



Regione del Veneto
Direzione Regionale per la Prevenzione



ARPAV
AGENZIA REGIONALE PER LA PREVENZIONE
E PROTEZIONE AMBIENTALE DEL VENETO

**INDAGINE REGIONALE
PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE AREE
AD ALTO POTENZIALE DI RADON
NEL TERRITORIO VENETO**

REGIONE DEL VENETO
DIREZIONE REGIONALE PER LA PREVENZIONE

ARPAV

AGENZIA REGIONALE PER LA PREVENZIONE E LA PROTEZIONE AMBIENTALE DEL
VENETO
AREA TECNICO-SCIENTIFICA

**INDAGINE REGIONALE
PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE AREE
AD ALTO POTENZIALE DI RADON
NEL TERRITORIO VENETO**

(DELIBERA DELLA GIUNTA REGIONALE 8 NOVEMBRE 1996, N. 5000)

Rapporto a cura del CRR (Centro di riferimento regionale per il coordinamento della rete di rilevamento della radioattività ambientale) **Dipartimento ARPAV di Verona**

Verona, 30 Novembre 2000

INDAGINE REGIONALE PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE AREE AD ALTO POTENZIALE DI RADON NEL TERRITORIO VENETO

PROMOZIONE

Regione del Veneto – Direzione Regionale per la Prevenzione

REALIZZAZIONE

Dipartimenti Provinciali ARPAV di Belluno, Padova, Treviso, Verona e Vicenza

COORDINAMENTO TECNICO-SCIENTIFICO

CRR (Centro di riferimento regionale per il coordinamento della rete di rilevamento della radioattività ambientale) – Dipartimento ARPAV di Verona

A. Tacconi (coordinatore scientifico dell'indagine), F. Trotti (referente esecutivo per l'indagine)

PARTECIPANTI

CRR - Dipartimento ARPAV di Verona: F. Bissolo, E. Caldognetto, L. Filipozzi, G. Franzini, G. Fusato, R. Fustegato, M. Lanciai, F. Predicatori, V. Panepinto, S. Poli, P. Querini, F. Righetti, F. Rinaldi, A. Tanferi

Dipartimento ARPAV di Belluno: M. Bassanello, S. Bassani, F. David, L. Pasquini, P. Soccà

Dipartimento ARPAV di Padova: F. Bergoglio, A. Bertolo, B. M. Stievano, G. P. Zamproga

Dipartimento ARPAV di Treviso: F. Andolfato, L. Ceresa, G. Gasparetto, M. Giacometti, F. Lovadina

Dipartimento ARPAV di Vicenza: R. C. Avanzo, L. Belleri, M. Zanon

ORAF (Osservatorio Regionale Agenti Fisici) – Direzione Area Tecnico Scientifica ARPAV: P. Mozzo

ALTRE COLLABORAZIONI

Comuni dell'area interessata dall'indagine

Dipartimenti di Prevenzione - Aziende ULSS 20 (Verona), ULSS 22 (Bussolengo - VR), ULSS 1 - Servizio Veterinario (Belluno)

Coordinamento Provinciale di Verona del Corpo Forestale dello Stato

Museo di Storia Naturale di Verona

INDICE

1.	INTRODUZIONE	pag. 1
2.	GENERALITÀ SUL RADON.....	pag. 3
3.	L'INDAGINE REGIONALE PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE AREE AD ALTO POTENZIALE DI RADON NEL TERRITORIO VENETO.....	pag. 5
	3.1 OBIETTIVI DELL'INDAGINE	pag. 5
	3.2 ORGANIZZAZIONE	pag. 5
	3.2.1 SCELTA DEL CAMPIONE	
	3.2.2 QUESTIONARIO	
	3.2.3 PROCEDURE OPERATIVE	
	3.3 METODOLOGIA	pag. 6
	3.4 RISULTATI.....	pag. 7
	3.5 CONCLUSIONI.....	pag. 7
	3.6 RINGRAZIAMENTI	pag. 8
4.	BIBLIOGRAFIA.....	pag. 9
	APPENDICE A IL RADON E L'ABITAZIONE	pag. 10
	APPENDICE B CARATTERIZZAZIONE DEL CAMPIONE	pag. 15
	APPENDICE C GESTIONE DEI DATI RELATIVI ALLE ABITAZIONI	pag. 20
	APPENDICE D DOSIMETRI PASSIVI PER IL MONITORAGGIO DEL RADON.....	pag. 32
	APPENDICE E SISTEMA DI LETTURA ED ANALISI AUTOMATICA DEI RIVELATORI DI RADON	pag. 36
	APPENDICE F QUALITÀ DEI DATI DI MISURA	pag. 39
	APPENDICE G METODOLOGIA DELL'INDAGINE	pag. 44
	APPENDICE H RISULTATI DELL'INDAGINE.....	pag. 53
	APPENDICE I SVILUPPI FUTURI	pag. 70

1. INTRODUZIONE

Il maggior contributo all'esposizione totale della popolazione alle radiazioni ionizzanti deriva dalle sorgenti naturali, le cui fonti principali sono costituite dai raggi cosmici, dalla radiazione gamma terrestre, dal Rn-220 (Toron) e Rn-222 (Radon), dai rispettivi prodotti di decadimento e dai radionuclidi interni al corpo.

L'esposizione più rilevante al radon (e ai suoi prodotti di decadimento) avviene all'interno degli ambienti confinati ove concentrandosi raggiunge a volte livelli molto elevati. Studi epidemiologici condotti nelle miniere di uranio hanno evidenziato una correlazione marcata tra l'esposizione al radon e l'incidenza di cancro polmonare.

In Italia è stata condotta alla fine degli anni '80 un'indagine nazionale per valutare l'esposizione della popolazione alla radioattività naturale (radon e i suoi discendenti, radiazione gamma) all'interno delle abitazioni [1].

Tale indagine ha coinvolto tutte le regioni selezionando un campione significativo di 5000 abitazioni e ha consentito di stimare l'esposizione media della popolazione e di evidenziare alcune situazioni di potenziale criticità, con riferimento particolare al più insidioso degli agenti considerati ovvero il radon ⁽¹⁾.

In Veneto si è ottenuta una concentrazione media di radon di 59 Bq/m³ leggermente superiore alla media dell'Emilia Romagna (43 Bq/m³), e inferiore a quelle di Friuli Venezia Giulia (96 Bq/m³) e Lombardia (117 Bq/m³). La media nazionale è risultata di 75 Bq/m³ (dato in corso di affinamento).

Dalla concentrazione tipica del Veneto si è valutato, tenendo conto dei tempi medi di permanenza della popolazione all'interno degli ambienti chiusi, dei fattori fisiologici, dei modelli dosimetrici, ecc., che la dose efficace media annua individuale è di circa 0,78 mSv nelle abitazioni e 0,33 in altri ambienti chiusi, per un totale di 1,1 mSv/anno.

A livello nazionale la dose efficace media ricevuta dagli italiani è stata stimata pari a 1,5 mSv/anno. Il Comitato Scientifico delle Nazioni Unite sugli Effetti della Radiazione Atomica stima a livello mondiale per la dose efficace media individuale dovuta al radon un valore di 1,3 mSv/anno [2].

Utilizzando i coefficienti di rischio derivanti dagli studi di coorte sui minatori di uranio, si stima che l'esposizione indoor per tutta la vita al livello medio di radon del Veneto comporti un rischio in eccesso di contrarre il tumore polmonare dello 0,6 %, rischio che sale al 3,6 % per una concentrazione di radon pari a 400 Bq/m³.

Questo è il valore che la Raccomandazione CEC 90/143 [3] indica come livello al di sopra del quale è opportuno procedere, per abitazioni esistenti, ad azioni di risanamento.

Diversi sono i Paesi europei che si sono attrezzati con normative e limiti sul radon per gli ambienti di vita e di lavoro; in Italia mancano disposizioni circa le abitazioni, mentre è stato emanato di recente un decreto [4] che fissa in 500 Bq/m³ il limite per la concentrazione di radon negli ambienti di lavoro.

È noto che i livelli di radon indoor variano molto da zona a zona (in funzione di diversi parametri) ed è per questo che, nonostante il livello medio del Veneto sia risultato dalla precedente indagine abbastanza modesto, è possibile che aree specifiche della regione presentino valori alti.

⁽¹⁾ Da un punto di vista sanitario sono i discendenti del radon i più pericolosi: essi sono implicitamente richiamati parlando genericamente di radon.

L'indagine precedentemente condotta, basata su un campione statisticamente rappresentativo di 372 abitazioni, ha consentito di escludere (in prima battuta) la parte meridionale della regione come area potenzialmente a rischio, ma ha suggerito l'esistenza di tali aree altrove.

La Regione Veneto (attraverso l'attuale Direzione Regionale per la Prevenzione), con delibera della Giunta Regionale 8 Novembre 1996 n. 5000, ha così promosso la mappatura delle aree con elevati livelli di radon indoor nel territorio regionale affidandone l'incarico al CRR in collaborazione con le Sezioni di Fisica Ambientale dei Presidi Multizonali di Prevenzione del Veneto (oggi Dipartimenti Provinciali dell'ARPAV) allo scopo di verificare proprio l'eventuale esistenza di tali aree nel territorio regionale. La loro individuazione consentirà di concentrare gli interventi risanatori e di prevenzione nelle zone a rischio.

A livello internazionale, si avverte da tempo l'esigenza dell'identificazione delle 'prone-areas' (aree con elevati livelli di radon). Lo stesso decreto poc'anzi menzionato (che recepisce una Direttiva del Consiglio della Comunità Europea in materia di protezione dalle radiazioni ionizzanti) stabilisce che vengano effettuati controlli di esposizione al radon in luoghi di lavoro situati in aree identificate.

Diversi sono gli approcci seguiti per la classificazione delle aree ad alto potenziale di radon: Germania [5] e Svezia [6] hanno deciso di disegnare le mappe delle aree a rischio sulla base di parametri geologici; in Svezia si sono accoppiati gli indicatori geologici a misure di radon nel suolo e di uranio nelle rocce; il National Radiological Protection Board (NRPB) nel Regno Unito [7] e, in qualche misura, la stessa ICRP (Commissione Internazionale per la Protezione Radiologica) [8] si sono basati invece sulla distribuzione territoriale delle concentrazioni di radon misurate nelle abitazioni.

Quest'ultimo approccio è stato scelto come metodologia d'indagine anche dal CRR, comportando il coinvolgimento di più di 1200 abitazioni, sempre però nel contesto di una collaborazione con l'ANPA impegnata a sviluppare indicatori di radon sulla base di parametri geologici.

Questo rapporto fornisce la prima elaborazione dei risultati conclusivi dell'indagine (insieme alla descrizione di obiettivi e metodologia per essa adottati) e ne sancisce il termine. Nel luglio del 1999 era stato fornito un rapporto preliminare sull'indagine.

2. GENERALITÀ SUL RADON

Il radon è un gas nobile radioattivo presente naturalmente come isotopi: Rn-219, Rn-220 e Rn-222.

Il Rn-220, noto anche come toron, appartiene alla catena del Th-232 (schema 1), il Rn-222, comunemente chiamato radon (ad esso si fa riferimento in questo rapporto), appartiene a quella dell'U-238 (schema 2) ed è il più importante dei due isotopi perché ha un tempo di dimezzamento più lungo (quello del Rn-220 è estremamente basso). L'abbondanza isotopica del Rn-219 è invece assai esigua.

Quando il radon viene generato nella roccia o nel suolo o nei materiali da costruzione, essendo un gas nobile, può liberamente muoversi raggiungendo l'aria in superficie attraverso le porosità del materiale; il movimento avviene mediante diffusione molecolare e, per il solo suolo, mediante trasporto da parte di un fluido (acqua, aria).

Esalando dal suolo, il radon, se è rilasciato all'aperto, viene rapidamente disperso nell'atmosfera e la concentrazione che ne consegue è generalmente bassa.

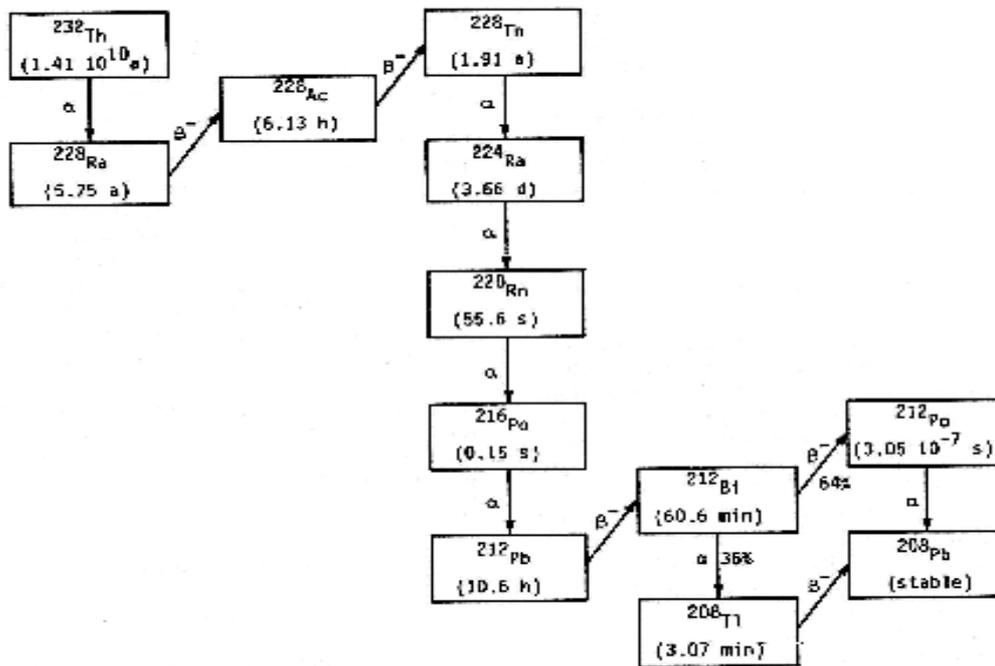
Se entra in un ambiente chiuso, provenendo dal suolo o dai materiali di costruzione, la sua concentrazione cresce a causa del limitato ricambio d'aria.

La temperatura interna all'abitazione spesso più alta di quella esterna e l'effetto del vento sull'edificio sono fattori che agiscono nella direzione di incrementare il livello indoor di radon. A causa loro, infatti, la pressione atmosferica interna tende ad essere inferiore a quella del sottosuolo. La risultante differenza di pressione, solitamente piccola, è tuttavia sufficiente, se esiste un percorso agevole, ad indurre un flusso di gas radon dal terreno verso l'interno dell'abitazione. I processi descritti sono spesso determinanti: in molte abitazioni ove sono stati riscontrati alti livelli di radon si è verificato, infatti, che il meccanismo dominante di ingresso del radon non era la diffusione dal suolo o dai materiali da costruzione ma il flusso guidato dalla differenza di pressione.

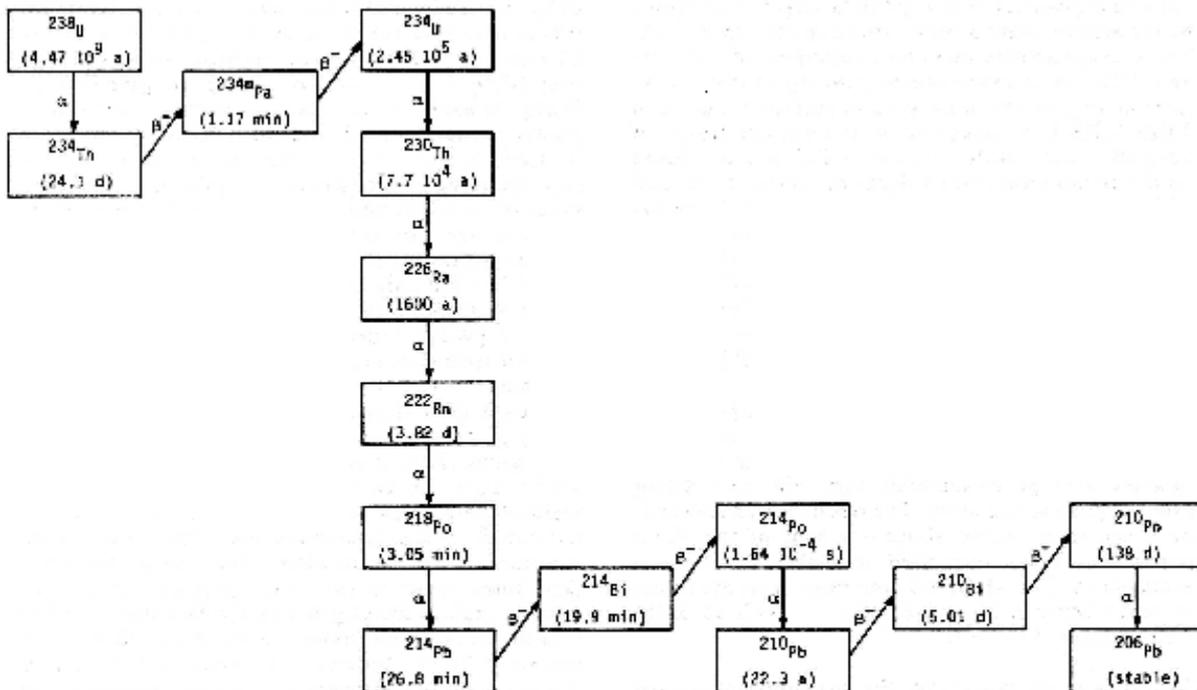
Anche l'acqua e il gas utilizzati nelle abitazioni e l'aria esterna portano un contributo alla concentrazione di radon, ma spesso di minor importanza.

Riassumendo, le sorgenti di radon in ambienti chiusi sono: il suolo, i materiali da costruzione, l'aria esterna, l'acqua ed il gas naturale.

L'analisi di questi fattori è abbozzata in appendice A.



Schema 1: Catena del Th-232



Schema 2: Catena dell'U-238

3. L'INDAGINE REGIONALE PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE AREE AD ALTO POTENZIALE DI RADON NEL TERRITORIO VENETO

Dall'analisi statistica dei risultati ottenuti nell'indagine nazionale a cui si è accennato nel primo capitolo, è emerso che nel Veneto la principale fonte di ingresso di radon nelle abitazioni è costituita dal suolo mentre gli altri contributi risultano, in genere, di secondaria importanza.

La pressione sotterranea del fluido veicolante il radon e le vie d'ingresso dal suolo all'ambiente di vita sono legate non solo alla tipologia geologica ma anche al piano dell'abitazione (inteso come distanza dal suolo), al clima e alla tipologia dell'abitazione stessa (cfr. appendice A). La sola geologia quindi non è sufficiente a delineare la mappa delle zone ad elevato livello di radon.

Il CRR, cui è stata affidata dal Dipartimento di Igiene Pubblica (oggi Direzione per la Prevenzione) della Regione Veneto l'organizzazione e la gestione tecnico-scientifica dell'indagine, ha scelto di seguire il modello inglese dell'NRPB [7], con i debiti adattamenti alla situazione locale.

La ricerca si è basata sull'analisi delle concentrazioni misurate direttamente all'interno delle abitazioni.

3.1. OBIETTIVI DELL'INDAGINE

L'obiettivo principale consiste nel definire le aree che per caratteristiche geomorfologiche, meteo-climatiche e di tipologie costruttive standard siano tali da avere flussi rilevanti di radon dal sottosuolo nelle abitazioni (e nei luoghi lavorativi), pervenendo alla definizione di una carta regionale delle situazioni maggiormente affette da radon.

In tal modo risulterà possibile individuare adeguati livelli di riferimento per il radon indoor nonché elaborare misure e sperimentare protocolli di intervento sui fabbricati allo scopo di fornire alle amministrazioni locali indicazioni mirate circa gli interventi di prevenzione.

L'indagine costituisce inoltre una proposta metodologica delle strategie di individuazione delle *radon prone areas* che può fornire suggerimenti o integrare iniziative analoghe su base nazionale.

Essa si collega, infine, ad un precedente studio epidemiologico di tipo ecologico condotto dal CRR di Verona, teso a verificare la correlazione tra incidenza di tumori polmonari e livelli di radon in ambienti confinati in Veneto [13].

3.2. ORGANIZZAZIONE

Il coordinamento tecnico-scientifico dell'indagine è stato assegnato al CRR, oggi facente parte del Dipartimento ARPAV di Verona.

Sono state coinvolte nell'indagine le Sezioni di Fisica dei Presidi Multizonali di Prevenzione (attuali Dipartimenti Provinciali ARPAV) di Belluno, Padova, Treviso, Vicenza per l'individuazione delle abitazioni in cui effettuare i rilevamenti di radon, per la distribuzione dei dosimetri (con l'ausilio in alcune zone dei Comuni del territorio coinvolto) e, in generale, per una collaborazione all'elaborazione dei criteri metodologici ed operativi della campagna di misura.

Sono stati ipotizzati rilevamenti in più di 1400 abitazioni, campione considerato rappresentativo per il territorio esaminato.

Si è escluso dall'indagine il monitoraggio della parte meridionale della regione, in quanto, date le caratteristiche geologiche (depositi alluvionali fini, di bassa permeabilità), essa

sembra caratterizzata da modesti valori di radon, come riscontrato nella precedente indagine nazionale.

Si è sovrapposto al territorio della regione un reticolo a maglie rettangolari (6,5x5,5 km²) corrispondenti ai quadri delle Carte Tecniche Regionali 1:10000 e si è previsto di effettuare le misure in almeno cinque abitazioni per maglia.

3.2.1. SCELTA DEL CAMPIONE

L'indagine prevedeva il monitoraggio di 293 maglie per un totale di 1465 abitazioni; in realtà, ad indagine conclusa, sono risultate effettivamente monitorate 218 maglie per un totale di 1230 abitazioni. In effetti, l'area di monitoraggio è un sottoinsieme dell'area complessivamente contemplata nell'indagine (330 maglie, oltre la metà del territorio regionale) includendo maglie di fatto non accessibili (assenza di insediamenti abitativi) per le quali tuttavia è stato possibile fornire stime sui livelli (potenziali) di radon.

L'aspetto della scelta delle abitazioni campione è discusso in appendice B.

3.2.2. QUESTIONARIO

Per ogni partecipante è stato compilato un questionario come descritto in appendice C al fine di conoscere le caratteristiche dell'abitazione, degli occupanti e della zona.

3.2.3. PROCEDURE OPERATIVE

Ad ogni famiglia selezionata ai fini dell'indagine è stato consegnato un dosimetro passivo con rivelatori CR-39 (descritto in appendice D), sostituito con un secondo dopo sei mesi in modo da monitorare l'intero anno: la misura integrata nel tempo permette di tener conto delle variazioni stagionali delle concentrazioni di radon legate essenzialmente a fattori climatici. Si è chiesto di posizionare tali dosimetri preferenzialmente in locali a piano terra, che non fossero possibilmente bagno e cucina per evitare l'influenza del radon presente nell'acqua o le turbolenze connesse con il suo impiego e con le fonti di calore.

In appendice E inoltre è descritto il sistema di lettura dei rivelatori che consente di calcolare la concentrazione di radon presente nell'abitazione. In appendice F sono descritte le procedure seguite per assicurare la qualità dei dati prodotti.

3.3. METODOLOGIA

Un primo elemento metodologico è costituito dalla dipendenza del livello di radon misurato dal piano dell'abitazione. Si è proceduto a normalizzare i dati sperimentali alla condizione di piano terra onde disporre di indicatori del potenziale di radon più rappresentativi della sorgente (il suolo); si sono anche proiettati i suddetti dati con riferimento alla condizione abitativa media del Veneto in relazione al piano per descrivere in modo più aderente alla realtà la situazione effettiva delle abitazioni.

Il secondo aspetto di rilievo consiste nelle modalità con cui, a partire dai dati del rilevamento nelle abitazioni della singola maglia, sono stati ricavati il valore medio e la percentuale di abitazioni che superano un determinato livello di riferimento da attribuire alla maglia: tali informazioni sono state derivate assumendo che la distribuzione di frequenza dei livelli di radon nelle maglie sia di tipo log-normale.

A partire dai dati ottenuti sono state prodotte attraverso tecniche di riempimento e smoothing le mappe delle percentuali di abitazioni che superano i livelli di riferimento scelti in via preliminare pari a 200 Bq/m³ e 400 Bq/m³ e delle medie di concentrazione del gas.

Tutta la descrizione dell'elaborazione è fornita in appendice G.

3.4. RISULTATI

In appendice H sono descritti i risultati dell'indagine (con prima elaborazione completa): per la parte di campionamento e misura, essa si è conclusa nel corso del 1999.

Nell'appendice sono riassunte le statistiche generali sui dati e sono fornite le mappe (tipicamente) delle percentuali di abitazioni che superano i livelli di riferimento di 200 Bq/m³ e 400 Bq/m³ sia per il piano terra che per la normalizzazione alla condizione abitativa standard del Veneto rispetto al piano (cfr. par. 3.3. e appendice G).

I risultati indicano che l'area interessata dall'indagine presenta livelli di radon mediamente più alti rispetto allo standard regionale (indagine nazionale del 1989 [1]): a titolo di esempio, la media aritmetica in questa indagine (dati riferiti alla tipologia abitativa standard del Veneto - housing stock) è di 94 Bq/m³ contro i 59 Bq/m³ di media rappresentativa della regione.

Vari tipi di mappe sono possibili per rappresentare l'articolazione dell'informazione sul territorio. Adottando quella delle percentuali di abitazioni (housing stock) con livelli eccedenti 200 Bq/m³ e ipotizzando una soglia per la delimitazione delle aree a rischio al 10 %, aree con elevati valori di radon si rinvergono nel nord delle province di Belluno (alcune zone del Cadore, dell'Agordino e del Comelico) e di Vicenza (Alta Val d'Astico con estensioni orientali e occidentali, zona pedemontana sottostante).

Maglie isolate sopra soglia si individuano anche in altre zone: in effetti, ricorrendo a soglie o rappresentazioni più "blande", tendono a delinarsi altre aree con elevati livelli; tra queste vanno segnalati i Colli Euganei (PD), sito potenzialmente sensibile per configurazione geologica (probabilmente non evidenziatosi molto per modesta risoluzione spaziale dell'indagine).

Sono possibili associazioni con la geologia o altri fattori abitativo-ambientali, che vengono commentate nell'appendice H.

3.5. CONCLUSIONI

L'indagine per l'individuazione delle aree ad alto potenziale di radon nel Veneto ha riguardato tutta la regione ad esclusione della pianura alluvionale costituita da depositi limosi e argillosi, risultata da un'indagine precedentemente condotta a livello nazionale zona scarsamente a rischio. Per la segnalazione delle zone sensibili al radon indoor sono state realizzate, a partire dai rilevamenti di radon effettuati all'interno di un esteso campione di abitazioni, le mappe delle percentuali di abitazioni che eccedono i livelli di riferimento prescelti di 200 Bq/m³ e 400 Bq/m³, basandosi su unità territoriali (maglie) rettangolari di dimensioni 6,5 x 5,5 km². Le mappe ottenute si possono ritenere soddisfacenti come primo progetto di elaborazione. Si ritiene, comunque, utile avanzare nelle tecniche di elaborazione anche alla luce degli aspetti segnalati in appendice I.

I dati presentati indicano livelli medi di radon più alti nell'area interessata dall'indagine rispetto al dato medio regionale e segnalano zone più sensibili nel nord delle province di Belluno e di Vicenza (più i Colli Euganei - PD - ed eventuali altre situazioni da approfondire).

La geologia sembra giustificare l'occorrenza dei diversi livelli di radon in alcune situazioni. Si ritiene, comunque, che i dati sperimentali di questo rapporto (e quelli di future ulteriori elaborazioni) vadano considerati come un supporto per l'azione di prevenzione in materia di radon indoor demandata agli organi competenti: a sedi più ampie di quella esclusivamente tecnica spetterà di concretizzarne i contenuti in strumenti amministrativi.

Un elemento che emerge da questa relazione è che valori elevati di radon indoor possono presentarsi nella nostra regione con riflessi sanitari (si vedano le considerazioni introduttive) non trascurabili: il problema radon non potrà dunque essere ignorato nelle future politiche di prevenzione.

Si ritiene che importanti aspetti da sviluppare nel breve termine riguardino l'informazione (generale e su questa indagine) ed i riflessi dell'indagine sulla prossima applicazione del decreto legislativo n. 241 [4] che regola l'esposizione al radon nei luoghi di lavoro.

3.6. RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo primo rapporto per l'individuazione delle aree ad alto potenziale di radon nel territorio del Veneto superiore si desidera ringraziare in modo particolarmente sentito tutte le famiglie che hanno partecipato all'indagine rendendosi disponibili ad ospitare i rilevamenti nelle proprie abitazioni.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bochicchio, F. et al. *Results of the Representative Italian National Survey on Radon Indoors*. Health Phys. **17**(5), 741-748 (1996).
- [2] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes (1993).
- [3] Recommendation 90/143/Euratom of Commission of the European Communities of 21/02/90.
- [4] Decreto Legislativo 26/05/00, n. 241: *Attuazione della direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti*.
- [5] Kemski, A., Klingel, R. and Siehl, A. *Classification and Mapping of Radon-affected Areas in Germany*. Environ. Int. **22**(Suppl. 1), 789-798 (1996).
- [6] Kullman, F. *Radon Risk Mapping – A method of Predicting Problem Areas on Geological Grounds*. Radiat. Prot. Dosim. **56**(1/4), 221-224 (1994).
- [7] Miles, J. C. H. et al. *Radon in UK Homes: Defining the Areas Affected*. Radiat. Prot. Dosim. **36**(2/4), 117-120 (1991).
- [8] ICRP. *Protection against Radon-222 at Home and at Work*. Ann. ICRP **23**(2), Publication 65 (1993).
- [9] Trotti, F. et al. *Radioattività Naturale nei Materiali da Costruzione utilizzati in Provincia di Verona*. Proc. XXVII Congresso AIRP, Ferrara 16-18 Sept. 1991. Vol. **II**, pp. 597-604 (1991).
- [10] Trotti, F. et al. *Indoor Exposure to Natural Radioactivity in Veneto*. Radiat. Prot. Dosim. **56**(1/4), 309-313 (1994).
- [11] Biancotto, R. et al. *Misure di concentrazione di Radon nelle acque termali e minerali del Veneto*. ENEA, Atti del XXVI Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana di Protezione contro le Radiazioni. Verona, 13-15 Sept. 1989.
- [12] Gunby, J. A. et al. *Factors Affecting Indoor Radon Concentrations in the United Kingdom*. Health Phys. **64**(1), 2-11 (1993).
- [13] Tanferi, A. et al. *Determinazione del rapporto tra esposizione a radon e cancro polmonare*. Ambiente Risorse Salute. **45**, 7-10 (1996).
- [14] Tommasino, L. and Griffith, R. V. *Etch track detectors in radiation dosimetry*. The dosimetry of ionizing radiation. **3**, 323 (1990).
- [15] Green, B. M. R. et al. *Gamma-radiation levels outdoors in Great Britain*. NRPB-R191 (1989).
- [16] Miles, J. C. H. *Mapping the proportion of the housing stock exceeding a radon reference level*. Radiat. Prot. Dosim. **56**(1/4), 207-210 (1994).
- [17] Price, P. N., Nero, A. V. and Gelman, A. *Bayesian prediction of mean indoor radon concentrations for Minnesota counties*. Health Phys. **71**(6), 922-935 (1996).
- [18] Fennel, S.G. et al. *Radon exposure in Ireland*. 5th International Conference on High Levels of Natural Radiation and Radon Areas. Monaco 4-7 Sept. 2000.

APPENDICE A

IL RADON E L'ABITAZIONE

A.1. INTRODUZIONE

I livelli di radon nelle abitazioni dipendono da diversi fattori come le caratteristiche del suolo, i materiali da costruzione, l'infiltrazione dall'esterno,...

Da un punto di vista sanitario sono i discendenti del radon i più pericolosi, tuttavia per gli ambienti domestici il fattore di equilibrio tra concentrazione media dei medesimi e concentrazione di gas radon risulta abbastanza costante e si considera pari a 0,4; proprio sulla base di tale equilibrio la rapida analisi di questa appendice sui vari contributi ai livelli indoor è incentrata sul solo gas radon e non sui suoi prodotti di decadimento.

A.2. SORGENTI DI RADON

Per le considerazioni di questo paragrafo si è fatto ricorso per lo più a [2].

A.2.1. DIFFUSIONE DA ELEMENTI COSTRUTTIVI E DAL SUOLO

Uno dei contributi alla concentrazione di radon indoor viene dalla diffusione dagli elementi costruttivi. All'interno dei materiali il radon è generato dal decadimento del radio (Ra-226) ivi contenuto.

Questo fattore dipende molto dalla porosità dei materiali, dal loro spessore e naturalmente dalla concentrazione di radio nei materiali. Per materiali edilizi standard, mediamente, questo fattore dà un contributo di rateo d'ingresso di radon nell'abitazione pari a 10 Bq/m³h.

Diffusione vi è anche dal suolo attraverso il pavimento dell'abitazione; in questo caso sono fondamentali, oltre alle caratteristiche geologiche del suolo e quindi al suo contenuto di radio, la permeabilità del suolo stesso e l'integrità del pavimento. Per un pavimento integro, una stima media per il contributo di rateo d'ingresso è di 7,5 Bq/m³h.

A.2.2. ADVEZIONE

Un altro meccanismo cui prestare attenzione è l'advezione, più frequentemente chiamata convezione: è causata essenzialmente dal differenziale negativo di pressione (depressione) che si instaura tra l'atmosfera interna all'abitazione e l'atmosfera esterna, creando moti convettivi attraverso le aperture dell'abitazione (fig. A1) e possibilità di ingresso di radon dal sottosuolo attraverso il pavimento.

Due sono i principali meccanismi responsabili: il differenziale indoor-outdoor di temperatura ed il vento incidente sull'abitazione. Significativi sono pure la permeabilità del suolo e l'integrità delle strutture che isolano l'abitazione dal suolo.

In un'abitazione con fessurazione standard del pavimento, con un differenziale di pressione di 5 Pa (tipico di un gradiente termico di 10-15 °C), costruita su un suolo costituito di sabbia e limo, il contributo dell'advezione è di circa 20 Bq/m³h, ma può facilmente salire a 250 Bq/m³h se si trova su un suolo altamente permeabile.

Ai differenziali di pressione possono contribuire anche sbilanciamenti nei ricambi d'aria con l'esterno (ad esempio ventoline sulle finestre solo estrattive) o l'impoverimento del contenuto di ossigeno dell'ambiente per combustione (es. camini) in assenza di integrazione di aria.

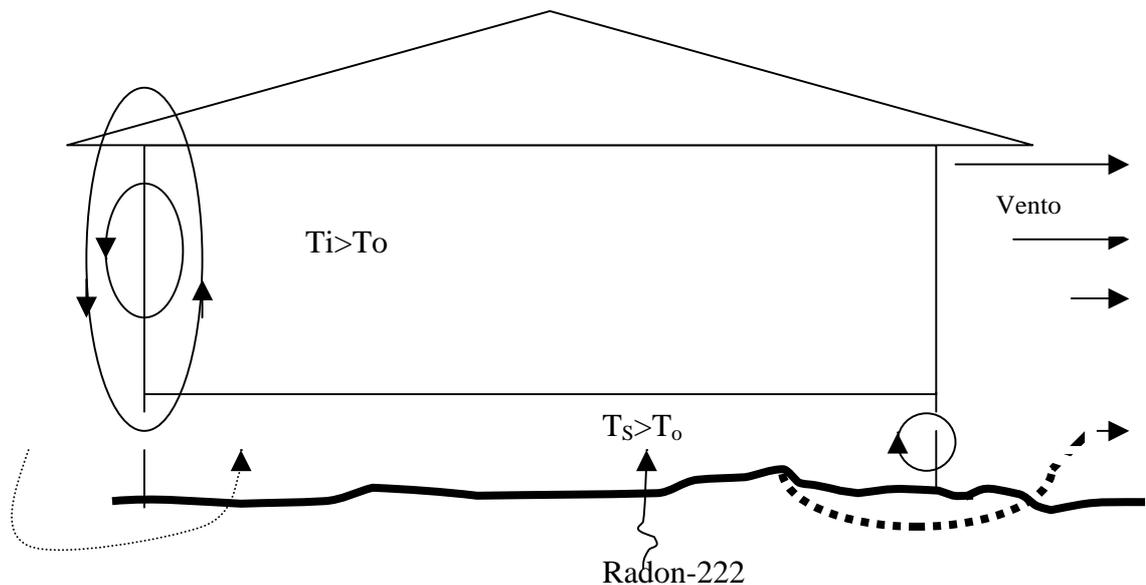


Fig. A1: Fenomeno di advezione, dovuto al differenziale di temperatura indoor-outdoor e al vento incidente sull'abitazione.

A.2.3. INFILTRAZIONE

Un ulteriore contributo viene dall'infiltrazione, ossia direttamente dal passaggio di aria dall'esterno all'interno per ventilazione naturale (tramite porte e finestre), meccanica o attraverso crepe e fessure.

La concentrazione esterna di radon è determinata dalla densità del flusso dal terreno e dalla dispersione nell'atmosfera, entrambi fattori che possono variare con le condizioni meteorologiche.

Considerando nell'abitazione un ricambio completo di aria ogni ora ed una concentrazione esterna pari a 10 Bq/m^3 , il rateo d'ingresso del radon nell'abitazione per infiltrazione è di circa $10 \text{ Bq/m}^3\text{h}$.

A.2.4. ACQUA

Il radon è solubile in acqua e può esserne rimosso per diffusione molecolare, agitazione, riscaldamento, con successivo trasferimento in aria.

Il valore di concentrazione medio nell'acqua è di 10 kBq/m^3 (valore che può variare in modo significativo per acque profonde); dati il fattore di trasferimento medio acqua-aria e un rateo di ricambio d'aria pari a 1 h^{-1} si può stimare un contributo medio dell'acqua all'ingresso di radon nell'abitazione di circa $1 \text{ Bq/m}^3\text{h}$.

Tutti i contributi menzionati sono riassunti in tab. A1.

Come si può vedere il rateo di ingresso totale è di 49 Bq/m³h; si deve sottolineare che il contributo prevalente (più del 50%) è legato al suolo e che al suo interno il ruolo maggiore è rivestito dall'advezione.

Dal rateo totale d'ingresso è possibile stimare la concentrazione di radon all'equilibrio tramite l'espressione

$$C = U / (\lambda_v + \lambda_{Rn}) \quad (1)$$

ove U è il rateo d'ingresso totale, C la concentrazione di radon, λ_{Rn} è la costante di decadimento del radon (solitamente trascurabile rispetto al λ_v) e λ_v il rateo del ricambio d'aria; con opportune approssimazioni e stimando essere λ_v pari a uno all'ora, il valore di C risulta pari a 49 Bq/m³.

Sorgenti di radon	Meccanismi	Rateo d'ingresso (Bq/m ³ h)	Percentuale
Elementi costruttivi	Diffusione	10	21
Suolo	Diffusione	7.5	15
Suolo	Advezione	20	41
Aria esterna	Infiltrazione	10	20
Acqua	Emanazione	1	2
Gas naturale ^(*)	Consumzione	0.5	1
Totale		49	100

(*) solitamente trascurabile

Tab. A1: Contributo delle diverse sorgenti al rateo d'ingresso di radon nell'abitazione.

A.3. APPLICAZIONE DEL MODELLO ALLA REALTÀ REGIONALE

Il valore medio appena ottenuto è puramente indicativo perché a seconda delle specifiche caratteristiche geologiche, strutturali, climatiche dell'abitazione sono attese ampie variazioni.

Si vedano a titolo di esempio la tab. A2 e la fig. A2 in cui sono riportati i valori del radio in alcuni materiali da costruzione tipici di talune zone: l'impiego di tufo laziale, in luogo dei tradizionali cemento e laterizi, comporterebbe un contributo al rateo d'ingresso di radon assai più rilevante di quello riportato in tab. A1.

Considerando il Veneto, si può ritenere non determinante il contributo dei materiali da costruzione poiché dati analitici sui singoli prodotti localmente diffusi [9] ed elaborazioni statistiche relative alla precedente indagine nazionale [10] forniscono un'indicazione di non particolare significatività.

Uguale considerazione può essere fatta per l'acqua perché, tranne casi particolari come le acque termali, le misure fatte si allineano con il dato presentato nel paragrafo precedente che è scarsamente rilevante [11]. Il contributo dell'infiltrazione può pure essere considerato di secondaria importanza.

Rimangono da considerare tre fattori, tutti connessi all'immissione di radon dal sottosuolo: un fattore legato alla tipologia geologica (τ_g), un fattore rappresentato dal piano (ossia dalla distanza dal suolo) dell'abitazione in esame (τ_p) e un terzo fattore dovuto all'interazione abitazione-ambiente (dipendente dunque da clima, tipologia dell'abitazione)

che caratterizza le vie di ingresso e la pressione sotterranea del gas (τ_c).

Il modello teorico di ingresso del radon predice quindi la seguente concentrazione di equilibrio (vedi eq. (1)):

$$C_i = C_{out} + (U_{soil} / \lambda_v) \quad (2)$$

ove C_i indica la concentrazione di radon all'interno dell'ambiente chiuso; U_{soil} è il rateo di ingresso di radon dal suolo; λ_v è il rateo di ventilazione (o riciclo d'aria) dell'ambiente; C_{out} è la concentrazione di radon outdoor (inserita nel modello per motivi funzionali, ma trascurabile nei fatti).

Tenendo conto dei suddetti fattori l'equazione (2) può essere così espressa [12]:

$$C_i = C_{out} + (\mu \tau_g \tau_p \tau_c) \quad (3)$$

equivalente a:

$$\ln(C_i - C_{out}) = \ln(\mu) + \ln(\tau_g) + \ln(\tau_p) + \ln(\tau_c) \quad (4)$$

ove μ è un valore di normalizzazione.

La scrittura secondo l'equazione (4) ha il vantaggio di suggerire una distribuzione log-normale delle concentrazioni come combinazione delle distribuzioni log-normali dei fattori causali.

Nell'indagine di cui si tratta, sono stati monitorati prevalentemente piani terra di abitazioni e comunque, come una delle opzioni di rappresentazione dei risultati, si sono normalizzati i valori misurati alla condizione di piano terra (si veda l'appendice G).

Normalizzando tutti i valori di concentrazione misurata a quella di piano terra si esclude l'influenza del fattore τ_p dalle equazioni (3) e (4) e si dispone di un indicatore più significativo e sensibile alle variazioni di τ_g e τ_c .

È importante sottolineare che i livelli di radon rilevati nelle abitazioni non sono condizionati esclusivamente dalla formazione geologica del terreno di pertinenza ma anche dal fattore (τ_c) di interazione 'abitazione-ambiente'.

Proprio per tale ragione non è sufficiente derivare la mappa del rischio da radon da una carta geologica sebbene la correlazione con le caratteristiche del sottosuolo sia forte.

Materiale	Regione	C_{Ra} [Bq/kg]
Tufo	Campania	130-220
Tufo	Lazio	390-550
Pozzolana	Campania	215-230
Pozzolana	Lazio	440-510
Lava	Campania	709
Polvere vulcanica	Campania	108
Peperino grigio	Lazio	242
Peperino rosso	Lazio	256
Porfido	Lombardia	300-477

Tab. A2: Valori medi di radio riscontrati in Italia in alcuni tipi di materiali da costruzione.

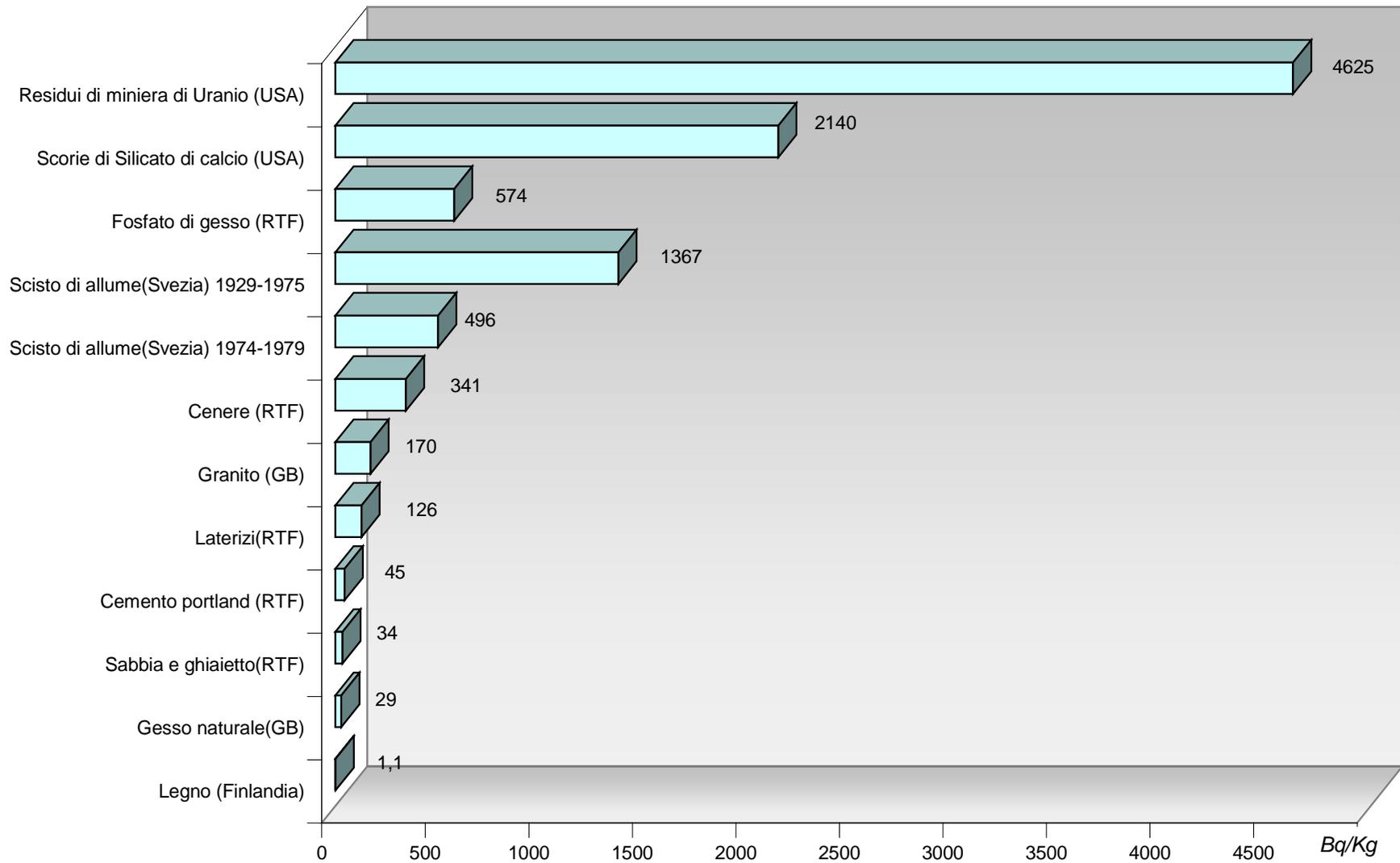


Fig. A2: Valori medi di radio (Bq/kg) riscontrati nei materiali da costruzione di diversi Paesi.

APPENDICE B

CARATTERIZZAZIONE DEL CAMPIONE

L'area interessata dall'indagine comprende tutta la regione ad esclusione della parte meridionale (coincidente con la pianura alluvionale costituita da depositi alluvionali fini caratterizzati da bassa permeabilità) in quanto l'analisi dei risultati dell'indagine nazionale ha fornito indicazione di modesti valori di radon in tale zona. In fig. B1 l'area interessata dall'indagine è sovrapposta alla carta geologica regionale per evidenziare il carattere dell'area esclusa.

La selezione del campione nel territorio da monitorare non ha seguito criteri di estrazione 'random'; piuttosto si è proceduto ad un campionamento sistematico sovrapponendo al territorio d'interesse un reticolo a maglie rettangolari di 6,5x5,5 km² ciascuna (corrispondenti alle sezioni della Carta Tecnica Regionale 1:10000) per un totale di 330 maglie coinvolte. Poiché all'interno di ciascuna maglia era attesa una variabilità nei livelli di radon indoor, sono state previste mediamente misure in almeno 5 abitazioni per maglia. In ciascuna maglia è stata costruita la distribuzione di frequenza per i livelli di radon indoor, utilizzando la media geometrica dei dati di maglia e la deviazione standard geometrica come risultante dall'osservazione su tutte le maglie con più di due abitazioni del campione selezionato (vedi appendice G). In tab. B1 è documentato lo stato conclusivo dell'indagine rispetto alla pianificazione iniziale: l'area prevista per il monitoraggio è un sottoinsieme del totale di interesse (alcune maglie sono risultate scarsamente abitate o difficilmente accessibili). L'efficienza di campionamento, intesa come numero di maglie monitorate rispetto a quelle previste, è risultata del 74%.

Area di interesse (km ²)	% di Veneto	Popolazione interessata	% di Veneto
11.860	56	2.938.736	65
Maglie previste per il monitoraggio	Maglie monitorate	Abitazioni previste per il monitoraggio	Abitazioni monitorate
293	218	1.465	1.230

Tab. B1: Stato conclusivo dell'indagine rispetto alla pianificazione iniziale.

Sono state coinvolte le Sezioni di Fisica dei PMP (oggi Dipartimenti ARPAV) di Belluno, Padova, Treviso e Vicenza (oltre il CRR di Verona) per l'individuazione delle abitazioni e per la distribuzione dei dosimetri con l'ausilio, dove necessario, dei Comuni delle zone del territorio interessato dall'indagine, o di enti che si sono resi disponibili all'iniziativa (Dipartimenti di Prevenzione delle Aziende ULSS, Corpo Forestale dello Stato, ...).

Nelle maglie, sono state scelte prevalentemente abitazioni a piano terra (cfr. appendice G), attraverso i canali più diretti (non ponendo requisiti statistici particolari nella selezione).

In tab. B2 è fornito l'elenco dei Comuni che si rinvergono nel territorio incluso nel piano di monitoraggio.

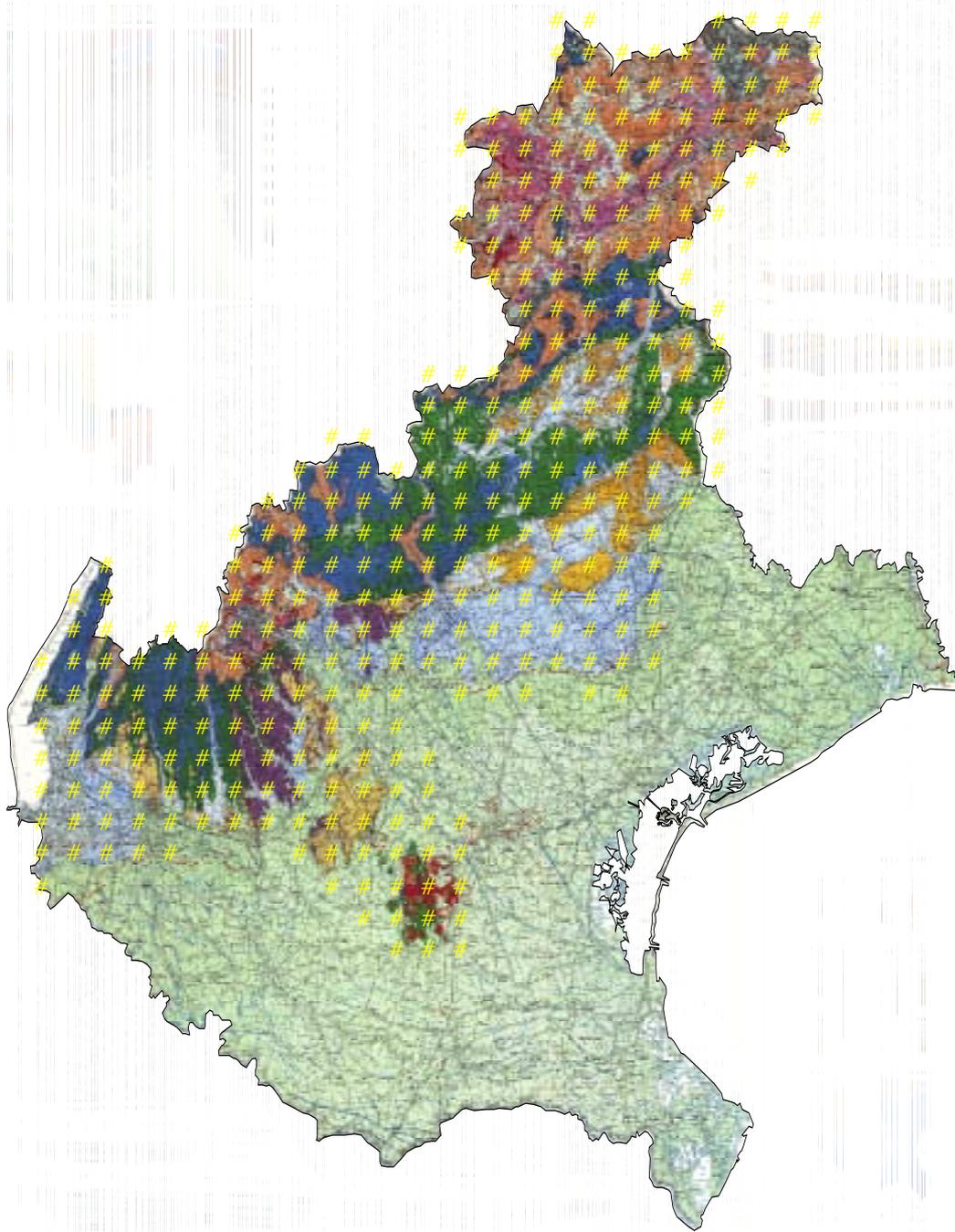


Fig. B1: Area interessata dall'indagine sovrapposta alla carta geologica regionale. La parte in verde chiaro caratterizza la pianura alluvionale del Veneto con depositi fini.

COMUNE	PROV.	COMUNE	PROV.
AGORDO	BL	SAN VITO DI CADORE	BL
ALANO DI PIAVE	BL	SANTA GIUSTINA	BL
ALLEGHE	BL	SANTO STEFANO DI CADORE	BL
ARSIE'	BL	SAPPADA	BL
AURONZO DI CADORE	BL	SEDICO	BL
BELLUNO	BL	SELVA DI CADORE	BL
BORCA DI CADORE	BL	SEREN DEL GRAPPA	BL
CALALZO DI CADORE	BL	SOSPIROLO	BL
CANALE D'AGORDO	BL	SOVERZENE	BL
CASTELLO LAVAZZO	BL	SOVRAMONTE	BL
CESIOMAGGIORE	BL	TAIBON AGORDINO	BL
CHIES D'ALPAGO	BL	TAMBRE	BL
CIBIANA DI CADORE	BL	TRICHIANA	BL
COLLE SANTA LUCIA	BL	VALLADA AGORDINA	BL
COMELICO SUPERIORE	BL	VALLE DI CADORE	BL
CORTINA D'AMPEZZO	BL	VAS	BL
DOMEGGE DI CADORE	BL	VIGO DI CADORE	BL
FALCADE	BL	VODO CADORE	BL
FARRA D'ALPAGO	BL	VOLTAGO AGORDINO	BL
FELTRE	BL	ZOLDO ALTO	BL
FONZASO	BL	ZOPPE' DI CADORE	BL
FORNO DI ZOLDO	BL	ABANO TERME	PD
GOSALDO	BL	BAONE	PD
LA VALLE AGORDINA	BL	BATTAGLIA TERME	PD
LAMON	BL	CINTO EUGANEO	PD
LENTIAI	BL	ESTE	PD
LIMANA	BL	FONTANIVA	PD
LONGARONE	BL	LOZZO ATESTINO	PD
LORENZAGO DI CADORE	BL	MONTEGROTTO TERME	PD
LIVINALLONGO DEL COL DI LANA	BL	RUBANO	PD
LOZZO DI CADORE	BL	SACCOLONGO	PD
MEL	BL	TEOLO	PD
OSPITALE DI CADORE	BL	TORREGLIA	PD
PEDAVERA	BL	VO	PD
PERAROLO DI CADORE	BL	ALTIVOLE	TV
PIEVE D'ALPAGO	BL	ARCADE	TV
PIEVE DI CADORE	BL	CAPPELLA MAGGIORE	TV
PONTE NELLE ALPI	BL	CASTELFRANCO VENETO	TV
PUOS D'ALPAGO	BL	CAVASO DEL TOMBA	TV
QUERO	BL	CONGLIANO	TV
RIVAMONTE AGORDINO	BL	CORNUDA	TV
ROCCA PIETORE	BL	CRESPANO DEL GRAPPA	TV
SAN GREGORIO NELLE ALPI	BL	CROCETTA DEL MONTELLO	TV
SAN NICOLO' DI COMELICO	BL	FREGONA	TV
SAN TOMASO AGORDINO	BL	GIAVERA DEL MONTELLO	TV

Tab. B2

COMUNE	PROV.	COMUNE	PROV.
MONTEBELLUNA	TV	COSTABISSARA	VI
PAESE	TV	ENEGO	VI
PIEVE DI SOLIGO	TV	FARA VICENTINO	VI
PONZANO VENETO	TV	GALLIO	VI
POVEGLIANO	TV	GAMBELLARA	VI
REFRONTOLO	TV	GAMBUGLIANO	VI
RESANA	TV	GRUMOLO DELLE ABBADESSE	VI
RIESE PIO X	TV	ISOLA VICENTINA	VI
SAN FIOR	TV	LAGHI	VI
SAN PIETRO DI FELETTO	TV	LASTEBASSE	VI
SANTA LUCIA DI PIAVE	TV	LONGARE	VI
SPRESIANO	TV	LONIGO	VI
SUSEGANA	TV	LUGO DI VICENZA	VI
TREVISO	TV	LUSIANA	VI
VALDOBBIADENE	TV	MALO	VI
VEDELAGO	TV	MARANO VICENTINO	VI
VILLORBA	TV	MAROSTICA	VI
VITTORIO VENETO	TV	MASON VICENTINO	VI
VOLPAGO DEL MONTELLO	TV	MOLVENA	VI
AGUGLIARO	VI	MONTE DI MALO	VI
ALONTE	VI	MONTEBELLO VICENTINO	VI
ALTAVILLA VICENTINA	VI	MONTECCHIO MAGGIORE	VI
ARCUGNANO	VI	MONTEGALDA	VI
ARZIGNANO	VI	MONTEGALDELLA	VI
ASIAGO	VI	MONTEVIALE	VI
ASIGLIANO VENETO	VI	MONTICELLO CONTE OTTO	VI
BARBARANO VICENTINO	VI	MUSSOLENTI	VI
BASSANO DEL GRAPPA	VI	NANTO	VI
BOLZANO VICENTINO	VI	NOGAROLE VICENTINO	VI
BREGANZE	VI	NOVE	VI
BRENDOLA	VI	NOVENTA VICENTINA	VI
BRESSANVIDO	VI	ORGIANO	VI
CALDOGNO	VI	PEDEMONTE	VI
CALTRANO	VI	PIANEZZE	VI
CALVENE	VI	POIANA MAGGIORE	VI
CAMPIGLIA DEI BERICI	VI	POVE DEL GRAPPA	VI
CAMPOLONGO SUL BRENTA	VI	QUINTO VICENTINO	VI
CARTIGLIANO	VI	RECOARO TERME	VI
CASSOLA	VI	ROMANO D'EZZELINO	VI
CHIAMPO	VI	ROSA'	VI
COGOLLO DEL CENGIO	VI	ROSSANO VENETO	VI
CONCO	VI	ROTZO	VI
CREAZZO	VI	SALCEDO	VI
CORNEDO VICENTINO	VI	SAN GERMANO DEI BERICI	VI
DUEVILLE	VI	SAN PIETRO MUSSOLINO	VI

Tab. B2

COMUNE	PROV.	COMUNE	PROV.
SAN VITO DI LEGUZZANO	VI	CASTELNUOVO DEL GARDA	VR
SANDRIGO	VI	CERRO VERONESE	VR
SANTORSO	VI	ERBEZZO	VR
SCHIO	VI	FERRARA DI MONTE BALDO	VR
SOLAGNA	VI	GARDA	VR
SOVIZZO	VI	GREZZANA	VR
TEZZE SUL BRENTA	VI	LAVAGNO	VR
THIENE	VI	LAZISE	VR
TONEZZA DEL CIMONE	VI	MALCESINE	VR
TORREBELVICINO	VI	MEZZANE DI SOTTO	VR
TORRI DI QUARTESOLO	VI	MONTEFORTE D'ALPONE	VR
VALDASTICO	VI	NEGRAR	VR
VALLI DEL PASUBIO	VI	PASTRENGO	VR
VELO D'ASTICO	VI	PESCHIERA DEL GARDA	VR
VICENZA	VI	ROVERE' VERONESE	VR
VILLAVERLA	VI	SAN MARTINO BUON ALBERGO	VR
ZERMEGHEDO	VI	SANT'AMBROGIO DI VALPOLICELLA	VR
ZUGLIANO	VI	SANT'ANNA D'ALFAEDO	VR
BADIA CALAVENA	VR	SAN ZENO DI MONTAGNA	VR
BOSCO CHIESANUOVA	VR	SELVA DI PROGNO	VR
BRENTINO BELLUNO	VR	SOMMACAMPAGNA	VR
BRENZONE	VR	SONA	VR
BUSSOLENGO	VR	TORRI DEL BENACO	VR
BUTTAPIETRA	VR	TREGNAGO	VR
CAPRINO VERONESE	VR	VALEGGIO SUL MINCIO	VR
CASTEL D'AZZANO	VR	VERONA	VR

Tab. B2

APPENDICE C

GESTIONE DEI DATI RELATIVI ALLE ABITAZIONI

C.1. INTRODUZIONE

Coloro che hanno preso contatto con le famiglie (generalmente personale del Comune o delle Sezioni di Fisica dei PMP – attuali Dipartimenti Provinciali Arpav), nel posizionare i dosimetri nelle abitazioni, hanno compilato anche una scheda informativa.

Il questionario aveva diversi obiettivi:

1. Avere i dati necessari per il calcolo dell'esposizione dei dosimetri.
2. Permettere l'elaborazione dei dati sperimentali e gestire i flussi informativi con le famiglie e gli altri referenti.
3. Fornire gli elementi necessari alle normalizzazioni dei dati rispetto al piano dell'abitazione monitorato.
4. Rendere possibile la ricerca di eventuali relazioni tra le concentrazioni misurate e le caratteristiche delle abitazioni.
5. Controllare il corretto posizionamento dei dosimetri nelle case.
6. Verificare quale fosse la rappresentatività del campione di abitazioni selezionato.

C.2. STRUTTURA DEL QUESTIONARIO

Una caratteristica importante del questionario doveva essere la chiarezza e la non ambiguità del linguaggio, per questo si è optato per una struttura a scelta multipla dove semplicemente barrare la casella corrispondente alla risposta.

In questa scheda erano richiesti i dati anagrafici della famiglia, dati sull'edificio (tipologia, materiali da costruzione, numero piani, ecc.), dati sull'abitazione (dimensioni, tipo di riscaldamento, presenza o meno di impianti di condizionamento, ecc.), dati sul locale di posizionamento del dosimetro (piano, presenza di finestre, tipo di pavimento, ecc.) ed infine i codici di identificazione dei dosimetri insieme alla data di consegna e ritiro dei medesimi.

Copia del questionario è riportata di seguito a questa appendice; i dati raccolti sono contenuti in un data base informatico realizzato con Microsoft Access per Windows e disponibile presso il CRR.

C.2.1. RAPPRESENTATIVITÀ DEL CAMPIONE

Come desumibile dalla precedente appendice B, il campione di abitazioni (e dei relativi occupanti) non risponde a criteri statistici puri; tuttavia un esame della costituzione del campione appare d'interesse e può essere altresì orientato ad una verifica della rappresentatività, a valle della selezione.

Le abitazioni cui si riferiscono i dati presentati in questa appendice (1230 abitazioni) sono quelle effettivamente monitorate di cui si dispone di almeno una misura semestrale.

La prima parte del questionario è relativa ai dati anagrafici degli occupanti (sez. a del questionario), con riferimento all'età e alla professione.

I dati ottenuti sono riportati in tab. C1 e in fig. C1.

Intervallo di età [anni]	Percentuale di persone
0-10	13.1
11-20	13.7
21-30	13.1
31-40	17.0
41-50	17.8
51-60	11.3
61-70	7.3
71-80	4.4
Maggiore di 80	2.4

Tab. C1: Età di tutti gli occupanti le abitazioni campione.

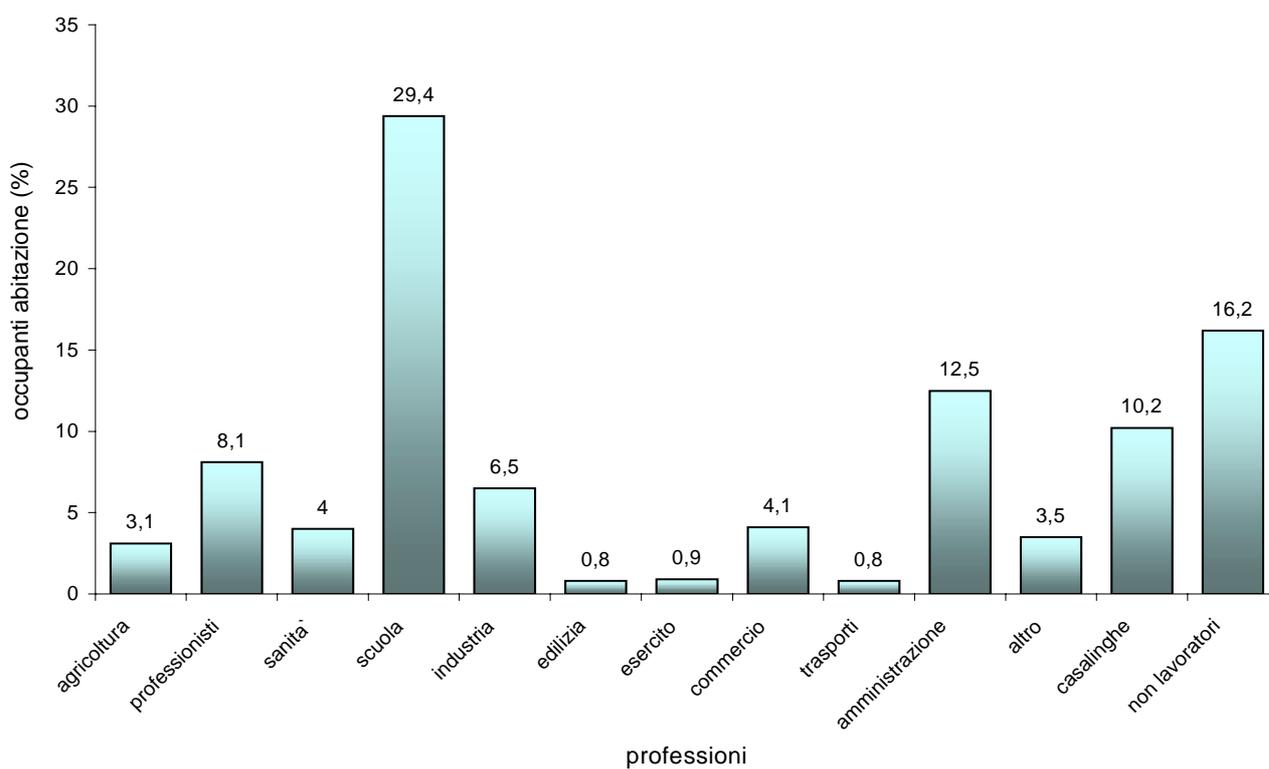


Fig. C1: Distribuzione delle professioni degli occupanti le abitazioni campione.

C.2.2. UBICAZIONE DELL'EDIFICIO

La sezione b del questionario invece definisce l'ubicazione dell'edificio. Il radon, come detto in appendice A, è presente su tutta la superficie terrestre in tutti i tipi di rocce, in ogni tipo di terreno, ma le quantità variano in funzione della conformazione geologica di ciascuna zona e di altri fattori anche ambientali (ventilazione, temperatura, ecc).

I risultati ottenuti sono riportati nelle tabb. C2, C3, C4.

I dati delle tabelle sono chiaramente conformi alle scelte fatte in impostazione dell'indagine circa il territorio della regione da investigare.

Tipologia dell'area	Percentuale di edifici
Urbana	36.8
Piccolo agglomerato	36.7
Isolata	26.5

Tab. C2: Tipologia dell'area su cui sorgono gli edifici campione.

Posizione dell'edificio	Percentuale di edifici
Montagna	34.2
Collina	25.8
Pianura	33.3
Vicino a bacino idrico	6.7

Tab. C3: Posizione degli edifici campione.

Esposizione al vento	Percentuale di edifici
Scarsa	19.6
Modesta	60.8
Elevata	19.6

Tab. C4: Grado di esposizione al vento degli edifici campione.

C.2.3. DATI EDIFICIO

La sezione c consente di caratterizzare l'edificio relativamente alla tipologia (unifamiliare, plurifamiliare, ecc.), alla data di costruzione, al numero di piani ed alla presenza del seminterrato. Poichè, infatti, il maggior contributo all'ingresso di radon in un edificio è fornito dal terreno, è necessario analizzare oltre alla conformazione geologica anche la struttura e l'isolamento dell'edificio da tale fonte.

Il 54,7% delle case considerate risulta avere il seminterrato. La presenza del seminterrato opera nella direzione di ridurre i livelli di radon indoor, costituendo una sorta di barriera ulteriore all'ingresso. In tabb. C5, C6, C7, C8 sono riportati i dati relativi alla tipologia, al numero di piani, alla posizione rispetto al terreno del piano più basso e all'anno di costruzione dell'edificio.

Tipologia dell'edificio	Percentuale di edifici
Monofamiliare	54.9
A schiera	21.9
A torre	23.2

Tab. C5: Tipologia degli edifici campione.

Numero di piani dell'edificio	Percentuale di edifici
1	7.0
2	48.9
3	34.7
4	8.1
5	1.1
6	0.1
7	0.05
8	0.05

Tab. C6: Numero di piani su cui si sviluppa l'edificio a partire dal piano terra incluso.

Posizione del piano più basso	Percentuale
Sopra il terreno	46.7
Sotterraneo	18.5
Seminterrato	14.2
Su pilastri	0.6
Interrato su alcuni lati	19.2
Altro	0.8

Tab. C7: Posizione, rispetto al terreno, del piano più basso dell'edificio.

Periodo di costruzione	Percentuale di edifici
Precedente al 1600	0.8
1600-1699	1.2
1700-1799	2.4
1800-1899	6.8
1900-1924	15.5
1925-1949	6.9
1950-1959	8.1
1960-1969	15.3
1970-1979	19.7
1980-1989	14.6
Dopo il 1990	8.7

Tab. C8: Periodo di costruzione degli edifici campione.

C.2.4. DATI ABITAZIONE

In questa sezione sono raccolti i dati riguardanti la parte di edificio abitata dalla famiglia campionata: sono indicati i piani abitati, il tipo di impianto idrico (tab. C9), di riscaldamento (tab. C10) e di condizionamento (tab. C11).

La vicinanza al suolo dell'abitazione incide sui ratei d'ingresso di radon, così come la sua espansione verticale è collegata a diluizioni del gas.

L'approvvigionamento idrico può essere importante essendo alcune tipologie di acquiferi a maggior contenuto di radon. Il condizionamento dovrebbe agire nella direzione di aumento di ventilazione e riduzione della concentrazione del gas.

Tipo di impianto idrico	Percentuale di abitazioni
Acquedotto	94.6
Pozzo	4.4
Altro	1.0

Tab. C9: Tipo di impianto idrico all'interno delle abitazioni campione.

Tipo di riscaldamento	Percentuale di abitazioni
Autonomo	88.9
Centralizzato	8.4
Assente	2.7

Tab. C10: Tipo di riscaldamento all'interno delle abitazioni campione.

Impianto di condizionamento	Percentuale di abitazioni
presente	2.0
assente	98.0

Tab. C11: Informazioni relative all'impianto di condizionamento nelle abitazioni campione.

C.2.5. LOCALE POSIZIONAMENTO DOSIMETRO

Questa sezione contiene tutti i dati propri del luogo in cui è situato il dosimetro caratterizzandolo dal punto di vista del piano, fondamentale ai fini delle normalizzazioni dei dati (cfr. appendice G), della stanza, la cui destinazione d'uso può incidere molto sulla concentrazione di radon, della soletta di separazione dal terreno, determinante a proposito di isolamento dal suolo, del regime di ventilazione presente all'interno della stanza e dei materiali di costruzione prevalenti.

Nelle tabb. C12, C13 e nelle figg. C2, C3, C4, sono presentate alcune delle suddette statistiche.

La prevalenza dei piani terra nel monitoraggio è conseguenza di indicazioni date per uniformare i rilevamenti relativi al piano.

Solitamente cucine e bagni sono stati sconsigliati per il monitoraggio in quanto le turbolenze locali dell'aria e le dispersioni di radon nell'uso dell'acqua possono alterare le condizioni standard dell'abitazione.

È significativo il numero di ambienti con presenza prevalente di pietra nei materiali edilizi. La ventilazione estiva è ovviamente mediamente più elevata di quella invernale, influenzando sulle variazioni dei livelli di radon dovute alla 'stagionalità'.

Piano ove è situato il dosimetro	Percentuale di abitazioni
Piano terra	70.7
Primo piano	20.7
Secondo piano	7.0
Terzo piano	1.4
Superiori al terzo	0.2

Tab. C12: Piano dove è stato posizionato il dosimetro all'interno delle abitazioni campione.

Tipologia del locale	Percentuale di abitazioni
Cucina	28.2
Camera da letto	22.1
Sala	39.7
Studio/laboratorio	5.0
Bagno	0.3
Altro	4.6

Tab. C13: Tipologia del locale dove è stato situato il dosimetro all'interno delle abitazioni campione.

materiale da costruzione
locale monitorato

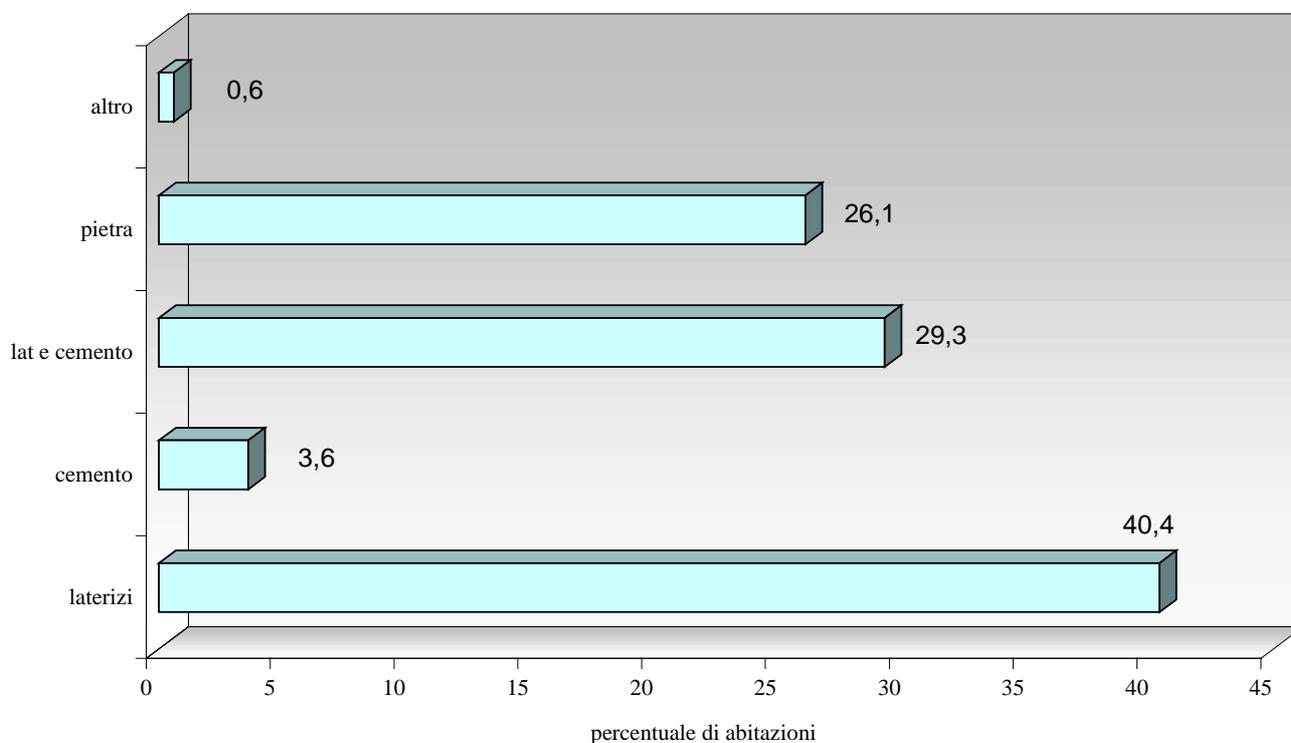


Fig. C2: Composizione del locale dove è stato posizionato il dosimetro all'interno delle abitazioni campione.

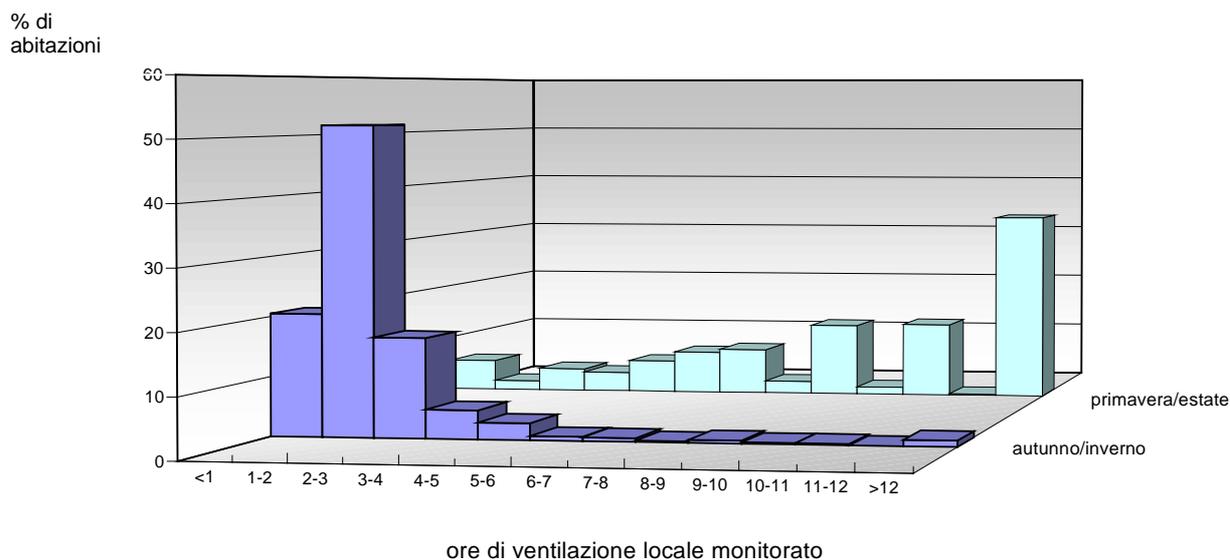


Fig. C3: Ore di ventilazione del locale dove è stato posizionato il dosimetro all'interno delle abitazioni campione nei due semestri primavera/estate e autunno/inverno.

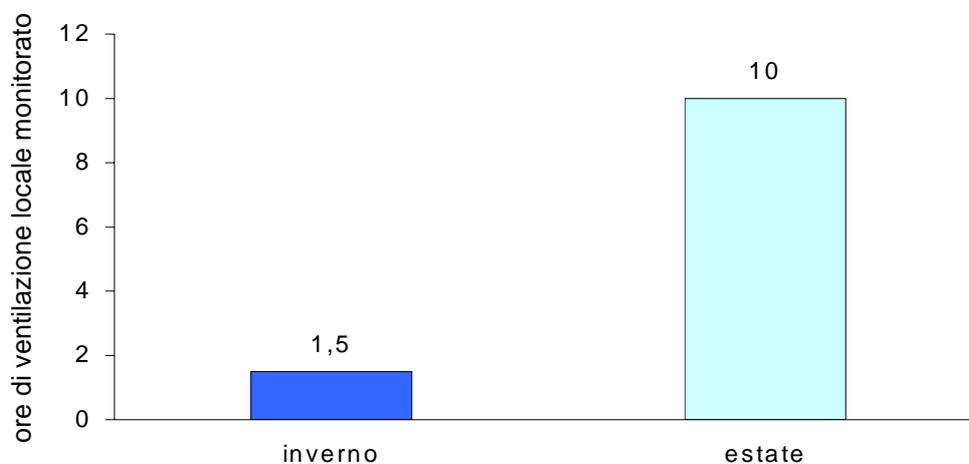


Fig. C4: Ore medie di ventilazione del locale in cui è stato posizionato il dosimetro nelle abitazioni campione.

C.2.6. DATI DOSIMETRO

Nell'ultima sezione sono registrati il codice del dosimetro del primo e secondo semestre (vedi paragrafo 3.2.3), la sua collocazione ed il tempo di esposizione.

Vi è inoltre la possibilità di ulteriori rilevazioni; questo perché nel 10% delle abitazioni coinvolte nell'indagine, oltre ai dosimetri passivi sono stati esposti elettretici, camere a ionizzazione o canister attivi in modo tale da avere un confronto tra i risultati ottenuti con le diverse tecniche.

RILEVAZIONE DELLE CONCENTRAZIONI DI RADON IN AMBIENTI ABITATIVI DEL VENETO

C.R.R.

(Centro Regionale di Riferimento per il Rilevamento della Radioattività)

S.F.A.

(Sezioni di Fisica Ambientale dei Presidi Multizonali di Prevenzione delle ULSS del Veneto)

Codice maglia: _____

Abitazione n°: _____

riservato a C.R.R. e S.F.A.

SCHEDA INFORMATIVA

Data di compilazione: _____ / _____ / 199____

Generalità del compilatore: _____

Generalità del capofamiglia _____

A1) Dati anagrafici - Generalità del capo famiglia e indirizzo:

Cognome : _____ Nome: _____
Via: _____ n°: _____
Località: _____ CAP: _____
Comune: _____ Provincia: _____
Telefono: _____ / _____

A2) Dati anagrafici - Componenti della famiglia:

	SESSO (M o F)	ETA' (anni)	PROFESSIONE ¹
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

¹Si prega di essere il più precisi possibile , seguendo per la risposta le professioni dell'allegato B.

B) Dati ubicazione edificio:

- a) **Tipologia dell'area:** 1: Urbana 2: Piccolo agglomerato 3: Isolata
- b) **Nelle immediate vicinanze sono presenti cave, grotte, doline?** 1: Sì 2: No
- c) **L'edificio è posto in:** 1: Prossimità di un bacino idrico di importanza rilevante
2: Montagna 3: Collina 4: Pianura
- d) **L'esposizione al vento è:** 1: Scarsa 2 Modesta 3: Elevata

C) Dati edificio:

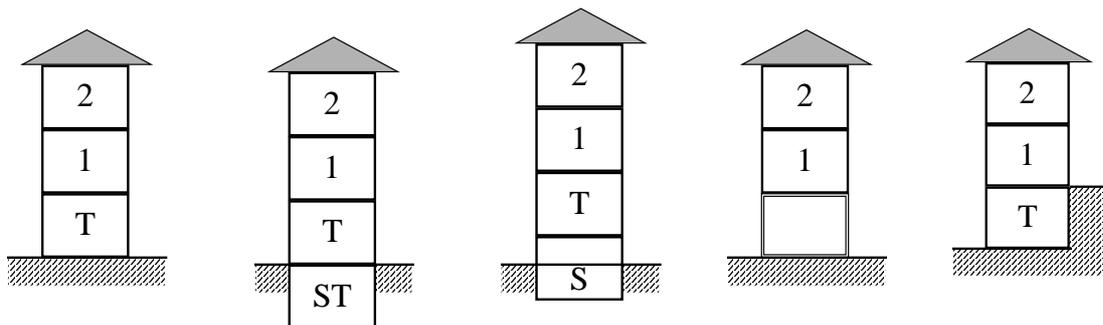
- a) **Tipologia dell'edificio:** 1: Monofamiliare 2: A schiera 3: A torre (tipo condominio)

b) **Anno di costruzione del fabbricato:** _____

c) **L'edificio è stato oggetto di interventi di ristrutturazione?** 1: Sì 2: No Anno: _____

d) **Numero di piani dell'edificio (dal piano terra, incluso):** _____

e) **Posizione, rispetto al terreno, del piano più basso dell'edificio¹:**



- 1: Sopra il terreno 2: Sotterraneo 3: Seminterrato 4: Su pilastri 5: Interrato (semint.) su alcuni lati 6: Altro _____

f) **Utilizzo del seminterrato o del sottterraneo¹:**

- 1: Vespajo di fondazione 2: Cantina/Deposito 3: Garage
4: Abitazione 5 Luogo di lavoro 6:Altro: _____

D) Dati abitazione:

a) **Piano dell'abitazione (piano inferiore se su più piani):** 1: Piano terra 2: Piano: _____

b) **Numero di piani su cui si sviluppa l'abitazione:** _____

c) **Impianto idrico da:** 1: Acquedotto 2: Pozzo 3: Altro: _____

d) **Impianto di riscaldamento:** 1: Autonomo 2: Centralizzato 3: Assente

e) **Impianto di condizionamento:** 1: Presente 2: Assente

¹ Nei casi misti, segnalare la condizione prevalente.

E) Dati locale posizionamento dosimetro:

a) Piano dell'edificio ove è situato il locale dosimetro: 1: Piano terra 2: Piano: _____

b1) Tipologia locale del dosimetro:

1: Cucina 2: Camera da letto 3: Sala
4: Studio/ Laboratorio 5: Bagno 6: Altro: _____

b2) Altezza del locale: _____ metri

b3) Superficie del locale: _____ metri quadrati

c) Materiale prevalente di costruzione delle pareti:

1: Laterizi 2: Cemento 3: Laterizi e cemento
4: Pietra 5: Altro: _____

d) Nel caso di locale al piano terra, esiste una soletta di separazione dal terreno? 1: Si 2: No

e1) Sono presenti finestre/ porte finestre? 1: Si 2: No

e2) se si, quante ore rimangono abitualmente aperte in una giornata?

periodo Autunno / Inverno: _____ ore periodo Primavera / Estate: _____ ore

e3) Stato di conservazione degli infissi: 1: Scadente 2: Buono

f1) Sono presenti nel locale porte di accesso diretto all'esterno? 1: Si 2: No

f2) se si, sono usate abitualmente? 1: Si 2: No

g) Sono presenti camini/ caldaie che bruciano aria del locale? 1: Si 2: No

(privi cioè di una presa che aspira l'aria dall'esterno)

h1) Sono presenti prese per l'immissione forzata di aria nel locale? 1: Si 2: No

h2) Sono presenti prese per l'estrazione forzata di aria dal locale? 1: Si 2: No

i) Stato di conservazione del locale: 1: Scadente (crepe nei muri o nel pavimento)
2: Buono (pavimento e pareti in buono stato)

l) Si osservano infiltrazioni d'acqua nel locale? 1: Si 2: No

m) Sono presenti tubazioni a vista/ lavandini? 1: Si 2: No

F) Dati Dosimetro:

a) Dosimetri radon primo semestre:

Codice dosimetro: _____

Collocazione dosimetro: _____

Inizio esposizione:

data: ____ / ____ / 199__ ora: ____ : ____

operatore²: _____

Fine Esposizione:

data: ____ / ____ / 199__ ora: ____ : ____

operatore²: _____

b) Dosimetri radon secondo semestre:

Codice dosimetro: _____

Collocazione dosimetro: _____

Inizio esposizione:

data: ____ / ____ / 199__ ora: ____ : ____

operatore²: _____

Fine Esposizione:

data: ____ / ____ / 199__ ora: ____ : ____

operatore²: _____

c) Altre eventuali rilevazioni:

1: Elettretre 2: Canister di carbone attivo 3: Dosimetri figli del radon 4: Camera ionizzazione

Codice dosimetro: _____

Collocazione dosimetro: _____

Inizio esposizione:

data: ____ / ____ / 199__ ora: ____ : ____

operatore²: _____

Fine Esposizione:

data: ____ / ____ / 199__ ora: ____ : ____

operatore²: _____

d) Altre eventuali rilevazioni:

1: Elettretre 2: Canister di carbone attivo 3: Dosimetri figli del radon 4: Camera ionizzazione

Codice dosimetro: _____

Collocazione dosimetro: _____

Inizio esposizione:

data: ____ / ____ / 199__ ora: ____ : ____

Operatore²: _____

Fine Esposizione:

data: ____ / ____ / 199__ ora: ____ : ____

operatore²: _____

² Si intende per operatore colui che consegna o ritira oppure effettua rilevazioni (camera di ionizzazione)

DOSIMETRI PASSIVI PER IL MONITORAGGIO DEL RADON

D.1. INTRODUZIONE

Esporre due dosimetri per la durata di un semestre ciascuno in 1230 abitazioni, altri per misurare la concentrazione di fondo negli ambienti in cui questi venivano conservati e per le calibrazioni, comporta lo sviluppo e la lettura di oltre 5.000 rivelatori considerando che ogni dosimetro è costituito di due rivelatori (l'uno di controllo alla risposta dell'altro).

I dosimetri dovevano:

1. Misurare la grandezza richiesta, ossia integrare la concentrazione di radon nel tempo.
2. Essere sensibili ad un ampio range di esposizioni.
3. Avere una risposta lineare nel range di esposizione più frequente.
4. Essere precisi almeno al 20%.
5. Avere una risposta stabile indipendentemente dagli effetti ambientali.
6. Avere dimensioni e forma tali da essere posizionati negli ambienti agevolmente e non creare pregiudizi tra gli occupanti dell'abitazione.

Sono stati scelti dosimetri passivi a permeazione con rivelatori di tracce nucleari CR-39.

D.2. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Nel nostro caso è stato opportuno utilizzare tecniche di integrazione passiva (senza ricorso a sistemi alimentati elettricamente) su lunghi intervalli di tempo per ovviare alle variazioni di concentrazione dovute a cambiamenti stagionali e ambientali ed ottenere così valori medi significativi di concentrazione di radon nelle abitazioni.

Tali tecniche utilizzano come rivelatori alcuni materiali in grado di sviluppare tracce nucleari, quali il nitrato di cellulosa (LR-115), i policarbonati Makrofol-E e Lexan e soprattutto l'allil diglicol carbonato CR-39.

La radiazione alfa emessa durante il decadimento del radon o dei discendenti penetra nel materiale di cui è composto il rivelatore causando modifiche della struttura molecolare per rottura delle catene polimeriche e crea un danno permanente.

Tramite un'opportuna procedura di attacco chimico in soluzione basica, i danni molecolari, che costituiscono una via preferenziale per l'attacco chimico, possono essere ingranditi ed evidenziati fino a diventare tracce con diametro dell'ordine di una decina di micron, visibili al microscopio ottico.

Il conteggio del numero di tracce può essere effettuato tramite sistemi di analisi automatici; presso il CRR è stato costruito un sistema di lettura automatico delle tracce illustrato in appendice E.

I dosimetri costituiti da questi tipi di rivelatori possono essere utilizzati per la misura della concentrazione del solo radon o della concentrazione dei suoi prodotti di decadimento e possono essere divisi in tre categorie: dosimetri a diffusione, a permeazione e aperti.

I dosimetri a diffusione (selettivi per il gas radon) sono costituiti in generale da un cilindro con rivelatore posto ad una delle estremità mentre l'altra viene lasciata aperta. La lunghezza del cilindro è calcolata in modo tale che il toron (gas radioattivo naturale solitamente di secondaria importanza rispetto al radon) decada nel tempo di diffusione al suo interno sino al rivelatore, mentre il diametro è scelto in modo tale da limitare il contributo sul rivelatore delle particelle alfa prodotte nel decadimento del Po-218 e del Po-214 (discendenti del radon) depositati sulle pareti interne del cilindro.

I dosimetri a permeazione (selettivi per il gas radon) si distinguono essenzialmente per la presenza di una membrana, posta in prossimità dell'estremità aperta del dosimetro, che è permeabile al gas radon (pur ritardandone l'ingresso nel volume sensibile), ma non ai suoi prodotti di decadimento; il toron, a causa del ritardo, decade prima di completare l'attraversamento della membrana.

In questo modo le tracce registrate dal rivelatore sono dovute soltanto alle particelle alfa emesse dal radon e dai suoi discendenti generati entro il volume attivo del dosimetro.

La configurazione del dosimetro a permeazione più diffuso attualmente in Italia, sviluppato da Tommasino [14], è descritta nel prossimo paragrafo essendo il dosimetro utilizzato per le misure di concentrazione in questa indagine.

Nei dosimetri aperti (destinati alla determinazione della concentrazione dei discendenti del radon), infine, il rivelatore è posto a contatto diretto con l'aria esterna ed è quindi sensibile alle particelle alfa emesse da radon, toron e dai rispettivi prodotti di decadimento; la risposta dei dosimetri è fortemente influenzata dalle condizioni locali di deposizione nonché dalle variazioni temporali delle stesse.

D.3. DOSIMETRO A PERMEAZIONE DI TOMMASINO

Nel dosimetro (in fig. D1) sono inseriti due rivelatori CR-39 separati l'uno dall'altro, ad una distanza di circa 1 cm, da un telaio di plastica e tenuti in contatto elettrico da una pellicola di policarbonato alluminizzato che ne assicura l'equipotenzialità riducendo il problema dei depositi preferenziali dei prodotti di decadimento carichi e costituendo inoltre uno schermo agli UV (la pellicola avvolge il lato esterno del rivelatore, non quello rivolto verso la camera di esposizione).

L'intero sistema è poi contenuto all'interno di una busta di polietilene termosaldata che impedisce l'entrata all'interno del volume sensibile di polveri, vapore acqueo e prodotti del decadimento del radon avendo una permeabilità sufficientemente elevata al radon e bassa al vapor acqueo.

La concentrazione all'interno della busta raggiunge gli stessi valori di quella esterna già dopo qualche ora (un tempo breve se paragonato al tempo di dimezzamento del radon che è di 3,82 giorni).

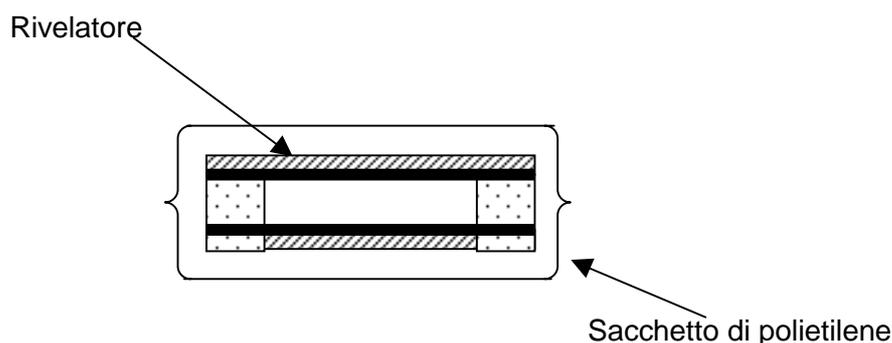


Fig. D1: Schema del dosimetro utilizzato.

Come già accennato, dopo l'esposizione i rivelatori vengono sottoposti ad attacco chimico per evidenziare le tracce e consentire di contarne la densità (tracce per unità di superficie del rivelatore) e determinare così, noto il periodo di esposizione del dosimetro, la concentrazione di radon tramite un fattore di calibrazione.

Spesso in passato sono stati usati rivelatori LR-115 spessi circa 12 μm che si sono dimostrati estremamente sensibili alle condizioni del bagno chimico (concentrazione, temperatura). Il polimero allico CR-39 presenta invece un'alta efficienza di rivelazione ed è meno sensibile alla variazione dei parametri di attacco chimico; inoltre è prodotto in fogli di spessore 0,5-1 mm più maneggevoli e robusti; per queste ragioni è stato adottato per l'indagine in esame.

D.4. PROCEDURE DI PREPARAZIONE E MATERIALI

I rivelatori sono ricavati da lastre di CR-39 da 18"x12" tagliate col laser; hanno uno spessore di 0,5 mm e dimensioni di 34x25 mm² con angolo smussato (fig. D2).

Il CR-39 è una resina usata tipicamente come plastica ottica contenente il 2,6 % di isopropil perossidicarbonato (IPP). In una delle partite di materiale da cui sono stati ricavati i rivelatori (partita D) è stato aggiunto inoltre l'1 % di diottil phtalato (DOP), sostanza che previene il *clouding* (e la conseguente riduzione della trasparenza) che spesso risulta dopo lunghi attacchi chimici.

Durante la costruzione del dosimetro deve essere prestata particolare cura a non danneggiare o sporcare in alcun modo i rivelatori.

Il lato rivolto verso l'interno del dosimetro è quello che viene irradiato e deve essere sempre identificabile; per questo si è proceduto a smussare un angolo (l'angolo smussato si trova in alto a sinistra quando la parte sensibile è rivolta verso chi guarda, con rivelatore in posizione 'landscape').

Il telaio di plastica con inseriti i due rivelatori avvolti in policarbonato alluminizzato viene poi chiuso in una busta di polietilene saldata, all'interno della quale si trova anche un'etichetta col codice del dosimetro stesso.

La densità di tracce di fondo del rivelatore varia da lastra a lastra e talvolta anche all'interno della stessa lastra di CR-39.

Prima dell'inizio dell'esposizione e ad esposizione terminata il dosimetro viene conservato all'interno di buste di plastica alluminizzata termosaldata che hanno permeabilità al radon trascurabile.

In ogni caso, per ogni partita di rivelatori, alcuni vengono tenuti come testimoni e su di essi viene calcolato il fondo da sottrarre ai conteggi dei rivelatori esposti.

Un valore tipico della densità di tracce di fondo è dell'ordine del centinaio di tracce/cm².

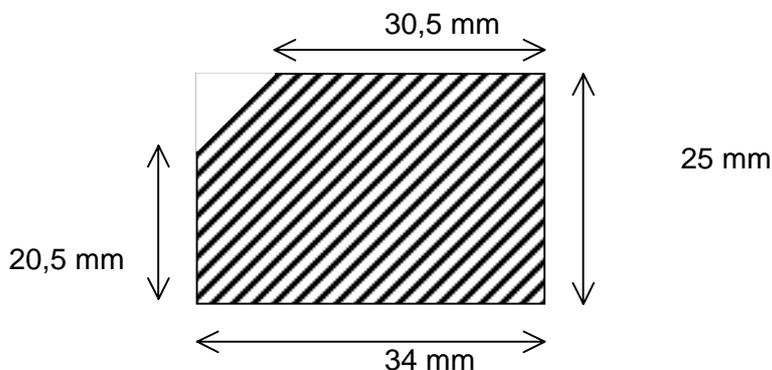


Fig. D2: Schema della lastra che costituisce il rivelatore.

D.5. ATTACCO CHIMICO

I rivelatori, dopo l'esposizione, vengono tolti dal telaio di plastica e sottoposti ad attacco chimico in soluzione 6,25 N di NaOH a 72° C per 15 ore e 20 minuti.

Viene sfruttato il fenomeno secondo il quale i rivelatori a stato solido, come i CR-39, sono caratterizzati da una diversa velocità di attacco nella zona danneggiata dal passaggio della particella carica rispetto alla superficie non irraggiata.

Le condizioni di attacco ottimali (tipo di reagente, concentrazione della soluzione, temperatura del bagno e tempo di attacco) sono stabilite sperimentalmente.

La riproducibilità della temperatura di attacco è importante perché il rateo di materiale asportato cambia al fluttuare della temperatura e con esso anche la dimensione della traccia.

Dato che la tecnica di conteggio delle tracce impiegata usa l'area della traccia per identificare le particelle alfa, i cambiamenti di temperatura possono fortemente influenzare il risultato.

Dopo lo sviluppo i rivelatori vengono risciacquati in acqua corrente e distillata per togliere ogni residuo di NaOH e asciugati singolarmente in tessuto assorbente.

APPENDICE E

SISTEMA DI LETTURA ED ANALISI AUTOMATICA DEI RIVELATORI DI RADON

E.1. INTRODUZIONE

L'analisi delle tracce delle particelle alfa è stata effettuata utilizzando un sistema di lettura automatico sviluppato presso il CRR, composto da un microscopio ottico il cui tavolino portaoggetti è azionato via software da motori passo passo, da una video camera e da un personal computer dotato di scheda frame grabber.

Sul PC è residente il software per la gestione dell'acquisizione (raccolta ed elaborazione delle immagini).

In fig. E1 è rappresentato lo schema a blocchi del sistema. I calcoli per risalire alle concentrazioni di radon, a partire dai conteggi delle tracce realizzati col sistema suddetto, sono effettuati con fogli di calcolo excel.

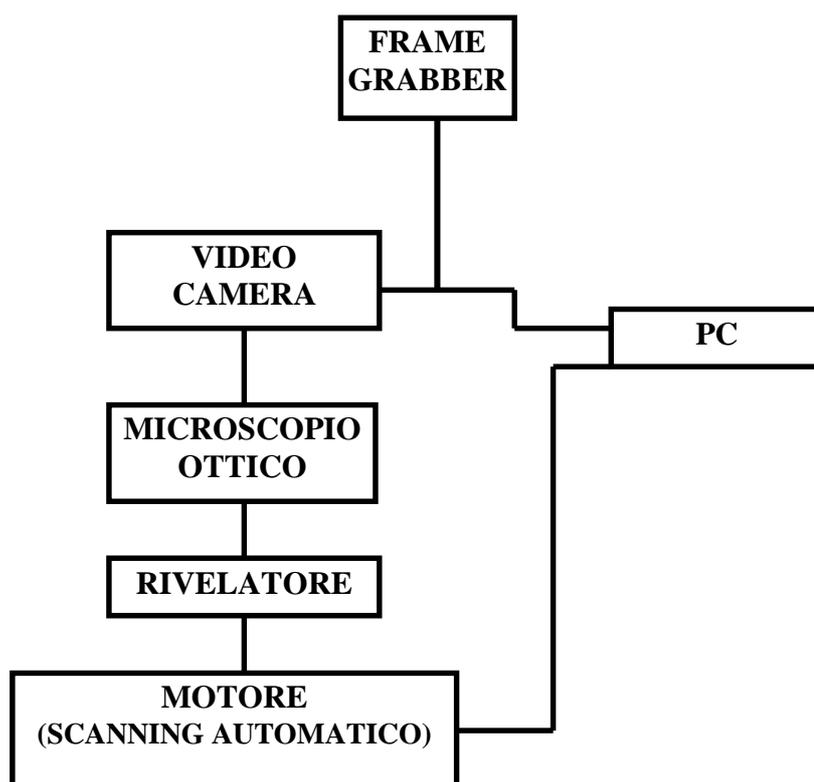


Fig. E1: Schema a blocchi del sistema.

E.2. DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI LETTURA E DELLE MODALITÀ DI ANALISI

E.2.1. PRINCIPI DI IDENTIFICAZIONE DELLE TRACCE

L'immagine catturata dal microscopio è ripresa dai rivelatori della telecamera ed il segnale analogico registrato viene elaborato e digitalizzato dalla scheda frame grabber (data translation) ottenendo così un'immagine composta da una matrice di elementi.

Ogni elemento, pixel, assume un valore intero compreso tra 0 (corrispondente al nero) e 255 (bianco).

Lo studio delle tracce si basa sulla digitalizzazione dell'immagine e sulla sua segmentazione ossia il riconoscimento delle tracce attraverso l'individuazione dei pixel che soddisfano determinate caratteristiche.

Nel caso dell'analisi delle tracce delle particelle alfa sui CR-39, il loro livello di grigio più scuro si differenzia dal resto dell'immagine, il fondo (più chiaro); per questo studiando la distribuzione dei livelli di grigio dei pixel, il software di gestione (sviluppato presso il CRR) fissa una soglia che permette una prima discriminazione tra tracce e fondo.

E.2.2. IL SOFTWARE DI IDENTIFICAZIONE DELLE TRACCE

Operando sui perimetri il software assegna alle tracce i pixel sopravvissuti al processo di discriminazione appena sintetizzato. Successivamente intervengono tre controlli finalizzati alla selezione delle tracce utili per le determinazioni quantitative (escludendo tracce sul dorso del rivelatore, impurità del materiale, ...):

1. Limite sul livello medio di grigio: la traccia viene accettata solo se almeno una certa percentuale dei pixel che la formano ha un livello di grigio minore di un valore stabilito.
2. Limite sull'eccentricità: analizza il rapporto tra asse maggiore e minore della traccia (che è di forma ellittica).
3. Limite sul confronto tra area geometrica, calcolata analiticamente a partire dal perimetro, e area determinata tramite la somma dei pixel che appartengono alla traccia.

All'interno del programma è stato inoltre sviluppato un algoritmo che permette la messa a fuoco automatica dell'immagine.

E.2.3. CONTEGGIO AUTOMATICO DELLE TRACCE

L'ingrandimento del sistema è circa 120. La scansione del rivelatore prevede l'analisi di otto files di otto immagini ciascuno, con un'area complessivamente analizzata di 0,941 cm².

La lettura dei rivelatori fornisce oltre al conteggio totale anche uno spettro della distribuzione delle aree delle tracce individuate; analizzando tale spettro è possibile individuare la zona di interesse e calcolare il numero di tracce comprese tra due valori che possono essere impostati ad ogni lettura: si è verificato che l'impiego della zona di picco della distribuzione garantisce una migliore riproducibilità rispetto al ricorso indiscriminato all'intero spettro di aree.

In fig. E2 è mostrato un esempio di distribuzione di frequenza delle aree delle tracce.

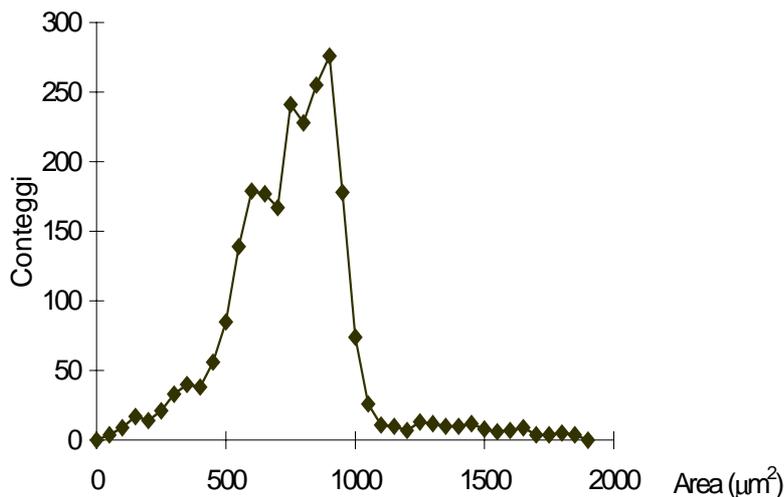


Fig. E2: Esempio della distribuzione di frequenza delle aree delle tracce.

E.2.4. CALCOLO DELLA CONCENTRAZIONE DI RADON

I conteggi vengono divisi per l'area di scansione ed elaborati su fogli Excel fino al calcolo della concentrazione di radon.

Dalla densità di tracce grezza è sottratto il fondo valutato sui testimoni di lastra.

Segue la normalizzazione sul tempo di esposizione e la conversione in concentrazione di radon, in Bq/m³, note le efficienze dei rivelatori ovvero tramite i coefficienti ottenuti nelle procedure di calibrazione (cfr. appendice successiva).

Viene anche valutata una minima attività rilevabile per i vari rivelatori: tipicamente (per sei mesi di esposizione) essa si aggira sui 10 Bq/m³.

La concentrazione di radon che viene attribuita ad un dosimetro risulta, infine, dalla media dei valori derivati dai singoli rivelatori. Per quanto riguarda l'incertezza da associare ad ogni valore di concentrazione, sono in corso approfondimenti sui termini che costituiscono le principali fonti di errore (posizionamento della "finestra" di selezione conteggi, correzioni per variazione dell'illuminazione del microscopio, riproducibilità del materiale di rivelazione, incertezza sulle esposizioni nominali in calibrazione,...).

Considerazioni sull'accuratezza sono contenute nel paragrafo F.1.3.

QUALITÀ DEI DATI DI MISURA

F.1. CALIBRAZIONI ED INTERCONFRONTO

F.1.1. CALIBRAZIONI

Nella precedente appendice, ove si è analizzato il sistema di lettura dei rivelatori e il conseguente calcolo della concentrazione di radon, si è fatto riferimento all'efficienza dei rivelatori.

I rivelatori utilizzati durante la campagna sono stati ricavati da quattro partite diverse di lastre di CR-39, identificate rispettivamente con A, B, C e D.

Un gruppo di dosimetri (variabile tra 20 e 40) per ogni partita di lastre, è stato inviato all'NRPB (National Radiological Protection Board, Chilton, UK); una quota di questi veniva irradiata in una camera a radon (si veda sezione F.1.2) ad una esposizione nota di circa $1000 \text{ kBq h m}^{-3}$, i rimanenti venivano utilizzati come testimoni e quindi non esposti.

L'efficienza è stata calcolata di volta in volta sottraendo alla media della densità di tracce dei rivelatori esposti la media della densità di tracce dei testimoni, normalizzando per il valore certificato dall'NRPB di esposizione al radon.

Tipicamente l'efficienza ottenuta è dell'ordine di $0,001 - 0,002 \text{ tr/cm}^2$ per Bq h m^{-3} e la dispersione dei valori intorno alla media è del 10 - 15 %.

F.1.2. CAMERA A RADON DELL'NRPB

Presso l'NRPB è stata allestita una camera a radon con un volume di 43 m^3 , che è il riferimento europeo per le misure di radon nei progetti di interconfronto e intercalibrazione.

All'interno della camera le concentrazioni di radon possono essere variate, nel range dei valori tipici degli ambienti di vita fino a diverse migliaia di Bq/m^3 .

Nella camera, le concentrazioni di radon e dei prodotti di decadimento sono continuamente monitorate, le condizioni di aerosol dell'aria possono venire variate a seconda delle esigenze di studi e calibrazioni.

F.1.3. INTERCONFRONTO

Per assicurare la qualità delle misure è importante confrontare i vari tipi di dispositivi dedicati all'effettuazione delle misure nelle stesse condizioni operative di misura.

Il *Radiation Protection Search Program* della Commissione Europea ha organizzato, all'inizio del 1999, un interconfronto di rivelatori attivi e passivi di radon e di tecniche di misura dei suoi prodotti di decadimento.

Ogni laboratorio partecipante con dosimetri passivi (tra cui anche il CRR) ha inviato all'NRPB 40 dosimetri che sono stati poi da questi divisi in gruppi di dieci.

Uno dei gruppi non è stato esposto, i rimanenti sono stati esposti nella camera a radon del NRPB a tre diversi valori: 1847 kBq h / m^3 , 290 kBq h / m^3 , 250 kBq h / m^3 .

I dosimetri sono stati poi riconsegnati ai vari laboratori che hanno dovuto sviluppare, leggere i relativi rivelatori e calcolare le esposizioni (in kBq h / m^3), subito comunicate all'NRPB, prima di essere informati dei rispettivi valori nominali.

Le letture effettuate dal CRR hanno dato come valori medi per i tre gruppi di rivelatori rispettivamente 1401 kBq h / m^3 , $241.3 \text{ kBq h / m}^3$, 218 kBq h / m^3 .

Risulta una differenza media rispetto ai dati nominali, sulle tre esposizioni, inferiore al 20%.

Tale valore era per gli organizzatori il limite, nella deviazione dai dati certificati o nella dispersione interna dei dati empirici, ai fini dell'accettabilità delle misure.

Si ritiene comunque di dover indagare sulle cause delle deviazioni registrate nell'interconfronto, anche considerando che le condizioni microclimatiche, elettrostatiche e di aerosol interne alla camera dell'NRPB possono aver agito sulla risposta dei dosimetri e non necessariamente corrispondere alle analoghe occorrenti nelle abitazioni.

F.2. FATTORI CORRETTIVI

Nei casi in cui l'esposizione indoor è stata elevata, l'irradiazione prodotta sui rivelatori ha comportato sovrapposizione di tracce che nel conteggio non venivano risolte, per cui ne è derivata una sottostima delle concentrazioni (effetto saturazione).

Il secondo aspetto di rilievo consiste nelle modifiche che sono state apportate ai valori di concentrazione misurati da ogni singolo rivelatore per tenere conto delle esposizioni aggiuntive rispetto a quella propriamente dell'abitazione.

Per ultimo, per avere un'idea delle fluttuazioni legate al clima e per avere un coefficiente che consenta di proiettare sull'intero anno dati di misura relativi ad un singolo semestre è stato valutato il valore medio del fattore stagionale, disponendo di numerose misure di radon per due semestri consecutivi nelle stesse abitazioni.

F.2.1. EFFETTO DI SATURAZIONE

Nei casi di rivelatori in cui sia presente saturazione si deve applicare una correzione che permetta di ottenere la reale concentrazione di radon dal numero di tracce effettivamente contate.

Operativamente, tale condizione si verifica a partire da un numero di tracce sul rivelatore superiore a 6000 circa, che, nel caso di esposizioni semestrali come quelle effettuate nell'indagine e di dosimetri con efficienza standard, corrisponde a concentrazioni superiori a 600 Bq/m^3 circa.

Per verificare la linearità del sistema di analisi sono stati inviati all'NRPB 70 rivelatori (cinque gruppi di sette dosimetri) che sono stati esposti a diversi livelli di radon: 413 kBq h / m^3 , 832 kBq h / m^3 , 1086 kBq h / m^3 , 3397 kBq h / m^3 e $11558 \text{ kBq h / m}^3$.

Tre dosimetri sono stati tenuti come testimoni del fondo.

Si è poi proceduto a calcolare la media dei conteggi per ogni gruppo di rivelatori e la corrispondente densità di tracce.

In fig. F1 è riportata la densità di tracce misurata in funzione di quella calcolata dai valori di esposizione noti (forniti dall'NRPB) e con riferimento all'efficienza dei rivelatori determinata in fase di calibrazione.

Il primo tratto di retta in basso a sinistra corrisponde all'intervallo di linearità del sistema in condizioni normali.

La retta passante per i due punti a densità di tracce superiore rappresenta la condizione di saturazione (le tracce iniziano a sovrapporsi per effetto della crescita dell'intensità di irradiazione).

Tuttavia la dispersione elevata dei dati impiegati per costruire la retta nella zona di saturazione e la stessa correzione drasticamente lineare (solo due punti sono disponibili per caratterizzare l'andamento nell'area di non linearità) scoraggiano l'applicazione di tale metodo correttivo. In attesa di disporre di una correzione per effetto di saturazione affidabile si è preferito non procedere con manipolazioni sulle letture tal quali. Si possono verificare in questo modo talune sottostime (modeste tuttavia in numero e, credibilmente, in entità): solo 25 dosimetri (39 rivelatori) sono affetti da saturazione ovvero l'1 % del totale; rispetto alla correzione tramite la fig. F1, inoltre, la concentrazione annua per le abitazioni con saturazione sarebbe in media sottostimata del 16 % (con estremi -4 % e +35 %).

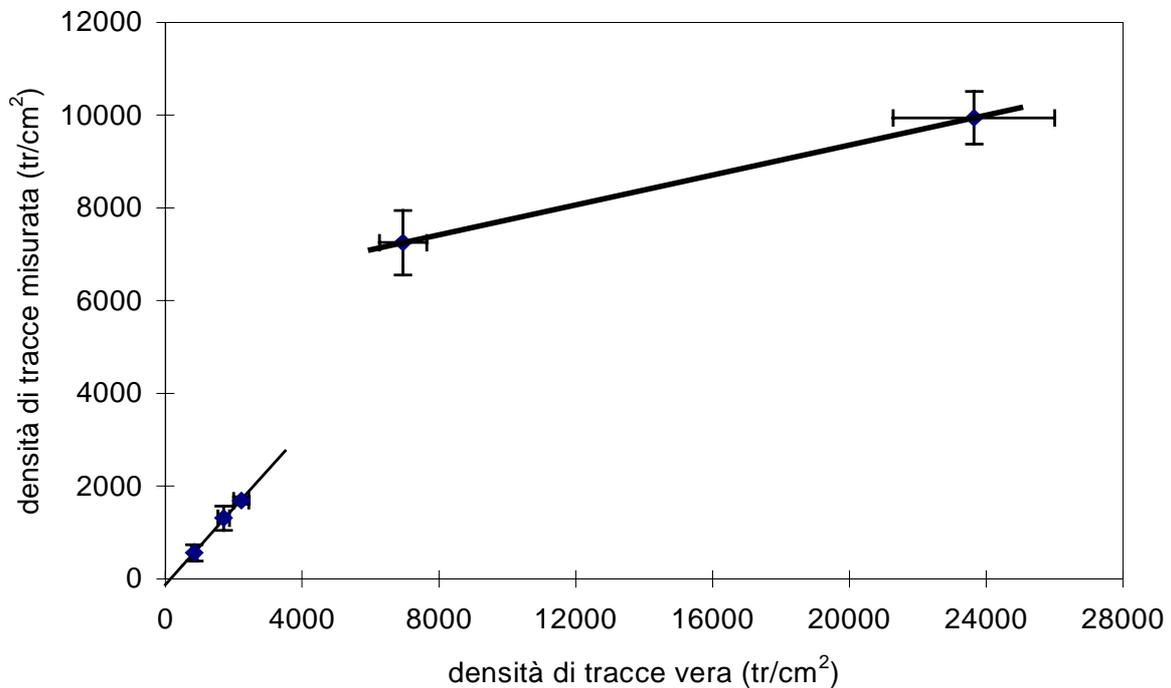


Fig. F1: Densità di tracce misurata in funzione di quella effettiva (esposizione effettuata presso l'NRPB - UK).

F.2.2. CORREZIONI PER ESPOSIZIONI AGGIUNTIVE RISPETTO A QUELLA PROPRIA DELL'ABITAZIONE

Il tipo di rivelatore utilizzato nell'indagine è in grado di rilevare la presenza di gas radon in tutti gli ambienti in cui viene posizionato a partire dall'istante in cui viene prodotto fino a quello in cui viene sottoposto alla procedura di sviluppo. Ciascun dosimetro, una volta prodotto presso il CRR, è stato consegnato (in busta di alluminio termosaldato) alle diverse Sezioni di Fisica provinciali (SFA) in attesa di essere recapitato alle famiglie campione per l'esposizione; a termine esposizione esso è stato conservato nelle stesse buste con chiusura posticcia (graffette, scotch, nastro adesivo o isolante, ..) fino al rientro al CRR ove è stato reintrodotta in alluminio termosaldato prima dell'attacco chimico. Prove di laboratorio hanno evidenziato che se la permeazione al radon dell'alluminio termosaldato è bassissima, così non è per le altre forme di chiusura utilizzate. Per diversi dosimetri che hanno atteso lunghi tempi (tipicamente ≥ 50 giorni) dopo l'esposizione prima del rientro al CRR, in sedi con presumibili concentrazioni di radon non insignificanti, si è valutato se apportare correzioni: se la stima tramite fattore stagionale (vedi paragrafo F.2.3) confortava il dato di misura questo veniva tenuto, altrimenti si adottava la proiezione con tale fattore (caso in cui il dosimetro dell'altro semestre era di buona qualità); ove i dosimetri di entrambi i semestri presentavano il problema, si è adottato il comportamento prevalente, provincia per provincia, circa l'evenienza appena descritta (solo in provincia di Treviso si è proceduto a correggere i dati con un 23 % di riduzione).

Complessivamente si è intervenuti sulle concentrazioni misurate di 118 dosimetri con una riduzione media del 31 %.

Per quanto riguarda la conservazione in busta di alluminio termosaldata prima dell'esposizione si sono operate delle correzioni solo nei casi in cui i tempi di permanenza erano estremamente lunghi (superiori all'anno) e fossero noti con una certa sicurezza gli ambienti adibiti allo stoccaggio dei dosimetri ed il valore di concentrazione al loro interno. Per questi dosimetri, la concentrazione misurata è stata corretta tenendo conto che nel periodo di stoccaggio la concentrazione nella busta termosaldata valeva:

$$C_B = C_O \frac{\tau}{\tau_M} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (5)$$

con C_B concentrazione di radon all'interno della busta,

C_O concentrazione di radon nell'ambiente adibito allo stoccaggio dei dosimetri,

$$\tau = \frac{\tau_M \cdot \tau_R}{\tau_M + \tau_R}, \quad \tau_R \text{ vita media del radon e}$$

τ_M tempo di permeazione dell'alluminio ($\tau_M \approx 70$ giorni).

Tale correzione ha riguardato solo pochi dosimetri comportando una correzione media del 13 % dal valore misurato.

Per ultimo è stata apportata una correzione indistintamente a tutti i dosimetri per il periodo intercorso tra il rientro al CRR e il loro sviluppo (conservazione ancora in busta termosaldata in ambiente povero di radon), sempre utilizzando l'equazione (5).

In tabella sono riassunte le correzioni effettuate.

Modalità di conservazione	Intervallo di tempo	N° dosimetri corretti	% media di correzione
Busta di alluminio termosaldata	Produzione-Consegna alla SFA	28	13 %
Busta chiusa con scotch, graffette, nastro adesivo o isolante	Fine esposizione-Rientro al CRR	118	31 %
Busta di alluminio termosaldata	Rientro al CRR-Sviluppo	2312	3 %

F.2.3. FATTORE STAGIONALE

Per fare proiezioni annuali nei casi in cui fosse noto un solo dato semestrale, si è calcolato un fattore stagionale come rapporto tra le medie (geometriche, essendo le distribuzioni dei dati approssimativamente log-normali) dei due periodi semestrali consecutivi. Sono stati considerati solamente i dosimetri per cui l'intervallo di tempo intercorso tra la fine dell'esposizione all'interno dell'abitazione e il rientro al CRR era inferiore ai valori di soglia stabiliti (cfr. paragrafo precedente).

Utilizzando quindi i dati provenienti da 608 abitazioni, si è ottenuto:

$$\left(\frac{\bar{I}}{\bar{E}} \right) = 1.29 \quad (6)$$

dove I è la concentrazione di radon misurata nel semestre corrispondente alle stagioni autunnale ed invernale, E è quella delle stagioni primavera ed estate.

La proiezione tramite fattore stagionale è stata utilizzata per complessive 205 abitazioni.

APPENDICE G

METODOLOGIA DELL'INDAGINE

G.1. DIPENDENZA DAL PIANO DELL'ABITAZIONE

G.1.1. NORMALIZZAZIONE A PIANO TERRA

Come più volte accennato, si sono prevalentemente individuate, per il monitoraggio, abitazioni a piano terra. Per i casi di altri piani monitorati, si è cercato comunque di costruire uno strumento per normalizzare il valore ad una virtuale condizione di piano terra. Il dato di piano terra non presenta, infatti, la dipendenza dalla distanza dal suolo (fattore τ_p , cfr. appendice A) e l'indicatore che da esso discende risulta più sensibile alle variazioni del fattore geologico (τ_g) e del fattore di interazione abitazione-ambiente (τ_c).

Per costruire la curva di normalizzazione delle misure alla condizione di piano terra, si è fatto ricorso ai dati ottenuti nell'ambito dell'indagine nazionale di cui si è già detto, essendo questi rappresentativi dell'esposizione al radon a livello regionale.

Tra questi si è selezionato un campione non comprendente zone nelle quali i livelli di radon erano soggetti ad evidenti distorsioni per specificità geologiche, pur riflettendo la composizione del data-set originario circa le tipologie abitative.

La fig. G1 rappresenta l'andamento delle concentrazioni in funzione del piano del locale ove sono stati posizionati i dosimetri per tale campione.

I valori riportati rappresentano le medie delle concentrazioni di radon a piano terra, al primo piano e a piani maggiori del primo. Quest'ultimo raggruppamento è stato fatto perché si è verificato che non sono presenti grandi variazioni tra i valori di concentrazione del gas radioattivo dal secondo piano in poi.

Le concentrazioni relative all'indagine di cui tratta il presente rapporto possono essere normalizzate quindi alla condizione di piano terra, noto il piano dove è stata effettuata la rilevazione, con ricorso alla curva in fig. G1 ovvero dividendo per i seguenti fattori:

$$Rn_{1 \rightarrow T} = 51.51/63.33=0.81$$

$$Rn_{2 \rightarrow T} = 40.17/63.33=0.63$$

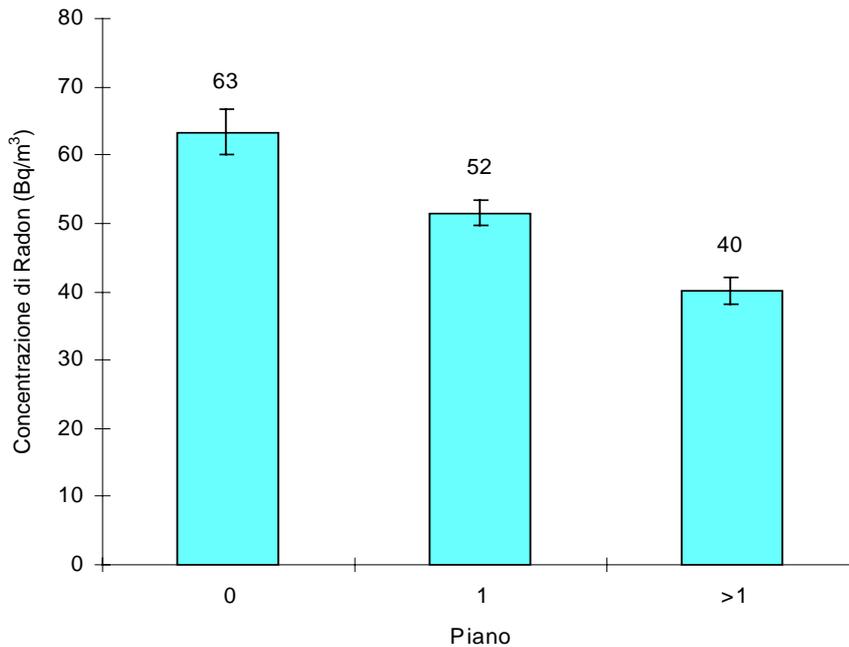


Fig. G1: Andamento delle concentrazioni di radon in funzione del piano a cui è stata eseguita la misura.

G.1.2. TIPOLOGIA ABITATIVA STANDARD (RELATIVAMENTE AL PIANO)

Come detto, oltre alla rappresentazione dei dati normalizzati alla condizione di piano terra, è interessante considerare un secondo tipo di rappresentazione in cui i dati sono proiettati in funzione delle tipologie abitative standard (relativamente al piano) localmente rinvenibili. In questo rapporto la correzione è stata effettuata con riferimento alla distribuzione di frequenza delle abitazioni in funzione del piano (housing stock) dell'intera regione del Veneto. Proiezioni più fini saranno eseguite in seguito, una volta in possesso di dati al dettaglio comunale, avendo osservato che possono determinarsi evidenti variazioni in relazione alla peculiarità delle aree monitorate (comunità montane piuttosto che aree urbane, ...).

Per estrapolare le concentrazioni di radon alla tipologia abitativa standard regionale, si è fatto ricorso ai dati ISTAT sull'housing stock regionale del Veneto del censimento della popolazione 1981.

In fig. G2 è rappresentato tale housing stock per le seguenti categorie: piano terra (più rialzato o mezzanino), primo piano, piani (singoli) maggiori del primo, abitazioni sviluppate su piano terra e primo piano, su primo e secondo piano, su altre possibili combinazioni di due piani ed infine strutture abitative a più di due piani.

Sulla base dell'housing stock e considerando i livelli di radon per tipologia abitativa di cui alla fig. G1 si è calcolata una media regionale pesata di concentrazione di radon (MR) tramite la seguente formula:

$$MR = \frac{\sum_i (\bar{R}n_i N_{a,i})}{\sum_i N_{a,i}} \quad (7)$$

dove \overline{Rn}_i indica la concentrazione media della i^{esima} tipologia abitativa; $N_{a,i}$ costituisce il numero di abitazioni della i^{esima} tipologia in Veneto secondo l'housing stock regionale (fig. G2).

Le concentrazioni di radon assegnate alle tipologie abitative caratterizzate da due o più piani derivano dalle medie sui valori dei singoli piani secondo l'istogramma della fig. G1.

Dividendo il valore di MR per la concentrazione media del piano terra (fig. G1) si ottiene il fattore che consente di estrapolare dalle stime normalizzate a piano terra i valori relativi alla condizione abitativa standard del Veneto:

$$\frac{MR}{\overline{Rn}_i} = 0.842 \quad (8)$$

dove \overline{Rn}_i è la concentrazione media per case a piano terra.

È possibile pervenire a proiezioni più mirate circa distribuzioni di tipologie abitative locali, se disponibili, ancora con ricorso alle eqq. (7) - (8) tramite sostituzione nell'eq. (7) dei valori di $N_{a,i}$ regionali con quelli del data-set locale.

La rappresentazione dei risultati in termini di tipologia standard rispetto a quella dei piani terra ha il vantaggio di fotografare lo stato effettivo dell'esposizione domestica in quanto aggiunge all'informazione più legata alla sorgente prevalente di radon (il suolo) quella dell'azione del patrimonio edilizio esistente su di essa.

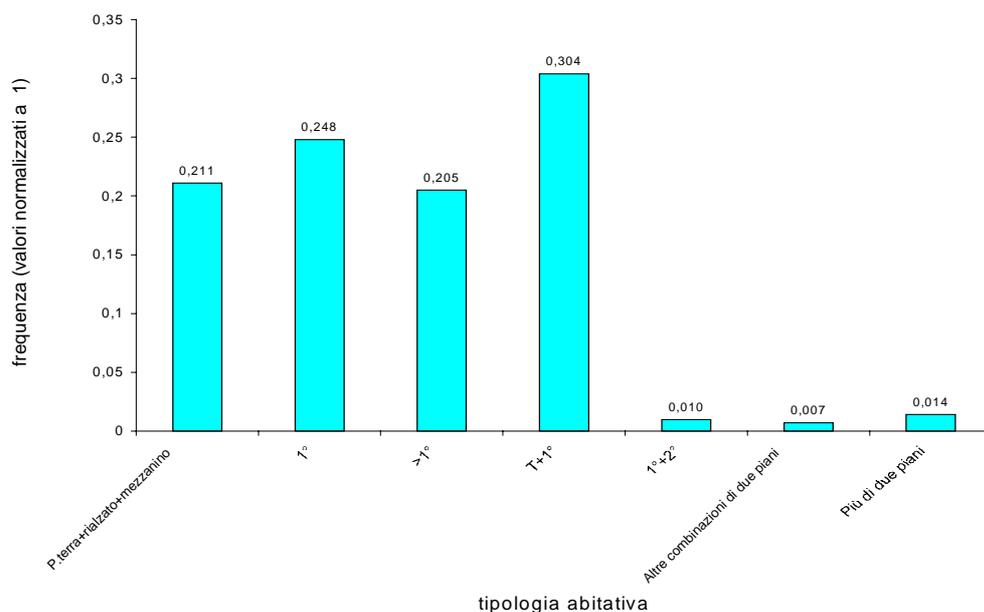


Fig. G2: Rappresentazione dell'housing stock regionale ricavato dal censimento ISTAT del 1981.

G.2. DISTRIBUZIONE DI FREQUENZA DEI LIVELLI DI RADON

L'ipotesi utilizzata in questa indagine, derivata da molte accreditate indicazioni scientifiche internazionali, è che la distribuzione di frequenza delle concentrazioni di radon indoor nelle maglie (e in generale) sia log-normale. Partendo da questo presupposto, per costruire la distribuzione di frequenza dei dati, si ha l'esigenza di calcolare media geometrica (GM) e deviazione standard geometrica (GSD) delle concentrazioni normalizzate alla condizione di piano terra per ciascuna maglia. La GM si ricava dai dati sperimentali della maglia specifica, mentre per la valutazione della GSD si è considerato un metodo indiretto descritto in G.2.2. Per la valutazione di GM e GSD nel caso di tipologia abitativa standard si veda più avanti al paragrafo G.3.

G.2.1 DISTRIBUZIONE DEI DATI

La funzione di distribuzione di frequenza dei livelli di radon all'interno delle maglie, e nel territorio in genere, si è detto, si ipotizza essere log-normale. Indicazioni a sostegno della stessa sono ampiamente documentate in letteratura [7] e trovano riscontro nei modelli statistici semplificati [12] di cui è fornito un esempio anche in questo rapporto, nell'appendice A.

Tuttavia, spesso, i dati sperimentali (inclusi quelli della più volte citata indagine nazionale) approssimano la distribuzione log-normale non adeguandovisi completamente. È possibile quindi che debbano essere operati degli adattamenti: con riferimento al modellino esemplificato in appendice A, Gunby [12] sostiene ad esempio che la distribuzione dei livelli di radon indoor è log-normale purché alle concentrazioni misurate sia sottratto il contributo della concentrazione locale di radon outdoor. Altri studiosi eseguono, invece, tagli sui livelli bassi di radon e ricostruiscono la distribuzione log-normale a partire da quelli che sopravvivono. Addirittura, taluni abbandonano ogni ipotesi funzionale interpretativa dei dati (di cui una è appunto la log-normale) per ricorrere ad algoritmi puramente descrittivi, come la polinomiale.

In fig. G3 è rappresentata la distribuzione di frequenza sperimentale dei logaritmi delle concentrazioni a piano terra di questa indagine per l'intero campione (1230 abitazioni).

La forma richiama abbastanza la normale, pur suggerendo i test statistici sulla normalità (χ^2 in primis) il rigetto di tale ipotesi. Un certo depauperamento della coda di bassi valori si osserva nella fig. G3, come se ci fosse una sovrastima sistematica delle concentrazioni e ciò andrebbe nel senso di quanto sostenuto sull'opportunità di sottrarre il contributo outdoor alle misure indoor.

Si è allora provato a sottrarre un valore non irragionevole della concentrazione outdoor (10 Bq/m^3) ai dati della fig. G3 ottenendo una distribuzione che migliora la sua simmetria e per la quale il test di normalità del χ^2 dà stavolta esito positivo ($p > 0.01$).

Tuttavia, in questo rapporto non si sono impiegati i dati sottoposti a questa correzione in attesa del dovuto approfondimento in materia.

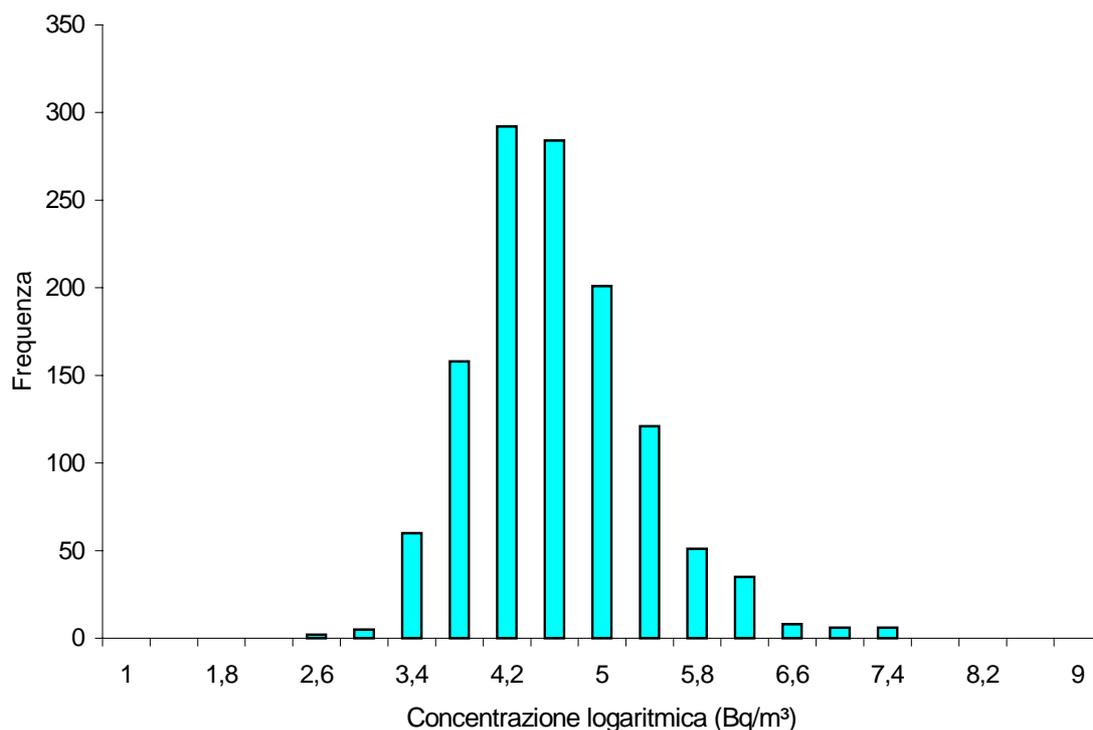


Fig. G3: Distribuzione di frequenza della concentrazione a piano terra espressa in forma logaritmica per l'intero campione di indagine (1230 abitazioni).

G.2.2. CALCOLO DELLE GSD

Per il calcolo delle GSD erano state previste ad inizio indagine alcune intensificazioni nel monitoraggio all'interno delle maglie (20 – 30 abitazioni in luogo delle 5 standard) al fine di poter contare su campioni con una certa validità statistica da utilizzare per ricavare informazioni estrapolabili alle restanti maglie. Sono state quindi considerate 16 maglie all'interno del campione di indagine con più di 12 abitazioni ciascuna. Esprimendo le deviazioni standard geometriche in funzione delle GM (concentrazioni normalizzate a piano terra) si è constatata una apparente dipendenza tra le due variabili (fig. G4).

La relazione lineare ricavata estesa a tutte le maglie comporta però predizioni distorte sulle code, questo in conseguenza del ristretto range di concentrazione coperto dalle maglie intensificate: 38 – 109 Bq/m³.

Sono state allora considerate tutte le maglie con più di 2 abitazioni ciascuna, per un totale di 205 maglie e su questo set si è indagato il rapporto esistente tra GM e GSD. Il range di concentrazione ora coperto è certamente più significativo (da 26 a 473 Bq/m³). In fig. G5 è mostrato il grafico che riporta i valori empirici di GSD in funzione della rispettiva GM (sempre per dati normalizzati a piano terra). Si riscontra una dipendenza lineare, leggera, ma statisticamente significativa (valore p del test F < 0,005).

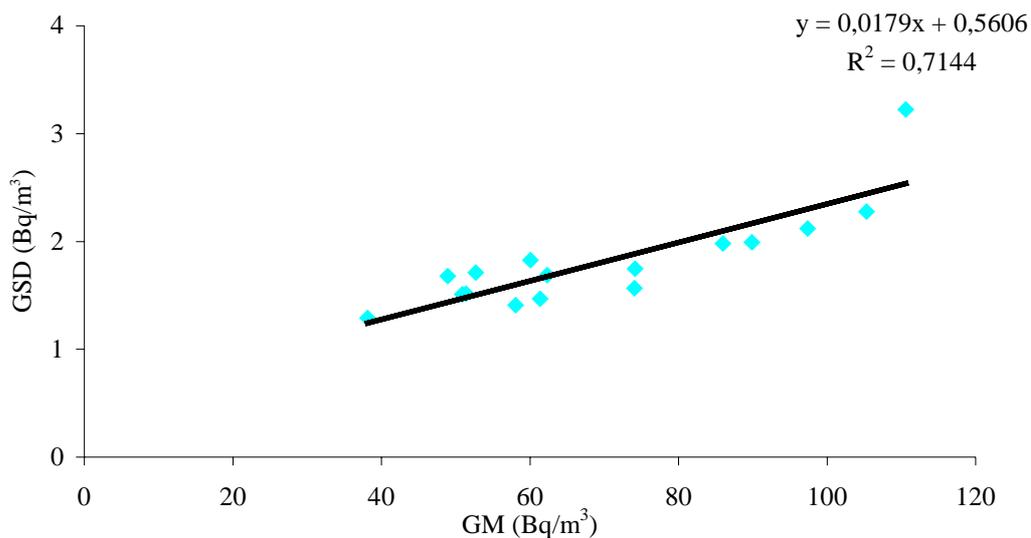


Fig. G4: Grafico dei valori di GSD in funzione di GM per le maglie intensificate con più di 12 abitazioni (dati normalizzati a piano terra).

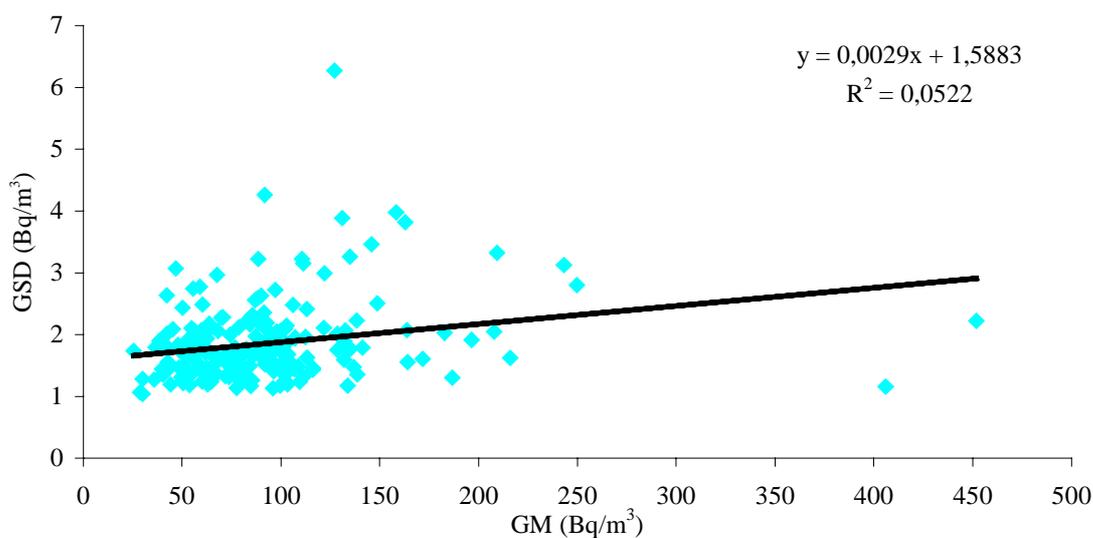


Fig. G5: Grafico dei valori di GSD in funzione di GM per tutte le maglie con più di due abitazioni (dati normalizzati a piano terra).

Maglia per maglia, dunque, la GSD è valutata a partire dalla propria GM tramite l'equazione di regressione della fig. G5: l'interpolazione fornisce la robustezza statistica che singolarmente le GSD empiriche di maglia non hanno.

G.3. CALCOLO DELLE PERCENTUALI DI ABITAZIONI CHE SUPERANO UN DETERMINATO LIVELLO DI RIFERIMENTO

Per produrre la mappa delle percentuali di abitazioni che superano un determinato livello di radon (LR) si è costruita la devziata normale standardizzata Z in ogni maglia definita come:

$$Z = \frac{[\ln(LR) - \ln(GM)]}{\ln(GSD)} \quad (9)$$

dove LR è il valore di riferimento.

In questo rapporto come LR sono stati adottati i valori di 200 e 400 Bq/m³.

La Commissione Internazionale per la Protezione Radiologica [8] suggerisce che i livelli di riferimento per le abitazioni nei vari Paesi debbano essere scelti nell'intervallo 200 - 600 Bq/m³.

Si ricorda che l'Italia non ha ancora definito il proprio livello di riferimento per il radon nelle abitazioni e che esiste, tuttavia, una raccomandazione comunitaria del 1990 [3] che fissa in 400 Bq/m³ il livello superato il quale è opportuno bonificare le abitazioni esistenti.

Consultando le tabelle di probabilità della distribuzione di frequenza normale, è possibile ricavare per ogni valore di Z la percentuale attesa di abitazioni eccedenti il LR scelto nella maglia.

In primo luogo questo procedimento è stato seguito riferendosi alle GM e alle GSD dei dati normalizzati a piano terra.

Si è poi operato analogamente per i dati normalizzati all'housing stock regionale (paragrafo G.1.2), pervenendo al popolamento della variabile Z e alla conseguente derivazione delle percentuali di abitazioni sopra LR. I valori di GSD utilizzati in questo caso coincidono con quelli ricavati per il piano terra (paragrafo G.2.2). Per le GM è stato sufficiente ricorrere al fattore dell' eq. (8).

G.4. RIEMPIMENTO E SMOOTHING DEI DATI DI MAGLIA

Le mappe che vengono prodotte a partire dai dati sperimentali possono presentare delle lacune. Può accadere che alcune maglie incluse nel piano di monitoraggio risultino nei fatti inaccessibili: alcune aree montane appaiono sprovviste di abitazioni stabilmente occupate. Talora le abitazioni utili all'interno della maglia sono meno delle 5 previste (per danneggiamenti occorsi ai dosimetri, per difficoltà di reperimento delle abitazioni,...); del resto, non essendo il campionamento all'interno della maglia basato su criteri statistici, il campione selezionato può essere caratterizzato da distorsioni.

Per tali motivi, si è proceduto a trattare i dati empirici di maglia con operazioni di riempimento e smoothing. Il metodo per ora preso in esame è quello adottato dal NRPB [15, 16] per elaborare i dati relativi al radon indoor ed alla dose gamma outdoor.

Per il riempimento, il valore della maglia (T) è ricavato da quelli delle maglie confinanti (X e Y), pesando sul contributo che il volumetto spiccato da ciascuna maglia dà al volume del tetraedro con base uguale all'insieme delle stesse maglie (cfr. fig. G6); i pesi derivati rispettivamente per le maglie X e Y sono 3 e 2, per cui il valore ricercato è:

$$T = \frac{3 \sum_i \ln(X_i) + 2 \sum_j \ln(Y_j)}{20} \quad (10)$$

Per lo smoothing, il procedimento è del tutto analogo salvo che è presente il valore della maglia (T) a cui viene attribuito peso 12, per cui l'eq. (10) diventa:

$$D = \frac{12 \ln(T) + 3 \sum_i \ln(X_i) + 2 \sum_j \ln(Y_j)}{32} \quad (11)$$

I valori di bordo a ridosso dei confini meridionali dell'area d'indagine, da utilizzare per lo smoothing, sono stati derivati da un campione di 244 abitazioni appartenente alla citata indagine nazionale rappresentativo dell'area sud della regione caratterizzata da depositi alluvionali fini, di bassa permeabilità (cfr. fig. B1). La tabella G1 ne riassume i valori.

N. abitazioni del campione selezionato	GM _{PIANO TERRA} (Bq/m ³)	GSD _{PT} (Bq/m ³)	GM _{HOUSING STOCK} (Bq/m ³)	GSD _{HS} (Bq/m ³)
244	64	1.49	50	1.53

Tab. G1: Dati che caratterizzano il campione appartenente alla passata indagine nazionale e caratterizzato da depositi alluvionali fini.

In prima approssimazione, per questo rapporto, i dati della tab. G1 sono stati impiegati anche per il riempimento delle maglie prive di dati non confinanti con alcuna maglia con dati oltrechè per caratterizzare il bordo ai fini dello smoothing anche sul confine settentrionale dell'area d'indagine.

È da sottolineare che indipendentemente dall'indicatore rappresentato nelle maglie, le tecniche suddette sono applicate alle GM e che la giustificazione al loro uso consiste nell'ipotesi di variazione territoriale con continuità dei livelli di radon.

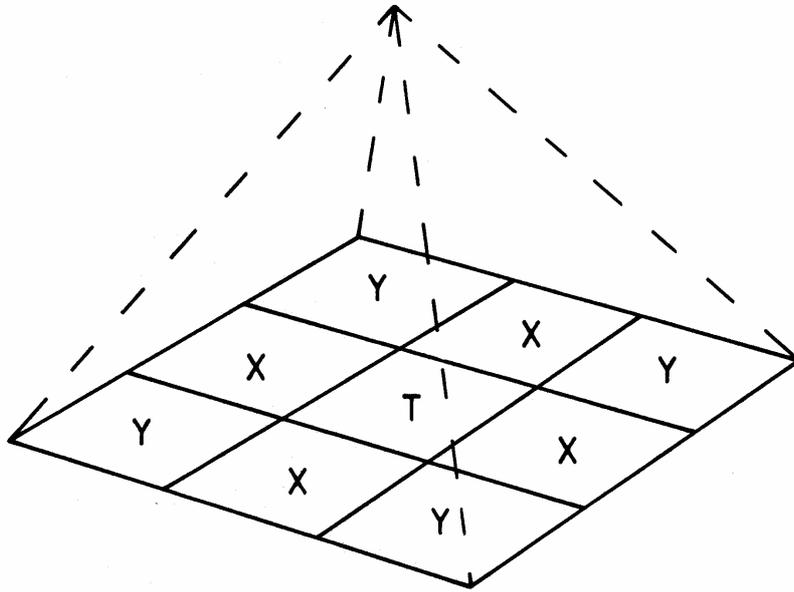


Fig. G6: Tetraedro su cui operano le tecniche di riempimento e smoothing.

La tecnica appena sintetizzata opera su considerazioni puramente geometriche. Esistono nuovi strumenti [17], che si pensa di approfondire ed eventualmente adottare, i quali orientano le operazioni di interpolazione utilizzando informazioni localmente disponibili, ad esempio, sui parametri geografici (geologia, ...) o strutturali dell'abitazione.

APPENDICE H

RISULTATI DELL'INDAGINE

In questa appendice è presentata la prima elaborazione dei risultati conclusivi dell'indagine in termini di una statistica generale e di molteplici rappresentazioni grafiche per la cui realizzazione si è utilizzato il software per la gestione della cartografia Arcview versione 3.2.

A partire dalle mappe, vengono segnalate le aree ritenute sensibili al problema del radon indoor e viene cercato un primo riscontro di natura geologica. Come verifica conclusiva viene effettuata una breve analisi degli andamenti delle distribuzioni dei valori di concentrazione di radon in funzione dei parametri abitativi.

H.1. DATI STATISTICI SULL'INDAGINE

In tab. H1 sono illustrati i dati statistici generali per questa indagine raffrontati a quelli relativi all'indagine precedente del 1989 che era basata su un campione random statisticamente rappresentativo della regione. In tabella vengono forniti, rispettivamente per l'attuale e la precedente indagine, il numero di abitazioni costituenti il campione, la media geometrica per dati normalizzati a piano terra (GM_{PT}), le relative deviazione standard geometrica (GSD_{PT}) e media aritmetica (AM_{PT}), la media geometrica per dati rapportati all'housing stock regionale (GM_{HS} - cfr. appendice G), le relative deviazione standard geometrica (GSD_{HS}) e media aritmetica (AM_{HS}). I valori tra parentesi per l'indagine attuale rappresentano i risultati ottenuti direttamente sul campione empirico, senza considerare la normalizzazione a piano terra. Essi risultano più elevati rispetto al valore di housing stock rispecchiando proprio la non casualità con cui sono stati selezionati i piani delle abitazioni da monitorare (prevalenza di piani terra); i dati di housing stock della passata indagine sono quelli empirici (campione rappresentativo della regione).

Dalla tabella appare evidente che nella nuova indagine i valori di concentrazione medi sono sensibilmente più elevati di quelli della precedente campagna di misura, confermando l'opportunità dell'indagine appena conclusa.

Confrontando le varie medie (geometrica ed aritmetica, piano terra e housing stock) si registrano incrementi di più del 30 %.

Un'altra osservazione riguarda la riduzione della GSD nella normalizzazione da dati sperimentali (rappresentativi della regione per la passata indagine, non per quella attuale) a condizione di piano terra, a conferma del fatto che la normalizzazione riduce la distorsione sui dati apportata dalla distanza dal suolo degli ambienti monitorati.

INDAGINE	ABITAZ.	GM_{PT} (Bq/m ³)	GSD_{PT} (Bq/m ³)	AM_{PT} (Bq/m ³)	GM_{HS} (Bq/m ³)	GSD_{HS} (Bq/m ³)	AM_{HS} (Bq/m ³)
1996	1230	83	2.03	112	70 (75)	2.03(2.07)	94 (103)
1989	360	64	1.58	72	51	1.63	59

Tab. H1: Statistiche generali a confronto per le due indagini (per la spiegazione delle voci si riferisca al testo).

H.2. MAPPE

In questo paragrafo sono presentate le mappe ottenute dall'elaborazione dei dati.

In fig. H1 è mostrata, per le sole maglie indagate, vale a dire con almeno un dato di concentrazione misurato sperimentalmente, la mappa delle percentuali di abitazioni che superano il valore di riferimento di 200 Bq/m^3 a piano terra. A partire dai valori sperimentali è stata poi applicata per l'intera area interessata dall'indagine una tecnica di riempimento per le maglie prive di dato e di smoothing (cfr. appendice G).

In fig. H2 e in fig. H3 è rappresentata l'evoluzione della mappa precedente mettendo a confronto la tecnica di riempimento e smoothing adottata (appendice G) con un algoritmo commerciale di interpolazione (IDW – inverse distance weighting): entrambe di tipo geometrico, le due tecniche si differenziano oltre che per il diverso metodo di calcolo (basato su costruzioni di tipo piramidale o circolare) soprattutto per i dati su cui operano. In fig. H2 lo smoothing agisce sui valori di media geometrica a piano terra di ciascuna maglia e, dopo aver attribuito il corrispondente valore di GSD (cfr. appendice G), viene ricalcolata la percentuale di abitazioni che superano il livello di riferimento stabilito. In fig. H3 lo smoothing di tipo circolare opera direttamente sulle percentuali. L'immagine che entrambe le figure tracciano è abbastanza simile a conforto di una sorta di indipendenza della rappresentazione dallo strumento di interpolazione: si preferisce, al momento, comunque, la tecnica dell'appendice G poiché facilmente verificabile e perché pesa in modo meno drastico il punto ove è disponibile il dato.

Sempre a livello di trattamento dei dati, si sottolinea che le frazioni valutate per l'area meridionale non indagata sono costruite basandosi su un unico valore di media e deviazione standard geometriche relative al sottoinsieme delle abitazioni dell'indagine del 1989 rinvenute in suddetta area; ancora, i valori assegnati alle maglie confinanti con la zona d'indagine ai fini dello smoothing (e a quelle interne senza dati contigui ai fini del riempimento) derivano dal medesimo sottoinsieme e possono, in questo senso, comportare delle sottostime (particolarmente sui bordi settentrionali della regione).

Sul merito dell'informazione rappresentata, si ricorda ancora una volta che non esiste in Italia un livello di riferimento per il radon nelle abitazioni (pur potendosi richiamare i 200 e 400 Bq/m^3 della Raccomandazione europea del 1990 [3]), né, tantomeno, è fissata una soglia di percentuale di abitazioni con concentrazioni eccedenti il livello di riferimento da usare per delimitare le aree ad alto potenziale di radon. A titolo di confronto, si segnala che in Irlanda (media geometrica nazionale di 57 Bq/m^3 [18]) è definita radon "prone-area" quella ove più del 10 % delle abitazioni supera 200 Bq/m^3 .

In fig. H4 è presentata la mappa delle medie geometriche a piano terra dopo l'applicazione della tecnica di riempimento e smoothing (di tipo piramidale). L'informazione della percentuale di abitazioni che eccedono un certo valore di radon è superiore rispetto a quella della media geometrica, perché combina tale parametro con la deviazione standard geometrica che, come si è visto nell'appendice G, non è uguale per tutte le maglie. Le classi della rappresentazione della fig. H4 sono state scelte in modo da riprodurre per quanto possibile la mappa della fig. H2, sostituendo l'1 % e il 10 % rispettivamente con i valori di 65 e 90 Bq/m^3 .

In fig. H5 è mostrata la mappa delle percentuali di abitazioni che superano il livello di riferimento di 200 Bq/m^3 per dati normalizzati all'housing stock regionale in relazione al piano. Si può notare come il passaggio dalla condizione di piano terra a quella di housing stock comporti il depauperamento delle maglie al di sopra della soglia del 10 %, evidenziando la presenza di punti isolati. Si rammenta che l'informazione relativa all'housing stock (ove rappresentativo del patrimonio edilizio) inquadra più correttamente la condizione domestica rispetto al dato di piano terra, più utile invece per descrivere la sorgente (il suolo). L'inserimento di una classe intermedia al 5% consente di recuperare le aree sensibili già evidenziate nella mappa per il piano terra (fig. H5b).

Le figg. H6 e H7 illustrano le percentuali di abitazioni che, rispettivamente a piano terra e tramite normalizzazione all'housing stock regionale, superano i 400 Bq/m^3 : tale valore è

un altro dei possibili standard adottabili quale livello di riferimento nelle abitazioni. La fig. H6 riproduce abbastanza bene la fig. H2 ove come soglia delle frazioni per l'individuazione delle aree critiche si scelga l'1 % (in luogo del 10%); la fig. H7, operata questa sostituzione, si allinea sufficientemente alla fig. H5. Infine in fig. H8 è fornita una mappa geografica del Veneto con sovrapposta quella dell'housing stock della percentuale di abitazioni che superano il livello di riferimento di 200 Bq/m^3 (cfr. fig. H5).

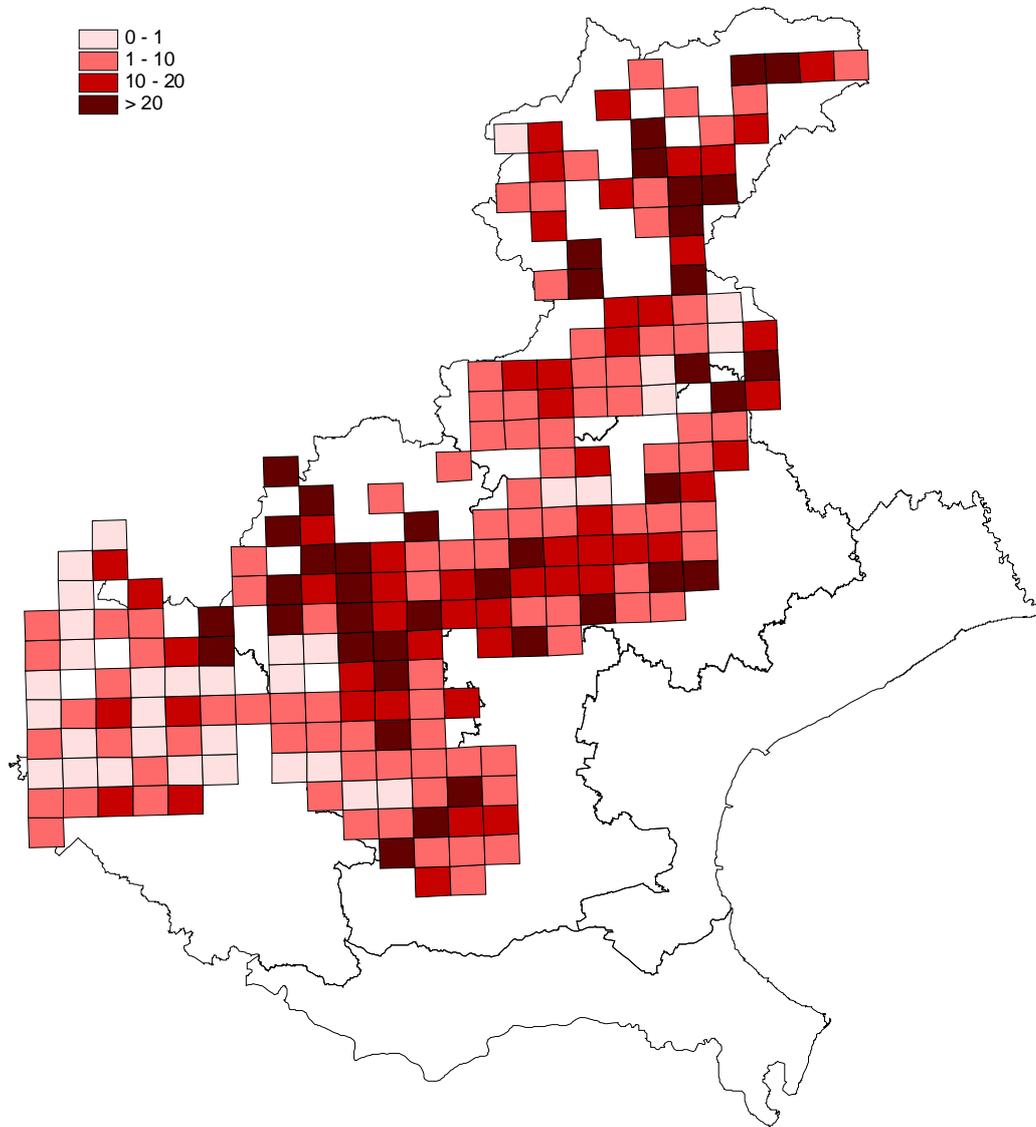


Fig. H1: Frazioni di abitazioni (%) con livelli eccedenti 200 Bq/m³ nelle maglie monitorate (dati normalizzati a piano terra).

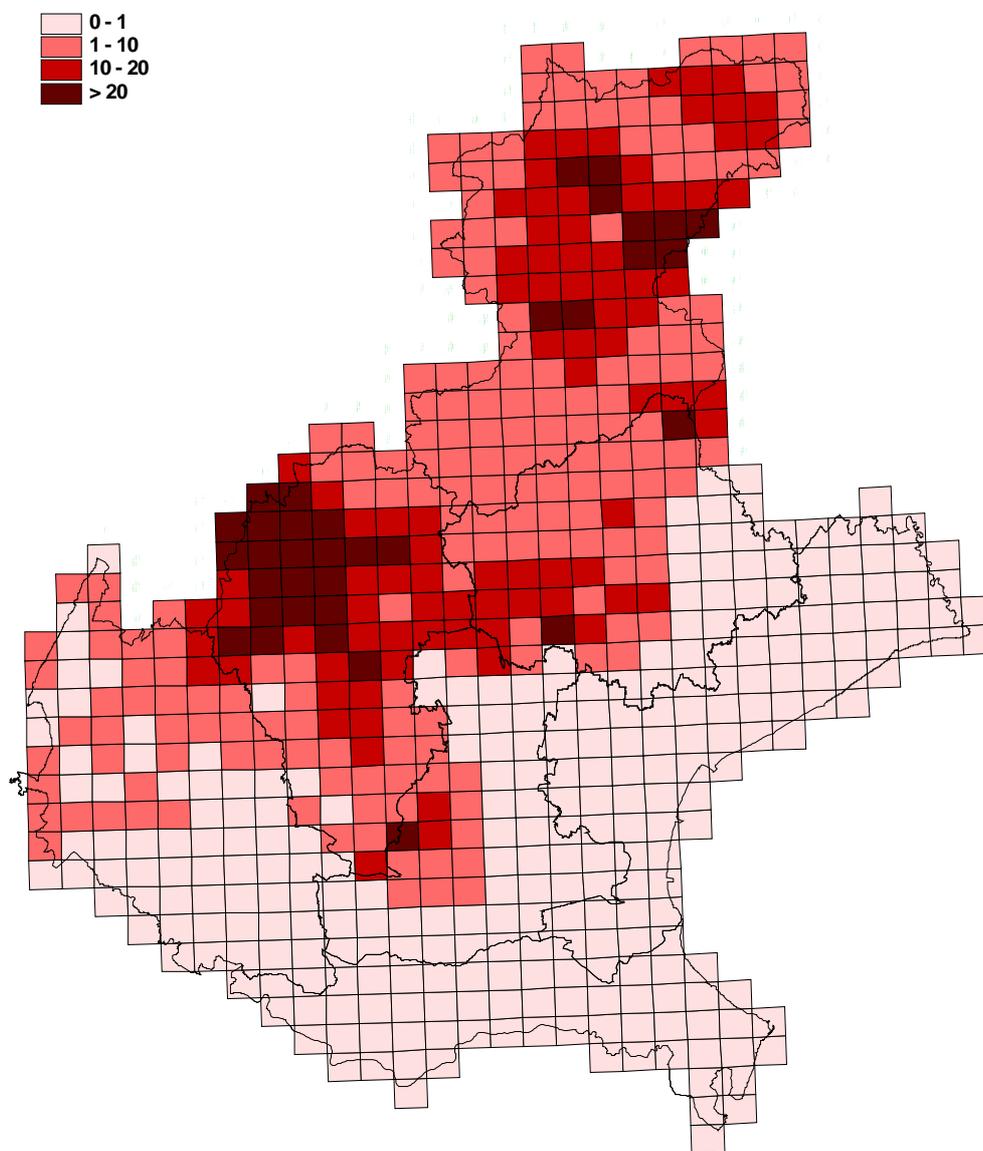


Fig. H2: Frazioni di abitazioni (%) con livelli eccedenti 200 Bq/m³ dopo riempimento e smoothing (dati normalizzati a piano terra).

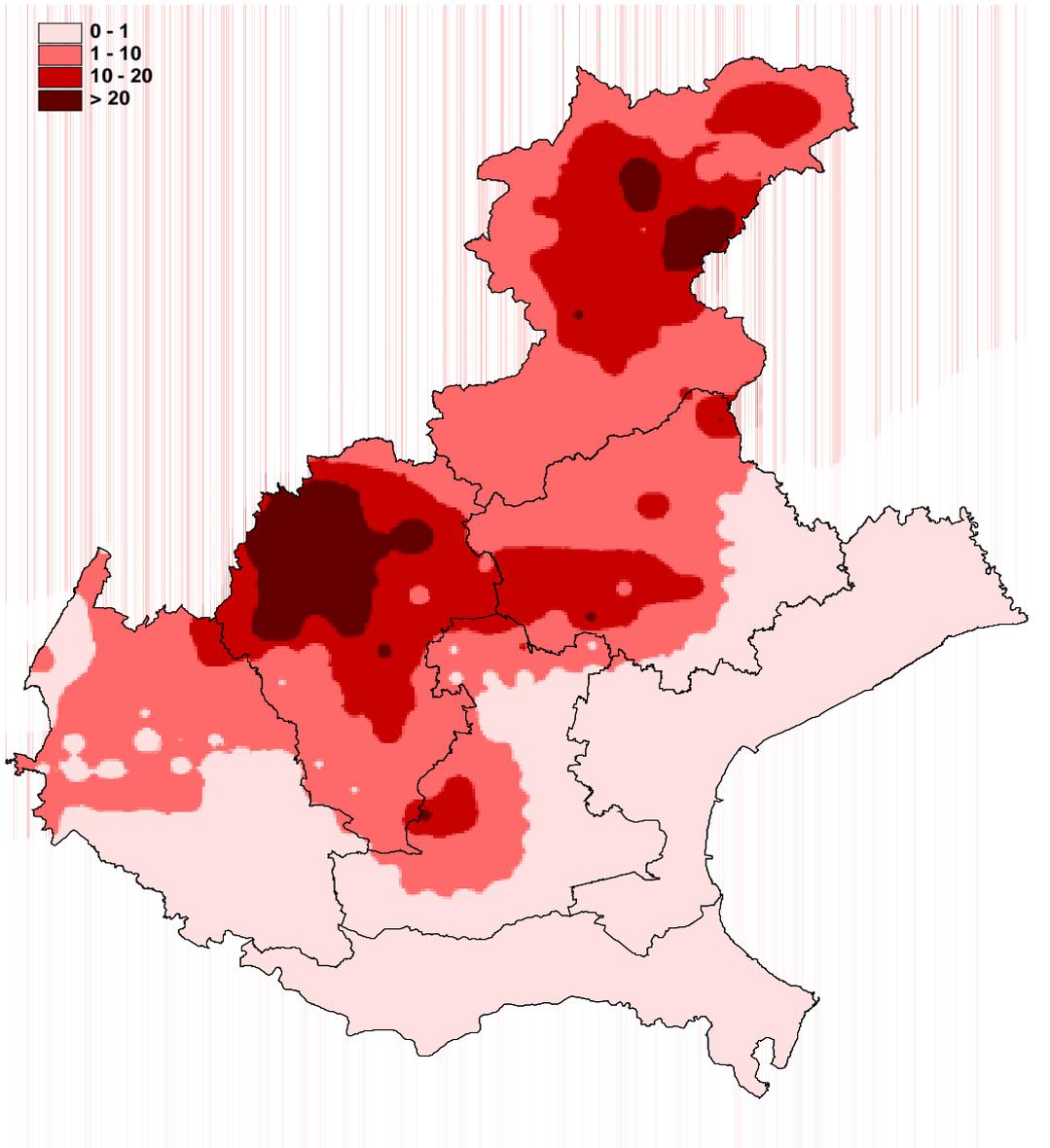


Fig. H3: Frazioni di abitazioni (%) con livelli eccedenti 200 Bq/m³ dopo interpolazione con algoritmo commerciale (IDW) (dati normalizzati a piano terra).

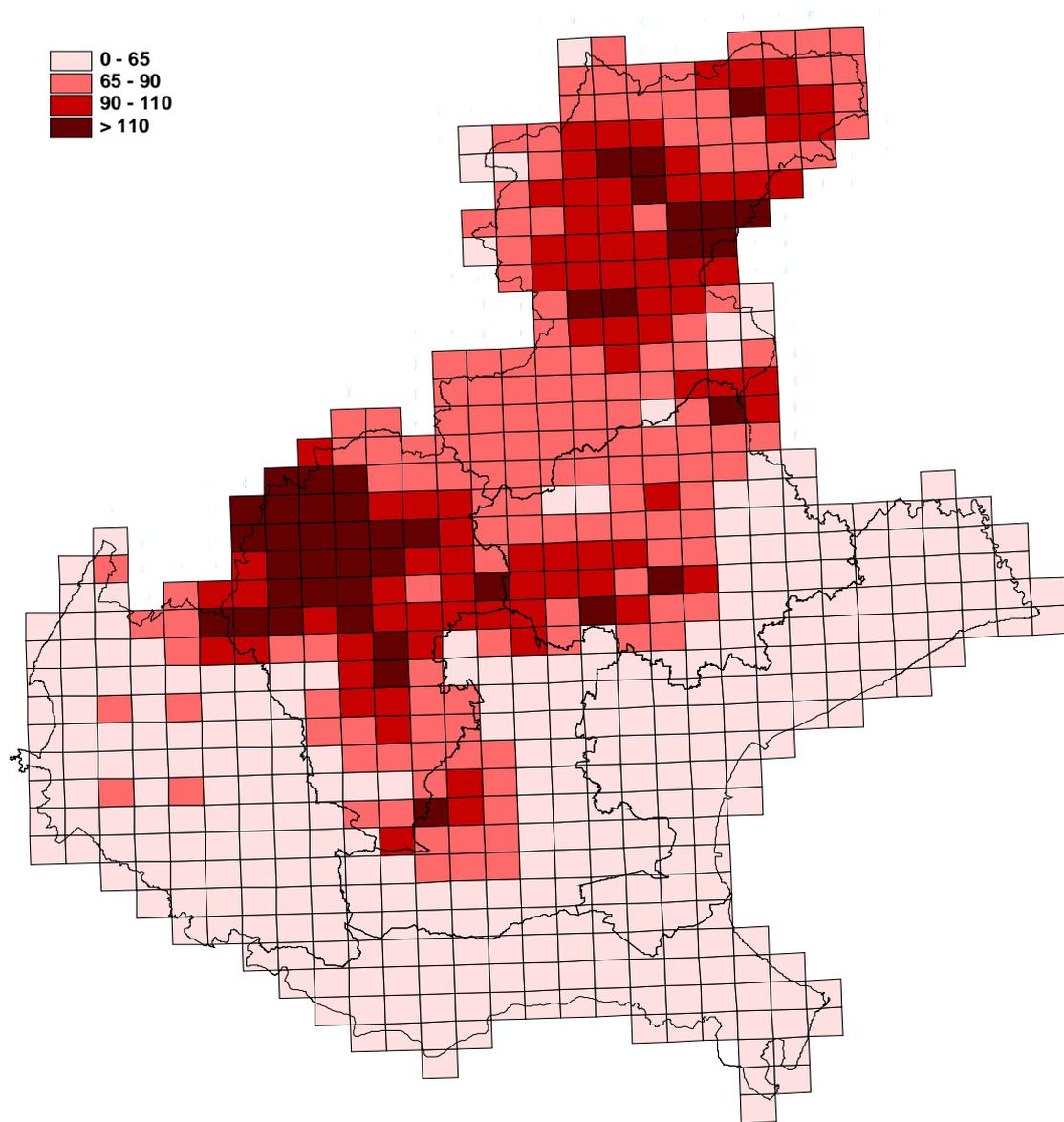


Fig. H4: Medie geometriche dopo riempimento e smoothing (dati normalizzati a piano terra).

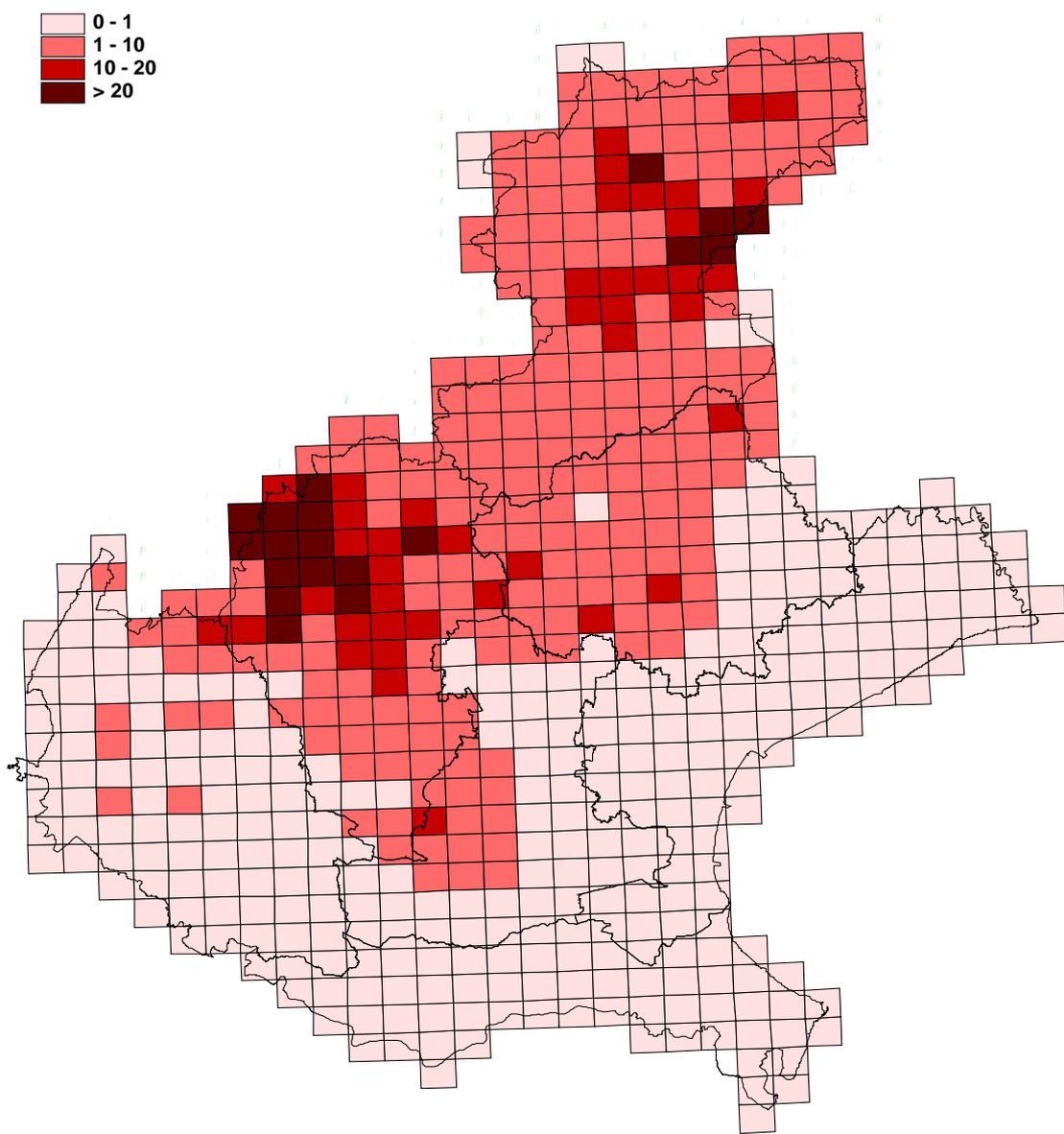


Fig. H5: Frazioni di abitazioni (%) con livelli eccedenti 200 Bq/m³ dopo riempimento e smoothing (dati normalizzati ad housing stock regionale).

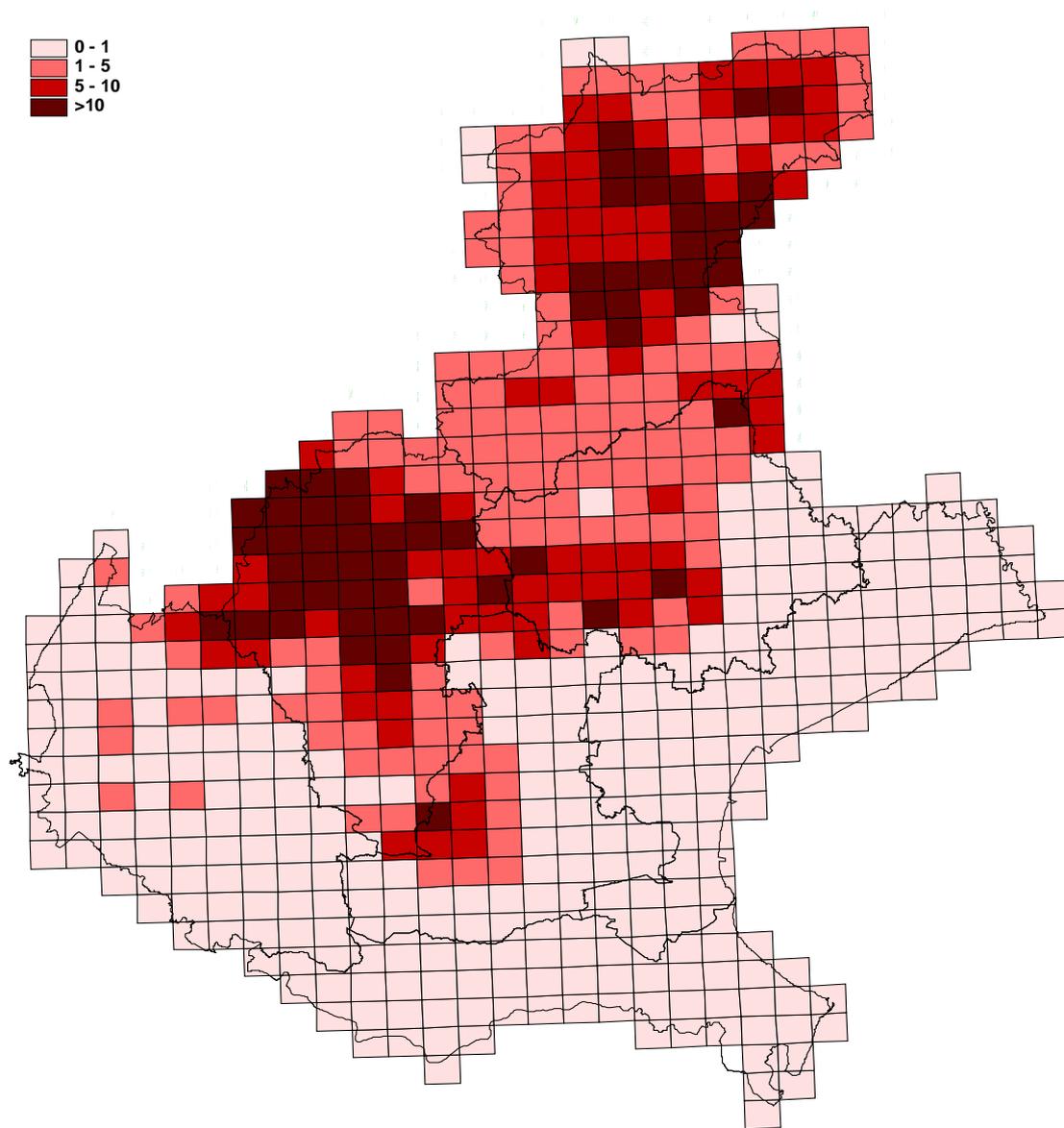


Fig. H5b: Frazioni di abitazioni (%) con livelli eccedenti 200 Bq/m^3 dopo riempimento e smoothing (dati normalizzati ad housing stock regionale).

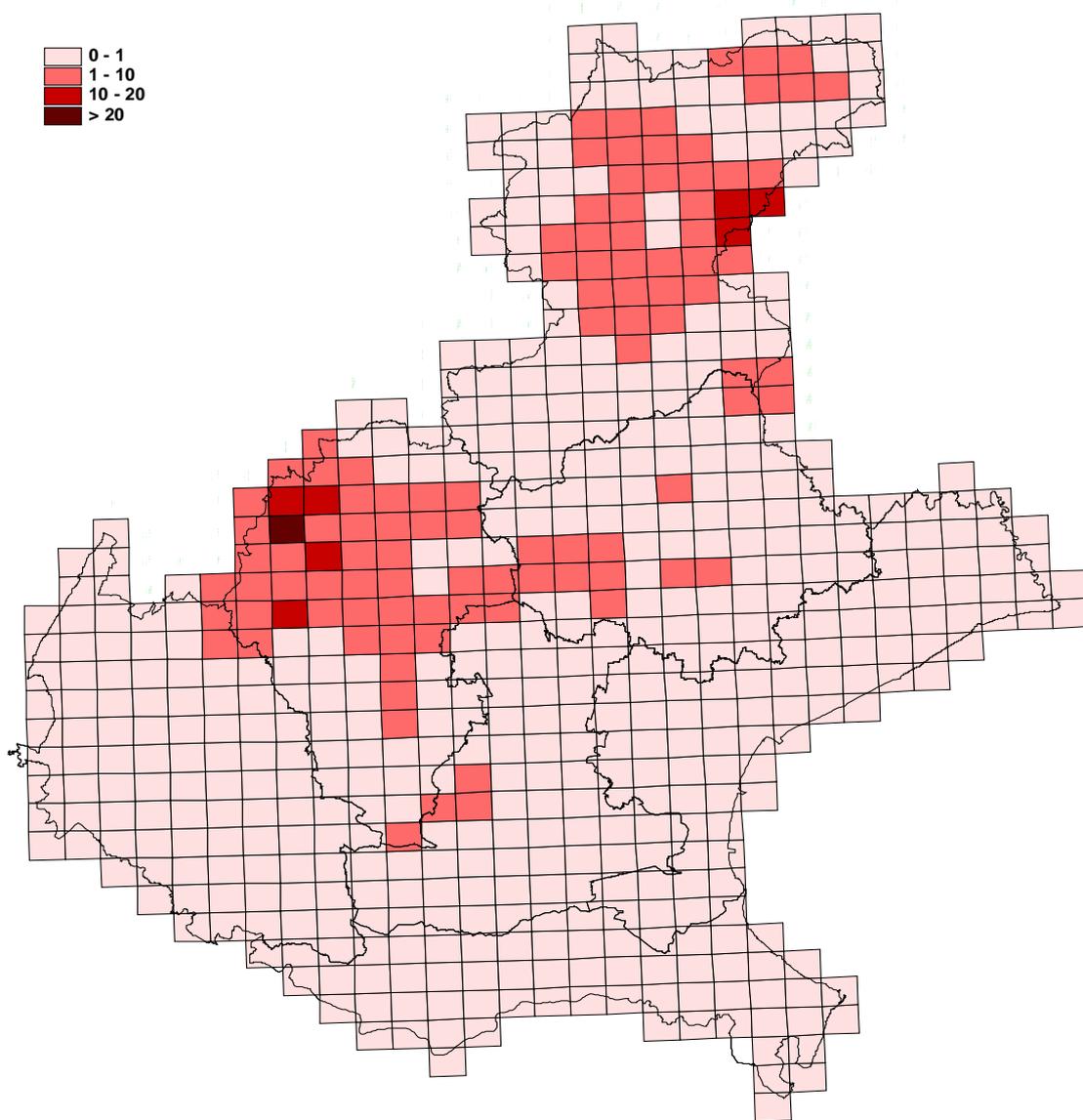


Fig. H6: Frazioni di abitazioni (%) con livelli eccedenti 400 Bq/m³ dopo riempimento e smoothing (dati normalizzati a piano terra).

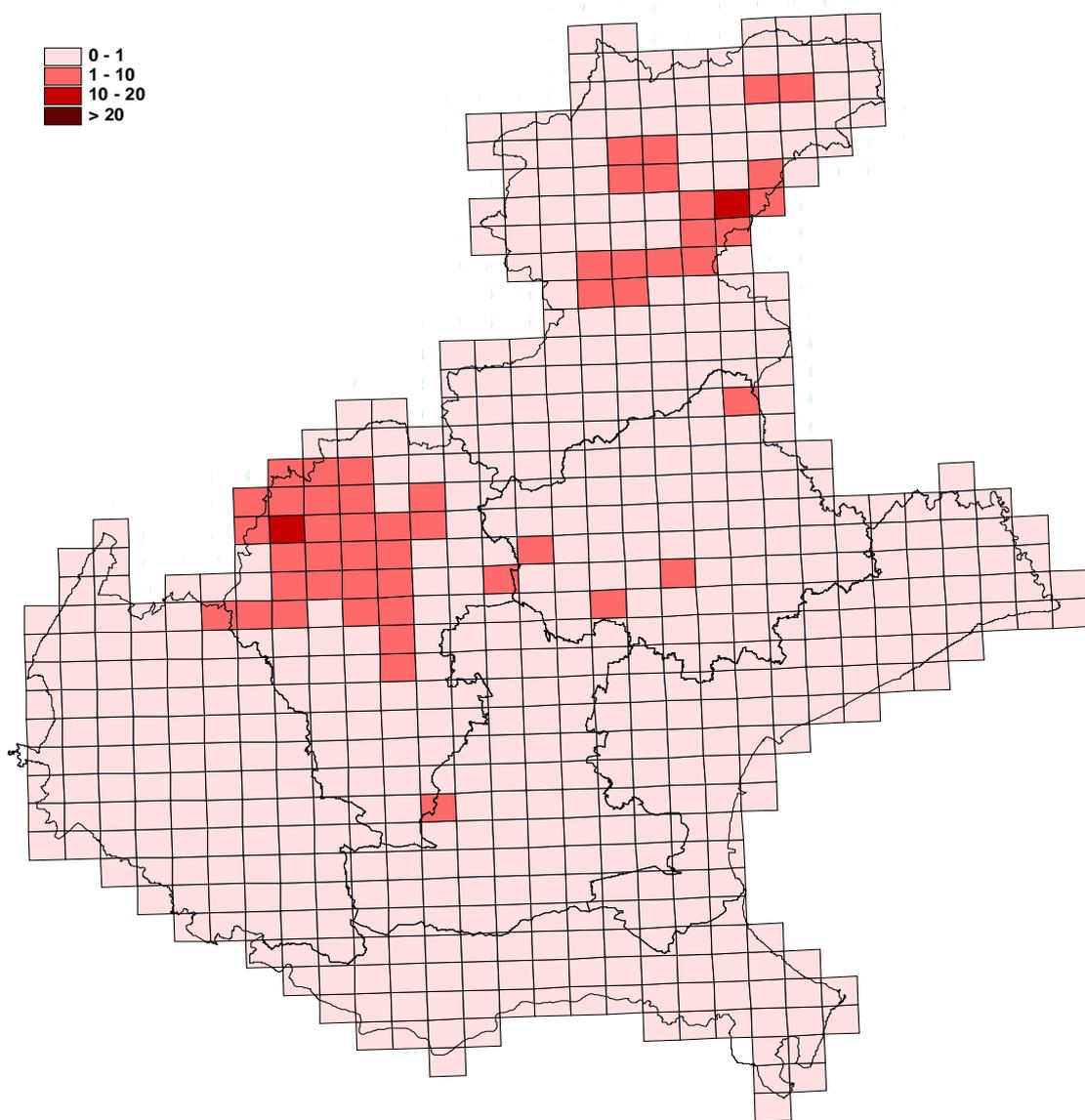


Fig. H7: Frazioni di abitazioni (%) con livelli eccedenti 400 Bq/m³ dopo riempimento e smoothing (dati normalizzati ad housing stock regionale).

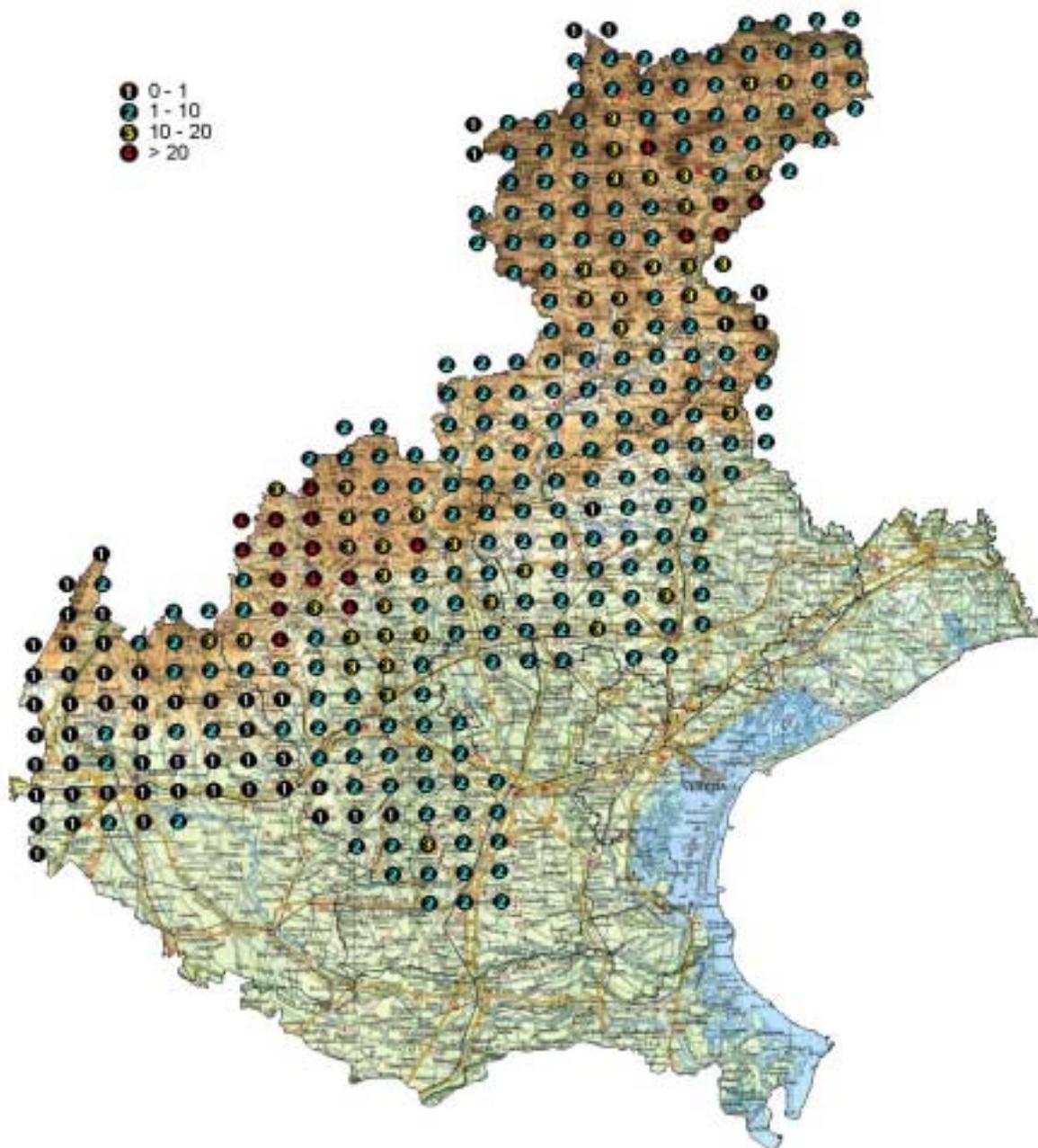


Fig. H8: Frazioni di abitazioni (%) con livelli eccedenti 200 Bq/m³ dopo smoothing e riempimento (dati normalizzati ad housing stock) sovrapposte alla carta geografica del Veneto.

H.3. SEGNALAZIONE DELLE AREE SENSIBILI AL PROBLEMA DEL RADON INDOOR

A partire dalla fig. H8 in cui viene rappresentata la porzione di territorio del Veneto appartenente all'indagine con sovrapposta la mappa delle percentuali di abitazioni che superano il valore di riferimento di 200 Bq/m³ (housing stock) e richiamando come valore di soglia il 10 %, alcune aree si segnalano come a potenziale rischio radon.

Dalla mappa emergono due zone estese situate rispettivamente a nord delle province di Vicenza e di Belluno. La prima comprende l'Alta Val d'Astico, la parte occidentale dell'Altopiano di Asiago, le zone alluvionali sottostanti queste due aree (con profilo meridionale che segue il corso del torrente Astico) e la zona a ridosso dei Lessini orientali. La seconda, nel bellunese, è comprensiva dell'area del Cadore (con particolare evidenza per la valle di Ampezzo, l'alta valle del Piave fino oltre Longarone), della zona nei dintorni di Agordo e nel Comelico.

Alcune maglie isolate si propongono con valori superiori al 10 % in tutta l'area d'indagine: tra di esse, maglie nelle aree di Asolo e del Cansiglio (Treviso) e sui Colli Euganei (Padova). Considerando la mappa della fig. H2 che fornisce l'informazione normalizzata al piano terra anziché all'housing stock, queste maglie trovano inserimento in un contesto più complessivo di zona sensibile, così come è osservabile un ulteriore allargamento delle zone sensibili già evidenziate nelle province di Vicenza e Belluno.

H.4. CONFRONTO CON LA GEOLOGIA

La breve descrizione che segue ha solo valore orientativo e preliminare, allo scopo di cercare alcune corrispondenze possibili tra natura geologica ed elevati valori di concentrazione riscontrati all'interno delle abitazioni. Ci si riserva di approfondire in un secondo momento il confronto, attraverso un'analisi più specifica della connotazione geologica. Il riferimento resta la mappa della fig. H5 con soglia al 10 %.

In provincia di Belluno si evidenzia un collegamento tra alcune aree con elevati livelli di radon (Valle d'Ampezzo, alta valle del Piave, area a sud di Agordo) e la dolomia principale, roccia dolomitica assai fratturata.

La presenza di dolomia principale viene riscontrata nuovamente nell'alto vicentino in corrispondenza delle aree ad elevati livelli di radon nell'Alta Val d'Astico, nella zona a sud di essa e nella Lessinia.

Gli alti valori che si riscontrano in concomitanza delle alluvioni pedemontane della provincia di Vicenza si collocano in un'area ove si registra una densità di faglie assai elevata. In questa provincia era di particolare interesse l'analisi all'area dell'Altopiano dei Sette Comuni. In realtà, le mappe ottenute hanno fornito un dato non conclusivo, in conseguenza del fatto che i valori rappresentati sono dominati da effetti di riempimento e smoothing, non essendo stato ivi il monitoraggio completamente efficace.

L'alta densità di faglie potrebbe ancora essere connessa con i livelli non trascurabili di radon riscontrati nell'area di alluvioni grossolane del trevigiano come evidenziati nella mappa della fig. H2.

Le mappe (principalmente quella della fig. H5) non fanno emergere in modo del tutto limpido i Colli Euganei come area ad alto potenziale di radon; in tale zona, in parte di origine vulcanica, è abbastanza diffusa la riolite (roccia acida vulcanica) il cui significativo contenuto di radionuclidi naturali è abbastanza noto. Probabilmente ciò è conseguenza del "passo" inadeguato dell'indagine (ampiezza delle maglie) rispetto alla risoluzione topografica dell'area.

Non ci sono riscontri evidenti per le formazioni del Cansiglio e del Comelico.

I depositi morenici ed alluvionali, che caratterizzano in prevalenza la fascia pedemontana della provincia di Verona e l'entroterra del lago di Garda, agiscono probabilmente da barriera rispetto ai flussi di radon provenienti dal sottosuolo, determinando i bassi livelli indoor riscontrati.

Deve, comunque, essere sottolineato, come anticipato nell'appendice A, che la geologia in sé non è sufficiente ai fini di accurate predizioni circa i livelli di radon indoor, intervenendo importanti fattori connessi al clima ed alle caratteristiche delle abitazioni (strutturali e d'uso da parte degli occupanti).

H.5. DISTRIBUZIONI DEI VALORI DI RADON IN FUNZIONE DEI PARAMETRI ABITATIVI

Come già sottolineato in appendice C si è provveduto, durante l'indagine, alla predisposizione di schede per la raccolta di informazioni sulle abitazioni monitorate. Oltre alla geologia, infatti, come più volte detto, è necessario tenere conto di altri fattori di interazione tra l'abitazione e l'ambiente. Le informazioni registrate sui questionari compilati per ciascuna abitazione sono state incrociate con i relativi livelli di radon per verificare l'esistenza o meno di associazione dei valori di concentrazione con i singoli parametri (della zona, dell'edificio, dell'abitazione, del locale monitorato).

Nelle figg. H9 e H10 sono riportate rispettivamente la differenza tra i livelli di radon di edifici unifamiliari e plurifamiliari e l'andamento del radon rispetto al piano dell'abitazione monitorato.

I valori più elevati riscontrati per le tipologie unifamiliari e a schiera sono probabilmente imputabili ad abitazioni e locali monitorati più prossimi al terreno, dunque maggiormente soggetti all'afflusso del gas dal sottosuolo.

Parametro determinante rimane la distanza dal suolo del locale monitorato: l'andamento qualitativo in fig. H10 conferma questo aspetto; i rapporti quantitativi non coincidono con quanto presentato nella fig. G1 in relazione alla selezione non secondo criteri statistici puri dell'indagine di cui si tratta, particolarmente per ciò che riguardava il piano del rilevamento.

Sono stati poi osservati i trend relativi ad altri parametri.

La fig. H11, per esempio, mette in evidenza una tendenza dei livelli medi di radon a diminuire quanto più l'anno di costruzione dell'edificio è recente; gli edifici di inizio secolo presentano valori medi di radon ben più alti di quelli eretti successivamente al 1970. È possibile che l'anzianità degli edifici, in questo caso, sia sintomatica di un degrado dell'isolamento dei medesimi dal terreno.

Sembra emergere anche una correlazione con il parametro 'materiale da costruzione' (fig. H12), ma a causa della scarsa articolazione del quesito e della presumibile approssimazione nel rispondere all'intervistatore, è necessario un maggior approfondimento. L'analisi si riferisce comunque a proprietà dei materiali costitutivi del locale monitorato ed alla eventuale incidenza degli stessi sull'immissione nel locale di gas radon.

Non si osservano differenze significative di valori di radon tra locali costruiti in cemento e locali realizzati con laterizi. È interessante il dato relativo alle pareti in pietra: più che un contributo specifico ai livelli di radon, difficilmente giustificabile considerato che, per le abitazioni dell'indagine, la pietra delle pareti era per lo più di origine non ignea (dai contenuti assai modesti di radio), si può ipotizzare che il motivo strutturale della parete in pietra sia rappresentativo di peculiari tipologie abitative (case non recenti, scarsamente isolate dal suolo, di aree montane, eventualmente carsiche, ...) e che dunque il più alto livello di radon sia da attribuire non al materiale ma all'abitazione nel suo complesso.

In fig. H13 sembra documentato l'effetto di diminuzione delle concentrazioni dovuto all'aumento di ventilazione del locale monitorato, attraverso l'indicatore sulla presenza o meno di porte e finestre. In fig. H14 si descrive il comportamento del radon in relazione alla presenza di fonti di combustione nel locale che potrebbero provocare impoverimento di ossigeno nell'ambiente con risucchio d'aria dal sottosuolo.

Gli andamenti rappresentativi in questo paragrafo costituiscono una prima elaborazione sui parametri ambientali – abitativi, che si conta di approfondire in seguito, anche con adeguata trattazione statistica.

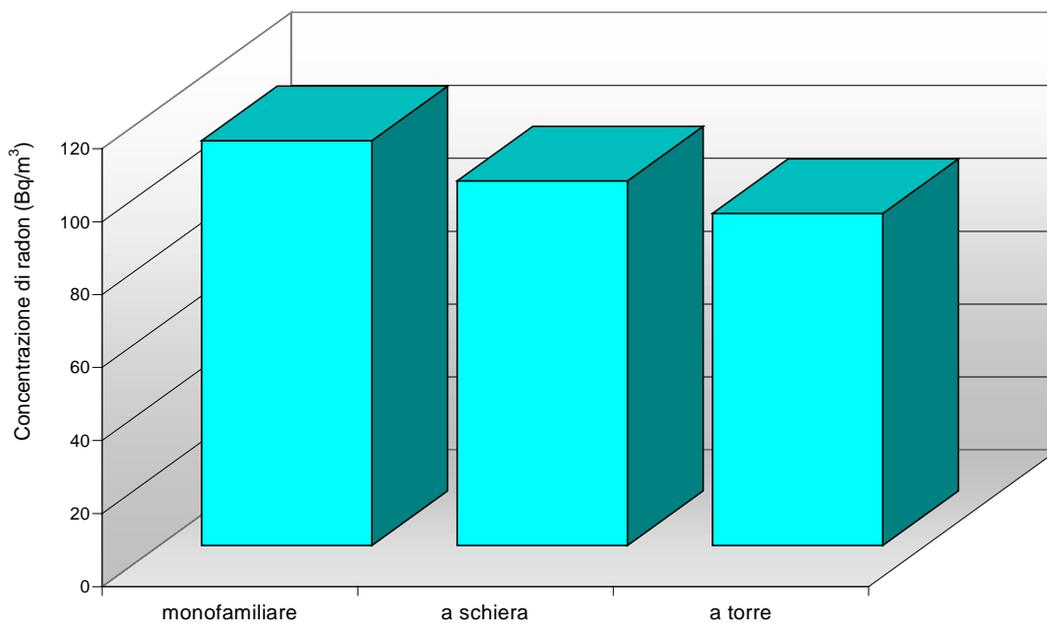


Fig. H9: Concentrazione media di gas radon in funzione della tipologia dell'edificio.

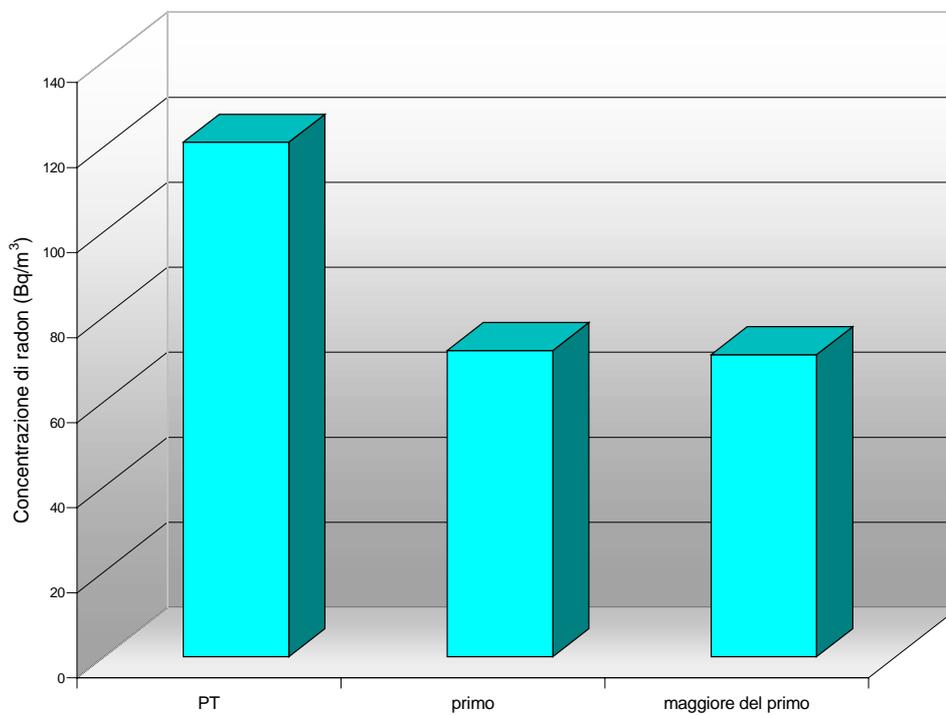


Fig. H10: Concentrazione media di gas radon in funzione del piano dell'abitazione monitorato.

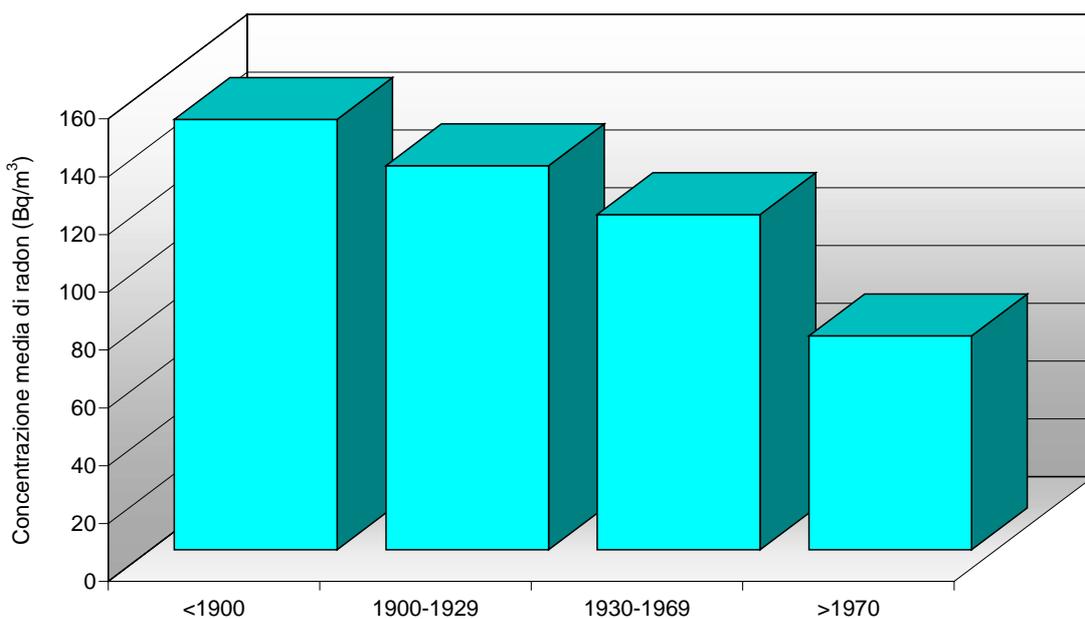


Fig. H11: Concentrazione media di gas radon in funzione dell'anno di costruzione dell'edificio.

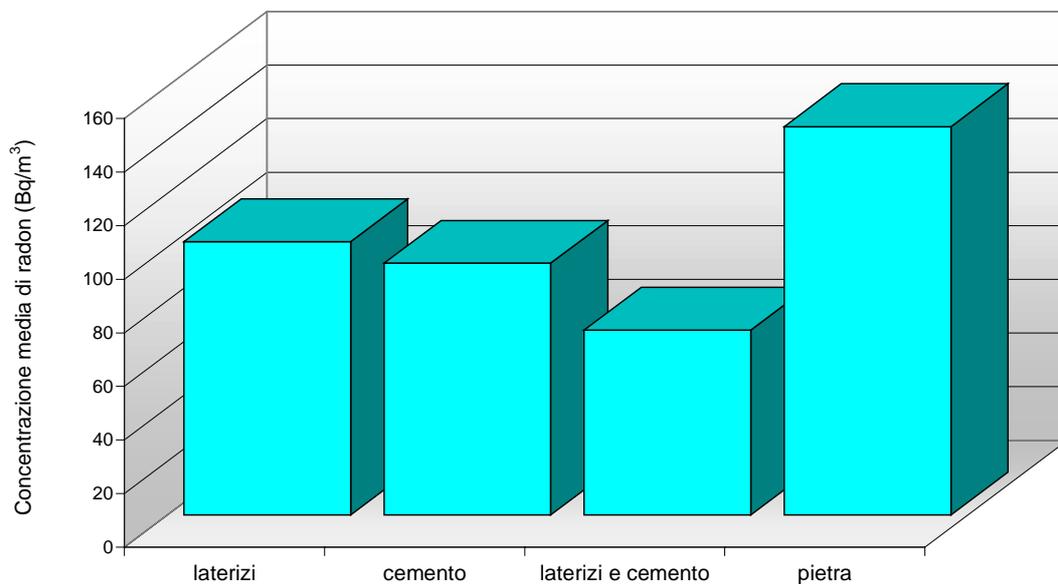


Fig. H12: Concentrazione media di gas radon in funzione del materiale edilizio del locale monitorato.

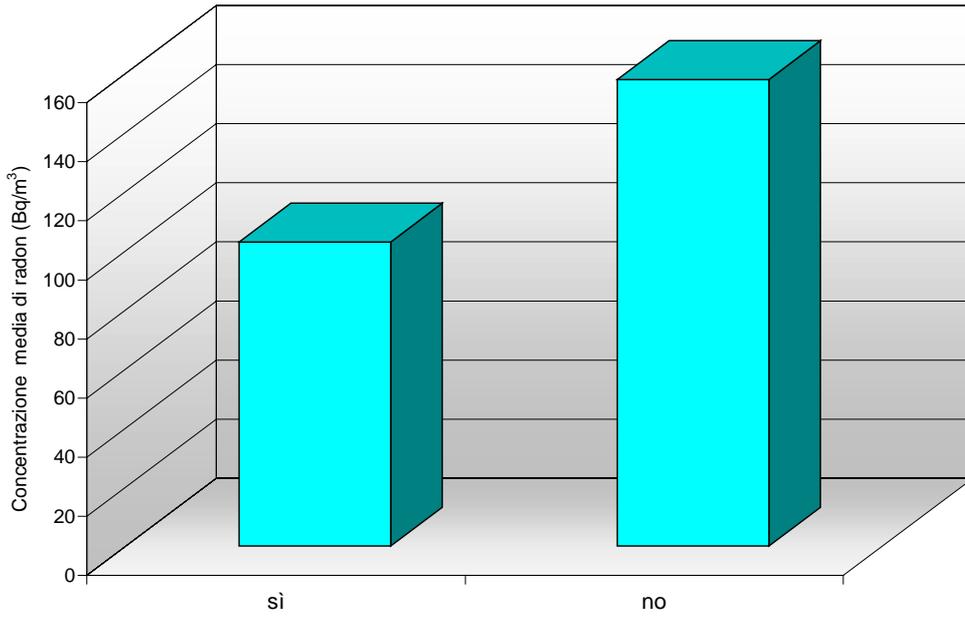


Fig. H13: Concentrazione media di gas radon in funzione della presenza di porte e finestre all'interno del locale monitorato.

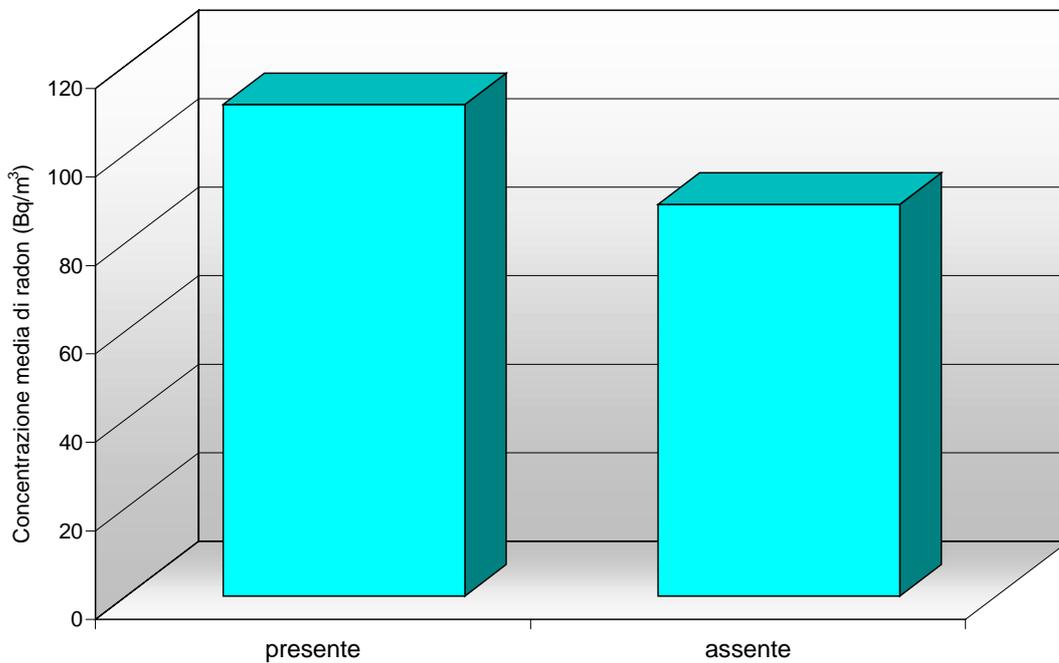


Fig. H14: Concentrazione media di gas radon in funzione della presenza di camini o caldaie.

APPENDICE I

SVILUPPI FUTURI

Come si è detto questo rapporto costituisce la prima elaborazione dei risultati conclusivi dell'indagine. Possono essere esplorati spazi di miglioramento per la rappresentazione dei dati così come sono individuabili linee di sviluppo.

La costruzione della funzione di distribuzione log-normale (appendice G) può essere migliorata (e con essa la stima delle frazioni di superamento dei livelli di riferimento) con sottrazione al dato di misura della concentrazione di radon outdoor. L'interpolazione dei dati di maglia con la tecnica adottata (appendice G) va rifinita per tenere debitamente conto dei livelli rinvenibili sul confine settentrionale della regione; la stessa tecnica potrebbe essere sostituita da strumenti di interpolazione "orientabili" dai dati disponibili (non puramente geometrici).

In questo rapporto vengono fornite mappe con normalizzazioni rispetto alla tipologia abitativa standard in relazione al piano del Veneto (appendice G): per rappresentare più realisticamente l'attuale esposizione indoor, sarà necessario procedere a normalizzazioni basate su caratterizzazioni locali dell'housing stock. A questo proposito, si intende aggregare i dati di misura in base ai confini amministrativi comunali (invece che a partire dal reticolo di maglie) provvedendo alle normalizzazioni sugli housing stock comunali, per valutare se varia l'informazione sulle aree a rischio della regione e per disporre eventualmente di uno strumento più diretto per l'applicazione degli adempimenti connessi all'identificazione delle suddette aree.

A livello di interpretazione dei dati sarà utile approfondire l'inquadramento geologico delle risultanze, particolarmente incrociando i livelli di radon indoor con le predizioni fornite dall'algoritmo di base essenzialmente geologica "PERS" (Potenziale di Esalazione di Radon dal Suolo) realizzato e caratterizzato nel Veneto (una porzione) dall'Università Cattolica di Roma per conto dell'ANPA.

Tra gli sviluppi futuri sono immaginabili investigazioni anche nell'area meridionale della regione (esclusa da questa indagine, per il modesto potenziale desunto dai dati della campagna del 1989), magari selezionando situazioni di potenziale criticità (presenza di faglie, ...).

Infine, si accenna solo a due momenti determinanti che dovranno seguire questa indagine, che travalicano l'ambito strettamente tecnico qui trattato e che troveranno altre sedi di discussione e sviluppo: l'informazione (inclusa quella ai partecipanti a questa indagine) e l'attuazione di strategie di prevenzione.