

I fattori che influiscono sul radon negli ambienti di lavoro: analisi dei dati in Toscana

Silvia Bucci⁽¹⁾, Andrea Iacoponi⁽¹⁾, Marta Pantani⁽¹⁾, Gabriele Pratesi⁽¹⁾, Maria Letizia Viti⁽¹⁾, Sara Antignani⁽²⁾, Francesco Bochicchio⁽²⁾

⁽¹⁾ARPAT, Unità Operativa Radioattività e Amianto, via Ponte alle Mosse 211, 50144 Firenze

⁽²⁾Istituto Superiore di Sanità, Reparto Radioattività e suoi effetti sulla salute, viale Regina Elena 299, 00161 Roma

Introduzione

In Toscana sono state effettuate diverse indagini per conoscere la distribuzione dei livelli di radon sul territorio in abitazioni, scuole e, diversamente da altre regioni, anche negli ambienti di lavoro non sotterranei né particolari (quali le terme).

Con la Delibera di Giunta Regionale n. 1019 del 26 novembre 2012 sono stati pubblicati i risultati dell'Indagine regionale sul gas radon negli ambienti di vita e di lavoro che si è svolta tra il 2007 e il 2010 (Bucci S., 2012); l'indagine ha coinvolto circa 2000 abitazioni, oltre 1200 luoghi di lavoro, e 86 scuole, distribuiti sul territorio regionale ma concentrati nei Comuni dove erano attese le concentrazioni di radon più elevate, sulla base dei dati e indicazioni geologiche disponibili.

Con la stessa delibera la Regione Toscana ha proceduto alla *prima individuazione* delle aree ad elevata probabilità di alte concentrazioni di radon, ai sensi dell'art. 10-sexies del D.Lgs. 230/95 s.m.i.. Tale prima individuazione costituisce un primo punto di arrivo delle attività di indagine sulla presenza del radon svolte in Toscana a partire dal 1989, ma il termine *prima individuazione* riportato anche dalla normativa implica anche un punto di partenza per stadi di approfondimento successivi nella conoscenza della distribuzione del radon sul territorio, che viene spesso chiamata mappatura.

In questo quadro di approfondimento si è inserito il progetto relativo all'*Indagine regionale sulla concentrazione di radon nelle scuole 2013-2015*, approvato con Decreto Dirigenziale n. 5925/2012, che ha coinvolto gli edifici scolastici nei Comuni dove in passato sono emersi valori di concentrazione di radon superiori ai livelli di azione previsti dalla normativa per gli ambienti di lavoro e le scuole, o ai livelli di riferimento raccomandati per le abitazioni. L'indagine nelle scuole è stata condotta da un punto di vista operativo interamente da personale ARPAT nel 2014-2015, con le misure annuali in 60 edifici effettuate fra giugno 2014 e luglio 2015.

In questo ambito di successivi stadi di approfondimento si inseriscono anche l'analisi dei dati per studiare l'influenza di alcuni fattori sui livelli medi di radon, a partire dalla geologia, un tema non affrontato qui, fino all'analisi della correlazione fra le caratteristiche costruttive degli edifici e la concentrazione di radon nelle abitazioni, luoghi di lavoro e scuole.

Il lavoro presenta una prima parte dei risultati dell'analisi statistica dei dati effettuata in collaborazione con l'Istituto Superiore di Sanità, volta in particolare ad evidenziare quali fattori contribuiscono a determinare i livelli di radon negli ambienti di lavoro, che anche la normativa vigente prevede di individuare. Infatti, a questo proposito, il D.Lgs. 230/95 e s.m.i. richiede che vengano identificate non solo le aree a maggiore probabilità di elevati valori di concentrazione di radon, ma anche le caratteristiche dei luoghi di lavoro maggiormente correlate con alti valori di concentrazione di radon.

A tale scopo la Regione Toscana ha un potenziale informativo rilevante, in quanto l'indagine del 2007-2010 ha coinvolto circa 1200 luoghi di lavoro di diverse tipologie, dagli uffici, alle industrie e aziende artigianali, ai servizi e gli ospedali. In ciascun luogo di lavoro sono stati misurati più locali per due semestri consecutivi mediante dosimetri passivi contenenti rivelatori a tracce nucleari del tipo CR-39; è stato inoltre compilato un questionario contenente alcune informazioni di carattere strutturale sull'edificio e sul locale misurato, raccolte proprio per potere successivamente valutare l'impatto delle caratteristiche sui valori medi della concentrazione di radon. I questionari sono

analoghi a quelli utilizzati per le scuole e le abitazioni.

Nel seguito è illustrato in sintesi il metodo di analisi dei dati e sono riportati e discussi i principali risultati della regressione multivariata.

Metodo di analisi dei dati

L'analisi dei dati di concentrazione di radon è stata effettuata nell'ambito di un accordo di collaborazione fra ARPAT e Istituto Superiore di Sanità; l'impostazione del lavoro, incluso la discussione sulle variabili significative e sui potenziali elementi da approfondire, è stata effettuata in collaborazione, mentre l'analisi statistica è stata pianificata ed eseguita dall'ISS, utilizzando il software *Stata*.

L'analisi è stata condotta su tutti i dati di concentrazione di radon relativi alle indagini realizzate in Regione Toscana dal 2007 in poi, in quanto le informazioni sugli edifici raccolte con i questionari sono confrontabili fra loro e le misure più recenti. I dati delle indagini precedenti non contengono infatti alcune delle informazioni utilizzate come variabili (risultate significative) nell'analisi condotta attualmente, e pertanto sono stati esclusi.

I dati utilizzati per l'analisi consistono della misura di concentrazione media annua (ottenuta ponderando sul periodo di esposizione dei due dosimetri semestrali) nei singoli locali e delle informazioni su alcune caratteristiche degli edifici raccolte con i questionari, al fine di studiare la loro influenza sulla concentrazione di radon e identificare quelle caratteristiche che hanno maggiore impatto, i cosiddetti fattori principali.

L'analisi è stata effettuata separatamente per i luoghi di lavoro, le scuole e le abitazioni, e i risultati confrontati fra loro. E' stato applicato un modello di regressione multivariata ad effetti misti, che prende in considerazione tutte le variabili contenute nei questionari contemporaneamente, senza considerare le potenziali correlazioni fra queste (ad esempio, l'epoca di costruzione di un edificio potrebbe essere correlata alla presenza di un vespaio o di piloti), e quindi senza introdurre variabili di interazione che avrebbe aumentato notevolmente il numero complessivo di variabili.

Dopo uno studio iniziale sulla completezza e sul potenziale informativo delle singole variabili, sono state scelte le variabili con maggiore impatto e per le quali le informazioni erano più complete, che sono risultate:

- il comune in cui si trova l'edificio
- l'edificio
- l'unità strutturale misurata all'interno dell'edificio (ad esempio una determinata abitazione in un grande edificio)
- la tipologia dell'edificio (6 categorie di dimensioni diverse)
- l'epoca di costruzione dell'edificio (5 categorie da prima del 1870 a dopo il 1960)
- piano al quale si trova il locale misurato
- il materiale che compone le pareti del locale misurato (7 categorie dal cemento al tufo e pietre naturali)
- lo stato di conservazione del locale misurato (5 categorie qualitative)
- il grado di aerazione del locale misurato (3 categorie semi-quantitative).

Nello studio preliminare alla scelta del modello di regressione multivariata, sono anche state esaminate:

1. la correlazione con la classe geologica della nuova carta regionale 1:250.000 (2011) come fattore di aggregazione territoriale dei dati; il comune è tuttavia risultato una variabile migliore nello spiegare i livelli medi di radon. Questo risultato merita senz'altro un approfondimento, ma è tuttavia coerente con il fatto che il potere predittivo degli indicatori geologici non è elevato in generale, e non significativo quando i livelli medi di radon sono più bassi. Va ricordato che in Toscana una analisi della correlazione fra livelli di radon e indicatori geologici è stata effettuata più volte da ARPAT (con metodologia semplificata, senza impiego di analisi statistiche), con il principale obiettivo di individuare zone dove possono essere presenti concentrazioni elevate di radon e pianificare le nuove indagini;

2. l'insieme delle variabili che descrivono l'attacco a terra dell'edificio, che tuttavia non sono risultate significative, presumibilmente perché sono variabili in parte correlate fra loro o con quelle considerate nel modello, le informazioni non sono sempre disponibili in modo completo, oppure può essere presente una errata compilazione in un numero rilevante di casi. Questo fatto dovrà essere considerato nella revisione del questionario da utilizzare nelle prossime indagini.

Risultati e discussione

Nella Tabella I è riportato il numero di dati inclusi nell'analisi delle abitazioni, dei luoghi di lavoro, delle scuole. Va tenuto presente che i dati nelle scuole sono distribuiti in un numero di edifici molto minore rispetto alle abitazioni, e su un numero limitato di comuni.

Tabella I – *Distribuzione dei locali analizzati nell'ambito della collaborazione tra ARPAT e ISS*

Tipologia	Locali	Abitazioni/LL/Scuole	Edifici	Comuni
Abitazioni	3660	1761	1739	284
Luoghi di Lavoro (LL)	2914	1137	1128	212
Scuole	1054	160	140	45
Totale	7628	3058	2999*	

* il numero totale di edifici non corrisponde alla somma del numero di edifici delle tre tipologie perché in alcuni edifici ci sono sia abitazioni che luoghi di lavoro.

Nella Tabella II sono sintetizzati i risultati dell'analisi di regressione multivariata. In primo luogo emerge che lo stesso fattore ha una influenza potenziale anche molto diversa sui livelli medi di radon in luoghi di lavoro, scuole e abitazioni; il piano a cui si trova il locale misurato, ad esempio, ha un impatto rilevante nelle abitazioni, meno nei luoghi di lavoro e nelle scuole, dove la compartimentazione fra i piani di uno stesso edificio è in media molto inferiore. Anche l'aerazione dei locali è più influente nei luoghi di lavoro rispetto a scuole e abitazioni, mentre lo stato di conservazione dei locali emerge sorprendentemente come fattore rilevante nelle scuole, a differenza di abitazioni e luoghi di lavoro.

Tabella II – *Sintesi dei risultati dell'analisi di regressione multivariata*

Fattore	Quota di varianza spiegata rispetto alla variabilità totale		
	Abitazioni	Luoghi di lavoro	Scuole
Tipologia edificio	3%	2%	19%
Epoca di costruzione	2%	2%	0%
Piano	16%	2%	2%
Composizione pareti	6%	5%	5%
Stato di conservazione	0.3%	0%	5%
Aerazione	0.6%	2%	0.3%
Varianza totale spiegata dalla parte fissa del modello	27%	14%	32%
Varianza totale spiegata dal modello	84%	68%	81%

L'impiego di alcuni materiali da costruzione, in particolare il tufo e alcune pietre naturali, ha una influenza

molto più rilevante di quanto emerso in altri studi europei (Gunby et al, 1993; Bräuner E. V. et al, 2013; Borgoni R. et al., 2014), sia in abitazioni, che nei luoghi di lavoro e scuole; questo fatto implica che negli edifici dove è presente il tufo o altri materiali con livelli elevati di radioattività, le tecniche di intervento per la riduzione della concentrazione di radon dovranno garantire una maggiore riduzione del radon proveniente dal suolo, ad esempio con l'uso di sistemi di ventilazione più potenti, per rispettare i livelli di riferimento della Direttiva 2013/59/Euratom.

Un ulteriore elemento che differenzia le scuole rispetto alle abitazioni e luoghi di lavoro è che la tipologia di edificio per le scuole è un fattore molto determinante, in altri termini il livello di radon nelle scuole è spiegato dalle variabili considerate in misura minore rispetto alle abitazioni (soprattutto) e ai luoghi di lavoro, con l'implicazione che per stimare quanto radon c'è in una scuola, dopo avere considerato in quale comune si trova e la tipologia dell'edificio, la soluzione migliore è fare le misure. Questo risultato potrebbe tuttavia essere influenzato dalla distribuzione delle scuole considerate in pochi comuni e dal numero elevato di locali misurati in ogni scuola, per cui è opportuno valutare anche le interazioni fra variabili.

In sintesi, nei luoghi di lavoro il fattore che influisce maggiormente sulla media della concentrazione di radon è risultato il materiale delle pareti del locale misurato, e in misura minore la tipologia di edificio (piccolo o grande), l'epoca di costruzione e l'aerazione del locale. Nessuna influenza dello stato di conservazione, ma soprattutto molto limitata quella del piano del locale rispetto alle abitazioni, ovvero poche sono le differenze di concentrazione di radon fra locali al piano terreno e quelli al primo piano, dove si trovano la maggior parte dei locali misurati. Questo risultato può indurre a ritenere che per valutare l'esposizione al radon in un ambiente di lavoro le misure potrebbero essere effettuate solo ai piani terra, ma è necessario a tal fine approfondire l'analisi per valutare la sua validità anche in altre situazioni ed escludere effetti di correlazione con altre variabili, quali la destinazione d'uso dei locali: va infatti tenuto presente che la variabilità fra i locali di uno stesso luogo di lavoro è superiore a quella di una abitazione, in parte a causa del diverso uso (Bucci S. et al, 2011).

Conclusioni

Questo lavoro, frutto di una collaborazione fra ARPAT e l'Istituto Superiore di Sanità, presenta la prima analisi statistica dei dati di concentrazione di radon condotta in Italia per lo studio dei fattori che possono influire sui livelli medi di radon negli ambienti di lavoro, confrontando i risultati con quelli ottenuti, con lo stesso approccio, per le abitazioni e le scuole.

In sintesi emerge che i fattori che influenzano maggiormente la concentrazione di radon negli ambienti di lavoro sono il materiale da costruzione del locale misurato, con circa il 5% di varianza spiegata, e, in misura minore, l'epoca di costruzione, il piano e l'aerazione dei locali misurati (ognuno col 2% di variabilità spiegata). Rispetto alle abitazioni, una quota rilevante della variabilità complessiva dei dati nei luoghi di lavoro è invece associata a fattori connessi all'edificio, ma non individuati specificamente.

Da sottolineare invece che il materiale da costruzione ha in generale un effetto molto più importante di quanto emerso da altri studi (6% rispetto a 1-2%), e può determinare un contributo determinante sui livelli più elevati della concentrazione di radon, ad esempio nel caso dell'impiego di tufo.

Questo fatto implica che negli edifici dove è presente il tufo, le tecniche di intervento di riduzione dovranno garantire una maggiore riduzione del radon proveniente dal suolo, ad esempio con l'uso di sistemi di ventilazione più potenti, per rispettare i livelli di riferimento della Direttiva 2013/59/Euratom.

Inoltre, il risultato che la variabilità spiegata dai fattori influenti più importanti sia molto inferiore nei luoghi di lavoro rispetto alle abitazioni (14% rispetto al 27%) indica che è necessaria molta cautela nella normativa prima di escludere alcuni luoghi di lavoro dall'obbligo delle misure, in quanto la capacità previsionale è molto ridotta: questo aspetto merita quindi un approfondimento successivo. D'altro canto, la variabilità minore della concentrazione di radon nei luoghi di lavoro in funzione del piano potrebbe spingere a valutare l'ipotesi di effettuare misure solo al piano terra, ipotesi che andrà attentamente verificata alla luce della variabilità del radon ad esempio in funzione dell'uso degli ambienti di lavoro e della loro ventilazione.

Un approccio ai dati basato sull'analisi quantile, complementare all'analisi riportata in questo articolo, consentirà di fare emergere quali fattori influenzano maggiormente i livelli più elevati di concentrazione di radon.

Bibliografia

Bucci S. (a cura di). Indagine regionale sulla concentrazione di radon negli ambienti di vita e di lavoro – Risultati nei Comuni della Toscana. *ARPAT* (2012). Scaricabile dal sito: <http://www.arpat.toscana.it/documentazione/catalogo-pubblicazioni-arpat/indagine-regionale-sulla-concentrazione-di-radon-negli-ambienti-di-vita-e-di-lavoro>.

Gunby J., Darby S., Miles J., Green B & Cox D. Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom. *Health Physics* **64**, 2-12 (1993).

Bräuner E. V., Rasmussen T. V. & Gunnarsen L. Variation in residential radon levels in new Danish homes. *Indoor air* **23**, 311-317 (2013).

Borgoni R., De Francesco D., De Bartolo D. & Tzavidis N. Hierarchical modeling of indoor radon concentration: how much do geology and building factors matter? *Journal of environmental radioactivity* **138**, 227-237 (2014).

Bucci S., Pratesi G., Viti M. L., Pantani M., Venoso G., Bochicchio F. Radon in workplaces: first results of an extensive survey and comparison with radon in homes. *Radiation Protection Dosimetry* **145** N. 2-3, 202-205 (2011).