

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

Alcune considerazioni sul radon in grotta

ARRIGO A. CIGNA (*)

RIASSUNTO

Dopo una breve introduzione concernente il fondo della radioattività naturale viene trattato specificatamente il radon in grotta. Partendo dal suo comportamento e dalla distribuzione nelle grotte di varie parti del mondo, viene illustrata l'origine, il trasporto e l'accumulo in grotta, passando poi a descrivere i rivelatori più adatti all'impiego in grotta.

Gli aspetti specifici della radioprotezione sono descritti con una premessa storica per passare successivamente ai problemi attuali. Gli aspetti normativi delle disposizioni di legge in Italia sono infine trattati, illustrando le migliori procedure per la loro applicazione.

KEY WORDS: Fondo naturale, Radon, Radioprotezione, Rivelatori.

INTRODUZIONE

Le misure del fondo naturale della radioattività ambientale mostrano una brusca variazione tra il 1972 ed il 1977 con un aumento che si è mantenuto anche successivamente (fig. 1). Tutto ciò non è la conseguenza di un fenomeno specifico ma semplicemente al fatto che nel periodo indicato si sono affinate le misure del radon. Questo, insieme ai suoi discendenti è un emettitore alfa e, come è noto, questo richiede tecniche specifiche.

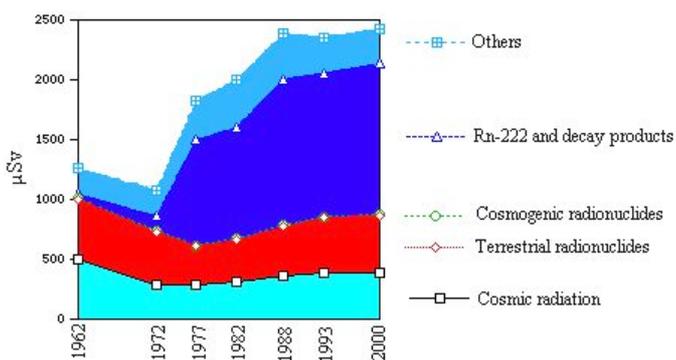


Fig. 1 – Valutazione del fondo naturale nella seconda metà del secolo scorso tratta dai rapporti UNSCEAR.

Il contributo dovuto al radon e discendenti al fondo naturale è intorno al 50% e si comprende quindi l'attenzione che si è sviluppata a questo proposito. Se da un lato ciò si è

risultato in una conoscenza del fenomeno grazie ad una pregevole attività di ricerca da parte di laboratori specializzati, dall'altra si sono moltiplicate ricerche improvvisate e conclusioni sovente fantasiose.

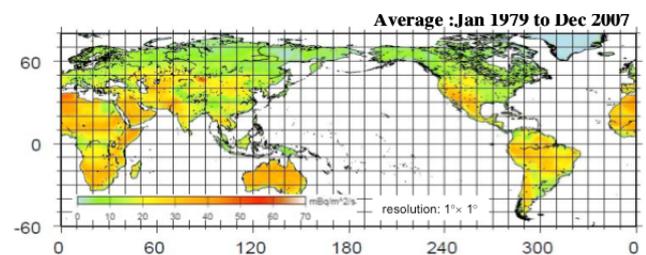


Fig. 2 – Distribuzione del flusso medio di rilascio del radon ($\text{mBq}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) nel periodo 1979-2007 (Yamazawa *et al.*, 2012)

Come evidenziato in Fig. 2 il valore del flusso di rilascio del radon varia già di 2 ordini di grandezza pur essendo mediato su 28 anni. Le fluttuazioni a breve periodo sono molto più ampie arrivando a parecchi ordini di grandezza.

Le cause delle variazioni sono molte: per quanto riguarda le medie di Fig. 2 sono ovviamente dovute alla concentrazione nel suolo dei progenitori, dipendono invece da cause molto diverse a quanto mai disparate. Fin negli anni '70 era stata osservata una correlazione tra variazioni improvvise della concentrazione del radon in aria (in generale aumenti) e conseguenti terremoti. Questo fatto aveva fatto intravedere la possibilità di utilizzare il fenomeno per la previsione di sismi.

Tuttavia si era potuto accertare l'impossibilità pratica di questo utilizzo proprio per la molteplicità delle cause che provocavano le variazioni della concentrazione del radon. Infatti, soltanto a posteriori, cioè a terremoto avvenuto, si poteva riscontrare la correlazione tra concentrazione del radon ed evento sismico eliminando, quindi, ogni possibilità di ottenere una previsione.

Vale la pena di ricordare a questo proposito il caso paradossale del tecnico dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso col suo allarme, prima del terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009, del tutto sbagliato sulla localizzazione dell'evento e quindi assolutamente inutile. Nell'ottobre 2012 si è avuta la condanna degli esperti della Commissione Nazionale per la Previsione e la Prevenzione dei Grandi Rischi poiché non avevano previsto il sisma contrariamente a quanto aveva fatto il sopra citato tecnico! Non c'è limite alle conseguenze dell'umana incompetenza, come hanno rilevato scienziati di tutto il mondo a questo proposito.

(*) SSI – UISP – ISCA

Deve essere riaffermata con vigore la necessità di attenersi sempre al rigoroso esame delle osservazioni condotte in modo affidabile senza abbandonarsi a conclusioni attraenti ma senza un solido fondamento scientifico (Santoro, 2012)

IL RADON IN GROTTA

Generalità

Proprio nella “caverna di Bossea” è stato effettuato uno studio sulla elettricità atmosferica nel 1903 in cinque stazioni situate tra l’imbocco e la cascata di Ernestina con l’impiego di un elettrometro di Elster e Geitel (Rizzo, 1903). L’autore si riprometteva poi di studiare se si manifestassero, sempre nella stessa caverna, dei “fenomeni di radioattività indotta”. Una ricerca negli Atti della R. Acc. delle Scienze di Torino, per gli anni successivi non ha dato purtroppo alcun risultato per cui si più ritenere che queste ulteriori ricerche non siano state effettuate.

Le prime misure di radioattività con un contatore di Geiger-Müller sono state eseguite nell’Ottobre 1952 nelle Grotte di Castellana utilizzando lo stesso strumento che era servito per misurare il fallout radioattivo prodotto dalle esplosioni nucleari sperimentali nel deserto del Nevada (Fig. 3). Questo apparecchio rilevava le radiazioni beta e gamma, dato lo spessore della parete del tubo in ottone.



Fig. 3 – Preparazione del contatore di Geiger-Müller a Castellana.

Soltanto alcuni anni dopo si è passati alla raccolta e misura dei prodotti di decadimento del radon in grotta nel nostro paese. Questa ricerca risale al 23 gennaio 1959, proprio nella Grotta di Bossea, filtrando l’aria su filtro di carta Schleicher & Schuell 589 mediante un aspiratore alimentato dalla rete interna della grotta (Fig. 4). Il filtro veniva successivamente sottoposto a misura beta totale in laboratorio.

Tuttavia soltanto nel 1983-84 venne condotta una ricerca sistematica in 5 grotte: Grotta Gigante, Trieste; Grotta del Vento, Lucca; Grotta Giusti, Pistoia; Grotta Grande di Vento, Anona e Grotta di Castellana, Bari. Le misure furono fatte con celle a diffusione e rivelatore plastico CR-39 (Cigna, 1986).



Fig. 4– L’aspiratore, alimentato dalla rete di illuminazione della grotta, in funzione poco a valle del Lago di Ernestina, sul Picco Rosarita.

La rilevazione, effettuata su un periodo di alcuni mesi in alcune stazioni per ogni grotta, ha fornito valori compresi tra 46 e 480 Bq/m³ con un valor medio di circa 230 Bq/m³.

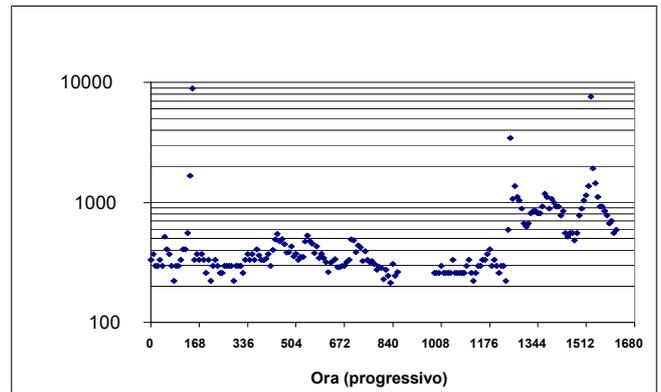


Fig. 5 – Andamento della concentrazione di radon nella Grotta delle Lumache dalle 17:30 del 14 Luglio 2001 (ora 0 dell’asse x) alle 9:30 del 21 Settembre 2001. Gli intervalli delle ascisse corrispondono a settimane.

Ma, come si è riportato in precedenza, la concentrazione del radon in grotta può variare nel tempo e nello spazio per cause molto diverse tra loro. Le variazioni nel tempo possono essere improvvise e molto rapide. Tipico, a questo proposito, quanto riscontrato nella Grotta delle Lumache a Buggerru, Sardegna (Fig. 5) nel 2001 (Chiesi *et al.*, 1986).

Nonostante accurate indagini non è stato possibile identificare cause evidenti dei picchi in quanto non si sono osservati né terremoti, né temporali con rapide variazioni di pressione, né frane. Ma questo non è altro che un esempio di numerose variazioni improvvise osservate in tempi e luoghi diversi per le quali non è stato possibile identificare alcuna causa.

Tutto ciò mostra come non sia possibile, a tutt’oggi, l’impiego delle variazioni di concentrazione del radon a scopo previsionale. Viceversa si è riscontrato un andamento stagionale piuttosto marcato in molte grotte con diverse caratteristiche geologiche, morfologiche e climatiche.

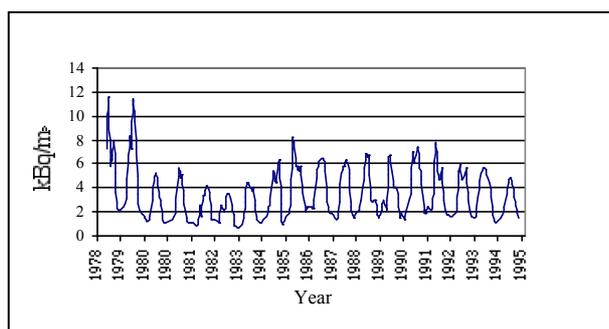


Fig. 6 – Concentrazione del radon nella grotta Hajnóczy in Ungheria (Hakl *et al.*, 1997)

Una serie di misure quasi ventennale è stata ricavata in una grotta ungherese ed è riportata in Fig. 6 con valori più elevati nel periodo estivo e minimi in quello invernale. Inoltre si può notare come all'andamento stagionale siano sovrapposte variazioni irregolari dipendenti da cause tutt'ora ignote.

La distribuzione della concentrazione media del radon in grotta varia in un intervallo molto ampio come è stato mostrato da Hakl (2004) che ha raccolto 303 valori da 220 grotte differenti (Fig. 7). Tuttavia, se il numero di dati è ancora troppo scarso per un'analisi esaustiva, specialmente per i valori più elevati, esso fornisce già un'idea sulla distribuzione in generale.

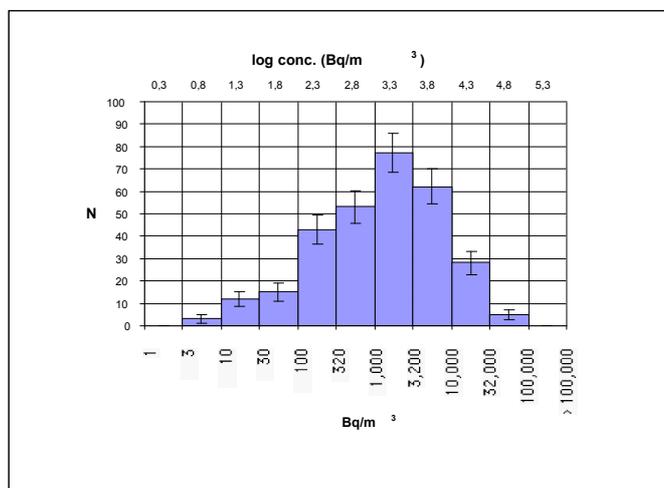


Fig. 7 – Distribuzione log normale di 303 valori della concentrazione media di radon in 220 grotte di varie parti del mondo. (da dati originali di Hakl, 2004).

Si riscontrano frequentemente distribuzioni log normali di fenomeni geologici, come per esempio le fratture. Anche la concentrazione del radon in grotta segue questa distribuzione con un valore medio intorno a 2500 Bq/m³ ma la forma di questa distribuzione approssimativamente gaussiana non è simmetrica. Ciò suggerisce la presenza di meccanismi diversi della diffusione del radon in grotta. In particolare vi sono probabilmente due "famiglie" di processi per i valori rispettivamente sotto e sopra la media prima citata.

Inoltre, dal momento che il trasporto del radon dipende, tra vari altri fattori, dalla dimensione delle fratture, anche la distribuzione di queste dimensioni riveste un ruolo

importante. Ovviamente uno studio più accurato dovrebbe basarsi su misure multiple in singole grotte, utilizzando poi in questi casi un valore medio.

Per quanto riguarda il meccanismo del trasporto del radon bisogna tener conto dei flussi di aria ed acqua, con particolare attenzione per quest'ultima. Infine bisogna identificare l'origine del radon in una data grotta, se proveniente dal calcare o da altre rocce attraverso fratture o percolazioni.

Come è noto, dal punto di vista della radioprotezione, occorre tener conto sia del radon come tale che dei suoi prodotti di decadimento. Questi sono dei solidi e tendono ad attaccarsi a superfici o al pulviscolo. Ne consegue che la concentrazione di questi prodotti di decadimento presenti nell'atmosfera è inferiore al 100% teorico. Il valore medio ponderato derivante da poco meno di un migliaio di misure effettuate in decine di grotte in tutto il mondo del fattore di equilibrio, F, è risultato essere compreso tra 0,5 e 0,6 (Cigna, 2005). Esso è lievemente superiore a quanto si riscontra normalmente nei ambienti di abitazione o di lavoro (0,4-0,5) in quanto l'atmosfera in grotta è normalmente più pulita e priva di pulviscolo.

Una trattazione dettagliata del radon in grotta si trova in Cigna (2005) dove sono stati riportati sia le caratteristiche fisiche del radon e suoi discendenti, il comportamento in grotta, i metodi di misura, i criteri di radioprotezione e la valutazione delle dosi per le guide.

L'origine del radon

Il radon ha vari isotopi a seconda delle diverse famiglie naturali dalle quali discendono. In questo lavoro viene preso in considerazione soltanto il ²²²Rn che proviene dalla serie dell'uranio in quanto il ²¹⁹Rn proveniente dalla famiglia dell'attinio ha un tempo di dimezzamento di soli 3,9 secondi e quindi troppo breve per raggiungere la biosfera, mentre il ²²⁰Rn che proviene dalla serie del torio ha un tempo di dimezzamento più lungo, 54 secondi, ma in generale non raggiunge concentrazioni rilevanti. Infine, l'uranio, ²³⁸U, decade con diversi passaggi nel ²²⁶Ra che, a sua volta decade nel ²²²Rn che è quello che qui è chiamato semplicemente radon.

Pertanto la concentrazione del radon dipende dalla concentrazione dei radionuclidi progenitori ²³⁸U e ²²⁶Ra nella roccia che può variare entro limiti molto larghi. Ma il radon è un gas che deve fuoriuscire dai cristalli del minerale e dalla molecola nella quale si è originato.

Ad ogni disintegrazione di ²²⁶Ra si forma un atomo di radon ed una particella alfa. Quest'ultima viene espulsa e l'atomo di radon è soggetto ad un effetto di rinculo che libera l'atomo stesso dal cristallo o dalla molecola dove il ²²⁶Ra si è disintegrato. La distanza che l'atomo di radon può percorrere varia tra 0,02 e 0,07 μm in un minerale secondo la sua densità e, così, il radon esce dal minerale.

Ovviamente il radon può effettivamente uscire dal minerale se si trova molto vicino alla superficie del minerale e se il moto del rinculo è diretto verso l'esterno. Recentemente Deszö *et al.* (2002) hanno effettuato alcune misure della esalazione del radon rispettivamente dall'argilla e dal calcare nella Grotta Bardala (Ungheria). Hanno così accertato che in condizioni climatiche normali dell'ambiente di grotta, il cammino

effettivo di diffusione del radon nell'argilla è tale da avere un ruolo importante nel rilascio del radon nell'atmosfera della grotta.

Misure di spettrometria gamma eseguite in laboratorio del contenuto di ^{226}Ra nei campioni di argilla hanno trovato che era circa 20-40 volte più elevato che nei campioni di calcare (Hakl, 2004). Dall'argilla può essere rilasciato nell'atmosfera circa il 44% del radon, mentre dal calcare la percentuale si abbassa a solo il 2,5 %. Combinando la contrazione del ^{226}Ra ed il rateo di rilascio, si ricava che il contributo del calcare è circa due ordini di grandezza inferiore rispetto al contributo dell'argilla. Pertanto si può ritenere che in generale sia l'argilla la fonte più rilevante di radon in grotta.

Nell'acqua il libero cammino medio del radon per l'effetto di rinculo è di 0,1 μm in aria e di 63 μm in acqua. Una volta che il radon si trova in una di questi fluidi, esso è soggetto alla diffusione ed al trasporto come viene descritto nel paragrafo successivo.

Il trasporto nella roccia

Come già accennato in precedenza, la diffusione ed il trasporto da parte di fluidi in moto svolgono un ruolo importante per il movimento del radon nel terreno. In generale la diffusione è il processo dominante nei canali intergranulari, nei capillari e nei pori più piccoli, mentre nei pori più grandi e nelle fratture il trasporto assume maggiore rilevanza o, addirittura, diventa prevalente (Tanner, 1978).

La eterogeneità del materiale geologico è la causa della grande variabilità della diffusione del radon in un mezzo poroso, rispetto alle previsioni della teoria. Per esempio, la mica e la vermiculite, che sono materiali a struttura lamellare, hanno un fattore di forma che provoca una diminuzione del coefficiente di diffusione della metà ad un terzo del valore teorico.

Le argille e gli schisti contengono una notevole quantità di minerali lamellari generalmente orientati in modo da ostacolare i flussi verticali. In questo modo viene sensibilmente ritardata la diffusione rispetto ad un mezzo con la stessa porosità ma costituito da particelle sferiche.

La frazione del radon che fuoriesce direttamente dal suolo dipende dalla profondità alla quale si origina e dalla permeabilità del terreno. Secondo l'NCRP (1984) circa il 10% del radon che si forma nello strato superficiale di un metro del suolo raggiunge l'atmosfera.

Ma il fattore principale che determina il flusso del radon nella roccia è il trasporto dall'acqua di falda attraverso giunti e faglie. La migrazione attraverso fratture o connessioni con cavità sotterranee non è riconducibile ad una trattazione matematica in quanto gli spazi vuoti sono assolutamente specifici per ogni singolo caso.

Un'alta concentrazione di radon nel suolo è stata sovente associata a faglie o dislocazioni sepolte, rendendo così possibile la localizzazione di faglie coperte da strati sottili di sedimenti. Talvolta la migrazione di uranio e ^{226}Ra attraverso le faglie ed il loro successivo accumulo per scambio ionico nelle argille del suolo sono la causa principale delle anomalie del radon in corrispondenza delle faglie stesse.

L'accumulo del radon

Dal momento che il radon è il gas a densità più elevata si ritiene comunemente che si accumuli nelle zone più profonde di una grotta analogamente al comportamento dell'anidride carbonica. Infatti, tutti hanno presente la Grotta del Cane presso Pozzuoli, dove un cane viene soffocato dalla CO_2 mentre una persona rimane indenne.

Questa stratificazione del gas avviene non a causa della densità ma semplicemente dal punto di provenienza. Semplici considerazioni sul comportamento dei gas (Cigna & Badino, 2008) descrivono in dettaglio il fenomeno.

Proprio nella Grotta di Bossea le concentrazioni più elevate di radon si trovano non nella parte più bassa della grotta ma nella zona di contatto tra le metavulcaniti e la struttura carbonatica dove è favorita la fuoriuscita del gas.

Analogamente nella Grotta Gigante, Trieste, i valori più elevati della concentrazione di radon sono stati osservati soprattutto nella Galleria Nuova (ad una decina di metri dal piano di campagna) con punte estive superiori (Del Maschio, 2010-11) a 20 kBq/m^3 con valori di qualche centinaio di Bq/m^3 in fondo alla grande cavità.

In conclusione la zona di maggior concentrazione del radon in una grotta non è necessariamente nelle parti più basse ma nelle vicinanze dei punti di rilascio.

I rivelatori

Questi si dividono in due categorie, quelli attivi e quelli passivi. I primi sono strumenti che richiedono una alimentazione elettrica a batteria o dalla rete. Dato il loro costo sono utilizzati soltanto a scopo di ricerca o per motivi specifici.

I rivelatori passivi sono invece dei rivelatori che non richiedono alimentazione e possono operare anche per lunghi periodi di tempo, come ad esempio un anno. Ne esistono modelli molto diversi tra loro e, proprio per le loro caratteristiche devono essere scelti con cura per l'uso in grotta.

Quelli a carbone attivo sono economici ma sono anche sensibili all'umidità e ovviamente l'ambiente di grotta non è adatto. Altri sono delle camere di ionizzazione con un elettrodo la cui carica viene neutralizzata dalla ionizzazione provocata dalle radiazioni alfa emesse dai prodotti di decadimento del radon. Oltre ad avere un costo non trascurabile necessitano di un caricatore e di un lettore. Inoltre sono sensibili anche alle radiazioni gamma il cui effetto deve essere sottratto per ottenere il contributo delle sole radiazioni alfa.

Infine ci sono i rivelatori a traccia nucleare che consistono in fogli di una plastica speciale, della dimensione di un francobollo, da esporre in grotta all'interno di un involucro di polietilene. Contrariamente a quanto si può essere indotti a ritenere, questo materiale è permeabile al radon mentre non lo è per il vapor acqueo. Le particelle alfa attraversando la plastica sensibile lasciano una traccia che viene poi sviluppata per esempio con una soluzione di soda. Questa trasforma la traccia in un forellino e il conteggio dei forellini viene fatto collocando il foglietto di plastica entro le armature di un condensatore.

Applicando una opportuna differenza di potenziale si ottengono delle scariche in successione nei forellini che possono essere così contati. Il loro numero è proporzionale alla concentrazione del radon ed al tempo di esposizione. Una

taratura di tutto il sistema permette di calcolare la concentrazione media del radon (in Bq/m^3) nel periodo di esposizione.

Questi rivelatori sono i più adatti per il monitoraggio del radon in grotta in quanto sono sensibili soltanto alle radiazioni alfa, sono economici, sono insensibili all'umidità e forniscono direttamente la concentrazione media nell'intervallo di misura.

QUESTIONI DI RADIOPROTEZIONE

Storia

La prima notizia di un effetto attribuibile alle radiazioni ionizzanti e, in particolare, al radon in miniera è dovuto a Epicuro, filosofo greco (nato nel 341 a.C. a Samos e morto nel 270 a.C. ad Atene) i cui lavori sono sopravvissuti solo parzialmente fino ad oggi.

La maggior parte di questi si trova in parecchi papiri carbonizzati trovati in una biblioteca di Ercolano danneggiata dall'eruzione del 79 d.C. Tuttavia, in questi papiri, non è stato trovato finora alcunché riguardante gli effetti delle radiazioni ionizzanti.

Notizie in proposito sono state invece riportate da Tito Lucrezio Caro, poeta latino nato intorno al 95 a.C. (forse a Pompei) e morto suicida circa 44 anni dopo probabilmente per una pozione erotica che lo condusse alla pazzia. Lucrezio scrisse la famosa opera "*De rerum natura*" che riveste un interesse speciale perché fornisce un contributo eccezionale sulle conoscenze scientifiche del tempo (Carus, 61 ± 10 a.C.).

Attualmente è difficile sapere con certezza se le malattie dei minatori citate da Lucrezio fossero dovute alla silicosi o al radon. Tuttavia bisogna tener presente che le miniere in questione si trovano nei pressi del Monte Pangaion dove la concentrazione di radon all'interno delle case è superiore a 100 Bq/m^3 e la dose gamma all'esterno è intorno a 100 nGy/ora (Green *et al.*, 1991).

Questi valori sono i più elevati di tutta la Grecia e supportano l'ipotesi che, in quelle miniere, la concentrazione del radon potesse essere abbastanza elevata da provocare effetti tumorali nei minatori locali. D'altra parte la tecnologia mineraria dell'epoca avrebbe difficilmente sollevato quantità di polveri tali da provocare una silicosi frequente (Fig. 8).

Un secolo dopo, un altro filosofo latino, Lucio Anneo Seneca (nato il 4 a Cordoba in Spagna e morto a Roma nel 65 d.C.) ha trattato nuovamente il problema di gas nocivi rilasciati in cavità sotterranee che avrebbero potuto forse avere qualche relazione col radon (Seneca, 60 ± 5).

Nel,lo stesso periodo un altro scrittore latino, Caio Plinio Secondo, noto come "Plinio il vecchio" (nato nel 23 a Como e morto nel 79 d.C. a Stabia) ha compilato una grande enciclopedia (Plinio, 77) divisa in 37 volumi. Egli era certamente al corrente di quanto riportato dai precedenti autori ed ha incluso nella sua opera un riferimento ai gas nocivi rilasciati dal terreno anche se non è possibile trovare dati utili per noi.



Fig. 8 – Miniera greca. Da una tavoletta in terracotta del 630-610 a.C., Berlino, Staatliche Museum

Il riferimento successivo al cancro polmonare dovuto alle radiazioni ionizzanti lo si ritrova molto più tardi. Infatti Agricola lo cita nel XVI secolo. La prima citazione nel "Bermanno" (Agricola, 1530) è stata ripresa con maggior dettaglio successivamente: "Tra alcune malattie alcune colpiscono le articolazioni, altre attaccano i polmoni, altre gli occhi ed infine alcune sono fatali per gli uomini" (Agricola, 1556).

Anche Paracelso ha descritto una mortalità insolitamente elevata per una malattia polmonare diffusa tra giovani minatori. Ha scritto il suo libro nel 1537 ma è stato pubblicato postumo soltanto dopo la sua morte (Paracelsus, 1567). Successivamente anche B. Ramazzini (1713) ha citato autori precedenti con particolare riferimento ad Agricola ed a Lucrezio.

Tra i minatori nella regione di Schneeberger-Jachymov nello Erzgebirge, la malattia era nota come "Schneeberger Krankheit" ed è stata diagnosticata come cancro polmonare nel 1879 (Härting & Hesse). La sua possibile associazione col radon è stata proposta circa 40 anni più tardi quando sono state scoperte delle concentrazioni elevate di radon nelle miniere di quella regione. La vera causa di questo cancro è stata identificata soltanto negli anni '50 del secolo scorso quando sono stati condotti i primi tentativi di dosimetria polmonare (Aurand *et al.*, 1955; Bale & Shapiro, 1955).

Raccomandazioni attuali

Il contributo rilevante del radon e dei suoi prodotti di decadimento al fondo naturale delle radiazioni ionizzanti ha richiamato l'attenzione sull'opportunità di provvedere il monitoraggio e di stabilire dei livelli di riferimento per ridurre la dose impartita agli individui maggiormente esposti.

Ma il rischio di cancro da bassi livelli di radiazioni è stimato per convenzione dagli effetti ben conosciuti dalle dosi elevate di radiazione facendo uso dalla teoria della correlazione lineare senza soglia che, d'altra parte, non è pienamente supportata dagli studi epidemiologici..

Infatti, alcuni studi sperimentali ed epidemiologici evidenziano l'esistenza di una soglia o addirittura di effetti benefici per basse dosi e basso rateo di dose di radiazioni. Secondo studi recenti (Preston *et al.*, 2003) non si trova una evidenza diretta per dosi inferiori a circa 0,5 Sv.

Ci sono notevoli incertezze nella stima del rischio di cancro al polmone negli ambienti diversi dalle miniere dove, inoltre le stime di rischio per unità di esposizione da diversi studi sui minatori, differiscono per un ordine di grandezza.

L'estrapolazione dalle miniere ad altri ambienti comportala concatenazione di varie approssimazioni dovute alla presenza di altri effetti. Ad esempio negli USA, Cole (1993) adotta argomenti convincenti per una politica del radon meno aggressiva. Egli dimostra infatti che l'informazione al pubblico con l'intero spettro di punti di vista sull'argomento non consente di trarre un giudizio obiettivo.

Comunque, la soluzione di questa controversia dovrebbe essere lasciata agli esperti di radioprotezione, mentre in questa sede ci si deve limitare soltanto alle raccomandazioni ed alle disposizioni di legge.

La legge italiana

In Italia è stato stabilito un livello di riferimento di 500 Bq/m³ per il radon. Se la concentrazione media annua del radon in un ambiente (una grotta, nel caso che qui interessa) è inferiore all'80% del valore di riferimento (cioè 400 Bq/m³) le misure devono essere ripetute ogni tre anni. Se invece il valore supera i 400 Bq/m³ le misure devono essere ripetute ogni anno.

Per valutare la dose alle persone è stato definito un fattore di conversione convenzionale pari a $3 \cdot 10^{-6}$ mSv che dà la dose effettiva per ogni unità di esposizione in Bq h m⁻³. E' così fissato il limite di 3 mSv/anno di dose impartita alle persone al di sotto del quale non si applica la qualifica di professionalmente esposto.

La procedura

Come si è già accennato in precedenza i dosimetri a traccia nucleare sono i più adatti per il monitoraggio in grotta grazie alla loro selettività (registrano soltanto le radiazioni alfa e non sono assolutamente sensibili alle radiazioni beta e gamma) ed alla loro robustezza intrinseca.

Quando si deve procedere per la prima volta al monitoraggio in una grotta, conviene effettuare una semplice campagna preliminare con uno strumento a lettura immediata per avere una valutazione indicativa della concentrazione del radon. Una volta che si disponga di questo dato si possono scegliere il tipo specifico di dosimetro ed il tempo di esposizione.

Dal momento che, come si è già accennato in precedenza, la concentrazione del radon può avere variazioni molto elevate, sarebbe opportuno proseguire lo studio per un tempo abbastanza lungo (per esempio settimane o anche mesi) per evitare l'influenza di picchi anomali che possono verificarsi senza alcuna causa apparente.

Comunque, quando non fosse possibile avere un monitoraggio in continuo, le misure dovrebbero essere ripetute

in stagioni diverse in modo da avere un valore medio annuo come è richiesto dalle disposizioni di legge. Infatti ci sono variazioni nictemerale e stagionali della concentrazione del radon per cause diverse aventi queste periodicità. In particolare bisogna tener presente che sovente le concentrazioni nel periodo estivo possono essere sensibilmente maggiori rispetto alla stagione invernale.

Gli interventi normalmente adottati per ridurre la concentrazione del radon negli ambienti di lavoro non possono ovviamente essere applicati in grotta dal momento che non è accettabile un'azione che modifichi la circolazione dell'aria nella grotta stessa. Per questo motivo l'unica possibilità per evitare il superamento del limite di legge per la dose ammessa per i lavoratori non professionalmente esposti (3 mSv/anno) consiste nel limitare il tempo di permanenza in grotta dei lavoratori stessi (le guide).

La relazione tra la concentrazione media ed il tempo trascorso in grotta durante un anno è data dalla seguente equazione:

$$T = \frac{10^6 * D}{7.784 * F * C}$$

dove:

T = ore all'anno di permanenza in grotta

D = Limite di dose annuale (3 mSv)

F = fattore di equilibrio

C = concentrazione media annua del radon (Bq m⁻³)

Con questa equazione è possibile calcolare il tempo che un lavoratore può trascorrere nel corso di un anno in una grotta con una data concentrazione media del radon. Questa relazione è stata riportata nella Fig. 9 per una semplice valutazione della situazione

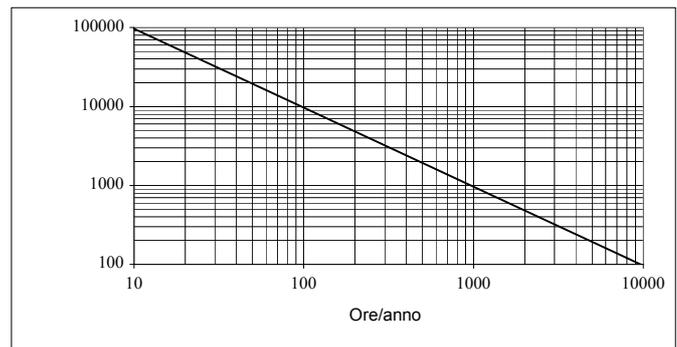


Fig. 9 - Ore all'anno che possono essere trascorse in grotta senza superare il limite di esposizione di 3 mSv con un fattore di equilibrio pari a 0,4.

Bisogna sottolineare che il non superamento del limite annuo di 3 mSv anche se possibile da un punto di vista normativo è assolutamente da evitare perché in questo caso sarebbe necessario classificare il personale interessato come "lavoratori professionalmente esposti" con oneri estremamente gravosi per la gestione della grotta turistica, praticamente inaccettabili dal punto di vista economico.

Altre considerazioni

Vale la pena di ricordare che una certa esposizione al radon

può verificarsi anche all'esterno della grotta ma nelle sue vicinanze. Infatti alcuni edifici come direzione, biglietteria, ecc. possono essere stati costruiti in prossimità della grotta stessa. Alcune grotte turistiche hanno degli edifici situati sopra l'ingresso della grotta, nonostante ciò sia assolutamente da evitare, e talvolta questi edifici sono occupati in permanenza da personale.

Tutto ciò deve essere assolutamente evitato in quanto potrebbe alterare notevolmente il microclima della grotta ed, inoltre, potrebbe impartire una dose al personale da esposizione al radon che non sarebbe in alcun modo giustificata.

In una grotta turistica dove il radon veniva regolarmente monitorato, si è riscontrato che il personale impiegato negli edifici soprastanti la grotta, ricevevano una dose più elevata rispetto alle guide! In questi casi occorre monitorare anche il radon indoor e, se necessario, adottare degli interventi atti a ridurre la concentrazione. Ma, come già riportato in precedenza, non si devono edificare costruzioni sopra le grotte sia per evitare una modifica del regime di percolazione delle acque meteoriche, sia per evitare un irraggiamento indebito del personale.

Diverse grotte turistiche dispongono di ascensori che consentono l'ingresso dei visitatori passando direttamente dalle costruzioni di accoglienza alla grotta. Questi ascensori fungono allora da pompe che trasferiscono l'aria della grotta direttamente nell'edificio. In questi casi la concentrazione del radon indoor può essere abbassata se gli ascensori portano ad un ambiente separato dal quale l'aria viene espulsa all'esterno invece di lasciarla filtrare all'interno del resto dell'edificio.

Se la concentrazione del radon in una grotta turistica è prossima al limite di legge (500 Bq/m³ in Italia) si dovranno evitare attività extra, come punti di ristoro all'interno della cavità. In linea di principio anche i lavori di grossa manutenzione e di nuovi interventi dovrebbero essere svolti nei periodi dell'anno nei quali la concentrazione del radon è più bassa (Aley, 2004), cioè in generale in inverno.

RINGRAZIAMENTI

Sono grato agli amici e colleghi che hanno contribuito in questi anni con informazioni e consigli; in particolare esprimo la mia riconoscenza al dr. Jozsef Hakl che fornito gentilmente dati originali ottenuti dal suo gruppo e il dr. Guido Peano sempre informato su tutti i dettagli della "sua" grotta.

OPERE CITATE

- AGRICOLA G., 1530 - *Bermannus sive de re metallica*. Froben, Basileae.
- AGRICOLA G., 1556 - *De re metallica*. Froben, Basileae, VI.
- ALEY T.J., 2000 - *Ubiquitous environmental contaminants; radon and radon daughters*. In: Lehr J. H. & Lehr J. K. - *Standard handbook of environmental science, health, and technology*. McGraw-Hill: 15, 20-29.
- AURAND K., JAKOBI W. & SCHRAUB A., 1955 - *Zur biologischen Strahlenwirkung des Radon und seiner Folgeprodukte*. Sonderbd. zu Strahlentherapie, 35: 237-243.
- BALE W.F. & SHAPIRO J.V., 1955 - *Radiation dosage to lungs from radon and its daughter products*. Proc. 1st Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva; United Nations, New York: 13: 233-236.
- CHIESI M, CIGNA A.A. FADDA A., FANCELLO L., FORTI P., GRAFITTI G., MURGIA F., NASEDDU A. & PERNA G., 1986 - *La Grotta delle Lumache di Buggerru (CA), risultati preliminari del monitoraggio ambientale e delle ricerche scientifiche finalizzati alla definizione del livello di fruibilità compatibile*. Atti Convegno di Studio "Il carsismo e la ricerca speleologica in Sardegna, Cagliari, 23-25 novembre 2001. Anthéo, Boll. Gr. Speleo-Archeol. G. Spano, Cagliari, 6, Dic. 2002, 143-160.
- CIGNA A.A., 1986 - *Radon Concentration in Some Italian Caves*. Proc. 9° Congr. Int. Espeleologia, Barcelona (Spagna), 2: 84-88. Anche come: Rapporto ENEA RT-PAS-86-19.
- CIGNA A.A., 2005 - *Radon in Caves*. International Journal of Speleology, 34(1-2), 1-18. Ristampato anche in: Cigna A.A. (Ed.), 2009 - Proc. 5° Int. Congr. ISCA, Bermuda, October 2006. ISCA, Italy, 83-1
- CIGNA A.A. & FORTI P., 2008 - *Comment on Al-Azmi et al.*. Health Physics, 95(2): 255-257.
- COLE L.A., 1993 - *Element of risk; the politics of radon*. Oxford University Press.
- DEL MASCHIO F., 2010-2011 - *Anomalie di Radon in Grotta Gigante*. Tesi di laurea magistrale, Università di Trieste.
- HACKL J., 2004 - Personal communication to A.A.Cigna, 5 May 2004.
- HACKL J., HUNYADY I. & VÁRHEGY I., 1997) - *Radon monitoring in caves*. In Durrani S.A. & Ilic R. (Eds.) Radon measurements by etched track detectors. World Scientific: 261-283.
- HÄRTING F.M. & HESSE W., 1879 - *Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben*. Vierteljahresschrift für gerichtl. Medizin und öff. Sanitätswesen, N. Folge, 30: 296-309; 31: 102-132, 312-337.
- NCRP, 1984 - *Evaluation of Occupational and Environmental Exposures to Radon and Radon Daughters in the United States*. NCRP Report N° 78.
- PARACELUSUS, 1567 - *Von der Bersucht und andere Bergkrankheiten*. Dillingen.
- PRESTON D.L., SHIMIZU Y., PIERCE D.A., SUYAMA A. & MABUCHI K., 2003 - *Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Slid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997*. RERF Report No.24-02, Radiation Research, 160 (4): 381-407
- RAMAZZINI B., 1713 - *Diatriba de morbis artificum*. Pataria
- RIZZO G.B., 1903 - *Contributo allo studio della dispersione elettrica nell'atmosfera*. Atti Reale Accademia delle scienze

di Torino, 38: 859-863.

SANTORO E., 2012 - *Presunto imminente*. Energia, Ambiente e Innovazione. ENEA, Roma, 58 (6): 35-36.

TANNER A.B., 1978 - *Radon Migration in the Ground: A Supplementare Review*. Natural Radiation Environment III, DOE Symp. Series 51, CONF-780422, 1: 5-56.

YAMAZAWA H., HIRAO S., MORIIZUMI J., IIDA T. & TASAKA S., 2012 - *Evaluation of radon flux maps for Siberian and East Asian regions by using atmospheric radon concentration observed over oceans*. In: Sources and Measurements of Radon Progeny Applied to Climate and Air Quality Studies. IAEA, Proceedings Series STI/PUB/1541: 65-73.

