrano questi fenomeni.

ABSTRACT: S. Nisio & F. Scapola, *Sinkhole prone areas: new study cases in southern Lazio*. (IT ISSN 0394-3356, 2005).

Many sub-circular ponds in Italian territory which originated in historical age, could be due to piping sinkhole phenomena. This hypothesis is supported by the geological, morphological and structural setting of the area affected by the sinkholes.

The small lakes have diameters from a few, to hundreds of meters and a depth of up to fifty meters. The names are of dialectical origin and they usually indicate a kind of sinking. Some legends refer the origin of the lakes to a quick catastrophic collapse.

These depression are usually originated by karst erosion (collapse dolines) and the genetic process could sometimes be related to a deep piping process.

The correlation between collapses and piping sinkholes is confirmed by the "drowning" of the cavity soon after the formation. Groundwater fills the cavity creating a pond, sometimes with underwater springs that feed the small lake.

The identification of a pond as sinkhole is not easy and needs specific studies such as geological surveys, geophysical, geochemical and hydrogeological studies. Sometimes it is not possible to make an extensive field survey, due to costs, but it is just possible to suggest some hypotheses. The first step is to verify the geological and structural setting of the area, on the field and from the available literature.

In some cases we have found a lot of information on, the date and the modalities of the cave genesis; for example the Caira sink.

The Caira Lake, unknown in geological literature, is formed by a collapse and after two centuries it is buried. Information about this lake are preserved in few ancient documents in Cassino Mount Abbey. Geological, geomorphological and hydrogeological studies have been conducted. Some first hypothesis are presented to explain the genesis of Caira lake. The origin of the lake is compatible to sinkhole sensu stricto (or piping sinkhole); the lake is originated in a plain area over sedimentary cover (up 100 meters of thickness).

After the discovery of the ancient lake, many areas of southern Lazio have been investigated.

The analysis of the aerial photographs has identified the location of many sinkhole ponds and paleoforms, in the same area. Some of which at the present time are still the seat of the ponds and others are dry. From the historical sources the presence of other numerous lakes, now extinct and of difficult location have been verified.

Examining the concerned area we can conclude that some of these forms have originated from the sinkhole sensu stricto phenomenon.

It has also been possible to determine the presence of a NNE active fault system (Theodicea fault), inside the intermontane basin of Cassino, not known in literature. It is along this NNE fault system that, in the past there was the distribution of almost all of the springs and/or ponds. At present the major sinkholes develop and align in this area.

Thanks to these discoveries, this area of southern Lazio can be listed among the Sinkhole Prone Risk Areas. It is therefore necessary to accomplish a series of detailed technical enquiries before carrying out new infrastructures in order to protect the new constructions and above all human life.

Parole chiave: Sinkhole, sprofondamento, deep piping, Lazio Meridionale, Caira.

Keywords: Sinkhole, sinking, deep piping, Southern Lazio, Caira.

1. AREA INDAGATA E SCOPO DEL LAVORO

L'area oggetto di studio ricade nel territorio della provincia di Frosinone, si estende per gran parte della Valle Latina procedendo da Sora fino alla confluenza del Fiume Liri con il Fiume Gari (fig. 1).

I siti indagati sono per lo più depressioni, piane alluvionali e conche intermontane, tutte di origine tettonica: la piana di Sora, la conca di Cassino, il bacino Lirino ed altre piccole piane circondate da rilievi carbonatici.

Lo scopo del presente lavoro è quello di studiare la situazione geologico-strutturale, idrogeologica e geomorfologica nonché l'evoluzione storica del territorio e l'impatto antropico per individuare un'eventuale concomitanza di fattori predisponenti ed innescanti tale da determinare una reale potenzialità di rischio sprofondamento, sufficiente per classificare questo territorio come una "sinkhole prone area" (area a forte rischio sinkhole).

A tal fine è risultato determinante il reperimento di alcune segnalazioni storiche (non note nella letteratura geologica) e l'individuazione di forme di sprofondamento attuali o relitte, per lo più coincidenti con cavità sub-circolari, a volte obliterate, e con piccoli laghetti.

In quest'area, infatti, sono state riconosciute alcune morfologie, di cui almeno due, rispettivamente presso l'abitato di Caira e presso Sora, riconducibili a fenomeni di sprofondamento repentino entrambe sedi di laghi oggi prosciugati: il lago di Caira (che sarà l'oggetto principale di questa trattazione per la maggiore quantità di dati raccolti) ed il lago Tremoletto, tra Carnello e località S. Domenico. Tra gli altri specchi d'acqua rinvenuti meritano attenzione il Lago di Acquasanta e la polla Magnesiacca. Sono state individuate inoltre alcune paleoforme, con l'ausilio della fotointerpretazione, di cui solo ad alcune è stato possibile attribuire l'identità di cavità di sprofondamento o di sinkhole ponds, dopo la verifica sul terreno, (tra cui La Pescarola, la cavità che ospita la Sorgente Magnesiacca e il laghetto di Acquasanta), per altre, ormai, morfologicamente obliterate, non sono rimaste tracce neanche nella memoria storica degli abitanti e dei luoghi.

2. I FENOMENI DI SINKHOLE NEL PANORAMA ITALIANO

A differenza di numerosi altri eventi catastrofici generati da calamità naturali, fino a qualche decennio fa l'apertura di improvvise voragini nel territorio occupava un posto marginale nei programmi di protezione civile e di pianificazione territoriale. Ultimamente, a causa della forte antropizzazione, il "rischio

totale" associato al verificarsi di tali sprofondamenti è aumentato notevolmente fino al punto di suscitare l'attenzione non solo degli enti preposti alla tutela del territorio ma anche, di conseguenza, dell'intera comunità scientifica per un'azione di previsione e prevenzione degli stessi.

Il rischio associato all'innescarsi di dette fenomenologie è strettamente collegato non solo all'intensità e alla pericolosità dell'evento in sé, ma soprattutto alla corretta valutazione e determinazione degli "elementi" a rischio (vite umane, beni immobili, infrastrutture, strutture adibite a pubblico servizio e soccorso, beni culturali ecc).

I sinkholes, forme di erosione che si inseriscono nell'ambito di processi di sprofondamento catastrofico, consistono in depressioni morfologiche sub - circolari che si formano in seguito allo sprofondamento repentino di una porzione di terreno (FAIRBRIDGE, 1968; MONROE, 1970).

Il termine sinkhole spesso indica forme crateriche o pseudocrateriche omologhe ma generate ed evolute secondo modalità differenti. Nella letteratura anglosassone il termine è sinonimo di dolina o di sprofondamento di origine antropica. In Italia definisce forme di erosione dovute non solo a fenomeni carsici o gravitativi, ma anche forme più peculiari, che si formano in aree di pianura su grandi spessori di copertura sedimentaria, dovute all'interazione tra: risalita dal basso di fluidi di provenienza profonda, rocce carbonatiche, falde superficiali ed acque di infiltrazione meteorica, oscillazioni del livello di falda ed attività tettonica attiva e recente (NISIO, 2003; NISIO & SALVATI, 2004; NISIO *et al.*, 2004, 2005; FERRELI *et al.*, 2004).

Gli elementi che distinguono una dolina da un sinkhole in senso stretto sono le condizioni geologiche

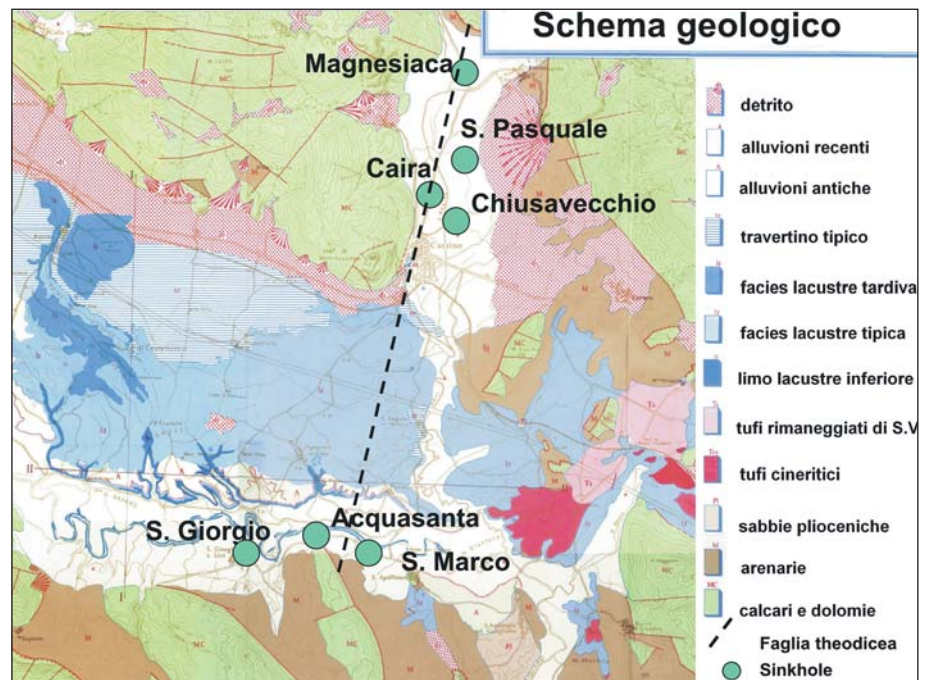


Fig. 1 - Schema geologico dell'area e ubicazione di altri fenomeni, sinkhole ponds o paleoforme, individuati nell'area di Cassino-S. Eia- S. Giorgio al Liri (da DEVOTO, 1965 modificato).

Location of the other phenomena recognized (sinkhole ponds o paleoform) in the Cassino-S. Eia-S. Giorgio area (from DEVOTO, 1965 modified).

al contorno, le modalità di innesco e di propagazione del fenomeno (SALVATI & SASOWSKY, 2002; NISIO, 2003; NISIO & SALVATI, 2004; NISIO *et al.*, 2004). La propagazione del processo si sviluppa, contrariamente a quanto avviene per le doline, dal basso verso l'alto fino a coinvolgere la copertura che si trova al di sopra del substrato carbonatico sottoposto alla dissoluzione carsica (per ulteriori approfondimenti si rimanda comunque a letteratura più specifica sull'argomento FACCENA *et al.* 1993; THARP, 1999; BERTI *et al.*, 2002; REGIONE TOSCANA, 2002; SALVATI & SASOWSKY, 2002; NISIO, 2003; NISIO & SALVATI, 2004 *etc.*).

I *sinkholes* s.s. si originano in contesti geologico-strutturali ed idrogeologici abbastanza articolati e complessi. Zone ad elevato rischio sono le pianure alluvionali e le conche intramontane in contatto con successioni carbonatiche, intensamente carsificate e tettonizzate (che ne costituiscono il *bedrock*), nelle quali vi sia la presenza concomitante di alcuni o tutti i fattori predisponenti e innescanti (FACCENA *et al.*, 1993; CAPELLI *et al.* 2000; NISIO, 2003; FERRELLI *et al.*, 2004).

Nella maggior parte dei casi finora individuati si è riscontrato che tali fenomeni tendono a concentrarsi in corrispondenza di aree caratterizzate da un'abbondante circolazione d'acqua, ove sono presenti acquiferi imprigionati in substrati profondi per lo più ricoperti da sedimenti impermeabili o scarsamente permeabili ed entrambi interessati da sistemi di faglie. Quest'ultimi mettono in comunicazione idrica i due mezzi favorendo processi di sifonamento, suffusione profonda (*deep piping*) ed erosione preferenziale, specialmente nella zona di interfaccia (LITTLEFIELD *et al.*, 1984; DERBYSHIRE & MELLORS, 1988; BILLIARD *et al.*, 1992; NISIO, 2003; NISIO *et al.*, 2005).

I processi di *deep piping* rivestono un ruolo fondamentale nell'origine dei *sinkhole* s.s. per tale motivo a questi è stato dato anche il nome di piping *sinkhole* o meglio *deep piping sinkhole* (NISIO, 2003; NISIO & SALVATI, 2004; NISIO *et al.* 2004; 2005; GRACIOTTI *et al.* 2004).

Molte aree dell'Appennino centro-settentrionale e meridionale sono interessate da questi fenomeni; triste primato spetta proprio alla Regione Lazio, in cui gli sprofondamenti risultano concentrati in conche intramontane (ad es. la Piana di S. Vittorino, Rieti), in strette valli fluviali (es. Valle del F. S. Martino, Capena), in pianure costiere (es. Pianura Pontina), nonché in depressioni e fasce pedemontane di aree vulcaniche (FACCENA *et al.*, 1993; BONO, 1995; DI LORETO *et al.* 1999; CAPELLI *et al.* 2000; CIOTOLI *et al.*, 2001; COLOMBI *et al.*, 2001; BERSANI & CASTELLANO, 2002; NISIO, 2003; ANNUNZIATELLI *et al.*, 2004; DEL PRETE *et al.*, 2004; GRACIOTTI *et al.*, 2004). Inoltre su molte pianure del territorio italiano, soprattutto in Appennino, sono presenti piccoli laghi, polle o fosse di forma circolare (craterica o pseudo-craterica) di dubbia origine che potrebbero essere compatibili con tali fenomeni (CARAMANNA *et al.*, 2004; DEL PRETE *et al.*, 2004; NISIO *et al.* 2005). Molti fenomeni di *sinkholes* sono stati segnalati nelle vicinanze dell'area di studio, in un raggio di circa 100 km: sul versante sud-orientale del Roccamonfina, e nella Valle del F. Volturno, presso il confine Lazio-Campania (DEL PRETE *et al.*, 2004); presso Posta-Fibreno (Frosinone; AGRILLO *et al.*, 2004), nelle vicinanze di Atina (SAROLI *et al.*, 2004); nonché più a sud in Pianura Pontina (Norma-

Sermoneta-Sezze; BONO, 1995; COLOMBI *et al.* 2001; DI FILIPPO *et al.*, 2002; NISIO, 2003; CAMPOBASSO *et al.*, 2004).

Fenomenologie di *sinkhole* non erano prima d'ora state segnalate nell'area del Cassinate.

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

Le aree di pianura in studio ricadono nel Lazio meridionale, coincidono con le pianure di Cassino e Sora e con una parte della piana alluvionale del Liri-Garigliano, alle pendici di alcune dorsali carbonatiche tra cui quella di Monte Cairo (provincia di Frosinone; fig. 1).

Dopo la tettonica compressiva, che ha portato alla costruzione dell'edificio a *thrust*, una fase estensionale ha prodotto in quest'area una rete di faglie normali ad alto angolo, immergenti, generalmente, verso ovest, molte delle quali riattivano i vecchi piani di *thrust* sepolti (GHISETTI & VEZZANI, 1999; CAVINATO & DE CELLES, 1999).

Si impostano, nel versante sudovest della catena, numerosi bacini estensionali, tra cui il bacino di Sora, con una geometria ad *half-graben* delimitati dalle suddette faglie, ripetutamente riattivate durante il Pliocene sup.- Pleistocene, con rigetti, per le strutture maggiori, fino a uno/due chilometri (GHISETTI *et al.*, 2001).

I bacini, colmati da sedimenti di *syn-rift* dal Miocene sup. al Pleistocene inferiore, presentano un'orientazione NNW-SSE e NW-SE; altri, di dimensioni minori, a direzione NE-SW o N-S (tra cui il bacino di Cassino), si sono sviluppati come strutture trasversali (MATTEI *et al.*, 1994).

Durante il Pleistocene l'area emerge ed una fase tettonica distensiva genera bacini interni fluvio-lacustri con connesse manifestazioni vulcaniche (Roccamonfina), controllati da strutture appenniniche ed antiappenniniche. Nel Pleistocene medio si verifica una nuova fase distensiva che porta all'estinzione dei bacini lacustri, alla formazione di nuove conche interne e alle attuali morfostrutture.

Dal Pleistocene superiore è attiva una tettonica tipo *strike-slip* che ha dato localmente origine a piccoli bacini tipo *pull-apart*, sorgenti termominerali, deposizione di travertini e caratteristiche vulcano-tettoniche (FACCENA, 1994; MATTEI *et al.*, 1994).

In questo contesto si è formato il "Bacino Lirino" che è stato colmato da depositi lacustro-alluvionali (con spessori di oltre 100 m) posti in contatto tettonico con la successione carbonatica mesozoica che costituisce l'ossatura del massiccio affiorante.

Esso si estende nell'ambito delle province di Frosinone e di Caserta, presenta una direttrice morfostrutturale NW-SE, fra la catena dei Monti Aurunci (a Sud-Ovest) e la catena dei Monti Simbruini-Monte Cairo (a Nord-Est), a confine fra l'Appennino centrale e quello meridionale. La nascita e lo sviluppo del Bacino Lirino sono stati, fin dai primi studi, attribuiti sia all'attività di sistemi di faglie appenniniche, a carattere prevalentemente distensivo con notevoli rigetti verticali, che al sorgere dell'edificio vulcanico del Roccamonfina (DEVOTO, 1965; DAMIANI & PANUZZI, 1980, 1982; CAVINATO *et al.*, 1995).

All'interno di quest'area si distinguono tre sistemi di faglie principali: N-S, NW-SE ed E-W. Le faglie che ne bordano il margine nord-orientale, ai piedi sia di

Monte Cairo che dei Monti di Venafro, sono normali ad alto angolo; mentre la linea tettonica che borda il margine sud-occidentale, fra Pico, Esperia e M.te Fammera, è un piano di faglia inverso (un sovrascorrimento) a direzione NW-SE immergente verso Sud, a basso angolo (CERISOLA & MONTONE, 1992). I rilevamenti hanno messo in luce l'esistenza di un terzo elemento tettonico di importanza probabilmente "regionale" (confermato anche dal confronto dei dati di rilevamento con i sondaggi geognostici reperiti), qui definito *Faglia Theodicea* (passante presso S. Angelo in Theodice; Fig. 1). Osservazioni geomorfologiche, strutturali e stratigrafiche, accompagnate da indagini geofisiche, suggeriscono una ripartizione del bacino liriniano in due settori, uno occidentale (ad Ovest del Fiume Gari) caratterizzato da un regime estensionale a direzione prevalentemente NE-SW ed uno orientale caratterizzato da un regime sempre estensionale ma a direzione prevalentemente WNW-ESE.

La *faglia Theodicea*, a direzione NNE, potrebbe servire da svincolo fra questi due settori a mobilità diversa e, quindi, non si possono escludere movimenti trascorrenti lungo la stessa. I settori orientali in prossimità del Fiume Gari sono ribassati, rispetto a quelli occidentali, dall'attività del sistema NNE più giovane rispetto a quello WNW e NW.

La piana di Cassino-Caira a Nord-Est è delimitata dalla faglia della Marsica, che interessa i monti di Venafro e Monte Cifalco, ad Ovest dalla *faglia Theodicea* (NNE) e a Sud dall'allineamento Monte Trocchio-Monte Porchio, che sembra essere una prosecuzione sud-orientale della faglia che mette in contatto Monte Cairo con i sedimenti lacustri ed alluvionali che colmano la Valle Latina (ACCORDI, 1964; PARLOTTO, 1970; 1971; PARLOTTO & PRATURLON, 1975; 1981). Questo forte controllo tettonico e l'intensità delle deformazioni fragili ad esso associate hanno provocato un'intensa disarticolazione del substrato carbonatico (CERISOLA & MONTONE, 1992). In effetti dai numerosi dati di pozzo si nota che la profondità del bedrock varia, anche in aree ristrette, da poche decine di metri dal piano di campagna, nei pressi della dorsale carbonatica, fino a diverse centinaia di metri al centro della piana.

Le unità litostratigrafiche, che formano i rilievi carbonatici presenti nell'area (M. Cairo - M. Cifalco - M. Ausoni-Aurunci - rilievo settentrionale di M. Massico), vengono collocate nel dominio di piattaforma Laziale-Abruzzese (ACCORDI *et. al.*, 1988) a cui si sovrappongono sedimenti terrigeni.

Al di sopra dei depositi marini e continentali, già morfologicamente modellati, di età plio-pleistocenica poggiano i sedimenti lacustri liriniani. L'intera sequenza stratigrafica lacustre, non ancora conosciuta nei dettagli; presenta uno spessore complessivo di cento metri circa. Dal punto di vista stratigrafico DEVOTO (1965) suddivide la suddetta successione in tre formazioni principali che sono, dal basso verso l'alto, il Limo Lacustre Inferiore, la Facies Lacustre Normale e la Facies Lacustre Tardiva. A queste l'Autore aggiungeva, oltre ai Travertini Tipici, le facies vulcaniche rappresentate dalle Tufiti di Vandra, dai Tufi Cineritici e dai Tufi rimaneggiati di San Vittore (fig. 1).

Il Limo Lacustre Inferiore presenta grande uniformità, è composto da limi calcarei molto puri, a giacitura

orizzontale, ad alto tenore in CaCO₃ (circa l'80/90%) regolarmente intercalati da numerosi livelli, a spessore variabile, di prodotti vulcanici. Lo spessore totale affiorante è di circa 25-30 m.

La Facies Lacustre Normale è la più rappresentativa dei depositi lacustri liriniani, complessivamente è costituita da un 60% di ghiaia-sabbia, da un 30% di limi calcarei e per il restante 10% da altre tipologie di sedimenti, presenta una significativa varietà di litofacies ed un'estrema variabilità del contenuto in CaCO₃ che oscilla fra il 20% ed il 98%.

La Facies Lacustre Tardiva è composta prevalentemente da limi calcareo-argillosi, da limo torboso, da sabbie calcaree, da travertini incoerenti e da travertini porosi inglobanti resti vegetali palustri. Significative sono le variazioni delle percentuali di sabbia e di argilla nei singoli strati.

La deposizione del Travertino Tipico (che affiora solo in alcuni punti della Piana; CARRARA, 1991) è connessa con l'attività di sorgenti fortemente incrostanti ad elevato tenore in Ca⁺⁺ e Mg⁺⁺ alcune delle quali sono tuttora attive (Capo d'Acqua).

I principali sistemi di faglie che hanno interessato l'area sono due: il primo sistema presenta allineamento NW-SE a cui sono collegate le placche di travertino presenti fra Aquino - Cassino, ed il secondo, orientato circa N-S o NNE-SSW alla cui attività vengono attribuiti sia gli affioramenti rinvenuti presso la direttrice Pontecorvo-Aquino che quelli lungo il corso del Fiume Gari in S. Angelo in Theodice. Benché le bancate di travertino si ritrovino in maniera frammentaria in tutta l'area, si è ipotizzata l'esistenza, su base morfologica, di un solo grande affioramento il cui spessore raggiunge i 18m.

Di norma i Travertini Tipici seguono o sono incasati nei sedimenti lacustri del Lago Lirino mentre, lungo il margine nord-orientale, poggiano sulla sequenza carbonatica della piattaforma Laziale - Abruzzese. Da un punto di vista composizionale la litofacies, per lo più vacuolare, è caratterizzata da alternanze di sabbie e limi calcarei, contenenti litotipi autoctoni micro e fitotermali associati a facies stromatolitiche e bibliolitiche. Di frequente dal travertino litoide si passa a quello spugnoso ed incoerente.

Al di sopra dei sedimenti lacustri affiorano, per lo più, alluvioni antiche e recenti, detriti di falda e/o di versante e terre rosse.

Riportiamo, qui di seguito, una colonna stratigrafica "tipo" per la piana di Cassino, ricordando comunque che la profondità del substrato carbonatico oscilla notevolmente fra il piano campagna ed i 150 m, allontanandosi dai bordi verso il centro della piana (i dati sono stati riassunti nelle stratigrafie di fig. 7b):

0/4 m terreno vegetale; 4/15 m grosse alternanze di limo con argilla, sabbia e sabbia con ghiaia; 15 m/15,5 m ghiaia grossolana; 15,5 m/16,7 m limo poco argilloso, grigio chiaro; 16,7 m/17,0 m ghiaia grossolana; 17,0 m/ 18,5 m: limo con argilla, bruno; 18,5 m/22,0 m: sabbia media grossolana; 22,0 m/23,4 m: limo argilloso e sabbioso con poca ghiaia minuta, grigio; 23,4 m/43,5 m: limo con argilla, da grigio scuro a bruno (prelevato campione indisturbato C1 a 26m); 43,5 m/48,0 m: limo poco argilloso con tracce di sabbia fine, grigio chiaro; 48,0 m/51,5 m: limo poco argilloso con tracce di sabbia fine, grigio (prelevato campione indisturbato C2

a 50m); 51,5 m/60,5 m: limo con argilla, grigio; 60,5 m/67,8 m: limo argilloso, debolmente organico, con elementi di ghiaia, da grigio scuro a bruno; 67,8 m/103 m (fondo foro): calcari biancastri.

3.1 Sismicità dell'area

Nella zona di Montecassino si sono sempre verificati fenomeni particolari ("i terremoti locali di Montecassino") che turbavano molto sia gli abitanti che i Monaci della Badia. Questi ultimi, non sapendo dare una spiegazione scientifica del fenomeno, si limitarono a riportare fedelmente la descrizione.

La cronistoria "sismica" di Montecassino, registrata dai monaci della Abbazia, inizia nel 1005 e, tranne qualche piccola lacuna, giunge fino al 1920. Dal 1005 al 1887 si registrarono ben 453 terremoti ma, nel 1920, SACCHETTI annotava che *"la quasi totalità dei terremoti subiti rimase circoscritta a Montecassino e solo raramente fu avvertita a Cassino"*. I Monaci chiesero al Re di Napoli, Ferdinando II di Borbone, di far studiare da un geologo del Regno le cause dei tremori ai quali si associava un odore di zolfo. Il Re, nel 1837, incaricò Leopoldo PILLA che imputò i terremoti a fattori "locali" e li ascrisse a cause elettriche. DE MARCO, invece, nel 1888, arriva alla conclusione che tali scosse sono imputabili a crolli dovuti all'azione aggressiva delle acque sotterranee. SACCHETTI (1920) sostenne la tesi di DE MARCO riportando, a supporto della stessa il *"terremoto che nel 1724 si verificò al paesello di Cairo"* (data coincidente con la formazione del Lago di Caira) e precisando che non si trattò di una vera e propria scossa sismica.

Gli episodi descritti sono in definitiva da ricollegare ai fenomeni carsici presenti sulla dorsale di Monte Cairo che portano alla frequente formazione di doline di crollo e all'allargamento di cavità ipogee, processo peraltro molto spinto ed ancora visibilmente in atto.

L'area in esame tuttavia è stata colpita da diversi sismi di forte intensità (ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA, 2000). In particolare la zona compresa fra la Valle Latina e il confine con la Campania (da Sora al Vulcano di Roccamonfina) appare decisamente attiva soprattutto per l'elevata frequenza degli eventi registrati, con un addensamento anomalo proprio in corrispondenza del territorio di Cassino. (GASPARINI *et. al.*, 1985; FREZZOTTI *et. al.*, 1988; FREPOLI & AMATO, 2000). L'area con elevato risentimento è allungata lungo la direzione NW-SE.

Tra gli eventi della sismicità storica dell'area si ricorda quello del 9 Settembre del 1349 che colpì il Cassinate ed il territorio di Isernia (a Cassino il risentimento è stato del IX grado), quello del Giugno 848 nel Sannio occidentale, quello del 23 Luglio del 1654 nell'area Sorano-marsicana che provocò la completa distruzione delle località di Piedimonte San Germano Alta, Posta Fibreno e Santopadre, ed infine l'evento del 6 Dicembre 1874 dei Monti della Meta. Nel 1724 si verificarono solo due scosse nei mesi di settembre e ottobre.

Tra gli eventi sismici recenti, i più significativi sono: un evento del 1973 (di magnitudo 4.4 localizzato a 5 km di profondità), un evento del 1980 (di magnitudo 3.5 con ipocentro a 8 km di profondità) e i due terremoti del 7 e del 11 Maggio del 1984 che colpirono l'area compresa tra l'alta Valle del Sangro, San Donato in Val di Comino ed i Monti della Meta, di magnitudo mb 5.5 e

5.3, rispettivamente. I danni del sisma si riscontrano nell'area di studio lungo l'allineamento rappresentato dalla faglia Theodicea (su cui è ubicato il sinkhole di Caira); il piezometro ubicato nella Villa comunale di Cassino (distante circa 1.5 km dal Lago di Caira sul medesimo allineamento) si abbassò di molti centimetri.

Ulteriori eventi sismici sono stati registrati nel giugno e nel settembre 1994, e gli effetti si registrano anche sugli allineamenti in direzione N-S (FREPOLI & AMATO, 2000).

Inoltre scosse strumentali registrate tra il 2003 e il 2004 nell'area di Cassino hanno determinato abbassamento del suolo (registrato presso un piezometro) di circa 3 centimetri a poca distanza dal Lago di Caira, e lungo l'allineamento NNE di cui si è parlato in precedenza.

Ultimamente l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha rilevato, durante il monitoraggio della Rete Sismica nazionale Centralizzata, il verificarsi di un periodo sismico. Tali eventi sismici avvertiti dalla popolazione locale e, peraltro, segnalati alla Protezione Civile, presentano profondità ipocentrale molto superficiale dando luogo a boati e a risentimenti macrosismici molto localizzati.

4. EVOLUZIONE GEOMORFOLOGICA

Nel Pliocene la porzione sud-orientale dell'odierna Valle Latina era interessata da una sedimentazione caratteristica di ambiente marino costiero e doveva presentarsi come un golfo aperto in direzione ESE fino al Pliocene medio-superiore, (fig. 2). Durante la fase regressiva le acque lasciarono definitivamente l'area compresa fra le dorsali carbonatiche. Il rapido abbassamento del livello del mare dovette incidere profondamente sull'organizzazione dei reticoli idrografici preesistenti ed il settore appena emerso divenne una valle fluviale sbarrata in seguito alla costruzione del Vulcano di Roccamonfina. Nel Pleistocene medio iniziò la raccolta delle acque del Lago Lirino (DEVOTO, 1965). L'aumento del carico sedimentario con l'erosione della soglia operata dall'emissario (l'attuale Garigliano), hanno fatto del Lago Lirino un lago precocemente fossile. Infatti, dato il continuo sollevamento a cui è stata soggetta quest'area, gli immissari furono costretti ad operare un continuo "ringiovanimento" del loro profilo d'equilibrio; cosa che determinò un apporto talmente massivo di sedimenti da ottenere, come effetto, il rapido colmamento del bacino stesso. L'età di estinzione del sistema lacustre lirino potrebbe essere avvenuta 368 ka (EVERNDEN & CURTIS; 1965) o 354±7 ed i 359±7 ka (NARCISI; 1986).

Terminato il ciclo lacustre il principale agente morfologico divenne quello fluviale; ai sedimenti "lirini" si sovrapposero i depositi alluvionali. L'ultimo ordine di terrazzi, post-würmiano, si situa a pochi metri dall'attuale letto del Liri.

La piana di Cassino presenta versanti regolarizzati ad est ed ad ovest ed è orlata, nel margine settentrionale, da piccole conche intermontane la cui genesi è strettamente collegata alla presenza ed alla attività di elementi strutturali il più delle volte a direzione NS.

Il massiccio carbonatico affiorante, oltre ad essere visibilmente fratturato e tettonizzato, presentandosi a luoghi pulverulento, è anche intensamente carsificato.

Presso Monte Cairo-Monte Cassino è emersa la presenza di numerose doline per crollo o dissoluzione (di grande diametro) la cui distribuzione sembra ricalcare l'andamento delle faglie principali.

All'interno della conca si individuano numerose conoidi detritiche a ventaglio di notevoli dimensioni, disposte prevalentemente lungo la faglia della Marsica e, subordinatamente, lungo la faglia Theodicea (in località Caira).

Anche il reticolo idrografico e la distribuzione delle sorgenti risentono del controllo tettonico. È evidente in quest'area la regolarizzazione di tratti o di intere aste fluviali (ad es. Fiume Rapido e parte del Fiume Gari) che assumono un andamento circa NS ricalcando l'andamento della faglia *Theodicea*.

La ricostruzione della rete di drenaggio superficiale, ordinata secondo il metodo di STRAHLER (1954), ha permesso di ricavare indizi morfotettonici: anomalia significativa è rappresentata dalle aste dei primi ordini che tendono ad assumere un'orientazione preferenziale NW-SE, tale distribuzione ha un addensamento in corrispondenza della diagonale NW-SE tracciabile fra la confluenza del Fiume Liri con il Fiume Gari e Massoneria di Folco (Aquino). Anche le Forme d'Aquino presentano in quest'area una rettilineazione NW-SE, preceduta da una "cattura a gomito", del loro corso.

Questi indizi, associati alla constatazione che tale direttrice funge anche da spartiacque fra il settore nord-orientale e quello sud-occidentale, fanno pensare alla presenza di una faglia sepolta avente la medesima orientazione. In effetti le aste dei primi ordini, essendo le più "giovani" non sono controllate dalle "vecchie direttrici tettoniche" ma da quelle recenti e/o attuali.

L'azione della tettonica è altresì testimoniata dalla presenza di forme strutturali sui versanti quali: faccette triangolari, depressioni, selle e interruzione di linee di cresta.

5. RISORSE IDRICHE DELL'AREA: STUDI SULLA MIGRAZIONE E SULLA VARIAZIONE DI PORTATA DELLE SORGENTI

L'area in studio è caratterizzata da un abbondante flusso di acque sia superficiali che profonde. Quest'ultime vanno ad alimentare, in maniera considerevole, le portate dei corsi principali. L'unità idrogeologica, che dà origine alle sorgenti del Gari, appartiene a quella più grande, costituita dai Monti Ernici, dai Monti Simbruini e da Monte Caira, e ne rappresenta la terminazione meridionale a partire dal Fiume Cosa (BAJ & TARTAGLIA, 1973; BONI, 1973; MOUNTON, 1973; CELICO, 1976; CELICO & STANGANELLI, 1976; BONI et al., 1986).

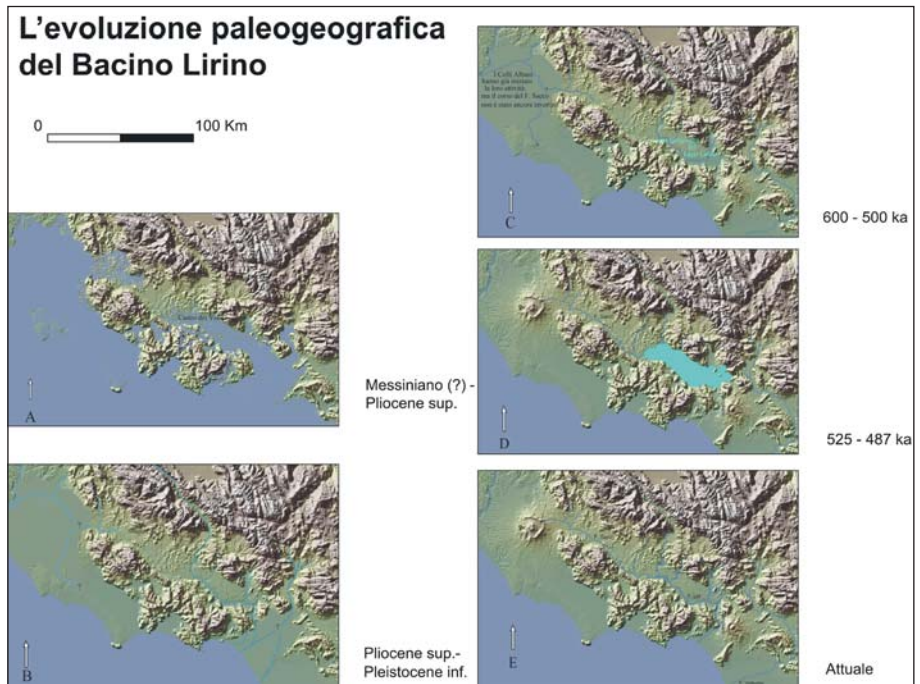


Fig 2 - Ricostruzione paleogeografica dell'area.
Paleo-geographic reconstruction of the study area.

A Sud della linea del Cosa sono presenti altri due punti di sfioro della falda che costituiscono, rispettivamente, le sorgenti di Capodacqua d'Aquino e di Bucone (fig. 3). Le prime sono legate alla discontinuità tettonica della Valle del Melfa, le seconde all'innalzamento del complesso dolomitico in corrispondenza di Monte Cairo. Caratteristica non trascurabile delle sorgenti Bucone è che esse sono costituite da due polle, una sulfurea a circuito lento e profondo e l'altra non sulfurea a ricambio veloce. Le sorgenti presenti nell'area di Cassino possono essere raggruppate in tre gruppi principali: il gruppo pedemontano, il gruppo delle Terme Varroniane ed il gruppo Mastronardi (fig. 3) con valori di portata cumulati pari a 18m³/sec. Le acque di tali sorgenti confluiscono nel Fiume Gari incrementandone la portata.

La conca di Cassino è attraversata dal Fiume Rapido (che presenta portata media di 2.5 m³/sec) nelle cui acque vanno a confluire i torrenti che attraversano il territorio di Cassino-Caira fra cui ricordiamo il Torrente Calcara, il Torrente del Campo, il Fosso della Grotta ed il Fosso di Caira. Il Rapido si immette nel Gari in prossimità del gruppo Mastronardi (fig. 3).

Le sorgenti presenti nel territorio di Cassino (s.l.) sono numerose e con elevata portata. Durante il corso della storia esse hanno subito variazioni per numero, ubicazione e chimismo (VARRONE, 1954). Attualmente è diminuito il numero delle sorgenti minerali la cui presenza ed azione massiva nei tempi passati sono testimoniate litologicamente dalle bancate di travertino, che occupano gran parte della piana, e documentate da numerose fonti storiche e bibliografiche. La maggior parte delle sorgenti minerali sgorgava fra valle Faga e Suio, ma ve ne erano diverse anche nel territorio di Cassino nei pressi della Badia, in località S Onofrio ed anche in località Fontanelle (fra il Colosseo e la Cappella di Santa Scolastica). In particolare in località

Fontanelle erano presenti due polle, una d'acqua sulfurea e l'altra ferruginosa con temperatura di 15°C (SACCHETTI 1920). Queste polle minerali rappresentavano ciò che rimaneva di una serie più numerosa che fino al secolo decimo ottavo alimentava il ramo del Fiume Rapido (GATTOLA 1734); fra queste ricordiamo le due sorgenti presenti nei pressi del lago di Cairà; fig. 3). Il numero delle sorgenti d'acqua dolce era numeroso ed imprecisato (PILLA, 1815), si pensi che nel 1902 DEL FOCO ne elenca più di quaranta per il solo centro abitato.

La distribuzione delle sorgenti sul territorio non sembra casuale ma si individuano allineamenti lungo direttrici tettoniche ben precise. Quelle sulfuree (GATTOLA; 1734) si disponevano lungo il corso del Rapido (dove lo stesso assume un andamento circa NS) ricalcando la direttrice della *faglia Theodicea*. DEVOTO (1965) descrive l'attività di sorgenti fortemente incrostanti ad elevato tenore in Ca⁺⁺ e Mg⁺⁺ (ad esempio quelle di Capo d'Acqua) la cui disposizione coincide con l'andamento dei principali sistemi di faglie: il primo ad andamento NW-SE, a cui sono collegate le placche di travertino presenti fra Aquino e Cassino, ed un altro orientato circa N-S o NNE-SSW, alla cui attività vengono attribuiti sia gli affioramenti rinvenuti presso la direttrice Pontecorvo-Aquino che quelli lungo il corso del Fiume Gari in S. Angelo in Theodicea.

Un'ultima annotazione riguarda la migrazione delle sorgenti sulfuree che si sono spostate progressivamente dai settori SE (Cassino, Sant'Angelo), prossimi all'apparato del Roccamonfina, verso quelli NW (Isola Liri, Ceprano) ove attualmente si assiste a periodiche manifestazioni sulfuree. Tale migrazione di sorgenti è stata accompagnata da un abbassamento delle vecchie linee sorgentizie, in località Cairà, di almeno cinquanta metri e da oscillazioni continue del livello di falda. Oltre alle probabili cause naturali la spiegazione del fenomeno va ricercata anche in quelle antropiche: quest'area è sottoposta a continui emungimenti (per portate "dichiarate" di 3m³/sec, ma sicuramente più cospicue), resi più intensi negli ultimi 20 anni.

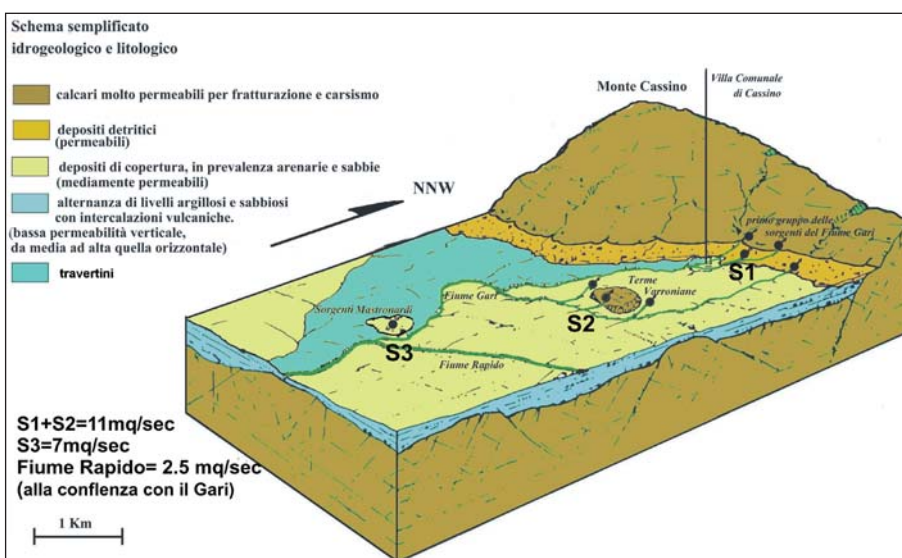


Fig. 3 - Schema idrogeologico semplificato dell'area di Cassino. Ubicazione dei principali gruppi di sorgenti e relative portate..

Simplified hydrogeological scheme of the Cassino area. Location of the main springs groups in the Cassino area.

Tale captazione di acque sotterranee, in un'area prossima alla confluenza del Rapido con il Gari, aveva avuto approvazione per portate di 6m³/sec. Fra l'Agosto del 1986 ed il Settembre dell'87, a seguito dell'emungimento di 1,5m³/sec si registrarono nel territorio di Cassino continui "assestamenti" accompagnati da tremori, alcune sorgenti si estinsero, altre diminuirono notevolmente la loro portata ma, cosa più grave, si verificò la subsidenza di una vasta area e vennero denunciate lesioni a diversi manufatti. Dopo perizie tecniche e studi congiunti, le Autorità dichiararono che per portate pari a 3m³/sec non ci sarebbero stati risentimenti o rischi significativi per il territorio; tali dati risultarono dagli accertamenti delle condizioni geologico-strutturali al contorno ed dai parametri geotecnici dei terreni analizzati.

5.1 Le Falde della Piana di Cassino

Nei sedimenti di copertura della Piana di Cassino, caratterizzati dall'alternanza di orizzonti per lo più impermeabili (argille o limi argillosi) con altri a media/alta permeabilità (sabbie grossolane e ghiaie), si rinvengono falde sovrapposte (riscontrate a 25 m e a 40 m di profondità negli strati a buona permeabilità orizzontale).

La stessa successione quaternaria, presentando una quasi totale impermeabilità verticale, permette la presenza, nel substrato carbonatico, di un acquifero confinato o falda in pressione.

Le connessioni idrauliche tra la falda profonda e le diverse falde superficiali avvengono, per lo più, attraverso strati limoso-sabbiosi, a luoghi ghiaiosi, a bassa trasmissività. Solo localmente e in aree ristrette, la falda profonda è direttamente in comunicazione con quella superficiale. Questo è possibile per la presenza di depositi grossolani posti o al tetto dell'acquifero calcareo o intercalati nei sedimenti fluvio lacustri.

Connessione tra la falda profonda e quella superficiale è possibile per la presenza di importanti dislocazioni tettoniche (quali la *faglia Theodicea* per esempio), che attraversano sia il substrato che le coperture quaternarie, accompagnate da un reticolo di ripetizioni, di fratture o diaclasi, che mettono in comunicazione il mezzo permeabile carbonatico profondo con quello impermeabile di superficie.

5.2 Caratteristiche geotecniche dei terreni di copertura

Le analisi di due campioni (C1, a 26 m dal p.c., e C2, a 46 m del Pozzo 1, fig 7b) mostrano che i terreni lacustri recenti della piana di Cassino sono formati in massima parte da terreni coesivi inorganici (limo con argilla, argilla con limo e limo argilloso) e in minima parte da intercalazioni e lenti di terreni non coesivi (ghiaie più o meno sabbiose e sabbie).

Fra i terreni coesivi prevalgono le argille inorganiche di

elevata plasticità, seguite in ordine decrescente da limi di medio-bassa plasticità. Il contenuto d'acqua del terreno varia generalmente tra il 20% e il 50%. Il peso di volume allo stato naturale è in generale compreso tra 1,7 e 2 g/cm³, con valori medi che tendono ad addensarsi intorno a 1,0 g/cm³. I valori medi tra W_0 e γ non mostrano alcuna tendenza a variare con la profondità. La coesione non drenata è risultata per entrambi i campioni più elevata di quanto non fosse lecito aspettarsi in base alle ben note correlazioni sperimentali con l'indice di plasticità e con la pressione di consolidazione: fatto questo che starebbe ad indicare un certo grado di consolidazione nei depositi in esame, confermato, tra l'altro, anche dalle prove edometriche.

6. I FENOMENI DI SPROFONDAMENTO NEL LAZIO MERIDIONALE

Dall'analisi storica, effettuata presso gli archivi di alcune Abbazie e presso biblioteche specialistiche, è emerso che l'area della provincia di Frosinone coincidente con le antiche proprietà benedettine prendeva il nome, agli inizi del 1800, di *Terra dei Laghi*. Ciò per la presenza di una serie di laghetti fra cui ricordiamo: *Lacus Raedemprandi*; *Lacus Sapatini*; *Lacus Maiore* (presso Aquino) già presenti nel 1734; *Lacus de Pobilu* in area non precisata sulla linea di confine con il territorio di Venafro all'interno delle proprietà benedettine; *Lacus Viticosum*; *Lacus Acquafondata* (presso Viticoso e Venafro; JANDOLO, 1966). Altri numerosi laghi, oggi scomparsi, sono emersi dall'analisi toponomastica dell'area in studio, consultando gli atti di compravendita delle proprietà benedettine, relative al periodo 1600-1800 (LECCISOTTI & AVIGLIANO, 1977): *La Cisterna*, *la Cisternola*, *Pescorile*, *Lo Lago*, *Lago di Sotto*, *Acqua Nera* nei pressi di S. Elia Fiumerapido; *Le Pantane* nel territorio di Cervaro; *Lo Laccozzo*, *La Pescarola*, *Le Pescie*, *La Puzza* e *Caput Casini* (nelle vicinanze della Chiesa di S. Pietro), *lo Laccozzo*, *Lo Lago*, *lo Pantano*, presso San Germano (attuale Cassino); *Le Pantanella* presso l'abitato di Piumarola nella Valle del Liri. Della maggior parte di tali laghi oggi non vi è più traccia, fatta eccezione per La Pescarola, in località Masseria Chiusavecchio.

La ricerca storica, pertanto, è stata volta alla possibile ubicazione di tali laghetti e al censimento di eventuali cavità sub-circolari che potrebbero far ipotizzare episodi di sprofondamento del terreno (fig. 4).

I documenti storici, unitamente alla fotointerpretazione hanno così portato all'individuazione di una serie di specchi d'acqua e di possibili morfologie depresse nelle aree di pianura: laghetti, piccole polle, con caratteristica forma sub-circolare, cavità asciutte relitte, che si rinvengono al centro di piane alluvionali o conche intermontane, privi di immissario o emissario, e che non possono essere attribuiti ad attività antropiche e/o a fenomeni carsici in senso stretto.

La conferma dell'esistenza di tali fenomeni è avvenuta con il reperimento della documentazione storica riguardante la formazione di un lago oggi estinto: il Lago di Caira.

6.1 Il lago di Caira

L'antico Lago di Caira (presente dal 1724 al

1904), attualmente estinto e trasformato in vivaio della forestale, è ubicato a valle dell'abitato di Caira, frazione di Cassino (fig. 5). Si colloca quasi alla confluenza fra il Torrente Calcara ed il Fiume Rapido sul limite morfologico della conoide alluvionale sulla quale si è sviluppato il paese.

Lo sprofondamento che diede origine al Lago di Caira viene riportato in letteratura da numerose fonti che fanno, comunque, riferimento alle notizie riportate dal "Giornale Cassinese" dell'epoca, e successivamente raccolte nelle "Historiae" di Gattola (1733; 1734). In queste fonti si ritrova la seguente descrizione (riportata in latino e tradotta dalle scriventi): *In questo anno 1724, non lontano da Caira nella notte fra il 18 e 19 febbraio*

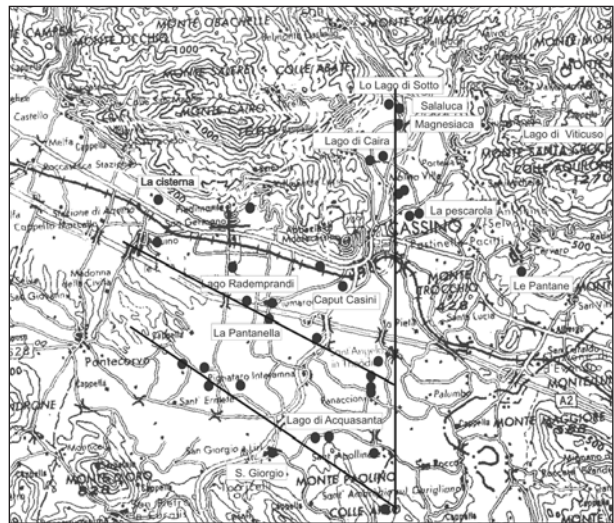


Fig. 4 - Tentativo di ubicazione di alcuni laghetti, oggi estinti, rinvenuti su mappe storiche del 1715 e 1734 e principali allineamenti.

Hypothesis of location of some buried lakes and ponds recognized on historic maps (1715 and 1734) and principal alignments.

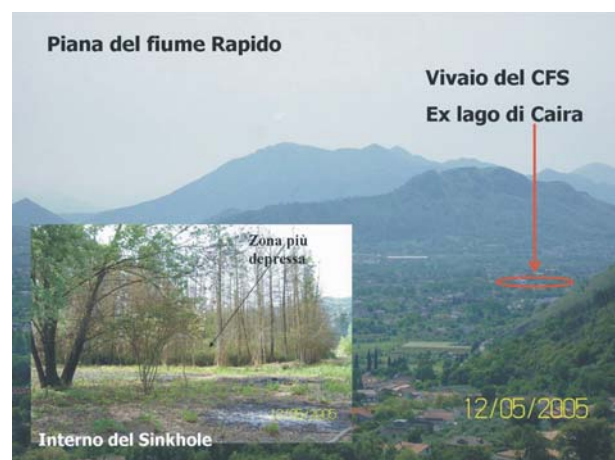


Fig. 5 - La piana di Cassino-Caira (Piana del F. Rapido), ubicazione del Lago di Caira, nel riquadro il lago come si presenta oggi.

Cassino-Caira intermountain plain (Rapido river plain); location of the Caira Lake; in the box the view of the lake.

con ingente strepito, tale che gli abitanti pensando che fosse un terremoto avevano abbandonato le case, la terra di otto tomoli, ciascuno dei quali comprende novecento cubiti napoletani di otto palmi, fu vista sprofondare a perpendicolo in quel luogo, dove c'erano alcuni alberi. La profondità di novanta palmi napoletani subito da parecchie sorgenti poste nella circonferenza dei lati iniziò ad essere riempita, mentre l'acqua cresceva così di giorno in giorno, che dopo un mese soltanto per cinque palmi distava dal piano del terreno. Tutta la circonferenza del lago è di duecentosettantacinque cubiti napoletani, il diametro da oriente ad occidente circa centoventiquattro, e trasversale circa centotrentanove.

Oltre a questi eventi, nel Giornale cassinese e negli scritti di GATTOLA (1734), viene riportato: "la notte fra il 18 ed il 19 febbraio dello stesso anno nel luogo, ove è ora, il Lago di Caira, un rumore fortissimo si intese ed i contadini che abitavano nei dintorni, come se un grande terremoto fosse accaduto, abbandonando le loro case fuggirono....."

Un'altra "fossa", oltre al Lago, si aprì alle pendici orientali di Monte Cairo e la tradizione afferma che in determinati periodi si sentivano dei rumori, come lamenti, provenire dalla stessa; gli abitanti del luogo iniziarono a buttare rifiuti all'interno della fenditura. Dopo un po' di tempo si accorsero che i frutti lanciati nella voragine le sere precedenti venivano ritrovati nei pressi dell'attuale Chiesa Madre nell'abitato di Cassino.

Da altre fonti si ricava che il livello del lago non subiva variazioni stagionali e, periodicamente, era soggetto ad una fase di intorbidimento delle acque e le stesse venivano rese acide da uno improvviso aumento della concentrazione di zolfo. Riportiamo il testo di BARATTA (1978): "...Nacque così il lago di Caira le cui acque non si vedono crescere anche nei tempi più piovosi, né diminuire. Di questo lago i monaci fecero un vivaio di pesci ma periodicamente le acque si intorbidaivano, probabilmente per l'afflusso di sorgenti sulfuree, ed i pesci rimanevano tramortiti. Si rianimavano, però, dopo pochi giorni. La periodicità del fenomeno era tanto nota che i pescatori vi si recavano, a data fissa, per farvi buona pesca."

Altre notizie del lago risalgono a DE MARCO (1888): "Il detto lago ritiene ancora la forma arrotondata; ma la circonferenza è più grande, la profondità molto minore, e la superficie è occupata da un lato quasi per un terzo da piante acquatiche a causa della terra ivi trasportata dal torrente che viene dai monti vicini. Avendolo io misurato nel gennaio di quest'anno, ho trovato la sua periferia di 525 m (con un diametro medio di 165 metri circa)".

Si ha notizia di numerose sorgenti sulfuree (puzzaturiello, fig. 6) presenti a quell'epoca nell'area, la loro provenienza tuttavia è sempre stata imputata alla risalita, secondo vie preferenziali, di acque appartenenti alla falda profonda. E' possibile che il progressivo svasamento del lago ed il continuo apporto di materiale detritico da parte dei torrenti abbia formato, nel tempo, un manto impermeabile al fondo impedendo l'interscambio delle acque. Periodicamente i sedimenti fini potrebbero essere stati rimossi, all'aumentare della pressione della falda sottostante (questo spiegherebbe l'intorbidimento delle acque associato all'immissione di acque sulfuree nel lago). Questo fenomeno lascia comunque ipotiz-

zare la presenza di un condotto di collegamento fra la falda profonda, presente nei calcari, e le acque del lago.

Nel 1902 DEL FOCO scrive: "A destra di questa strada traversa, v'ha il laghetto di Caira con scarse sorgenti interne. La superficie di questo lago, pel materiale importatovi da due torrenti che scendono a settentrione e a mezzogiorno del Colle del Forno e dei Monticelli, che si riuniscono a Caira, va anno per anno restringendosi, e finirà collo scomparire del tutto, con miglioramento delle condizioni sanitarie di quei dintorni infestati dalle febbri palustri. Intanto quanto sarebbe desiderabile che l'autorità venisse in aiuto del lavoro lento della natura...".

Poco dopo il consiglio comunale decise di prosciugarlo, ma eventi naturali precedettero questo intervento di bonifica; durante una fase di piena del fiume una grande quantità di detriti si riversò nel lago (restò attivo almeno fino al 1904; fig. 6). Il lago si prosciugò e, nel corso degli anni la forma si obliterò definitivamente. Attualmente all'interno del vivaio della forestale sono presenti alcune sorgenti che manifestano periodiche risalite di gas.

La successione stratigrafica dell'area circostante il lago (fig. 7 a, b), come rilevato da pozzi e sondaggi geoelettrici, varia procedendo da monte verso valle (da est ad ovest). Nell'area di affioramento della conoide alluvionale, al di sotto di una fascia pedogenizzata (con spessore di pochi metri fino ad alcune decine), si rinvennero detriti di falda, con spessori considerevoli (cento metri circa) in contatto diretto con il substrato cabonatico.

Più a valle, nella zona di piana, i pozzi n.1 e n.2 (fig. 7b), molto prossimi al paleolago, mostrano la presenza di un'alternanza di argille, limi argillosi con ciottoli

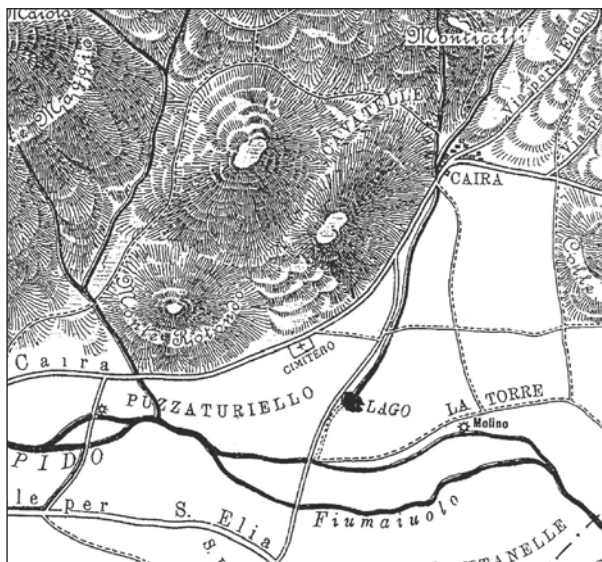


Fig. 6 - Mappa storica del 1902 ove è ancora riportato il Lago di Caira, è possibile, inoltre, individuare nelle vicinanze il toponimo Puzzaturiello che fa ipotizzare presenza di gas e acque sulfuree.

Historic map of the 1902; it is showed the Caira lake; it is possible to see close to the lake the Puzzaturiello area. It demonstrate the presence of H₂S acid water. (In dialectical Italian "Puzzaturiello" sounds like "smelly").

calcarei e ciottolate, il tutto al di sopra di un substrato carbonatico ubicato intorno a settanta metri di profondità dal piano campagna.

Questo tipo di successione stratigrafica determina valori bassi di permeabilità verticale, mentre valori elevati, negli strati a granulometria più grossolana, di permeabilità orizzontale. E' possibile, pertanto, trovare nella copertura detritica più falde sospese ed una falda imprigionata all'interno del substrato calcareo (permeabile per fratturazione e carsismo) ribassato tettonicamente.

6.1.1 Geometria iniziale della forma ed evoluzione nel tempo.

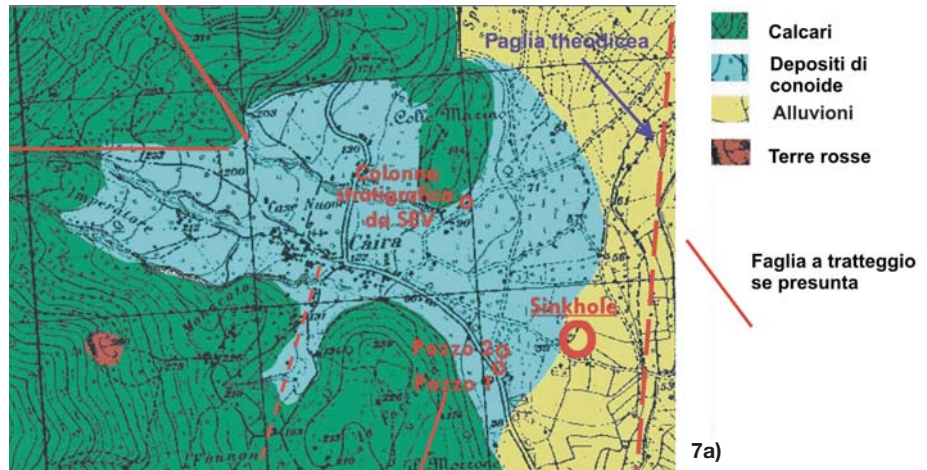
Ci si imbatte in molte difficoltà per determinare le dimensioni iniziali dello sprofondamento che originò il lago di Caira. Prima fra tutte la "discordanza" delle fonti, l'incongruenza di alcune di esse e la parzialità e/o incompletezza dei dati forniti da altre.

Per ricostruire la geometria iniziale della voragine bisogna partire dalle notizie storiche di GATTOLA (1734). In queste sono presenti le seguenti indicazioni, riportate in latino e di seguito tradotte: a) *sprofondati otto tomoli di terreno, ciascuno di 900 "cubiti napoletani di otto "palmi"* ; b) *perimetro della voragine 275 cubiti napoletani*; c) *asse est-ovest 124 e nord-sud 139* (dei quali l'Autore non riporta però l'unità di misura).

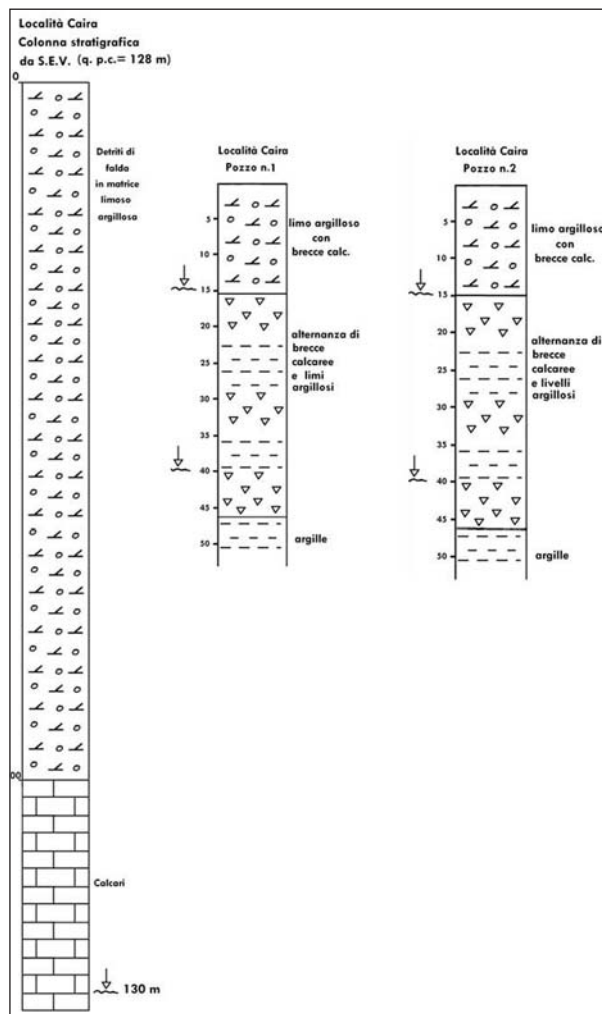
SARAGOSA & SARAGOSA (1998), tradussero il testo latino dell'Autore, ed indicarono che, al momento della formazione, la cavità presentava una circonferenza di 550m e diametri di 250m e 280m. Si è invece rilevato che questi dati non trovano corrispondenza tra di loro e non corrispondono alla situazione reale.

Volendo ricavare le dimensioni della forma in base alle antiche unità di misura si riscontrano due problemi: a) è difficile attribuire un valore preciso alle unità di misura adottate: i cubiti napoletani non vengono contemplati in nessun testo tra quelli consultati; b) nel riportare le dimensioni degli assi non è stata indicata l'unità di misura utilizzata.

Per accertare le reali dimensioni del lago sono state consultate fonti storiche, enciclopedie del lessico italiano e testi latini. Dopo molti accertamenti si è giunti



7a)



7b)

Fig. 7 - a) Schema geologico semplificato dell'area dove è avvenuto lo sprofondamento di Caira; a sinistra un sondaggio geoelettrico; b) le stratigrafie dei pozzi 1 e 2.

a) Geological scheme, in the sinking Caira area; b) electric borehole; on the right borehole (1 and 2) stratigraphy.

alla conclusione che le misure degli assi di (124 e 139) erano espresse in palmi e che ai palmi napoletani poteva essere attribuito il valore di 26,4 cm.

Applicando una formula approssimativa del perimetro dell'ellisse si riscontra che il valore dei due assi è espresso con un'unità di misura diversa da quella del perimetro.

Dopo numerose ricerche concludiamo che i valori riportati nella letteratura riferiti al perimetro possono essere ricondotti ai cubiti attici e romani ai quali viene

attribuito un valore di 44,4cm.

Individuate le unità di misura, e rimanendo fedeli alle indicazioni di GATTOLA (1734) per quanto riguarda le proporzioni degli assi, si ricava che il lago di Caira, al momento della sua formazione, aveva l'asse maggiore di 41 m, il minore di 37 m, il perimetro di 122,1m, una profondità di 23,7m (90 palmi napoletani) ed un'area di 310m².

Misure effettive sulle dimensioni del lago, dopo una sua evoluzione, risalgono a DE MARCO (1888): "Avendolo io misurato nel gennaio di quest'anno, ho trovato la sua periferia di 525m (con un diametro medio di 165 metri circa)"

Questo significa che in 164 anni lo svasamento dei bordi con la rimozione delle particelle ha più che quadruplicato le dimensioni originarie (sulla sezione IGM al 10.000 il diametro della paleoforma è di 170 m).

L'interrimento del lago è successivo all'anno 1902; presumibilmente avvenne pochi anni dopo (DEL Foco, 1902; fig. 6).

6.2 Altre aree interessate da sprofondamenti

La conferma della presenza dello sprofondamento di Caira nell'area ha stimolato ulteriori ricerche storiche e ricognizioni in tutto il territorio per individuare altre cavità o paleoforme; difficilmente infatti un fenomeno di sinkhole s.s. si rinviene isolato.

E' stata indagata, in principio, tutta la piana di Cassino, partendo dal sito in cui è stato riconosciuto il Lago di Caira. L'analisi delle foto aeree di tutta l'area ha messo in evidenza altre tre forme sub-circolari ormai oblite (fig. 8), due in località Vertelle (con diametri di circa 250 m) e una presso Masseria Chiusavecchio dove si evidenzia una paleo forma gemellata (data dalla fusione di due cavità sub-circolari) con diametro maggiore di 380 m circa.

Il successivo sopralluogo sul terreno presso Masseria Chiusavecchio ha evidenziato la presenza di un piccolo lago (fig. 8) ormai quasi estinto: la Pescarola (la denominazione antica ricordata dagli abitanti, i quali affermano che si formò naturalmente), con diametro attuale di 25-30 m e scarsa profondità. Alcuni abitanti affermano che il lago era già presente alla fine dell'1800 con dimensioni molto più grandi ed adibito a vivaio. Negli archivi della Abbazia benedettina, un atto di vendita presente nei REGESTI ha confermato la presenza della Pescarola già nel 1676.

Nel 1920 tutta l'area è stata bonificata e molte polle, stagni ed eventuali cavità sono stati ricolmati. Inoltre, durante il sopralluogo, è emerso che a poca distanza dalla Pescarola era presente un altro laghetto, presso l'area in cui oggi sorge l'ospedale. Nel corso dei lavori per la costruzione dell'ospedale si sono verificati eccessivi cedimenti del terreno (gli ultimi nell'agosto 2005) che hanno portato alla provvisoria sospensione dei lavori.

Il sopralluogo condotto sul terreno in località Vertelle (dove si distinguevano altre forme subcircolari) non ha dato però esiti positivi in quanto l'urbanizzazione del territorio ha ormai obliterato le presunte cavità. Nei pressi del lago di Caira (antico Mulino) è stata individuata un'altra paleoforma risalente almeno al 1200.

Nella porzione settentrionale della stessa piana presso S. Elia Fiumerapido, l'analisi fotointerpretativa ha evidenziato la presenza di altre tre paleo-forme (fig. 9), di cui due coincidono sul terreno con polle subcircolari con diametri di 8-10 m (Salaluca e Magnesiaca; fig 9), sedi di sorgenti di acqua mineralizzata, con abbondanti risalite di gas. Le portate stimate delle sorgenti sono di 94l/sec e 68 l/sec (CARAMADRE 1996), le conducibilità rispettivamente di 445 µs (nel 1996) e 935 µs, la salinità di 370 e 660 g/cm³ rispettivamente. Gli alti valori di conducibilità sono compatibili con acque di provenienza profonda.

Presso la polla Magnesiaca e' stata eseguita la batimetria con ecoscandaglio che ha fatto registrare la presenza di una cavità tronco-conica, con pareti sub-verticali e profondità di 8 m. Per quanto riguarda i dati di sottosuolo un sondaggio geognostico, reperito nelle vicinanze delle due polle, mostra la presenza di limi argillosi sino alla profondità di almeno 50m (fondo foro; fig. 9) e di due falde sovrapposte rispettivamente a 24 m e a 49 m, corrispondenti con livelli permeabili. Durante il terremoto del 1984 l'acqua proveniente dalla sorgente Magnesiaca ha subito intorbido per 3 giorni circa, con risalita di fango. I dati relativi alla polla magnesiaca sono riportati in tab. 1.

In prossimità della sorgente Magnesiaca era presente un'altra cavità circolare, oggi inac-

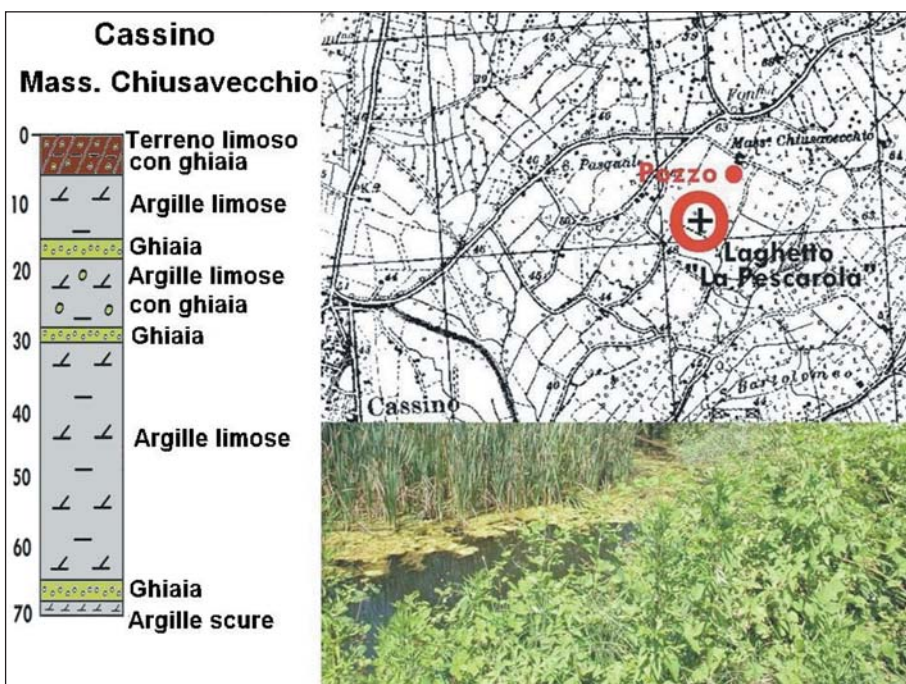


Fig 8 - Ubicazione della Pescarola; colonna stratigrafica riportante i dati di sottosuolo nelle vicinanze del laghetto e immagine di come la Pescarola si presenta oggi.

Location of the Pescarola pound; stratigraphy of the borehole data and Pescarola pound view.

cessibile, contenente attualmente acqua.

L'esame delle mappe storiche conferma che presso l'abitato di Sant'Elia, nei primi del settecento erano presenti tre laghetti uno dei quali in località Acqua Nera (fig 9; fig 12); le posizioni coincidono con le polle e le paleoforme individuate.

La seconda area indagata è ubicata presso S. Giorgio al Liri (fig. 10), nella porzione meridionale del bacino Lirino. Nei pressi dell'abitato è ubicato il lago di Acquasanta che oggi si presenta come un piccolo specchio d'acqua, con diametro di 12 m e profondità di 1,5 m, ma che, in passato, doveva avere dimensioni più grandi, infatti è presente in una mappa storica del 1700 (disegni ad acquerello di M. Guglielmelli; fig. 12). Il laghetto presenta emissioni di gas ed una probabile emergenza al fondo.

Nelle vicinanze del primo laghetto, nella piana del Liri, è presente un'altra cavità sub-circolare colmata d'acqua, sede di sorgente di acqua ferruginosa risalente almeno ai primi del 1700.

All'interno dell'abitato di S. Giorgio al Liri è ubicato un terzo laghetto ormai con sponde antropizzate e collegato al Liri tramite canale artificiale, la cui origine dovrebbe risalire a più di 300 anni (è infatti riportato nelle carte antiche di GATTOLA, 1734, e di GUGLIELMELLI, 1715; fig. 10; fig. 12). Il diametro della cavità è diminuito nel tempo, attualmente si attesta intorno ai 30-40 m e la profondità è pari a circa 2 m.

La forma del laghetto di S. Giorgio in origine era circolare; infatti l'urbanizzazione dell'area ha seguito la morfologia dell'antico perimetro del lago, e ciò testimonia che la nascita dell'abitato è successiva allo stesso (informazioni fornite dal Comune di San Giorgio a Liri).

Una quarta cavità asciutta, ormai obliterata, è presente presso località S. Marco: negli anni 50 il diametro si attestava intorno ai 47 m, attualmente è pari a circa 20 m; probabilmente la cavità naturale è stata successivamente sfruttata per recupero di inerti.

Tab. 1 - Principali parametri geochimici delle acque nell'area di S. Elia e S. Giorgio al Liri. *Main Geochemical Parametres of the water samples in the S. Elia S. Giorgio al Liri Area.*

Toponimo	Ph	Eh	Cond. $\mu\sigma$	T C°	Bicarbonati ml/l
Sorg. Magnesiaca S. Elia	6,63	164	935	13.05	732
Lago di Acquasanta	7,46	117	327	17	244
Sorgente ferruginosa	7,4	0	370	15	317
Lago di S. Giorgio al Liri	7,58	98	372	16	244

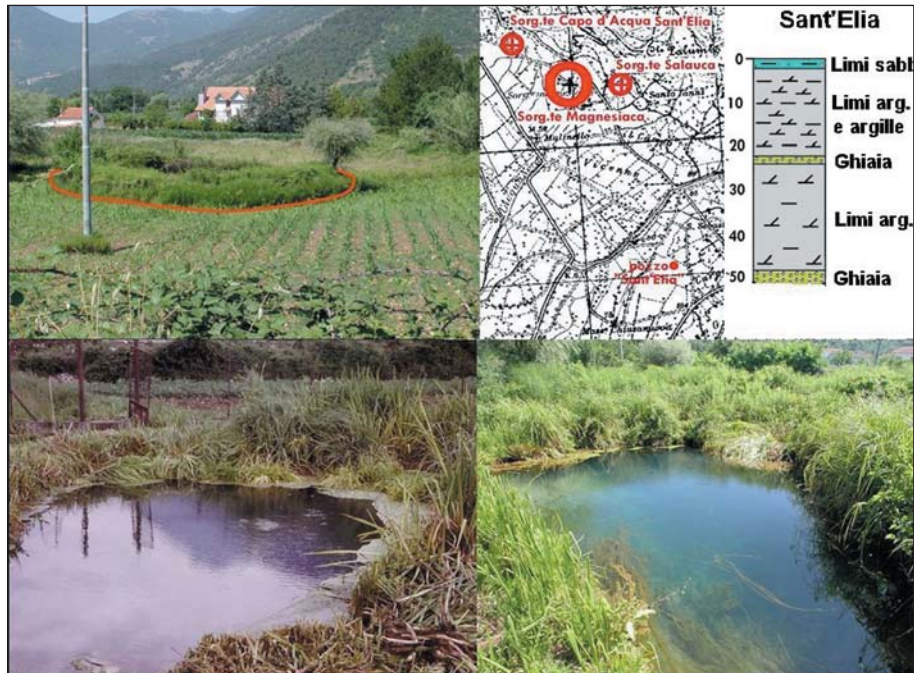


Fig. 9 - In alto ubicazione, presso S. elia Fiumerapido, delle sorgenti e del pozzo con la relativa colonna stratigrafica; in basso, foto della Sorgente magnesiaca come si presentava nel 1996 (foto di R. Caramadre) e come si presenta nel 2005.

At the top location of the S. Elia Fiumerapido springs and pounds, and borehole stratigraphy. At the bottom Magnesiaca sinkhole pound photograph: in the 1996 (left photo by Caramadre) and in the 2005.

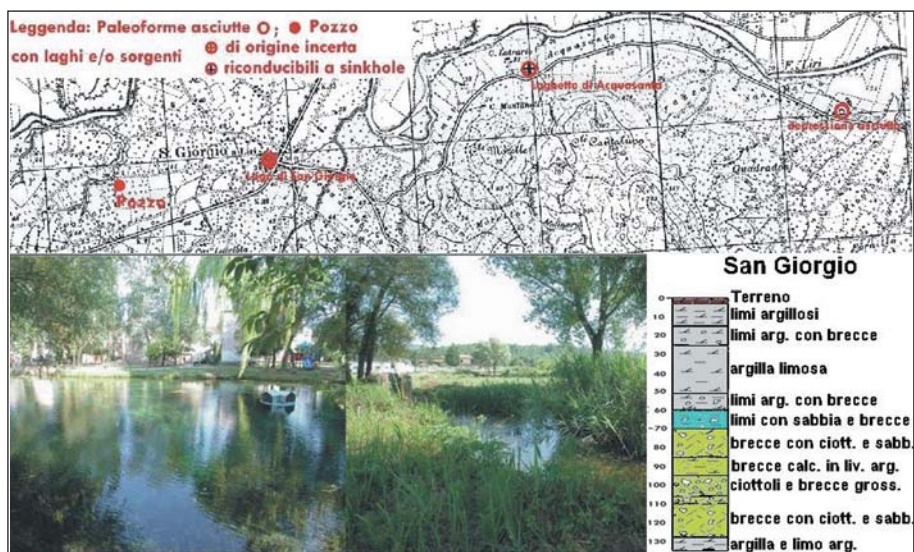


Fig. 10 - In alto sono riportate le ubicazioni dei Laghi presso S. Giorgio al Liri e della paleoforma asciutta nonché del sondaggio geonostico. Immagini dei laghetti presso S. Giorgio al Liri (a sinistra) e Acquasanta; a destra stratigrafie del sondaggio geonostico.

At the top are represented S. Giorgio al Liri Lakes, paleoform and borehole location. Photograph of th S. Giorgio lake and Acquasanta lake; to the right bore hole stratigraphy.

Durante il sopralluogo in sito sono state condotte analisi delle acque i cui dati vengono mostrati in tab.1.

Dai dati raccolti emerge che le conducibilità sono compatibili con lo scorrimento delle acque in terreni di natura alluvionale, i valori di Ph potrebbero essere stati contaminati con apporti di acque superficiali e di scolo provenienti dai canali artificiali.

I dati di sondaggio, nei pressi del laghetto di S. Giorgio (fig. 10), mostrano una successione di limi e argille sino alla profondità di 85 m successivamente brecce calcaree e ghiaie sino alla profondità di 128 m, ed infine argille sino a foro 135 m. Il substrato carbonatico, non riscontrato mai in sondaggio, pertanto, è molto profondo; si può escludere così una genesi carsica dei laghetti. Nei sedimenti è stata, inoltre, riscontrata una falda in pressione alla profondità di 70 m che risale sino al piano di campagna.

La terza area indagata è la piana di Sora (fig. 11), a nord-ovest di Cassino, in cui è stato rinvenuto un antico lago oggi ricolmato, il Lago Tremoletto. Questo è ubicato nella tenuta dei Conti Manconi, secondo alcune fonti l'origine risale ad alcuni secoli addietro, in epoca borbonica; risulta comunque già presente nei primi del 1800. Secondo altre fonti esso sarebbe stato originato da un episodio catastrofico, e caratterizzato dalla presenza di tremori e boati nel sottosuolo, da cui il nome "Tremoletto". A partire dal 1800 il lago ha iniziato a colmarsi per gli apporti detritici del Fiume Fibreno e ridotto ad un piccolo specchio d'acqua, dopo il 1948, è stato definitivamente bonificato. Le stratigrafie dei sondaggi geognostici mostrano una copertura sedimentaria di sabbie e limi sino ad una profondità variabile tra i 15 m e i 25 m; al di sotto si rinvengono sabbioni calcarei e bancate di travertino di spessore complessivo di circa 20 m (fig. 11). I sondatori hanno riscontrato la presenza di vuoti alla profondità di 20-25 m. Il livello di falda si attesta ad una profondità media di 40-50 m circa.

Ulteriore conferma della presenza di fenomeni di sprofondamento all'interno della piana di Sora provengono dalla cronistoria del terremoto di Avezzano, del 13 gennaio del 1915, quando si è aperta una cavità nel terreno con fuoriuscita di acqua mista a fango con formazione di vulcanelli e fontane di sabbia.

Dalle osservazioni finali sulle ricognizioni effettuate di paleoforme e dei laghetti rinvenuti tra la piana di Cassino e S. Giorgio al Liri, si evince che essi si allineano secondo una direttrice orientata circa NS (N10E): la *Faglia Theodicea*; fig. 1.

7. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

La situazione geologico-strutturale ed idrogeologica della Bassa Valle Latina, ed in particolar modo delle piane di Cassino e Sora, è predisponente alla formazione di fenomeni di sinkhole.

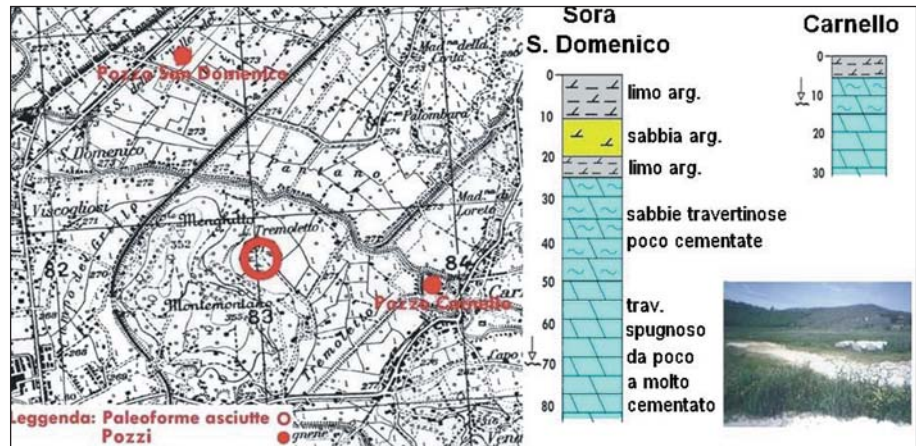


Fig. 11 - Ubicazione del Lago Tremoletto, presso la Piana di Sora (nel riquadro interno il lago come si presenta oggi) e stratigrafie dei sondaggi.

Ubication of tremoletto lake, in the Sora plain (in the box a view of the lake now) and borehole stratigraphy.

Le piane su cui si sviluppano gli abitati sono di origine tettonica; i depositi quaternari che le colmano, con spessori di oltre cento metri, sono costituiti in prevalenza da un'alternanza di limi e argille, dotate di discreta consistenza e subordinatamente da sabbie e ghiaie; solo a luoghi, includono bancate o lenti di travertino (ad ovest del F. Gari, per esempio presso la Piana di Sora, e i dintorni di Aquino).

Le dorsali carbonatiche circostanti le piane sono fortemente interessate da fenomeni carsici (doline di crollo o di soluzione normale); il substrato carbonatico, al di sotto della copertura quaternaria, è profondamente disarticolato da diversi sistemi di dislocazioni ed è sede di un acquifero confinato, in cui si esplica una notevole circolazione idrica (sorgenti con portate complessive superiori ai 20 m³/s).

A ciò si associa una forte circolazione sotterranea di fluidi aggressivi per la presenza di H₂SO₄ e H₂S legati al vulcanesimo di Roccamonfina e/o ad una circolazione molto profonda all'interno di sistemi di faglia.

L'attività antropica con emungimento indiscriminato delle acque dal sottosuolo, dal 1984 ad oggi, ha



Fig. 12 - Esempi di mappe storiche. Disegni a d Acquerello di Guilmelli (1715), con ubicazione di alcuni laghetti.

Examples of historic maps: Watercolors of Guilmelli (1715); locations of some sinkhole ponds.

determinato l'abbassamento repentino del livello di falda e la migrazione di alcune sorgenti. L'attività tettonica recente del settore è testimoniata dalla sismicità sia storica che strumentale che ha colpito in particolare l'area di Cassino dove, in occasione anche di piccole scosse strumentali, si sono verificati cedimenti del terreno di alcuni centimetri.

Tali caratteristiche al contorno conferiscono all'area tutte le condizioni predisponenti ed innescanti per la formazione di fenomeni di sprofondamento (sinkhole s.s.).

Infatti l'intera area in epoca storica era caratterizzata dalla presenza di piccoli laghetti di forma sub-circolare, (nota per questo motivo come *Terra dei Laghi*) rinvenuti su mappe antiche (ne sono stati individuati ben 23), ma oggi scomparsi o di difficile ubicazione, inoltre alcune leggende e fonti storiche narrano dell'apertura nel terreno di grandi voragini.

La ricerca sul territorio ha permesso di individuare alcune morfologie sub-circolari coincidenti con piccole polle, laghetti o cavità. Tra questi il lago Tremoletto, nella piana di Sora (di cui purtroppo si hanno pochi dati), che si è formato in seguito ad uno sprofondamento repentino del terreno in epoca borbonica non precisata; in parte interrito dagli apporti detritici del F. Rapido, è stato ricolmato artificialmente dopo il 1948.

La presenza però al di sotto del lago di bancate di travertino e la segnalazione da parte dei sondatori di alcuni vuoti, riscontrati durante i lavori di escavazione, possono far ipotizzare per questo lago un meccanismo di tipo diverso, probabilmente assimilabile da un *cover-collapse sinkhole*. Nella stessa piana di Sora, tuttavia, le cronistorie del terremoto di Avezzano nel 1915 narrano dell'apertura di una cavità con connessi episodi di liquefazione e di fuoriuscita di acque mineralizzate.

Più a Sud, nel Bacino Lirino, le ricerche storiche hanno portato all'individuazione di altri laghetti di forma sub-circolare: i laghi di S. Giorgio e Acquasanta non riconducibili a fenomeni carsici in quanto originati al di sopra di una copertura argillosa-limosa (con spessori maggiori di 135 m) in cui è presente una falda in pressione.

La conferma dei fenomeni di sinkhole è stata però accertata con lo sprofondamento di Caira, noto in letteratura come Lago di Caira, formatosi nella notte fra il 18 ed il 19 febbraio del 1724. La raccolta di dati ha permesso di avere un quadro chiaro ed esaustivo della situazione.

Il Lago di Caira si è formato nella piana omonima, a poca distanza dall'abitato, su di una copertura costituita da un'alternanza di argille, limi argillosi con ciottoli calcarei e ghiaie con spessore di cento metri, al di sotto della quale affiora il substrato carbonatico.

La falda profonda è in pressione, mentre i depositi quaternari, al tetto, contengono piccole falde sovrapposte a profondità rispettivamente di 25 m e 40 m dal p.c., in corrispondenza di lenti od orizzonti più permeabili.

La voragine si è aperta in corrispondenza di un elemento tettonico di importanza regionale individuato durante i rilievi di campagna, il cui piano è visibile presso S. Angelo in Theodice e che attraversa tutta la piana: la *Faglia Teodicea* (con andamento circa N5-10E).

All'interno della cavità vi era risalita di gas (H_2S), testimoniata dalle fonti storiche, ed a poca distanza erano ubicate sorgenti sulfuree (oggi estinte) che ali-

mentavano il corso del Fiume Rapido.

La morfologia della cavità risulta essere cilindrica, con pareti verticali profonde 23,5 m; è presumibile pensare che l'alimentazione del lago (il cui livello non oscillava mai) fosse dovuta all'apporto della falda più superficiale (25 m di profondità), ma non si può comunque escludere la presenza di ulteriori piccole polle di risalita di acque sulfuree (infatti periodicamente si assisteva alla morte per asfissia della fauna acquatica).

In quest'area nel 1723 sono registrate nel catalogo dei terremoti molte scosse sismiche (di cui una molto intensa il 18 ottobre) ma non nella notte fra il 18 ed il 19 febbraio 1724 (anche se alcune fonti storiche narrano di un terremoto avvenuto proprio quella notte; due episodi sismici si verificarono nel settembre e nell'ottobre 1724, successivi però alla formazione del lago); pertanto non è possibile ricondurre il fattore innescante ad un evento sismico.

Non è noto, inoltre, se ci sia stata una brusca variazione del livello di falda attribuibile ad un evento pluviometrico importante.

Il processo genetico che ha originato il lago, data la profondità del substrato ed il notevole spessore dei sedimenti di copertura, nonché la loro composizione (prevalentemente limosa dotata di una certa consistenza), non può essere imputabile al lento scorrimento di particelle verso il basso (*raveling*) in quanto gli orizzonti argillosi-limosi impermeabili renderebbero difficile l'infiltrazione d'acqua e l'asportazione di particelle in profondità.

Inoltre la morfologia della cavità (così come viene descritta) cilindrica e non conica (caratteristica nei processi di *raveling*) fa piuttosto ipotizzare la presenza di un condotto.

Si esclude poi la presenza di una cavità a profondità intermedia (di circa 25-30 m) imputabile per esempio alla presenza di placche di travertino o di brecce carsificabili, in quanto non rinvenute in sondaggio.

Si propone pertanto un meccanismo erosivo che proceda dal basso verso l'alto collegato alla risalita di fluidi arricchiti nella componente gassosa ($H_2O + CO_2 + H_2S$) che avrebbero potuto sfruttare proprio la linea di debolezza, costituita dalla Faglia Theodicea. Tale circolazione di fluidi accompagnata a processi di erosione, di sifonamento e di suffosione profonda (*deep piping*) dei materiali di copertura porterebbe, nel tempo, fino al collasso finale della copertura detritica.

È quindi possibile che la cavità superficiale dipenda da processi agenti nel bedrock posto a notevole profondità.

Da quanto detto possiamo classificare lo sprofondamento che ha dato origine al Lago di Caira come Sinkhole s.s ovvero un *piping sinkhole*.

L'analisi fotointerpretativa su tutto il territorio ha permesso di individuare inoltre paleo-cavità e la verifica sul terreno ha confermato tali ipotesi: all'interno delle paleoforme si rinvenivano laghetti in via di estinzione o piccole polle riconducibili a fenomeni del tutto simili a quello avvenuto a Caira che potrebbero essersi formati nell'arco degli ultimi secoli.

Infatti nella piana di Cassino sono presenti la maggior parte delle forme relitte sub-circolari, riconosciute: nei pressi di S. Elia Fiumerapido sono presenti tre forme coincidenti con antichi laghetti, in cui oggi si individua una piccola polla con sorgente (sorgente

Magnesiaca); a poca distanza da Cassino sono state individuate altre paleoforme e la verifica sul terreno ha portato alla conferma della presenza di un piccolo lago, la Pescarola, (presso masseria Chiusavecchio) ormai quasi in estinzione. Gli abitanti del luogo ricordano la presenza di un altro lago dove oggi sorge l'ospedale. A poca distanza dal lago di Caira è inoltre presente una ulteriore morfologia subcircolare, delimitata da piccole scarpate, nelle cui vicinanze sorgeva un antico mulino (anno 1200), gli abitanti ricordano che anticamente era presente una sorgente e polle d'acqua stagnante.

Dai dati raccolti sull'intera area si può infine asserire che la piana di Cassino, quella di Sora e parte del territorio in pianura della provincia di Frosinone sono aree ad elevata pericolosità di sinkhole, inoltre la crescente urbanizzazione del territorio e gli aumentati emungimenti di acqua dal sottosuolo ne fanno incrementare il rischio. Infatti i lavori di costruzione di alcuni edifici (tra cui il nuovo ospedale) al di sopra di una paleo-forma di sprofondamento hanno subito già alcuni problemi durante l'esecuzione, ed altri ben più gravi potrebbero verificarsi in futuro soprattutto in seguito ad eventuali scosse sismiche, anche solo di tipo strumentale. Pertanto il verificarsi oggi di un evento calamitoso, come quello che ha portato alla formazione del lago di Caira, potrebbe certamente provocare oltre a danni gravi all'edilizia perdita di vite umane.

RINGRAZIAMENTI

Si desidera ringraziare i Dott. Giorgio Caramanna e Giancarlo Ciotoli per il supporto durante i rilevamenti idrogeologici. Il Dott. Angelo Leopardi e il Dott. Alberto Frepoli per la collaborazione alle ricerche, il Dott. Rossano Caramadre per aver fornito alcuni dati idrogeologici.

Un particolare ringraziamento va a Don Gregorio dell'Abbazia di Cassino per la disponibilità durante le ricerche storiche e a Don Germano per il supporto durante le ricognizioni sul terreno.

BIBLIOGRAFIA

- ACCODI B. (1964) - *Lineamenti strutturali del Lazio e dell'Abruzzo meridionale*. - Mem. Soc. Geol. It., IV, 595-633, Bologna. (1963).
- ACCORDI G., CARBONE F., CIVITELLI G., CORDA L., DE RITA D., ESU D., FUNICIELLO R., KOTSAKIS T., MARIOTTI G. & SPOSATO A.. (1988) - *Note illustrative alla carta delle litofacies del Lazio-Abruzzo e delle aree limitrofe*. Quad. Ric. Scient., **144** (5), 93-168.
- AGRILLO E., BONO P., CASELLA L., D'ANDREA L., CARAMANNA G. (2004) - *Cavità di collasso recenti e antiche nel bacino lacustre di Posta Fibreno (Frosinone)*. Atti Workshop "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio Roma 20-21 maggio 2004"; 11-18.
- ANNUNZIATELLIS A., BEAUBIEN S.E., CIOTOLI G., LOMBARDI S., NISIO S. & NOLASCO F. (2004) - *Studio dei parametri geologici e geochimici per la comprensione dei meccanismi genetici degli sprofondamenti nella piana di S. Vittorino*. Atti Conv. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio Roma 20-21 maggio 2004"; 63-82.
- BAJ L. & TARTAGLIA G. (1973) - *Le risorse idriche del Lazio con particolare riferimento all'area di intervento della cassa per il Mezzogiorno*. Atti 2° Conv. Int. Acque Sott., 495-505, Palermo (1973).
- BARATTA M. (1978) - *I terremoti d'Italia*. Arnaldo Forni Editore, 95 pp
- BERSANI P. & CASTELLANO F. (2002) - *I sinkhole della Piana di S. Vittorino (Rieti) e il rischio idraulico connesso*. In: Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana. Att. Conv. 31 marzo 2000, (GR). Regione Toscana, 47-61.
- BERTI G., CANUTI P., & CASAGLI N. (2002) - *Voragini e sprofondamenti nel territorio nazionale: analisi morfometrica di alcuni casi caratteristici in aree appenniniche*. In: Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana. Att. Conv. 31 marzo 2000, GR. Regione Toscana, 71-81.
- BILLIARD A., MUXART T., DERBYSHIRE E., WANG G.T. & DIYK-STR, T.A. (1992) - *Les glissements de terrain induits par les loess de la province de Gansou, Chine*. Annales de géographie, 566,495-515. 1992.
- BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia centrale*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 991-1012, 2 tavv.
- BONI C.F. (1973) - *Lineamenti idrogeologici dell'Appennino carbonatico laziale-abruzzese (primi risultati della campagna 1970-1972)*. Atti 2° Conv. Int. Acque Sott., Palermo.
- BONO P. (1995) - *The sinkhole of Doganella (Pontina, Plain, Central Italy)*. Environmental Geology, **26**, 48-52.
- CAMPOBASSO C., GRACIOTTI R., NISIO S. & LETIZIA V. (2004) - *Il progetto sinkhole: le attività svolte dal Dipartimento Difesa del Suolo dell'APAT*. Atti Conv. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio Roma 20-21 maggio 2004". 171-188.
- CAPELLI G., PETITTA M. & SALVATI R. (2000) - *Relationships between catastrophic subsidence hazards and groundwater in the Velino Valley (Central Italy)* - Proceedings Sixth International Symposium on Land Subsidence SISOLS 2000, Ravenna, Italy. **1**, 123-136.
- CARAMADRE R. (1996) - *Contributo all'idrogeologia del bacino del fiume Rapido (Lazio Meridionale)*. Tesi di Laurea, Relatore prof. Piero Barazzuoli. Università degli Studi di Siena. A.A.
- CARAMANNA G., NISIO S. & VITA L. (2004) - *Fenomeni di annegamento dei sinkholes: casi di studio su alcuni laghetti di origine incerta*. Atti Conv. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio Roma 20-21 maggio 2004", 229-248.
- CARRARA C. (1991) - *Travertine deposits of the middle Liri Valley (Central Italy): geomorphological, sedimentological and geochemical study*. Palaeoenvironmental and palaeoclimatic implications. Il Quaternario, n. **4** (1a), pp. 55-84.
- CAVINATO G.P., COSENTINO D., DE RITA D., FUNICIELLO R. &

- PAROTTO M. (1995) - *Tectonic-sedimentary evolution of intrapenninic basin and correlation with the volcano-tectonic activity of central Italy*: Memorie Descrittive Servizio Geologico Italiano, **39**, 44-59.
- CAVINATO G.P. & DE CELLES P.G. (1999) - *Extensional basin in the tectonically bimodal central Apennines fold-thrust belt, Italy: response to corner flow above a subducting slab in retrograde motion*. *Geology*, **27-10**, 955-958.
- CELICO P. (1976) - *Nuove vedute sulla struttura della piana di Cassino in base a recenti indagini idrogeologiche*. *Boll. Soc. Nat. In Napoli*, **85**, 1-16.
- CELICO P. & STANGANELLI V. (1975) - *Le ricerche di nuove risorse idriche nelle regioni carsiche campane e molisane*. E.S.A. Atti 3° Convegno Internazionale "Acque Sotterranee" Palermo.
- CELICO P. & STANGANELLI V. (1976) - *Sulla struttura idrogeologica dei monti di Venafro (Italia meridionale)*. *Boll. Soc. Natur. in Napoli*, **85**, pp. 1-26, tav. II.
- CERISOLA R. & MONTONE P. (1992) - *Analisi strutturale di un settore della catena dei monti Ausoni-Aurunci (Lazio, Italia Centrale)*. *Boll. Soc. Geol. It.*, **111**, 449-457, 5 ff., 1 tav.
- CIOTOLI G. DI FILIPPO M., NISIO S. & ROMAGNOLI C. (2000) - *La Piana di S. Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, strutturali, geomorfologici, geofisici e geochimici*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **56**, 297-308.
- COLOMBI A., SALVATI R. & CAPELLI G. (2001) - *Sinkhole in Latium Region (Central Italy). Purposes of the Main Project*. In *Geotechnical and Environmental applications of karst geology and hydrology*. Beck B.F. and Gayle Herring J. Eds., Balkema, The Netherlands.
- DAMIANI A. V. & PANUZZI L. (1980) - *La neotettonica del F. 153 "Agnone"*. C.N.R., P.F. Geodinamica, Pubbl. n°365, 237-248, Roma.
- DAMIANI A. V. & PANUZZI L. (1982) - *Osservazioni neotettoniche nei Fogli 151 "Alatri" e 152 "Sora"*. C.N.R., P.F. Geodinamica, sottoprogetto neotettonica, Pubbl. n°506, 37-51, Roma.
- DE MARCO G. (1888) - *Monte Cassino: Nei tre regni della natura*. 216 pp.
- DEL FOCO O. (1902) - *Cassino e le sue Acque*. Milano, 79 pp.
- DEL PRETE S., DE RISO R. & SANTO A. (2004) - *Primo contributo sui sinkholes di origine naturale in Campania, Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*. Atti Conv. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio Roma 20-21 maggio 2004", 361-376.
- DERBYSHIRE E. & MELLORS T.W. (1988) - *Geological and geotechnical characteristic of some loess and loessic soil from China and Britain: A comparison*. *Engineering geology*, **25**, 135-175.
- DEVOTO G. (1965) - *Lacustrine Pleistocene in the lower Liri Valley*. *Geol. Rom.*, IV, 1965, 6, 291-368.
- DI FILIPPO M., PALMIERI M., TORO B. (2002) - *Studio gravimetrico del sinkhole di Doganella di Ninfa (Latina)*. In: *Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana*. Att. Conv. 31 marzo 2000, GR. Regione Toscana, 62-70.
- DI LORETO E., LIBERI L., & PIRO M. (1999) - *Riqualificazione ambientale del Geotopo di Lago Puzzo, Comune di Fiano Romano Roma*. Mem. descr. Carta geol. D'It., **LIV**, 339-346.
- DISSERTATIO I. (1800) - *Saeculum nonum a constructione coenobi cassinensis* cap VII Pars VII pp
- EVERNDEN C. & CURTIS L. (1965) - *The Potassium-Argon dating of late Cenozoic Rocks in East Africa and Italy*. *Current Anthropology*, **6**, n. 4.
- FACCENNA C. (1994) - *Structural and hydrogeological features of Pleistocene shear zones in the area of Rome (Central Italy)*. *Annali di Geofisica*, **37**, 121-133.
- FACCENNA C., FLORINDO F., FUNICELLO R., & LOMBARDI S. (1993) - *Tectonic setting and Sinkhole Features: case histories from western Central Italy*. *Quaternary Proceeding* n.3, 47-56.
- FAIRBRIDGE, (1968) - *The encyclopedia of Geomorphology*. Ed. Reinhold, New York, 1295 pp, 1968.
- FERRELLI L., GUERRIERI L., NISIO S., VITA L. & VITTORI E. (2004) - *Relations among seismogenic structures, earthquakes and sinkhole phenomena: a methodological approach in the Apennines (Italy)*. 32nd International Geological Congress. Firenze 20-28 Ago 2004. Vol. Abs, Part 1, 669.
- FREPOLI A. & AMATO A. (2000) - *Fault plane solution of crustal earthquakes in Southern Italy (1988-1995): seismotectonic implications*. *Annali di Geofisica*, vol. 43, N. 3, June 2000.
- FREZZOTTI M., MOLIN D. & NARCISI B. (1988) - *Correlazione tra caratteri strutturali e sismicità storica dell'area di Roccamonfina*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **41**, 12 ff.
- GASPARINI C., IANNACCONE G. & SCARPA R. (1985) - *Fault-plane solution and seismicity of the Italian peninsula*. *Tectonophysics*, **117**, 59-78.
- GATTOLA E. (1733) - *Historia Abbatiae Cassinensis*. Pars Secunda, Venetiis, Coleti, Monte Cassino.
- GATTOLA E. (1734) - *Ad Historiam Abbatiae Cassinensis Accessiones*. Venetiis, Coleti, **2**, 907 pp.
- GHISSETTI F. & VEZZANI L. (1999) - *Depth and modes of crustal extension during the Pliocene-Pleistocene evolution of the Apenninic belt (Italy)*. *Terra Nova*, **11**, 67-71.
- GHISSETTI F., KIRSCHNER D. L., VEZZANI L. & AGOSTA F. (2001) - *Stable isotope evidence for contrasting paleofluid circulation in thrust faults and normal faults of the central Apennines, Italy*. *Journal of Geophysical Research*, **106**, B5, 8811-8825.
- GRACIOTTI R., NISIO S., & VITA L. (2004) - *Sinkholes in Italy: inventory of natural phenomena and some study cases*. 32nd International Geological Congress. Firenze 20-28 Ago 2004. Vol Abs, part 1, 670.
- GUGLIEMELLI M. (1715) - *La Terra di S. Benedetto. nei disegni acquerellati di Marcello Guglielmelli (sec. XVIII)*. Vol. 4. Riproduzione Banca Popolare cassinata. Cassino 1986.
- ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA (2000) - *Annali di Geofisica* vol. **43**, N. 4, 609-868. August 2000;
- JANDOLO E. (1966) - *La Bonifica Benedettina*. Istituto della Enciclopedia Italiana, Fond. G. Treccani.
- LECCISOTTI T. & AVAGLIANO F. (1977) - *I Regesti dell'Archivio*. Vol. VI, Abbazia di Monte Cassino.
- LITTLEFIELD J.R., CULBRETH M.A. UPCHURCH S.B., STEWART M.T. (1984) - *Relationship of modern sinkhole development to large scale-pholinear features*. In:

- Beck Barry F. (1984) *Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact*. Ed. A.A. Balkema/Rotterdam/Boston.
- MATTEI M., FACCENNA C. & FUNICIELLO R. (1994) - *Paleomagnetic Evidence for No Tectonic Rotation of the Central Italy Tyrrhenian Margin Since Upper Pliocene*. *Geophysical Research Letters*, **21**, no. 6, pages 481-484.
- MONROE W.H. (1970) - *A glossary of karst terminology*. U. S. Geol. Surv. Water Sup.
- MOUTON J. (1973) - *Contributo allo studio delle acque sotterranee del Lazio meridionale*. Atti 2° Conv. Int. Acque Sott., Palermo.
- NARCISI B. (1986) - *Ricerche di tefracronologia nella media e bassa Valle Latina*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **35**, 909-912, 3 ff., 1 tab.
- NISIO S. (2003) - *I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia Centrale*. *Il Quaternario*, **16(1)**, 121-132.
- NISIO S., CARAMANNA G., CIOTOLI G. (2005) - *Sinkholes hazard in Italy: first results on the inventory and analysis of some case studies*. General Assembly of the European Geosciences Union (EGU), Vienna April 24-29; *Geophysical Research Abs.* Vol. **7**, 03922, 2005.
- NISIO S., GRACIOTTI R. & VITA L. (2004) - *I fenomeni di sinkhole in Italia: terminologia, meccanismi genetici e problematiche aperte*. Atti Workshop APAT. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio Roma 20-21 maggio 2004", 557-572.
- NISIO S. & SALVATI R. (2004) - *Fenomeni di sprofondamento catastrofico. Proposta di classificazione applicata alla casistica italiana*. Atti Workshop APAT "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio Roma 20-21 maggio 2004", 573-584.
- PAROTTO M. (1971) - *Stratigraphy and tectonics of the eastern Simbruini and western Marsica range (Central Apennines Italy)*. *Mem. Acc. Naz. Lincei, Classe di scienze Fis., Mat. e Nat., ser. 8, 10*, Roma.
- PAROTTO M. (1980) - *Apennin central*. In: 26° Congr. Geol. Inter. Introduction à la géologie générale d'Italie et guide à l'excursion. 112A, 33-37.
- PAROTTO M. & PRATURLON A. (1975) - *Geological Summary of the Central Apennines*. In C.N.R., Structural Model of Italy. *Quad. Ric. Sci.*, **90**, 257-311.
- PAROTTO M. & PRATURLON A. (1981) - *Duecento anni di ricerche geologiche nell'Italia Centrale*. "Mem. Soc. Geol. It." Vol. giubilare "Cento anni di geologia italiana", 241-278. Bologna
- PILLA L. (1837) - *Relazione dei tremuoti che afflissero la città di S. Germano ed il Monastero di Montecassino nella primavera dell'anno, 1837*.
- REGIONE TOSCANA (2002) - *Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana*. Att. Conv. 31 marzo 2000, GR.
- SACCHETTI G. I. (1920) - *Storia Geologica di Montecassino (stato attuale delle conoscenze e ricerche personali)*. Stabilimento tipografico Emilio Di Mauro, Cava Dei Tirreni.
- SARAGOSA S. & SARAGOSA L. (1998) - *Caira, frazione di Cassino, dalle origini ad oggi*. Tipografia Francesco Ciolfi Cassino.
- SALVATI, R. & SASOWSKY, I. D. (2002) - *Development of cover collapse sinkholes in areas of groundwater discharge*. *Journal of Hydrology*, 264.
- SAROLI M., CIOTOLI G., LOMBARDI S. & MARIOTTI G. (2004) - *Assetto geologico e possibile sviluppo di fenomeni di sinkhole lungo la "linea Val Roveto-Atina"* Atti Workshop APAT "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio Roma 20-21 maggio 2004". Vol Abs., 66.
- STRAHLER A.N. (1954) - *Quantitative geomorphology of erosional landscapes*. C.R. 19th Intern. Geol. Cong. Algiers, Sect. 13, part 3, 341-354.
- THARP T.M. (1999) - *Mechanism of upward propagation of cover collapse sinkhole*. *Engineering Geology*, **52**, 23-33.
- VARRONE M.T. (1954) - *Marco Terenzio Varrone ed il Cassinate*. Roma 1954.

Ms. ricevuto il 6 settembre 2005
 Testo definitivo ricevuto il 10 novembre 2005

Ms. received: September 6, 2005
 Final text received: November 10, 2005

