

Mirco Elena e Aldo Valentini

Radon: una minaccia naturale nelle nostre case

ABSTRACT: The radioactive gas radon represents a major sanitary risk for the population, in particular as a cause of lung cancer (it is the second known cause for importance, after cigarette smoking). Unfortunately its dangers are not well known. In this article the radon problem is described in simple terms, indicating its main characteristics, its risks, the ways in which it can be measured, the possible interventions to reduce its indoor presence, how to build radon-safe houses.

KEY WORDS: Radon, Radioactivity, Ionizing radiation, Lung cancer, Indoor pollution, Health risks, Remedial actions, Measurement of ionizing radiation, Radon-safe houses.

RIASSUNTO: Il gas radioattivo radon costituisce un considerevole fattore di rischio sanitario, essendo la seconda causa di tumore polmonare dopo il fumo di sigaretta. Purtroppo la popolazione italiana è pochissimo informata di questo pericolo, che provoca varie migliaia di decessi annualmente, quasi tutti evitabili con opportune misure di mitigazione. In questo articolo si presentano, con linguaggio divulgativo, le principali caratteristiche del radon, come si misura, come si può ridurre la sua presenza, come si devono costruire gli edifici in modo che non vi penetri questo gas.

PAROLE CHIAVE: Radon, Radioattività, Radiazioni ionizzanti, Cancro ai polmoni, Inquinamento indoor, Rischi sanitari, Azioni di rimedio anti-inquinamento indoor, Misura delle radiazioni ionizzanti, Costruzioni edilizie a prova di radon.

Numerose sono le (reali, ipotetiche o del tutto immaginarie) minacce alla nostra salute che sono salite agli onori delle cronache negli ultimi anni: dall'amianto alle polveri sottili nell'aria, dai residui chimici su frutta e verdura agli scarichi automobilistici, dalle onde elettromagnetiche ai vaccini, alle scie chimiche. L'elenco è lungo, ma stranamente non include un fattore di rischio

Mirco Elena, fisico, ricercatore.

Aldo Valentini, fisico medico, esperto qualificato, già direttore del Servizio di Fisica Sanitaria all'APSS di Trento.

scientificamente acclarato e di grande rilevanza, che in Italia è particolarmente rilevante: il gas nobile radon (con simbolo chimico Rn); nient'altro che una curiosità scientifica, se non fosse che è radioattivo e costituisce la principale fonte di irradiazione ionizzante per la popolazione del nostro paese e – probabilmente – del mondo intero!

La società civile ed i media italiani non si sono mai “accorti” della sua presenza ed importanza, nonostante i ripetuti avvisi e raccomandazioni da parte degli enti ed istituti preposti da una parte alla tutela della salute (ultima in ordine di tempo l'Organizzazione mondiale per la Sanità¹) e dall'altra alle attività che implicano l'uso di sostanze radioattive.² Nemmeno il grande pubblico si è mai accorto della minaccia radon e di conseguenza a tutt'oggi alcune migliaia di italiani muoiono *annualmente* a seguito dell'inalazione di questo gas radioattivo, la cui presenza, nella maggior parte dei casi, potrebbe – con poco sforzo e a costi moderati – venir fortemente ridotta, se non addirittura quasi totalmente eliminata.

Iniziamo la nostra trattazione con una breve e semplice introduzione alla fisica dei materiali radioattivi e delle radiazioni ionizzanti da essi emesse.

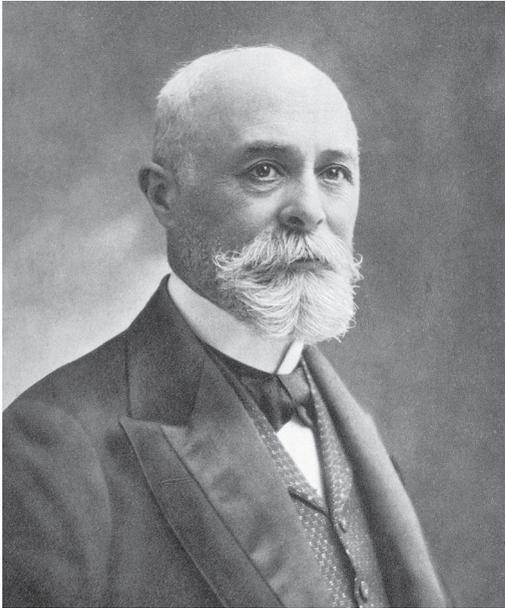
Materiali radioattivi

L'idea che tutta la materia attorno a noi sia composta da un numero limitato di “mattoni fondamentali” è molto antica e risale ai greci, che li avevano chiamati atomi, cioè “non divisibili”, proprio per sottolineare la loro natura essenziale, al fondo di tutte le cose. Solo negli ultimi 150 anni, o giù di lì, abbiamo potuto dimostrare scientificamente che la loro intuizione era giusta, comprendendo però che in realtà anche gli atomi non sono proprio entità ultime, indivisibili, ma sono formati da varie componenti e che al loro interno si nascondono le energie inimmaginabilmente grandi che danno origine alla radioattività. Solo a partire dall'inizio del XX secolo i fisici sono riusciti a comprendere la struttura dettagliata degli atomi, proprio usando come sonde d'indagine le radiazioni emesse da certi materiali radioattivi (fenomeno questo scoperto nel 1896 dal fisico francese Antoine Henri Becquerel³).

¹ Organizzazione Mondiale per la Sanità; “WHO report on cancer: setting priorities, investing wisely and providing care for all”. 149 pagg., ISBN 9789240001305, (2020). Disponibile a: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/330745>.

² Come la International Commission for Radiological Protection (ICRP) e la International Atomic Energy Agency (IAEA).

³ Per onorare Becquerel l'unità di misura dell'attività radioattiva ha preso il suo nome (in sigla Bq).



1. Antoine Henri Becquerel.

Oggi sappiamo che nella nostra zona d'universo, alla periferia della Via Lattea, si trovano in natura 92 elementi atomici, dal più leggero (idrogeno) al più pesante (uranio).⁴ Oggi sappiamo anche che ogni elemento è formato da un denso *nucleo* carico positivamente, circondato a grande distanza da *elettroni* carichi negativamente,⁵ così da rendere l'atomo elettricamente neutro. I 92 elementi sono caratterizzati univocamente dal numero di particelle cariche positive (protoni) presenti nel nucleo. Al cambiare del numero di protoni mutano drasticamente le caratteristiche dell'atomo, cui si dà quindi un nome diverso. Ad esempio: un protone: idrogeno; 20 protoni: calcio; 26 protoni: ferro; 92 protoni: uranio.

Se un certo materiale presenta un'attività di 1 Bq, vuol dire che ogni secondo c'è un decadimento. Nel caso del radon si parla in genere di becquerel per metro cubo di aria (Bq/mc).

⁴ In altre posizioni, prossime all'esplosione di supernovae e ad altri fenomeni che producono nuclei radioattivi di grande massa ("transuranici"), si potrebbero trovare elementi che sulla Terra sono già da lungo tempo scomparsi, a seguito del loro decadimento radioattivo.

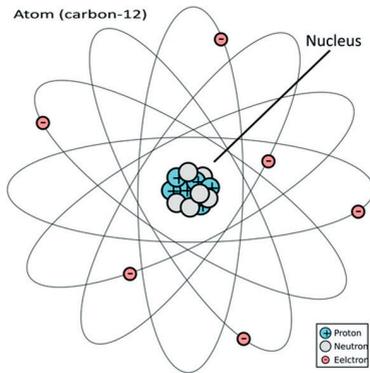
⁵ Per dare l'idea di questa distanza, si pensi che se il nucleo avesse dimensione di un centimetro, gli elettroni si troverebbero a circa un chilometro di distanza. L'atomo è quindi quasi "vuoto", con la massa concentrata praticamente tutta nel minuscolo nucleo, dove in alcuni casi sono racchiuse energie enormi che la scienza e la tecnologia hanno imparato a sfruttare, ad esempio nei reattori e nelle bombe nucleari.

1																		18					
IA																		VIII A					
1																	2						
H																	He						
idrogeno																	elio						
3	4															5	6	7	8	9	10		
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne		
litio	berillio															boro	carbonio	azoto	ossigeno	fluoro	neon		
11	12	13	14	15	16	17	18															19	20
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar															K	Ca
sodio	magnesio	alluminio	silicio	fosforo	zolfo	cloro	argon															potassio	calcio
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36						
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
potassio	calcio	scandio	titanio	vanadio	cromo	manganese	ferro	cobalto	nichel	rame	zinc	gallio	germanio	arsenico	selenio	bromo	kriptone						
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54						
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
rubidio	stronzio	ittrio	zirconio	niobio	molibdeno	tecnecio	rutenio	rodio	palladio	argento	cadmio	indio	stagno	antimonio	tellurio	iodio							
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86						
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
cesio	bario		afnio	tantalio	tungsteno	renio	osmio	iridio	platino	oro	mercurio	tallio	piombo	bismuto	polonio	astato	radon						
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118						
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo						
francio	radio		rutherfordio	dubnio	seaborgio	bohrio	hassio	meitnerio	damastasio	roentgenio	copernicio	ununtrio	flerovio	ununpentio	livermorio	ununseptio	ununoctio						
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71									
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu									
lantanio	cerio	praseodimio	neodimio	promezio	samario	europio	gadolinio	terbio	disprosio	olmio	erbio	tulio	itterbio	lutetio									
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103									
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr									
attinio	torio	protattinio	uranio	nettonio	plutonio	americio	curio	berkelio	californio	einsteinio	fermio	mendelevio	nobelio	laurenzio									

2. Tabella periodica degli elementi (o di Mendeleev). Cerchiati in rosso gli elementi radon, uranio (potremmo definirlo un “antenato” del radon) e il radio (discendente dell’uranio e “genitore diretto” del radon).

In quanto detto c’è però un problema. Come è possibile che la repulsione elettrostatica dovuta ai diversi protoni positivi presenti nei nuclei non porti all’immediata disintegrazione di questi agglomerati? È infatti ben noto come cariche dello stesso segno si respingano. Il mistero è stato risolto quando si è capito che nei nuclei esiste una specie di “colla nucleare”, formata da particelle senza carica elettrica (i *neutroni*); quanti più protoni ci sono, tanta più “colla” ci deve essere per stabilizzare il nucleo; quindi se per l’ossigeno, che ha solo 8 protoni, bastano altrettanti neutroni, per l’uranio, che di cariche positive ne ha 92, ci vogliono quasi 150 neutroni.

Per completare il quadro, aggiungiamo che ogni elemento presenta delle sottovarietà chiamate *isotopi*, che si differenziano per il numero di neutroni. Ad esempio il carbonio (che nella sua forma più comune ha un nucleo costituito da 6 protoni e 6 neutroni) presenta anche isotopi con 7 e con 8 neutroni. Quest’ultimo è il famoso “carbonio 14”, usato per la datazione dei reperti archeologici. Il numero 14 deriva dalla somma dei 6 protoni e degli 8 neutroni. Si tratta di un nucleo instabile, ovvero possiede un sovrappiù di



3. Struttura schematica dell'atomo di carbonio 12. (Nucleus = nucleo; proton = protone; neutron = neutrone, electron = elettrone)

energia, di cui si libera emettendo un elettrone molto veloce (“*raggio beta*”), trasformandosi così spontaneamente in un altro nucleo. Siamo qui in presenza di un fenomeno radioattivo del tutto naturale e sul quale non possiamo intervenire in nessuna maniera per modificarlo. Riassumendo, la radioattività è null'altro che un fenomeno di instabilità in un nucleo atomico, che cerca un nuovo equilibrio emettendo energia, sotto forma di *radiazioni* (“raggi”); a questo fenomeno si dà il nome di *decadimento radioattivo*.



4. Isotopi del carbonio.

Carbonio 12	Carbonio 13	Carbonio 14
6 protoni	6 protoni	6 protoni
6 neutroni	7 neutroni	8 neutroni
6 elettroni	6 elettroni	6 elettroni

Radiazioni ionizzanti

Oltre alle radiazioni beta ve ne sono altre: di tipo corpuscolare, come nel caso dei “*raggi alfa*” o degli stessi neutroni (i primi sono nient'altro che nuclei di elio, quindi con due protoni e due neutroni), oppure sotto forma di onde

elettromagnetiche, come nel caso dei “raggi gamma” (un tipo di “luce” ancor più energetica e penetrante dei raggi X).

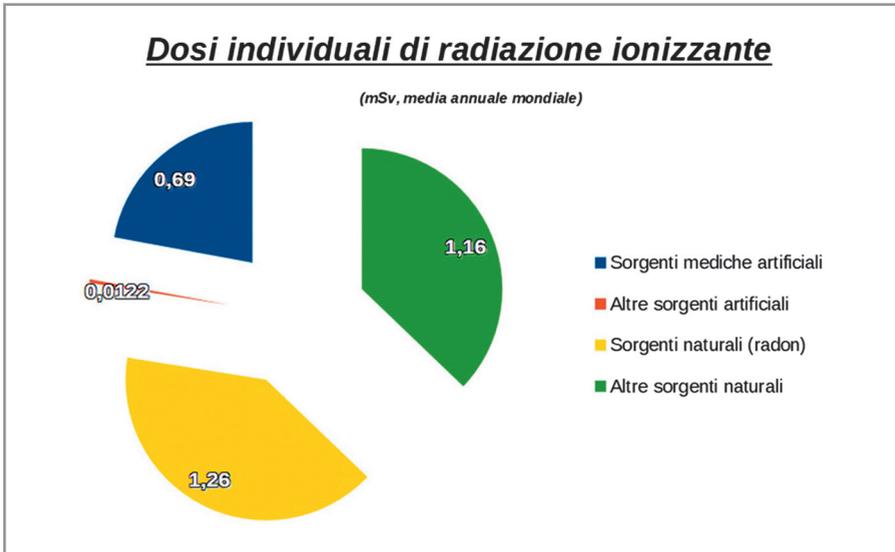
Tabella 1. Tipi di radiazioni ionizzanti.

Radiazione	Penetrazione in aria	Penetrazione nei tessuti biologici	Pericolosa nel caso la radiazione provenga da:
Alfa	pochi centimetri	alcune decine di micron	Interno del corpo
Beta	pochi metri	pochi mm	Esterno e interno del corpo
Gamma	molti metri	molti cm	Principalmente dall'esterno
Raggi X	molti metri	molti cm	Principalmente dall'esterno
Neutroni	molti metri	molti cm	Principalmente dall'esterno

Le radiazioni di cui parliamo si definiscono “ionizzanti” in quanto dotate di energia sufficiente a interagire fortemente con gli elettroni che circondano i nuclei di atomi e molecole, creando “ioni”, cioè entità elettricamente cariche. Dato che i fenomeni chimici dipendono dalla configurazione degli elettroni, possiamo capire come una radiazione ionizzante che colpisca un corpo vivente possa provocare danni, cambiando i legami che tengono assieme atomi e molecole, con la conseguente morte delle cellule o – peggio – la loro trasformazione in tumori. Ecco perché l'esposizione alle radiazioni ionizzanti di origine *artificiale* è oggetto da quasi un secolo di severe norme di legge. Solo in anni recenti si sono invece stabiliti limiti per la quantità di radiazioni ionizzanti di origine *naturale* cui si possono sottoporre i lavoratori e ci sono indicazioni anche per i cittadini comuni.

Tra le fonti di radiazioni naturali le principali sono le seguenti: 1) i raggi cosmici provenienti dal Sole e dal resto dell'universo, che come una specie di invisibile (ma misurabile) pioggia colpiscono il nostro pianeta. La quantità è determinata dal livello di attività solare, dalla quota a cui ci si trova e dalla posizione relativamente ai poli magnetici terrestri. 2) i cibi che mangiamo. Le piante, che sono alla base di tutta la catena alimentare, assorbono infatti dall'aria il carbonio 14 e dal suolo il potassio 40, entrambi radioattivi. Noi, nutrendocene, ingeriamo inevitabilmente anche questi isotopi.⁶ 3) i materiali

⁶ Il carbonio 14 è presente nella CO₂ atmosferica, venendo prodotto nell'alta atmosfera dall'impatto dei neutroni dei raggi cosmici sui nuclei di azoto. Legandosi all'ossigeno dell'aria forma CO₂ radioattiva che viene assorbita dalle piante nella fotosintesi clorofilliana. Il potassio 40 (K⁴⁰) è invece un isotopo a lunga vita (1,3 miliardi di anni) presente nelle rocce e nei terreni.



5. Dose individuale di radiazioni ionizzanti ricevuta annualmente dai cittadini dalle diverse fonti (media mondiale).

(adattato da: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/gdwq4-with-add1-chap9.pdf?)

costituenti la crosta terrestre, che contiene in particolare uranio, torio e radio. 4) vi è infine il contributo, in genere dominante dal punto di vista sanitario, dovuto al gas radon presente nell'aria.

UNITÀ DI MISURA DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

Pochi campi della fisica presentano un assortimento così complicato di unità di misura come quello delle radiazioni ionizzanti. Oltre alla complessità intrinseca della materia, a peggiorare le cose vi sono stati cambiamenti di denominazione decisi dalle organizzazioni scientifiche internazionali, ma adottati, nella pratica corrente, con tempistiche sfasate in Europa e negli Stati Uniti, col risultato di trovare, in articoli e libri, unità differenti per lo stesso concetto (e ovviamente con valori numerici molto diversi fra loro per descrivere la stessa quantità); quindi curie al posto dei becquerel, rem invece dei sievert, rad anziché gray, in un guazzabuglio che facilmente scoraggia chi si avvicina per la prima volta a questo settore. Limitiamoci pertanto ad illustrare qui solo le nuove unità di misura (Sistema Internazionale).

Quando una sostanza radioattiva presenta un decadimento una volta ogni secondo si dice che la sua attività radioattiva è di un becquerel (in sigla Bq). Si dovrà di solito specificare se quel becquerel è per chilo di materia, per metro cubo di volume o altro. La radiazione emessa verrà a colpire ciò che c'è intorno, cedendole la propria energia con modalità che dipendono dal tipo di radiazione e dal tipo di assorbitore. Ciò costituisce la "dose assorbita", che si misura in gray (simbolo Gy). Un gray equivale all'assorbimento di un joule di energia in un chilogrammo di materia bombardata.

Dato che, a parità di dose assorbita, il danno biologico risultante dipende dal tipo di radiazione ionizzante coinvolto, per valutarlo si usa una unità diversa, detta sievert (in sigla Sv). Il valore in sievert si ottiene semplicemente moltiplicando il numero di gray assorbiti per un fattore di pericolosità, che vale 1 per raggi X, gamma e beta, mentre vale 20 per i raggi alfa (trascuriamo qui i neutroni, con cui la popolazione civile raramente ha a che fare). Questo risultato esprime la cosiddetta "dose equivalente". Ma non ci si ferma qui!

Per tenere conto dell'effetto dannoso delle differenti radiazioni sui vari organi/tessuti del corpo, ciascuno dei quali ha una sua particolare sensibilità, si moltiplica il valore della dose equivalente per un opportuno fattore di sensibilità, ottenendo la cosiddetta "dose efficace", che è un indicatore del rischio di induzione di un tumore, ed è pure la grandezza presa in considerazione dalle leggi destinate a proteggere cittadini e lavoratori esposti alle radiazioni ionizzanti. Anche la dose efficace si esprime in sievert.

Ma quanto è grande un sievert? È rischioso assorbire una tale dose di radiazioni ionizzanti? Si aprirebbe qui un capitolo molto complesso, per cui non vi entreremo, limitandoci a dire che ancor oggi la maggior parte dei dati su cui ci si basa per valutare il rischio per gli esseri umani dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti deriva dallo studio delle conseguenze dei bombarda-

Tabella 2. Fattori di pericolosità per i diversi tipi di radiazione ionizzante.

Radiazione	Trasferimento energetico al bersaglio	Fattore di pericolosità
Particelle alfa	Elevato	20
Neutroni	Elevato	5-20
Particelle beta (elettroni)	Basso	1
Raggi X e gamma	Basso	1

Tabella 3. Dosi ai cittadini da fonti naturali e artificiali di radiazioni ionizzanti.

Causa o pratica medica	Dose efficace
Fondo naturale medio di radiazione	2,4 mSv/anno
Massima dose di fondo naturale	131 mSv/anno
Radiografia convenzionale	<1 mSv
Tomografia computerizzata	2-15 mSv
Tomografia a emissione di positroni	5-20 mSv
Scintigrafia	2-10 mSv

Tabella 4. Effetto biologico di irradiazione, in particolare acuta, a tutto il corpo.

Esposizione	Effetto
50 mSv	Nessun danno visibile né alcun sintomo.
1 Sv	Può provocare nausea e vomito per un paio di giorni e un calo di breve durata nella produzione di globuli bianchi nel sangue (leucopenia).
3,5 Sv	Inizialmente nausea e vomito, seguiti da un apparente miglioramento. Ma dopo 3 o 4 settimane può presentarsi un deficit di globuli bianchi e di piastrine nel sangue. Necessità di cure mediche.
Livelli ancora più elevati	L'esposizione tende ad essere fatale. Necessità di cure mediche (ad es.: trapianto di midollo osseo).

menti atomici di Hiroshima e Nagasaki. Ci basti qui dire che la dose efficace annuale media mondiale da fonti naturalmente presenti nell'ambiente che ci circonda è di circa 2,4 millesimi di sievert (2,4 mSv/anno), sebbene in alcune zone con suoli particolarmente ricchi di uranio e altre sostanze radioattive si arrivi a valori dieci volte maggiori, senza che questo produca evidenti conseguenze sanitarie alle popolazioni residenti.⁷ Questo valore di dose va

⁷ Gli studi sugli effetti delle radiazioni ionizzanti hanno permesso di stabilire che esiste una relazione lineare tra dose efficace e rischio di sviluppare tumori. Il coefficiente è di circa 0,05 cancro/Sv (secondo l'ICRP del 2008). Quindi per un'esposizione di 1 mSv (0,001 Sv) il rischio corrisponde a $0,001 \times 0,05 = 0,00005$ cioè circa cinque tumori ogni centomila persone irradiate. Comprensibile quindi che l'accresciuto rischio non sia facilmente evidenziabile nei dati epidemio-

comparato con quello relativo a vari trattamenti medici impieganti radiazioni ionizzanti; si veda la tabella 3.

L'irradiazione ad alte (altissime) dosi può portare alla morte quando la persona assorbe più di qualche gray di radiazione al corpo intero somministrata in breve tempo (irradiazione acuta). In questo caso la morte sopraggiunge per problemi ematopoietici, gastro-intestinali, respiratori e cerebrovascolari.

In radioterapia si somministrano alte dosi (1500-2000 mGy a seduta ovvero 30-70 Gy a trattamento) però a volumi limitati ed ovviamente ottimizzando il trattamento tenendo conto della sensibilità degli organi/tessuti sani coinvolti.

La maggior parte della popolazione è esposta mediamente al corpo intero a dosi dell'ordine dei millisievert che non portano ad effetti deterministici ma ad effetti stocastici, ovvero contribuiscono alla probabilità di induzione tumore e/o di danni genetici.

Breve storia del radon

L'elemento chimico radon fu scoperto dal chimico tedesco Frederick Ernst Dorn nel 1900.⁸ Inizialmente venne considerato interessante come possibile sostituto a basso costo del radio per applicazioni mediche, poi venne trascurato come sostanza senza applicazioni importanti. Si dovette attendere gli anni '80 del XX secolo perché un fatto imprevisto accendesse i riflettori sulla possibile pericolosità di questo gas per la salute pubblica.

Negli Stati Uniti si stava costruendo un reattore nucleare in Pennsylvania, quando uno degli addetti, certo Stanley Watras, fece scattare l'allarme su un rivelatore di radiazioni nel momento in cui *entrava* nell'impianto. Era una cosa strana, in quanto nessun materiale radioattivo era ancora stato caricato nel reattore. Indagando il caso si capì che il lavoratore aveva i vestiti talmente impregnati di radon da rappresentare una sorgente radioattiva mobile. E quel radon veniva da casa sua, posta su una struttura geologica che lo convogliava dal profondo del terreno. Studi su un campione di abitazioni effettuati dall'Agenzia Ambientale statunitense (EPA) permisero di capire che il radon

logici. Considerando poi che una dose bassa distribuita nel tempo (come è in genere per il radon) potrebbe risultare un po' meno pericolosa di una dose temporalmente più concentrata, si ritiene in genere di ridurre in tal caso del 50% la stima del rischio.

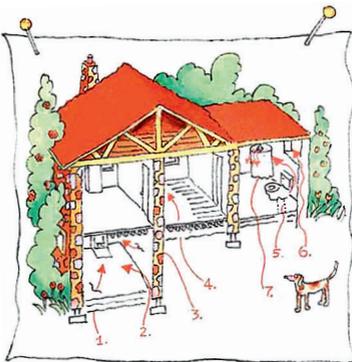
⁸ Sebbene altre fonti indichino la primogenitura di Rutherford e Soddy nell'identificarlo, ancora nel 1899 (http://acshist.scs.illinois.edu/bulletin_open_access/v28-2/v28-2%20p76-83.pdf).

poteva rappresentare un problema di salute pubblica in quell'area. Alla fine degli anni '80 l'Agenzia fece partire un grande programma sul radon indoor (negli edifici). Nel giro di pochi anni, almeno nelle zone più contaminate, anche il mercato immobiliare si adeguò, richiedendo un certificato radon al momento di effettuare transizioni di proprietà.

In Europa e in Italia ci si accorse del problema solo dopo che questo era stato affrontato negli Usa.

Cos'è il radon

Cerchiamo ora di conoscere un po' meglio questo radon. È un gas pesante,⁹ inodore, incolore e insapore (e quindi non percepibile dai nostri sensi) che si forma dal decadimento del radio, derivante a sua volta dall'uranio. Quest'ultimo è presente, disperso nella crosta terrestre, con una certa abbondanza, addirittura superiore a quella di elementi a noi familiari come l'oro, il platino, il mercurio, l'argento (quest'ultimo è 20 volte meno abbondante). Quindi è presente in molti suoli e materiali da costruzione.¹⁰ Per questo, anche il radon, che da esso deriva, si trova ovunque. Generatosi nelle rocce e nei terreni, da qui migra lentamente, durante la sua breve vita (il suo tempo di dimezzamento è di soli 3,8 giorni). Quando giunge in atmosfera vi si disperde, diluendosi a valori così bassi da non creare particolari preoccupazioni. Diverso è invece il discorso quando si infiltra nelle case, sfruttando le fessure



6. Vie di ingresso del radon negli edifici.

Cortesia EPA; da https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/2016_a_citizens_guide_to_radon.pdf

⁹ Ha un numero di massa 222, con 86 protoni e 136 neutroni nel nucleo.

¹⁰ Ad esempio in certe rocce vulcaniche come i tufi.

(anche quelle microscopiche), o lungo gli attacchi delle pareti ai pavimenti, o attraverso i passaggi degli impianti tecnici (elettrici, termici, idraulici). Di conseguenza, i livelli di radon sono generalmente maggiori nelle cantine e ai piani bassi. Negli edifici, a causa dei piccoli volumi d'aria presenti e del limitato ricambio, il radon può giungere a concentrazioni elevate e pericolose.

Perché il radon fa male¹¹

Il danno che il radon provoca è dovuto al fatto che, nel suo decadimento, emette una particella alfa molto energetica. Questa, essendo doppiamente carica, interagisce fortemente con le sostanze bersaglio, tanto che la sua capacità di penetrazione è davvero molto scarsa, non riuscendo a superare nemmeno la barriera della nostra pelle, i cui strati esterni sono costituiti da cellule morte. Capiamo quindi subito come non ci sia nessun problema, se la radiazione alfa proviene dall'esterno dell'organismo. Ma siccome tutta l'energia delle particelle si deposita in un volume molto piccolo, nel caso esse colpiscano cellule vive il rischio diviene assai grande, dato che il danno molecolare sarà assai concentrato.¹² Sulla base di queste considerazioni abbiamo ora gli elementi per capire come mai il radon sia particolarmente pericoloso per la nostra salute. Essendo un gas presente naturalmente nell'aria, esso viene infatti inalato e arriva nei polmoni. Se lì decade, la particella alfa emessa colpirà cellule vive, prive di qualunque protezione, uccidendole o, peggio, causando loro gravi danni. Se i meccanismi di riparazione di cui dispone l'organismo non riescono ad aggiustare bene questi guasti, la cellula può tramutarsi in cancro. Ecco quindi spiegato come il radon sia un rischio specificamente per l'apparato respiratorio umano; risulta al secondo posto come fattore di rischio per tumore polmonare dopo il fumo di sigaretta.

Il radon venne formalmente identificato come causa di tumore al polmone nel 1986. (WHO, 1986; IARC, 1988).¹³ A quel tempo, la principale fonte di

¹¹ L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC), tra le categorie di cancerogenicità, inserisce il radon nel Gruppo 1 ("evidenza sufficiente di cancerogenicità per l'uomo").

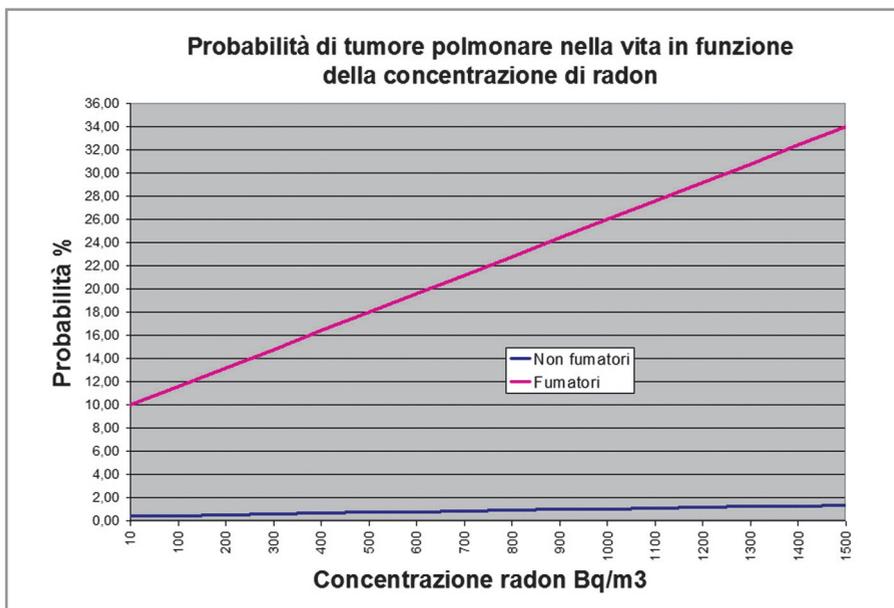
¹² Parlando della pericolosità delle radiazioni ionizzanti dobbiamo quindi tenere presente che ci sono due fattori che entrano in gioco, quasi contraddittori tra di loro: da una parte dobbiamo guardarci da alcune radiazioni (come i raggi gamma) perché è difficile bloccarle, data la loro grandissima capacità di penetrazione nei materiali. Dall'altra, radiazioni come le particelle alfa che hanno bassissima penetrazione causano gravi danni proprio perché questi sono volumetricamente molto concentrati.

¹³ WHO, 1986. Indoor Air Quality Research: Report on a WHO Meeting, Stockholm, 27–

Tabella 5. Stima dei casi annui di tumore polmonare attribuibili all'esposizione al radon nelle abitazioni italiane, secondo lo studio dell'Istituto Superiore di Sanità del 2010.

Regione	Casi osservati tumore polmonare	Numero casi stimati			% di casi osservati		
		Stima puntuale	Intervallo di confidenza (95%)		Stima puntuale	Intervallo di confidenza (95%)	
Abruzzo	558	49	16	88	9	3	16
Basilicata	219	10	3	19	5	1	9
Calabria	665	26	8	48	4	1	7
Campania	2822	372	128	642	13	5	23
Emilia Romagna	2886	190	62	346	7	2	12
Friuli Venezia Giulia	775	106	37	182	14	5	23
Lazio	3121	499	175	841	16	6	27
Liguria	1212	69	23	128	6	2	11
Lombardia	5718	862	301	1464	15	5	26
Marche	764	34	11	63	4	1	8
Molise	108	7	2	13	6	2	12
Piemonte	2816	280	94	496	10	3	18
Puglia	1706	131	43	237	8	3	14
Sardegna	746	69	23	124	9	3	17
Sicilia	2054	109	35	201	5	2	10
Toscana	2231	159	52	289	7	2	13
Trentino Alto Adige	401	35	12	62	9	3	16
Umbria	455	39	13	69	8	3	15
Valle d'Aosta	69	5	1	8	7	2	12
Veneto	2808	238	79	428	8	3	15
Italia	32134	3237	1087	5730	10	3	18

(da: <http://www.irp.enea.it/servizi/documenti/opuscolo-radon>)



7. (da <https://www.radongas.eu/testi-informativi-approfondimento-sul-radon/percentuali-di-rischio-di-tumore-polmonare-per-radon/>) (Bq/m³ = becquerel al metro cubo).

informazioni sui rischi di carcinoma polmonare indotto dal radon erano gli studi epidemiologici sui minatori sotterranei (ICRP, 1993). Nel 2010 la International Commission on Radiological Protection (ICRP = Commissione Internazionale per la Radioprotezione) (ICRP, 2010), revisionò ed analizzò gli studi epidemiologici sulla associazione fra cancro del polmone ed esposizione al radon. Sia per le miniere sotterranee che per le case, ci sono forti prove che il radon e la sua progenie possono causare il cancro ai polmoni. Per i tumori solidi diversi dal carcinoma polmonare e per la leucemia, invece, fino ad oggi non vi sono prove coerenti di aumento dell'incidenza associata

31. August 1984. World Health Organization, Copenhagen.

IARC, 1988. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans: Man-made Fibres and Radon. IARC Vol. 43. International Agency for Research on Cancer, Lyon.

ICRP, 1993. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2).

ICRP, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny and Statement on Radon. ICRP. Publication 115. Ann. ICRP 40(1)

Tabella 6. Probabilità percentuale P di incorrere in un tumore polmonare nella vita in funzione della concentrazione di radon nei locali abitati.

Concentrazione radon indor [Bq/mc]	P [%] per non fumatori	P [%] per fumatori
10	0.40	10.00
100	0.46	11.60
200	0.53	13.20
300	0.59	14.80
400	0.66	16.40
500	0.72	18.00
600	0.78	19.60
700	0.85	21.20
800	0.91	22.80
900	0.98	24.40
1000	1.04	26.00
1100	1.10	27.60
1200	1.17	29.20
1300	1.23	30.80
1400	1.30	32.40
1500	1.38	34.00

(Tabella riadattata da <https://www.radongas.eu/testi-informativi-approfondimento-sul-radon/percentuali-di-rischio-di-tumore-polmonare-per-radon/>)

all'esposizione al radon e alla sua progenie. Di conseguenza, la Commissione ha proposto, di raddoppiare il fattore di rischio per l'esposizione al radon.

Il rischio ovviamente aumenta al crescere della concentrazione e del tempo che si trascorre in ambienti con presenza elevata di radon. Una valutazione di massima, basata sulla concentrazione media del radon in Italia e sul rischio prodotto da una certa dose radioattiva, permette di valutare in alcune migliaia il numero di morti per radon all'anno in Italia.¹⁴ I dati epidemiologici

¹⁴ Nel "Primo rapporto sintetico su: Rischio di tumore polmonare attribuibile all'esposizione al radon nelle abitazioni delle Regioni italiane" (2010, Istituto superiore di Sanità e Centro Nazionale per la prevenzione e il controllo delle malattie) si afferma che dei circa 32.000 casi annuali di tumori polmonari in Italia, circa il 10% sono causati dal radon. Di questi circa l'80% tra i maschi. http://old.iss.it/binary/radon/cont/1_Rapporto_Rn_effetti_sulla_salute.pdf

indicano inoltre come il rischio radon sia particolarmente alto per i fumatori, in quanto il rischio complessivo è frutto – potremmo figurativamente dire – della moltiplicazione (e non semplice addizione) dei due rischi presi separatamente; si veda la figura 7 e la tabella 6. Il fumo di sigaretta, comunque, resta nettamente la prima causa di tumore polmonare, provocando circa l'80 per cento dei casi.

Sebbene l'importanza sanitaria del radon sia stata riconosciuta tardi, è strano che non riceva in Italia la dovuta attenzione, in quanto questo gas è oggettivamente più pericoloso di sostanze regolamentate di cui la società è ormai ben conscia, come l'amianto ed il benzene. Se in Italia i morti da radon sono stimabili in almeno tremila, quelle dovute al benzene sono circa un centinaio. Pure l'amianto è meno pericoloso del radon, ma il suo utilizzo è bandito da anni.

Dove si trova il radon

La presenza di radon dipende ovviamente anche dal tipo di suolo. Terreni ricchi di uranio, come quelli vulcanici, presenteranno in genere concentrazioni maggiori del gas, mentre aree povere di uranio avranno meno radon. Detto questo, non si immagini di poter automaticamente dire che tutti gli edifici sopra un terreno ricco di uranio saranno inquinati fortemente dal radon. Molti fattori entrano in gioco e tra questi la permeabilità dei suoli. In presenza di rocce solide e compatte il radon prodotto al loro interno potrebbe non avere il tempo per trovare il modo di giungere alla superficie prima di decadere.¹⁵ Al contrario un suolo poco compatto, come quelli alluvionali, può permettere l'arrivo in superficie di radon proveniente anche da molto lontano (da elevate profondità). In pratica, la forte disomogeneità delle concentrazioni di radon rilevate negli edifici non è facilmente correlabile con la composizione del terreno.

Risultato questo ribadito a pag. 49 di http://www.isprambiente.gov.it/files2018/pubblicazioni/stato-ambiente/ambiente-urbano/5_Inquinamentodellariaecambiamenticlimatici.pdf sulla base del lavoro del 2013 di Bochicchio F., et al, "Quantitative evaluation of the lung cancer deaths attributable to residential radon: a simple method and results for all the 21 Italian Regions", *Radiation measurements*, 50: 121-126.

¹⁵ Come già detto, il tempo di dimezzamento del radon è di nemmeno quattro giorni. Inoltre i suoi prodotti di decadimento (i suoi "figli") sono solidi e quindi non si muovono facilmente all'interno dei materiali del suolo.

Tabella 7. Presenza media di uranio in diversi suoli (parti per milione).

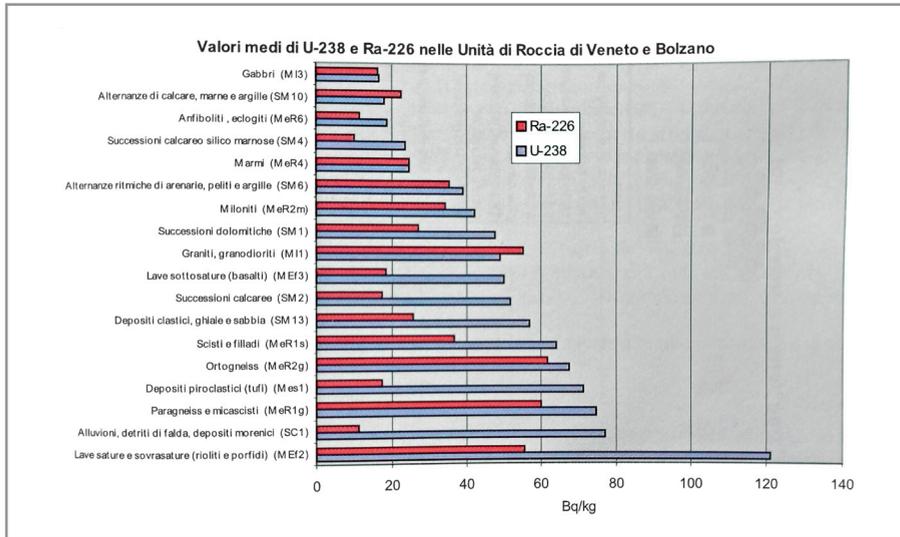
Minerale ad alto tenore di U	>20.000
Minerale a basso tenore di U	1.000
Granito	4
Rocce vulcaniche	20-200
Rocce sedimentarie	2
Scisti neri	50-250
Crosta terrestre	2,8

(da: <https://geoinfo.nmt.edu/resources/uranium/where.html>)

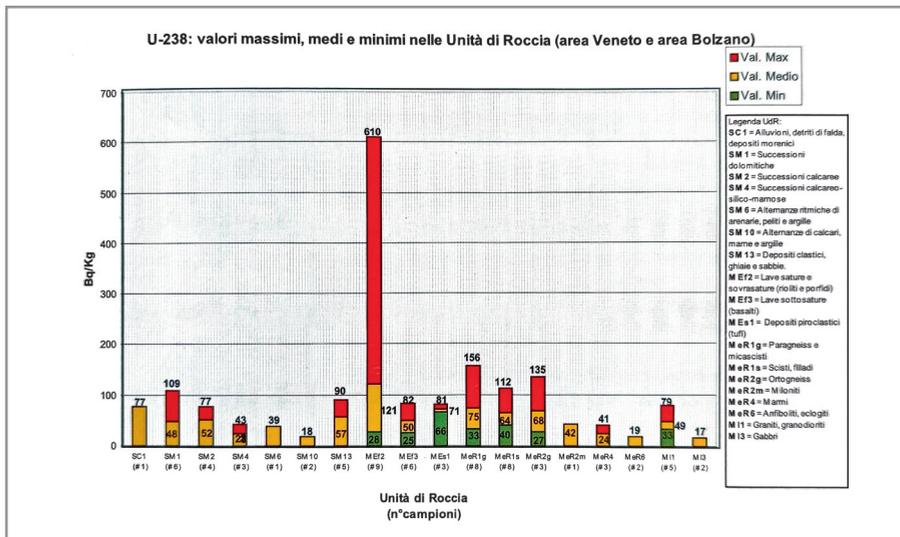
Come già accennato, la concentrazione di radon è bassa all'aria aperta, praticamente insignificante da un punto di vista sanitario, mentre può raggiungere livelli elevati all'interno degli edifici. Ciò per vari motivi:

- 1) le fondamenta ed il solaio a terra non sono in generale realizzati così da garantire una tenuta stagna nei confronti di gas, come il radon, provenienti dal terreno;
- 2) il volume d'aria all'interno delle stanze è modesto e facilmente inquinato dal gas radioattivo che si infiltra dal sottosuolo;
- 3) il ricambio con l'aria esterna è ridotto, specie d'inverno o con il condizionamento estivo, per saggi motivi di risparmio energetico;
- 4) l'interazione dell'edificio con il vento esterno crea un pompaggio (effetto Venturi) nei confronti dei gas presenti sotto le fondamenta;
- 5) i materiali con cui è stato costruito l'edificio contengono uranio e di conseguenza emettono essi stessi radon.

Una difficoltà rilevante che si presenta di fronte ai tentativi di ridurre le conseguenze sanitarie è che l'insieme dei fattori sopra indicati rende praticamente impossibile determinare a tavolino la presenza del gas in quantità rilevanti, nemmeno nei casi in cui si dispone delle mappe geologiche più perfezionate e dei dati costruttivi degli edifici. Non è infatti possibile sapere a priori quale è la tenuta delle fondamenta (e, anche se queste fossero state realizzate impermeabili al gas, niente ci assicura che processi di assestamento della costruzione non ne abbiano nel tempo rovinato la tenuta), quali tipi di materiali sono stati impiegati, quali porosità presentano. Nessuno sa inoltre quale utilizzo venga fatto dell'edificio, se ad esempio le finestre siano tenute aperte o chiuse, se le eventuali porte che separano le fondamenta o la cantina interrata dagli spazi residenziali siano tenute chiuse e quanto siano impermeabili, ecc. Si capisce quindi come l'unico modo affidabile per valutare la



8. Concentrazioni medie di uranio 238 e di radio 226 nei diversi tipi di roccia, ordinati secondo valori crescenti del contenuto di uranio (da “Il sistema informativo territoriale per la valutazione del potenziale di esalazione di radon dal suolo”, ANPA, marzo 2000, ISBN-88-448-0284-8).



9. Concentrazioni massime, medie e minime di uranio 238 nei diversi tipi di roccia (da “Il sistema informativo territoriale per la valutazione del potenziale di esalazione di radon dal suolo”, ANPA, marzo 2000, ISBN-88-448-0284-8).

presenza del radon sia quello di procedere a misure dirette; ogni generalizzazione teorica si infrange contro la variabile presenza di questo gas radioattivo; una casa può esserne piena mentre quella posta di fronte, appena al di là della strada, ne può essere quasi priva!

Una fonte potenzialmente rilevante di radon, che finora non abbiamo considerato, è l'acqua. Il gas radioattivo è solubile in essa e se questa è rimasta nel sottosuolo per molto tempo, può averne assorbito a tal punto che, nel momento in cui la utilizziamo, essa diviene una rilevante causa di inquinamento.¹⁶ In particolare quando ci facciamo una doccia, dato che lo spray di innumerevoli piccole gocce, dall'elevato rapporto superficie/massa, facilita l'emissione del loro contenuto radioattivo e soprattutto facilita la introduzione attraverso il sistema respiratorio.

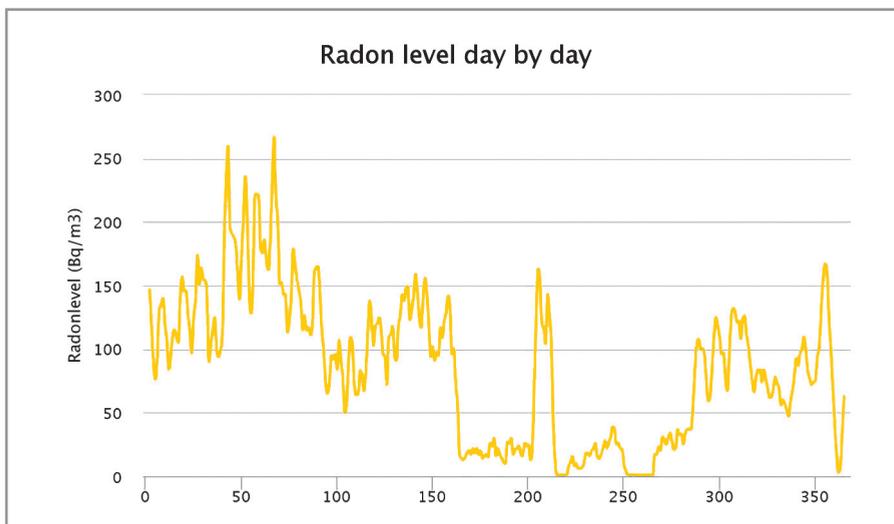
Come si misura il radon

La misurazione del radon è fortunatamente piuttosto facile e in vari casi *pure piuttosto economica*. Non si usano i tradizionali contatori Geiger, in quanto di solito non sono in grado di rivelare le particelle alfa, ma si ricorre a vari strumenti, classificabili in due grandi gruppi: rivelatori attivi e passivi. I primi sono strumenti dedicati e costosi, che richiedono alimentazione elettrica e impiegano sistemi di rivelazione delle particelle alfa (celle a scintillazione,¹⁷ rivelatori a stato solido, camere a ionizzazione; il tutto gestito da sofisticata strumentazione elettronica) in grado di misurare in poco tempo il decadimento del radon. Possono essere molto utili specialmente in occasione di lavori edilizi mirati a ridurre la concentrazione di radon. I secondi non richiedono alimentazione, sono piuttosto economici e accumulano i segnali del decadimento, fornendo un dato mediato nel tempo (carboni attivi, elettretti, tracce nucleari [etched tracks]¹⁸). Diciamo subito che i primi sono utili per studiare l'andamento nel

¹⁶ Nella pubblicazione "Il radon in Italia: guida per il cittadino", pubblicata dall'ISPESL, Dipartimento di Medicina del Lavoro, si indica nel 19% il contributo al radon atmosferico proveniente dall'acqua.

¹⁷ Nelle misurazioni radon spesso chiamate "Celle di Lucas".

¹⁸ I carboni attivi sono posti in un contenitore impermeabile al gas radon, che viene aperto nel luogo da sottoporre a misura, esposto per massimo una settimana al gas, che viene quindi assorbito dai carboni. Il contenitore viene quindi richiuso e velocemente mandato a misurare; sono adatti solo ad uno screening iniziale di presenza del gas radioattivo. Hanno il vantaggio di poter misurare concentrazioni di gas anche molto basse. Gli elettretti sono dischi di teflon elettricamente carichi posti in un contenitore di plastica elettricamente conduttrice a tenuta radon. Il disco di teflon è isolato dal contenitore. Nell'ambiente di misura il contenitore viene aperto e



10. Le pesanti fluttuazioni che può presentare il radon.

(da: <https://www.airthings.com/resources/long-term-myth-short-term-radon-test>)

Radon level day by day = Livello del radon giorno per giorno

Radonlevel (Bq/m3) = Livello di radon in Bq al metro cubo

tempo del radon, le sue fluttuazioni (legate ad esempio alla cangiante situazione meteorologica), mentre i secondi forniscono un valore mediato nel tempo, più direttamente correlabile con l'impatto sanitario per chi vive in un certo ambiente ricco di radon. A questo fine risulta ovvio il vantaggio di avere rivelatori in grado di estendere il tempo di integrazione del radon, così da superare le fluttuazioni a breve e lungo termine, che possono essere molto rilevanti (v. figura 10). Queste dipendono da vari fattori, tra cui l'emanazione dal suolo (che a sua volta segue le variazioni di pressione atmosferica, di ventosità, di umidità nel terreno) e le modalità di utilizzo dell'edificio. In estate, con le finestre aperte, ci sarà più ricambio d'aria e quindi in generale meno radon, a meno che il maggiore ingresso del vento giochi in senso opposto, esacerbando l'effetto Venturi. Si vede come, ancora una volta, sia difficile prevedere a priori

l'arrivo sull'elettrode delle particelle alfa ne fa variare la carica elettrica, che viene alla fine misurata, ricavando la concentrazione del gas. I rivelatori a tracce nucleari usano lastrine di materiale plastico ospitate in piccoli contenitori anch'essi plastici. Esponendoli al radon gli strati superficiali della plastica vengono danneggiati dalle particelle alfa prodotte dal decadimento. Alla fine del periodo di esposizione (che può essere molto lungo, anche un anno) un attacco chimico incide la plastica nei punti danneggiati, che diventano così visibili al microscopio e sono contati con vari sistemi.

il livello di inquinamento da radon. Per valutare il rischio per gli abitanti o i frequentatori di un edificio sarà ovviamente utile effettuare una misura lunga dodici mesi, così da mediare sulle probabili variazioni stagionali.

Il costo di una misura di dodici mesi della concentrazione del radon che utilizza dosimetri passivi, forniti da una ditta specializzata dipende da diversi fattori, tra cui il numero di dosimetri che vengono utilizzati. Indicativamente può variare da qualche decina fino a 150 euro, IVA inclusa. In questo costo ci possono anche stare le spese di spedizione dei dosimetri alla ditta specializzata che esegue la lettura, ma non le spese relative a eventuali sopralluoghi o altri interventi in loco del personale specializzato, ove eventualmente richiesti (nella maggior parte dei casi questi non sono peraltro necessari). Se si dovesse optare per una misura con strumentazione attiva il costo sarebbe più alto, dipendendo specialmente dalla durata del campionamento (e quindi dall'impegno esclusivo del costoso strumento di misura) e dall'indispensabile intervento sul posto del personale esperto. Indicativamente si arriverebbe sui 250 euro. Per far effettuare una misura il cittadino interessato può rivolgersi agli uffici pubblici competenti (agenzie di protezione ambientale), oppure a ditte private, come quelle elencate ad esempio sul sito dell'ARPA veneto.¹⁹

MISURARE IL RADON CON UN ELETTRITE

Gli strumenti più comunemente impiegati per la misura della concentrazione di radon sono i rivelatori elettretici. Sono costituiti sostanzialmente da un disco di teflon, caricato elettricamente, che viene esposto all'aria. La ionizzazione provocata dalle particelle emesse dal radon nel suo decadimento scarica progressivamente la carica elettrica di tale disco. Misurando la carica elettrica iniziale e finale, noto il fattore di taratura dello strumento, il tempo di esposizione ed il fondo gamma presente, è quindi possibile calcolare la concentrazione di attività del radon in aria.

Si deve ribadire che le letture devono essere effettuate sull'arco di 1 anno. Non è infatti possibile stimare la concentrazione media annuale di radon da misure limitate nel tempo: la concentrazione infatti dipende fortemente dalle condizioni atmosferiche.

¹⁹ <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/agenti-fisici/radiazioni-ionizzanti/radon/come-si-misura-1> e anche <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/agenti-fisici/radiazioni-ionizzanti/radon/come-si-misura-1/elenco-di-organismi-ritenuti-idoneamente-attrezzati-per-misurazioni-di-radon-in-aria-all'interno-delle-abitazioni-del-territorio-veneto>.



11-12. Elettretti e lettore della carica elettrica.

La normativa attuale

La scoperta delle radiazioni ionizzanti è avvenuta poco più di 100 anni fa e solo lentamente si capì che potevano provocare danni agli organismi viventi. Tutto iniziò con la scoperta dei raggi X, che avvenne l'8 novembre 1895 ad opera di Wilhelm C. Roentgen, ma passarono due mesi prima che ne venisse dato l'annuncio alla collettività scientifica. Nel febbraio 1896 un costruttore e sperimentatore di tubi sottovuoto (usati per la produzione dei raggi X) presentò lesioni alla cute delle mani, che oggi indicheremmo come dermatite subacuta da raggi X. Nel 1900 due scienziati tedeschi (Friedrich Oskar Giesel e Friedrich Otto Walkhoff) riportarono che i raggi emessi dal radio avevano una azione distruttiva sulla pelle. Nel 1901 Henri Becquerel presentò un eritema della cute in corrispondenza della tasca del vestito nella quale aveva tenuto per qualche tempo una fiala di vetro contenente dei sali di radio. Nel 1903 si riconobbe che l'esposizione ai raggi X poteva indurre sterilità negli animali da laboratorio. Nel 1904 furono segnalate le prime anemie e le prime leucopenie da raggi X.

Entro 10 anni dalla scoperta di Roentgen, una gran parte delle patologie da dosi elevate e intense di radiazioni ionizzanti era ormai stata riconosciuta e sommariamente descritta. Dagli inizi del 1900 molti esperimenti vennero effettuati al fine di studiare gli effetti delle radiazioni ionizzanti sull'organismo, sui singoli organi, sulle cellule, sui geni. L'uso delle radiazioni ionizzanti, oltre che benefici diagnostici e terapeutici, ha portato a molti morti fra gli utilizzatori. Nel 1936 la Società Roentgen tedesca eresse nella città di Amburgo un "Monumento ai martiri dei raggi X e del radio", con l'elenco di diverse centinaia di medici di molte diverse nazionalità che morirono a seguito dei

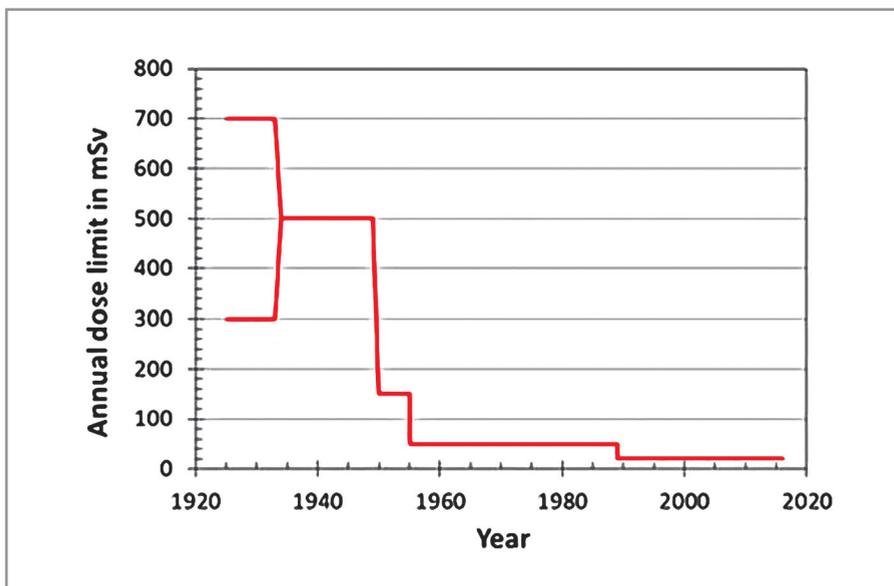
danni provocati dalle radiazioni con cui avevano lavorato.²⁰

La collettività scientifica radiologica ha fissato dei limiti di esposizione, che sono variati via via nel tempo, a mano a mano che aumentavano le conoscenze sui rischi. Questi limiti a volte erano definiti in termini di dose giornaliera e quindi la conversione in dose annuale è affetta da imprecisione (riscontrabile nelle varie pubblicazioni che trattano l'argomento) dovuta al numero di giorni lavorati/anno presi in considerazione.

- Nel 1925 Sievert, Barclay e Cox raccomandarono un limite di 500-600 mSv/anno.
- Sempre nel 1925 Mutscheller propose una riduzione a 50-60 mSv/anno.²¹
- Nel 1926 il Dutch Board of Health introdusse il primo regolamento basato su un approccio conservativo: 600 mSv/90.000 ore lavorate (a copertura della intera vita lavorativa).
- Nel 1928 si tenne il 2° congresso internazionale di radiologia, che istituì un comitato con il compito di definire le grandezze e loro unità di misura.
- Nel 1937 si concordò ufficialmente sull'unità di esposizione e sulla sua unità di misura (chiamata Roentgen).
- Nel 1929 negli Stati Uniti venne istituito il National Council on Radiation Protection and Measurement (NCRP).
- Nel 1932, nel primo rapporto del NCRP, si raccomandò di non superare il limite di 0.2 R/giorno (= 2 mSv/giorno).
- Nel 1936 l'NCRP propose il concetto di Dose Massima Ammessa (DMA) e fissò il limite a 1 mSv/giorno.
- Nel 1949 il rapporto numero 6 del NCRP ridusse la DMA a 150 mSv/anno.
- Nel 1955 la DMA venne fissata a 3 mSv/settimana per lavoratori di età 18-45 e a 6 mSv/settimana per lavoratori di età superiore a 45 anni.
- Nel 1957 questi valori vennero rivisti e fissati a 3 mSv/settimana, non dovendosi superare i 50 mSv/anno.
- Nel 1977 con la Pubblicazione n. 26 l'International Commission on Radiological Protection (ICRP) fissò il limite a 50 mSv/anno.
- Nel 1990 con la Pubblicazione n. 90 l'ICRP raccomandò, per i lavoratori, una dose massima di 20 mSv/anno.

²⁰ <https://www.icrp.org/docs/The%20History%20of%20ICRP%20and%20the%20Evolution%20of%20its%20Policies.pdf>, pag. 77

²¹ Queste differenze sono dovute all'ambiguità allora esistente per quanto riguardava la misura della dose.

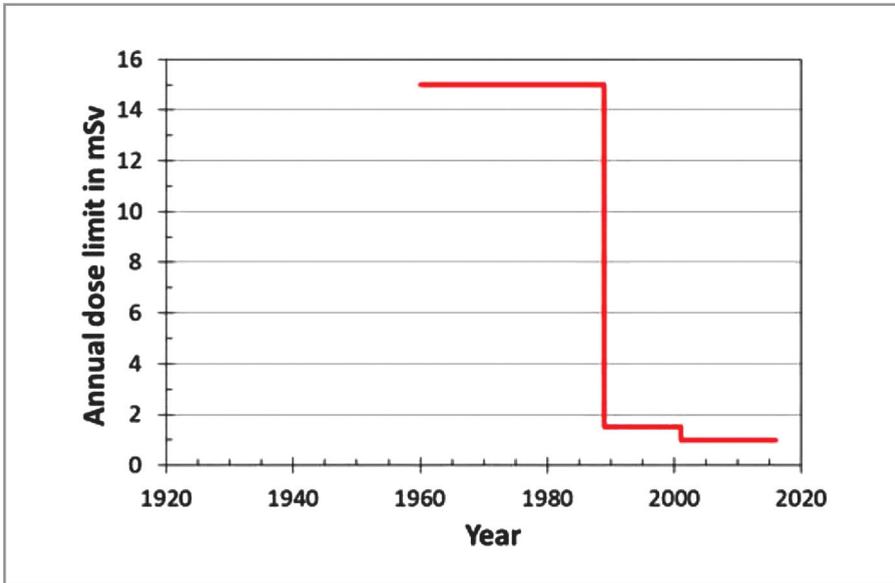


13. Variazione nel tempo dei limiti di dose per l'esposizione dei lavoratori alle radiazioni ionizzanti. I due valori nel periodo iniziale riflettono le differenti definizioni di dose utilizzate dai diversi esperti. (Annual dose limit in mSv = limite di dose annuale in mSv; Year = anno)

(Da https://www.researchgate.net/publication/328190296_Radiation_protection_today-success_problems_recommendations_for_the_future_The_Club_of_the_Philosophers_of_the_German-Swiss_Association_for_Radiation_Protection_Fur_Deutschland_und_die_Schweiz_Mitglie)

Attualmente la maggior parte dei Paesi ha fissato il limite di esposizione *per i lavoratori* a 20 mSv/anno e *per la popolazione* a 1 mSv/anno. Fanno eccezione gli Stati Uniti, ove il limite per i lavoratori è 50 mSv/anno.

Dal punto di vista normativo, l'Italia non ha una legge specifica sul radon nelle abitazioni, ma si è sempre appoggiata sulle Raccomandazioni europee, dapprima la 90/143/Euratom e, più recentemente, sulla Direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio dell'Unione Europea. Essa indica come le nazioni della UE debbano introdurre, per la concentrazione del gas radon, un livello di riferimento che non vada oltre i 300 becquerel al metro cubo (Bq/mc). La medesima Direttiva prevede anche l'adozione di misure di prevenzione radon per le nuove costruzioni. A questo riguardo è opportuno ricordare come già nel 2008 l'Istituto Superiore di Sanità e il Centro nazionale per la prevenzione e il controllo delle malattie avessero elaborato una "Raccomandazione sull'introduzione di sistemi di prevenzione dell'ingresso del radon in tutti gli edifici di nuova costruzione" nell'ambito del progetto PNR-CCM (Piano Nazionale



14. Variazione nel tempo dei limiti di dose per esposizione del pubblico alle radiazioni ionizzanti. (Annual dose limit in mSv = limite di dose annuale in mSv; Year = anno)

(Da https://www.researchgate.net/publication/328190296_Radiation_protection_today-success_problems_recommendations_for_the_future_The_Club_of_the_Philosophers_of_the_German-Swiss_Association_for_Radiation_Protection_Fur_Deutschland_und_die_Schweiz_Mitglie)

Radon per la riduzione del rischio di tumore polmonare in Italia). Riguardo alle iniziative di enti sovranazionali, ricordiamo che l'Organizzazione Mondiale della Sanità nel 2009 ha proposto un livello di riferimento per il radon idealmente non superiore a 100 Bq/mc e, in ogni caso, non oltre i 300 Bq/mc.

I decreti legislativi 230/1995, 241/2000 e 151/2001 normano la problematica del rischio da radiazioni ionizzanti in ambito nazionale, recependo le direttive europee Euratom 89/618, 90/641, 92/3 e 96/29 in materia di radiazioni ionizzanti. In particolare, relativamente alle *attività lavorative* che espongono a sorgenti *naturali* di radiazioni:

- il D. Lgs. 241/2000 si applica alle attività lavorative durante le quali i lavoratori ed eventualmente le persone del pubblico sono esposti a prodotti di decadimento del radon o del toron²² o a radiazioni gamma o a

²² Il radon deriva dal decadimento del radio, che a sua volta discende dall'uranio 238. Ha numero atomico 86 e massa atomica 222. In natura si trovano altri isotopi del radon, derivanti dalle catene di decadimento dell'uranio 235 (è indicato anche col nome di attinon; ha un tempo

ogni altra esposizione in particolari luoghi di lavoro quali tunnel, sottovie, catacombe, grotte e, comunque, in tutti i luoghi di lavoro sotterranei o in zone ben individuate o con caratteristiche determinate;

- nei luoghi di lavoro citati l'esercente, entro ventiquattro mesi dall'inizio dell'attività, procede a misurazioni di concentrazione di attività di radon medie in un anno;²³
- L'allegato I-bis fissa il *livello di azione* per le *attività lavorative* in luoghi di lavoro pari a 500 Bq/mc di concentrazione media annua. L'esercente è tenuto ad intraprendere azioni correttive solo se i valori misurati sono superiori all'80% del livello di azione (ovvero 400 Bq/mc). In questo caso si presentano due scenari:
 1. Qualora i valori misurati non superino il livello di azione ma siano superiori all'80 per cento del livello di questo (400 Bq/mc), l'esercente assicura nuove misurazioni nel corso dell'anno successivo.
 2. Nel caso di superamento del livello di azione 500 Bq/mc, l'esercente, avvalendosi della figura dell'Esperto Qualificato, pone in essere azioni di rimedio idonee a ridurre le grandezze misurate al di sotto del predetto livello, tenendo conto del principio di ottimizzazione, e procede nuovamente alla misurazione al fine di verificare l'efficacia delle suddette azioni.

Al termine dell'intervento di rimedio è obbligatorio, ai sensi della normativa vigente, ripetere le misure di concentrazione di radon della durata di un anno.

Prossimi sviluppi legislativi

È in fase di emanazione un decreto legislativo che recepisce la direttiva europea del 2013 sulla protezione dalle radiazioni ionizzanti.

Relativamente al radon le novità legislative sono le seguenti:

- Verrà adottato un nuovo Piano nazionale radon che recepisce le disposizioni della nuova direttiva. Il Piano fisserà:
 - a) le strategie, i criteri e le modalità di intervento per prevenire e ridurre i rischi a lungo termine dovuti all'esposizione al radon nelle abitazioni, ne-

di dimezzamento di circa 4 secondi) e del torio (indicato col nome di toron; ha tempo di dimezzamento di 55 secondi); hanno massa atomica rispettivamente 219 e 220. Questi altri due isotopi hanno nella maggior parte dei casi assai meno importanza del radon 222 per quanto riguarda la radioprotezione della popolazione e dei lavoratori.

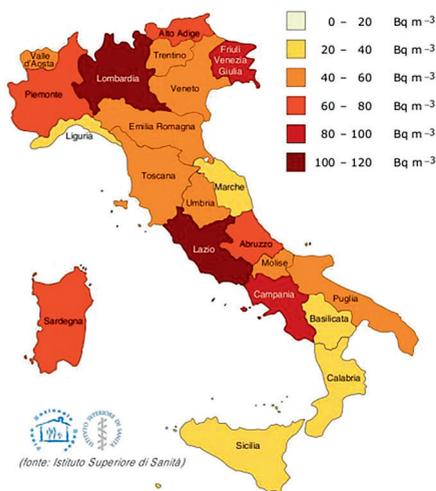
²³ Negli ambienti di lavoro sono incluse anche le scuole.

- gli edifici pubblici e nei luoghi di lavoro, anche di nuova costruzione, per qualsiasi fonte di radon, sia essa il suolo, i materiali da costruzione o l'acqua;
- b) i criteri per la classificazione delle zone in cui si prevede che la concentrazione di radon come media annua superi il livello di riferimento nazionale in un numero significativo di edifici;
- c) le regole tecniche e i criteri di realizzazione degli edifici di nuova costruzione nonché degli interventi di manutenzione straordinaria, di restauro e di risanamento conservativo e per interventi di ristrutturazione edilizia che coinvolgono l'attacco a terra.
- saranno definiti nuovi livelli di riferimento per la concentrazione di attività di radon (inferiori, ovvero più protettivi, rispetto agli attuali);
 - verranno date delle indicazioni sui criteri per l'individuazione delle aree prioritarie per l'intervento di risanamento da radon;
 - saranno rese disponibili informazioni locali e nazionali sull'esposizione al radon in ambienti chiusi e sui rischi per la salute che ne derivano, sull'importanza di effettuare misurazioni della concentrazione di radon e sui mezzi tecnici disponibili per ridurre le concentrazioni di radon esistenti;
 - sono previsti esperti in interventi di risanamento radon, i quali dovranno essere in possesso delle qualificazioni previste.

Le prime indagini sul radon in Italia

Nel 1988 l'ENEA-DISP (successivamente ISPRA) e l'Istituto Superiore di Sanità (ISS) effettuarono i primi studi, arrivando a coordinare negli anni '90 la prima indagine nazionale sulla presenza del radon nelle abitazioni civili. Si scelse un campione di cinquemila case in duecento comuni, suddivisi tra quelli con popolazione superiore o inferiore a 100.000 abitanti (questo aspetto è importante per quanto diremo in seguito a proposito delle misure radon in Trentino). I due gruppi prevedevano una proporzione precisa (ma diversa nei due casi) di misure sulla base della popolazione comunale (cioè una misura ogni X abitanti, dove X era un numero piccolo nel caso di comuni poco abitati e maggiore per quelli con oltre 100.000 cittadini).

Dall'indagine emerse un quadro molto variabile da regione a regione, dovuto senza dubbio al differente substrato geologico ma anche ai materiali costruttivi e alle condizioni climatiche. I valori medi riscontrati per alcune regioni erano di poche decine di Bq/mc, mentre per altre superavano i 100 Bq/mc. Si trovarono edifici con concentrazioni di radon superiori a 1000 Bq/mc, che quindi presentavano un serio rischio per la salute degli occupanti.



15. La concentrazione del radon in Italia, secondo i risultati della prima campagna di misura effettuata negli anni '90.

Nella cartina sono riassunti i dati di quella prima campagna di misure. Si vede come il problema apparisse particolarmente presente in Lombardia, Friuli, Lazio e Campania. Risultava che la concentrazione media italiana era di circa 70 Bq/mc, quasi il doppio rispetto alla media mondiale che si aggirava sui 40 Bq/mc,²⁴ mentre per l'Europa si era sui 59 Bq/mc. Circa il 4% delle abitazioni presentava concentrazioni radon superiori a 200 Bq/mc e l'1% maggiori di 400 Bq/mc,²⁵ ciò che causava un rischio di tumore al polmone di circa lo 0,5%. Si evidenziava anche che circa il 10% di tutti i tumori polmonari nel nostro paese potevano essere attribuiti al radon.

Altre indagini sul radon sono state successivamente effettuate dall'ISS, che ha coinvolto tra l'altro 5.500 abitazioni di lavoratori di Telecom Italia, distribuite su 1800 comuni. Inoltre varie regioni e province hanno proceduto ad estendere le misurazioni sul radon, in particolare per individuare le aree ad elevata probabilità di pesante inquinamento a causa di questo gas. In totale sono state misurate (vedi tabella 8) circa 36.000 abitazioni, 8.300 scuole e 7.500 luoghi di lavoro. I valori medi regionali misurati in queste indagini vanno da 35 Bq/mc a 170 Bq/mc.

Il confronto dei valori medi ottenuti nella iniziale campagna nazionale degli anni '90 e le successive misure effettuate risulta istruttivo. Si vede dalla

²⁴ <http://old.iss.it/radon/index.php?lang=?lang=1&cid=178&tipo=43>

²⁵ 200 e 400 Bq/mc erano i valori di riferimento indicati nella Raccomandazione Europa del 1990 per gli edifici esistenti e di nuova realizzazione.

Tabella 8. Numero di edifici (case, scuole, luoghi di lavoro) in cui sino al 2013 si è misurata la concentrazione di radon nelle diverse regioni.

Regione	Indagini su scala nazionale		Indagini su scala regionale o sub regionale			Totale		
	N. abitazioni	N. LL (edifici)	N. abitazioni	N. edifici scolastici	N. LL (edifici)	N. abitazioni	N. edifici scolastici	N. LL (edifici)
Piemonte	826	264	1 555	611	130	2 381	611	394
Valle d'Aosta	53	9	527	101	36	580	101	45
Lombardia	1 538	508	2 574	496	1 344	4 112	496	1 852
Prov. di Bolzano	131	76	3 000	800	1 000	3 131	800	1 076
Prov. di Trento	186	76	1 681	725	223	1 867	725	299
Veneto	764	142	1 419	1 342	0	2 183	1 342	142
Friuli-Venezia Giulia	430	58	3 389	1 500	0	3 819	1 500	58
Liguria	377	67	59	0	0	436	0	67
Emilia-Romagna	843	207	137	607	0	980	607	207
Toscana	786	166	2 097	728	1 226	2 883	728	1 392
Umbria	163	53	0	127	0	163	127	53
Marche	440	45	0	0	0	440	0	45
Lazio	656	293	6 985	0	0	7 641	0	293
Abruzzo	271	100	1 325	553	300	1 596	553	400
Molise	84	12	0	42	0	84	42	12
Campania	1 182	287	0	0	0	1 182	0	287
Puglia	637	219	200	438	75	837	438	294
Basilicata	162	26	0	0	0	162	0	26
Calabria	332	124	70	77	36	402	77	160
Sicilia	698	326	400	0	0	1 098	0	326
Sardegna	303	105	0	141	0	303	141	105
Italia	10 862	3 163	25 418	8 288	4 370	36 280	8 288	7 533
Nord	4 305	1 200	14 204	5 575	2 733	18 509	5 575	3 933
Centro	3 243	876	10 544	2 057	1 526	13 787	2 057	2 402
Sud e isole	3 314	1 087	670	656	111	3 984	656	1 198

Nota: i valori in corsivo sono approssimati.

Fonte dei dati: Archivio Nazionale Radon (presso Istituto Superiore di Sanità). Tabella pubblicata su: www.iss.it/radon

(da: <https://www.flickr.com/photos/125199432@N03/14409393979/in/set-72157645146874530>)

tabella 9 come in molti casi i valori più recenti siano assai superiori, anche per le province autonome di Trento e Bolzano, dove la differenza è di quasi tre volte. Torneremo più tardi su questo punto, a proposito del Trentino.

Analizzando i valori minimi e massimi misurati si vede come in alcuni edifici i livelli di radon siano altissimi, in grado di – potremmo dire – garantire seri problemi alla salute. Risaltano in particolare i 13.000 Bq/mc abbondanti riscontrati in una casa altoatesina. Se la provincia di Bolzano presenta un problema radon particolarmente serio, in Campania invece parrebbe che le concentrazioni di radon siano tranquillizzanti. Ciò è piuttosto sorprendente, dato che questa regione è ricca di materiali vulcanici. Strano è anche che il numero di abitazioni con concentrazione radon oltre i 300 Bq/mc sia del 30% inferiore rispetto al vicino Lazio e che la massima concentrazione misurata sia anch'essa molto inferiore.

Tabella 9. Confronto tra i dati medi ottenuti nella prima campagna radon nazionale e i dati successivamente raccolti nell'ambito di campagne regionali/provinciali.

	Campagna nazionale	Campagne regionali/provinciali
Regione / Provincia Autonoma	Media aritmetica [Bq/mc]	Media aritmetica [Bq/mc]
Piemonte	69	70
Valle d'Aosta	44	83
Lombardia	111	124
Prov. Bolzano	70	277 ¹
Prov. Trento	49	120-131 ²
Veneto	58	94
Friuli Venezia Giulia	99	162 ³
Liguria	38	N.D.
Emilia Romagna	44	49 ⁴
Toscana	48	35
Umbria	58	N.D.
Marche	29	N.D.
Lazio	119	121
Abruzzo	60	58
Molise	43	N.D.
Campania	96	N.D.
Puglia	52	N.D.
Basilicata	30	N.D.
Calabria	25	76 ⁴
Sicilia	35	75 ⁵
Sardegna	64	N.D.

Note: (1) Valori solo invernali; (2) Abitazioni e scuole; (3) Calcolando la media delle maglie della campagna 2005-2006; (4) Solo per le Province di Catanzaro e Crotona; (5) Solo per la Provincia di Ragusa.

(da: <https://www.radongas.eu/testi-informativi-approfondimento-sul-radon/mappe-della-concentrazione-del-radon-nelle-regioni-italiane/>)

Tabella 10. Sintesi (regione per regione) dei dati di concentrazione del radon misurati in abitazioni nell'ambito di campagne di misura.

Regione	Numero Comuni	Numero abitazioni	RnConc Min (Bq m ⁻³)	RnConc Max (Bq m ⁻³)	N. abitazioni con RnConc > 200 Bq m ⁻³	N. abitazioni con RnConc > 300 Bq m ⁻³
Abruzzo	263	1 919	5	1 181	71	38
Basilicata	22	153	12	367	1	1
PA di Bolzano	127	2 454	10	13 266	709	457
Calabria	66	392	<5	1 049	17	9
Campania	133	1 155	<5	648	75	21
Emilia-Romagna	129	949	<5	837	14	8
Friuli-Venezia Giulia	222	2 893	11	2 000	579	329
Lazio	381	7 773	<5	2 154	1 075	456
Liguria	61	397	<5	843	3	1
Lombardia	668	4 080	<5	1 936	526	289
Marche	72	428	5	716	2	1
Molise	22	79	9	123	0	0
Piemonte	320	2 281	6	2 734	234	138
Puglia	124	929	11	1 240	96	43
Sardegna	59	286	<5	312	8	1
Sicilia	102	1 071	<5	415	5	1
Toscana	286	2 620	<5	4 828	133	63
PA di Trento	134	1 782	<5	2 188	243	122
Umbria	23	159	<5	444	4	2
Valle d'Aosta	40	584	7	1 423	39	24
Veneto	337	2 259	10	1 686	191	84
Totale	3 591	34 643	<5	13 266	4 025	2 088

Tabella da: <http://old.iss.it/radon/index.php?lang=?lang=1&id=178&tipo=43>

Tabella 11. Esalazione del radon da vari materiali da costruzione.

Materiale	Intensità di esalazione [Bq/(mq.h)]
Arenaria naturale	1,0
Porfido	3,3
Pietra arenaria calcarea	0,9
Mattoni, clinker	0,2
Pietra pomice naturale	1,5
Scorie metallurgiche	0,6
Calcestruzzo	1,1
Calcestruzzo poroso	1,0
Gesso naturale	0,2
Gesso chimico, apatite	0,4
Gesso chimico, fosforite	24,1

(da: Radonhandbuch-i, disponibile da www.supsi.ch)



16. Le aree maggiormente affette dal radon in diverse regioni italiane. Queste mappe sono un utile strumento per far aumentare nei cittadini la consapevolezza del problema radon.

(da: <https://www.radongas.eu/testi-informativi-approfondimento-sul-radon/mappe-della-concentrazione-del-radon-nelle-regioni-italiane/>)

La situazione radon in provincia di Trento

Nella Provincia di Trento la prima campagna di misura fu effettuata nell'ambito dell'indagine nazionale di inizio anni '90. Localmente era coordinata dall'Ufficio del Medico Provinciale, supportato dai tecnici del Servizio di Fisica Sanitaria dell'ospedale S. Chiara. Il comune di Trento era incluso di diritto, come città di oltre 100.000 abitanti, ma per il criterio proporzionale adottato per quel gruppo di comuni (stratificazione statistica) vi venivano effettuate poche misure. Il caso volle che quasi tutti gli altri comuni coinvolti fossero di piccole dimensioni; quindi spettavano loro poche misurazioni. C'era però una eccezione: la città di Rovereto, che aveva una popolazione superiore alla somma di quella di tutti gli altri piccoli centri. Ne risultò un forte sbilanciamento dei dati provinciali, dominati numericamente da quelli della città lagarina (47 su un totale di 80²⁶).

Quando il substrato geologico è calcareo ci si aspetta che i valori di radon siano piuttosto bassi e infatti i dati di Rovereto furono molto tranquillizzanti. Ciò fece però sì che la media provinciale della concentrazione radon per *tutto* il Trentino risultasse piuttosto bassa, essendo dominata, appunto, dai dati roveretani.

²⁶ Nell'ambito di una indagine locale disposta dalla Provincia Autonoma di Trento vennero effettuate ulteriori quindici misure in quattro comuni della val Rendena.

Durante la campagna promossa da ISS e ENEA nel 1990, nella Provincia Autonoma di Trento venne rilevato un valore di 49 Bq/mc di concentrazione annuale media di radon indoor con l'1,3% di Comuni sopra i 200 Bq/mc. Questo valore si può confrontare con il valore medio nazionale di 70 Bq/mc, con la media mondiale di 40 Bq/mc e con quella europea di 59 Bq/mc.

Che il quadro non fosse però così tranquillizzante appariva chiaro esaminando i dati comune per comune. Era evidente che vi erano zone ove il radon costituiva un problema potenzialmente assai serio. Nel rapporto consuntivo dell'indagine provinciale²⁷ questo fatto non venne sottolineato per nulla, probabilmente per non causare problemi al mondo politico del tempo, che di tutto aveva voglia tranne che di affrontare un nuovo problema sanitario dalle spinose conseguenze, ad esempio per il mondo turistico. Come si sarebbe potuto dire ai turisti "Venite in Trentino, così vi prenderete anche una bella dose di radon"? La tentazione poteva essere forte di preferire un approccio del tipo "il problema non esiste e tutto invece va bene anche su questo fronte!" (si vedano anche le considerazioni esposte nel Box "Meglio non far sapere"). Peccato che questa posizione tranquillizzante venisse sancita anche dal fisico trentino che la Provincia aveva incaricato di fungere da consulente scientifico. Il tempo si incaricò poi di mostrare come la situazione radon in provincia richiedesse invece attenzione.

Successivamente l'Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente (APPA) svolse dal 1992 al 2007 in Trentino alcune campagne annuali di monitoraggio del gas radon indoor che coinvolsero:

- 1.600 abitazioni su tutto il territorio provinciale, appartenenti a 118 comuni su 223;
- 738 edifici scolastici ove si effettuarono complessivamente circa 1.200 misure, esaminando separatamente i diversi piani degli edifici indagati;
- 234 edifici comunali.

Delle 1.600 abitazioni in cui vennero misurati i livelli di radon, 1.400 sono state monitorate per un intero anno solare (1.200 tramite un singolo posizionamento e 200 tramite due posizionamenti distinti fra estate ed inverno). Le rimanenti abitazioni furono monitorate per periodi più brevi (4-6 mesi).

Nelle scuole elementari vennero effettuati 2 posizionamenti, in due distinti periodi, per complessivi 9 mesi (quelli dell'anno scolastico). Negli asili nido e nelle scuole materne il posizionamento fu effettuato in un solo periodo, tra febbraio e giugno, periodo intermedio fra la stagione invernale ed

²⁷ "Radioattività naturale nelle abitazioni – Risultati dell'indagine sull'esposizione in Trentino", Provincia Autonoma di Trento.

Tabella 12. Valore medio della concentrazione di radon negli edifici pubblici trentini (presso il piano più basso utilizzato).

	Numero edifici misurati	Valore medio di radon	Numero di edifici (municipi e scuole) con valore medio di radon superiore a 500 Bq/m ³ (D.Lgs.241/2000)
Asili nido	23	73 Bq/m ³	nessuno
Scuole materne	283	139 Bq/m ³	9 pari a circa il 3%
Scuole elementari	287	135 Bq/m ³	10 pari a circa il 3%
Scuole medie	91	84 Bq/m ³	2 pari a circa il 2%
Scuole superiori	40	80 Bq/m ³	1 pari a circa il 2%
Centri formazione professionale	26	151 Bq/m ³	2 pari a circa l'8%
Edifici municipali	234	106 Bq/m ³	3 pari a circa l'1%

(da: http://www.appa.provincia.tn.it/binary/pat_appa_restyle/rdioattivita/Gas_radon_in_edifici_pubblici_ed_abitazioni.1513847013.pdf)

estiva e quindi ritenuto rappresentativo dell'intero anno scolastico, per quanto riguarda l'inquinamento indoor del radon e le sue fluttuazioni temporali. Nelle scuole medie e superiori venne effettuato un posizionamento per un intero anno scolastico. Per quanto attiene gli edifici comunali la durata del posizionamento dei dosimetri fu di un intero anno solare.

A tutt'oggi si sono esaminate circa 1.700 abitazioni dislocate in quasi 120 comuni della Provincia. Inoltre sono state eseguite indagini radon anche in circa 1.000 edifici pubblici (soprattutto scuole), per un totale di circa 1.500 ulteriori misure.

È un peccato che questi dati non siano presentati sotto forma di mappa del territorio, né che si forniscano informazioni sulla distribuzione dei valori attorno alle medie (ci si attenderebbe che venisse fornita almeno la deviazione standard). È inevitabile fare il confronto con l'atteggiamento aperto e di massima chiarezza che da anni caratterizza il lavoro sul radon effettuato dall'APPA di Bolzano.²⁸

È curioso notare come, in alcuni comprensori, i piani terra non risultino più inquinati da radon rispetto alle abitazioni prese nel loro complesso.

²⁸ Si veda ad esempio http://www-3.unipv.it/webgiro/fsctcnmbt0506/ulterioredidattica/Rn-radon_ital%20bolzano.pdf

Tabella 13. Valori medi della concentrazione di radon in ciascun comprensorio trentino.

Comprensorio	Edifici scolastici (asili, nidi e scuole elementari)	Abitazioni (su qualsiasi piano)	Abitazioni (solo piano terra)
1. Val di Fiemme	158 Bq/m ³ (26 edifici)	248 Bq/m ³ (107 abitazioni, 8 comuni)	275 Bq/m ³ (60 abitazioni, 8 comuni)
2. Primiero	178 Bq/m ³ (18 edifici)	209 Bq/m ³ (96 abitazioni, 6 comuni)	241 Bq/m ³ (60 abitazioni, 6 comuni)
3. Bassa Valsugana	172 Bq/m ³ (44 edifici)	204 Bq/m ³ (101 abitazioni, 10 comuni)	180 Bq/m ³ (49 abitazioni, 9 comuni)
4. Alta Valsugana	172 Bq/m ³ (57 edifici)	145 Bq/m ³ (116 abitazioni, 11 comuni)	181 Bq/m ³ (35 abitazioni, 10 comuni)
5. Valle dell'Adige	98 Bq/m ³ (155 edifici)	121 Bq/m ³ (207 abitazioni, 13 comuni)	139 Bq/m ³ (79 abitazioni, 12 comuni)
6. Val di Non	113 Bq/m ³ (69 edifici)	90 Bq/m ³ (60 abitazioni, 9 comuni)	121 Bq/m ³ (22 abitazioni, 7 comuni)
7. Val di Sole	181 Bq/m ³ (32 edifici)	102 Bq/m ³ (55 abitazioni, 6 comuni)	159 Bq/m ³ (21 abitazioni, 3 comuni)
8. Valli Giudicarie	156 Bq/m ³ (55 edifici)	96 Bq/m ³ (664 abitazioni, 37 comuni)	172 Bq/m ³ (119 abitazioni, 28 comuni)
9. Alto Garda	93 Bq/m ³ (38 edifici)	98 Bq/m ³ (69 abitazioni, 6 comuni)	95 Bq/m ³ (44 abitazioni, 5 comuni)
10. Vallagarina	107 Bq/m ³ (86 edifici)	98 Bq/m ³ (94 abitazioni, 10 comuni)	115 Bq/m ³ (38 abitazioni, 9 comuni)
11. Val di Fassa	195 Bq/m ³ (13 edifici)	151 Bq/m ³ (45 abitazioni, 3 comuni)	144 Bq/m ³ (23 abitazioni, 3 comuni)
Concentrazione media in Trentino	131 Bq/m³	128 Bq/m³	173 Bq/m³

(da: http://www.appa.provincia.tn.it/binary/pat_appa_restyle/rdioattivita/Gas_radon_in_edifici_pubblici_ed_abitazioni.1513847013.pdf)

Grazie alla disponibilità del dr. Stefano Pegoretti, del Settore Laboratorio dell'APPA, disponiamo in anteprima (rispetto al Rapporto sullo Stato dell'Ambiente 2020) dei dati riportati in Tabella 14, relativi alle scuole, dai quali si evince come una percentuale non trascurabile di strutture richiederà, a seguito delle norme più recenti, qualche intervento di mitigazione/bonifica.

Tabella 14. Valori della concentrazione di radon minima, media e massima nelle scuole trentine (Fonte: APPA Trento).

Tipo di scuola	Numero di misure	Concentr. minima (Bq/mc)	Concentr. massima (Bq/mc)	Concentr. media (Bq/mc)	% di misure maggiori di 300 Bq/mc
Asilo nido	325	9	1402	136	8,3
Scuola materna	68	27	887	154	6,3
Scuola elementare	526	21	2374	138	11,8
Scuola media	104	15	1279	111	5,7
Scuola superiore	138	9	2010	134	10,1
Totale	1.161				

Tabella 15. Percentuale di abitazioni a diversi intervalli di concentrazione radon.

	minore di 200 Bq/m ³	tra 200 e 400 Bq/m ³	maggiore di 400 Bq/m ³
Abitazioni	85%	10%	5%
Abitazioni piano terra	72%	17%	11%

(da: http://www.appa.provincia.tn.it/binary/pat_appa_restyle/rdioattivita/Gas_radon_in_edifici_pubblici_ed_abitazioni.1513847013.pdf)

I risultati riportati sulle tre precedenti tabelle forniscono una buona base per capire le dimensioni del problema radon in provincia di Trento. Si lamenta però la mancanza di cartine che forniscano immediatamente un'idea delle aree più affette. Dai dati delle tabelle si possono ricavare cifre metodologicamente confrontabili con quelle della campagna nazionale e delle altre Regioni. L'inquinamento indoor medio annuale delle abitazioni e delle scuole dell'intera Provincia di Trento (su qualsiasi piano) è risultato essere di 128-131 Bq/mc. La percentuale di abitazioni con inquinamento superiore a 200 Bq/mc è del 15% e la percentuale di abitazioni con inquinamento superiore a 400 Bq/mc è del 5%. Sono valori ben superiori a quelli dell'indagine nazionale.

Come si è detto in precedenza, il radon è un gas pesante e quindi, se entra negli edifici dal sottosuolo, tende a restare confinato preferenzialmente nei piani bassi. A supporto di questa supposizione ci sono i dati fornitici anche in questo caso dal dr. Stefano Pegoretti, del Settore Laboratorio dell'APPA di Trento.

Tabella 16. Andamento della concentrazione del radon in funzione del piano degli edifici scolastici (in base alle misure effettuate dall'APPA di Trento negli anni 1993-2007).

Piano	N. di misure	Concentrazione media (in Bq/mc)	% di misure superiori a 300 Bq/mc
Interrato	73	157	8,2
Seminterrato	152	188	13,9
Terra	410	143	9,5
Rialzato	150	123	7,3
Primo	288	109	3,4
Secondo	87	100	1,1
Oltre il secondo	1	30	0,0

MEGLIO NON FAR SAPERE...

Un esempio di una certa ritrosia trentina ad ammettere un problema legato alla presenza naturale sul nostro territorio di sostanze radioattive lo si può ritrovare nel posizionamento, alcuni decenni fa, di cartelli “Vietato asportare sassi” in prossimità delle vecchie aree di prospezione mineraria per l'uranio presenti nella zona del monte Tov (o Toff, tra le valli d'Algone e Rendena), dove è ancor oggi possibile trovare materiale di scarto dotato di una discreta emissione radioattiva. In assenza di qualunque spiegazione, quelle scritte potevano risultare addirittura controproducenti, inducendo il viandante a raccogliere le pietre, nel caso fossero di qualche valore! Nulla si diceva sul motivo del divieto. Si aveva paura di far sapere che sul territorio c'era uranio? Possibile che si ritenesse impossibile spiegare che c'era effettivamente un potenziale problema, al quale però si poteva porre rimedio piuttosto facilmente, effettuando misure, individuando i materiali pericolosi e risanando ove necessario? È triste che si preferisse incrociare le dita affinché il problema restasse nascosto sotto il tappeto, vivendo nel timore che il bubbone scoppiasse all'improvviso, anziché affrontarlo, risolverlo e così trasformare il problema in opportunità, alla fine potendo dire al mondo turistico “venite da noi perché siamo talmente bravi e attenti alla vostra salute che abbiamo eliminato anche quel possibile problema. Da noi, statene sicuri, non c'è nulla di cui preoccuparsi”.

La presenza di materiali radioattivi in Trentino non è limitata al monte Tov. Mineralizzazioni uranifere sono presenti nelle valli Lagorai, Giulis, Daone. Ricordiamo anche un episodio curioso. In Val di Genova, a seguito della segnalazione di un cittadino, si individuò un tratto di strada assai radioattivo, su cui passavano molte persone a piedi. Su intervento del Medico Provinciale (allora responsabile della Salute pubblica e della Prevenzione) si provvide a far coprire quel settore con uno spesso strato di ghiaia.



16. Foto di diversi anni fa, scattata sul versante occidentale del monte Tov, nella zona dove erano stati effettuati scavi di prova alla ricerca di minerali uraniferi. I cartelli di questo tipo sono stati in seguito (fortunatamente) rimossi. (©Mirco Elena)

Misure di mitigazione contro il radon

Le più semplici azioni di rimedio sono:

- Limitare temporalmente la presenza delle persone nei locali inquinati.
- L'aumento dell'aerazione dei locali. Questa nella maggioranza dei casi consente una diminuzione della concentrazione di radon. Tale aerazione

deve però avvenire in concomitanza (o subito prima) della presenza delle persone nei locali.

Nello sfortunato caso in cui un edificio risulti pesantemente inquinato dal radon sono consigliabili diversi interventi, ragionevolmente economici, specie se confrontati con il valore dell'immobile, quali:

- sigillatura dei pavimenti e delle pareti interrato con materiali impermeabili al radon;
- leggera sovrappressurizzazione dei locali abitati rispetto all'ambiente esterno all'edificio;
- ventilazione forzata nei locali abitati, utilizzando aria esterna (usando uno scambiatore di calore per ridurre le perdite energetiche);
- ventilazione dei muri e degli spazi cavi posti sotto i pavimenti;
- posizionamento di intercapedini aerate al di sotto del pavimento e tra le pareti interrato ed il terrapieno circostante;²⁹
- aspirazione, tramite pozzetti appositamente realizzati, dei gas provenienti dal sottosuolo, per poi disperderli all'aria aperta, lontano dalle finestre.

Ovviamente molta attenzione deve essere posta alle progettazioni dell'intervento, che deve tener conto dei vari fattori ambientali che possono interferire con la funzionalità dell'impianto (direzione predominante del vento, altezza relativa delle bocchette di ripresa e mandata, posizionamento delle ventole, valutazione della sovrappressione, area di copertura e quindi qualità del drenaggio, ...).

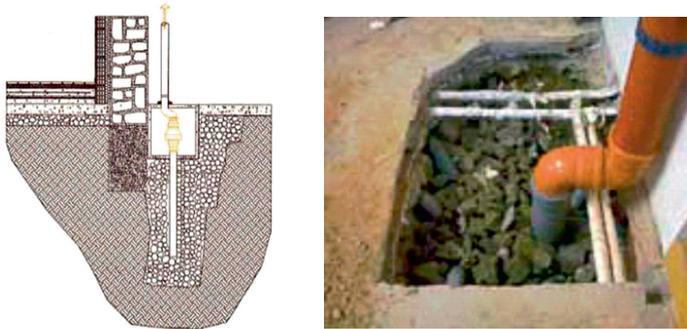
Esistono anche lavori pubblicamente disponibili, sia in italiano che soprattutto in inglese che trattano in dettaglio le modalità operative specifiche.³⁰

²⁹ Si dispongono sotto le caldane igloo e tubi plastici forati, sopra i quali viene steso un telo impermeabile al radon, in modo da convogliare verso l'esterno dell'edificio il gas raccolto sotto i locali da proteggere. Questo è un intervento possibile in particolare su nuove costruzioni.

³⁰ Ad esempio, le schede presenti in http://www.arpat.toscana.it/notizie/arpatnews/2014/174-14/174-14-tecniche-di-mitigazione-per-ridurre-la-concentrazione-di-radon-oppure-le-indicazioni-fornite-in-https://ambiente.provincia.bz.it/downloads/Radon_-_Le_contromisure.pdf o ancora la documentazione disponibile a <http://www.supsi.ch/dacd/ricerca/centri-competenze/centro-competenze-radon/pubblicazioni.html>.

Per quanto riguarda le numerosissime fonti in inglese, citiamo qui per brevità solo https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44149/9789241547673_eng.pdf;jsessionid=DE1CDBFE-1F9A8FBE64E22A77F0C04B5E?sequence=1.

Inoltre: Building Research Establishment (1998). "Guide to Radon Remedial Measures in Existing Dwellings: Dwellings with Cellars and Basements. BRE". "Active Soil Depressurization Radon Mitigation Standards for Low Rise Residential Buildings" (AARST 2006); "Standard Practice for Installing Radon Mitigation in Existing Low-Rise Residential Buildings" (ASTM 2007). United States Environmental Protection Agency (1993). "Radon Reduction Techniques for Existing De-



17-18. Esempi di bonifica di edificio preesistente: messa in depressione del terreno con drenaggio del radon tramite pozzetti di aspirazione.



19-20. Esempio di costruzione di un nuovo edificio con accorgimenti anti radon: messa in opera di vespaio igloo con aerazione e guaina d'isolamento.

Nella Provincia di Trento sono stati effettuati nel 1996 interventi in dieci scuole, in sette delle quali sono stati realizzati sistemi di ventilazione delle intercapedini (vespai e pareti a contatto con il suolo) ottenendo riduzioni della concentrazione di radon che vanno da 2 a 15 volte. In altre tre scuole si è agito con sistemi di ventilazione, o più precisamente adottando opportuni protocolli di ricambi di aria, che hanno portato ad una riduzione della concentrazione di radon da 1 a 8 volte.

Nella tabella seguente riportiamo esempi di interventi di mitigazione eseguiti in Alto Adige, dai quali si evince come, nella maggioranza dei casi, si siano ottenuti rilevanti risultati.

tached Houses: Technical Guidance (Third Edition) for Active Soil Depressurization”, USEPA Publication 625-R-93-011, Washington D.C. e pure il “Consumer’s Guide to Radon Reduction”. USEPA Publication 402-K-03-002, Washington D.C.

Tabella 17. Risultati di interventi di bonifica del radon eseguiti in Alto Adige.

Metodo	Edificio e superficie approssimativa in m ²	Piano	Massima concentrazione di radon misurata prima e dopo l'intervento (valori in Bq/m ³)	
			PRIMA	DOPO
Pozzetto Radon	casa priv. 150	-1	120.000 (cantina)	1500
	casa priv. 100-150	0	10.000	600
	asilo 300	0	2.500	400
	casa priv. 100-150	0	14000	300
	casa priv. 100	0	700	700
	casa priv. 100-150	0	8.000	1100
	casa priv. < 100	0	20.000	350
	albergo 200	0	2.700	400
	abitazione 100-150	-1	2.400	100
	casa priv. 100	-1	4.000	500
	casa priv. 100	1	8.000	2000
	casa priv. 100	0	1.500	< 200
	casa priv. 100	0	2.500	2500
	scuola 300	0	5.800	< 300
asilo 200	0	1.200	< 200	
casa priv. 100	-1	8.000	580	
abitazione < 100	-1	1.000	200	
Drenaggio sotto il pavimento	casa priv. 100-150	0	1.300	300
	casa priv. 300	-1	9.00	<200
	casa priv. 100-150	-1	casa nuova	230
	casa priv. 100-150	-1	2000	70
	casa priv. 100	-1	1800	180
Sovrappressione in casa	casa priv. 100	-1	3000	600
	casa priv. 100	0	2000	1200
	aula asilo 60	0	800	450
	sala giochi 50	-1	3000	200
	aula tecnica 80	-1	1100	280
Aspirazione da intercapedine	sala riunioni 50	-1	2500	400
	stanza casa priv. 20	-1	4500	290
	scuola 300	0	5000	100

(da: Tabella 4.1 a pag. 39 di http://www.salute.gov.it/imgs/C_17_opuscoliPoster_160_allegato.pdf)

Il radon non è mai stato di moda, ma ora...

Sulla base di quanto abbiamo esposto sin qui ci si potrebbe aspettare che i cittadini italiani siano ormai ben consci dell'importanza sanitaria di questo gas radioattivo, responsabile del maggior numero di tumori ai polmoni dopo il fumo di sigaretta. Dopo tutto sono passati ben tre decenni dalla prima indagine nazionale ad esso dedicata. Sorprende invece constatare che ben pochi ne conoscano l'esistenza e che ancora meno si preoccupino di far misurare la propria abitazione per mettersi al riparo dalle possibili pesanti conseguenze nel caso esso sia presente in quantità rilevante. Ciò colpisce particolarmente,

in quanto nel nostro paese si è prestata molta attenzione a problemi quali l'inquinamento da amianto o da onde elettromagnetiche, al piombo tetraetile, alle polveri sottili, ai residui chimici sulla frutta e la verdura... Come è possibile che una minaccia ufficialmente riconosciuta dai più importanti organismi nazionali ed internazionali come causa nel nostro paese di alcune migliaia di morti all'anno, non si sia conquistata un posto di primo piano nella cultura sanitaria del popolo italiano? Per di più il problema radon è risolvibile con misure ragionevolmente semplici ed alla portata delle tasche dei cittadini. Difficile rispondere, se non pensando che, tristemente, è tutta una questione di moda; spesso, per puro caso, un problema si impone all'attenzione collettiva e solo allora il mondo dei media e della politica se ne impossessano e lo fanno diventare un'urgenza nazionale, a prescindere dalla sua importanza intrinseca.

Nel corso degli anni ci sono state anche varie iniziative imprenditoriali che hanno cercato di far capire al grande pubblico la necessità di procedere a misurazioni del livello di radon indoor nelle abitazioni, fornendo i relativi servizi. Nessuna di queste ha riscosso particolare successo, nonostante il fatto che l'Italia sia tra i paesi più colpiti da questo problema.

Le cose ora fortunatamente cambieranno, grazie alla nuova legislazione europea. Dopo decenni di morti non necessarie, il radon diventerà uno dei tanti aspetti cui dovranno fare attenzione i costruttori di edifici e chi in essi deve vivere.

Il radon come strumento didattico: l'esperienza "P.D.R."

Verso la metà degli anni '90 del secolo scorso, quando la problematica radon era agli albori in Italia, un gruppo di esperti di varie materie (fisici, geologi, medici, matematici e biologi) testò con buon successo in diverse scuole medie inferiori del Trentino Alto Adige un'innovativa iniziativa didattica interdisciplinare ideata da Mirco Elena e mirata a far effettuare ai giovanissimi una vera ricerca scientifica sperimentale di misura del radon indoor, con lo scopo di riuscire ad affrontare, in modo coinvolgente e convincente, tematiche interessanti ma talora difficili da proporre a scuola, quali l'importanza della scienza (che permette di evidenziare pericoli non individuabili con i nostri sensi), la struttura microscopica della materia, la radioattività ambientale, la fisica delle radiazioni ionizzanti, i diversi tipi di rocce e suoli con le loro caratteristiche, l'effetto che questi hanno sulla qualità della vita nelle case, l'incertezza connessa a ogni misura sperimentale, gli accorgimenti da mettere in atto affinché gli edifici non presentino rischi per chi ci vive. Altri argomenti che si

potavano agganciare al P.D.R. erano la matematica sottesa a molti fenomeni naturali, gli effetti degli inquinanti sugli organismi viventi e le relative soglie normative, il rapporto rischio-benefici applicato agli interventi di risanamento edilizio antiradon. Sottolineiamo come il P.D.R. abbia rappresentato quasi un unicum per quanto riguarda la possibilità di affrontare tematiche connesse con le radiazioni ionizzanti senza esporre i giovani a nessuna dose extra rispetto a quella cui già sono sottoposti. Inoltre la procedura sperimentale adottata consente una visibilità diretta ed immediata del risultato ed ha un effetto di coinvolgimento assai superiore a quello ottenibile con una qualunque “scatola nera” che mostri un valore di radiazione su di un display.

Il percorso didattico iniziava con la somministrazione di un questionario per valutare il livello di conoscenza ed il tipo di sensibilità dei giovani studenti nei confronti di diverse tematiche. Si procedeva poi con gli incontri con gli esperti, che proponevano approfondimenti nei vari campi coinvolti, dalla fisica alla geologia, alla biologia, alla valutazione dei rischi, ecc.

L'esperimento vero e proprio di misurazione del radon prevedeva la costruzione di un semplice rivelatore a tracce da parte degli alunni, a ciascuno dei quali veniva fornito un kit, composto da: barattolino di yogurt vuoto e pulito, un pezzetto di plastilina, un foglietto di pellicola del tipo di quello usato per avvolgere gli alimenti (domopak o equivalente). Vi era infine il cuore del rivelatore, costituito da un quadrato di circa $3 \times 3 \times 0,15$ cm di “tastrak”, uno speciale policarbonato sviluppato per esperimenti di fisica delle radiazioni da un gruppo del dipartimento di fisica dell'università di Bristol (GB). Gli studenti erano istruiti a fissare con la plastilina il tastrak al fondo del barattolino, facendo molta attenzione a non sporcarne il lato superiore. Il barattolino veniva quindi sigillato con la pellicola e a quel punto i rivelatori erano pronti per l'uso. Oltre a una misura in classe venivano effettuati campionamenti nella camera da letto dei giovani partecipanti ed in altri ambienti ritenuti interessanti (ad es. spazi ipogei, ecc.).

Effettuata l'esposizione, idealmente durata qualche settimana, i rivelatori venivano aperti ed il tastrak recuperato e sottoposto da parte della ditta fornitrice ad attacco chimico in un bagno caustico. L'attacco dissolveva parzialmente il materiale plastico, in modo particolare dove il reticolo cristallino era stato danneggiato dalla radiazione alfa emessa nel decadimento del radon; in tal modo si creavano dei veri micro fori conici nella plastica, facilmente visibili osservando la superficie con un microscopio. Le piastrine plastiche venivano restituite agli studenti, perché provvedessero al conteggio delle tracce, evidenziate grazie ad un proiettore in cui il tastrak veniva posto come se si trattasse di una diapositiva o alternativamente fornendo loro delle stampe fo-

tografiche molto ingrandite della piastrina. Il vantaggio di questa procedura era che tutti gli studenti della classe effettuavano individualmente il conteggio. In tal modo scoprivano che in certi casi era difficile valutare certe “tracce problematiche”; si doveva quindi decidere se includerle o meno nel totale. Per questo i conteggi prodotti dai diversi studenti per la *medesima* piastrina potevano differire, trovandosi così di fronte al fatto che il risultato di una stessa misura è affetto da una inevitabile incertezza, ciò che consente di introdurre spontaneamente alcuni importanti concetti statistici.

Avendo visto con i loro occhi i forellini dovuti alla radiazione ionizzante, per gli studenti risultava immediatamente intuibile cosa succedeva quando le particelle alfa colpiscono i tessuti viventi anziché la plastica. Si offriva quindi l'occasione di approfondire i differenti tipi di radiazione, le relative capacità di penetrazione, i danni prodotti, i rischi nei confronti dei diversi organi colpiti. Si poteva inoltre affrontare il concetto di rischio sanitario, con le relative soglie di legge.

Con l'accumularsi dei dati ottenuti con le piastrine di tastrak, la scuola poteva anche iniziare a compilare un miniatlante radon del proprio territorio e ciò offriva l'occasione di correlare le concentrazioni del radon con il tipo di substrato geologico o eventuali linee di faglia.

Il P.D.R. si concludeva con un secondo questionario sottoposto agli studenti, per valutare il grado di comprensione e di apprezzamento dei vari procedimenti, nonché per avere suggerimenti per possibili miglioramenti.

Avendo toccato il tema della radioattività, era possibile per l'insegnante allargare il discorso a temi importanti come le conseguenze sull'organismo umano delle radiazioni ionizzanti, come nel caso dei bombardamenti di Hiroshima e Nagasaki (dai quali derivano buona parte delle moderne conoscenze sull'effetto delle radiazioni ionizzanti). Altri temi erano da una parte le centrali nucleari e dall'altra il rischio che le radiazioni cosmiche pongono ai viaggi interplanetari dei futuri astronauti.

Riassumendo, il P.D.R. prevedeva le seguenti fasi:

1. Questionario iniziale;
2. Introduzione alla natura atomica della materia e ai fenomeni radioattivi, con visita a una collezione di rocce e minerali;
3. Origine, propagazione ed effetti del gas radon;
4. Descrizione di un facile metodo per la rilevazione del gas radon;
5. Costruzione di un semplice rivelatore passivo di radon;
6. Effettuazione delle misure, in classe e nelle abitazioni degli alunni;
7. Trattamento delle piastrine sensibili al radon da parte della ditta fornitrice;

8. Conteggio da parte degli studenti delle tracce lasciate dalle particelle alfa sulle piastrine;
9. Discussione dei risultati e correlazioni con la realtà territoriale;
10. Eventuali approfondimenti;
11. Questionario finale.

Conclusioni

L'inquinamento indoor da radon è ormai riconosciuto universalmente come un serio problema di sanità pubblica, responsabile annualmente di alcune migliaia di decessi in Italia. Date le sue caratteristiche, non è possibile individuare a tavolino quali sono gli edifici che ne sono affetti. La buona notizia è che la sua presenza è però facilmente individuabile grazie a strumentazioni e procedure affidabili e a modico prezzo. Solo in questo modo si riesce a capire se un ambiente di vita o di lavoro presenta concentrazioni rischiose per la salute. Nei casi in cui questo inquinamento è rilevante si possono mettere in atto vari interventi, più o meno risolutivi e impegnativi dal punto di vista tecnico, che in quasi tutti i casi non hanno un costo particolarmente impattante (a maggior ragione se confrontato con il valore dell'edificio).

* * *

In Italia è demandato alle regioni e province autonome l'affrontare il problema radon, pur se con la collaborazione e il coordinamento di valide istituzioni nazionali. Ciò ha prodotto un quadro molto diverso da territorio a territorio, con alcune aree molto ben studiate mentre su altre si hanno pochi dati. Anche le modalità di pubblicizzazione dei dati disponibili sono assai variabili, con alcune regioni/province che hanno divulgato in maniera dettagliata (pur sempre proteggendo la privacy) i dati disponibili, con cartine che danno un'idea immediata delle aree particolarmente affette, mentre altre si sono limitate a pubblicare dati mediani piuttosto criptici per la maggioranza dei cittadini. Al primo gruppo appartiene sicuramente la provincia di Bolzano, mentre quella di Trento lascia un po' a desiderare in quanto a trasparenza e completezza delle informazioni, quasi soffriva ancora di una certa paura di far sapere, forse lasciato dell'atteggiamento adottato al tempo della prima indagine nazionale. Auspichiamo che, con un po' di sforzo, su questo piano si possa presto migliorare, così da facilitare la crescita dell'attenzione al radon da parte della nostra popolazione.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano per la gentile collaborazione il dr. Stefano Pegoretti dell'APPA di Trento e la dr.a Monica Marani del Servizio di fisica sanitaria dell'APSS di Trento.

Bibliografia minima

Ben fatto, esaustivo e simpaticamente illustrato l'opuscolo: http://www.salute.gov.it/imgs/C_17_opuscoliPoster_160_allegato.pdf

Varie e interessanti le guide disponibili in inglese al sito: <https://www.epa.gov/radon/publications-about-radon>

Radon in Workplaces. Implementing the Requirements in Council Directive 2013/59/Euratom, disponibile a: <https://op.europa.eu/it/publication-detail/-/publication/93cc4aff-47c5-11ea-b81b-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF>

ICRP, 2010. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1).

Disponibile a: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_40_1

WHO, 2009. WHO Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective. WHO Press, Geneva.

“Rischio radon: cosa è, come si previene, come si misura, come si interviene. 13 quesiti sul problema Radon”, disponibile al sito http://www.elettra.trieste.it/files/Documents/Radiation%20Protection/RP_docs/radon_ANPEQ.pdf

Il radon: cos'è e come possiamo evitarlo. Vademecum per professionisti e cittadini. Enea (2014). Disponibile a: <http://www.irp.enea.it/it/servizi/documenti/opuscolo-radon>