

BOSSEA MMXIII

CONGRESSO NAZIONALE

LA RICERCA CARSOLOGICA IN ITALIA

Frabosa Soprana (Cn) – Grotte di Bossea
22-23 giugno 2013

ATTI

LABORATORIO CARSOLOGICO SOTTERRANEO DI BOSSEA
STAZIONE SCIENTIFICA DI BOSSEA CAI CUNEO – COMITATO SCIENTIFICO CENTRALE DEL CAI

2007-2012 Sei anni di rilevamenti ambientali e del radon in grotta Forra Lucia (720/T/PO) (Monti della Calvana - Prato)

FIASCHI ANDREA (*), FIORENZO GEI (**)

RIASSUNTO

La catena dei Monti della Calvana è costituita, per la maggior parte, da rocce appartenenti alla Formazione di Monte Morello, indicata dai vecchi Autori come Alberese o anche come Calcare ad Helmintoidi. La formazione appartiene all'Unità della Calvana che, con l'Unità Ofoilitica che ne costituiva probabilmente l'originario substrato, formava una successione "oceanica" completa in cui sono riconoscibili diversi livelli litostratigrafici: quello basale delle ofioliti, in cui troviamo rocce magmatiche e metamorfiche, quelli prevalentemente pelitici tra cui Argilliti a Palombini, quelli torbiditici, in prevalenza argillitico-arenacei (la Formazione di Sillano) o calcareo marnosi (la Formazione di Monte Morello). Nei calcari marnosi e nelle marne calcaree il fenomeno carsico si presenta sia con forme epigee sia ipogee, quest'ultime in strutture non molto estese a causa del notevole quantitativo di argilla che residua dalla alterazione delle marne.

La grotta di Forra Lucia (720/T/PO), percorsa in tutta la sua lunghezza da un torrente, si apre in sinistra idrografica del Rio Buti (335 m.s.l.m.), sul versante pratese dei Monti della Calvana. La cavità è impostata su diaclasi in corrispondenza di una struttura tettonica - la faglia del Rio Buti - dove possono verificarsi risalite di fluidi endogeni. Alla fine del 2003, grazie alla disponibilità di sistemi di rilevamento ambientale caratterizzati da una grande resistenza alle condizioni microclimatiche tipiche della grotta, Forra Lucia è stata attrezzata a stazione ipogea di presa dati ambientali e, nel 2007, anche per il rilevamento delle quantità di gas radon 222 in atmosfera.

Il Radon 222 è un elemento radioattivo, tempo di semivita 3,81 giorni, appartenente al gruppo dei gas nobili, che si origina per decadimento alfa dal radio 226. Nei pressi dell'area in analisi rocce contenenti metalli pesanti, quali il radio e i suoi precursori, sono presenti esclusivamente sul Monteferrato (serie ofiolitica), pochi chilometri a occidente della Calvana.

Forse per l'improbabilità di trovarne, nessuno aveva testato la presenza di radon all'interno di ipogei carsici insistenti sui calcari dei Monti della Calvana. Nel dicembre 2004, grazie ad un intervento con rilevatore portatile di radioattività alfa da parte di Guido Peano, direttore del laboratorio sotterraneo della Grotta di Bossea (CN), venne scoperto che nell'atmosfera della grotta di Forra Lucia era presente una notevole quantità di Radon 222; gas che non pochi geologi ritenevano essere uno dei più accreditati precursori sismici.

Nel marzo 2007 prese definitivamente avvio il monitoraggio della concentrazione del radon in atmosfera grazie ad un sensore AlphaGUARD PQ2000 Genitron; in pratica un contatore Geiger costituito da una camera a ionizzazione ottimizzata per la misura di impulsi α .

I dati raccolti mostrano che, in media, le emissioni si attestano sui 4000 Bq/m³, con il massimo tra 7000 e 10.000 Bq/m³ ed il minimo intorno agli 800 Bq/m³; appaiono inoltre evidenti un andamento periodico delle emissioni e una relazione diretta tra la saturazione d'acqua delle fratture del sistema carsico e le emissioni di radon veicolate dalle medesime fratture.

Due le spiegazioni plausibili per la forte presenza di questo gas nella grotta: che il gas risalga attraverso le fratture profonde da un basamento costituito da rocce magmatiche e metamorfiche, sottostante alla formazione carbonatica a conferma di quelle che sono le convinzioni che si vanno affermando nella definizione della geologia regionale, oppure che il radon origini dalle argille residuali dal disfacimento dei calcari della Calvana.

Le stazioni sismiche gestite dall'Istituto Geofisico Toscano - fondazione Prato Ricerche - si trovano numerose nell'area del Mugello (FI) ed in provincia di Prato e rilevano tutta l'attività sismica locale a partire da valori di magnitudo superiori a 0.8 Richter. Comparando i loro dati con quelli delle variazioni della quantità di radon 222 in Forra Lucia, nel tentativo di dare al radon il significato di precursore sismico, l'unica corrispondenza significativa trovata è quella con la crisi sismica del settembre 2009. Si osserva però che il massimo di radon 222 segue di tre giorni il mainshock di magnitudo 4,5. Di conseguenza più che di "precursore" dovremmo parlare di "successore" del terremoto. Per tutti gli altri eventi sismici registrati non si sono rilevate variazioni significative nel radon.

KEY WORDS: *Forra Lucia, radon 222, radioattività alfa, precursore sismico.*

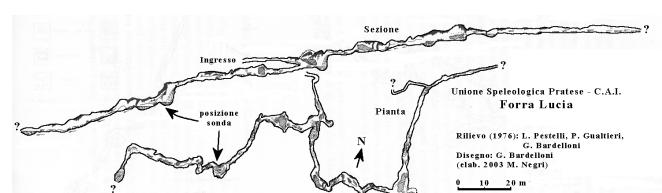


Fig. 1 – Pianta e sezione della grotta Forra Lucia (720/PO, Monti della Calvana, Prato, quota ingresso 317 s.l.m., coordinate ingresso 671916E – 4865066N, dislivello totale 31 m., sviluppo 270 m.ca.)

INTRODUZIONE

La grotta denominata Forra Lucia (720/T/PO) si apre sul versante pratese dei Monti della Calvana, in sinistra idrografica del Rio Buti ed è percorsa, in tutta la sua lunghezza, da un torrente collettore che vede la luce, nello stesso Rio Buti, da una sorgente perenne situata pochi metri sotto la grotta detta della Fonte Buia Inferiore. Quest'ultima è, in definitiva, un

(*) Sismologo Istituto Geofisico Toscano

(**) Chimico, Collaboratore Museo di Scienze Planetarie Prato, Speleologo e ONCN CAI

sifone di non meglio precise dimensioni, un ramo semifossile che nei periodi di massima portata funziona da scarico di troppo pieno, sia per Forra Lucia, che per un sistema carsico ancora sconosciuto la cui esistenza è ipotizzata in base alla sproporzione osservata in certi periodi dell'anno tra i volumi di acqua uscenti da questa risorgiva e quelli fluenti entro Forra Lucia.

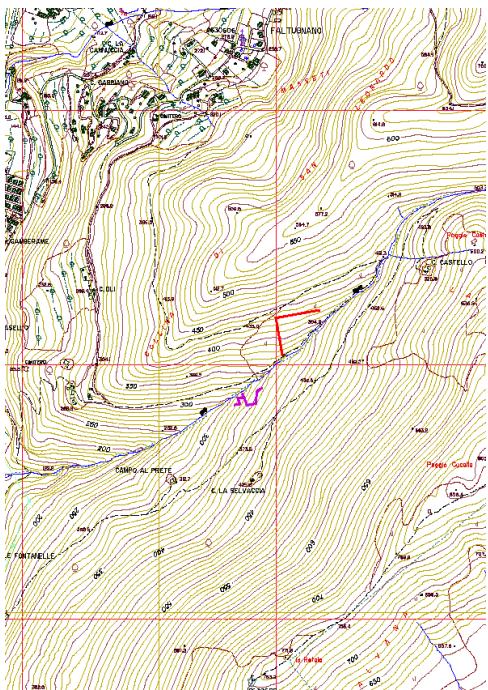


Fig. 2 – La carta mostra, in rosso, la posizione e lo sviluppo della Grotta della Fontebuia e, in violetto, la posizione e lo sviluppo della grotta della Forra Lucia. Da dove termina il tratto percorribile all'uomo della Forra Lucia al Rio Buti stanno le gallerie sommerse di Fonte Buia Inferiore che ricevono le acque anche da altro sistema carsico al momento sconosciuto.

Nel novembre 1975 i soci del Gruppo Speleologico Pratese, oggi Unione Speleologica Pratese del CAI, riuscirono ad entrare nella grotta di Forra Lucia dopo aver asportato decine di metri cubi di materiale presenti nel corridoio d'ingresso, inizialmente un condotto a pressione nel quale si depositavano i sedimenti trasportati dalla corrente mano a mano che questa diminuiva la sua velocità. Durante l'esplorazione della cavità gli speleologi constatarono che questa avrebbe potuto facilmente ospitare un laboratorio ipogeo senza che si rendessero necessari lavori di adattamento. Per questo, nel dicembre 1979, chiesero ed ottennero un comodato gratuito, a nome del CAI di Prato, dai proprietari del fondo dove si trova la grotta. Dopo quasi un anno di lavoro, il 30 novembre 1980, venne inaugurata la prima versione del laboratorio, nel quale si sarebbero dovuti misurare periodicamente i principali parametri ambientali per determinare le condizioni microclimatiche ed idrologiche della grotta.

Ad un breve periodo di attività seguì una lunga fase di stasi durante la quale non furono prelevati dati a causa della mancanza di strumentazione idonea. Finalmente il laboratorio riprese a funzionare alla fine del 2003 grazie alla disponibilità

di nuovi sistemi di rilevamento ambientale caratterizzati da una maggiore resistenza alle condizioni microclimatiche della grotta rispetto alle attrezzature disponibili un quarto di secolo prima. L'acquisto degli strumenti è stato possibile grazie al contributo dell'Assessorato al governo del territorio ed aree protette della provincia di Prato.

Inizialmente nel laboratorio di Forra Lucia vennero messi in funzione una sonda multiparametrica e due datalogger. La sonda, di tipo sottomarino, grazie a cinque specifici elettrodi in vetro era in grado di rilevare, ad intervalli di tempo determinati e scelti a piacere, la portata, la temperatura, l'ossigeno dissolto, il pH e la conducibilità dell'acqua del torrente sotterraneo. I datalogger avrebbero rilevato, nel frattempo e con la stessa scansione temporale, umidità relativa e pressione barometrica dell'aria, temperatura della roccia in superficie grazie ad un foro praticato in una parete, alla profondità di 120 cm.

Il monitoraggio ambientale veniva integrato dalla periodica analisi chimica quantitativa, secondo le norme del D.L. 152 (ultima versione 29/04/2006), dei principali parametri qualitativi dell'acqua.

I geologi che visitarono e studiarono Forra Lucia stabilirono che la cavità si sviluppa su diaclasi in corrispondenza di una struttura tettonica - la faglia del Rio Buti (vd. carta allegata) - dove possono verificarsi risalite di fluidi endogeni. Nel dicembre 2004 Guido Peano, direttore del laboratorio ipogeo del Comitato Scientifico Centrale CAI di Grotta Bossea (CN), venne invitato a portare in Forra Lucia un rilevatore portatile di radioattività alfa. Fu così che si rivelò, per la prima volta, la presenza, e in notevole quantità, di gas radon-222 nell'atmosfera di una grotta dei Monti della Calvana. Questa conoscenza evidenziò l'importanza, per non dire la necessità, di dotare il laboratorio ipogeo di uno strumento capace di rilevare quantitativamente in continuo la concentrazione del radon-222 atmosferico attraverso la sua radioattività alfa.

Alla fine del 2005, grazie all'intervento finanziario della provincia di Prato, fu acquistato un sensore AlphaGUARD PQ2000, ovvero un contatore Geiger costituito da una camera a ionizzazione ottimizzata per la misura di impulsi α . Durante il funzionamento normale dello strumento, il gas fluisce attraverso un filtro in fibra di vetro, di elevata superficie specifica, posto all'ingresso della camera a ionizzazione e verso l'interno della stessa. Attraverso questo filtro possono transitare solo le particelle alfa e il radon-222 gassoso, mentre i prodotti del suo decadimento vengono bloccati prima che possano entrare. Allo stesso tempo il filtro protegge la camera a ionizzazione da un'eventuale contaminazione di particelle esterne e da polvere presente nell'aria.

Dopo un periodo di messa a punto durato circa due anni dal 2007 si diede inizio al monitoraggio ambientale continuo del radon all'interno della grotta.

Il presente lavoro mostra i dati acquisiti ed alcuni spunti interpretativi sulle origini del gas e sulle sue relazioni con altri fenomeni naturali, in particolare i terremoti.

CONSIDERAZIONI METODOLOGICHE

Lo studio del radon in ambiente ipogeo abbraccia vari campi d'indagine, in questa sede sono stati considerati fondamentalmente: 1) gli aspetti geochimici, 2) quelli ambientali e sanitari e 3) quelli legati alle possibili relazioni tra la concentrazione del gas ed altri fenomeni naturali come i terremoti.

Aspetti geochimici

Il radon-222 è un gas che si origina per decadimento radioattivo dal radio, un elemento presente nel suolo e nelle rocce dove forma composti minerali. Il radio, a sua volta, viene generato, attraverso una serie di passaggi, dal decadimento radioattivo dell'uranio 238.

Il radon appartiene al gruppo dei gas nobili ed è quindi chimicamente pressoché inerte; questa sua caratteristica gli permette di risalire alla superficie, dalle profondità (?) in cui si forma, senza reagire lungo il percorso e, siccome a temperatura e pressione ambiente è inodore e incolore, la sua presenza non è rilevabile senza appositi strumenti. Questo gas è però caratterizzato anche da un'alta solubilità in acqua la quale, una volta formata la soluzione, lo può trasportare per lunghi tratti. Poiché la concentrazione del radon in atmosfera è in genere estremamente bassa, l'acqua di superficie (sorgenti, fiumi, laghi) a contatto con questa lo rilascia in continuazione, anche se, generalmente, in quantità molto limitate.

L'acqua di origine profonda però può presentare una assai più elevata concentrazione di radon-222 rispetto alle acque superficiali, per averlo solubilizzato passando su rocce che lo producono. Le acque dei collettori sotterranei, durante il loro percorso entro la grotta, possono quindi trasferire all'atmosfera dell'ipogeo gran parte del proprio contenuto in radon. Il trasferimento viene regolato, ovviamente, dal coefficiente di solubilità del gas in base alla temperatura delle acque ed è quindi favorito dal riscaldamento, per quanto modesto, che queste subiscono durante il percorso da monte a valle all'interno della grotta. Altro fattore facilitante la cessione del gas dal liquido all'aria è la presenza di rapide e cascate.

In definitiva la presenza e la quantità del radon-222 nell'atmosfera di una grotta è determinata dalla composizione delle rocce sopra le quali l'acqua è scorsa prima di entrare nella cavità; dalla composizione delle rocce nelle quali la grotta si sviluppa; dal tipo di roccia sottostante il massiccio calcareo e dalla fratturazione che collega questa all'ipogeo; dalla conformazione della grotta; dalla quantità di acqua che scorre nella cavità.

Essendo facilmente assorbito, trasportato e rilasciato dalle acque, la maggiore o minore presenza del radon in atmosfera sembra sia da collegarsi alle variazioni di portata dei collettori sotterranei. Questo però non sempre si verifica e, quando ciò avviene, possono darsi due fenomeni opposti:

- le acque portano e cedono radon: all'aumentare della portata del torrente aumenta la quantità di radon in atmosfera, come a Bossea;
- le acque portano via radon: all'aumentare della portata

del torrente una maggiore quantità di radon viene solubilizzato dalle acque e diminuisce il suo tenore in atmosfera, come a Forra Lucia.

Fondamentale è capire quali sono le formazioni di roccia nelle quali si trovano gli elementi da cui origina il radon e quale può essere la loro collocazione nel contesto geodinamico strutturale a piccola e grande scala. Nelle rocce carbonatiche, di cui si compongono in prevalenza i rilievi della Calvana, la quantità di uranio, e di conseguenza di elementi derivanti dal suo decadimento radioattivo, è quasi sempre bassissima. Quando, all'interno di un ammasso roccioso costituito prevalentemente da carbonato di calcio troviamo quantità di radon notevolmente superiori alla media della crosta terrestre dobbiamo chiedercene il motivo. Per Forra Lucia, e le altre grotte della Calvana, ancora non abbiamo una risposta definitiva.

Per cercare di capire la distribuzione del gas all'interno della catena calcarea dei Monti della Calvana, è stata rilevata la concentrazione di radon-222 sia in altre grotte della stessa Calvana - Grotta della Fonte Buia, Grotta dei Cacci e Buca del Cane -, che in due abitazioni della frazione di San Leonardo (borgo medievale, con case in pietra alberese, che si trova in prossimità del Rio Buti e di Forra Lucia), che in un rifugio antiaereo sul Monte Ferrato. Questi rilevamenti sono stati effettuati mediante campionatori passivi a tracce nucleari (dosimetri).

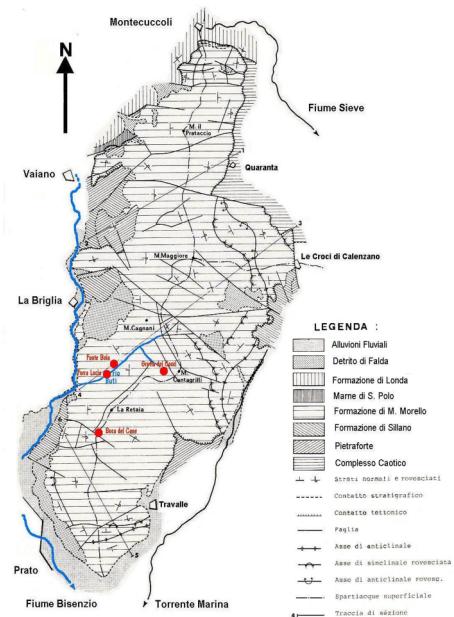


Fig. 3 – Carta geologica dei Monti della Calvana; in rosso le posizioni delle grotte sottoposte a rilevamento del radon in atmosfera (da F. Cicali - Tesi di laurea inedita - modificata).

Mentre nelle abitazioni di San Leonardo non sono stati evidenziati accumuli di gas, all'interno delle altre grotte, pur poste su diaclasi legate a faglie diverse da quella che interessa la grotta laboratorio, sono state rilevate concentrazioni sovrapponibili a quelle misurate in Forra Lucia. Discorso a parte merita il campionamento effettuato all'interno del rifugio

antiaereo presente sul Monteferrato. Quest'ultimo è un basso e poco esteso rilievo, tre coni di altezza massima 420 m slm molto prossimo ai Monti della Calvana, costituito fondamentalmente da serpentine - il "marmo verde di Prato" - e gabbri. Dagli studi geologici sappiamo che le rocce ofiolitiche (o serpentine), oltre che sul Monteferrato, sono molto probabilmente anche alla base della Calvana. Se l'origine del radon è legata al substrato ofiolitico soggiacente il massiccio calcareo, risulta fondamentale conoscere la concentrazione di radon al suo interno. Per questo motivo è stato sfruttato il rifugio antiaereo presente nel Centro di Scienze Naturali di Galceti che essendo scavato completamente per circa cento metri nelle ofioliti e con un pozzo interno per l'approvvigionamento idrico consente un perfetto campionamento del radon. Tre diversi rilevamenti sono stati eseguiti con dosimetri tenuti sul posto per sei mesi ogni volta ed hanno dimostrato che nel suo interno la radioattività non si discosta da quella media esterna: tra i 50 e i 100 Bq/m³. Le ofioliti sembrano quindi estranee alla presenza del radon all'interno della massa calcarea dei Monti della Calvana.

Da dove potrebbe allora prendere origine il radon-222 presente in così gran quantità nelle grotte testate?

Una vecchia analisi del Mancini, pubblicata nel 1951, mostra chiaramente che i calcari della Calvana devono essere definiti marnosi per il forte residuo di materiale argilloso derivante dalla loro dissoluzione: dal 7 al 27 % su sei campioni da lui prelevati.

Tabella 1 – Analisi Calcimetriche su rocce della Calvana pubblicate da Mancini nel 1951

Localizzazione dolina	quota slm	carbonato di calcio %	Residuo %
500 m a nord di Monte Maggiore	900	74	26
Monte Maggiore	900	78	22
Rio della Fonte al Favo	730	86	14
500 m dal passo della Croce	780	85	15
Poggio Castiglioni	395	93	07
dolina di Poggio Cocolla	780	89	11
500 m a nord di Case Selve di sopra	640	73	27

Il Mancini effettuò l'analisi con un calcimetro De Astis, strumento oggi superato. Abbiamo quindi prelevato altri sei campioni e li abbiamo sottoposti ad analisi in due diversi laboratori su apparecchio Axford.

I valori riportati in tabella indicano:

A) le quantità di carbonato di calcio, espresse in percentuale sul peso, presenti nel campione secondo analisi del CNR UniFi;

B) lo stesso dato, rilevato in un laboratorio privato;

C) le quantità di magnesio, espresse come percentuale di MgO (ossido di magnesio);

D) le quantità di alluminio, espresse come percentuale di Al₂O₃ (ossido di alluminio);

E) le quantità di silice espresse come percentuale di SiO₂ (anidride silicica);

F) le quantità di ferro, espresse come percentuale di Fe₂O₃ (ossido ferrico);

G) le quantità di potassio, espresse come percentuale di K₂O (ossido di potassio).

Tabella 2 – Analisi calcimetriche su campioni raccolti (2010, F.Gei et alii)

Camp.	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
1	82	84	0,30	1,66	9,67	1,15	0,14
2	96	97	0,00	1,28	2,91	0,69	0,08
3	65	65	1,07	5,05	21,98	1,96	1,00
4	82	83	0,46	2,19	11,04	1,07	0,22
5	91	91,5	0,18	1,34	7,07	0,83	0,03
6	87	86	0,33	2,04	9,31	1,01	0,24

I campioni sottoposti ad analisi sono stati prelevati (vedi carta geologica):

1) Terrazza di San Leonardo, da strato di alberese massiccio ed inalterato.

2) Rio Buti al guado di Campo al Prete, da deposito tipo travertino da acque

sature.

3) Piega coricata detta "Boomerang", al contatto tra uno strato di alberese e gli argillosi.

4) Il Crocicchio, dove nasce il Rio Buti, da strato analogo a quello di prelievo del campione 1.

5) Dolina del Ciuco, all'ingresso della grotta detta Buca del Ciuco.

6) All'interno della Grotta dei Cacci.

Come si vede i risultati delle analisi effettuate nel 1951 e quelle del 2010 sono sostanzialmente analoghi.

A nostro avviso potrebbero essere le argille residuali a contenere una quantità di metalli pesanti, tra i quali i genitori del radon. Per questo vorremmo sottoporre ad analisi i residui argilosì che si trovano, spesso in banchi anche di notevole potenza, all'interno delle grotte della Calvana.

Aspetti ambientali e sanitari

Nel caso del radon possono acquistare rilevanza considerazioni sulla salubrità delle emissioni, ovvero se la sua

presenza determina un problema di tipo sanitario e di quale entità. L'uomo è soggetto all'esposizione di diverse fonti di radiazioni ionizzanti di origine naturale; fra queste il radon si dice sia l'elemento che fornisce il maggior contributo. Essendo un gas, quando è presente nell'atmosfera lo si respira, se in seguito esso decade produce particelle alfa all'interno dei polmoni, particelle che possono provocare notevoli danni impattando con i tessuti polmonari. Per questo l'Organizzazione Mondiale della Salute (WHO), attraverso l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC), lo ha classificato, fin dal 1988, nel Gruppo 1; gruppo nel quale sono elencate le 95 sostanze per le quali si ha il massimo livello di certezza di cancerogenicità per l'uomo.

Diventa quindi di fondamentale importanza definire la concentrazione di radon all'interno delle grotte ed il suo decorso nel tempo sia per le attività speleologiche che ivi si svolgono, sia per le interazioni esistenti tra le acque che le attraversano ed il loro eventuale utilizzo a fini idropotabili.

Relazione tra radon ed attività tellurica

Può essere della più grande importanza, oltre che del più grande interesse, capire la causa delle anomalie della concentrazione del radon e valutare la possibilità che queste siano utilizzabili nella prevenzione di eventi sismici. Per cercare di capire se veramente sia possibile questo collegamento il CAI di Prato ha attivato una collaborazione con la fondazione "Prato Ricerche – Istituto Geofisico Toscano" proprietaria di una rete di monitoraggio sismometrico locale. La distribuzione territoriale della rete è stata pensata principalmente in funzione delle aree a maggior rischio sismico: in particolare le stazioni sono ubicate rispettivamente nei comuni di Pistoia (PSL - Passo della Collina, MTCR - Monte della Croce), Montemurlo (PTF - Fattoria di Iavello), Firenzuola (VISG - Visignano), Palazzuolo sul Senio (BIBN - Bibbiana), Marradi (LMD - Lutirano), Scarperia (SEI - Sant'Agata), Vicchio (VMG - Villore), Borgo San Lorenzo (BOSL - Monte Aguzzo), La rufina (RUF). Di queste SEI e VMG fanno parte anche della rete nazionale centralizzata e vengono pertanto ritrasmesse nella sede operativa dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Le stazioni sismiche rilevano tutta l'attività sismica locale a partire da valori di magnitudo superiori a 0.8 Richter.

Nel modello classico che spiega la genesi di un terremoto un ruolo importante è svolto dal processo di microfessurazione che precede il sisma nella zona della faglia 'stressata'. La costante apertura e chiusura di piccole fessure può favorire l'emissione di radon dalle rocce e farlo accumulare nelle acque freatiche e, in forma gassosa, nel suolo. Gli imponenti processi di deformazione nell'area della faglia sotto stress possono causare un sostanzioso aumento del flusso di radon, che raggiunge il picco nelle ore antecedenti il terremoto per poi diminuire subito dopo sia per il degassamento che per la chiusura repentina di queste microfessure (Scholz, C.H., L.R. Sykes e Y.P. Aggarwal 1973. Earthquake prediction: a physical basis. *Science* 181: 803-810.)

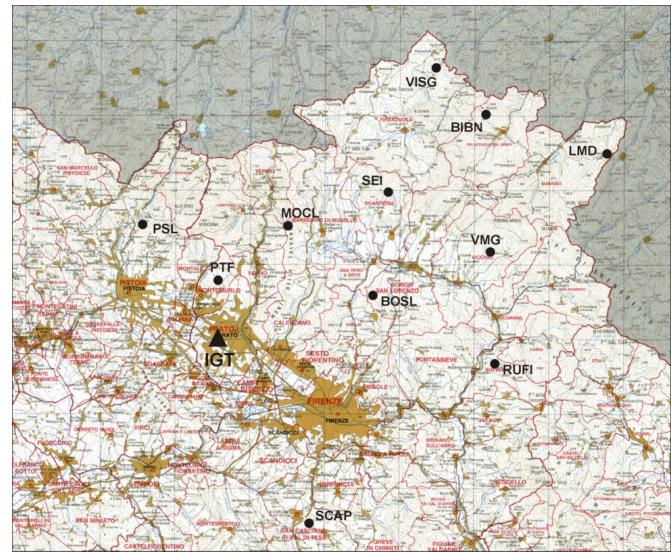


Fig. 4 – La rete sismometrica della Prato Ricerche - Istituto Geofisico Toscano.

Quindi all'arrivo di un sisma le fessure della massa rocciosa si stirano, si allargano e si deformano permettendo una risalita del radon in quantità superiori a quanto accade normalmente.

Normalmente per le misure di radon si considerano anomalie quelle che eccedono i valori di +/- 2 sigma, cioè due deviazioni standard (Igarashi G., Wakita H.; 1990: Groundwater radon anomalies associated with earthquakes, Tectonophysics, 180, 237-254). Se lo scopo dello studio delle anomalie è correlarle con i terremoti si aggiunge l'ulteriore condizione che gli eventi sismici devono avere magnitudo maggiore o al limite uguale alla seguente espressione:

$$M \geq 2.4 \log_{10} D - 0.43$$

Dove M è la minima magnitudo richiesta per ottenere un'anomalia di radon alla distanza D. (Hauksson, E. e J.G. Goddard 1981. Radon earthquake precursor studies in Iceland. *Journal of Geophysical Research* 86(B8): 7037-7054.). Nel presente lavoro si è fatto riferimento a questa espressione per la scelta degli eventi da sottoporre a valutazione.

RISULTATI DEL MONITORAGGIO

Il rilevamento della radioattività alfa in Forra Lucia è stato eseguito dal 2007 alla fine del 2012, campionando con frequenza oraria tramite AlphaGUARD PQ2000. Il monitoraggio è stato quindi pressoché continuo e tale da consentire di rilevare sia le variazioni stagionali che le variazioni a corto periodo. L'uso di dosimetri, che danno una misura totale del periodo di rilevamento, ci ha permesso di constatare l'esatta corrispondenza del valore medio da questi misurato e quello medio misurato dall'AlphaGUARD.

Sebbene il monitoraggio fosse iniziato nel marzo 2007, alcuni problemi tecnici legati alle difficoltà di alimentazione dello strumento hanno impedito di avere da subito un dataset

completo, in particolare mancano i dati di alcuni momenti nel periodo che va dal giugno 2007 al giugno 2008 e mancano pure alcuni brevi periodi della restante parte del 2008 e del 2009. Dal 2010 il dataset è completo per tre anni.

Nella grotta della Forra Lucia è stata rilevata una radioattività alfa da radon-222 che ha superato più volte i 10.000 Becquerel al metro cubo d'aria (Bq/m³). Questo contro una media esterna misurata compresa tra 30 e 100 Bq/m³. Nel grafico sottostante sono riportati i valori della concentrazione del radon misurati tra il giugno 2008 ed il dicembre 2012.

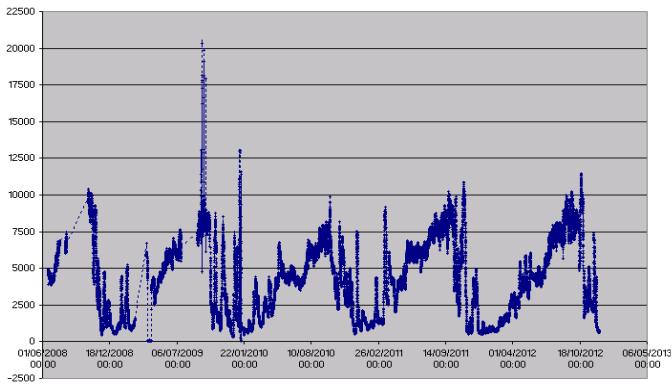


Fig. 5 – Concentrazioni di radon tra giugno 2008 e dicembre 2012.

Per conoscere meglio il fenomeno sono state eseguite anche determinazioni della concentrazione di radon nelle acque presenti all'interno della grotta Forra Lucia e della Grotta della Fonte Buia, acque che, in entrambi i casi, alimentano il Rio Buti e che, dopo poche centinaia di metri dalla loro risorgenza, vengono captate dall'acquedotto pratese. I valori di concentrazione rilevati nelle acque delle due grotte sono risultati notevolmente inferiori ai valori soglia previsti per gli usi potabili, con un valore massimo poco superiore ai 2,5 Bq/L.

Nel corso del periodo monitorato - 2007/2012 - sono stati registrati circa 3000 eventi sismici con due crisi sismiche di rilevo, avvenute rispettivamente a marzo del 2008 e settembre del 2009. Nell'occasione furono registrati ben 4 terremoti con magnitudo Richter superiore a 4, e con epicentro a circa 18 km dalla grotta Forra Lucia. Purtroppo la prima crisi è avvenuta proprio nel periodo durante il quale il monitoraggio di radon era stato momentaneamente sospeso per problemi tecnici.

Nonostante i periodi mancanti i dati raccolti mostrano delle caratteristiche interessanti: in primo luogo è evidente una marcata stagionalità, i massimi nelle emissioni si raggiungono sempre a fine settembre inizio di ottobre, mentre il minimo si rileva tra novembre e febbraio. In media le emissioni si attestano sui 4000 Bq/m³, con il massimo tra 7000 e 10000 Bq/m³ ed il minimo intorno agli 800 Bq/m³.

Notevoli i picchi assoluti annuali che nel 2009, in corrispondenza della crisi sismica di settembre, hanno raggiunto i 20.000 Bq/m³. Interessanti sono anche le pulsazioni che si rilevano nel periodo che intercorre tra il raggiungimento del minimo annuale e l'inizio della risalita con valori che partendo da 800-900 Bq/m³ arrivano anche a 9000 Bq/m³.

Venendo all'interpretazione dei dati osservati, appare evidente che l'andamento periodico delle emissioni deve essere legato a qualche fenomeno stagionale che condiziona il rilascio

del radon nell'ambiente della grotta. Le figure seguenti mostrano gli andamenti del radon rispetto a tre parametri scelti tra quelli più significativi nel contesto ipogeo nel quale sono state fatte le rilevazioni: Temperatura T°, umidità H e pressione atmosferica P. Per apprezzare meglio l'andamento relativo delle funzioni ciascuna variabile è stata normalizzata e riscalata all'interno del singolo grafico.

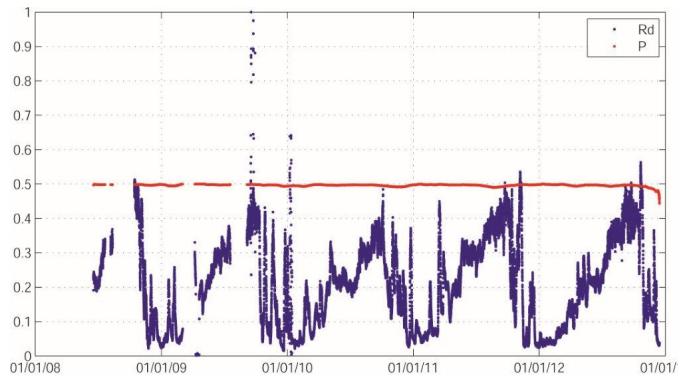


Fig. 6 – Radon e pressione atmosferica interna alla grotta.

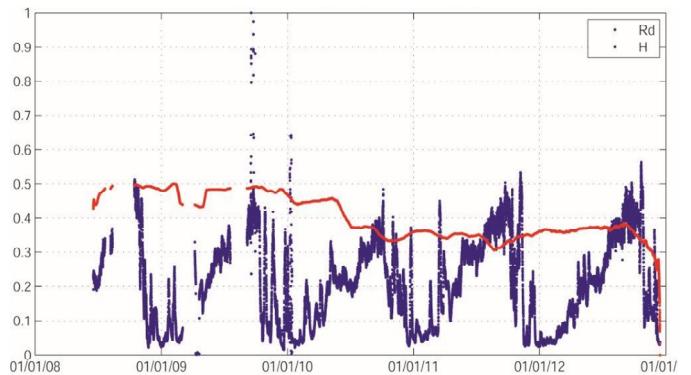


Fig. 7 – Radon e umidità relativa all'interno della grotta.

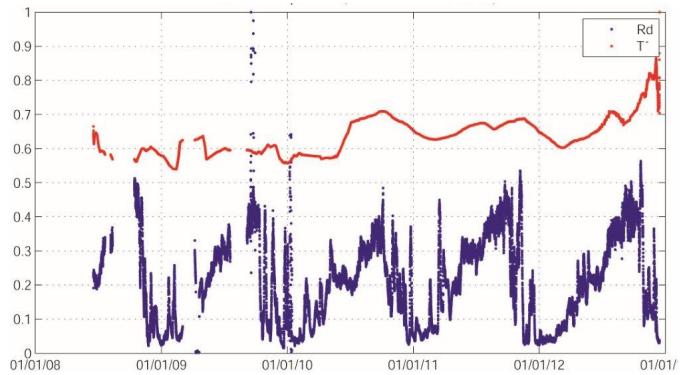


Fig. 8 – Radon e temperatura interna alla grotta.

Le brusche variazioni in tutti i parametri negli ultimi giorni del 2012 sono relative al trasporto degli strumenti all'esterno. Il trend all'aumento della temperatura e contemporanea diminuzione dell'umidità relativa, a partire dalla primavera 2010, è stato rilevato anche con altri strumenti di tipo classico. Da evidenziare che la zona dove insiste Forra Lucia ha visto un significativo innalzamento delle temperature estive cui sono seguiti inverni relativamente miti mentre scarsissime sono state

le precipitazioni a partire da quel momento fino all'inizio dell'inverno 2012/2013. Inverno che ha portato abbondanti piogge e nevicate, ma scarsità di freddo. Le stalattiti di Forra Lucia hanno smesso lo stillicidio dal maggio/giugno 2010 fino alla metà di dicembre del 2012. Una storia meteo che rispecchia esattamente quanto si legge nei grafici.

Nella figura seguente viene mostrato il quadro sinottico dei parametri temperatura interna alla grotta, temperatura esterna, precipitazioni annuali ed emissioni di radon registrati tra il 2008 e il 2011. L'unico parametro che mostra una certa correlazione con il radon è quello delle temperature esterne, anche se con una certa sfasatura temporale.

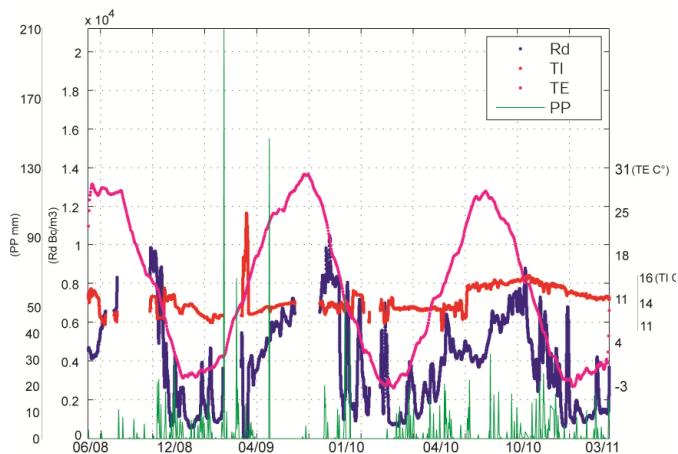


Fig. 9 – Quadro sinottico di alcuni parametri ambientali significativi e concentrazioni di radon.

Purtroppo non sono disponibili misure strumentali della portata del corso d'acqua all'interno della grotta in quanto la sonda multiparametrica vede i suoi sensori coprirsi di una patina di calcare che rende in brevissimo tempo inattendibile, poi impossibile, ogni misura. È tuttavia evidente una corrispondenza tra i minimi di portata, osservati visivamente, ed i massimi di radon. Questo sembra implicare una relazione diretta tra la saturazione d'acqua delle fratture del sistema carsico e le emissioni di radon veicolate dalle medesime fratture.

Per quanto riguarda il radon come precursore sismico, l'unica corrispondenza statistica significativa, come già segnalato, è quella con la crisi sismica del settembre 2009. Guardando i tempi si osserva però che il massimo di radon segue di tre giorni il mainshock di magnitudo 4,5. Di conseguenza più che di precursore dovremmo parlare di "successore" del terremoto. Per tutti gli altri eventi sismici registrati non si sono rilevate variazioni significative nel radon.

La crisi ha una prima fase il 1 marzo 2008, con tre eventi sopra magnitudo 4, ed una seconda fase tra il 14 ed il 17 settembre 2009. Evento max di magnitudo 4,5 il 14 settembre 2009 alle 20.04, profondità 13 km. Tra il 14 ed il 17 settembre 2009 si registrano oltre 250 repliche con magnitudo locale compresa tra 3,3 e 0,5. Distanza con Forra Lucia 18 km, eventi significativi, secondo formula Hauksson e Goddard, sopra 2,6.

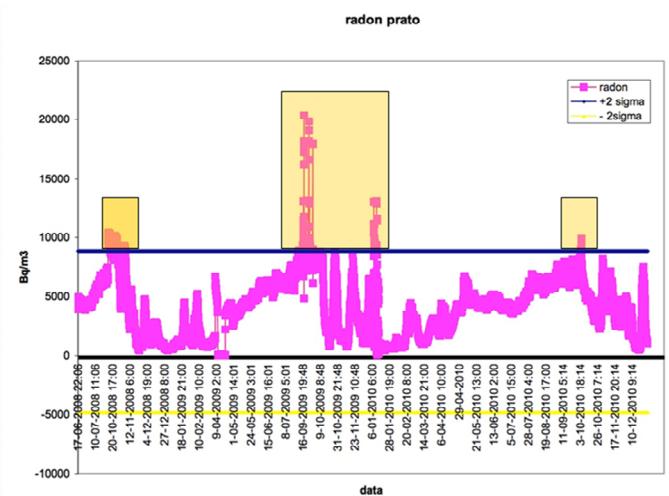


Fig. 10 – Raffigurazione delle anomalie di radon statisticamente significative.

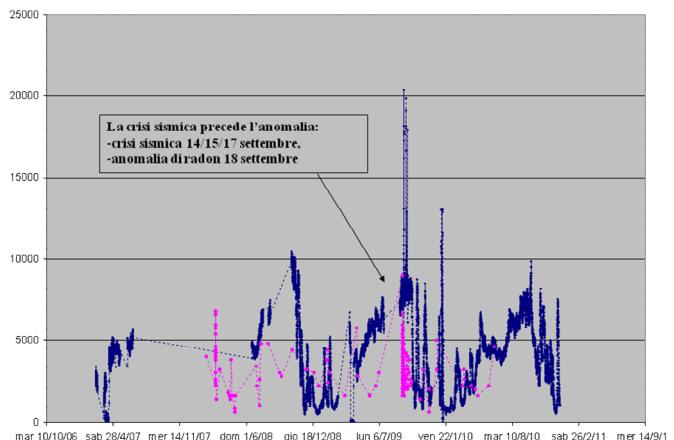


Fig. 11 – Confronto radon terremoti: il dato sismico è stato riscalato rispetto alla magnitudo per poterlo confrontare visivamente in uno stesso grafico con il radon.

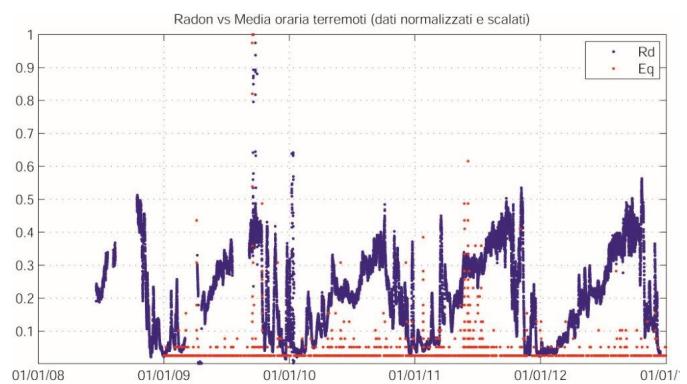


Fig. 12 – Confronto radon frequenza oraria dei terremoti

Nell'ultima figura è stato fatto il confronto con la frequenza oraria dei terremoti per valutare la possibilità di una correlazione tra la concentrazione di radon e le sequenze sismiche accadute nell'area esaminata. Purtroppo anche questo parametro non si discosta da quanto osservato per i singoli eventi sismici.

Il monitoraggio si è dovuto purtroppo definitivamente interrompere a fine dicembre del 2012, e il dataset è ancora in fase di studio, ma possiamo senz'altro dire che l'andamento non ha subito variazioni di alcun tipo. Pare che si possa senz'altro dire che la quantità di radon è massima durante i periodi di maggiore magra del torrente e dello stillicidio. Con la crescita della portata d'acqua del torrente e la ripresa dello stillicidio si ha una rapida decrescita della radioattività alfa che arriva a diminuire anche del 90%.

RICERCHE ATTUALMENTE IN CORSO IN FORRA LUCIA

Cessata la presa dati per il rilevamento del radon, Forra Lucia, grotta "chiusa" e quindi con ambiente fondamentalmente integro nella sua naturalità, viene ora utilizzata per studi di biospeleologia. Alcuni ricercatori dell'Università di Firenze, collegati con l'Università di Milano, stanno conducendo un notevole lavoro sugli *Speleomantes* e sui ragni del genere *Meta* che presentano, questi ultimi, un curioso fenomeno di gigantismo.

OPERE CITATE

- AGATI M., GEI F. & NEGRI M., 2003 - *Il laboratorio ipogeo di Forra Lucia (PO)*. Atti del Convegno Nazionale: "L'Ambiente Carsico e L'Uomo", Grotte di Bossea – Frabosa Soprana (CN), 3-8 settembre 2003.
- BASTOGI, CANESSA, GEI, MAETZKE, 2008 - *Un itinerario naturalistico per i monti della Calvana*. Nuova Toscana Editrice, Firenze.
- CICALI F. & PRANZINI G., 1984 - *Idrogeologia e carsismo dei Monti della Calvana - (Firenze)*. Boll. Soc. Geol. It. n°103: 3-50.
- CIGNA A., 2005 - *Radon in caves*. International Journal of Speleology, 34 (1-2): 1-18.
- CIGNA A., 2003 - *The distribution of radon concentration in caves*. Int. J. Speleol., 32 (1/4): 113-115.
- GEI F., 1981 - *Formazione di un laboratorio sperimentale ipogeo sui monti della Calvana a nord di Prato a cura del GSP del CAI*. In: Atti del 1° Congresso Informale di speleologia fisica, Bologna.
- GEI F. & GRUPPO SPELEOLOGICO PRATESE DEL CAI, 1985 - *Le grotte della Calvana*. Ed. del Palazzo, Prato: 134 pp.

