

Atti del Convegno "Sicilia Sotterranea" (9-10-11 Maggio 2008)	Speleologia Iblea	Vol. XIII	pp. 143 - 149	Ragusa 2009
---	----------------------	-----------	---------------	----------------

MISURE DI RADON NELLE STRUTTURE IPOGEE IBLEE

R. Mineo¹, A. Conti², S. Buonmestieri¹, G. Alessandro¹

¹Provincia Regionale di Ragusa - Assessorato Territorio, Ambiente e Protezione Civile - 10° Settore Geologia e Geognostica
²ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente) Sicilia

Summary

The Local Territory and Environment Authority of the Province of Ragusa, through the Geology Department, is cooperating with the Regional Agency for Environmental Protection (ARPA) of Sicily for the implementation of measures of radon concentration at some hypogea of Sicily. Radon, radioactive gas produced by rocks, can reach high concentrations within enclosed spaces and buried as mining, water, caves, etc. Pending define hypogea to track, this project provides for the execution of a pilot measure, which was performed at the "Grotta dei Funghi" in Ragusa. In this work the results of the survey are presented.

Introduzione

Alla fine del 2006 l'Assessorato Territorio, Ambiente e Protezione Civile e l'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Sicilia hanno programmato un piano di monitoraggio di gas radon in aree naturali protette della Sicilia. Come indagine preliminare sono state eseguite delle misure di concentrazione di radon nell'ipogeo denominato "Grotta dei Funghi" a Ragusa, scelto grazie alla collaborazione degli speleologi del C.I.R.S. (Centro Ibleo di Ricerche Speleo-Idrogeologiche) che hanno individuato ed esplorato la cavità.

La caratterizzazione di questo tipo di ambienti può fornire un contributo alle attività di monitoraggio del radon su una vasta area territoriale, con la possibilità di studiare le eventuali corrispondenze tra le concentrazioni di radon e le strutture geologiche e geodinamiche. Infatti, da un punto di vista geologico, l'importanza della conoscenza delle concentrazioni di radon – particolarmente in ambienti ipogei – risiede nella possibilità (anche questa oggetto di studi sempre più approfonditi) che il radon possa essere utilizzato come fenomeno precursore di eventi sismici.

Invece, dal punto di vista della salute della popolazione (sebbene l'attenzione della popolazione alla possibile incidenza delle concentrazioni di radon sulla salute non è altissima), l'importanza del radon è stata riconosciuta da anni, come viene riferito sia nell'ambito di una vasta letteratura scientifica sia dai più autorevoli enti internazionali di tutela dell'ambiente e della salute. La IARC (International Agency for Research on Cancer) ha inserito in classe I ("agenti certamente cancerogeni per l'uomo") sia l'isotopo 222 del radon sia i suoi figli [1] e il Ministero della Salute considera la necessità di valutare e ridurre – ove fosse il caso – le concentrazioni di radon negli ambienti confinati [2].

Da un punto di vista normativo, in Italia il D.Lgs. n. 230 del 17 marzo 1995 ha preso atto di alcune direttive europee; nei successivi decreti (D.Lgs. n. 241 del 26 maggio 2000 e D.Lgs n. 257 del 9 maggio 2001) è stata introdotta per la prima volta la problematica dell'esposizione alle radiazioni di origine naturale (ad esempio, attività svolte in tunnel, in grotte e in tutti i luoghi dove è possibile l'esposizione a radiazioni gamma e al radon; attività su aerei e depositi di stoccaggio).

Il decreto definisce l'obbligo di misurare il radon solo per gli ambienti di lavoro, individuando come limite di concentrazione il valore di 500 Bq/m³, oltre in quale è opportuno avviare azioni di verifica controllo e, eventualmente, di rimedio. In ogni caso questo è un punto importante della normativa italiana perché pone fortemente l'attenzione sul fatto che un radionuclide, benché naturale, possa essere fortemente nocivo per la salute.

Scoperta del radon e sue caratteristiche

Già all'inizio del 16° secolo l'alchimista Paracelso aveva notato una inspiegabile elevata mortalità dovuta a malattie polmonari tra i lavoratori delle miniere d'argento nella regione di Schneeberg in Germania. Questa malattia si diffuse ancora di più nel 17° e 18° secolo e fu riconosciuta come cancro polmonare nel 1879. Nel 1900 venne scoperto l'elemento chimico radon, ma solo alla fine degli anni '30 sono eseguite misure sistematiche delle concentrazioni di radon nelle miniere di Schneeberg che hanno mostrato come la concentrazione di radon nell'aria della miniera raggiungeva valori di 100 kBq/m³ con picchi fino a 500 kBq/m³ [3,4].

A questo punto è stata avanzata l'ipotesi di un rapporto di causa-effetto tra gli alti livelli di radon ed il cancro polmonare.

Il radon è un gas naturale, inerte, incolore, inodore e radioattivo. È circa otto volte più pesante dell'aria. La sua solubilità in acqua aumenta al diminuire della temperatura dell'acqua: a 20 °C la concentrazione di radon in acqua è pari al 25% di quella in aria; a 0 °C è il 57% [5]. Per questo motivo il radon può essere assorbito dalle acque che percolano attraverso terreni ed essere trasportato a grandi distanze.

Il radon è presente in natura con tre isotopi, il ^{222}Rn (radon), il ^{220}Rn (thoron) e il ^{219}Rn (actinon), i quali appartengono rispettivamente alle serie radioattive che hanno per capostipiti ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U , i cui tempi di dimezzamento sono riportati nella Tabella 1. Il radon è l'unico elemento gassoso delle serie radioattive, ma, a causa delle diverse abbondanze degli elementi capostipiti e delle differenti vite medie, l'isotopo 222 è di gran lunga quello più importante. Poiché è un gas chimicamente inerte, il radon non si combina con gli elementi del materiale nel quale è stato generato e può così allontanarsi e percorrere distanze

Tabella 1 – Caratteristiche generali delle serie radioattive

Elem. capostipite	Elem. gassoso	Elem. stabile
^{238}U $T_{1/2} = 4.468 \cdot 10^9 \text{ y}$	^{222}Rn (radon) $T_{1/2} = 3.8 \text{ d}$	^{206}Pb
^{232}Th $T_{1/2} = 14.010 \cdot 10^9 \text{ y}$	^{220}Rn (thoron) $T_{1/2} = 55 \text{ s}$	^{208}Pb
^{235}U $T_{1/2} = 0.7038 \cdot 10^9 \text{ y}$	^{219}Rn (actinon) $T_{1/2} = 3.9 \text{ s}$	^{207}Pb

Aspetti sanitari del radon negli ipogei

La principale causa di tumore al polmone è il fumo di tabacco, principalmente sigaretta: diversi studi epidemiologici mostrano che l'esposizione cumulativa al radon sembra essere un fattore significativo per il manifestarsi di un tumore al polmone. Dagli studi emerge altresì che il rischio dipende parecchio dal clima e dalla posizione geografica. Per quanto concerne gli ambienti ipogei, il rischio di esposizione al radon andrebbe quantificato in termini di dose assorbita sulla base della concentrazione di radon e delle ore di permanenza all'interno dell'ipogeo, e, in questo senso, un gran numero di grotte non rappresenterebbe un serio problema per il visitatore, a causa dell'esiguo numero di ore di permanenza all'interno della cavità [6]. Tuttavia, se, a causa del breve tempo di permanenza all'interno delle grotte, il rischio di sviluppare un tumore polmonare per un visitatore non fumatore può essere considerato molto basso, diverso è il caso di un visitatore fumatore, che presenta un rischio ben maggiore [7].

Accumulo di radon negli ipogei

L'abbondanza del radon nelle rocce, nei minerali, nel suolo e nelle acque è legata alla concentrazione di uranio e di torio; essi sono i capostipiti di tutto il radon presente in natura e sono diffusi nella crosta terrestre in concentrazioni molto variabili, in base alla genesi e morfologia delle rocce che li contengono.

In generale, nelle rocce vulcaniche la concentrazione di ^{238}U e ^{232}Th è mediamente maggiore che nelle rocce sedimentarie (Tabella 2). Inoltre, tra le rocce vulcaniche, quelle acide presentano maggiori quantità di uranio e torio

rispetto alle rocce basiche, a causa della tendenza di questi elementi a concentrarsi, durante la fase di cristallizzazione, nei magmi ricchi di silice [8]. La concentrazione di uranio e torio nelle rocce sedimentarie è invece legata alla mobilità di questi ultimi in acqua; in particolare, l'uranio è solubile in ambiente ossidante e molto insolubile in ambiente riducente. Le rocce sedimentarie carbonatiche, come i calcari, presentano una "inversione" rispetto alle rocce ignee, ovvero il contenuto di uranio supera quello di torio.

Tabella 2 – Contenuto di uranio e di torio nelle rocce vulcaniche e sedimentarie [8].

Rocce vulcaniche	^{238}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)
Acide (granito)	59	81
Intermedie (diorite)	23	32
Mafiche (basalto)	11	11
Ultrabasiche (durite)	0.4	24
Rocce sedimentarie	^{238}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)
Calcari	27	7
Carbonati	26	8
Arenarie	18	11
Scisti	44	44

Non tutti gli atomi di radon riescono a sfuggire dal reticolo cristallino dei minerali che lo contengono; può accadere, infatti, che gli atomi di radon attraversino il poro e finiscano in un granulo adiacente (Figura 1).

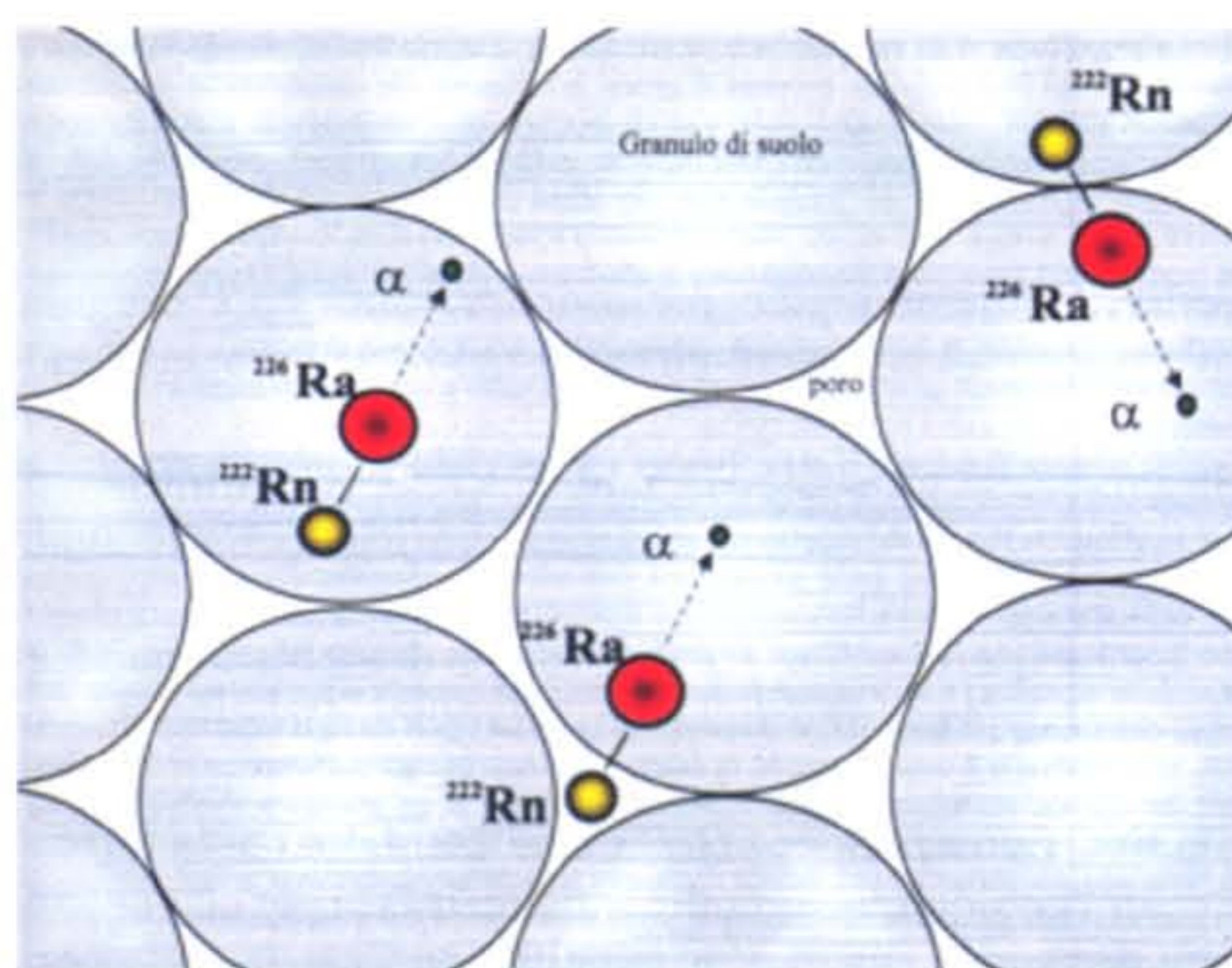


Fig. 1 - Meccanismo di emanazione degli atomi di radon dai granuli rocciosi [9].

A questo punto, per gli atomi che riescono ad essere espulsi dal granulo entrano in gioco le caratteristiche fisico-chimiche delle rocce e del suolo. Porosità, fessurazione, fratturazione, permeabilità, umidità determinano la modalità di migrazione del radon nel sottosuolo, che può avvenire per diffusione, per convezione (con distanze coperte dell'ordine dei centimetri o dei metri), o per trasporto da parte di un fluido (con spostamenti maggiori). La mobilità dei fluidi nel sottosuolo, e quindi la capacità di migrazione del radon, è influenzata anche dalla quantità di acqua presente e da alcuni parametri meteorologici. Ad esempio, la concentrazione del radon nel suolo può aumentare quando gli strati più superficiali del terreno sono saturi d'acqua in seguito alle precipitazioni atmosferiche. Essi formano una

barriera tra suolo ed atmosfera, che si oppone agli effetti termoconvettivi, eolici e barometrici, che favoriscono invece l'esalazione del radon (effetto capping).

Il radon è moderatamente solubile in acqua, pertanto può essere presente nelle acque che scorrono tra le rocce e le sabbie. Una volta formato ed esalato dalle rocce e dai minerali, può entrare a far parte degli spazi interstiziali oppure essere disciolto nelle acque di falda. L'acqua costituisce un veicolo efficace per il trasporto del radon dagli strati più profondi alla superficie.

Benché, di norma, fenomeni di carsismo si sviluppano su rocce calcaree povere di uranio, il processo di dissoluzione chimica può favorire l'accumulo di residui insolubili e ricchi di ossidi ad elevata concentrazione di uranio. Inoltre, le grotte carsiche possono essere ricche di radon a seguito della normale diffusione del gas attraverso la fratturazione delle rocce che rende gli ammassi rocciosi permeabili ai fluidi, e del contributo fornito dal radon sciolto in acqua; in modo particolare va considerata anche la risalita attraverso fessure e faglie attive, ed i moti convettivi causati da differenze di temperatura tra ambienti ipogei a diverse profondità (Figura 2).

Se all'esterno il radon viene rapidamente diluito, alte concentrazioni di radon sono possibili nelle miniere, nelle terme, nelle grotte, negli acquedotti, nelle gallerie, nelle cantine, nei sotterranei e in genere in tutti i luoghi chiusi ed a diretto contatto con il terreno.

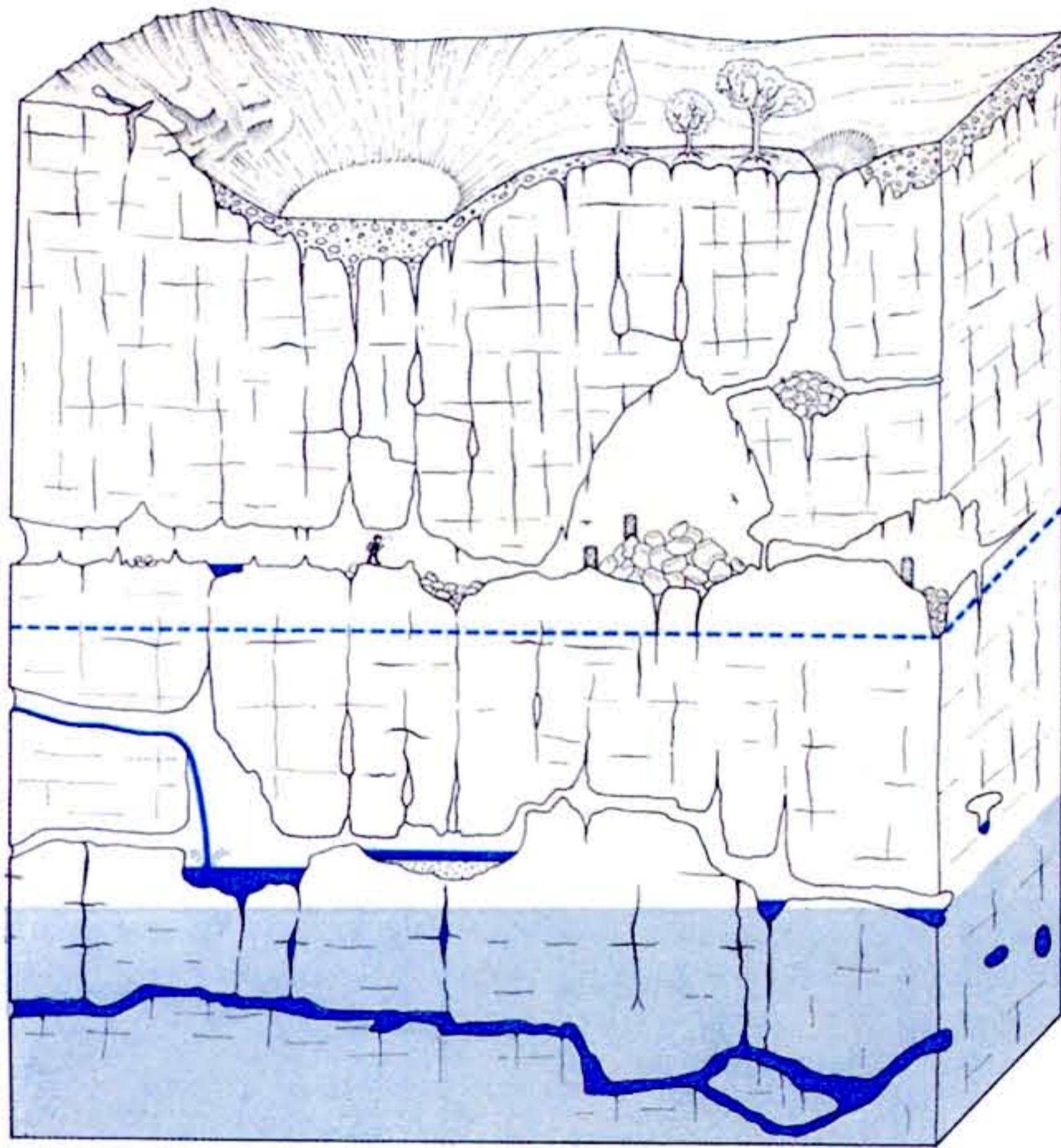


Fig. 2 – Il fenomeno carsico può favorire l'esalazione di radon, grazie alla presenza di grotte, fratture, cavità, cunicoli

La Rete Rilevamento Emissioni Gas Radon della Provincia Regionale di Ragusa

Nell'ambito delle attività istituzionali proprie dell'Assessorato Territorio, Ambiente e Protezione Civile, volte alla tutela ed alla salvaguardia del territorio, è stato avviato alcuni anni fa un programma di studio sulla sismicità iblea, che ha portato alla nascita, nel 2000, della Rete Sismometrica Provinciale e, nel 2003, alla messa in esercizio della Rete Rilevamento Emissioni Gas Radon, la cui gestione scientifica è stata affidata al C.U.T.G.A.N.A.

dell'Università di Catania. Queste strutture lavorano in sinergia per affrontare sia l'aspetto scientifico legato alla possibilità di correlare le variazioni della concentrazione di radon con il manifestarsi di eventi sismici locali, sia l'aspetto protezionistico legato alla prevenzione del rischio del radon accumulato in ambienti indoor. La Rete è costituita da stazioni di rilevamento, posizionate a Ragusa, Modica e Scicli (Figura 3), che aspirano continuamente aria dal sottosuolo e che analizzano il radon contenuto in essa. È anche presente una stazione di rilevamento portatile per misure di concentrazione di radon in atmosfera, nei terreni e nelle acque.

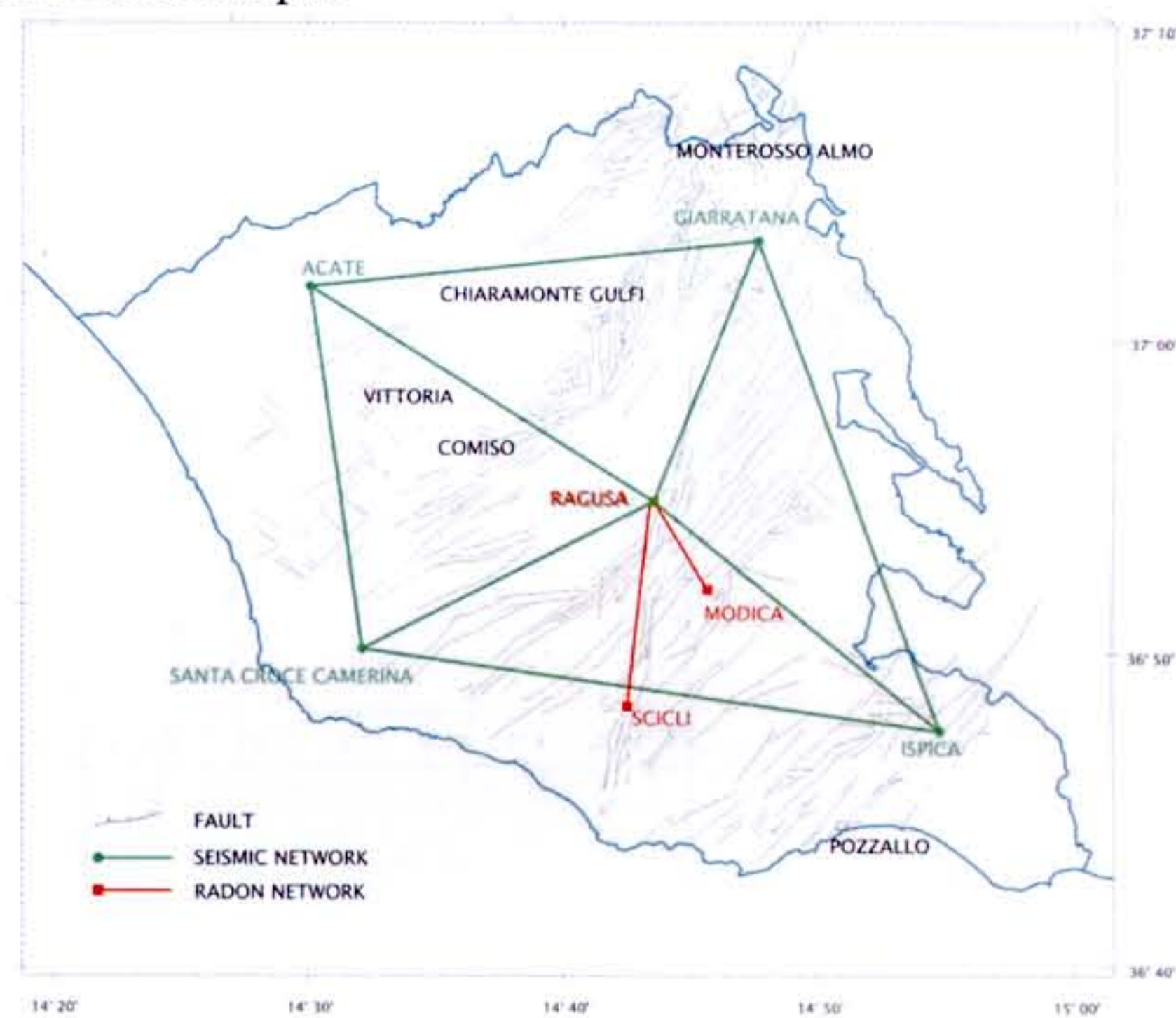


Fig. 3 - La Rete Sismometrica Provinciale (in verde) e la Rete Rilevamento Emissioni Gas Radon (in rosso).

In quasi cinque anni di attività sono stati raggiunti importanti risultati:

- i valori di concentrazione di radon misurati in continuo nel suolo sono in media superiori a quelli registrati da analoghe strutture di rilevamento posizionate in siti con prevalenza di rocce vulcaniche [10];
- i valori di concentrazione mostrano comportamenti differenti sebbene siano riferiti a siti con caratteristiche litologiche simili (Figura 4); in particolare, mentre le stazioni di Ragusa e Scicli mostrano una maggiore esalazione di radon in corrispondenza dei mesi invernali, la stazione di Modica mostra un comportamento opposto, con massimi di emissione in corrispondenza dei mesi estivi;
- si evidenzia una notevole dipendenza della concentrazione di radon dai parametri meteorologici (in particolare dalla temperatura) che potrebbero nascondere eventuali anomalie legate al manifestarsi di eventi sismici;
- sono state eseguite misure di concentrazione di radon indoor presso edifici scolastici con l'obiettivo di individuare particolari situazioni di accumulo di radon in ambienti sotterranei e seminterrati;
- misure eseguite lungo linee di faglia hanno presentato concentrazioni di radon fino a 100 kBq/m³.

Sulla base di questi risultati, che hanno ampliato la conoscenza delle caratteristiche di emissione, propagazione ed accumulo del radon, sono state programmate delle indagini per valutare anche la concentrazione di radon disciolto in acqua di pozzi e sorgenti. Inoltre, come già accennato, sono state programmate, in collaborazione con l'A.R.P.A., misure di concentrazione di radon in ambienti ipogei della Sicilia, iniziate con una misura pilota nella "Grotta dei Funghi" di Ragusa.

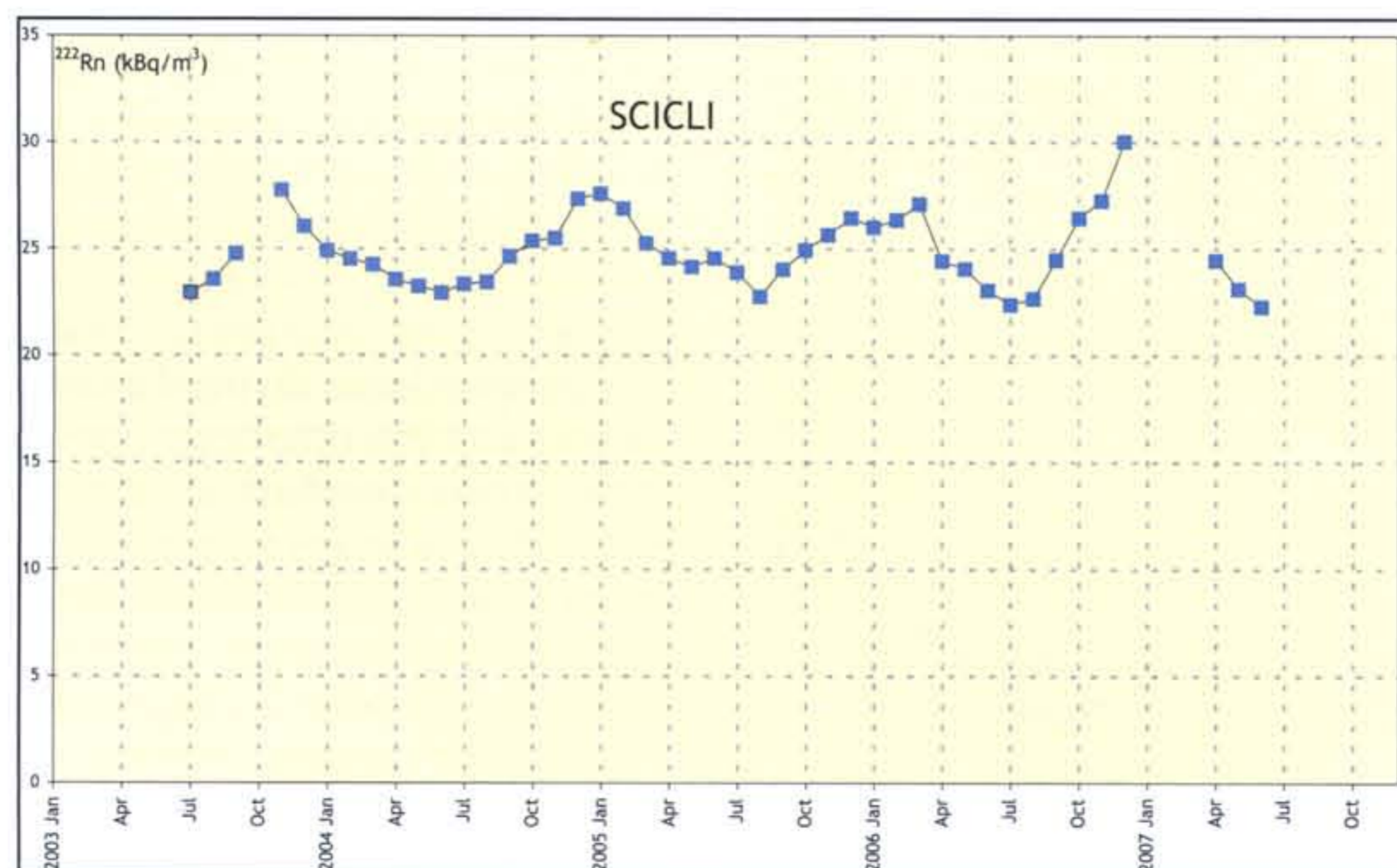
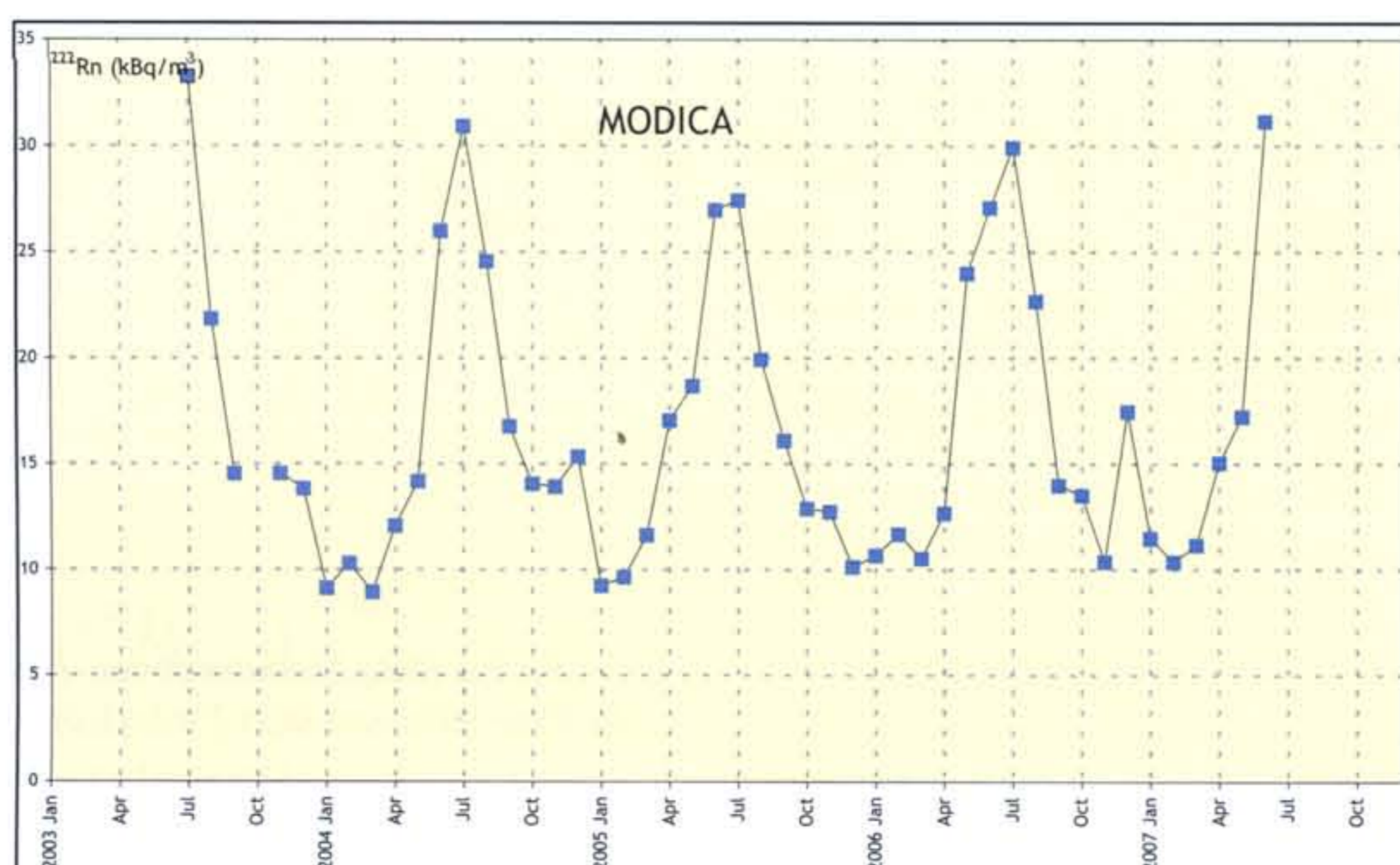
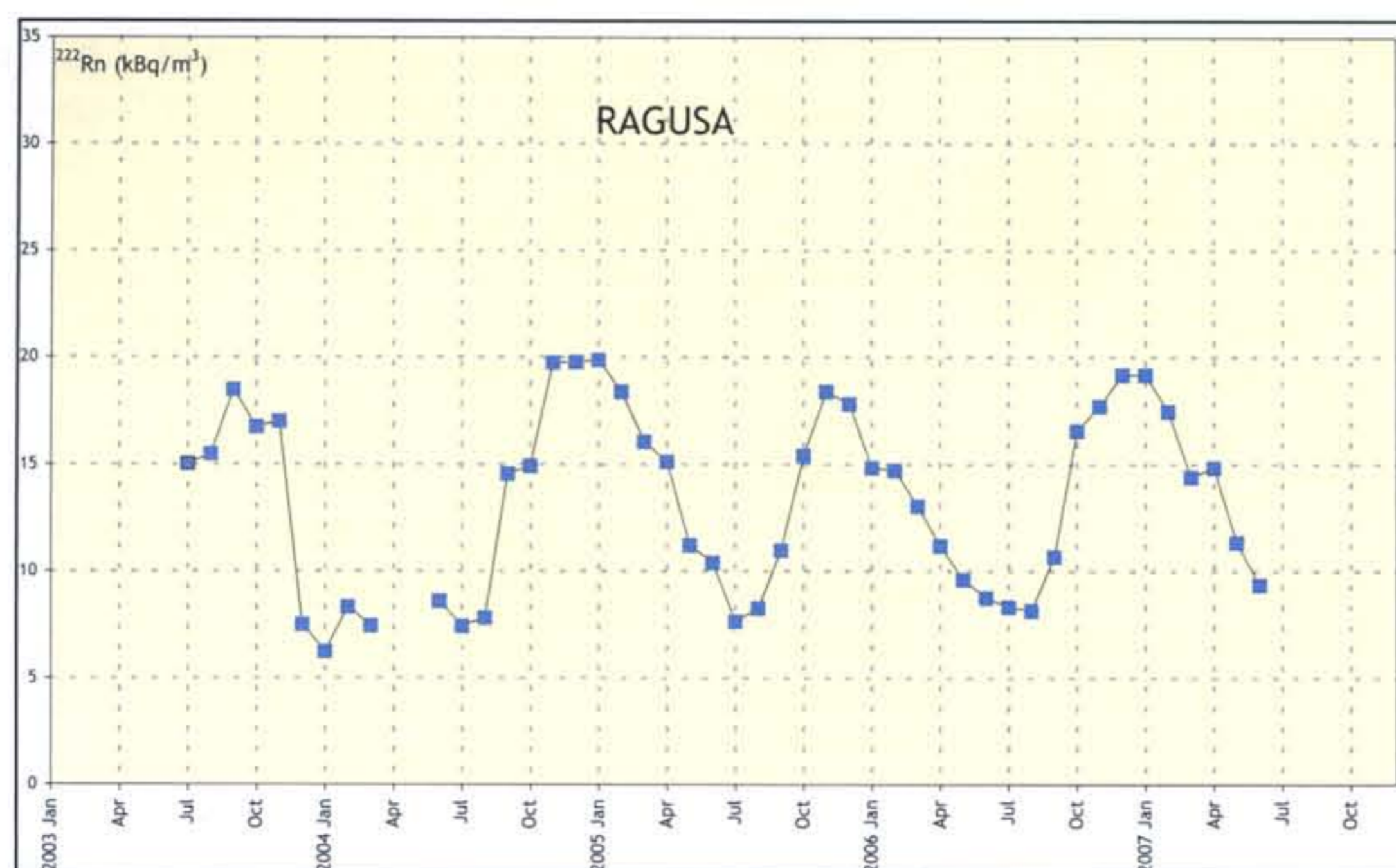


Fig. 4 - Medie mensili (kBq/m³) di concentrazione di radon registrate dalle stazioni della Rete.

Misure nella “Grotta dei Funghi”

La “Grotta dei Funghi” è posta nei pressi della confluenza tra la Cava Gonfalone e la Cava Santa Domenica a Ragusa. La grotta è costituita da una cavità, in parte artificiale (latomia), utilizzata per la coltivazione dei funghi, che intercetta un ambiente con fenomenologia carsica; sono stati scelti due punti di misura (Figura 5). Sono state

effettuate due misure in due punti distinti della grotta: la prima misura, dal 01.11.2006 al 15.11.2006, nella parte più esterna dell'ipogeo (punto P1), la seconda misura, dal 06.12.2006 al 18.12.2006, nella parte più interna (punto P2). Le misure sono state eseguite utilizzando il rivelatore portatile a camera di ionizzazione AlphaGUARD PQ2000PRO (Figura 6) della Genitron Instruments GmbH.



Fig. 5 - Planimetria della Grotta dei Funghi e punti di misura [11], tratta da: Speleologia Iblea vol. 2, modificata.

Le misure sono state effettuate in modalità diffusione con registrazione di una lettura ogni 10 minuti. Ogni lettura comprende il valore della concentrazione di radon, espresso in Bq/m³, della temperatura (°C), dell'umidità relativa (%), e della pressione atmosferica (mbar). L'analisi dei dati



Fig. 6 - Il rivelatore AlphaGUARD PQ2000PRO alimentato da una batteria ad alta capacità.

mostra, per i due punti di misura, stati di microclima differenti con conseguenti variazioni nell'andamento delle concentrazioni di radon. In Figura 7 l'andamento dei valori registrati nei due punti di misura P1 e P2.

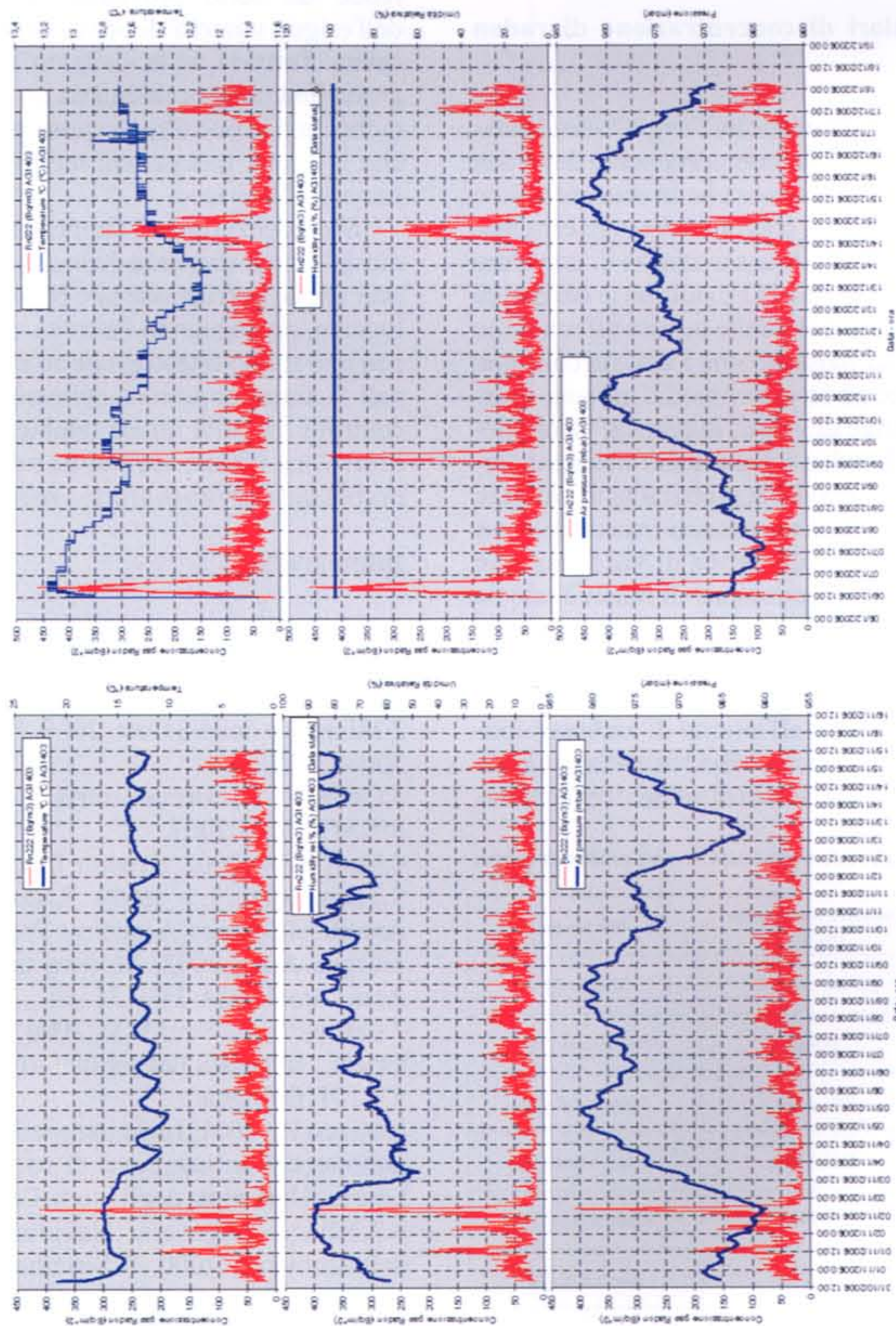


Fig. 7 - Valori di concentrazione di radon registrati nel punto P1 (a sinistra) e nel punto P2 (a destra), a confronto con i parametri climatici.

I dati registrati nel punto P1 evidenziano variazioni periodiche della concentrazione di radon, con periodo pari a circa 24 ore, e con massimi relativi che non superano 100 Bq/m³ e che sono raggiunti nella prime ore del giorno. È presente comunque un picco che supera 400 Bq/m³. I dati registrati nel punto P2 evidenziano minori variazioni periodiche della concentrazione di radon, sebbene siano presenti alcuni massimi di 300–400 Bq/m³.

L'evoluzione complessiva dei valori raggiunti nel punto di misura P1 suggerisce comunque la forte correlazione della concentrazione di radon con la temperatura e l'umidità registrata. Questa correlazione è meno marcata nel punto P2, nel quale si nota una minore variabilità dell'andamento della temperatura ed un elevato e costante tasso di umidità relativa. La struttura delle variazioni di concentrazione di radon non sembra strettamente correlabile con l'andamento della pressione atmosferica, benché un innalzamento di concentrazione a cavallo tra il 2 e il 3 novembre avvenga in corrispondenza di un abbassamento della pressione atmosferica.

I valori massimi rivelati non superano la soglia dei 500 Bq/m³ che, allo stato attuale, è l'unico valore limite della normativa italiana, riferito agli ambienti di lavoro.

Distribuzione dei valori di concentrazione di radon nelle grotte

I risultati ottenuti nella “Grotta dei Funghi” sono lontani dall'essere rappresentativi del comportamento del radon negli ambienti ipogei, dal momento che le concentrazioni di radon misurate negli ipogei coprono un range estremamente ampio e non mostrano alcuna evidenza di un valore medio di concentrazione. Cigna [12], sulla base dei dati di concentrazione di radon raccolti dalle misure effettuate su circa 300 grotte [13], ha mostrato che i dati raccolti non sono raggruppati attorno ad un valore medio ma sono sparpagliati su un ampio range di valori; in pratica, valori elevati di concentrazione di radon si presentano con meno frequenza dei valori bassi. Tuttavia, la probabilità di valori di concentrazione molto alti è bassa ma non trascurabile; un esempio in tal senso è dato dalla grotta di Vaccamorta in Abruzzo, nella quale la concentrazione di radon è tale da fornire una significativa dose assorbita anche con sole poche ore di esposizione [14].

A conferma della estrema variabilità dei valori di concentrazione di radon misurati all'interno di ambienti ipogei, si riporta, come riscontrato in varia letteratura scientifica, un elenco (Tabella 3) di risultati di valori di concentra-

Inoltre, probabilmente le misure in ambienti ipogei tendono a sottostimare la reale concentrazione di radon a causa di ragioni legate all'architettura della grotta, all'idrologia, all'aerazione e, naturalmente, alle variazioni stagionali che possono portare a notevoli differenze [19], come nel caso della Goatchurch Cavern che presenta un rapporto estate / inverno di 4.79 [18].

Conclusioni

Le misure nell'ipogeo “Grotta dei Funghi” mostrano un comportamento delle concentrazioni non sempre regolare e, comunque, solo in pochi casi vengono raggiunti valori di concentrazione prossimi al valore limite normativo di 500 Bq/m³. Tuttavia, come già illustrato, questi risultati sono lontani dall'essere rappresentativi del comportamento del radon negli ambienti ipogei, dal momento che le concentrazioni di radon misurate negli ipogei coprono un range molto ampio.

Peraltro, il rischio radon andrebbe quantificato in termini di dose assorbita sulla base della concentrazione di radon e delle ore di permanenza all'interno dell'ipogeo, e, in questo senso, un gran numero di grotte non rappresenterebbe un serio problema per il visitatore, a causa dell'esiguo numero di ore di permanenza all'interno della cavità. Tuttavia, se la visita turistica o occasionale di una grotta non pone problemi da un punto di vista del rischio radon, non si può dire lo stesso per le guide o gli operatori che in grotta trascorrono molto più tempo, ancor più se fumatori di tabacco.

Si evidenzia quindi l'importanza di approfondire lo studio del comportamento delle concentrazioni di radon misurate, anche in relazione alle peculiarità delle strutture geologiche, proseguendo l'attività di misura e monitoraggio con uno studio esteso anche ad altri ambienti ipogei regionali. È altresì opportuno coinvolgere i vari enti preposti ai controlli ed alla tutela ambientale (A.R.P.A., A.S.L., Protezione Civile, ecc.) al fine di monitorare il radon per eventuale apertura di grotte a scopo turistico.

Bibliografia

1. IARC, 2001, Ionizing Radiation, Part II: Some Internally Deposited Radionuclides, 2001; IARC Monographs Vol. 78.
2. Ministero della Salute, 2006, Piano Sanitario Nazionale 2006–2008, 93.
3. Gelmini F., Breve storia del radon, pubblicazione SILAQ, 27.03.2007.
4. Moroni M., 2002, Il radon, Il Sole 24 Ore, Milano.
5. Tommasino L., 1998, Radon, in Encyclopedia of Analytical Science, Academic Press Limited, 4359–4368.
6. Cigna A.A., 2002, Modern trend in cave monitoring, Acta Carsologica, 31/1, 35–54.
7. Craven S.A., Smit B.J., 2006, Radon in caves: clinical aspects, International Journal of Speleology, 35 (2) 2006, 93–101, Bologna.
8. Mineo R., 2001, Indagine sperimentale sulla presenza di radionuclidi in campioni di rocce, Tesi sperimentale di Laurea, Università degli Studi, Catania.
9. ANPA – Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, 2000, Il Sistema Informativo Territoriale per la valutazione del Potenziale di Esalazione di Radon dal Suolo, Serie Stato dell'Ambiente 9, ANPA, Roma.

Tabella 3 – Concentrazioni di radon misurate in vari ambienti ipogei

Grotte, cavità, miniere	Concentrazione di radon (Bq/m ³)	Riferimento
Miniere di Schneeberg (D)	150 000 – 500 000	Gelmini [3]
Grotta di Vaccamorta (I)	10 000	Moretti et al. [14]
Grotte australiane	500 – 9 000	Solomon et al. [15]
Grotte inglesi	484 – 8 868	Hyland & Gunn [17]
Giant Hole Derby Shire (Gran Bretagna)	155 000	Hyland & Gunn [17]
Mendip cave cluster (Gran Bretagna)	2 600	Sperrin et al. [18]
Desert caves of Al-Somman Plateau (Arabia Saudita)	74 – 451	Hanan Al-Mustafa et al. [19]

10. Immè G., La Delfa S., Lo Nigro S., Morelli D., Patanè G., 2005, Gas radon emission related to geodynamic activity on Mt. Etna, *Annals of Geophysics*, vol. 48, n. 1, february 2005, 65–71.
11. Gruppo Grotte Ragusa – Centro Ibleo di Ricerche Speleo–Idrogeologiche, 1991, *Speleologia Iblea*, anno II – n. 2, Ragusa.
12. Cigna A.A., 2003, The distribution of radon concentration in caves, *International Journal of Speleology*, 32 (1-4) 2003, 113–115, Bologna.
13. Hakl J., Hunyadi I., Várhegyi A., 1995, Radon monitoring in caves, in Durrani S.A. & Ilic R. (Eds.), *Radon measurements by etched track detectors*, World Scientific, 261–283.
14. Moretti A., Ferrini G., Di Sabatino D., Sciocchetti G., 2004, La radioattività della grotta di Vaccamorta (Tornimparte, Abruzzo), GNGTS – Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, *Atti del 23° Convegno Nazionale*, Roma, 14-16 dicembre 2004.
15. Solomon S.B., Langroo R., Peggio J.R., Lyons R.G., James J.M., 1996, Occupational exposure to radon in Australian tourist caves – An Australia-wide study of radon levels, Australian Radiation Laboratory, Final Report of Worksafe Australia Research Grant (93/0436), ARL/TR119, ISSN 0157-1400, february 1996.
16. Hyland R. & Gunn J., 1994, International Comparison of Cave Radon Concentrations Identifying the Potential Alpha Radiation Risks to British Cave Users. *Health Physics*, 67 (2), 176–179.
17. Sperrin M., Gillmore G., Denman T., 2001, Radon concentration variations in a Mendip cave cluster, *Environmental Management and Health*, Volume 12, Issue 5, 476–482.
18. Hanan Al-Mustafa, M.I. Al-Jarallah, Fazal-ur-Rehman & F. Abu-Jarad, 2005, Radon concentration measurements in the desert caves of Saudi Arabia, *Radiation Measurements*, Volume 40, Issues 2-6, november 2005, 707–710, Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Tracks in Solids.
19. Cigna A.A., 2005, Radon in caves, *International Journal of Speleology*, 34 (1-2) 2005, 1–18, Bologna.

