

I FENOMENI DI SINKHOLE ED I LAGHETTI DI ORIGINE INCERTA

Dr. Giorgio Caramanna

**Tutor:
Dr. Stefania Nisio**

INDICE

Riassunto	4
Abstract	7
Premessa	9
Introduzione	10
1. I fenomeni di sprofondamento (sinkholes) e i meccanismi genetici	12
2. I fenomeni di annegamento	16
3. Metodologie e tecniche di raccolta dei dati	18
4. I casi di studio	19
4.1 I laghi di Paterno	22
4.1.1 Inquadramento geomorfologico e geologico	23
4.1.2 Idrogeologia	28
4.2 Le sorgenti delle Acque Albule e il Lago di S. Giovanni	29
4.2.1 Inquadramento geomorfologico e geologico	30
4.2.2 Idrogeologia	34
4.3 Il sinkhole di Doganella di Ninfa	36
4.3.1 Inquadramento geomorfologico e geologico	36
4.3.2 Idrogeologia	39
4.4 Il lago di Posta Fibreno	41
4.4.1 Inquadramento geomorfologico e geologico	42
4.4.2 Idrogeologia	43
4.5 I laghi di S. Antonio	44
4.5.1 Inquadramento geomorfologico, geologico ed idrogeologico	46

4.6	Il lago dell'Accesa	46
4.6.1	Inquadramento geomorfologico, geologico ed idrogeologico	48
4.7	I laghi di Capalbio	50
4.7.1	Inquadramento geomorfologico, geologico ed idrogeologico	51
5	Conclusioni	54
6	Bibliografia	57

Riassunto

Uno dei fenomeni di subsidenza catastrofica che hanno maggiore influenza sull'assetto del territorio e sulla salvaguardia delle infrastrutture ed attività umane è quello associato alla genesi dei "sinkholes". Con questo termine, derivato dalla letteratura anglosassone ed in particolare statunitense, si indicano delle cavità ipogee a cielo aperto su litotipi vari. In generale sono caratterizzate da formazione repentina e dalla presenza di acqua nel loro interno.

A grandi linee si possono dividere in due gruppi: quelli associati a substrati chiaramente carsificabili e quelli che si formano in materiali apparentemente non soggetti a dissoluzione carsica. In questo secondo caso a volte si sono identificati materiali carsificabili in profondità, che potrebbero essere all'origine dei fenomeni di collasso, in altri casi si devono ipotizzare meccanismi più complessi per la genesi delle cavità.

L'accumulo di acqua all'interno dei sinkholes può essere dovuto sia ad una semplice raccolta di falde superficiali, raramente dall'accumulo di acque meteoriche, sia alla presenza di sorgenti alimentate da un acquifero più profondo.

Sovente vi sono apporti di fluidi (liquidi e gas) altamente mineralizzati e talvolta geotermici. La presenza di fluidi aggressivi può contribuire, o al limite essere la causa principale, della dissoluzione dei materiali e del conseguente collasso del terreno.

Da un punto di vista strutturale i sinkholes sono spesso associati a lineamenti tettonici di importanza locale e regionale, talvolta in aree al confine di dorsali carbonatiche.

La complessità delle cause coinvolte nel fenomeno si riflette anche nel tentativo di creare una nomenclatura adatta a specificare il tipo di sinkhole. In questo caso vi sono delle differenze tra i sistemi adottati dai ricercatori anglosassoni (principalmente Americani) e quelli proposti per l'Italia. Tali

differenze sono essenzialmente dovute alla diversa geologia (intesa come tipologia di terreni e assetto strutturale ed idrogeologico) che caratterizza le zone soggette alla formazione dei sinkholes nel nostro Paese rispetto a quella Americana.

I casi di studio presentati sono rappresentativi di una serie di situazioni caratterizzate da diverse litologie coinvolte e da un diverso assetto geologico, strutturale ed idrogeologico. Lo scopo di questa scelta è di fornirne un quadro articolato delle fenomenologie presenti. Nello specifico si passa da sinkholes in aree carsiche, come le Acque Albule, a sinkholes in terreni di copertura, Doganella di Ninfa, attraverso una serie di situazioni intermedie.

Come metodologia di studio è stato scelto un approccio sia bibliografico che di misure dirette. Ad un'iniziale raccolta delle informazioni geologiche presenti si è associata, ove disponibile, l'acquisizione di informazioni storiche relative alle date di formazione degli sprofondamenti. In diversi casi la verità storica è frammista a racconti fantasiosi o a vere e proprie leggende che necessitano di un'interpretazione critica per una corretta valutazione delle informazioni. Le osservazioni dirette, effettuate mediante sopralluoghi, hanno riguardato aspetti morfologici, rilievi di terreno speditivi e acquisizione di dati relativi alla geochimica delle acque.

La presenza di acqua all'interno dei sinkholes studiati ha reso necessaria l'adozione di particolari metodologie per la raccolta delle informazioni necessarie. In alcuni casi, ritenuti particolarmente significativi, l'autore (in possesso delle qualifiche professionali di Advanced European Scientific Diver e di Working Diver International Diving Schools Association) ha effettuato dei rilievi e campionamenti in immersione, secondo protocolli internazionali nella garanzia della qualità del dato e della assoluta sicurezza degli operatori.

A conclusione dello studio si è cercato di dare un'interpretazione, seppure di massima, delle fenomenologie alla base dell'innescò degli sprofondamenti. I casi di studio presentati permettono di definire alcuni trend comuni. I

sinkholes risultano in chiara correlazione con lineamenti tettonici, queste dislocazioni costituiscono anche vie di risalita preferenziale per i fluidi endogeni, la presenza di materiali carsificabili (calcari, travertini) è stata spesso riscontrata nelle aree affette dal fenomeno, in altre situazioni sembrano prevalere fenomeni di soffiatura (piping) strettamente legati alla presenza di fluidi in movimento. Le acque presenti nelle cavità costituiscono, in diversi casi, l'affioramento della falda basale. Per questo motivo i sinkholes possono costituire una via di accesso preferenziale per inquinanti e come tali devono essere adeguatamente monitorati e protetti.

Ovviamente il presente studio non può considerarsi esaustivo ma può costituire una base di inizio per studi più dettagliati su una fenomenologia che tanta importanza riveste nell'assetto del nostro territorio.

L'uso dell'immersione scientifica si è rivelato un utile "strumento" a disposizione dei ricercatori per studiare ambienti sommersi che, diversamente, non sarebbe stato possibile osservare.

Abstract

THE SINKHOLE PHENOMENA AND THE PONDS OF UNCERTAIN ORIGIN

Sinkholes are one of the most severe form of catastrophic subsidence that could affect the environment and human activities.

The word “sinkhole” is used, mainly by the American and English geologists, to indicate a surface depression. Usually the formation of a sinkhole is quick with a water body filling the void.

We can have sinkholes on karst terrains and on deposits that are not a clear karst surface. In this case sometimes karst bedrock has been identified under the soil cover. In other situations the origin of the subsidence is more complex.

The water found in some sinkholes comes from a surface aquifer, rarely from the rain, or from a deep aquifer through one or more springs inside the sinkhole.

Mineralized fluids rising through faults could mix with the karst aquifer. In this case there is a strong increasing of the chemical dissolution of soluble deposits (i.e. limestone, travertine).

Sinkholes are related to regional and local tectonic displacements and are seldom close to carbonate ridges and outcrops.

There is a complex nomenclature on the sinkhole’s phenomena with differences between the American and Italian terms. This is due to several causes that are at the origin of the collapses and the different structural, geological and hydrogeological setting of Italy and America.

The cases studied are representative of several geological environments. We studied typical karst sinkholes (i.e. “Acque Albule” (White Waters) springs) and sinkholes in cover deposits (i.e. the sinkhole of Doganella) with some intermediate cases.

We made bibliography researches on the geology of the areas investigated and direct investigations. Where available we collected information about the

date of the collapses. In some cases there are legends and popular histories about the origin of sinkholes.

Direct investigation on the morphology, geology and water chemistry of the ponds have been done. Due to the presence of the water the author (certified professional Advanced European Scientific Diver and working diver by International Diving Schools Association) made some scuba dives to collect data.

Following the data acquired by this research we can define some trends in the sinkhole genesis and flooding. There is a strong correlation between sinkholes and tectonic setting, faults are paths for endogenetic rising fluids. Some sinkholes are of karst origin, others are piping sinkholes due to the presence of fluid flows. Sometimes sinkholes are links between the deep water reservoir and the external environment. Following this, sinkholes must be protected to avoid pollution of the aquifer.

This research is just the first step for a more comprehensive study on the sinkholes features and causes. Sinkholes are a very hazardous kind of catastrophic subsidence that could affect the environment.

Scientific scuba diving is a powerful “tool” for researchers to study flooded environments.

Premessa

In Italia sono presenti molti laghetti di forma sub-circolare originatesi in epoca storica, di cui le modalità di formazione, la morfologia e il contesto geologico-strutturale potrebbero essere compatibili con fenomenologie di *piping sinkhole* (sprofondamento improvviso connesso alla risalita di fluidi e all'erosione dal basso).

Tali laghetti presentano in genere diametro variabile da pochi metri al centinaio di metri e profondità fino ad un massimo di cinquanta metri. Sono stati segnalati e studiati in epoca storica attribuendo ad essi differenti denominazioni dialettali: *obico*, *merro*, *sprofonzo o sprofonno*, *ovizo*, *obizzo* (che ricordano la parola *aviso* o *aiso* che vuol dire dolina in un dialetto arcaico della penisola salentina). 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 di cavità ipogee (doline di crollo) o a causa di fenomeni di dissoluzione spinta. A volte i meccanismi genetici sono più complessi ed assumono ruolo importante i fenomeni di erosione dal basso (*piping*).

La correlazione tra i fenomeni di erosione inversa, con apporto di fluidi, e gli sprofondamenti catastrofici (*piping sinkholes*) nasce dall'osservazione del fenomeno più frequente dopo la formazione di un *sinkhole*: il processo di "annegamento". 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 del *sinkhole* vi sono delle sorgenti che colmano rapidamente, nell'arco di pochi giorni, la voragine alimentandola perennemente.

Stabilire quali dei numerosi laghetti presenti nel territorio italiano possano essere considerati fenomeni di *sinkhole* 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).

Tuttavia spesso non è possibile effettuare tutte le indagini necessarie a causa dei costi troppo onerosi, pertanto è possibile formulare soltanto ipotesi. Il primo passo è quello di esaminare ed accertare le condizioni geologico-strutturali al contorno, che possono essere tratte dalla letteratura storica e geologica, successivamente si possono effettuare ricognizioni e osservazioni dirette sul terreno.

Il proposito di questo lavoro, pertanto, è stato la ricognizione di alcuni laghetti dell'Appennino centro-settentrionale mediante una ricerca delle fonti storiche.

I fenomeni censiti sono stati inoltre inquadrati nel contesto geologico-strutturale ed idrogeologico; alla fase di acquisizione e rielaborazione delle informazioni disponibili è seguita, ove possibile, l'indagine in sito con misurazioni dirette dei principali parametri geomorfologici ed idrochimici per l'analisi dei processi genetici.

In alcuni casi si è provveduto anche ad indagini dirette con tecniche specifiche al fine di raccogliere informazioni circa la geomorfologia della parte sommersa; è stato infine possibile effettuare delle ipotesi circa la loro genesi.

Introduzione

Uno dei fenomeni di subsidenza catastrofica di maggior impatto sulle infrastrutture ed attività umane è quello legato alla formazione dei sinkholes.

I sinkholes sono delle voragini dal perimetro sub-circolare e dalla sezione verticale ad imbuto che si aprono in modo repentino con scarsi o nulli segnali premonitori.

In molti casi la subsidenza avviene su materiali di copertura che sovrastano, con spessori anche notevoli, bedrock carbonatici o comunque costituiti da litologie solubili.

In diversi casi le cavità sono sede di affioramento della falda, superficiale o profonda, con formazione di laghetti di dimensioni varie, fenomeno noto con il termine di “annegamento” dei sinkholes (Nisio *et alii*, 2004, Caramanna *et alii*, 2004). Frequenti sono anche gli apporti di fluidi mineralizzati, in particolare di gas.

Vista la grande variabilità delle caratteristiche morfologiche e genetiche dei fenomeni carsici si è determinata una certa confusione terminologica relativamente a definire cosa sia esattamente un fenomeno di sinkhole.

In Italia l'approccio scelto è di creare una nomenclatura che distingua chiaramente i fenomeni carsici s.s. (doline) dai sinkholes in senso stretto (Nisio, 2003, Nisio & Salvati, 2004). Inoltre tale nomenclatura mira a distinguere i fenomeni non solo su base esclusivamente morfologica ma soprattutto genetica. A tal fine si richiede che il sinkhole venga inquadrato in un più ampio contesto geologico, strutturale ed idrogeologico.

I meccanismi genetici alla base della formazione dei sinkholes, e del loro successivo “annegamento” non sono ancora completamente chiari in tutti i loro aspetti soprattutto nel caso di formazione del sinkhole su materiali apparentemente non interessati da fenomeni di carsismo. Per alcuni di questi eventi è stato possibile raccogliere delle testimonianze storiche o dirette della loro formazione. L'analisi delle problematiche connesse alla genesi dei

sinkholes si è effettuata mediante una serie di casi di studio significativi scelti in contesti geografici e geologici diversi.

Di ogni caso studiato è stato fornito un breve inquadramento geologico ed idrogeologico generale seguito dalla raccolta ed interpretazione di dati morfologici ed idrogeologici più specifici nel tentativo di formulare un'ipotesi di lavoro ragionevole per ulteriori più estese indagini.

In particolare si è cercato di determinare quali siano i meccanismi di “annegamento” dei sinkholes e i rapporti di feedback tra emergenza della falda ed evoluzione del sinkhole stesso inquadrando la fenomenologia nel contesto idrogeologico locale e regionale.

Da un punto di vista operativo la presenza di acqua all'interno delle cavità ha comportato la necessità di sviluppare metodologie adeguate per la raccolta dei dati ed un approccio multidisciplinare al problema includendo considerazioni di tipo geologico-strutturale, sedimentologiche ed idrochimiche.

1. I fenomeni di sprofondamento (sinkholes) e i meccanismi genetici

L'aumento della popolazione e la conseguente progressiva urbanizzazione del territorio ha amplificato gli effetti dei dissesti naturali, in particolare di quelli che avvengono in modo repentino e con pochi o nulli segnali premonitori. In questa categoria si annoverano gli sprofondamenti catastrofici o sinkholes oggetto del presente studio.

L'analisi delle caratteristiche dei sinkholes e delle cause all'origine della loro formazione riveste pertanto non solo un valore scientifico ma anche applicativo per la salvaguardia delle infrastrutture e delle attività umane.

Il termine “sinkhole”, letteralmente “buco da sprofondamento”, è stato introdotto nella letteratura anglosassone inizialmente come sinonimo di dolina (Fairbridge 1968, Monroe, 1970; Jennings, 1985; White, 1988; Lowe & Waltham; 1995 Sharp 2000). Successivamente è stato impiegato per descrivere qualsiasi piccola depressione sul terreno, anche di origine antropica.

Field (1999) dà due diverse definizioni di sinkhole: la prima si riferisce espressamente ad un punto in cui un fiume scompare nel sottosuolo, sinonimo dunque di inghiottitoio carsico (Kearey 2001); la seconda assume una valenza più generica di depressione chiusa (sinonimo di dolina) in quest'ultimo l'Autore associa alcuni aggettivi collegati ai meccanismi genetici del fenomeno, riprendendo le classificazioni di Cramer, 1941:

- *Sinkhole da dissoluzione.* Si originano in terreni carsificabili per dissoluzione chimica dei materiali ad opera delle acque circolanti. Hanno tempi di formazione variabili ma, in genere, lunghi.
- *Sinkhole da collasso.* Sono dovuti al crollo delle volte di cavità ipogee. In questo caso avvengono in modo repentino e con scarsi o nulli segnali premonitori.

- *Sinkhole in terreni sciolti.* Si formano quando spessori consistenti di materiali incoerenti sovrastano substrati carsificabili. Si formano delle strutture imbutiformi dai fianchi instabili che si allargano ed approfondiscono per crolli successivi. La velocità evolutiva, e l'entità del dissesto, sono variabili passando da una subsidenza lenta e progressiva ad un vero e proprio crollo.

In Italia la nomenclatura è ancora in fase di definizione poiché il termine fu introdotto alla fine degli anni ottanta per indicare un differente tipo di cavità rispetto alle doline; utilizzare il termine come sinonimo di dolina in Italia originerebbe delle indeterminazioni circa i reali meccanismi genetici delle cavità.

Le doline s.s. si originano per azione diretta delle acque superficiali di infiltrazione; dall'alto verso il basso attraverso materiali carsificabili. In questo caso la dissoluzione chimica è il meccanismo genetico predominante, se non esclusivo, nella formazione della cavità.

I sinkholes s.s. dovrebbero la loro origine a fenomeni di erosione inversa da parte di fluidi che risalgono dal basso attraverso fratture e discontinuità nei terreni interessati. All'azione di dissoluzione chimica si associano, nel caso di materiali scarsamente coerenti, fenomeni meccanici di *suffosione* (piping).

La terminologia da adottare quindi assume un carattere non esclusivamente morfologico ma comprende un'interpretazione geologica e strutturale delle aree interessate dalla presenza dei sinkholes, "sinkholes prone areas" (Nisio & Salvati, 2004).

Per quanto riguarda i meccanismi genetici all'origine dei fenomeni di sinkholes sono state individuate una serie di caratteristiche geologiche e strutturali delle aree interessate dal fenomeno con una stretta correlazione tra substrato calcareo, reticolo idrografico ipogeo e genesi dei sinkholes come evidenziato da indagini geofisiche e da trivellazioni geognostiche, nonché dei

fattori predisponenti ed innescanti il fenomeno (Jenkins & Nyquist, 1999; Capelli *et alii*, 2000; Caramanna, 2001 a-b; Caramanna *et alii* 2001; Gary *et alii*, 2003; Nisio, 2003; Nisio & Salvati, 2004; Caramanna & Gary, 2004; Caramanna *et alii*, 2004).

Le caratteristiche principali possono essere riassunte come segue:

- Presenza di un substrato carsificabile, eventualmente anche ad elevata profondità. In questo caso il carsismo ipogeo può originare della cavità la cui volta crollando innesca la subsidenza, più o meno repentina, dei depositi terrigeni sovrastanti (ravelling). In altre situazioni vi possono essere dei camini verticali (karst shaft), assimilabili a condotti idraulici, che favoriscono i movimenti verso l'alto della eventuale falda in pressione con fenomeni di liquefazione dei sedimenti e successivo asporto (piping).
- Presenza di una copertura di spessore variabile con caratteristiche geomeccaniche scadenti e granulometria variabile. Una volta che si sia creato un vuoto in profondità la scarsa capacità portante dei sedimenti comporta il collasso degli stessi con formazione di cavità dalle morfologie caratteristiche (imbutiformi, cilindriche).
- Circolazione idraulica ipogea attiva (falde in pressione). Un regime di elevata circolazione favorisce fenomeni di escavazione dei materiali della copertura e asporto degli stessi con conseguente collasso del piano campagna (piping).
- Apporto di fluidi chimicamente aggressivi. Questi, mescolandosi con la falda carsica basale, ne incrementano la capacità di dissoluzione nei confronti di materiali solubilizzabili (carbonati, evaporiti).
- Lineamenti tettonici di importanza locale o regionale. La presenza di dislocazioni tettoniche favorisce il movimento dei fluidi nel substrato. In particolare le faglie e le diaclasi costituiscono delle linee preferenziali per la risalita di fluidi endogeni potenzialmente aggressivi.

La presenza di una o più di cause predisponenti può far definire l'area come potenzialmente soggetta alla formazione dei sinkholes (*sinkhole prone area*). Affinché gli sprofondamenti si verifichino sono tuttavia necessarie delle cause innescanti (*trigger*) che comportino il superamento della soglia critica di stabilità del sistema con conseguente collasso della struttura.

Una delle cause innescanti la formazione dei sinkholes è rappresentata dalle oscillazioni repentine della piezometrica della falda acquifera. Anche l'attività umana, con il pompaggio o l'immissione di fluidi nel sottosuolo, le perforazioni, o forti vibrazioni connesse a lavori o a impianti industriali, può fungere da innesco per il fenomeno. Sismi, fenomeni di inondazione o comunque di pioggia intensa possono favorire il collasso della struttura con effetto "trigger" su di una latente instabilità strutturale dei depositi (Crema, 1915; Segre, 1948; Bono, 1995; Hyatt *et alii*, 1999).

2. I fenomeni di annegamento

Le voragini appena formate sono spesso colmate d'acqua assumendo l'aspetto di piccoli laghetti (*sinkhole ponds*).

L'origine delle acque di colmamento può essere attribuita alla presenza di falde superficiali, ad acque meteoriche in minima parte, o dell'emergenza della falda basale.

In alcune situazioni i sinkholes sono veri piezometri naturali che mettono in contatto un reticolo carsico ipogeo allagato con l'ambiente esterno.

Nel caso in cui i laghetti siano alimentati da falde superficiali o accumulo di acque meteoriche sono soggetti a marcate variazioni di livello e, sovente nella stagione secca, a completo prosciugamento. Maggiore stabilità nel livello e regime perenne sono caratteristiche dei sinkholes annegati nei quali l'acqua si origina da sorgenti connesse alla falda profonda.

In questi casi è possibile trarre maggiori indicazioni circa la genesi dei sinkhole ponds che può essere correlata a meccanismi di erosione profonda in grado di realizzare dei condotti che mettano in comunicazione l'acquifero profondo all'interno del bedrock e la superficie.

Analisi del chimismo possono permettere una prima discriminazione circa l'origine delle acque. Per ulteriori conferme ed accertamenti si devono impiegare metodi analitici più specifici quali le analisi isotopiche (Zuppi *et alii*, 1974)

In particolari situazioni le acque di falda sono miscelate a fluidi mineralizzati che ne modificano in modo marcato il chimismo. Questi fluidi sono spesso rappresentati da gas, principalmente CO₂, che ha la capacità di acidificare l'acqua in cui si discioglie amplificandone il potere di aggressione nei confronti di materiali carsificabili.

I casi di annegamento in depressioni carsiche e sinkholes s.s. studiati in Italia sono caratterizzati dalla presenza di sorgenti alimentate dall'acquifero basale,

ad emergenze di acquiferi confinati, a falde superficiali o a situazioni intermedie.

Emergenze della falda basale si hanno soprattutto nei casi di sinkholes in aree in cui il substrato carbonatico è sepolto sotto ingenti depositi di materiali di copertura, in questi casi il chimismo delle acque è spesso modificato a seguito dell'interazione della falda con i sedimenti sovrastanti il substrato e per i conseguenti fenomeni di lisciviazione (Caramanna *et alii*, 2004).

Il fenomeno di annegamento segue un processo evolutivo continuo. In diversi casi le sorgenti che alimentano il lago possono “migrare” con conseguente interruzione del flusso e prosciugamento del sinkhole. In altri casi, particolarmente nei materiali non consolidati, le variazioni del livello di falda contribuiscono ad innescare fenomeni di frana nelle pareti con un progressivo allargamento ed interrimento.

3. Metodologie e tecniche di raccolta dei dati

Il primo problema da affrontare è stato quello di discriminare tra i numerosissimi specchi lacustri quali possano essere connessi all'affioramento della falda all'interno dei sinkholes. Si è pertanto proceduto ad un'analisi bibliografica e storica delle aree in cui si sono manifestati dei fenomeni di sprofondamento improvviso. In diversi casi è stato possibile reperire documentazione storica, spesso arricchita da leggende, che hanno permesso di risalire alla datazione del fenomeno.

Successivamente si è provveduto alla raccolta di informazioni relative all'assetto geologico-strutturale, all'idrogeologia e alla morfologia delle aree ritenute di maggiore interesse.

A questa prima fase di inquadramento delle fenomenologie e di raccolta delle informazioni disponibili è seguita quella delle indagini in sito finalizzate ad una documentazione fotografica, a rilievi geologici di massima e alla raccolta di campioni per le analisi dei parametri chimico-fisici principali (T, pH, conducibilità elettrica, alcalinità). In alcuni casi è stato possibile effettuare anche analisi quantitative delle concentrazioni ioniche principali.

Si è anche provveduto alla realizzazione di carte batimetriche. Nei casi in cui erano disponibili informazioni pregresse sulle profondità e morfologie sommerse queste sono state verificate onde determinarne eventuali modificazioni, a testimonianza dell'evoluzione dei fenomeni.

La presenza di acqua all'interno delle cavità ha comportato l'impiego di materiali e metodologie specifici. In particolare si è utilizzato un battello per le batimetrie e per la raccolta dei campioni d'acqua. In alcune situazioni sono state impiegate metodologie di indagine diretta mediante immersioni subacquee secondo protocolli internazionali in grado di garantire la qualità del dato e, principalmente, la sicurezza degli operatori (Flemming & Max, 1996; AAUS, 1996; Heine, 1999; NOAA, 2001).

4. I casi di studio

I “laghetti di origine incerta” studiati sono distribuiti nell’Appennino centro-settentrionale, nel Lazio ed in Toscana e rappresentano alcune delle principali tipologie di annegamento di sinkhole (Fig. 1 – 2). Si è preferito concentrare la raccolta dei dati su quei fenomeni che possono essere definiti sinkholes s.s. ossia presenti in aree di pianura e su potenti sedimenti di copertura. Sono stati tuttavia considerati anche alcuni casi di sinkhole su materiali carbonatici affioranti per le particolarità morfologiche ed idrochimiche mostrate.

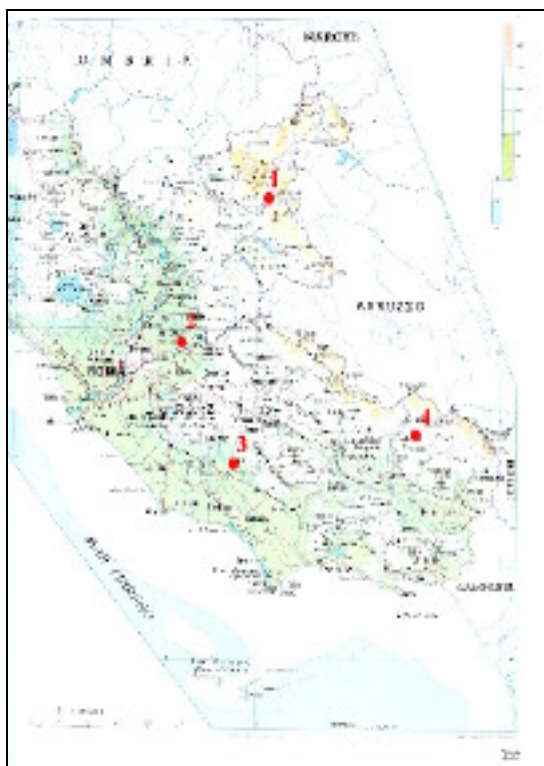


Fig. 1 – Ubicazione dei casi di studio:

- 1) Laghi di Paterno – 2) Albule – S. Giovanni
3) Doganella – 4) Posta Fibreno

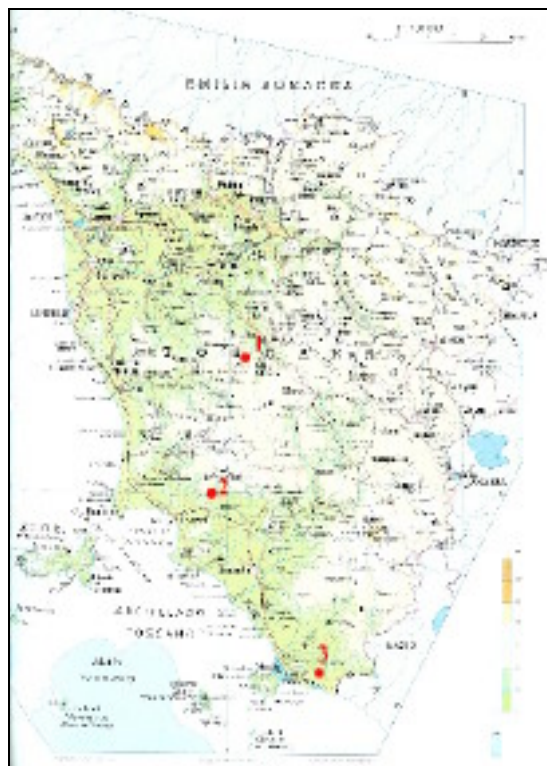


Fig. 2 – Ubicazione dei casi di studio:

- 1) S. Antonio – 2) Accesa – 3) Capalbion

- I laghi di Paterno sono piccoli specchi d'acqua che si aprono nella piana del fiume Velino (Piana di S. Vittorino, Rieti) su sedimenti prevalentemente alluvionali. In alcuni di essi sono chiaramente visibili delle emissioni gassose. Indagini dirette hanno permesso di ricostruirne la batimetria e la stratigrafia di massima. Raggiungono dimensioni e profondità notevoli per queste tipologie di laghi (Lago di Paterno, 55 m).
- Le sorgenti delle Acque Albule ed il Lago di S. Giovanni sono piccoli laghetti che si aprono su affioramenti di travertini della piana di Guidonia (Roma). Le Acque Albule sono rappresentate dai laghetti sorgivi di Colonnelle e Regina. La particolarità di questo sistema è l'abbondante presenza di fluidi mineralizzati e la termalità delle acque che sono infatti sfruttate per usi terapeutici fin da epoca Romana. Il Lago di S. Giovanni, che si trova nella stessa area delle Acque Albule, grazie ad alcune indagini subacquee si è rivelato essere una grotta allagata nel travertino venuta a giorno a seguito del crollo della volta.
- La voragine di Doganella, di Ninfa si trova nella Pianura Pontina pochi chilometri a nordest di Latina, si è formata in tempi recenti ed è stato possibile osservare in maniera diretta il suo annegamento.
- Il Lago di Posta Fibreno si è formato in prossimità della sorgente del fiume Fibreno ad alcuni chilometri a sud di Sora (Frosinone). Il lago non presenta la caratteristica forma sub-circolare ma sul fondale si localizzano di una serie di cavità di forma circolare in cui i sedimenti sabbiosi sono mantenuti in continua liquefazione dal flusso d'acqua.
- I laghi di S. Antonio sono degli specchi d'acqua di dimensioni modeste ubicati in un'area di pianeggiante-collinare nei dintorni di Poggibonsi (Siena), alcuni anni fa era presente un'ulteriore laghetto ormai ricolmato.

- In prossimità dell'abitato di Capalbio (Grosseto), nei sedimenti alluvionali che costituiscono la piana pericostiera, che separa la dorsale carbonatica dal mare, sono ubicati alcuni laghetti di origine incerta, formatisi in epoca storica.
- Il Lago dell'Accesa si trova alcuni chilometri a sud di Massa Marittima (Siena). E' uno specchio lacustre di diametro superiore ai 200 m con profondità dell'ordine dei 30 metri. Circa la sua origine esistono diverse leggende che concordano nel testimoniare un evento repentino probabilmente collegato ad un sisma.

4.1 I laghi di Paterno

La Piana di S. Vittorino è ubicata tra la dorsale carbonatica del Terminillo e quella del Nuria. Caratterizzata dai depositi alluvionali dell'alveo del Velino e del Peschiera è interessata dalla presenza di faglie attive con emissione di fluidi mineralizzati. Il territorio è soggetto a vistosi fenomeni di subsidenza catastrofica con la formazione di numerosi sinkholes su materiali scarsamente coerenti. Le dorsali carbonatiche sono sede di carsismo epigeo con formazione di doline anche di notevoli dimensioni.

Il presente studio si è concentrato su alcuni laghetti (Lago di Paterno, Pozzo di Mezzo, Pozzo Burino) nei quali affiora la falda originando corpi idrici di varia profondità.

4.1.1 Inquadramento geomorfologico e geologico

Il settore rappresenta il contatto tra il dominio carbonatico laziale-abruzzese, la zona di transizione ed il dominio pelagico umbro-marchigiano-sabino. Si può quindi considerare come appartenente alla “zona d'incontro” Auct. coinvolta nella formazione a thrusts della catena appenninica e, successivamente, nella tettonica distensiva con rotazione differenziata dei blocchi crostali connessa all'apertura del Tirreno. La litologia prevalente nel gruppo del Monte Terminillo è rappresentata da calcari liassici con intercalazioni marnose più o meno diffuse e di facies bacinale. La dorsale del Monte Nuria è invece costituita soprattutto da calcari cretacici di piattaforma carbonatica. Marne e argille sabbiose costituiscono una cintura bordiera alle strutture carbonatiche verso la piana alluvionale prevalentemente quaternaria del Velino. Sono inoltre presenti depositi quaternari continentali costituiti da brecce cementate, alluvioni terrazzate del Fiume Velino, depositi di versante, conoidi antiche e recenti e depositi travertinosi in località Vasche, Caporio e in prossimità del Lago di Paterno, del Pozzo di Mezzo e del Pozzo Burino (Accordi & Carbone 1988).

L'intero settore è interessato da una diffusa fagliazione, piani di taglio con direzioni preferenziali NW-SE, SSW-NNE, E-W (Facenna *et alii*, 1993), tra cui sono presenti allineamenti tettonici di importanza regionale (la *linea Ancona–Anzio*, la *linea Fiamignano-Micciani*). L'esistenza di una situazione strutturale complessa, anche in profondità, è testimoniata da evidenze morfologiche, dalla presenza di vistose anomalie geologiche, come la risalita di fluidi mineralizzati e manifestazioni gassose di anidride carbonica ed idrogeno solforato nelle emergenze “termali” di Cotilia e in vari pozzi trivellati nella Piana di S. Vittorino oltre che da una elevata frequenza di eventi sismici a bassa e media energia (Nolasco, 1998; Ciotoli *et alii*, 2000; Annunziatellis *et alii*, 2004; Centamore *et alii*, 2004). L'assetto strutturale dell'area condizionato soprattutto dalla faglia *Fiamignano-Micciani* che, in prossimità delle sorgenti del Peschiera, mette in contatto la formazione calcarea giurassica del Monte Nuria con i flysh. Lungo tale linea si originano continue tensioni che causano frequenti danneggiamenti alle gallerie drenanti ACEA per la captazione delle acque sorgentizie nell'acquedotto del Peschiera (dati ACEA). Evidenze della faglia *Fiamignano-Micciani* sono presenti anche in prossimità della Chiesa di S. Vittorino, sprofondata per oltre due metri, nel cui interno si è originata una sorgente con portata di circa 200 l/s (Solenghi *et alii*, 1999). Anche i numerosi sinkhole della zona paiono allineati lungo la dislocazione di Micciani (Fig. 3).

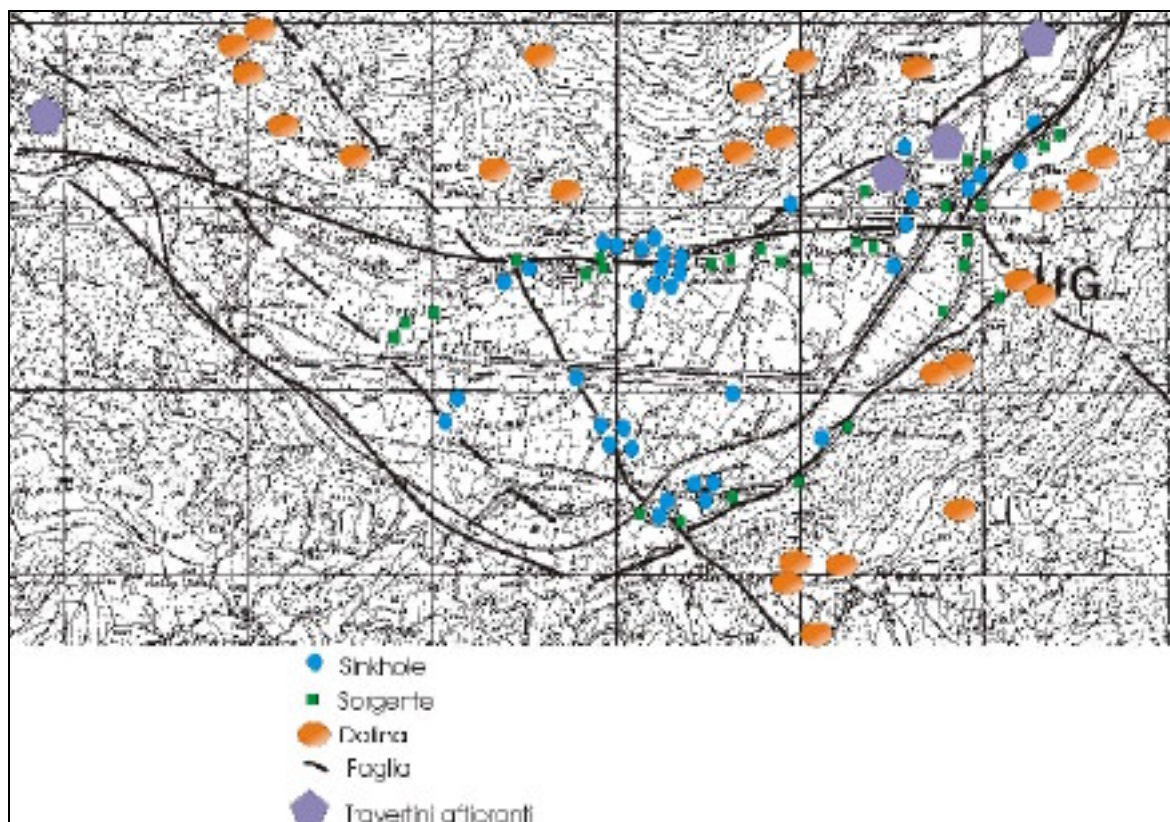


Fig. 3 – Schema semplificato dell'area dei Laghi di Paternò (Nisio *et alii*, 2004)

Il Lago di Paternò è il più grande dei sinkholes esaminati. Di forma sub-ellittica ha un asse maggiore di circa 180 metri mentre il minore è di circa 165 metri. La superficie dello specchio lacustre è prossima al livello di campagna nel settore meridionale ed orientale del bacino, con presenza di un esteso canneto. Una modesta scarpata caratterizza il settore occidentale e, maggiormente, quello settentrionale del bacino.

La morfologia delle pareti del lago è articolata in settori che degradano progressivamente verso il fondo mentre altri sono più ripidi. E' stata rilevata la presenza di bancate di travertino intercalate a sedimenti argillosi più o meno compatti.. Si è appurato che lo spessore di sedimenti molli sul fondo non supera gli 80 cm ricoprendo un substrato litoide non meglio precisabile (Fig. 4 – 5).

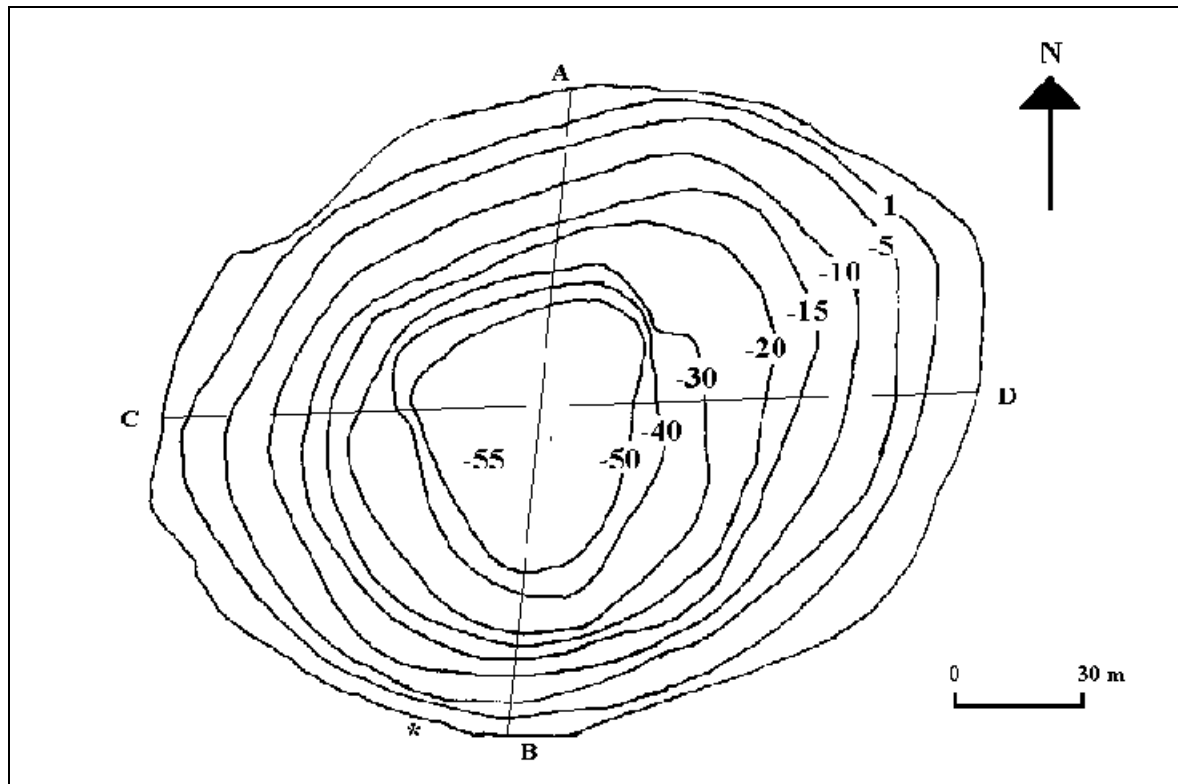


Fig. 4 – Batimetria del Lago di Paterno (* ubicazione della stratigrafia)

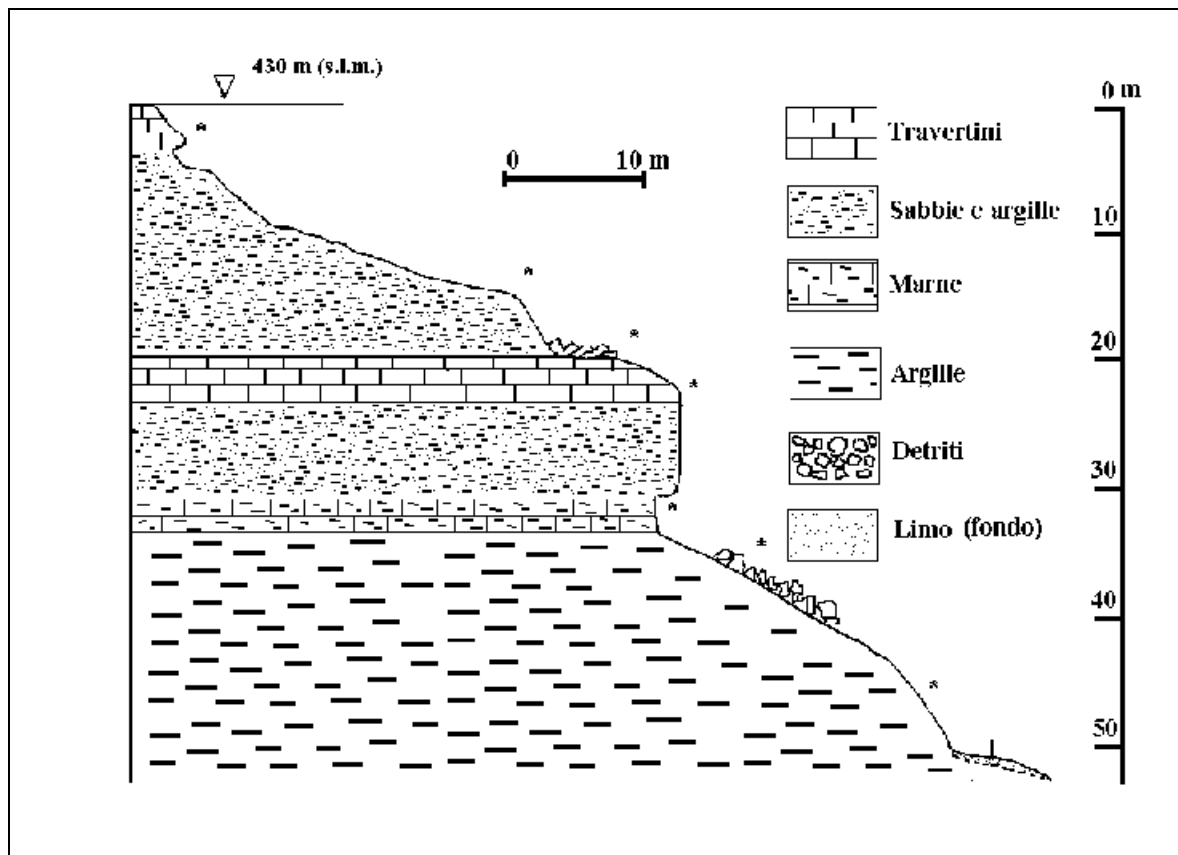


Fig. 5 – Stratigrafia semplificata della parete meridionale del Lago di Paterno

Il Pozzo di Mezzo con la profondità massima di 15 metri è una cavità subcircolare di circa 70 metri di diametro, a forma di scodella, dalle pareti ripide e con fondo piatto. E' un sinkhole aperto in depositi travertinosi intensamente carsificati. Ubicato a valle del Lago di Paterno (dislivello 17 m) ha pareti ripide che sovrastano lo specchio d'acqua per un'altezza di alcuni metri (Fig. 6).

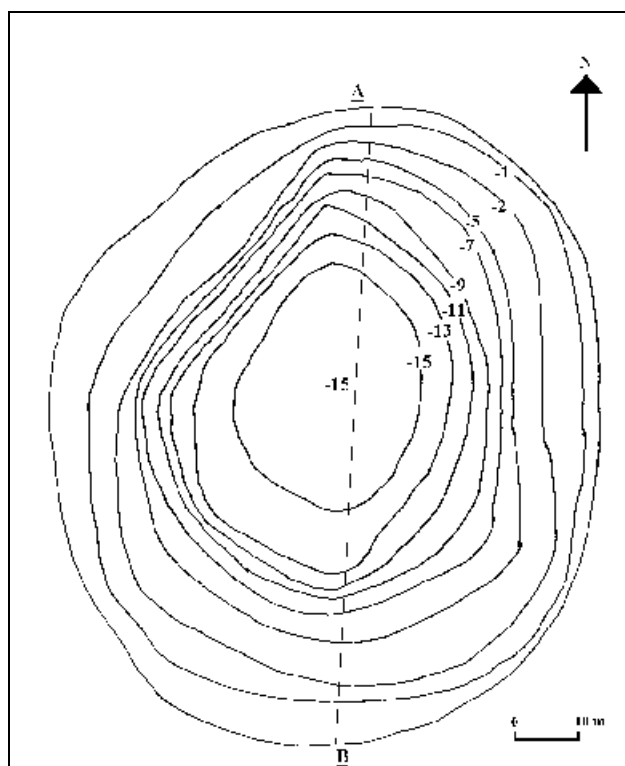


Fig. 6 – Batimetria del “Pozzo di Mezzo”

Il Pozzo Burino, più piccolo, è ubicato a valle della strada statale Salaria, circondato dai depositi alluvionali della Piana di S. Vittorino. Con profondità massima di circa 3 metri, presenta pareti ripide e forma subcircolare con diametro di circa 50 metri. Le pareti emerse della cavità sono costituite da travertini. La superficie dello specchio d'acqua è coperta da uno spesso feltro vegetale (Fig. 7).

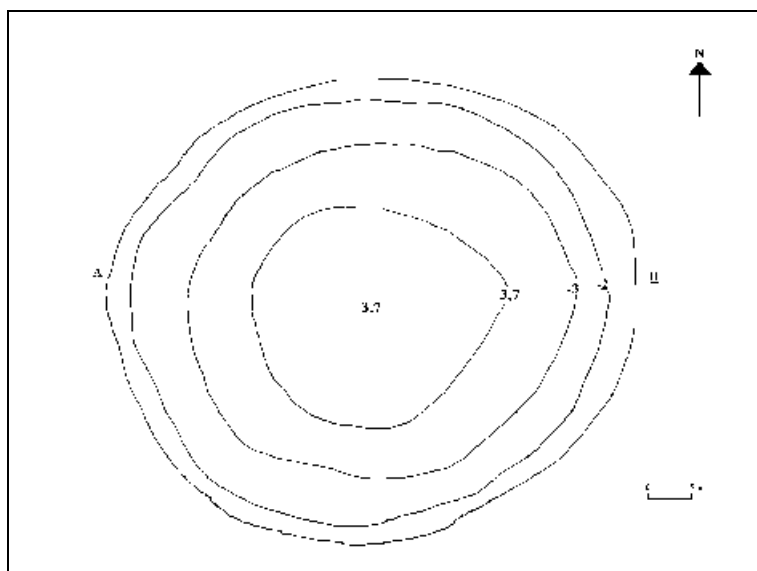


Fig. 7 – Batimetria del “Pozzo Burino”

4.1.2 Idrogeologia

L'idrogeologia dell'area è caratterizzata dall'idrostruttura del Monte Nuria che alimenta le sorgenti del Peschiera con una portata di $18 \text{ m}^3/\text{s}$ di cui $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$ vengono captati dall'acquedotto Peschiera- Capore (dati ACEA). Minore sembra essere il contributo del massiccio del Monte Terminillo.

La presenza di sorgenti sublaquali alimentanti il Lago di Paterno è provata dalla costanza del livello del lago e dalla presenza di un modesto emissario rappresentato da una canaletta artificiale che convoglia le acque del bacino lacustre nei terreni di privati e in un canale di drenaggio.

Il Lago di Mezzo non ha emissari o immissari; le acque appaiono stagnanti ed interessate dalla presenza di fioriture vegetali tali da renderle torbide fin da pochi cm sotto la superficie. Il lago potrebbe essere alimentato soprattutto da acque superficiali con possibili apporti laterali di acque sotterranee dalle bancate di travertino che ne costituiscono il perimetro.

Il Pozzo Burino è sede di un piccolo lago le cui acque ospitano una fitta fioritura algale tanto da originare un feltro continuo sulla superficie. Anche in questo caso l'alimentazione del bacino potrebbe derivare da una falda

superficiale nei travertini in affioramento dalla cui dissoluzione dovrebbe essersi originato il sinkhole.

Le acque sono classificabili come bicarbonato-calciche con pH attorno a 7.

Circa i meccanismi genetici all'origine dei laghetti, la letteratura attribuisce la genesi dei laghi a fenomeni puramente carsici (Nolasco, 1998), tuttavia alla luce delle nuove teorie (Nisio, 2003) non si possono però escludere correlazioni con i fenomeni di sinkholes in senso stretto.

Il Lago di Paterno pone alcuni problemi di interpretazione per la sua posizione, essendo in prossimità dalla dorsale carbonatica di Monte Paterno, il meccanismo genetico può essere riconducibile ad un crollo di una volta di cavità carsica (dolina di crollo), viceversa non si possono escludere fenomeni di erosione più profonda per due motivi: nonostante siano presenti all'interno del lago travertini, facilmente carsificabili, al di sotto di essi sono stati rinvenuti terreni argillosi e marnosi fino a 55 m di profondità. Se all'interno del lago venissero localizzate polle sorgive provenienti dall'acquifero profondo si potrebbero ipotizzare anche meccanismi di erosione sub-superficiale. Ulteriori indagini verranno condotte a tal fine.

Per quanto riguarda gli altri due laghetti, il Pozzo di Mezzo ed il Pozzo Burino, la loro ubicazione a distanza maggiore dalla dorsale carbonatica, all'interno della piana sui depositi alluvionali farebbe ipotizzare un bedrock carbonatico a maggiore profondità e renderebbe difficile attribuire questi fenomeni a fenomeni puramente carsici. Tuttavia è pur vero che in superficie affiorano lenti di travertino, anche se di spessore modesto, e che dalle analisi svolte non è stato possibile individuare polle sorgive al fondo dei laghetti, anche se il livello medio delle acque non subisce variazioni di rilievo. Tali laghetti sono però molto vicini ad altri *sinkholes ponds* attribuiti a fenomeni di *piping sinkhole*, avvenuti in tempi recenti, sembra pertanto difficile poter attribuire questi due laghetti a differenti meccanismi genetici.

4.2 Le sorgenti delle Acque Albule e il Lago di S. Giovanni

Pochi chilometri a nord di Tivoli si trovano tre laghetti all'interno della placca di travertini che contraddistingue la Piana di Tivoli e Guidonia. Due di questi, il lago Regina ed il lago Colonnelle, sorgenti delle Acque Albule, sono contraddistinti da ingenti apporti gassosi con acque mineralizzate ed ipotermiche. Il Lago di S. Giovanni si trova poche centinaia di metri a nord delle Acque Albule ed è caratterizzato da acque con elevato contenuto in bicarbonati ma prive di apporti gassosi o termalità anomala.

4.2.1. Inquadramento geomorfologico e geologico

La Piana di Tivoli, con il Bacino delle Acque Albule, è delimitata dalle strutture carbonatiche dei Monti Cornicolani a Nord, della dorsale Lucretile-Tiburtina a Est e dall'alveo del fiume Aniene a Sud. I sedimenti presenti sono rappresentati da alluvioni plio-quadernarie, depositi piroclastici quadernari dei Monti Albani e dal travertino. Il substrato carbonatico è interessato da vistosi fenomeni di carsismo con formazione, per crolli improvvisi, di cavità a cielo aperto (Crema, 1915). L'area è caratterizzata da motivi tettonici di estensione sia locale che regionale con la presenza di tre sistemi di faglie subverticali con direzione NW-SE, NE-SW, N-S associati a quattro fasi deformative principali legate sia a tettonica compressiva che distensiva (Mattei *et alii*, 1986). Lungo queste dislocazioni si assiste a risalita di fluidi mineralizzati, prevalentemente gassosi. Il Bacino della Acque Albule è da ritenersi di origine tettonica formatosi in concomitanza con una fase di sollevamento del Preappennino Romano (Fig. 8).

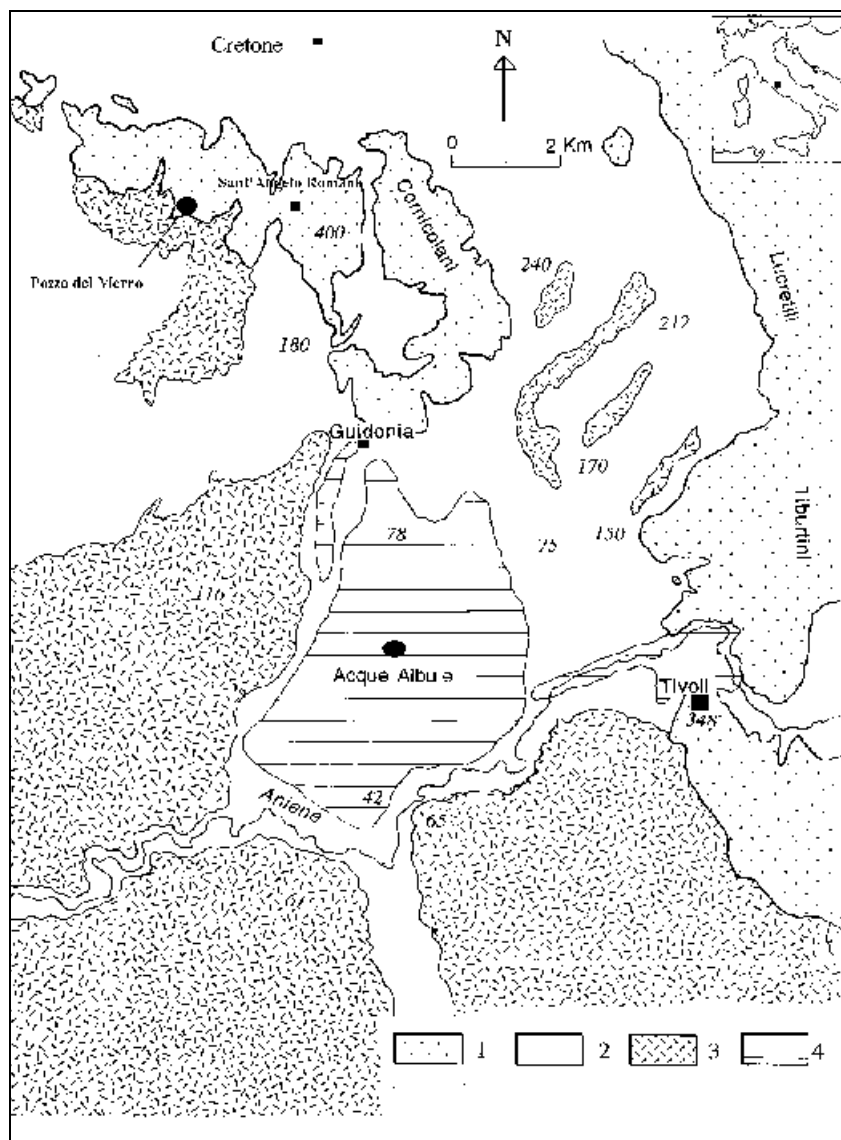


Fig. 8 – Schema geologico semplificato del bacino delle Acque Albule

1) Dorsali carbonatiche – 2) Coperture alluvionali – 3) Vulcaniti – 4) Travertini

Il Lago Regina, che si apre nel substrato travertinoso affiorante, ha forma sub-ellittica con diametro maggiore di 90 m e minore di 75 m. La profondità massima è di 35 m con un fondale pianeggiante caratterizzato dall'accumulo dei fanghi di dissoluzione del travertino. Alla base della parete settentrionale si trova la sorgente principale, parzialmente captata e convogliata agli impianti termali delle "Acque Albule s.p.a." per usi curativi. La forma della cavità è sub-cilindrica e le pareti sono caratterizzate da numerosi diaclasi e fratture attraverso le quali si registra un flusso di acqua sia in ingresso che in

uscita dal sinkhole. Numerose sono le emissioni gassose che determinano il particolare chimismo delle acque (Fig. 9).



Fig. 9 – Il Lago Regina

Il Lago Colonnelle ha una forma irregolare con diametro maggiore di circa 60 m e minore di 40 m. La profondità raggiunge i 60 m. La sezione verticale del sinkhole è ad “imbuto” restringendosi progressivamente verso il fondo ricoperto da spessori metrici di fanghi finissimi bianchi. Lungo le pareti il travertino è ricoperto da colonie di solfobatteri e, all’interno di alcuni sgrottamenti che ne caratterizzano la parete orientale, si identificano delle pseudo-stalattiti formatesi per accumulo di CaCO_3 sul materiale organico dei solfobatteri. In prossimità del fondale si localizzano alcune sorgenti e deboli emissioni gassose (Fig. 10).



Fig. 10 – Il Lago Colonnelle

Il Lago di S. Giovanni, ubicato poche centinaia di metri a Nord delle Acque Albule, è uno specchio lacustre sub-circolare con diametro di circa 60 m e profondità massima di 16m. Si apre in materiale travertinoso. Le sponde

strapiombanti creano un salto di circa 3 metri tra il piano campagna e la superficie lacustre. La parte sommersa della cavità ha una morfologia inequivocabilmente riconducibile ad una grotta venuta a giorno per crollo della volta. Lungo il perimetro è infatti presente un esteso e profondo sgrottamento con una serie di speleotemi. La massima penetrazione orizzontale, misurata dalla verticale del perimetro del lago, è di 16 m nel settore orientale. A luoghi il travertino si presenta fortemente alterato a testimonianza della presenza, in passato, di fluidi chimicamente aggressivi (Fig. 11-12).

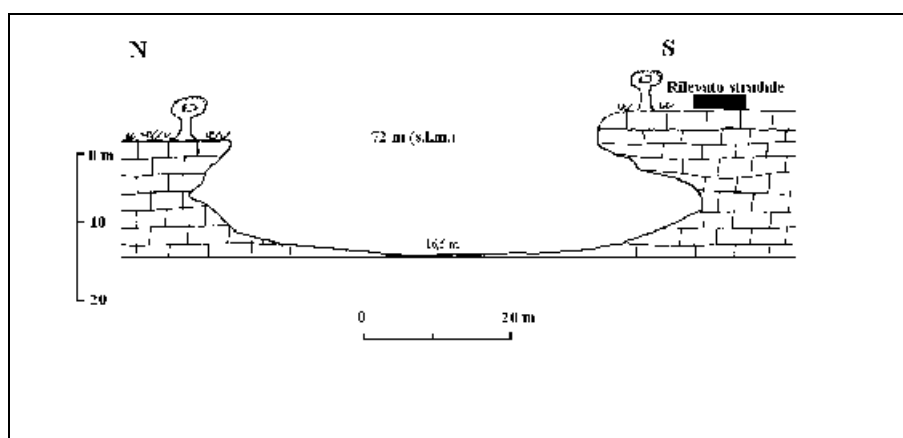


Fig. 11 – Sezione N-S del Lago S. Giovanni

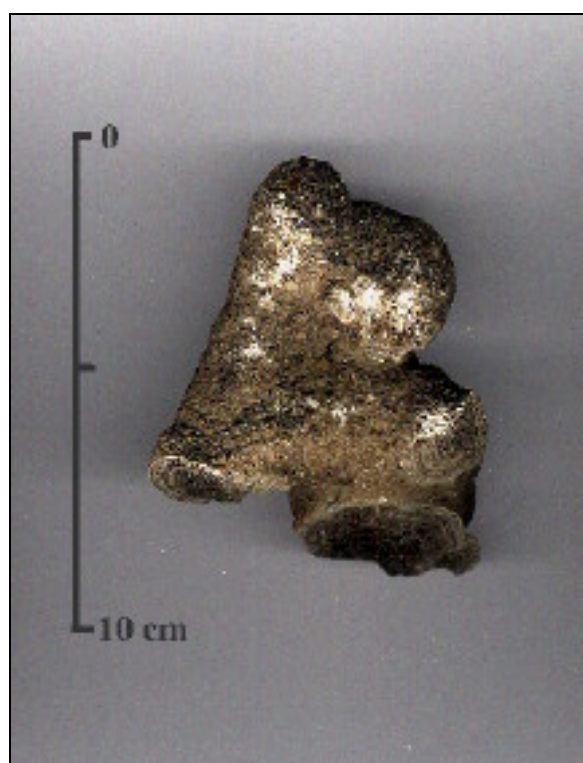


Fig. 12 – Speleotema nel Lago S. Giovanni

4.2.2 Idrogeologia

La falda basale ospitata nel bedrock carbonatico della Piana di Tivoli è alimentata essenzialmente dalle acque che si infiltrano lungo le dorsali del settore meridionale della catena Sabina, dai Monti Cornicolani e dai Lucretili – Tiburtini. Tale area di alimentazione è compresa tra le isoiete di 1.000 e 1.500 mm/a con un'infiltrazione efficace di 568 mm e con un deflusso totale di 15 m³/s. Di questi 2,5 m³/s sono rappresentati dalle sorgenti delle Acque Albule. La superficie totale di 832 Km² è distribuita tra i vari complessi carbonatici nel modo seguente: dominio pelagico 391,04 Km² complesso marnoso-calcarenitico 370,24 Km², dominio di piattaforma carbonatica 70,72 Km² (Boni *et alii*, 1986).

Che la falda alimentante le sorgenti delle Acque Albule ed il Lago di S. Giovanni sia la medesima dei Monti Cornicolani è stato proposto fin dal 1949 dal Manfredini. L'Autore ipotizza inoltre che le sorgenti siano dovute al contatto tra il serbatoio calcareo ed i sedimenti argillosi della Piana di Tivoli. La linea delle emergenze sarebbe stata allontanata dal piede della dorsale carbonatica, linea di contatto diretto carbonati/alluvioni, proprio per effetto della lente di travertino. Le anomalie geochimiche delle sorgenti delle Albule sarebbero dovute alla risalita, lungo le vie preferenziali dei fluidi profondi dovuti al vicino sistema vulcanico dei Colli Albani.

Da indagini dirette nel Lago Regina si è riscontrata una conducibilità elettrica superiore ai 3000 µs/cm con una temperatura di 23 °C e un pH di 6,25 mentre nel Lago Colonnelle la conducibilità misurata è stata di 2800 µs/cm con temperatura di 23°C e pH di 6,30. Le emissioni gassose, presenti in entrambe le sorgenti, sono più evidenti nel Lago Regina. Per la temperatura sono disponibili dati storici a partire dal 1857 che evidenziano una sostanziale stabilità dell'anomalia termica tenendo anche conto delle diverse strumentazioni utilizzate per la misura del dato (Tab. 1).

Data	Temperatura °C	Autore
1857	23,0	Latini <i>et alii</i>
1874	23,0	Canevari
1896	23,7	Camilla
1899	23,5	Perrone
1924	24,7	Piccinini
1933	22,0	Dir. Gen. Sanità
1940	23,0	Min. Interno
1951	22,0	Messini
1964	23,0	Falchitto
1974	23,4	Camponeschi
1980	23,3	Camponeschi – Nolasco
1999 - 2004	23,0	Caramanna

Tab. 1 - Temperature dell'acqua del Lago Regina (da Camponeschi & Nolasco mod., 1988)

Le analisi chimiche hanno inoltre rilevato la presenza di concentrazioni importanti in solfuri. All'ossidazione di questi composti dello zolfo, per opera dell'ossigeno atmosferico, si deve la particolare opalescenza della superficie dei laghi da cui il nome "Acque Albule". Tale fenomeno è particolarmente evidente in immersione. Un effetto marcato è quello stagionale; in inverno infatti le acque calde risalgono, si raffreddano e riprecipitano verso il basso. La cella convettiva che ne deriva spinge lo strato opalescente in profondità. In estate invece si origina una stratificazione con limitata penetrazione degli strati opalescenti lungo la colonna d'acqua. In almeno un caso (13 ottobre 2000) si è verificato un aumento dell'emissione gassosa e della torbidità nel

Lago Colonnelle correlabile ad un periodo di attività sismica nella Valle dell'Aniene (Caramanna, 2002).

Il quadro complessivo che si delinea è quello di un acquifero carsico ospitato nei termini carbonatici con locali apporti di fluidi mineralizzati chimicamente aggressivi. L'aggressività di questi fluidi sarebbe una delle cause principali nella formazione di cavità ipogee che, evolvendo nel tempo, possono determinare fenomeni di collasso improvviso con venuta a giorno dei vuoti.

4.3 Il sinkhole di Doganella di Ninfa

Il sinkhole di Doganella di Ninfa si apre su sedimenti prevalentemente piroclastici in un'area della Pianura Pontina al confine con la dorsale carbonatica dei Lepini. La data di formazione del sinkhole, o meglio del suo manifestarsi in superficie, è nota con estrema precisione ed è il pomeriggio del 22 agosto 1989 dopo un periodo di siccità (Bono, 1995). Su un terreno agricolo si apriva una piccola cavità a forma di imbuto con le pareti ripide. Successivamente il sinkhole si allargava venendo annegato dall'affioramento della falda che origina un laghetto di circa 30 metri di profondità.

4.3.1 Inquadramento geomorfologico e geologico

Nell'area in cui si apre il sinkhole di Doganella di Ninfa i terreni di copertura sono prevalentemente di natura clastica. Si tratta di depositi eterogenei costituiti da tufi, sabbie, ciottoli, ghiaie ed argille, riferibili ad ambienti deposizionali di tipo fluvio-lacustre e lagunare. In affioramento, nel settore nord occidentale, si rilevano banchi di travertino, come si osserva nella cava dismessa in località Lago di Cotronia. Tali depositi, intercalati a sequenze vulcanoclastiche e argille, sono stati attraversati a diverse profondità in numerosi sondaggi eseguiti nell'area di indagine. Da una ricostruzione paleogeografica dell'area pontina (Bono, 1995), si evidenzia l'appartenenza degli orizzonti travertinosi di maggiore spessore a tre cicli deposizionali,

diversi per età, in relazione alle fasi di attività magmatica che hanno caratterizzato il Vulcano Albano. Considerazioni diverse fanno ritenere che gli orizzonti di travertino chiudano la sequenza vulcanoclastica di tre cicli deposizionali, separati da cicli erosivi correlabili a variazioni eustatiche negative.

La forma del sinkhole è irregolarmente circolare con un allungamento in direzione Est – Ovest. La profondità è di circa 35 metri, di questi 30 sono occupati da un piccolo lago. Lungo le pareti si verificano continui crolli che determinano l'allargamento del sinkhole ed un suo progressivo interrimento.

Alla base delle pareti si localizza uno sgrottamento perimetrale con il massimo approfondimento verso Ovest coincidente con la direzione di allargamento della cavità.

Il fondo è ricoperto da uno spesso strato di limo, a luoghi si incontrano blocchi di dimensione metriche a testimonianza dei crolli delle pareti. Misure in situ dello spessore e della consistenza del deposito di fondo lasciano ipotizzare che il substrato sia costituito da limi e materiali argillosi addensati con formazione di un piano inclinato nella direzione di massimo allargamento del sinkhole (Fig. 13 - 14)

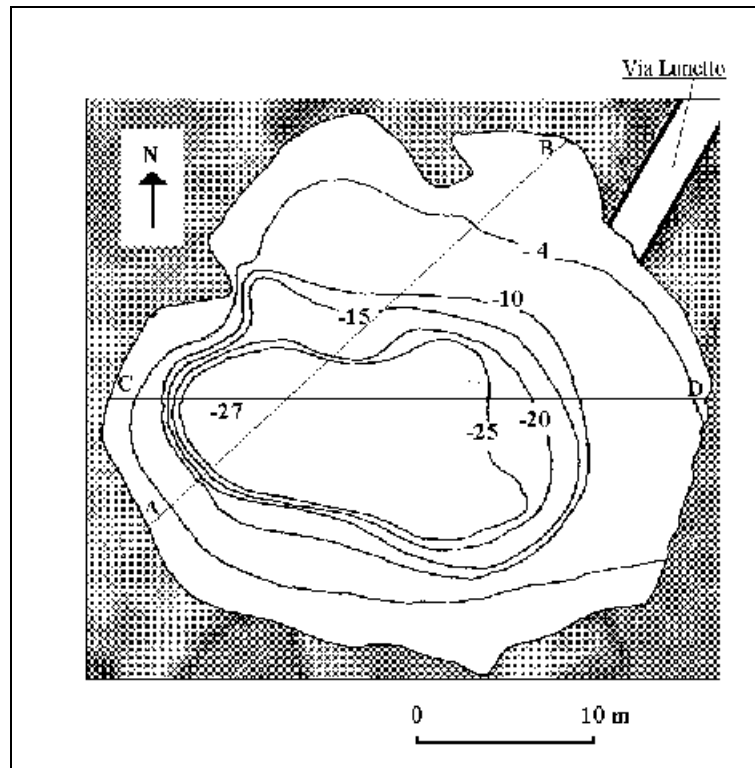


Fig. 13 – Batimetria del sinkhole di Doganella di Ninfa

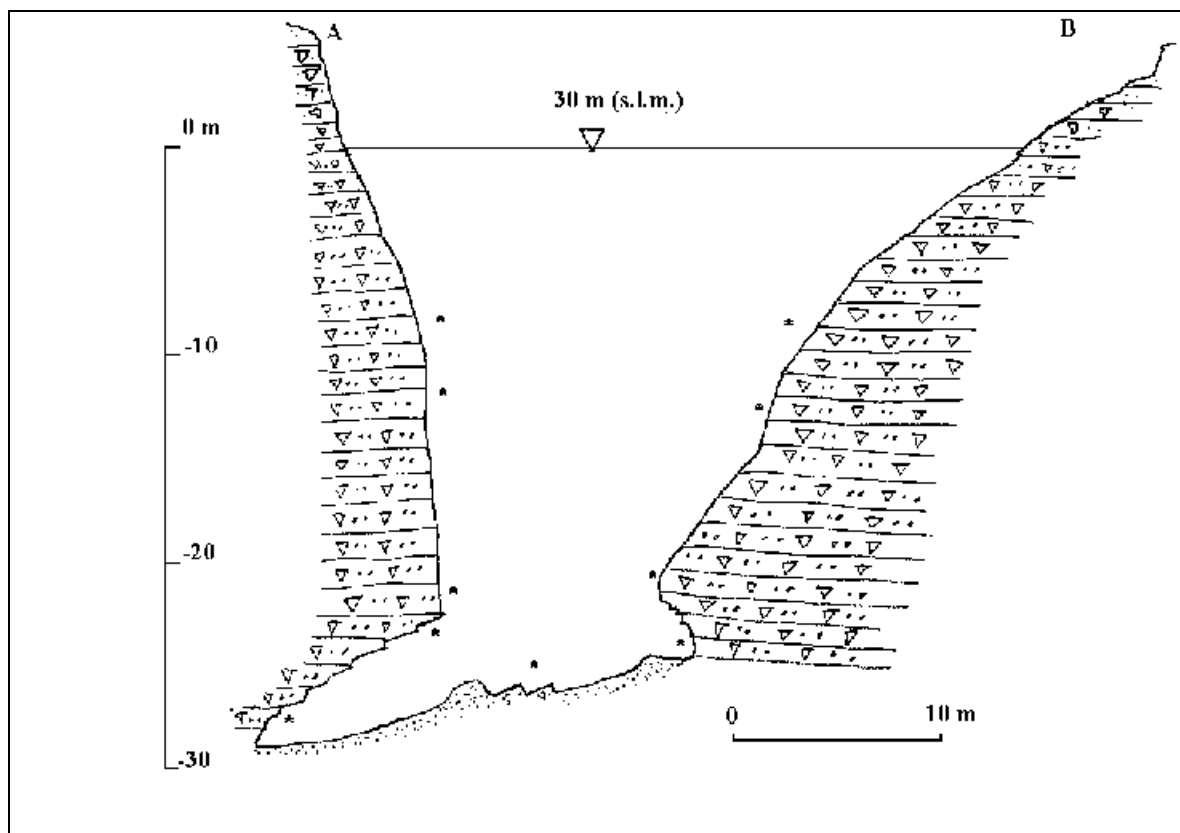


Fig. 14 – Sezione verticale del sinkhole di Doganella di Ninfa

Dal piano di campagna fino a circa 12 – 15 metri sotto la superficie dell'acqua, il sedimento prevalente è di tipo vulcanoclastico con una matrice argillosa. Da 15 metri fino al fondo il sedimento diventa più compatto determinando, verso il basso, una struttura a gradini inversi lungo la volta dello sgrottamento perimetrale (Caramanna, 2001 b; Caramanna *et alii*, 2004).

4.3.2 Idrogeologia

I caratteri idrogeologici della Pianura Pontina sono in stretta dipendenza con le relazioni giaciture venutesi a determinare tra i diversi complessi litologici presenti nel settore. E' possibile identificare alcune strutture idrogeologiche sede di attiva circolazione sotterranea (Boni *et alii* 1980)

La parte emersa della struttura carbonatica Lepina è sede di un'importante falda basale la cui superficie piezometrica risulta libera nel settore in affioramento. Tale acquifero di base alimenta numerose emergenze con portata globale media di 15 m³/sec. In particolare la sorgente di Ninfa, la più vicina al sinkhole e la più alta in quota (29 m) dell'idrostruttura lepina, eroga in media 2,5 m³/sec, con minimo di 0,6 e massimo di 4,1 m³/ sec. Il gradiente idraulico dell'acquifero, diretto verso SW, è approssimativamente di 5-6 m/Km (Boni *et alii* 1980).

La parte ribassata della struttura lepina, che si spinge al disotto della Pianura Pontina risultando coperta da depositi sedimentari pliocenici e quaternari complessivamente meno permeabili, contiene una falda imprigionata con alimentazione laterale da parte dell'acquifero del settore emerso della struttura carbonatica.

I depositi quaternari che colmano il graben pontino sono sede di falde sovrapposte di entità minore rispetto al sistema acquifero carsico sepolto. Si identificano falde nei sedimenti con maggiore permeabilità rappresentati da travertini, dalle sequenze vulcanoclastiche e dai depositi ghiaioso-sabbiosi.

Il sinkhole di Doganella di Ninfa è sede di un affioramento della falda idrica basale. Osservazioni dirette della cavità hanno evidenziato l'assenza di immissari od emissari, tuttavia l'acqua presente non è stagnante segno della presenza di un continuo, seppur lento, circuito di ricambio. Le dimensioni della parte a del sinkhole sono tali da far stimare un volume di acqua accumulata dell'ordine dei 15 .000 – 20.000 m³.

Le analisi comparate (Tab. 2) dei campioni d'acqua prelevati in data 19/05/03 in prossimità degli impianti di pompaggio della sorgente di Ninfa (T 15°C - pH 6,60 – Cond. Elettr. 430 µs/cm) e nel sinkhole di Doganella (T 17°C - pH 7,05 – Cond. Elettr. 438 µs/cm) evidenziano una differenza nelle concentrazioni degli ioni principali. Le acque del sinkhole sono complessivamente più mineralizzate con un arricchimento in Na, K, e solfati e relativamente in Cl. L'origine di tale mineralizzazione è verosimilmente da attribuirsi a fenomeni di lisciviazione di lenti evaporitiche ricche in CaSO₄. Il Ca ed il Mg dovrebbero essere adsorbiti dai depositi argillosi che sigillano il fondo del sinkhole con rilascio di Na e K in soluzione mentre SO₄ e Cl rimangono liberi in soluzione. La presenza di F fa ipotizzare la lisciviazione anche di sedimenti piroclastici recenti. Si esclude la presenza di un flusso di CO₂ anomalo visti i tenori dei bicarbonati tipici dell'area. La diversità dei valori dei rapporti ionici principali ed in particolare del rapporto(Cl+SO₄)/HCO₃, tre volte superiore nel sinkhole rispetto alla sorgente di Ninfa (Tab. 3), conferma una differenziazione evidente nel chimismo delle acque affioranti nel sinkhole rispetto a quelle captate alle sorgenti di Ninfa.

Campione	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(mg/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)
Sinkhole sup.	0,01	0,40	0,18	0,33	3,03	0,53	< 0.1	0,04	0,75	2,74
Sinkhole fondo	0,01	0,44	0,28	0,42	3,63	0,58	< 0.1	0,09	0,90	3,42
Ninfa	0,00	0,22	0,05	0,06	4,04	0,18	< 0.1	0,01	1,12	3,32

Tab. 2 – Concentrazioni degli ioni principali (INGV Roma 1)

Campione	SO ₄ /Cl	Mg/Ca	Na/Ca	Cl/HCO ₃	K/Na	(Ca+Mg)/(Na+K)	(Cl+SO ₄)/HCO ₃
Sinkhole sup.	0,83	0,27	0,19	0,13	0,08	6,12	0,24
Sinkhole fondo	0,95	0,26	0,17	0,12	0,16	6,45	0,24
Ninfa	0,27	0,34	0,05	0,05	0,06	23,37	0,07

Tab. 3 – Rapporti ionici principali (INGV Roma 1)

Dai dati raccolti il sinkhole si sarebbe originato per il collasso dei sedimenti di copertura, dalle scadenti proprietà meccaniche, per effetto di ripetute oscillazioni della piezometrica. Ovviamente si ipotizza la presenza di una cavità all'interno del substrato carbonatico (sia esso rappresentato dalla struttura Lepina ribassata sotto la Piana Pontina, sia una lente di travertino) che avrebbe accolto il volume di materiale mancante.

4.4 Il lago di Posta Fibreno

Il Lago di Posta Fibreno si trova ai piedi della dorsale carbonatica di Serra Lunga ed occupa, con una forma a falce, una superficie di 0,285 km² con profondità massima prossima a 15 metri e media attorno ai 6 – 8 m. Il bedrock carbonatico presente nell'area è interessato da varie forme di carsismo e lo stesso bacino lacustre è caratterizzato dalla coalescenza di strutture da collasso.

Sul fondale sbbioso-limoso del lago si identificano una serie di sinkholes sedi di polle sorgentizie che, complessivamente, alimentano il fiume Fibreno, unico emissario del lago, con una portata di circa 10 m³/s (Caramanna, 2001 b; Agrillo *et alii*, 2004).

4.4.1 Inquadramento geomorfologico e geologico

I terreni in affioramento nell'area del Lago di Posta Fibreno sono rappresentati in prevalenza da sedimenti carbonatici, rappresentati dai Monti della Marsica Occidentale, ascrivibili all'ambiente deposizionale di "Piattaforma carbonatica ristretta" con evidenza di due fasi evolutive deposizionali dal Giurassico al Paleogene (Accordi & Carbone, 1988).

Il bacino lacustre, con la caratteristica forma allungata a falce, è costituito da una depressione all'interno di materiali calcarei, con evidenze di lenti di travertino. Sul fondo, sotto una spessa copertura di sabbie fini e limi, si identificano numerose polle sorgentizie con morfologie sia positive (conetti di fango) che negative. La depressione principale, identificata col nome di "Lago Chiaro" (Fig. 15), ha una forma subcircolare con diametro di circa 7 m. E' caratterizzata dalla presenza di sabbia fine mantenuta in continua "liquefazione" dal flusso sorgentizio. Misure dirette hanno evidenziato che lo spessore di questa copertura mobile è superiore ai 5 m. La zona del lago in cui si raggiunge la massima profondità (14,5 m) è quella detta "Dolina della Croce". Si presenta come una struttura sub circolare del diametro di 25 metri. Il fondo è caratterizzato dalla presenza di alcune polle sorgentizie delle quali una si approfondisce per quasi due metri dal livello di fondo del lago assumendo l'aspetto di una piccola caverna. Le pareti sono costituite da litotipi carbonatici.



Fig. 15 – Una polla sorgentizia sul fondo del lago. Si noti il cono in primo piano e, sullo sfondo, la cavità riempita da sabbia fine in stato di “liquefazione”.

L'Isola galleggiante, costituita da un substrato di torba e di vari vegetali, occupa un settore secondario del lago collegato a quello principale da un canale di limitata profondità. La massima profondità di questo settore è di 9 metri con fondale fangoso detritico, privo di polle sorgentizie. Le pareti sono strapiombanti e fangose. Il substrato carbonatico non è evidente.

4.4.2 Idrogeologia

L'area di ricarica delle sorgenti che originano il lago di Posta Fibreno è identificabile dall'idrostruttura carbonatica dei Monti della Marsica Occidentale. La superficie del bacino è di 350-400 km². I valori di precipitazione annua media variano da 1200 mm ad oltre 1700 mm. L'idrostruttura Marsicana, costituita prevalentemente dalle successioni carbonatiche mesozoiche e cenozoiche del complesso di piattaforma carbonatica, è intensamente tettonizzata e carsificata costituendo una eccellente area di ricarica con valori di infiltrazione efficace annua media che variano da 750 a 1000 mm di acqua meteorica (Boni *et alii*, 1986; 1988).

Visto l'assetto dell'area e le morfologie presenti nel lago si può ipotizzare che i sinkholes si siano originati per azione di una falda in pressione risalente dal substrato carbonatico eventualmente presente sotto i materiali alluvionali della conca lacustre.

4.5 I laghi di S. Antonio

Sull'altopiano di S. Antonio, nella parte settentrionale della montagna senese, tra i corsi d'acqua dell'Elsa e della Staggia, si rinvengono quattro cavità sub-circolari che allineate. Due di queste ospitano dei laghetti, il Lago Scuro e il Lago Chiaro (Fig. 16-17).



Fig. 16 – Il Lago Chiaro limitrofo alla chiesa di S. Antonio



Fig. 17 – Il Lago Scuro

Sulla loro origine sono fiorite leggende e racconti.

Il Del Zanna (1901) riporta un brano di un manoscritto conservato nella Pieve di Staggia: *Sant'Ambrogio recandosi a Roma si fermò in una locanda, presso la vecchia strada maremmana, per passarvi la notte. Nella sera mentre prendeva riposo dalle fatiche del viaggio, s'intrattenne a parlare familiarmente col proprietario dell'albergo, e questi discorrendo di sè disse, caso più unico che raro, di essere felice, senza desideri, e che nessuna disgrazia aveva mai turbata la sua serena contentezza. A tali parole il vescovo milanese ordinò a quelli che l'accompagnavano di prepararsi a partire subito perché un'immensa sciagura minacciava quella casa. Infatti il sant'uomo col suo seguito si era di poco allontanato, che la casa sprofondò col terreno adiacente e nella voragine si raccolsero le acque formando un lago.*

Altri Autori riportano leggende diverse, Del Zanna (1901) riporta un interessante brano di un autore del '500, Leandro Alberti, (1550), tratto da *Descrizione di tutta Italia*, (stesso racconto è riportato da Paolo Merula nel 1605 in *Cosmografia e Geografia* parla delle stesse leggende):

Preso l'Abbadia, onorevole contrada posta fralli termini di Fiorenza e di Siena, sono dui laghi l'uno dall'altro discosto, al tirare di una saetta. In uno di quelli vedesi l'acqua chiara ma non se ne ritrova il fondo (come dicono gli habitatori del paese), nell'altro alquanto più piccolo, appare l'acqua tanto nera che pare da reguagliare all'inchiestro, al cui fondo non si può attingere. E questa acqua è totalmente di natura contraria all'altre acque, imperoche essendogli gelato dentro il legno incontinente, scende al profondo, e più non si vede. Et quivi pesce non di ritrova. Ella è volgata fama appresso agli abitatori del paese che passando quindi S. Cervone Vescovo di Massa e quivi fermandosi a riposare (ove è il primo lago) ove era una taverna, e intendendo la vitiosa vita dell'hosto, che teneva, e sforzando di ridurlo in penitenza dei suoi peccati, e giudicando di non poterlo convertirlo, partendosi la mattina seguente li pronunciassse, che insieme lui insieme colla taverna

profondarebbe nell'abisso, et che partito il santo vescovo, incontinente aprendosi la terra fosse inghiottito coll'edificio e che poi vi rimanesse detto lago. Dell'altro lago dicono, che habitando in questo luogo unscelerato sodomita e essendo vivuto in tanta sceleragine alquanto tempo, non lo volendo più sopportare Iddio, fece aprire la terra, e lo fece sprofondare con tutta la fameglia, rimanendovi questo lago pieno d'acqua negrissima, e di contraria natura dell'altra acqua, quanto era la sua habitazione.

4.5.1 Inquadramento geomorfologico, geologico ed idrogeologico

La profondità di lago Chiaro si attestava a 14 m nel 1888 (Lotti), ed il diametro di 60 m; nel lago scuro la profondità è di 7.5 m (dati del 1888) ed il diametro di 20 m. Secondo del Zanna invece le misure eseguite nel 1901 attesterebbero le dimensioni del Lago chiaro a 120 m l'asse maggiore di un'ellisse e 110 m l'asse minore, mentre il Lago scuro avrebbe assi di 80 m e 65 m.

La Chiesa di S. Antonio, che si trovava presso le sponde del lago Chiaro, ha subito cedimenti negli ultimi anni dell'800 pertanto fu abbattuta e ricostruita nel 1898.

Alla base dei laghi la cui origine dovrebbe essere uno sprofondamento carsico sono presenti sorgenti di modeste portate 13 l/sec.

La situazione geologica mostra che i laghi si formano a contatto dei travertini e sedimenti plio pleistocenici che poggiano trasgressivi su un substrato costituito da Calcare cavernoso (Bossio *et alii*, 2002).

4.6 Il lago dell'Accesa

Si hanno poche notizie riguardo l'origine del Lago dell'Accesa (Massa Marittima), la cui origine risalirebbe secondo una leggenda al 26 luglio 1218, festa di S. Anna. In quel giorno di festa il proprietario dei terreni, in cui attualmente si trova il lago, volle trebbiare il grano. A seguito di questo, secondo il racconto “ *verso mezzogiorno il cielo improvvisamente si rabbuiò.*

Nuvole minacciose si addensarono sopra l'Accesa mentre tremori sconvolassavano le terra. I trebbiatori colti alla sprovvista, cercarono di mettersi al riparo, cercando scampo sotto gli alberi, chi nei capannoni chi nella casa del Turco. Ma non ci fu nulla da fare una fenditura si aprì nel terreno lungo tutta l'aia e rapidamente divenne un'enorme voragine. La terra precipitò dentro, le messi furono inghiottite, i capanni e la casa sprofondarono con tutti i malcapitati che avevano creduto di trovarvi riparo, mentre lingue di fuoco si levavano dal sottosuolo. Nello stesso tempo si aprirono cateratte dal cielo e un diluvio si precipitò sull'Accesa...Dopo mezz'ora di questa musica, la terra finalmente si raffreddò, il cratere con altri brontolii lamentosi poco a poco si richiuse e il sole ricomparve di nuovo ma dove fino a poco tempo prima c'era un'aia, trebbiatori e bionde spighe a perdita d'occhio, ora c'era solamente un piccolo lago verde azzurro con qualche bagliore rossastro”.

Anche il nome del lago Accesa dovrebbe derivare da una luce misteriosa che sembrava provenire dalla profondità e che emanava bagliori rossastri.

Il primo a parlare del lago dal punto di vista scientifico fu Santi (1809) nel suo lavoro *Viaggio terzo in Toscana* in cui l'autore afferma: *“la profondità in mezzo al Chiaro è grandissima. Parvemi che egli tragga le sue acque da polle del suo proprio fondo e le acque dell'emissario, regolate da cataratta, manda le sue acque ai forni dell'accesa ove si fonde e si ripurga il minerale dell'Elba”.*

Nei primi anni del 1800 le acque del lago erano utilizzate per gli impianti di lavaggio delle vicine miniere dell'Accesa, proprio in virtù dello stato perenne del lago alimentato dalle sorgenti al fondo.

Ripetti nel 1833 tenta di calcolare le dimensioni reali del Lago ma non dà nessun giudizio in merito all'origine dello stesso affermando: *”non appartiene alla serie di ristagni palustri, sivvero entra nel numero di quelli che Virgilio chiamò con il suo vero epiteto vivique lacus” .*

4.6.1 Inquadramento geomorfologico, geologico ed idrogeologico

L'area circostante il Lago dell'Accesa, nei dintorni di Massa Marittima, è caratterizzata da depressioni subcircolari attribuite a processi carsici.

La prima è il bacino della Ghirlanda ad est di Massa marittima, il secondo è quello delle Venelle ad ovest, dal quale si originano le sorgenti omonime, quello di Schiantapetto e procedendo verso Sud quello dell'Aronna ed infine quello dell'Accesa.

Dal punto di vista morfologico il bacino dell'Accesa presenta forma allungata in direzione NS, una piccola insenatura lo divide da un'altra depressione all'interno della quale si rinvencono le sorgenti dell'Aronna. Raggiunge i 30 metri di profondità. (Fig. 18).

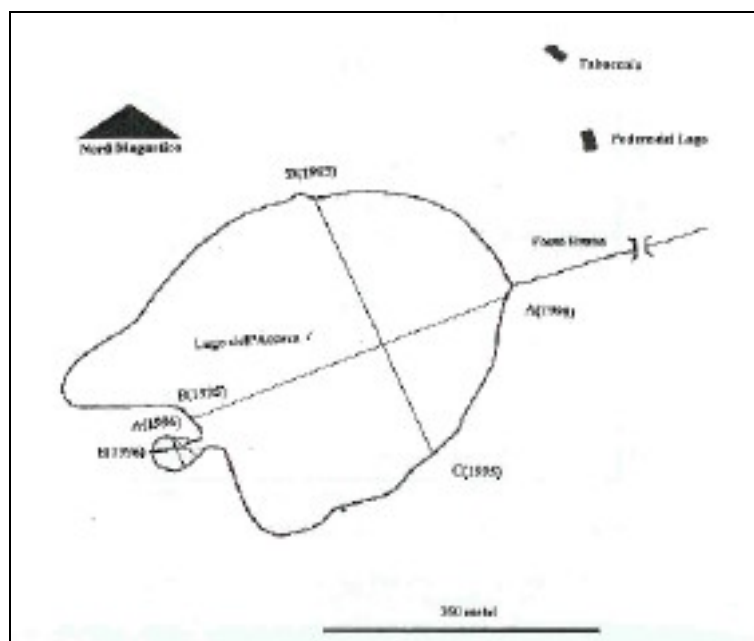


Fig. 18 – Il Lago dell'Accesa (da Negri, 1998)

Le sorgenti delle Venelle, dell'Aronna e dell'Accesa si allineano secondo una direttrice circa N-S. La sorgente delle Venelle, a quota 164 m, è posta all'interno di una dolina originata sul Calcare cavernoso, su cui poggiano stratigraficamente gli argilloscisti eocenici. L'area sorgentifera in realtà è costituita da una serie di emergenze la cui portata totale è di 300 l/sec..

La sorgente dell'Aronna è costituita da due gruppi di polle, alcune formanti laghetti, impostatesi sugli argilloscisti e sedimenti fluvio-lacustri ai bordi di una dorsale costituita da Calcare Cavernoso. La portata totale è di 850 l/sec (Deferrari & Lotti, 1886).

Dal punto di vista geologico nell'area sono presenti tre formazioni: un substrato del Permiano costituito da scisti, su cui poggia la formazione del Calcare Cavernoso, molto permeabile ed erodibile che ben si presta allo sviluppo di carsismo. Il Calcare Cavernoso affiora a N e a W del lago.

Al di sopra del Calcare Cavernoso si rinvencono gli Argilloscisti a Galestri e Palombini.

Il quaternario è rappresentato da detriti che si trovano al di sopra degli argilloscisti e formano una fascia che circonda il Lago.

L'area è interessata da due sistemi di faglie: un sistema N-S o NNW-SSE e uno ortogonale ENE-WSW. I due sistemi si intersecano proprio in corrispondenza del Lago dell'Accesa.

I primi studi di carattere geologico del lago si hanno nel 1886 (De ferrari & Lotti) in cui gli Autori ricollegano l'origine del lago a fenomeni carsici e parlano anche di altre sorgenti che si allineano in direzione N-S secondo una medesima direttrice con il Lago dell'Accesa. Le sorgenti delle Venelle e dell'Aronna che distano in linea d'area 2,2 km da quelle dell'Accesa e vengono a giorno alla stessa quota da p.c..

Il lago presenta un canale di scarico, che fu ripristinato ed approfondito nel 1912 dall'Azienda Agraria Società Montecatini con abbassamento del livello del Lago di 50 cm, bonificando tutta la zona circostante.

Le dimensioni del lago sono state rilevate per primo da Merciai (1933); il lago presenta forma ellittica con asse maggiore di 580 m e asse minore di 390 m, la profondità massima è stata stimata dallo stesso Autore essere di 40 m.

Il lago ha subito variazioni di forma e dimensioni nel tempo le variazioni nella planimetrie dal 1832 al 1919 sono state riportate da Merciai (1933), le

ultime misusure batimetriche sono state effettuate da Negri nel 1995 (Negri, 1998).

La temperatura risente della temperatura esterna ed oscilla dagli 8° ai 25 ° circa.

La sorgente a fondo lago ha portata di 68 l/sec secondo Perrone (1912), risultava invece a De Ferrari e Lotti (1886) di 160 l/sec; mentre la portata del piccolo canale emissario è di 10 l/sec.

4.7 I laghi di Capalbio

Nell'entroterra dell'Argentario, nei pressi di Capalbio, vi sono una serie di laghi (S. Floriano, Marruchetone) la cui origine può essere ricondotta a fenomenologie di collasso carsiche, più o meno profonde, (Mori, 1932; Censini & Costantini, 2002, Gonnelli *et alii*, 2002) alcuni di essi possono essere stati originati da fenomenologie di piping sinkhole. Circa l'origine del Lago di S. Floriano, avvenuta il 4 agosto di un anno imprecisato (nel 1832 il Lago era già rappresentato sulle mappe), vi è una leggenda molto simile a quella del Lago dell'Accesa. Nella Maremma toscana il 4 agosto è un giorno dedicato a San Floriano, santo protettore dei trebbiatori, in quel giorno è usanza antica sospendere i lavori di trebbiatura e fare festa. La leggenda narra che alcuni trebbiatori non vollero interrompere i lavori nei campi dove ora c'è il lago. Ad un tratto il terreno tremò e si aprì una cavità che travolse i lavoratori e che fu subito riempita d'acqua

4.7.1 Inquadramento geomorfologico, geologico ed idrogeologico

Il Lago di S. Floriano

Il Lago di S. Floriano, che dista da Capalbio (GR) 5,5 km, è di origine incerta: si è formato, in base a notizie storiche, alla fine del secolo scorso, in seguito ad eventi improvvisi, su di un substrato carbonatico a notevole profondità sormontato da depositi continentali.

Il Lago è ubicato allo sbocco della Valle dei Ceppi compresa tra i Poggetti e Poggio di Capalbiaccio; presenta un immissario Fosso di S. Floriano ed un emissario Fosso del Melone.

Il Lago è posto a quota 9.5 s.l.m., ha forma pressoché circolare, resa leggermente irregolare dallo sbocco dell'immissario. La sponda nord-occidentale del Lago è vicina agli affioramenti della dorsale carbonatica mentre tutto il resto del lago ha sponde paludose (Fig. 19).



Fig. 19 – Il Lago di S. Floriano (Capalbio)

Il Lago di S. Floriano dal punto di vista geologico poggia su sedimenti limosi palustri (tp) alla cui base affiora un substrato costituito da Calcare Cavernoso (cv).

Il diametro massimo è di 228 m il minimo di 195 m, la profondità media di circa 2.5 m, quella massima di 5 m

I laghi del Marruchetone

Ad ovest del Lago del Cutignolo, presso Casale del Marruchetone, sono presenti due laghetti.

Il primo denominato del Marruchetone, ma che noi chiameremo del Bosco Schiapparello, sembra essersi formato circa una trentina di anni fa (prima del 1970 dai racconti degli abitanti) in un unico evento catastrofico.

Nasce a ridosso di un piccolo rilievo allungato, all'interno di un bosco di querce, antistante la piana, e poggia dal punto di vista geologico sulla formazione dei Galestri e palombini.

Il laghetto all'origine aveva una morfologia circolare, successivamente è stato allungato artificialmente all'interno del bosco. Il diametro iniziale doveva essere di una cinquantina di metri (oggi ha forma ellissoidale con asse maggiore di circa 80 m) e profondità molto scarsa 2-3 m. Durante la stagione secca il livello dell'acqua si abbassa ma mai si arriva all'estinzione.

La temperatura delle acque è risultata 6°C, la conducibilità 175,4 μs .

Il secondo lago che definiremo del Marruchetone, ubicato sempre all'interno della tenuta omonima, si è formato circa quindici anni fa durante la stagione invernale. L'area occupata dal bosco è stata disboscata ed arata (i lavori sono durati una decina di giorni circa), il giorno successivo all'aratura, si è verificato uno sprofondamento catastrofico con fuoriuscita istantanea di acque che hanno dato origine ad un laghetto.

Le fratture dovute allo sprofondamento hanno interessato un'area più vasta arrivando sino alla strada.

Attualmente gli argini sono stati antropizzati e il laghetto sempre perenne viene utilizzato a fini irrigui nella tenuta (Fig. 20). Il vicino torrente Radicata durante la stagione stiva si asciuga mentre il lago del Marruchetone mantiene costante il suo livello.

Le dimensioni sono di circa 60 m di diametro e profondità di 3-4 m.

La temperatura è risultata di 6°C la conducibilità di 677 μs .



Fig. 20 – Il laghetto del Marruchetone (Capalbio)

5. Conclusioni

I laghi carsici originatesi, in seguito ad un crollo repentino della volta (doline di crollo), e sprofondamenti di differente natura sono frequenti in tutta la penisola italiana e concentrati in alcune aree le cui caratteristiche geologiche e il cui contesto geologico stratigrafico sono predisponenti per il loro innesco (Carso Triestino, Sicilia, Appennino centro-settentrionale) molti di essi sono stati segnalati e studiati in epoca storica.

Alcuni casi potrebbero, tuttavia, in seguito ad una rilettura delle cause che hanno portato alla loro origine, essere compatibili con fenomeni di sub-erosione, *suffosione*, ed essere attribuiti a fenomenologie di *piping sinkhole* (Nisio, 2003, Nisio *et alii*, 2004, Caramanna *et alii*, 2004) la cui genesi è connessa a meccanismi di risalita delle acque.

Il primo passo per l'attribuzione di un laghetto ad un fenomeno di sinkhole è quello di esaminare ed accertare le prime condizioni geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche al contorno, che possono essere tratte dalla letteratura storica e geologica.

- 1) Il laghetto deve essere impostato su depositi sciolti, terreni (alluvioni, depositi marini, depositi marnosi o scistosi, che comunque si comportino come terre) e non direttamente su roccia carsificabile (su carbonati, evaporiti, o altre rocce solubili).
- 2) Lo spessore di tale copertura deve essere considerevole, superiore almeno ai 20-30 m, per poter ipotizzare la presenza di un carsismo sepolto, (ciò può essere accertato da un sondaggio o in mancanza di esso dalla ricostruzione della situazione geologica).
- 3) Il rilevamento geologico deve accertare la presenza di faglie di importanza regionale o sistemi di faglie che si intersecano.
- 4) Il rilevamento idrogeologico deve accertare la presenza di una circolazione idrica importante, e la presenza di sorgenti anche minerali nelle vicinanze.

- 5) L'evento di origine deve essere stato repentino e dunque catastrofico, l'accertamento di ciò necessita di una ricerca storica, molti laghetti si sono formati nei secoli passati a volta in epoca medioevale.
- 6) La presenza di sorgenti perenni a fondo lago è una condizione favorevole all'ipotesi di una genesi di questo tipo, sarebbe però necessario un loro accertamento e l'analisi della chimica delle acque per poter attribuire l'acqua di alimentazione ad un acquifero profondo.

Sono molti i laghetti che vengono segnalati come probabili sinkhole, è stata fatta pertanto una verifica su alcuni di essi secondo i criteri sopra esposti.

Nel Lazio sono stati analizzati tre dei laghetti presenti nella Piana di S. Vittorino:

Il Lago di Perno, il Pozzo di Mezzo e il Pozzo Burino. Le analisi delle acque non evidenziano anomalie geochimiche. Le morfologie riscontrate e le litologie farebbero supporre che l'origine degli sprofondamenti sia dovuta a fenomeni di dissoluzione in lenti di travertino. Tale fenomeno tuttavia, soprattutto per il Lago di Paterno, da solo non giustificerebbe la formazione dei laghetti. È pertanto probabile che vi siano altre cause quali fenomeni di risalita di acque in pressione con conseguente soffusione dei sedimenti della copertura.

Per il lago di Posta Fibreno la presenza di imponenti sorgenti subacquee causerebbe fenomeni di "liquefazione" dei sedimenti del fondo con probabile collasso e formazione di sinkholes.

Per i laghetti del bacino delle Acque Albule l'origine sembrerebbe da attribuire senza dubbio a fenomeni di dissoluzione dei travertini ad opera dei fluidi chimicamente aggressivi che risalgono lungo lineamenti tettonici. Per il Lago di S. Giovanni c'è la certezza che si sia formato a seguito del crollo della volta di una cavità ipogea preesistente nei travertini.

In toscana meritano di certo studi più approfonditi il Lago dell'Accesa e uno dei due Laghetti del Marruchetone trovandosi in situazioni litologiche, morfologiche e strutturali tali da poterli inserire in sinkholes s.s.

I laghi di S. Antonio sono verosimilmente impostati su depositi travertinosi; anche in questi casi tuttavia la presenza di sorgenti subacquee potrebbe contribuire alla formazione degli sprofondamenti per effetto "piping".

Gli studi da noi svolti non sono esaustivi si pensa pertanto di continuare le ricerche volte all'approfondimento delle indagini soprattutto relativamente ad una identificazione certa della presenza di sorgenti all'interno dei laghetti, ad una stima delle portate, ad uno studio idrochimico e ad una migliore definizione della morfologia sommersa. Questo al fine di giungere ad una modellizzazione del fenomeno ed alla formulazione di ipotesi predittive che consentano di identificare aree e situazioni geologiche potenzialmente adatte alla formazione di sinkholes nell'ottica di mitigare il rischio connesso a tale fenomenologia.

Ci si augura inoltre di poter ulteriormente sviluppare ed affinare le tecniche innovative di indagine diretta subacquea, conformemente a quanto avviene in ambito internazionale, al fine di valorizzarne al meglio le potenzialità.

6. Bibliografia

Accordi G., Carbone F., 1988, *Sequenze carbonatiche Meso-Cenozoiche*, Note ill. Carta delle Litofacies del Lazio-Abruzzo ed aree limitrofe Prog. Fin. Geod. CNR Vol. 5, 11-92

Agrillo E., Bono P., Caramanna G., Casella L., D'Andrea L., 2004, *Cavit  di collasso recenti e antiche nel bacino lacustre di Posta Fibreno (FR)*, Atti del convegno "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio" APAT – Roma (in stampa)

American Academy of Underwater Sciences (editor), 1996, *Standars for scientific diving certification and operation of scientific diving programs*, AAUS –430 Nahant Road, Nahant MA (USA) 71 pp.

Annunziatellis A., Beaubien S. E., Citoli G., Lombardi S., Nisio S., Nolasco F., 2004, *Studio dei parametri geologici e geochimici per la comprensione dei meccanismi genetici degli sprofondamenti nella Piana di S. Vittorino (RI)*, Atti del convegno "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio" APAT – Roma (in stampa)

Boni C., Bono P., Calderoni G., Lombardi S., Turi B., 1980, *Indagine idrogeologica e geochimica sui rapporti tra ciclo carsico e circuito idrotermale nella Pianura Pontina (Lazio meridionale)*, Estr. Geologia Applicata e Idrogeologia, Vol. XV, Bari, 204-247

Boni C., Bono P., Capelli G., 1986, *Schema idrogeologico dell'Italia Centrale*, Memorie Società Geologica Italiana 35, 991-1012

Boni C., Bono P., Capelli G., 1988, *Carta idrogeologica del territorio della Regione Lazio*, Regione Lazio – D.S.T. Università “La Sapienza” Roma

Bono P., 1995, *The Sinkole of Doganella (Pontina Plain, central Italy)* Environmental Geology 26, 48 – 52

Camponeschi B., Nolasco F., 1983, *Le risorse naturali della Regione Lazio*, Vol. 8 Regione Lazio

Capelli G., Petitta M., Salvati R., 2000, *Relationship between catastrophic subsidence hazards and groundwater in the Velino valley (Central Italy)*, Proceeding Sixth International Symposium on Land Subsidence SISOLS 2000, Ravenna – Italy – 1, 123-136

Caramanna G., Malatesta R., Rosa C., 2001, *Scientific utilization of ROV Technology by the University of Rome*, Proceeding of Underwater Intervention 2001 Tampla, FL USA

Caramanna G., 2001, *Scientific utilization of Scuba Diving and ROV Techniques in an inland flooded sinkhole in the Latium region (Central Italy) for the hydrogeological and geochemical study of the karst water resource*, Geoitalia 2001 – 3° Forum Italiano di Scienze della Terra – Chieti 5-8 Settembre 2001 (Poster)

Caramanna G., 2001, *Idrogeologia, Idrologia e Morfologia di sinkholes rappresentativi della regione Lazio*, Tesi di laurea inedita Università La Sapienza – Roma

Caramanna G., 2002, *Morfologia, idrogeologia e chimismo dei sinkholes delle sorgenti delle Acque Albule*, Atti del convegno “Il travertino: aspetti naturalistici e sfruttamento industriale all’inizio del terzo millennio” Guidonia 27-28 Ottobre 2000 pp. 33-43

Caramanna G, Gary M., 2004, *Applicazioni di metodologie di immersione scientifica e ROV nello studio geologico comparato dei due sinkholes allagati più profondi del Pianeta: Pozzo del Merro (Lazio – Italia Centrale). El Zacaton (Taumalipas – Messico)*, Atti del convegno “Stato dell’arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio” APAT – Roma (in stampa)

Caramanna G., Nisio S., Vita L., 2004, *Fenomeni di annegamento dei sinkholes: casi di studio su alcuni laghetti di origine incerta*, Atti del convegno “Stato dell’arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio” APAT – Roma (in stampa)

Censini G., Costantini A., 2002, *Il sottosuolo della pianura tra Grosseto e Ribolla: ipotesi sul suo assetto strutturale*, in *Le voragini catastrofiche. Un nuovo problema per la Toscana*. Atti Con. 31 marzo 2003 GR. Regione Toscana, 231-241

Centamore E., Nisio S., Rossi D., 2004, *Aspetti geologico-strutturali in relazione alla formazione della sinkhole plain di S. Vittorino*, Atti del convegno “Stato dell’arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio” APAT – Roma (in stampa)

Cramer H., 1941, *Diesystematic der Karstdolinen*

Crema C., 1915, *Improvvisa formazione di una dolina presso Montecelio*
Boll. Soc. Geol. It. 34 Roma, 273-276

Ciotoli G., Di Filippo M., Nisio S., Romagnoli C., 2000, *La Piana di S. Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, strutturali, geomorfologici, geofisici e geochimici*, Mem. Soc. Geol. It 56, 297-308

De Ferrari P., Lotti B., 1886, *Le sorgenti dell'Aronna delle Renelle e del Lago dell'Accesa presso Massa Marittima*, Boll. Del. R. Com. Geol. D'It 17, 3-4

Del Zanna, 1901, *I laghi di S. Antonio in provincia di Siena* Boll. Soc. Geol. It. VIII, 281-288

Facenna C., Florindo F., Funiciello R., Lombardi S., 1993, *Tectonic setting and sinkhole features: case histories from western central Italy*, Quaternary Proceeding n. 3, 47-56

Fairbridge C., 1968, *The Encyclopedia of Geomorphology*, Rehinold Ed., NY

Field M. S., 1999, *A Lexicon of Cave and Karst terminology with special reference to environmental Karst Hydrology*, United States Environmental Protection Agency

Flemming N. C., Max M. D. (editors), 1996, *Scientific Diving: a General Code of Pratic*, Best Publishing Company – UNESCO Publishing

Gary M. O., Sharp J. M., Caramanna G., Havens R. S., 2003, *Volcanically influenced speleogenesis: forming el sistema Zacaton, Mexico and Pozzo del Merro, Italy, the deepest phreatic sinkholes in the world*, Geological Society of America – 2003 Seattle Annual meeting -November 2-5, 2003

Gonnelli I., Mattioli V., Micheli L., 2002, *Primo contributo all'individuazione delle aree a rischio sinkhole in Toscana: il carsismo nel Calcare Cavernoso*, in Le voragini catastrofiche. Un nuovo problema per la Toscana. Atti Con. 31 marzo 2003 GR. Regione Toscana, 231-241

Heine J. N., 1999, *Scientific Diving Techniques*, Best Publishing Company

Hyatt J.A. & Wilkes H. P. Jacobs. P. M., 1999, *Spatial relationship between new and old sinkholes in covered karst, Albany, Georgia, USA*, Hydrogeology an Engineering Geology of Sinkholes and Karst – Beck, Petit, Herring (eds), 37-44

Jenkins S. A., Nyquist J. E., 1999, *An investigation into factors causing sinkhole development at a site in Northampton County, Pennsylvania*, Hydrogeology an Engineering Geology of Sinkholes and Karst – Beck, Petit, Herring (eds), 45-50

Jennings J. N., 1985, *Karst Geomorphology*, Basil Blackwell, New York

Kearey P., 2001, *The new Penguin Dictionary of Geology II edition*, Penguin Books

Lowe D., Waltham T., 1995, *A Dictionary of Karst and Caves*, Cave Studies Series N. 6 British Cave Research Association

Manfredini M., 1949, *Alcuni dati sulla falda idrica che alimenta le sorgenti delle Acque Albule*, Boll. Serv. Geol. d'Italia, 71: Nota VIII

Mattei M., Montone P., Salvini F., 1986, *Analisi strutturale dei rilievi del margine appenninico intorno a Tivoli (Roma)*, Mem. Soc. Geol. It. V. 35, 579-589

Merciai G., 1933, *Il lago dell'Accesa presso Massa Marittima*, Atti della Soc. Tosc. Sc. Nat. Pisa Mem. 43, 29-50

Monroe W. H., 1970, *A glossary of karst terminology*, USGS Water Sup.

Mori A., 1932, *Ricerche sui laghi dell'orbetellano e del capalbiese*, Boll. Soc. Geol. It. 51(1), 1-52

Nisio S., 2003, *I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia Centrale*, Il Quaternario 16(1), 121-132

Nisio S., Salvati R., 2004, *Fenomeni di sprofondamento catastrofico. Proposta di classificazione applicata alla casistica italiana*, Atti del convegno "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio" APAT – Roma (in stampa)

Nisio S., Graciotti R., Vita L., 2004, *I fenomeni di sinkhole in Italia: terminologia, meccanismi genetici e tematiche aperte*, Atti del convegno “Stato dell’arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio” APAT – Roma (in stampa)

National Oceanic and Atmospheric Administration, 2001, *NOAA Diving Manual fourth edition*, James T. Joiner Editor, Best Publishing Company

Negri M., 1988, *Contributo alla conoscenza del Lago dell’Accesa, Massa Marittima (GR)*, Atti Mus. Stor. Nat. Maremma 17, 129-139

Nolasco F., 1998, *La Piana di S. Vittorino. Contributo allo studio dei processi evolutivi dei rischi e della prevenzione*, Regione Lazio – ACEA

Santi G., 1809, *Viaggio Terzo per la Toscana*

Segre A. G., 1948, *I fenomeni carsici e la speleologia del Lazio*, Pubblicazioni dell'Istituto di Geografia dell'Università di Roma, Serie A, N. 7, 61-67

Sharp J. M., 2000, *A Glossary of Hydrogeological terms*, Department of Geological Sciences, The University of Texas, Austin, Texas

Solenghi C., Borgioli M., Faitelli M., 1999, *Il sistema acquedottistico Peschiera – Capore*, ACEA S.p.A.

White W. B., 1988, *Geomorphology and hydrology of karst terrains*, Oxford University Press, New York

Zuppi G. M., Fontes J. C., Letolle R., 1974, *Isotopes du milieu et circulations d'eaux sulfurees dans le Latium*, Proc. Symp. Isot. Tech. in Groundwater Hydrology IAEA Vienna