

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

Dr. ssa Fabiana Scapola

Tutor: Dr.ssa Stefania Nisio

PREFAZIONE

Nell'ultimo ventennio, si sono registrati, in aree di pianura italiane, fenomeni di sprofondamento naturale, che sono stati tempestivamente osservati, monitorando, in tal modo, la loro evoluzione ed effettuando una gran numero di indagini specifiche. Tali studi hanno portato all'individuazione dei meccanismi genetici che non coincidono con i classici schemi relativi ai processi carsici ma, a causa del notevole spessore della copertura sedimentaria, con fenomeni di erosione dal basso (*deep piping*): a tali fenomeni è stato dato il nome di *piping sinkhole* (sprofondamento improvviso connesso alla risalita di fluidi e all'erosione dal basso).

Da tempo inoltre erano state osservate sul territorio italiano, anomale cavità o fosse subcircolari, prive di acqua, definite, dagli Autori *forme crateriche o pseudo crateriche*, di oscura genesi. Alcune si rilevano in aree vulcaniche e quindi attribuite in passato a fenomeni vulcanici (*maar*, o piccoli crateri) altre, presenti in aree pianeggianti nelle vicinanze di dorsali carbonatiche, attribuite a fenomeni carsici (doline alluvionali), altre ancora attribuite erroneamente a cavità antropiche (cave, anfiteatri romani, voragini dovute ad esplosioni etc.). Inoltre, distribuiti in molte regioni italiane, sono presenti molti laghetti di forma sub-circolare originatisi in epoca storica, di cui le 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 l'origine ad un unico evento catastrofico.

Essi hanno origine generalmente connessa a fenomeni carsici, si formano in seguito ad un crollo repentino della volta (doline di crollo) o a causa di fenomeni di dissoluzione spinta, a volte, invece, i meccanismi genetici sono più complessi ed assumono ruolo importante condotti di erosione all'interno dei terreni.

La correlazione tra questi ed i gli sprofondamenti catastrofici, tipo *piping sinkholes*, nasce 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 dando a questa 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, nell'arco di pochi giorni, la voragine alimentandola perennemente.

Stabilire quali dei numerosi laghetti o delle cavità asciutte presenti nel territorio italiano possano essere considerati fenomeni di *sinkhole* in senso stretto è difficile e la veridicità di tali ipotesi può venire confermata solo in seguito ad indagini specifiche (ricostruzioni geologiche, sondaggi geognostici, indagini geofisiche, analisi idrogeologiche e geochemiche). In alcuni casi però le ricerche effettuate hanno portato ad esiti positivi ed ad acquisire informazioni precise circa la data e le modalità di formazione di tali sprofondamenti, come è avvenuto per il Lago di Caira vicino Cassino, di cui è stato possibile proporre delle ipotesi genetiche.

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 rimanendo in vita circa un secolo. Pertanto la memoria storica del Lago rimane soltanto in pochi scritti conservati negli archivi dell'Abbazia di Cassino.

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 sprofondamento

naturale verificatisi nelle aree di pianura, e di censire piccoli specchi d'acqua che potrebbero avere avuto genesi compatibile con episodi di sprofondamento attraverso processi di *deep piping*. La ricerca delle fonti storiche, gli studi e gli accertamenti in sito, hanno così confermato che non solo nella piana di Cassino ma anche nelle aree limitrofe si sono manifestati in passato questi episodi calamitosi. Grazie a queste scoperte quest'area del Lazio Meridionale potrà da oggi essere annoverata tra le aree a rischio sinkhole, per le quali si rende necessario espletare una serie di indagini tecniche di dettaglio prima di realizzare nuove infrastrutture al fine di salvaguardare i nuovi manufatti e, soprattutto, la vita umana.

Stefania Nisio

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	4
1.1	AREA INDAGATA E SCOPO DEL LAVORO	4
1.2	METODOLOGIA.....	5
2	PREMESSA.....	5
2.1	CONCETTO DI SINKHOLE	6
2.2	CARATTERISTICHE FAVOREVOLI ALLO SVILUPPO DI SINKHOLE	7
2.3	AREE TIPICHE CARATTERIZZATE DA SINKHOLE	8
2.4	MODELLI GENETICI E CLASSIFICAZIONE	8
3	I FENOMENI DI SPROFONDAMENTO NEL LAZIO MERIDIONALE.....	11
4	INQUADRAMENTO GEOLOGICO – STRUTTURALE.....	15
4.1	STRATIGRAFIA	17
4.2	CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI DI COPERTURA	20
5	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO.....	20
5.1	RICOSTRUZIONE PALEOGEOGRAFICA DELL'AREA.....	20
5.2	GEOMORFOLOGIA	21
6	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO:.....	23
6.1	LE SORGENTI DELL'AREA, CHIMISMO DELLE ACQUE	24

6.2	FALDE	26
7	IL LAGO DI CAIRA	27
7.1	CASSINO E LA “STORICA” INSTABILITÀ GEOLOGICA	27
7.2	UBICAZIONE E CONTESTO GEOLOGICO DEL “LAGO DI CAIRA”	29
7.3	IL LAGO DI CAIRA: RICOSTRUZIONE STORICA	31
7.4	LA GEOMETRIA INIZIALE DELLA FORMA E SUA EVOLUZIONE NEL TEMPO.	32
8	SISMICITÀ	35
8.1	SISMICITÀ STORICA	35
8.2	SISMICITÀ STRUMENTALE	36
9	DISCUSSIONE E CONCLUSIONI	39

1 INTRODUZIONE

1.1 Area indagata e scopo del lavoro

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

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 l’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 subcircolari, 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 *sinkhole* s.s. entrambe sedi di laghi oggi prosciugati: il lago di Caira (che sarà oggetto principale di questa trattazione per la maggiore quantità di dati raccolti), il lago Tremoletto, presso Isola Liri, il Lago di San Marco e di Acquasanta, in San Giorgio sul Garigliano. Sono state inoltre

individuare altre paleoforme, con l'ausilio della fotointerpretazione, di cui solo ad alcune è stato possibile attribuire l'identità di cavità di sprofondamento o di lago, dopo la verifica sul terreno, (tra cui la Pescarola e il laghetto estinto al di sotto dell'Ospedale nuovo) per altre tuttavia non sono rimaste tracce nella memoria storica dei luoghi.

1.2 Metodologia

La metodologia utilizzata in questo lavoro ha previsto lo svolgimento di alcune fasi:

- Individuazione preliminare delle presunte morfologie di sprofondamento su supporto topografico, analisi di foto aeree accompagnate da verifiche di terreno.
- Analisi storica dell'area di studio: ricerca dei toponimi e raccolta di informazioni presso gli abitanti della zona, per recuperare la memoria storica degli eventi mediante tradizioni e leggende; analisi delle cronache storiche (in latino medioevale) conservate nell'abbazia di Montecassino, consultazione di manoscritti e confronto degli stessi; ricerche presso il Tribunale di Cassino sulle perizie effettuate nell'area di Cassino; ricerche svolte presso vari enti pubblici e privati; collaborazione con l'Università di Cassino, facoltà di ingegneria, per la raccolta dei dati di pozzo, di sondaggi geognostici e di dati idrogeologici della zona di Cassino.
- Rilevamento geologico-strutturale e geomorfologico (con particolare riguardo all'area di Cassino), mediante sopralluoghi in sito e studio delle foto aeree; confronto con le stratigrafie di pozzi, con sondaggi geognostici e con stese sismiche; studio delle caratteristiche geotecniche dei terreni affioranti.
- Rilevamento idrogeologico della piana di Cassino mediante la verifica dei livelli di falda e il censimento delle sorgenti.
- Analisi della sismicità storica e degli eventi alluvionali che hanno colpito l'area.
- Sintesi dei dati ed ipotesi sui meccanismi genetici che hanno portato alla formazione delle cavità.

2 PREMESSA

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 predisposti 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 tali 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).

2.1 Concetto di sinkhole

I sinkholes, forme di erosione che si inseriscono nell’ambito di processi di sprofondamento catastrofico e di subsidenza catastrofica, 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 omologhe ma che si sono formate ed evolute secondo modalità differenti. Nella letteratura anglosassone 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 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 e Salvati, 2004; Nisio et alii, 2004). Gli elementi che distinguono una dolina da un sinkhole sono le condizioni geologiche al contorno e le modalità di innesco e di propagazione del fenomeno (Nisio e Salvati, 2003). L’evoluzione di una dolina è guidata essenzialmente da agenti morfogenetici esogeni (acque meteoriche, carsismo, per lo più epigeo e gravità); mentre in un sinkhole la genesi e lo sviluppo sono influenzati da agenti morfogenetici endogeni (acque di circolazione sotterranea, flussi gassosi, collassi nel sottosuolo, carsismo ipogeo, faglie e fratture). 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. Il termine dolina, quindi, non va confuso con quello di voragine o sprofondamento che fanno riferimento al verificarsi di un improvviso richiamo verso il basso di depositi di copertura in seguito al crollo di una cavità.

Dato il numero via via crescente delle cavità che si vanno aprendo su tutto il nostro territorio e di quelle formatesi in tempi storici ed ultimamente individuate, si è sentita l'esigenza di unificare il linguaggio adottato per classificarle cercando di associare quanto più possibile il nome della morfostruttura al processo genetico che l'ha originata. In base alle modalità di innesco ed evoluzione del fenomeno possono essere distinti alcuni modelli fondamentali di sinkholes: *piping sinkhole*; *collapse sinkhole*; *solution sinkhole*; *subsidenze sinkhole*; *anthropogenic sinkhole* e *cover sinkhole*. Nel secondo capitolo passeremo brevemente ad illustrarli. Premettiamo, comunque, che il termine sinkhole s.s. dovrebbe essere riservato a quelle forme determinate da processi di risalita, sifonamento e suffosione profonda, ossia dalla risalita di fluidi dal basso, attraverso sistemi di fratture che pongono in contatto il substrato carsificato con i depositi di copertura.

2.2 Caratteristiche favorevoli allo sviluppo di sinkhole

I sinkholes (s.l.) si originano in contesti geologico-strutturali ed idrogeologici abbastanza articolati e complessi. Zone ad elevato rischio sono le pianure alluvionali in contatto con successioni carbonatiche intensamente carsificate e tettonizzate (che ne costituiscano il bedrock) ove vi sia la presenza concomitante di alcuni o tutti i seguenti fattori:

- a) Un substrato carbonatico posto a notevole profondità, carsificato e fratturato che presenti una morfologia accidentata sia a piccola che grande scala tale da favorire processi di erosione localizzati e la "mobilizzazione" di materiale;
- b) Presenza al tetto del substrato di un potente pacco di depositi continentali a granulometria variabile con particolari alternanze di orizzonti a diversa permeabilità (di solito impermeabili o semipermeabili), coerenza e competenza;
- c) scadenti caratteristiche geo-meccaniche (consolidazione, addensamento, resistenza) dei terreni costituenti la copertura superiore;
- d) presenza di un potente acquifero confinato, falda in pressione, e/o sorgenti con portate notevoli (porre particolare riguardo alla temperatura, al chimismo e alla salinità delle stesse acque circolanti);
- e) circolazione di fluidi idrotermali ricchi in CO₂ e H₂S (più aggressivi sui carbonati) associati alla risalita di flussi gassosi;

-
- f) variazioni del livello di falda generate da cause naturali, come eventi pluviometrici intensi dopo periodi di siccità, oppure antropiche, come sovrasfruttamento di sorgenti e/o sovraemungimento, che causano rispettivamente imbibizione ed essiccamento;
 - g) sistema di deformazione fragile ben sviluppato che interessi il substrato e metta in comunicazione lo stesso con i depositi di copertura così da agevolare la circolazione dei fluidi e favorire i processi di erosione;
 - h) sismicità dell'area.

2.3 Aree tipiche caratterizzate da sinkhole

Nella maggior parte dei casi finora individuati si è visto che tali fenomeni tendono a concentrarsi in corrispondenza di successioni carbonatiche massicce, di 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, suffosione profonda ed erosione preferenziale specialmente nella zona di interfaccia (Littlefield et alii, 1984; Derbyshire & Mellors, 1988; Billiard et alii, 1992/3; etc..).

In termini geologici e/o geografici tali aree corrispondono a bacini intermontani di origine tettonica, a zone di piana (alluvionale, costiera, intermontana...) posta in contatto tettonico con le dorsali confinanti. Tuttavia non bisogna trascurare tutta una serie di dissesti di origine quasi esclusivamente antropica che si verificano in zone urbane non necessariamente carsiche.

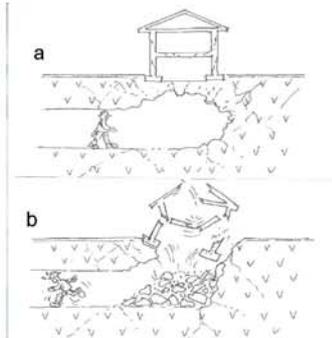
2.4 Modelli genetici e classificazione

Come abbiamo precedentemente accennato in base alle modalità di innesco ed evoluzione del fenomeno possono essere distinti alcuni modelli fondamentali di sinkhole.

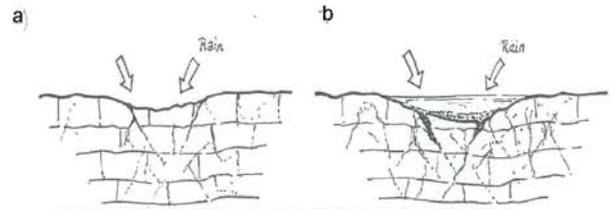
- Sprofondamento di origine antropica *anthropogenic sinkhole*. Tale fenomeno è strettamente collegato alla presenza di cavità artificiali nel sottosuolo (miniere, catacombe etc.); esso dipende principalmente dalla gravità.
- Dolina di dissoluzione o *solution sinkhole*. Si tratta di una depressione morfologica, che si origina per dissoluzione della roccia carbonatica poco profonda e ricoperta da una sottile pellicola di depositi poco coesivi come sabbie, limi o sedimenti vulcanici..
- Dolina di crollo o *Cave collapse sinkhole*. E' generata da processi sia di natura chimica che meccanica su roccia. L'evoluzione delle cavità carsiche è dovuta

all'inesco di una serie di crolli gravitativi. Tali crolli portano ad un continuo assottigliamento dello spessore compreso fra il tetto della cavità e la superficie topografica che termina con il crollo della volta nel momento in cui lo spessore della roccia è così esiguo da non poter sorreggere il peso del materiale sovrastante

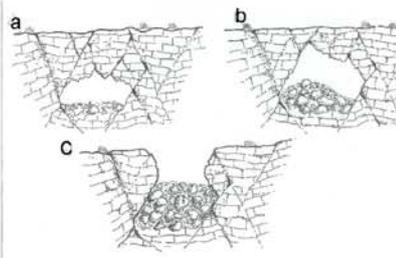
- Dolina alluvionale o *Subsidence sinkhole*. Si forma sui materiali di copertura e/o alluvionali in seguito all'originarsi, nelle rocce solubili sottostanti, di cavità o condotti carsici per processi di dissoluzione sub-superficiali.
- Dolina di subsidenza in roccia o *Rock subsidence sinkhole*. Cavità che si sviluppa su rocce coerenti e permeabili ma non solubili, poggiate su rocce solubili per crollo di volta (Castiglioni, 1986).
- Dolina per crollo della copertura o *Cover collapse sinkhole*. Tale modello prevede la migrazione di particelle di terreno o di altro materiale coesivo appartenente alla copertura detritica posta al di sopra di rocce carbonatiche carsificate. Talvolta le suddette particelle iniziano ad essere drenate, a migrare attraverso le fratture dell'ammasso roccioso, nelle cavità sottostanti (raveling) ed in seguito le acque di falda, prendendo in carico ed allontanando le particelle, consentono la continua progressione del processo erosivo.
- *Piping sinkhole*. Il termine sinkhole in senso stretto va riservato a questa classe. Tali cavità di forma sub-circolare si aprono improvvisamente in terreni di varia granulometria. La loro formazione è strettamente collegata a meccanismi di risalita delle acque e dei gas accompagnati a processi di erosione, di sifonamento, di suffosione profonda dei materiali di copertura fino al collasso finale. I meccanismi di piping e suffosione profonda agirebbero, a lungo termine, sui sedimenti continentali di notevole potenza sfruttando le linee di maggior debolezza (faglie, fratture...). Talvolta è possibile che le cavità superficiali dipendano dalla dissoluzione di alcuni sedimenti, come i travertini, posti a poca profondità dal piano campagna o, più spesso, da processi agenti in un bedrock di notevole profondità.



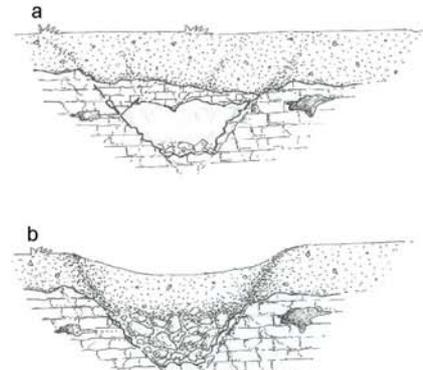
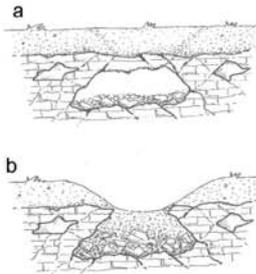
ANTHROPOGENIC SINKHOLE
SPROFONDAMENTO ANTROPICO



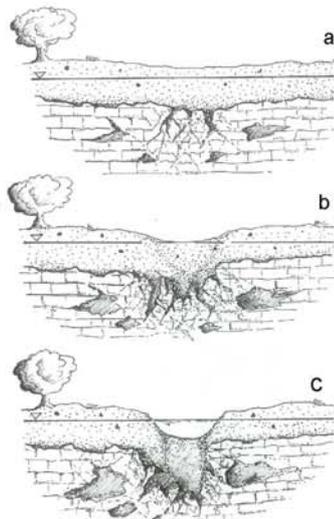
SOLUTION SINKHOLE- DOLINA DI SOLUZIONE NORMALE



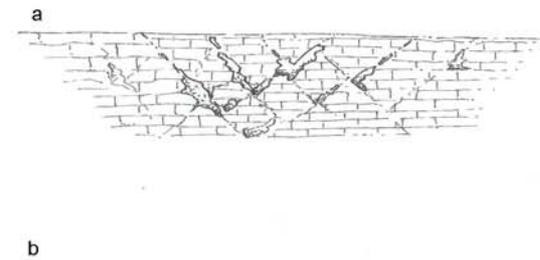
CAVE COLLAPSE SINKHOLE
DOLINA DI CROLLO



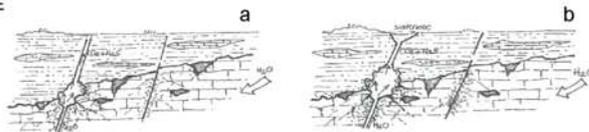
COVER COLLAPSE SINKHOLE
DOLINA PER CROLLO DELLA COPERTURA



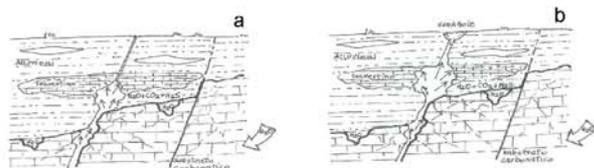
COVER SUBSIDENCE SINKHOLE
DOLINA ALLUVIONALE



ROCK SUBSIDENCE SINKHOLE -DOLINA DI SUBSIDENZA IN ROCCIA



PIPING SINKHOLE



3 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* per la presenza di una serie di laghetti (*Lacus redemprandi*, *Lacus Sapatini*, *Lacus Maiore* ad Aquino, *Lacus de Pobilus*, *Lacus Vitaecaesum*, *Lacus Acquafondata* presso Cardito e *Lo Lago*, a S. Elia, *Le pantane*, presso Cervaro, *Lago di Sotto* presso località Le Cese). Di tali laghi oggi ne ve è più traccia.

La ricerca storica pertanto è stata volta alla possibile ubicazione di tali laghetti e al censimento di possibili cavità subcircolari che potrebbero far ipotizzare episodi di sprofondamento del terreno.

I documenti storici unitamente alla fotointerpretazione hanno così portato all'individuazione di una serie di possibili morfologie di sprofondamento: laghetti, piccole polle, con caratteristica forma sub-circolare, cavità asciutte relitte, che si rinvergono 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 prima area indagata è ubicata presso S. Giorgio al Liri 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 doveva avere dimensioni più grandi in passato, infatti è presente in una mappa storica del 1700 (disegni ad acquerello di Marcello Guglielmelli). Il laghetto presenta emissioni di gas e 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 presente un terzo laghetto ormai con sponde antropizzate e collegato al Liri tramite canale artificiale, la cui origine dovrebbe risalire a 200-300 anni fa (informazioni reperite al Comune di S. Giorgio). 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. Giorno era circolare in origine 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.

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.

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

Toponimo	Ph	Eh	Conducibilità	Temperatura	Bicarbonati
Lago di Acauasanta	7,46	117	327	17	244
Sorgente ferruginosa	7,4	0	370	15	317
Laghetto di S. Giorgio al Liri	7,58	98	372	16	244

Tab. 1: parametri geochimici delle acque nell'area di S. Giorgio al Liri

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 proveniente dai canali.

I dati di sondaggio, nei pressi del laghetto di S. Giorgio, 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 seconda area indagata è la piana di Sora in cui è stato rinvenuto un antico lago oggi ricolmato, il Lago Tremoletto. Il Lago è ubicato nella tenuta del Conte Mancone, l'origine risale ad alcuni secoli addietro (epoca borbonica secondo alcune fonti; il lago era già presente nei primi del 1800) e secondo alcune fonti avvenuta mediante un episodio catastrofico, da cui il nome per la presenza di tremori e boati nel sottosuolo. 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 esso 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 rinvennero sabbioni calcarei e bancate di travertino di spessore complessivo di circa 20 m. I sondatori hanno riscontrato la presenza di vuoti alla profondità di 20-25 m. Il livello di falda si attesta ad una profondità di 40-50 m.



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 e formazione di vulcanelli e fontane di sabbia.

La terza area indagata è la piana di Caira-Cassino, in cui si è manifestato il fenomeno più eclatante e documentato, su cui è stata reperita la maggiore quantità di dati: il lago di Caira, di cui si tratterà più ampiamente in seguito. L'analisi delle foto aeree di tutta l'area ha messo in evidenza altre tre forme sub-circolari ormai obliterate, 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 di 380 m circa.

Il successivo sopralluogo sul terreno presso Masseria Chisavecchio ha evidenziato la presenza di un piccolo lago ormai quasi estinto: la Pescarola (la denominazione antica ricordata dagli abitanti), con diametro attuale di 25-30 m e scarsa profondità. Alcuni gli abitanti affermano che il lago era già presente alla fine dell'1800 con dimensioni molto più grandi ed adibito a

vivaio. Nel 1920 tutta l'area è stata bonificata e molte polle sono state ricolmate. Inoltre, durante il sopralluogo, è emerso che a poca distanza da quest'ultimo era presente un altro laghetto, presso l'area in cui oggi sorge l'ospedale. Per la costruzione dell'ospedale l'area è stata bonificata, ma durante gli scavi si sono verificati eccessivi cedimenti del terreno che hanno portato alla 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 mascherato le presunte cavità.

Nella porzione settentrionale della stessa piana presso S. Elia Fiumerapido, l'analisi fotointerpretativa ha evidenziato la presenza di altre tre paleo-forme, di cui due coincidono sul terreno con polle subcircolari con diametri di 8-10 m (Salaluca e Magnesiaca), sedi di sorgenti di acqua mineralizzata, con abbondanti risalite di gas.

Le portate stimate delle sorgenti sono **di 94l/sec e 68 l/sec** e le conducibilità rispettivamente di 445 ms (nel 1996) e 935 ms, la salinità di 370 e 660 g/cm³. E' stata eseguita la batimetria con ecoscandaglio presso la polla magnesiaca che ha fatto registrare la presenza di una cavità cilindrica, con pareti sub-verticali e profondità di 8 m. Un sondaggio geognostico reperito nelle vicinanze delle due polle mostra la presenza di limi argillosi sino alla profondità di almeno 50m (fondo foro) e di due falde sovrapposte rispettivamente a 24 m e a 49 m, corrispondenti con livelli ciottolosi. Durante il terremoto del 1984 l'acqua proveniente dalla sorgente Magnesiaca ha subito intorpidimento per 3 giorni circa, con risalita di fango.

I dati relativi alla polla magnesiaca sono riportati in tab. 2.

Toponimo	Ph	Eh	Conducibilità	Temperatura	Bicarbonati
Magnesiaca	6,63	164	935	13.05	732

Tab 2: Analisi geochimiche della sorgente Magnesiaca.

In prossimità delle sorgente magnesiaca era presente un'altra cavità circolare, oggi inaccessibile, e secondo alcuni abitanti contenente attualmente acqua.



Dall'analisi delle 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); linea risultata dai rilievi di campagna essere una dislocazione tettonica (*faglia teodicea*, di cui si tratterà di seguito).

L'esame delle mappe storiche d'epoca, inoltre, (reperate presso l'Abbazia di Cassino) ha portato all'individuazione di altri laghetti, oggi scomparsi, di difficile ubicazione: **il primo laghetto di forma circolare, privo di immissario ed emissario, si rinveniva in una piana intermontana, nell'area di Cardito, presso Valle Defensa, il secondo di diametro molto più piccolo nei pressi di Cerasuolo (pozzo Moaslice).**

4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO – STRUTTURALE

L'area in studio ricade nel Lazio meridionale, coincide con le piane 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).

In particolare qui si tratterà più ampiamente del settore corrispondente con il bacino Lirino e alla piana di Caira-Cassino.

Il "bacino lirino" è una piana colmata 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 morfo-strutturale 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

meridionale¹. 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).

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 quella che ne 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 e Montone, 1992). Studi recenti hanno messo in luce l'esistenza di un terzo elemento tettonico di importanza probabilmente "regionale": la *Faglia Teodicea*². Osservazioni geomorfologiche, strutturali e stratigrafiche, accompagnate da indagini geofisiche, suggeriscono una ripartizione del bacino lirino in 2 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 Teodicea, a direzione N10E, potrebbe servire da svincolo fra questi due settori a mobilità diversa e, quindi, non si possono escludere movimenti trascorrenti lungo la stessa. I

¹ Tale settore si sviluppa nel contesto di strutturazione ed evoluzione dell'Appennino Centrale (Praturlon, 1975; 1993), nella fase di raccorciamento guidata dal processo di propagazione a vergenza adriatica del sistema catenavanfossa-avanpaese (iniziato nel Miocene superiore) e viene definitivamente costituito dalla successiva azione della tettonica estensionale. La Valle Latina, di cui il Bacino Lirino costituisce il lembo sud-orientale, può essere considerata il corrispondente interno (adiacente al margine tirrenico) delle conche intermontane che interessano diffusamente la catena appenninica. Tra queste ricordiamo la Conca del Fucino, il bacino di Colfiorito (D'Agostino et alii, 2001) e quelli di Sulmona, Rieti, L'Aquila e Sora.

² Dalla correlazione dei profili geologici messi a disposizione dalla TAV e dal Comune di Cassino con i dati di rilevamento è possibile, inoltre, supporre l'esistenza di una faglia, non conosciuta in letteratura, ad andamento antiappenninico. Dall'allineamento di diversi punti (A, B, C e D) è stato, infatti, individuato un elemento strutturale N 7° che interessa il Bacino Lirino s.s. Sulla base topografica in scala 1:100000 (Foglio 160 Cassino) sono stati riportati i punti in cui la faglia è stata incontrata e/o misurata. Nel punto A, proveniente dal profilo geologico effettuato dalla TAV, si nota una separazione stratigrafica lungo tale elemento che vede in contatto i termini inferiori della *Facies Lacustre Normale* (ad Ovest) con quelli superiori più recenti e ricchi in livelli piroclastici della stessa (ad Est). Il punto B viene preso dal profilo effettuato dalla GEOLAB, presente nella relazione geologica integrativa (29-09-1998), per la costruzione di un parcheggio nel Comune di Cassino. Il punto C è quello in cui è stato effettuato il rilevamento mesostrutturale, da cui emerge la geometria della faglia orientata N 7° ed immergente ad Est di 73° circa.

Il punto D individua il luogo in cui nel 1974 si è impostato il sinkhole che ha portato alla formazione del Lago di Cairi. Ricordiamo anche l'allineamento, lungo lo stesso elemento, delle sorgenti del Gari. Altre evidenze di terreno confermano l'esistenza di questo elemento strutturale.

settori orientali in prossimità del Fiume Gari iniziano ad essere ribassati, rispetto a quelli occidentali, dall'attività del sistema NNE più giovane rispetto a quello WNW / NW.

A tal proposito bisogna ricordare che l'attività della faglia N10E potrebbe interrompere la "Faglia della Marsica" rendendone attualmente attiva solo la terminazione meridionale, ovvero la struttura Atina - Monte Maggiore.

A testimonianza dell'attività recente di questo settore³ ricordiamo i dati forniti dalla sismicità strumentale, fra cui l'evento del 21 Giugno 1994 che ricade proprio in prossimità della faglia NNE.

La piana di Caira s.s. a Nord-Est è delimitata dalla faglia della Marsica che interessa i monti di Venafro e Monte Cifalco, ad Ovest dalla faglia Teodicea (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 riempiono la Valle Latina. Questo forte controllo tettonico e l'intensità delle deformazioni fragili ad esso associate hanno provocato un'intensa disarticolazione del substrato carbonatico. 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.

4.1 Stratigrafia

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 alii, 1988). Le formazioni che costituiscono le strutture calcaree in questione vanno dal Giurassico inf. al Cretacico sup. (Catenacci e Molinari, 1965). Il Gruppo di M. Cairo è composto da calcari micritici con intercalazioni detritiche ed alternanze dolomitiche (Accordi et alii, 1967; Cavinato e Sirna, 1988; Parotto e Praturlon, 1975).

I sedimenti depositi alla fine del Cretacico sono costituiti prevalentemente da calcareniti e breccie derivanti dallo smantellamento delle sequenze mesozoiche affioranti.

³ Attualmente dall'analisi delle soluzioni focali, in particolar modo dall'orientazione dei loro assi T, quasi tutti suborizzontali, si può osservare come l'intera area è caratterizzata da un regime deformativo di tipo estensionale nel quale la direzione di estensione è antiappenninica.

Prima della trasgressione miocenica rappresentata da sedimenti calcareo-marnosi (sempre più arricchiti, verso l'alto della sequenza, nella componente argillosa) è presente una lacuna stratigrafica (Damiani, 1984) che interessa quasi tutta l'area.

I litotipi del Miocene inferiore indicano un ambiente distale in cui erano già abbondanti gli apporti terrigeni che diventeranno predominanti nell'alto Miocene.

Al di sopra dei depositi marini e continentali, già morfologicamente modellati, di età plio-pleistocenica poggiano i sedimenti lacustri lirini. L'intera sequenza stratigrafica lacustre a tutt'oggi non è ancora conosciuta; generalmente le si attribuisce uno spessore complessivo di cento metri circa. Dal punto di vista stratigrafico il Devoto 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.

Il Limo Lacustre Inferiore presenta una grande uniformità del materiale sedimentario sempre a giacitura orizzontale, è composto da limi calcarei molto puri ad alto tenore in CaCO_3 (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 Normale⁴ è la più rappresentativa dei depositi lacustri lirini, 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 CaCO_3 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 oscillazioni delle percentuali di sabbia e di argilla nei singoli strati.

La deposizione del Travertino Tipico (che affiora solo in alcuni punti della Piana) 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).

⁴ Il limite inferiore di questa facies coincide con quello superiore del Limo Lacustre Inferiore ed è importante mettere in evidenza come, detto limite, tra Pignataro Interamna e S. Angelo in Theodice scenda improvvisamente a un valore prossimo ai quaranta metri forse a causa dell'attività della Faglia Teodicea.

La disposizione delle sorgenti non è casuale ma ricalca l'andamento dei principali sistemi di faglie che hanno interessato e, forse, interessano quest'area. Uno allineato NW-SE a cui sono collegate le placche di travertino presenti fra Aquino – 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 Theodice. Benché le bancate di travertino si ritrovino in maniera frammentaria in tutta l'area si è ipotizzata l'esistenza, su base morfologica e deduttiva⁵, di un solo grande affioramento il cui spessore raggiunge i 18m.

Di norma i Travertini Tipici seguono o sono incassati nei sedimenti lacustri del Lago Lirino mentre, lungo il margine nordorientale, poggiano sulla sequenza carbonatica della piattaforma laziale – abruzzese. In quest'ultimo caso la superficie di contatto è nascosta da terre rosse, inglobanti sparsi detriti litoidi irregolari, dovute all'alterazione dello stesso (travertino). 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. Non manca, sul muschio, la tipica struttura a bande e festoni.

Al di sopra dei sedimenti lacustri abbiamo, 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 l'area di Cassino, ricordando comunque che la profondità del substrato carbonatico oscilla notevolmente fra il piano campagna ed i 150 m:

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

⁵ Dalle immagini satellitari si nota una vasta superficie peneplanata, durante l'aratura affiorano grandi blocchi di travertino, nei pozzi scavati, anche poco profondi, le pareti nella parte sommitale sono di travertino ed inoltre una vasta area è coperta da terre rosse.

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

4.2 Caratteristiche geotecniche dei terreni di copertura

Le analisi di due campioni (C1 a 26 m dal p.c e C2 46 m a cura del Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano) 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 di importanza 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 entrambe 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 dalle prove edometriche.

5 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

5.1 Ricostruzione paleogeografica dell'area

Nel Pliocene la porzione sud-orientale dell'odierna Valle Latina era interessata da una sedimentazione caratteristica di ambiente marino costiero (Carrara et alii, 1995) e doveva presentarsi come un golfo aperto in direzione ESE fino al Pliocene medio-superiore, (Compagnia Mediterranea Prospezioni, 1975). Durante la fase regressiva le acque lasciarono definitivamente l'area compresa fra le dorsali carbonatiche (Catenacci e Manganeli, 1975). 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 (Carrara et alii, 1995). L'inizio dell'attività del Roccamonfina 630 Ka (Ballini et alii, 1989; De Rita e Giordano, 1996; Bosi e Giordano, 1997), causò un progressivo aumento delle quote

topografiche, insieme alla contemporanea costruzione dell'edificio vulcanico, che ben presto sbarrò il corso del Garigliano confinandolo all'interno della Valle Latina. Nel Pleistocene medio iniziò la raccolta delle acque del Lago Lirino (Devoto, 1965; Trevisan e Giglia 1978). L'attività dei Colli Albani con la deposizione della seconda colata piroclastica del Tuscolano-Artemisio, fra i 525 ed i 487 Ka (Bernardi et alii, 1982) provoca l'inversione del corso del Paleo-Sacco (De Rita et alii, 1992) di conseguenza, il lago lirino rappresenterà il recapito dei sedimenti portati in carico dal Sacco, dal Liri, dal Melfa, dal Gari e dal Rapido. 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 e 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. Le alluvioni antiche della bassa Valle Latina sono dovute principalmente alle esondazioni del Liri e del Melfa (miocene med./sup.-Pliocene) e si estendono fino alla confluenza del Liri con il Gari (Devoto, 1965).

La Valle Latina ospita, attualmente, depositi alluvionali terrazzati di cui quelli del III, IV e V ordine sono incassati nei sedimenti lacustri del Lago Lirino (Devoto, 1965; Carrara, 1991).

L'ultimo ordine di terrazzi, post-würmiano, si situa a pochi metri dall'attuale letto del Liri. Il corpo sedimentario fluvio-lacustre è ricoperto dall'ignimbrite campana datata a 35 ka.

5.2 Geomorfologia

Lo studio geomorfologico nella piana lirica s.s. e nella conca di Cassino - S. Elia Fiume Rapido- Cervaro è stato condotto, in fase preliminare, mediante la fotointerpretazione multi scalare e multi temporale e, ove necessario, mediante il sopralluogo diretto in aree di interesse.

La zona in studio può rientrare nella definizione di bacino intermontano; si tratta di una vasta piana di origine tettonica colmata da depositi lacustri e alluvionali orlata, nel margine

settentrionale, da piccole conche intermontane la cui genesi è strettamente collegata alla presenza ed 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 la cui distribuzione sembra ricalcare l'andamento delle faglie principali.

All'interno della conca si individuano numerose conoidi detritiche di notevoli dimensioni disposte prevalentemente lungo la faglia della Marsica e, subordinatamente, lungo la faglia Teodicea (in località Caira). Anche il reticolo idrografico e la distribuzione delle sorgenti risente del controllo tettonico.

E' evidente in quest'area la rettizzazione 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 Teodicea.

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 rettizzazione NW-SE, preceduta da una "cattura a gomito", del loro corso.

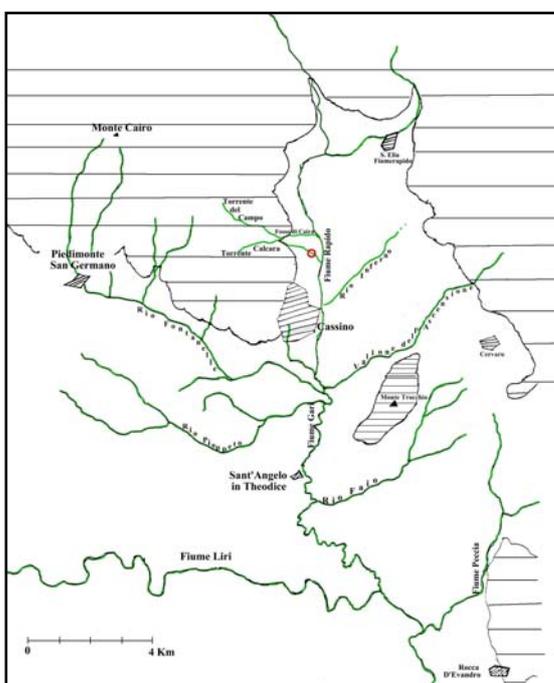
Questi indizi, associati alla constatazione che tale direttrice funge anche da spartiacque fra il settore Nordorientale e quello Sudoccidentale, fanno pensare alla presenza di una faglia sepolta, sismicamente attiva, avente la medesima orientazione. In effetti le aste dei primi ordini, essendo le più "giovani" non sono controllate dalle "vecchie direttrici tettoniche" ma da quelle recenti e/o attuali (L. Palmieri et alii, 2001).

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

6 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO:

Come emerso dalla ricostruzione paleogeografica l'attuale reticolo idrografico si è impostato a partire da 250-230 ka sui sedimenti lacustri del Lago Lirino. Le aste principali dell'attuale reticolo idrografico sono costituite dal Fiume Liri, dal Fiume Gari, con il Rapido suo affluente, e dal Fiume Peccia che alimentano insieme le acque del Fiume Garigliano.

Date le caratteristiche della copertura quaternaria, la rete di drenaggio superficiale si è sviluppata tramite l'impostarsi di numerosissimi corsi d'acqua a carattere sia effimero, sia stagionale che perpetuo.



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.

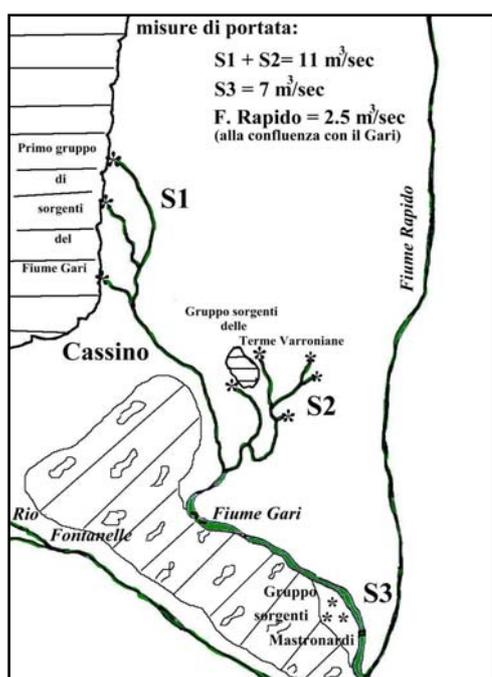
A Sud della linea del Cosa sono presenti altri due punti di sfioro della falda che costituiscono rispettivamente le sorgenti di Capodacqua d'Aquino e Bucone. Le prime sono legate alla discontinuità tettonica della Valle del Melfa e le

altre 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 profonda 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, quello delle Terme Varroniane ed in ultimo quello Mastronardi con valori di portata cumulati pari a 18m³/sec. Queste generano il Fiume Gari e ne incrementano via via le portate. L'area di conca intermontana è attraversata dal Fiume Rapido (2.5m³/sec) nelle cui acque vanno a confluire i torrenti che attraversano il territorio di 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.

6.1 Le sorgenti dell'area, chimismo delle acque

Numerose e con elevata portata sono le sorgenti presenti nel territorio di Cassino (s.l.). Durante il corso della storia esse hanno subito variazioni per numero, ubicazione e chimismo. Attualmente, fatta eccezione per il pozzo di Sant'Onofrio, non c'è più traccia di sorgenti minerali la cui presenza ed azione massiva nei tempi passati è testimoniata litologicamente dalle bancate di travertino, che occupano gran parte della piana, e documentata da numerose fonti storiche e bibliografiche. La maggior parte delle sorgenti minerali sgorgavano 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 qui vi erano due polle una d'acqua sulfurea e l'altra ferruginosa con temperatura di 15°C (Sacchetti 1920). Queste polle minerali rappresentavano i resti di una serie più numerosa che fino al secolo decimo ottavo andava alimentando il ramo del Fiume Rapido (Gattola) fra cui ricordiamo le due sorgenti presenti nei pressi del lago di Caira come mostrato in figura. Non si contava il numero delle sorgenti d'acqua dolce, si pensi che nel 1902 il Dott. O. Del Foco ne elenca più di quaranta per il solo centro abitato. La distribuzione di queste sorgenti non è casuale ma si allinea lungo direttrici tettoniche ben precise. Quelle

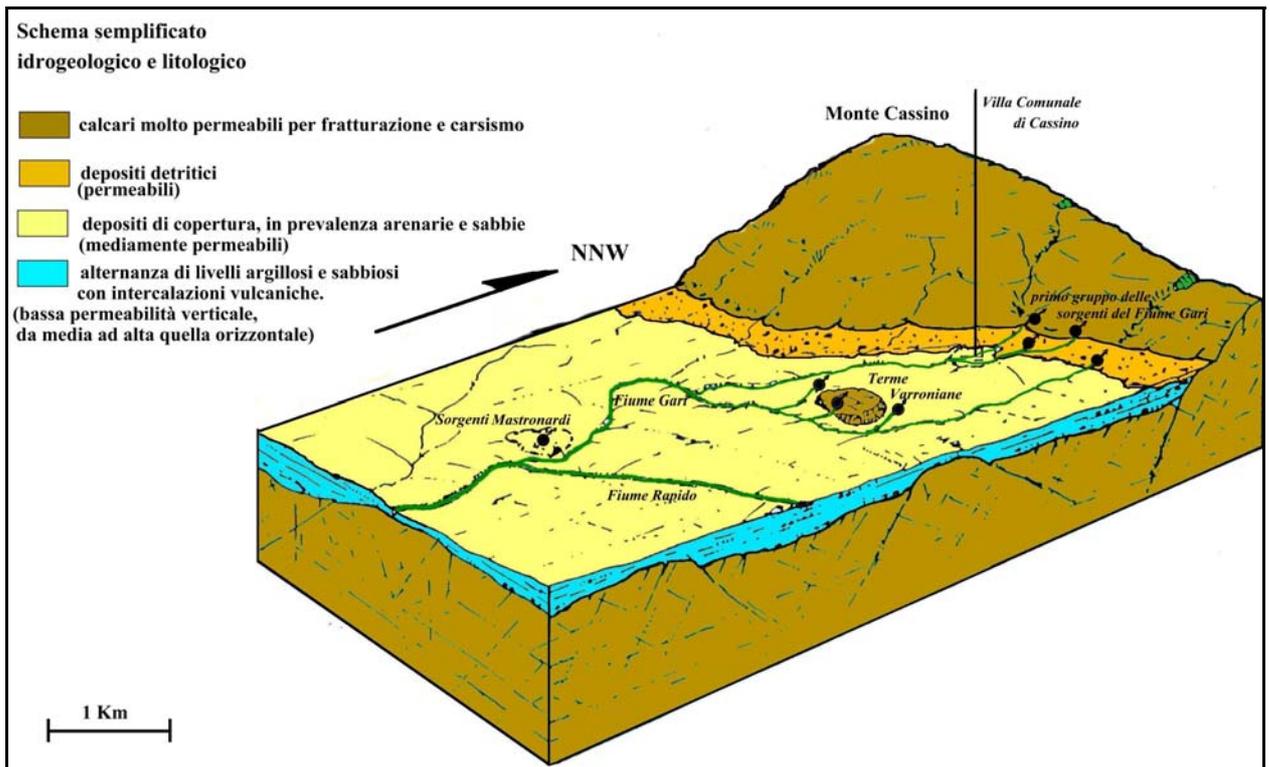
sulfuree, Gattola (19...) si disponevano lungo il corso del Rapido (dove lo stesso assumeva ed assume un andamento circa NS) e seguivano la Faglia Teodicea. Devoto (1965) descrive l'attività di sorgenti fortemente incrostanti ad elevato tenore in Ca⁺⁺ e Mg⁺⁺ (ad esempio quelle di Capo d'Acqua) la cui disposizione ricalca l'andamento dei principali sistemi di faglie: il primo ad andamento NW-SE a cui sono collegate le placche di travertino presenti fra

Aquino – 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 Theodice.

Un'ultima annotazione riguarda la migrazione delle sorgenti sulfuree che man mano si sono spostate dai settori SW (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 Caira di almeno cinquanta metri, e da oscillazioni continue del livello di falda. Oltre alle cause naturali ricordiamo che quest'area è sottoposta a continui emungimenti per portate "dichiarate" di $3\text{m}^3/\text{sec}$.

Tale captazione di acque sotterranee, in un'area prossima alla confluenza del Rapido con il Gari, aveva avuto approvazione per portate di $6\text{m}^3/\text{sec}$. Fra l'Agosto del 1986 ed il Settembre dell'87, a seguito dell'emungimento di $1,5\text{m}^3/\text{sec}$ si registrarono nel territorio di Cassino continui "assestamenti" accompagnati da tremori, alcune sorgenti si estinsero, altre diminuirono notevolmente le loro portate ma, cosa più grave, si verificò la subsidenza di una vasta area e vennero denunciate lesioni a diversi manufatti. Mediante perizie tecniche e studi congiunti la Procura della Repubblica di Cassino dichiarò che per portate pari a $3\text{m}^3/\text{sec}$ non ci sarebbero stati risentimenti o rischi significativi per il territorio e questo per la condizione geologico strutturale ed i parametri geotecnici dei terreni analizzati⁶.

⁶ Benchè, durante le sperimentazioni di prova, si è visto che per prelievi dell'ordine di 1600 litri/sec sono state registrate nei piezometri depressioni comprese fra i 25 ed i 50cm per un raggio di influenza di 1000m a nord del Campo-pozzi interessando così, gran parte della città.



6.2 Falde

Data la sequenza stratigrafica dei sedimenti di copertura caratterizzati dall'alternanza di orizzonti praticamente impermeabili (orizzonti di argille o limo argilloso) con altri a media/alta permeabilità (sabbie grossolane e ghiaie) si rinvengono in essi falde sovrapposte (riscontrate a 25 m e a 40 m di profondità) negli strati a buona permeabilità orizzontale.

La stessa successione, 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 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.

Altra possibilità di contatto fra la falda profonda e quella superficiale è generata dalla presenza di importanti dislocazioni tettoniche (come ad es. la *faglia Teodicea*) nel substrato accompagnate da un reticolo di piccole fratture o diaclasi che, appunto, mettano in comunicazione il mezzo permeabile con quello impermeabile.

7 IL LAGO DI CAIRA

7.1 Cassino e la “storica” instabilità geologica

Nella zona di Montecassino si sono sempre verificati, e ancor oggi si manifestano, fenomeni particolari che turbavano molto sia gli abitanti dell’antica San Germano che i Monaci della Badia. Questi, non sapendo dare loro una spiegazione, si limitarono a riportarne fedelmente la descrizione non cessando di chiedere l’intervento di esperti per quelli che, tutt’ora, vengono chiamati (dai residenti) i terremoti “locali” di Montecassino.

I Monaci cassinensi di tutti i tempi hanno avuto cura di registrare in molti codici i principali fatti giornalieri ed anche i movimenti tellurici che, con molta frequenza, venivano a turbare la tranquillità della Badia.

La cronistoria sismica di Montecassino comincia dal 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”*. È utile ricordare che i Monaci con grande assiduità chiesero al Re di Napoli, Ferdinando II di Borbone, di far studiare da un bravo geologo del Regno le cause dei troppo frequenti terremoti di Montecassino ai quali si associava, di sovente, un odore di zolfo che si sentiva specialmente nelle grotte (località Sant’Onofrio ed Albaneta mentre era inavvertito nella roccia adiacente al Burrone dell’Eremita) ai piedi della montagna dopo una violenta scossa di terremoto. Il Re, nel 1837, mandò Leopoldo Pilla che, ponendo mente al fatto che il più delle volte i terremoti sempre sussultori ed accompagnati da fragorosi rumori *“che per entro alle viscere (del monte) eransi fatti udire”*, rimanevano circoscritti a Montecassino, non tardò ad ascriverli a cause “locali” ma, risentendo delle correnti di pensiero dell’epoca, li ascrisse a cause elettriche.

Gennaro De Marco, 1888, riscontrando la notevole frequenza dei terremoti della “montagnuola di Cassino” ne fa oggetto di studio sottolineando che il più delle volte la scossa, sussultoria, è preceduta da “un gran tonfo, come se un masso enorme cadesse dall’alto nel fondo del fabbricato” e, rigettando la teoria del Pilla, arriva alla conclusione che tali

scosse, a carattere locale, sono imputabili all'azione distruttrice delle acque sotterranee che favoriscono frane profonde.

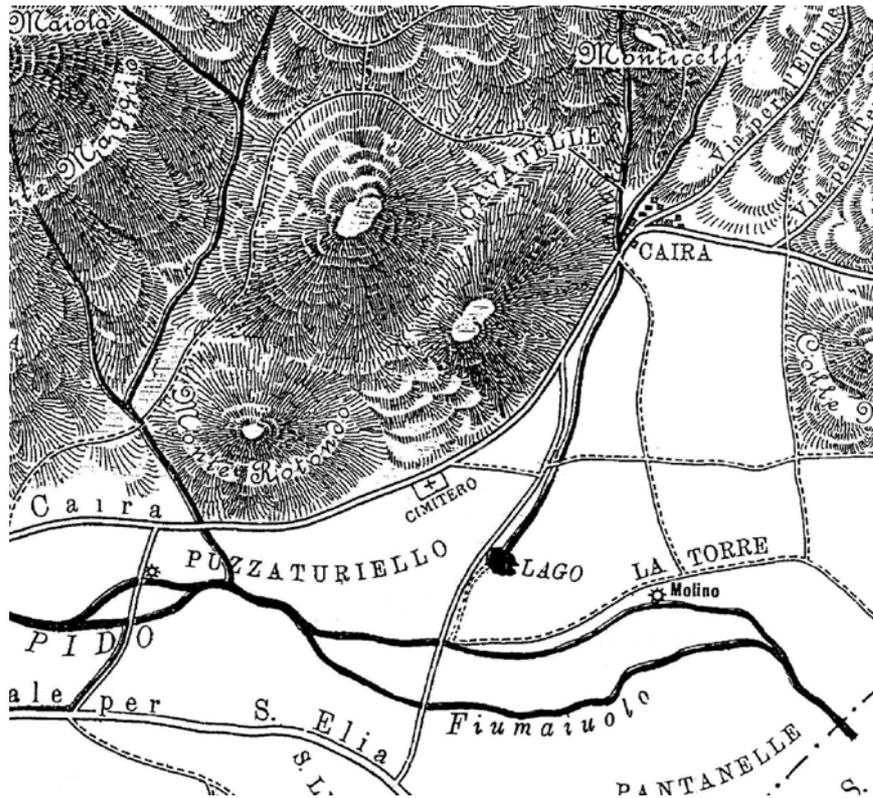
Da parte sua, Sacchetti, dopo aver assodato che Montecassino è un centro sismico a sé, sostenne la tesi di De Marco ed imputò a frane profonde la causa dei sismi riportando, a supporto della stessa, il “terremoto” che nel 1724 si verificò “al paesello di Cairo (l'attuale Caira)”.

Precisando che non si trattò di una vera e propria scossa sismica, infatti né nel catalogo dei grandi terremoti, né in quello parametrico si fa riferimento a queste date, riportiamo ciò che De Marco descriveva alla fine dell'Ottocento.

Il 19-09-1724 grave scossa con replica forte il 23 seguente. Il 26 ottobre forte terremoto con replica anche forte il 28 dello stesso mese (De Marco, 1888). Oltre a questi eventi, nel Giornale cassinese e nella Storia di Montecassino del Gattola, viene riportato che la notte fra il 18 ed il 19 febbraio dello stesso anno nel luogo, ove è ora, chi scrive vive nel 1734, il Lago di Cairo, un rumore fortissimo si intese ed i contadini che abitavano nei dintorni, come se un grande terremoto fosse accaduto, abbandonando le loro case fuggirono.

Al mattino si accorsero che una zona di circa quindicimila metri quadrati era sprofondata creando una voragine la quale, nel punto più profondo, raggiungeva i ventitre metri. Un'altra “fossa” si aprì sempre alle pendici orientali di Monte Cairo e la tradizione afferma che in determinati periodi si sentivano dei rumori, come lamenti, provenire dalla stessa e le persone del luogo iniziarono a buttare frutti all'interno della fenditura. Dopo un po' di tempo si accorsero che i frutti lanciati nella voragine le sere precedenti venivano ritrovati al fianco dell'attuale Chiesa Madre nell'abitato di Cassino.

Ancora oggi i Monaci dell'Abbazia e gli abitanti di Cassino, periodicamente, avvertono gli stessi tremori, accompagnati da boati e tonfi profondi. Tali episodi sono in definitiva da ricollegare ai fenomeni carsici presenti sulla dorsale di Monte Cairo che portano alla formazione di doline di crollo e allargamento di cavità sotterranee: le indicazioni lasciano pensare che il processo è molto spinto ed è ancora in atto .



7.2 Ubicazione e contesto geologico del "Lago di Caira"

L'antico Lago di Caira (esistito dal 1724 al 1902-4), attualmente estinto e trasformato in vivaio della forestale, è ubicato a valle dell'abitato di Caira, frazione di Cassino. Si colloca quasi alla confluenza fra il Torrente Calcara ed il Fiume Rapido sul limite morfologico della conoide di versante sulla quale si è sviluppato il paese.

La successione stratigrafica dell'area, come rilevato da pozzi e sondaggi geoelettrici, varia procedendo da monte verso valle. Nella zona di conoide al di là della fascia pedogenizzata (da pochi metri ad alcune decine di terre rosse) si hanno spessori considerevoli, cento metri circa, di detriti di falda in contatto diretto con il substrato carbonatico.

Scendendo più a valle, nella zona di piana, i pozzi n.1 e n.2, che sono quelli più prossimi al paleolago-mostrano la presenza di un'alternanza di argille, limi argillosi con ciottoli calcarei e ciottolame il tutto al di sopra di un substrato carbonatico ubicato intorno ad i settanta metri di profondità dal piano campagna.

Questo tipo di stratificazione fa sì che mentre la permeabilità verticale abbia valori bassi quella orizzontale acquisti valori elevati negli strati più ciottolosi.



Da qui deriva la possibilità di trovare nella copertura detritica diversi livelli di falda e che la stessa possa funzionare da “tappo” per la falda profonda presente nei calcari, resi permeabili per fratturazione e carsismo.

7.3 Il Lago di Caira: ricostruzione storica

Lo sprofondamento che diede origine al Lago di Caira viene riportato in letteratura da numerose fonti che fanno, comunque, tutte capo alle notizie riportate dal “Giornale Cassinese” e successivamente raccolte nelle “Historiae” del Gattola. In queste fonti si ritrova la seguente descrizione (in latino): *In questo anno 1724, non lontano da Caira nella notte fra il 18 e 19 febbraio 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.* 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 del Baratta (1901): *“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 intorbidavano, probabilmente per l'afflusso di sorgenti sulfuree⁷, 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 al G. 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*

⁷ Nella località di Sant'Onofrio, a pochi passi dall'Abbazia, c'era, fra tutti i pozzi di Cassino (che non sono pochi), un unico pozzo ad acqua sulfurea. La provenienza dell'idrogeno solforato è strettamente collegata all'esistenza del Roccamonfina ed infatti lungo tutta la valle del Garigliano attualmente (scrive il Sacchetti, 1920) si rilevano non poche sorgenti minerali e specialmente sulfuree. Le sorgenti minerali di Suio non sono le sole vene che si trovano nel territorio di Cassino e precisamente nella località Fontanelle tra il Colosseo e la Cappella di Santa Scolastica, si tratta di due polle d'acqua a breve distanza fra loro: una di acqua sulfurea e l'altra di acqua ferruginosa alla temperatura di 15°C. Le due polle minerali di Cassino rappresentano i resti di una serie che fino al principio del secolo decimo ottavo, come si legge nel Gattola in “Storia della Badia di Montecassino”, andavano ad alimentare, in vari corsi, il ramo del Rapido e popolavano le radici di Montecassino.

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 solfuree presenti a quell'epoca nell'area ma è altresì noto che la loro provenienza era collegata 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 fosse tale da generare un "tappo" impermeabile sul fondo dello stesso, capace di impedire l'interscambio delle acque, che veniva "rimosso" all'aumentare della pressione della falda sottostante. (questo spiegherebbe l'intorbidimento delle acque associato all'immissione di acque solfuree nel lago). Comunque questo fenomeno lascia aperta l'ipotesi di una via di collegamento fra la falda profonda, presente nei calcari, e le acque del lago; tale percorso potrebbe essere stato anche sede di un continuo flusso particellare. Tale migrazione di particelle detritiche spiegherebbe anche come mai, nonostante il continuo apporto di materiale detritico da parte dei due torrenti e il progressivo svasamento dei bordi, il lago sia sopravvissuto centoottanta anni senza esserne colmato del tutto.

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 la natura intervenne in sua vece, e come lo aveva creato, così in una notte lo fece scomparire. Il lago si prosciugò e, nel corso degli anni, i vari torrenti che lo alimentavano lo riempirono di detriti.

7.4 La geometria iniziale della forma e sua evoluzione nel tempo.

In non poche difficoltà ci si imbatte per determinare le dimensioni iniziali dello sprofondamento che diede origine al lago di Caira. Prima fra tutte la "discordanza" delle fonti, l'incongruenza interna di alcune di esse e la parzialità e/o incompletezza dei dati forniti da altre.

Per ricostruire la geometria iniziale della voragine apertasi nei possedimenti di Monte Cassino in località Caira nel 1724 bisogna, comunque, partire dalle notizie riportate dal “Giornale Cassinese” e successivamente raccolte nelle “Historiae” del Gattola come visto nel paragrafo precedente. Da queste si evincono le seguenti indicazioni: a) sprofondati otto tomoli di terreno ciascuno, di 900 ”avambracci/cubiti napoletani” di otto “palmi” b) perimetro della voragine 275 avambracci/cubiti napoletani; c) asse est-ovest 124 (?) e nord-sud 139 (?)

Volendo ricavare le dimensioni della forma in base a quanto detto si incontrano immediatamente due problemi:

1. le unità di misura adottate non solo non sono attualmente in uso ma è anche difficile attribuirvi un valore preciso;
2. nel riportare le dimensioni degli assi non è stata indicata l’unità di misura utilizzata che, per vincoli geometrici, non può essere l’ultima citata.

Altri autori si sono imbattuti in questa situazione ma, data la diversa specificità del loro lavoro, hanno potuto direttamente evitare di riportare tutte le dimensioni, altri che vi hanno provato non si sono preoccupati di verificare la congruenza dei loro dati.

Per accertare le reali dimensioni del lago sono state consultate fonti storiche, enciclopedie del lessico italiano e testi latini, per trovare una corrispondenza in centimetri dei “palmi”, “avambracci” e “tomoli” e, convertiti i dati delle fonti nell’unità di misura adottate nel nostro sistema di riferimento. Si è verificata la veridicità del dato mediante il confronto fra misura empirica e sperimentale del perimetro della voragine. Tale espediente è stato, inoltre, utilizzato come indice dell’attendibilità dei valori riportati in ogni testo consultato (storico e/o attuale). Ossia, se la discrepanza, lo scarto, fra il dato sperimentale e quello empirico era tale da non poter essere giustificato con l’andamento irregolare proprio di geometrie “naturali” le dimensioni ivi indicate venivano considerate non valide.

Applicando una formula approssimativa del perimetro dell’ellisse ($P=2\pi[(a^2+b^2)/2]^{1/2}$) si vede che il valore dei due assi è espresso con un’unità di misura diversa da quella del perimetro. Infatti, se i due assi fossero stati espressi in avambracci come indicato per il perimetro, applicando la precedente il risultato dovrebbe essere confrontabile con il valore misurato.

Essendo “a” il semiasse maggiore e “b” il minore, si ottiene:

$$P=2\pi[(69,5^2+62^2)/2]^{1/2}=413,79$$

$$a=139/2=69,5$$

$$b=124/2=62$$

misura questa incompatibile con i “275 avambracci napoletani”, pur volendo considerare un aumento del perimetro dovuto all’andamento irregolare dell’orlo della voragine.

Si è proceduto, quindi, cercando di verificare se fossero stati espressi in palmi napoletani e, soprattutto, convertire gli stessi e gli “ulnae” in centimetri. Consultando l’enciclopedia del “Lessico universale Italiano” (Treccani, Roma 1970) risulta che i palmi assumevano valori compresi tra i 20 e i 30cm in base al territorio di riferimento. A quelli napoletani viene riconosciuto un valore standard pari a 26,4cm. Nel dizionario della lingua latina gli “ulnae”, indicati come cubiti, trovano corrispondenza con i nostri cm45. Confrontando questo valore con quelli indicati nell’enciclopedia e tenendo in considerazione il periodo in questione, essi possono essere ricondotti ai cubiti Attici e Romani ai quali viene attribuito un valore di 44,4cm.

Abbiamo quindi l’asse maggiore di 3670 cm (139 palmi napoletani equivalenti a centimetri 139·26,4), il minore di 3274 cm (124 palmi napoletani equivalenti a centimetri 124·26,4) ed il perimetro di 12210 cm (275 cubiti napoletani equivalenti a centimetri 275·44,4). Segue che:

$$P=2\pi[(1835^2 \cdot 1637^2)/2]^{1/2}=10920\text{cm}$$

$$a=3670/2=1835$$

$$b=3274/2=1637$$

lo scarto nettamente inferiore (12,9m) fra il perimetro misurato e quello calcolato sperimentalmente accerta che gli assi sono espressi in palmi napoletani.

Tenendo conto che la proporzione fra gli assi deve rimanere costante e che il perimetro è un dato empirico, abbiamo gli elementi necessari per impostare il seguente sistema ($124:139=x:y$ e $12210=2 \pi \cdot ((x^2 \cdot y^2)/2)^{1/2}$) da cui si ottiene che il semiasse E-W è di 18.5m, quello N-S di 20,5m.

Secondo il nostro procedimento il lago di Caira, al momento della sua formazione, aveva l’asse maggiore di 41m, il minore di 37m, il perimetro di 122,1m, una profondità di 23,7m (90 palmi napoletani equivalenti a centimetri 90·26,4) ed un’area di 310m².

Saragosa (1998) aveva indicato una circonferenza di 550m e diametri di 250m e 280m ma questi dati non trovano corrispondenza tra di loro.⁸

⁸ Riportiamo il testo: l’anno 1724, la notte fra il 18 e 19 febbraio, alle ore 10, una zona di circa 15000m² sprofondò... il terreno era seminato a grano ed era di proprietà di tale Francesco Pollastrella, in parte del monastero di Santa Scolastica e del seminario Cassinese, ed in parte del Regio Demanio. La legenda narra che alcuni contadini nel giorno di Sant’Anna preferirono tagliare il grano bevendo e cantando. La Santa li punì l’anno successivo, facendo sprofondare il luogo e facendo crollare una casa che seppellì alcuni spergiuri. ... Si

Misure effettive sulle dimensioni reali del lago risalgono al 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.

A Del Foco (1902) va il merito di aver riprodotto l'unica cartina del lago a noi pervenuta (vedi Figura). Sulla sezione IGM al 10.000 il diametro attuale della paleoforma è di 170 m.

8 SISMICITÀ

8.1 Sismicità storica

L'area in esame, in base alle fonti storiche disponibili, è stata colpita da diversi sismi di forte intensità. Dalle informazioni sul risentimento sismico è possibile ricostruire le isosisme contenenti i punti quotati in base ai diversi gradi della scala Mercalli-Cancani- Sieberg (MCS) dell'intensità macrosismica. Da tali informazioni si deduce che gli eventi sismici più forti che colpiscono quest'area dell'Italia centrale si concentrano lungo l'asse appenninico caratterizzato dai rilievi più alti della catena. In particolare nella zona del Basso Lazio e nelle aree limitrofe gli eventi forti sono localizzati nelle regioni montuose al confine con l'Abruzzo ed il Molise e nei Monti del Matese al confine tra Campania e Molise. L'area costiera lungo il Mar Tirreno invece non è interessata da eventi di forte intensità. In particolare la zona compresa fra la Valle Latina e la terminazione nordorientale della stessa (ossia da Sora al Vulcano di Roccamonfina) appare decisamente più attiva soprattutto per l'elevata frequenza degli eventi registrati. Tra gli eventi della sismicità storica dell'area spicca quello del 9 Settembre del 1349 che colpì il Cassinese ed il territorio di Isernia. In base alla revisione fatta di questo evento per il Catalogo dei forti terremoti (Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980, Ist. Naz. di Geofisica e Storia Geofisica e Ambiente, 1995) le località che hanno avuto un risentimento del X grado sono: Atina (FR), Cerreto Sannita (BN), Sant'Elia

era formata una voragine, che nel punto più profondo raggiungeva i 23m. ...La circonferenza del lago fu calcolata in 275bracci napoletani, dunque circa 550m, mentre il diametro da est verso ovest risultò di 124bracci, quindi m250, e trasversalmente misurò 139bracci, cioè m280.

Fiumerapido (FR) e Venafro (IS); Il risentimento a Montecassino (FR) e Cassino (FR) è stato del IX grado. Ciò indica che l'area che è stata maggiormente colpita è assai estesa ed in particolare allungata lungo la direzione NW-SE.

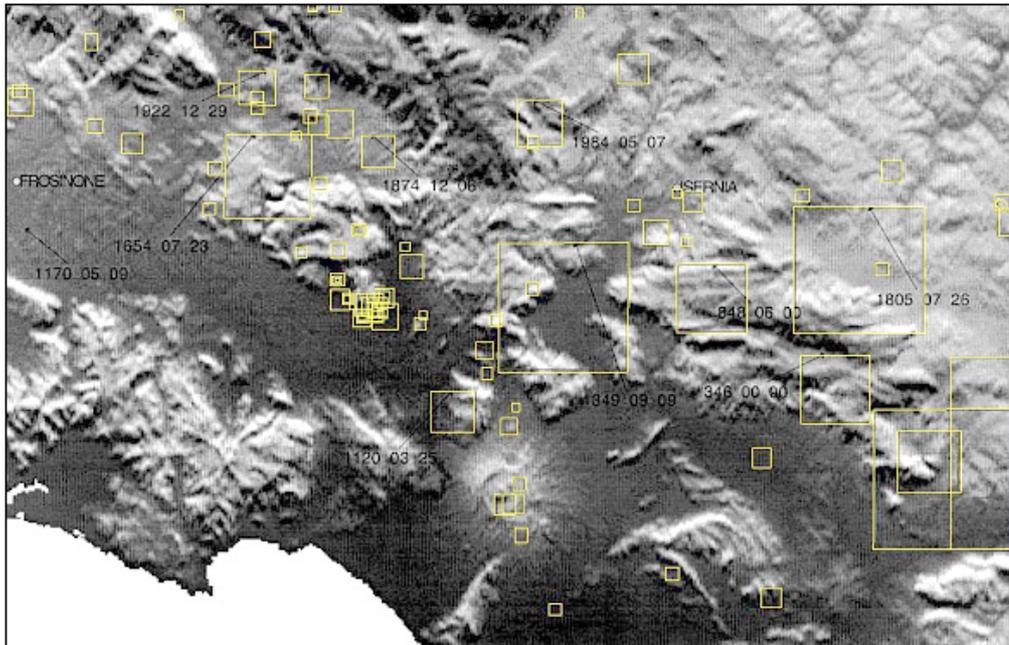


Fig. 7-1: Distribuzione dei terremoti storici dell'area in studio. La grandezza del riquadro è proporzionale all'intensità del sisma, INGV.

Degli altri eventi storici di una certa importanza ricordiamo quello del Giugno 848 nel Sannio occidentale (Telese IX-X grado e Isernia IX grado), quello del 23 Luglio del 1654 nell'area Sorano-marsicana (X grado) 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 (VIII grado).

8.2 Sismicità strumentale

Negli eventi sismici recenti, fra i più significativi, troviamo 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, pari al VIII grado MCS.

A partire dal 1985, grazie al potenziamento della rete sismica, è stato possibile registrare in questi ultimi 18 anni gran parte della microsismicità di tutto il territorio nazionale, fino ad un minimo di magnitudo di durata Md di circa 1.8-2.0.

Prendendo in esame la sismicità dell'ultimo secolo all'interno dell'area in studio è stato possibile determinare, con il metodo dei primi arrivi, le soluzioni focali di alcuni eventi come riportato nella tabella qui di seguito. Sono stati tratti due meccanismi focali, uno relativo ad un evento del 1973 (di magnitudo 4.4 localizzato a 5 km di profondità) e l'altro ad un evento del 1980 (di magnitudo 3.5 con ipocentro a 8 km di profondità).

L'evento del 1973 è stato localizzato nella zona dei Monti della Meta. La sua soluzione focale è di tipo normale con una elevata componente strike-slip. L'asse di minima compressione (asse T) è orientato circa NE-SW.

Il secondo evento (1980) è localizzato più ad W, nell'area dei Monti Ernici. In questo caso la soluzione focale è decisamente di tipo trascorrente con asse T orientato NNE-SSW. Del dataset di dati raccolti da Frepoli e Amato (2000) ricadono nell'area in esame tre eventi di cui è stato calcolato il meccanismo focale.

I due eventi localizzati più a meridione, nell'area tra Cassino e Venafro, presentano soluzioni focali di tipo normale con piccola componente trascorrente. In entrambi i casi l'asse di minima compressione è orientato circa in direzione anti-appenninica (tra NNE-SSW e ENE-WSW). In particolare, di questi due eventi quello del 21 Giugno 1994 è l'unico a ricadere pienamente all'interno del settore di studio. Un terzo meccanismo focale localizzato nella zona dei Monti della Meta è anch'esso di tipo distensivo con asse T orientato in direzione NE-SW. Anche in questo caso è presente una piccola componente strike-slip.

La sequenza sismica di San Donato in Val di Comino del Maggio-Novembre 1984 è stata caratterizzata da due eventi principali di media intensità (magnitudo mb 5.5 e 5.3) localizzati a 10 e 13 km di profondità. L'area epicentrale delle due scosse principali e delle loro repliche è stata l'alta Valle del Sangro e l'area dei Monti della Meta, ma il terremoto è stato fortemente risentito nell'area di Cassino. I meccanismi focali del sisma sono di tipo distensivo con asse T anti-appenninico. Nella soluzione focale dell'evento del 7 Maggio è presente una piccola componente trascorrente. I danni del sisma si riscontrano nell'area di studio lungo l'allineamento rappresentato dalla faglia Teodicea (su cui è ubicato il sinkhole di Caira); il piezometro ubicato nella Villa comunale (distante circa 1.5 km dal Lago di Caira sul medesimo allineamento) si è abbassato di molti centimetri

Dall'analisi di queste soluzioni focali, in particolar modo dall'orientazione dei loro assi T che sono quasi tutti suborizzontali, si può osservare come l'intera area in studio è caratterizzata da un regime deformativo di tipo estensionale nel quale la direzione di estensione è antiappenninica.

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

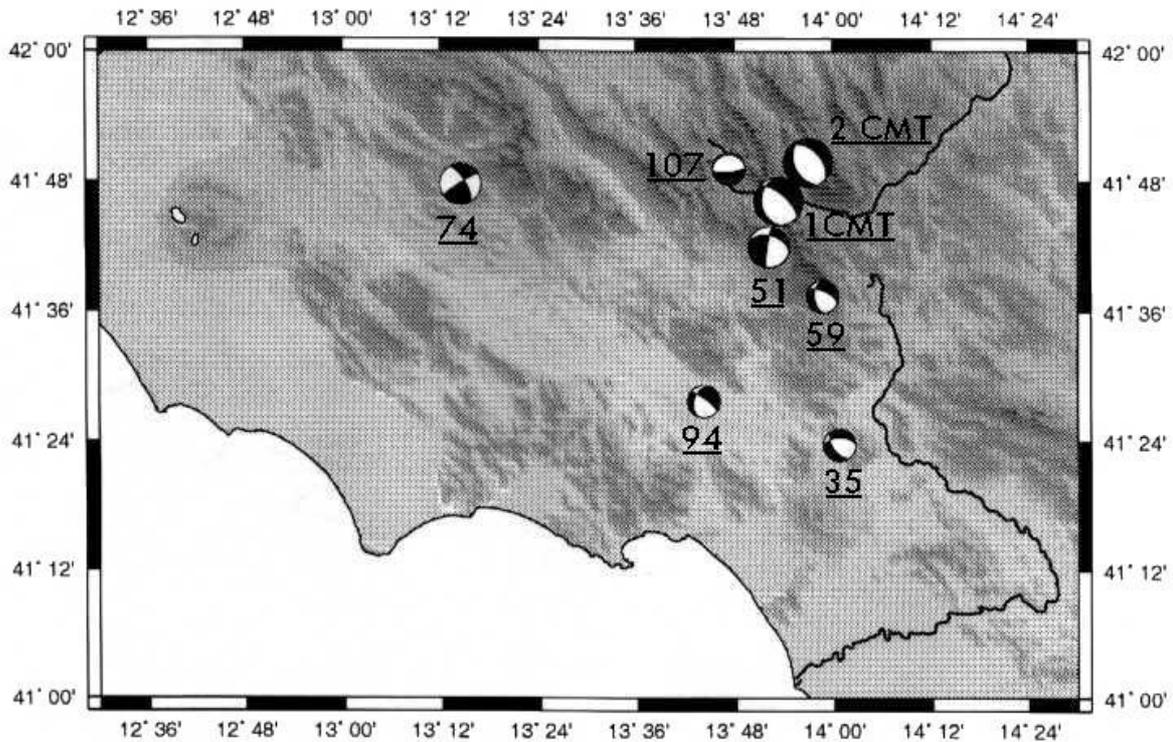
Inoltre scosse strumentali registrate tra il 2003 e il 2004 nell'area di cassino hanno determinato abbassamento del suolo (registrato presso un piezometro) di circa 3 centimetri a poca distanza dal Lago di Caira, e lungo l'allineamento N10E di cui si è parlato in precedenza.

Ultimamente l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha rilevato durante il monitoraggio della Rete Sismica nazionale Centralizzata (RSNC) il verificarsi di un periodo sismico nel territorio del Comune di Piedimonte San Germano (Fr). 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.

No	Data	Tempo d'origine	Lat.	Long.	Prof. Ipoc.	M _d	RMS	ERH	ERZ
F-A 35	920316	05:45	4123	1401	7.8 Km	3.4	0.25	0.9	1.9
F-A 59	930101	18:46	4137	1359	10.7 Km	3.2	0.24	0.9	1.1
F-A 94	940621	09:01	4127	1344	5 Km	3.3	0.21	1.1	---
F-A 107	940920	19:10	4149	1347	6.7 Km	3.5	0.23	0.9	1.5
G. 51	731030	01:14	4170	1387	5 Km	4.4	---	---	---
G. 74	801001	00:57	4179	1324	8 Km	3.5	---	---	---
CMT 1	840507	17:49	41 46	13 53	10 Km	5.5	---	---	---
CMT 2	840511	10:41	41 49	13 57	13 Km	5.3	---	---	---

No	Strike del Dip	Dip	Rake	P Azim.	Ax.p	T azim	Ax.p
F-A 35	235	55	-50	114	58	207	2
F-A 59	265	45	-40	156	55	51	10
F-A 94	290	40	-20	177	44	63	22
F-A 107	175	75	-90	355	60	175	30
G. 51				134	39	244	22
G. 74				285	9	191	20

CMT 1	264	31	-52				
CMT 2	246	43	-76				



9 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. Le piane su cui si sviluppano gli abitati sono di origine tettonica (delimitate cioè da sistemi di faglie); i depositi quaternari che le colmano, con spessori di oltre cento metri, sono costituiti da un'alternanza di limi, argille, sabbie e ghiaie e, a luoghi, includono bancate o lenti di travertino.

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 faglia 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 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 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, (nota per questo motivo come *Terra dei Laghi*) rinvenuti su mappe antiche, 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 laghi 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 ed è stato ricolmato artificialmente dopo il 1948; i laghi di S. Giorgio e Acquasanta non riconducibili a fenomeni carsici in quanto originati al di sopra di una copertura argillosa-limoso (con spessori maggiori di 135 m) in cui è presente una falda in pressione.

La conferma dei fenomeni di sinkhole viene 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 cui 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 o orizzonti più permeabili.

La voragine si è aperta in corrispondenza di un elemento tettonico di importanza regionale recentemente individuato: la *Faglia Teodicea* (con andamento circa N-S).

All'interno della cavità vi era risalita di gas (H_2S) testimoniata dalle fonti storiche riportate nel testo e a poca distanza erano ubicate sorgenti sulfuree (oggi estinte) che alimentavano 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) sia 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.

In quest'area nel 1723 sono riportate 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); 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 a 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 breccie 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 Teodicea. 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.

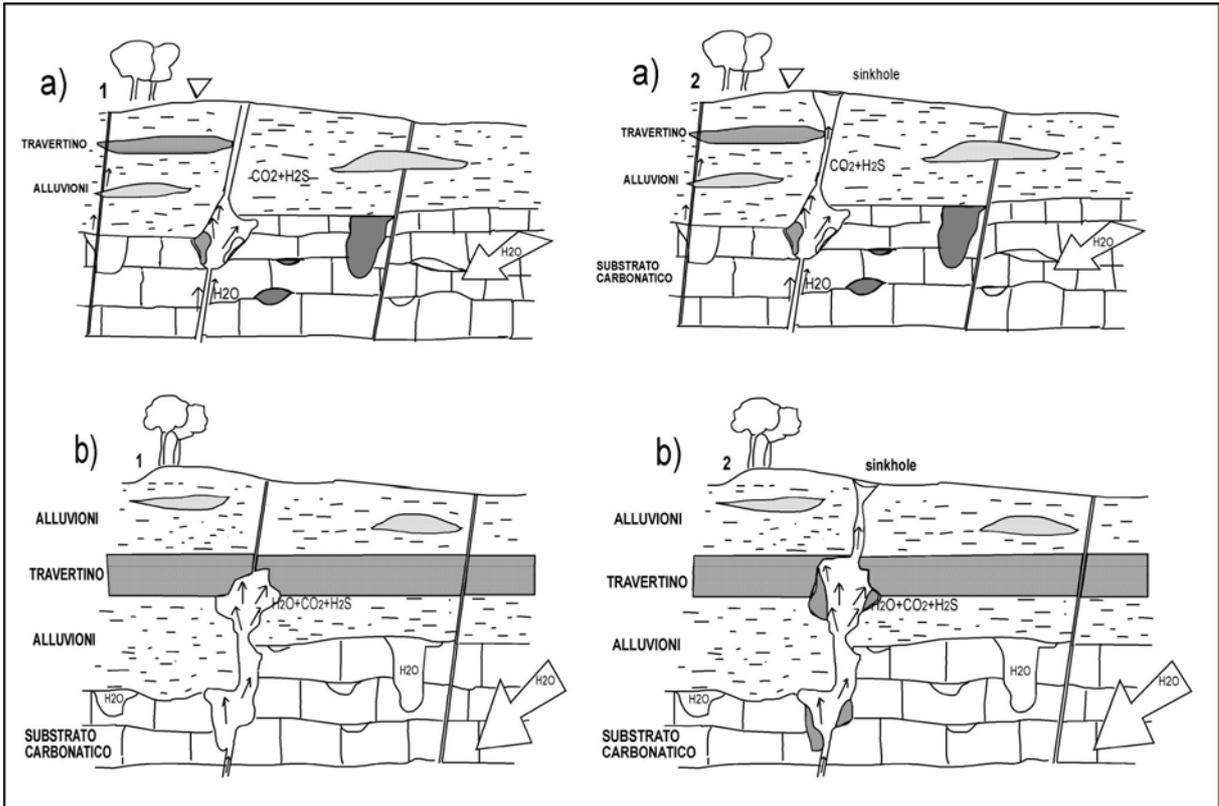
È quindi possibile che la cavità superficiale dipenda da processi agenti nel bedrock posto a notevole profondità.

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 altre paleo-cavità e la verifica sul terreno ha confermato tali ipotesi: all'interno delle paleoforme si rinvennero 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 di due secoli.

Infatti nella piana di Cassino è presente la maggior parte delle relitte sub-circolari, riconosciute: nei pressi di S. Elia Fiumerapido sono presenti tre forme, in cui oggi si individua una piccola polta 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 la Masseria Chiusavecchio) ormai quasi in estinzione. Gli abitanti del luogo ricordano la presenza di un altro lago dove oggi sorge il nuovo ospedale.

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 incrementano il rischio. I lavori di costruzione di alcuni edifici (tra cui il nuovo ospedale) al di sopra di una paleo-forma di sprofondamento hanno causato già alcuni problemi durante l'esecuzione degli stessi. Eventi 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.



BIBLIOGRAFIA