



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente



MINISTERO DELL'AMBIENTE
E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Qualità dell'aria indoor e rischio radon in Italia e realtà confrontabili:

la normativa, la letteratura scientifica,
le certificazioni energetiche

(Accordo di collaborazione MASE-ISPRA
per supporto all'attività di prevenzione
e riduzione del rischio
di esposizione al radon indoor)

**QUADERNI
AMBIENTE E SOCIETÀ**

27 / 2023



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente



MINISTERO DELL'AMBIENTE
E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Qualità dell'aria indoor e rischio radon in Italia e realtà confrontabili:

la normativa, la letteratura scientifica,
le certificazioni energetiche

(Accordo di collaborazione MASE-ISPRA
per supporto all'attività di prevenzione
e riduzione del rischio
di esposizione al radon indoor)

**QUADERNI
AMBIENTE E SOCIETÀ**

27 / 2023

Informazioni legali

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), insieme alle 21 Agenzie Regionali (ARPA) e Provinciali (APPA) per la protezione dell'ambiente, a partire dal 14 gennaio 2017 fa parte del Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente (SNPA), istituito con la Legge 28 giugno 2016, n.132.

Le persone che agiscono per conto dell'Istituto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questa pubblicazione.

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma
www.isprambiente.gov.it

ISPRA, Quaderni Ambiente e Società 27/23
ISBN 978-88-448-1183-9

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica

Grafica di copertina: Elena Porrazzo ISPRA – Area Comunicazione Ufficio Grafica

Coordinamento pubblicazione online:

Daria Mazzella

ISPRA – Area Comunicazione

Autori

Elisabetta De Maio, Francesca De Maio, Alessandro Di Menno Di Bucchianico, Raffaella Gaddi, Giuliana Giardi, Arianna Lepore, Daniela Santonico, Barbara Bellomo, Elisa Raso (ISPRA)

Clara Peretti (consulente ISPRA)

Simone Bergantino (tirocinante ISPRA, Università degli Studi Roma Tre)

Margherita Arpaia, Barbara Castrucci (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica)

Ringraziamenti

Si ringrazia la dott.ssa Silvia Brini (ISPRA) per la disponibilità, il supporto fornito e i preziosi suggerimenti.

Sommario

1 Premessa	4
2 Normativa e documenti di riferimento	5
2.1 Introduzione	5
2.2 La situazione Normativa europea e nazionale	8
2.3 Norme e leggi europee	24
2.4 Norme e leggi nazionali	26
2.5 Norme, leggi e linee guida a livello locale	28
2.6 Documenti internazionali	31
2.6.1 Norme ISO	32
2.7 Documenti nazionali	35
2.8 Sitografia	36
2.8.1 Pubblicazioni SNPA e Organizzazioni istituzionali	41
3 Analisi della letteratura scientifica	43
3.1 Introduzione	43
3.2 Metodologia	43
3.2.1 Mappatura delle aree a rischio radon	44
3.2.2 Misurazione e concentrazione del radon	56
3.2.3 Radon ed efficientamento energetico	87
3.2.4 Misure di mitigazione del radon	132
3.2.5 Conclusioni generali	163
4 Certificazioni per l'efficienza energetica in Italia e in realtà confrontabili	166
4.1 La legislazione europea sull'efficienza energetica degli edifici	166
4.2 La normativa di riferimento sulla certificazione energetica in Italia	170
4.3 I protocolli per la certificazione energetico-ambientale	181
4.3.1 I protocolli internazionali	185
4.3.2 I protocolli nazionali	202
5 Conclusioni	217

1 Premessa

Il radon è la seconda causa di morte per cancro ai polmoni dopo il fumo ed è classificato cancerogeno umano di gruppo 1^{1, 2}. Il pericolo per la salute dell'uomo deriva dalla sua trasformazione in altri elementi a loro volta radioattivi, i cosiddetti "figli del radon". La concentrazione del radon e dei suoi prodotti di decadimento nell'aria outdoor non presenta un rischio per la salute, trattandosi di gas che si disperdono rapidamente, mentre negli ambienti indoor potrebbero accumularsi raggiungendo concentrazioni rilevanti. In generale, i livelli di inquinanti negli ambienti confinati possono essere elevati rispetto a quanto misurato negli spazi esterni e, inoltre, il considerevole numero di ore trascorse negli ambienti chiusi (spesso oltre il 90%) può determinare una rilevante esposizione a contaminanti causando un rischio per la salute. Ne consegue che la permanenza in edifici progettati e mantenuti senza tenere nella giusta considerazione la qualità dell'aria indoor o realizzati con materiali non idonei, può determinare effetti dannosi sulla salute.

L'efficientamento energetico degli edifici è oramai riconosciuto essere un indirizzo prioritario nelle strategie di molti Paesi. Le caratteristiche degli edifici efficienti dal punto di vista energetico, come la sigillatura, se associate ad una ventilazione non adeguata possono d'altra parte compromettere la qualità dell'aria negli ambienti di vita e, in particolare, aumentare la concentrazione degli inquinanti, tra cui il gas radon. Pertanto, è essenziale essere a conoscenza del rischio radon quando vengono messi in atto interventi di efficientamento energetico al fine di prevenire i rischi correlati.

Il presente quaderno è stato realizzato nell'ambito dell'Accordo di collaborazione per il supporto all'attività di prevenzione e riduzione del rischio di esposizione al radon indoor stipulato a ottobre 2021 tra il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica e l'ISPRA. Tra le finalità principali dell'Accordo: accrescere le conoscenze sulla problematica del rischio del radon indoor, aumentare la consapevolezza della popolazione sui rischi sanitari derivanti dall'esposizione al radon indoor.

Il quaderno offre un'analisi della documentazione tecnica e scientifica, della normativa e della documentazione relativa alle certificazioni in materia di efficientamento energetico e gas radon con riferimento alla realtà italiana e ad altre realtà con essa confrontabili.

¹ WHO 2009. World Health Organization (2009). WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective.

² International Agency for Research on Cancer (1988). IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Man-made Mineral Fibres and Radon. IARC Monograph Vol. 43, Lyon, France.

2 Normativa e documenti di riferimento

2.1 Introduzione

La comunità scientifica sostiene che uno dei principali contributi ai livelli di concentrazione di radon all'interno degli ambienti confinati (radon indoor) è rappresentato dal radon emesso dal suolo sottostante le costruzioni e dai terreni nelle prossimità³.

La problematica del radon impone una sfida e una serie di azioni affinché vengano ridotti al minimo l'esposizione della popolazione e i conseguenti effetti sulla salute.

Tale sfida richiede una serie di azioni multilivello e in comparti molto diversi gli uni dagli altri come l'edilizia, la salute, la sostenibilità e l'efficientamento energetico. Per interventi in ambiti multidisciplinari è necessario un quadro di norme e regolamenti che indirizzino le strategie e le volontà dei vari Paesi e che tengano in considerazione la salute della popolazione. Tali normative e raccomandazioni dovrebbero essere accompagnate da attività di *Citizen science* per accrescere la consapevolezza sui rischi dell'esposizione al radon indoor, stimolando a diffusione le attività di misurazione e monitoraggio del radon e qualora necessarie intraprendendo azioni di risanamento. In tale contesto, fondamentale è la redazione e l'adozione del Piano d'azione nazionale radon che rappresenta un passo strategico di grande rilevanza⁴.

Tema non trascurabile è il radon nei luoghi di lavoro e di vita lì ove l'ambiente di vita diviene (causa emergenze sanitaria e trasformazioni nella modalità di svolgimento delle professioni) a tutti gli effetti anche ambiente di lavoro.

Numerosi sono gli studi internazionali che si sono occupati della normativa sull'esposizione⁵ al gas radon all'interno degli ambienti confinati⁶. Emerge tuttavia una disomogeneità sul tema in materia di salute pubblica e di normativa di riferimento. La mancanza di metodologie consolidate e di procedure condivise tra i vari Paesi europei e internazionali ha prodotto da un lato una preziosa e ricca attività

³ Radiological evaluation of by-products used in construction and alternative applications; Part I. - preparation of natural radioactivity database Sas, Z., Doherty, R., Kovacs, T., Soutsos, M., Sha, W., & Schroeyers, W. (2017). Radiological evaluation of byproducts used in construction and alternative applications; Part I. - preparation of natural radioactivity database. *Construction and Building Materials*, 150, 227-237. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.167>

https://pureadmin.qub.ac.uk/ws/portalfiles/portal/130564720/DB1_1_s2.0_S0950061817310577_main.pdf

⁴ <https://www.radonorm.eu/news/radonorm-presented-and-discussed-at-the-sra-europe-2022-conference/>

⁵ <http://radon.iss.it/tag/organismi-internazionali/>

⁶ L'approccio RAD_CAMPANIA per la pianificazione, prevenzione e valutazione dell'impatto sugli ambienti antropici e naturali derivante dal superamento dei valori soglia di concentrazione del gas Radon. Albina Cuomo, Domenico Guida, Simona Mancini, Michele Guida, ISBN 9788888648453

di ricerca e monitoraggio, dall'altro il proliferare di numerose raccomandazioni e metodiche operative originate da approcci diversificati.

La normativa italiana sul radon ha subito numerose modifiche nel corso degli anni. La complessità della materia ha sofferto della carenza di una normazione univoca nazionale che individuasse limiti di riferimento per la concentrazione di radon indoor ed al contenuto di radioattività nei materiali da costruzione. In Italia, prima del recente D.lgs. 101/2020 del 31 luglio 2020 e successive integrazioni,⁷ le norme che disciplinavano l'ambito della radioprotezione dal pericolo delle radiazioni ionizzanti erano costituite unicamente dal D.lgs. 230/95 del 17 marzo 1995 (modificato dai decreti D.lgs. 241/2000, D.lgs. 257/2001, D.lgs. 100/2011 e D.lgs. 45/2014).

La direttiva europea di riferimento 2013/59/EURATOM racchiude in sé tutte le principali situazioni di esposizione possibili alle radiazioni ionizzanti, sia per l'esposizione in ambito lavorativo, che per l'esposizione della popolazione in genere. Tale direttiva è stata recepita nel decreto legislativo D.lgs. 101/2020⁸ del 31 luglio 2020, entrato in vigore il 27 agosto 2020, che segna in Italia un passaggio normativo unico in quanto regola tutti gli aspetti connessi al tema delle radiazioni ionizzanti. Nel presente paragrafo non tratteremo in dettaglio il D.lgs. 101/2020 e successive integrazioni, ma solo i primi articoli ove sono elencati i principi generali base per il contenimento dell'emissione in ambiente di radiazioni ionizzanti. Negli articoli iniziali si sottolinea l'importanza di giustificare e riconsiderare ciclicamente le attività che implicano l'esposizione alle radiazioni ionizzanti. Le esposizioni devono essere mantenute al livello più basso possibile, tenendo in considerazione i fattori economici, sociali e abitativi. Se da un lato viene definito l'obbligo di rimanere al di sotto dei limiti stabiliti, non viene mai menzionato un valore nullo di esposizione ai livelli di radiazione naturali.

Tra gli aspetti fondamentali trattati nel decreto, oltre alle definizioni e ai principi generali, sono enunciati e definiti i limiti consentiti, le autorità competenti, e tutta una serie di problematiche connesse al radon, compresa l'enunciazione di regole ben precise riguardanti i numerosi campi di applicazione (esposizioni mediche, della popolazione, dei lavoratori, regolamenti per gli impianti nucleari, rifiuti radioattivi

⁷ Decreto legislativo 25 novembre 2022, n. 203, recante: «Disposizioni integrative e correttive al decreto legislativo 31 luglio 2020, n. 101, di attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordina della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117». (Decreto legislativo pubblicato nella Gazzetta Ufficiale - Serie generale - n. 2 del 3 gennaio 2023). (23A02064) (GU Serie Generale n.79 del 03-04-2023)

⁸ Decreto Legislativo 101 del 31 luglio 2020. Attuazione della Direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordina della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 117 del 4 ottobre 2019. Gazzetta Ufficiale 201 del 12 agosto 2020 - Supplemento ordinario 29.

ecc.). Il decreto, entrando in merito della materia sulla radioattività è corposo e consta di 245 articoli e 35 allegati.

Il rischio radon alla luce del D.lgs.101/2020: aggiornamento dei limiti

Principali novità:

- Protezione dall'esposizione al radon negli ambienti di vita (nel 230/95 e s.m.i. tale argomento era esplicitamente dichiarato fuori dai campi di applicazione).
- Protezione dall'esposizione al radon negli ambienti di lavoro (importanti modifiche rispetto al quadro normativo precedente).
- Protezione dei lavoratori e degli individui della popolazione dall'esposizione ai radionuclidi naturali presenti nelle materie e nei residui di lavorazione di industrie NORM (Normally Occurrence Radioactive Materials).
- Protezione dalle radiazioni gamma emesse dai radionuclidi contenuti nei materiali da costruzione.
- Protezione del personale navigante dall'esposizione alla radiazione cosmica etc..

I livelli massimi di riferimento per le abitazioni e i luoghi di lavoro, espressi in termini di valore medio annuo della concentrazione di attività di radon in aria, sono di seguito indicati: a) 300 Bq m⁻³ in termini di concentrazione media annua di attività di radon in aria per le abitazioni esistenti; b) 200 Bq m⁻³ in termini di concentrazione media annua di attività di radon in aria per abitazioni costruite dopo il 31 dicembre 2024; c) 300 Bq m⁻³ in termini di concentrazione media annua di attività di radon in aria per i luoghi di lavoro; d) il livello di riferimento di cui all'articolo 17, comma 4, è fissato in 6 mSv in termini di dose efficace annua. L'articolo 12 è uno degli art. dedicati all'aggiornamento dei limiti.

Decreto 23 giugno 2022 (Criteri Ambientali Minimi per l'Edilizia) 2022, aggiornamento dei limiti

I CAM (Criteri ambientali minimi) si applicano agli edifici pubblici, tra questi vi sono anche gli edifici residenziali. 2.4.12 Radon. Criterio. Devono essere adottate strategie progettuali e tecniche idonee a prevenire e a ridurre la concentrazione di gas radon all'interno degli edifici. Il livello massimo di riferimento, espresso in termini di valore medio annuo della concentrazione di radon è di 200 Bq m⁻³.

È previsto un sistema di misurazione con le modalità di cui all'allegato II sezione I del decreto legislativo 31 luglio 2020, n. 101, effettuato da servizi di dosimetria riconosciuti ai sensi dell'articolo 155 del medesimo decreto, secondo le modalità

indicate nell'allegato II, che rilasciano una relazione tecnica con i contenuti previsti dall'allegato II del medesimo decreto.

Le strategie, compresi i metodi e gli strumenti, rispettano quanto stabilito dal Piano nazionale d'azione per il radon, di cui all'articolo 10 comma 1 del decreto dianzi citato.

2.2 La situazione Normativa europea e nazionale

La Raccomandazione 90/143/Euratom del 21 febbraio 1990, è stata emanata sulla base della crescente consapevolezza del pericolo dell'esposizione della popolazione al radon in ambienti chiusi. In seguito, è stata emanata la Direttiva 96/29/Euratom riguardante la protezione sanitaria contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti per la popolazione e per i lavoratori. La direttiva in esame è stata recepita in Italia dal D.Lgs. 241/2000 e stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti. Successivamente è stata emanata la Raccomandazione 2001/928/Euratom, relativa alla tutela della popolazione contro l'esposizione al radon nell'acqua potabile (collegata alla direttiva 96/29/Euratom).

La successiva direttiva europea 2013/59/EURATOM ([Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013](#)) definisce un sistema regolatorio che ha lo scopo principale di garantire la protezione dalle sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti. Per il gas radon, amplia il controllo delle concentrazioni di gas radon in tutti gli ambienti confinati, fornendo l'elenco degli elementi da considerare nell'elaborazione del piano d'azione nazionale, per affrontare i rischi a lungo termine derivanti dall'esposizione al radon. Inoltre, sono descritti i metodi e gli strumenti per prevenire l'ingresso del radon nei nuovi edifici, inclusi l'individuazione di materiali da costruzione con esalazione di radon significativa (es: il tufo vulcanico). Il recepimento della direttiva in Italia ha di fatto modificato e aggiornato la legislazione italiana relativamente alla protezione dei lavoratori dal rischio di esposizione al radone della popolazione generale

Nella elaborazione e recepimento della normativa nazionale (Decreto Legislativo 31 luglio 2020, n. 101), uno degli elementi cardine è il concetto chiave della riduzione del cancro polmonare da esposizione al radon indoor e delle malattie correlate, che può essere raggiunta attraverso programmi di prevenzione e protezione. Il decreto tiene in conto sia dello scenario delle nuove abitazioni sia di quelle esistenti. Aspetto saliente della direttiva europea 2013/59/Euratom, come è noto, è la regolamentazione per il controllo della radioattività nei materiali da costruzione, in

quanto tali materiali hanno un notevole impatto negli ambienti confinati di vita e di lavoro. Molte sono le novità introdotte dal decreto: il "livello" non è più "di azione" ma "di riferimento" con attività in forza del principio di ottimizzazione; per le nuove abitazioni i "livelli" sono stati abbassati a 200 Bq m⁻³; il "livello di riferimento" per le abitazioni esistenti e i luoghi di lavoro è stato ridotto a 300 Bq m⁻³. Vi sono anche contenute indicazioni per la redazione del Piano Nazionale Radon relative a: strategie, criteri e interventi; classificazioni aree prioritarie; prevenzione in nuove costruzioni e ristrutturazioni; indicatori di efficacia.

Nella tabella 1 si riporta l'attuazione della Direttiva Europea 2013/59/ EURATOM.

Tab. 1. Attuazione della Direttiva Europea 2013/59/ EURATOM nelle Nazioni

EU	Nazione	Data di recepimento della direttiva europea 59/2013	Riferimento normativo	Sito Web
Si	Austria	luglio 2020	Bundesgesetzblatt II Nr. 339/2020	https://www.ris.bka.gv.at/eli/bgbl/II/2020/339 https://www.ris.bka.gv.at/eli/bgbl/II/2020/353/20200731
Si	Belgio	maggio 2018	Amendment of the FANC law 2018/202303	https://fanc.fgov.be/nl/system/files/20180517-publicatie-wet-medische.pdf February 2020
		febbraio 2020	Report 9511 Royal Decree	https://www.health.belgium.be/en/report-9511-medical-exposures-ionising-radiation
		febbraio 2020	2020/20132, Royal Decree amending the Royal Decree of 20 July 2001	https://fanc.fgov.be/nl/system/files/20200220-publicatie-kb-medjury.pdf
Si	Bulgaria	febbraio 2018	Ordinance № 2 of 5 February 2018	https://www.mh.government.bg/media/file_r_public/2018/02/14/naredba2-5-02-2018-uslovia-red-osigurqvanezashtita-medoblychvane.pdf
Si	Croazia	maggio 2018	Ordinance 9 May 2018, Official Gazette 42/18	https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_05_42_814.html
Si	Cipro	dicembre 2018	Radiological Safety and Security Law L.164(I)/2018	http://www.mlsi.gov.cy/mlsi/dli/dliup.nsf/Al/4155482043318AA9C2257E29001F7E86?OpenDocument
Si	Repubblica Ceca	gennaio 2017	Atomic law (263/2016 Sb.) and Radiation protection	https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/zakony/Act_263_2016_web.pdf

EU	Nazione	Data di recepimento della direttiva europea 59/2013	Riferimento normativo	Sito Web
			regulation (422/2016 Sb.)	
Si	Danimarca	gennaio 2018	Act on Ionising Radiation and Radiation Protection ACT No. 23 of 15/01/2018	https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2018/23
Si	Estonia	febbraio 2018	(European Council directive 2013/59/Euratom) was put into practise in Estonia in 2018	documento dove è stata tratta l'informazione https://www.egt.ee/en/news/radon-risk-map-soil-published
Si	Finlandia	dicembre 2018	Radiation Act 859/2018	https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20180859 https://finlex.fi/en/laki/kaannokset/2018/en20180859.pdf
		novembre 2018	Government Decree on Ionising Radiation 1034/2018	https://finlex.fi/en/laki/kaannokset/2018/en20181034.pdf https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/201810344fi/fi/laki/alkup/2018/20181034
		novembre 2018	Ministry of Social Affairs and Health Decree on Ionising Radiation 044/2018	https://www.finlex.fi/en/laki/kaannokset/2018/en20181044.pdf https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20181044
Si	Francia	giugno 2018	Decree No. 2018-434	Décret no 2018-434 du 4 juin 2018 portant diverses dispositions en matière nucléaire
		giugno 2018	Decree no. 2018-437	Décret no 2018-437 du 4 juin 2018 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants
		giugno 2018	Decree no. 2018-438	Décret no 2018-438 du 4 juin 2018 relatif à la protection contre les risques dus aux rayonnements ionisants auxquels sont soumis certains travailleurs

EU	Nazione	Data di recepimento della direttiva europea 59/2013	Riferimento normativo	Sito Web
Si	Germania	giugno 2017	Law on the protection against the harmful effects of ionizing radiation	https://www.gesetze-im-internet.de/strlrschg/
		novembre 2018	Ordinance on protection against the harmful effects of ionizing radiation	https://www.gesetze-im-internet.de/strlrschv_2018/
Si	Grecia	novembre 2018	Presidential Decree P.D. 101/2018 194/A/20.11.2018	https://eeae.gr/en/radiation-safety/regulatory-control/ionizing-radiation/regulatory-framework
Si	Ungheria	giugno 2018	Decree of the Minister of Human Capacities No. 21/2018 21/2018 (VII.9.) EMMI Regulation laying down rules for the protection of the health of persons exposed to ionising radiation in the course of health services other than in the framework of their duties	https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A1800021.EMM
Si	Irlanda	gennaio 2019	Regulation 2018 SI No.256	S.I. No. 256/2018 - European Union (Basic Safety Standards for Protection Against Dangers Arising from Medical Exposure to Ionising Radiation) Regulations 2018 https://www.irishstatutebook.ie/eli/2018/si/256/
Si	Italia	giugno 2020	Law decree n.101 31 july 2020	https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2020/08/12/201/so/29/sg/pdf

EU	Nazione	Data di recepimento della direttiva europea 59/2013	Riferimento normativo	Sito Web
Si	Lettonia		NA	<p>NA the maximal admissible concentration of radon in houses is 300 Bq per 1 m³ of air.</p> <p>Tratto da http://www2.meteo.lv/produkti/soe98_eng/texts/radiat/rdt_stt.htm</p> <p>altro testo https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35206181/</p> <p>limite nazionale consentito 200 Bq m⁻³ per i luoghi di lavoro</p>
Si	Lituania	novembre 2018	Lithuanian hygiene standard HN 73: 2018	https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.751B6F8BF451/mreNWpyxdS
				https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.159355
		novembre 2015	HN 95: 2015	https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.07B72FE9B4AF/fEuwkNSMnr
		ottobre 2017	HN 78: 2009	https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.8ED408A891FA/mpUnMzUiii
		settembre 2017	Orders of the Director of the radiation safety center	https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/89f5bf70a4d611e78a4c904b1afa0332
			Tutti gli altri requisiti della direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio sono posti sulla norma igienica HN 73:2017 "Standard di base di radioprotezione"	http://www.vatesi.lt/fileadmin/documents/Teisine_informacija/Teises_aktai_anglu_kalb_a/Orders_of_Ministry_of_Health/HN_73_2018_Basic_Radiation_Protection_Standards.pdf

EU	Nazione	Data di recepimento della direttiva europea 59/2013	Riferimento normativo	Sito Web
		maggio 2016	HN 77: 2002	https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.43FC01D4BF9B/ARYPgucyXB
		maggio 2015	HN 31: 2008	https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.539C640DDFD5/fjlhXbMpGu
Si	Lussemburgo	agosto 2020	Journal Officiel du Grand-Duchè de Luxembourg Memorial A N 528 5aug2020	http://data.legilux.public.lu/file/eli-etat-leg-rgd-2019-08-01-a528-jo-fr-pdf.pdf
		maggio 2019	Journal Officiel du Grand-Duchè de Luxembourg Memorial A N 389 7jun2019	https://data.legilux.public.lu/filestore/eli-etat/leg/loi/2019/05/28/a389/jo/fr/pdfa/eli-etat-leg-loi-2019-05-28-a389-jo-fr-pdf.pdf
Si	Malta	giugno 2018	Suppliment tal-Gazzetta tal-Gvern ta' Malta Nru. 20,020, 3 ta' Lulju, 2018 L.N. 210	https://www.gov.mt/en/Government/DOI/Government%20Gazette/LN/Documents/2020/LN%20138.pdf
Si	Olanda	ottobre 2017	404 Besluit van 23 oktober 2017, houdende vaststelling van regels ter bescherming van personen tegen de gevaren van blootstelling aan ioniserende straling (Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming)	https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stb-2017-404.html
Si	Polonia	giugno 2019	Atomic Law Act 1593	https://eli.gov.pl/api/acts/DU/2019/1593/text/T/D20191593L.pdf

EU	Nazione	Data di recepimento della direttiva europea 59/2013	Riferimento normativo	Sito Web
Si	Portogallo	dicembre 2018	Decree Law 108/2018	https://data.dre.pt/eli/dec-lei/108/2018/12/03/p/dre/pt/html
Si	Romania		Reglementations on basic radiological safety requirements 186-2019	Non tutta la direttiva è stata recepita
Si	Slovacchia	-	-	-
Si	Slovenia	gennaio 2018	Update of Ionising Radiation Protection and Nuclear Safety Act Slovenia: Radon nelle case e nei luoghi di lavoro Attuazione del programma nazionale sul radon	https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2019-01-1196?sop=2019-01-1196 https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/52/124/52124042.pdf?r=1
		dicembre 2017	Ionising Radiation Protection and Nuclear Safety Act	https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2017-01-3698?sop=2017-01-3698
	Spagna	ottobre 2020	BOE n.262	Parziale trasposizione https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=CE-D-2020-262
		2022	DBHS Documento Básico HS Salubridad	https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DBHS.pdf
Si	Svezia	aprile 2018	Radiation protection act 2018:396	https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/stralskyddslag2018396_sfs-2018-396
N o	Svizzera ⁹	gennaio 2018	RS 814.501 Ordinance on	https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/502/

⁹ Svizzera limiti per edifici esistenti (Bq m⁻³) 300, per edifici nuovi (Bq m⁻³) 100 Bq m⁻³ fonte: <https://www.bag.admin.ch/bag/en/home/gesund-leben/umwelt-und-gesundheit/strahlung-radioaktivitaet-schall/radon/bauliche-massnahmen-radonschutzneu.html>

EU	Nazione	Data di recepimento della direttiva europea 59/2013	Riferimento normativo	Sito Web
			radiation protection (ORaP)	
N	UK	maggio 2019	The Radiation (Emergency Preparedness and Public Information) Regulations 2019	https://www.hse.gov.uk/radiation/ionising/reppir.htm
o		maggio 2018	Environmental Permitting (England and Wales) (Amendment) (No. 2) Regulations 2018 2018 No. 428	https://www.legislation.gov.uk/uksi/2018/428/made
		maggio 2018	The Ionising Radiation (Basic Safety Standards) (Miscellaneous Provisions) Regulations 2018	https://www.legislation.gov.uk/uksi/2018/482/made
		aprile 2019	The Carriage of Dangerous Goods (Amendment) Regulations 2019	https://www.legislation.gov.uk/uksi/2019/598/contents/made https://www.onr.org.uk/transport/radiation-risk-cdg.htm#:~:text=The%20Carriage%20of%20Dangerous%20Goods%20%28CDG%29%20%28Amendment%29%20Regulations,Use%20of%20Transportable%20Pressure%20Equipment%20Regulations%202009%20%28CDG09%29.de

Fonte: elaborazione informazioni da fonte EURATOM¹⁰

¹⁰https://www.efomp.org/uploads/e2f1793d-aa52-47d6-9e9a-cedd66d78730/201359%20EURATOM%20Directive%20from%20the%20E2%80%9CMagna%20Charta%20E2%80%9D%20to%20the%20clinical%20practice_Table1.pdf

Per completezza di informazione si riportano i limiti di riferimento per il radon presenti nella normativa internazionale nella tabella 2, mentre nella tabella 3 si riportano i Piani di Azione Radon.

Tab. 2. Livelli di riferimento per il radon in diversi Paesi.

Livello di riferimento radon in Bq m⁻³ per le abitazioni	Leggi specifiche per le abitazioni	Edifici ad alta occupazione pubblica	Luoghi di Lavoro	Piani d'azione	
Andorra	Non applicabile	No	No	No	
Argentina	300	Si consigliate linee guida	Si consigliate linee guida	Si consigliate linee guida	
Armenia	Non applicabile	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	
Australia	200	No	No	Sì, norme obbligatorie	
Austria	300	Sì, norme obbligatorie	No	Sì, norme obbligatorie	
Bahrain	300	No	No	No	
Belarus	200	_____	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	
Belgio	300	Si consigliate linee guida	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	2019-20 2020-25 ¹¹
Brasile	300	Si consigliate linee guida	NO	Si consigliate linee guida	
Bulgaria	300	Si consigliate linee guida	Si consigliate linee guida	Si consigliate linee guida	2018-22
Canada ¹²	200	Si consigliate linee guida	Si consigliate linee guida	Si consigliate linee guida	
Cina	300	Si consigliate linee guida	Si consigliate linee guida	Si consigliate linee guida	
Cuba	Non applicabile	NO	No	Si consigliate linee guida	
Cipro	300	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	2019-25

¹¹ 2020-2025 Sul sito AFCN dell'agenzia Federale è reperibile il piano 2020-2025

<https://afcn.fgov.be/fr/system/files/2021-09-22-belgian-national-radon-action-plan-2020-2025-fr-v2.pdf>

¹² Health Canada raccomanda di intraprendere azioni correttive ogni volta che la concentrazione media annua di radon supera i 200 Bq m⁻³ negli spazi occupati di una casa. Se la concentrazione supera i 600 Bq m⁻³, è necessario intraprendere un'azione di risanamento entro meno di un anno. Se la concentrazione è compresa tra 200 Bq m⁻³ e 600 Bq m⁻³, è necessario intraprendere un'azione correttiva entro meno di 2 anni.

Livello di riferimento radon in Bq m ⁻³ per le abitazioni	Leggi specifiche per le abitazioni	Edifici ad alta occupazione pubblica	Luoghi di Lavoro	Piani d'azione	
Czechia	300	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	2019-25 ¹³
Danimarca	100	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	2016-2019
Estonia	300	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	2018-2027
Finlandia	300	Si consigliate linee guida	Si consigliate linee guida	Sì, norme obbligatorie	2020-25
Francia	300	Si consigliate linee guida	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	2016-19 2020-24 ¹⁴
Georgia	200	Si consigliate linee guida	No	Sì, norme obbligatorie	
Germania	300	Si consigliate linee guida	No	Sì, norme obbligatorie	2019-28
Grecia	300	Si consigliate linee guida	Si consigliate linee guida	Sì, norme obbligatorie	
Guinea	Non applicabile	NO	NO	NO	
Ungheria	300	NO	NO	Sì, norme obbligatorie	2018-23
Iceland	Non applicabile	NO	No	NO	
Iran (Islamic Republic of)	Non applicabile	NO	NO	NO	
Irlanda	200	NO	NO	Sì, norme obbligatorie	2019-24
Italia	300	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	2002-2020
Giappone	Non applicabile	NO	NO	NO	

¹³ Versione consultabile la cui fonte è stata reperita da ricerche su web

http://radonovyprogram.cz/fileadmin/radonovyprogram/pdf_doc/Czech_Republic_Radon_Action_plan_002.pdf

¹⁴ Fonte Autorite de Surete Nuclear <https://www.asn.fr/l-asn-informe/dossiers-pedagogiques/le-radon-et-les-professionnels/plans-nationaux-d-action/plan-national-d-action-2020-2024-pour-la-gestion-du-risque-lie-au-radon-national-action-plan-2020-2024-for-management-of-the-radon-risk>

[Plan national d'action 2020-2024 pour la gestion du risque lié au radon.pdf\(PDF - 627.52 Ko \)](#)
[National action plan 2020-2024 for management of the radon risk.pdf\(PDF - 466.97 Ko \)](#)

Livello di riferimento radon in Bq m⁻³ per le abitazioni	Leggi specifiche per le abitazioni	Edifici ad alta occupazione pubblica	Luoghi di Lavoro	Piani d'azione	
Latvia	200	Sì, norme obbligatorie	NO	Sì, norme obbligatorie	
Libia	Non applicabile	NO	NO	NO	
Lituania	300	Si consiglia linee guida	Si consiglia linee guida	Sì, norme obbligatorie	2017-23
Lussemburgo	300	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	2017-20 2017-23 ¹⁵
Malta	300	NO	NO	NO	
Messico	Non applicabile	NO	NO	NO	
Mongolia	100.2	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	
Marocco	Non applicabile	NO	NO	Sì, norme obbligatorie	
Namibia	100	NO	NO	NO	
Olanda	100	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	
Norvegia	100	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	2018-22 ¹⁶
Paraguay	Not applicabile	NO	NO	NO	
Perù	Not applicabile	NO	NO	Si consiglia linee guida	2019-22
Polonia	300	Sì, norme obbligatorie	NO	Sì, norme obbligatorie	
Portogallo	300	No	NO	Sì, norme obbligatorie	
Repubblica di Moldova	100 (edifici nuovi) 150 (edifici esistenti)	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	2020- ³⁰ ¹⁷
Russia Federazione	Non applicabile	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	Sì, norme obbligatorie	

¹⁵ Lussemburgo Radon plan 2021-2028 <https://sante.public.lu/fr/espace-professionnel/plans-nationaux/plan-radon.html>

¹⁶ Nuclear safety and security. The Norwegian Government's Action Plan 2018–2022 <https://dsa.no/en/radon>

¹⁷ Health and environment scorecard Republic of Moldova https://cdn.who.int/media/docs/default-source/country-profiles/environmental-health/environmental-health-mda-2022.pdf?sfvrsn=7ec4a328_4&download=true

Livello di riferimento radon in Bq m ⁻³ per le abitazioni	Leggi specifiche per le abitazioni	Edifici ad alta occupazione pubblica	Luoghi di Lavoro	Piani d'azione
Serbia	400	Sì, norme obbligatorie	NO	Sì, norme obbligatorie

Fonte: elaborazione su fonte WHO

<https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/topic-details/GHO/gho-phe-radon-database>

Tab. 3. Piani d'azione radon in diversi Paesi

Paese	Riferimento documentale e link di alcuni piani d'azione
Belgio	Sul sito AFCN dell'agenzia Federale è reperibile il piano 2020-2025 https://afcn.fgov.be/fr/system/files/2021-09-22-belgian-national-radon-action-plan-2020-2025-fr-v2.pdf
Bulgaria	Relazione sull'attuazione delle attività nell'ambito del piano d'azione nazionale per la riduzione del rischio di esposizione al radon - dicembre 2020. https://radon.bg/wp-content/uploads/2021/01/Report_NP_Rn_2020_last.pdf Norme per il monitoraggio e la valutazione dell'attuazione di un piano d'azione nazionale per ridurre il rischio di esposizione al radon. – 2020 Studio dell'attività volumetrica del radon negli edifici residenziali con elevati valori di radon trovati sul territorio della Bulgaria - 2020. Relazione sull'attuazione delle attività nell'ambito del piano d'azione nazionale per la riduzione del rischio di esposizione al radon - 2019. Misurazione del tasso di ricambio d'aria negli edifici residenziali con elevati valori di attività volumetrica del radon. – 2019 Ordinanza n. RD-02-20-1 del 2019 sui requisiti tecnici degli edifici per la protezione dal radon (SG, n. 33 del 19.04.2019) https://radon.bg/wp-content/uploads/2020/09/20180220_DV016_NRZ.pdf Ordinanza sui requisiti tecnici per gli edifici https://radon.bg/wp-content/uploads/2020/09/20190419_DV033.pdf

Paese	Riferimento documentale e link di alcuni piani d'azione
Cipro	<p>Normative sul radon http://www.mlsi.gov.cy/mlsi/dli/dliup.nsf/All/E63D9A9AF63A76E4C2257E2A0024C929?OpenDocument</p>
Francia	<p>Autorité de sûreté nucléaire (ASN) Plan National D'action - Pour La Gestion Du Risque Lié Au Radon 2020-2024 Fonte MiTe https://www.asn.fr/Professionnels/Agrements-controles-et-mesures/Le-radon/Les-plans-nationaux-d-action-pour-la-gestion-du-risque-lie-au-radon/Plan-national-d-action-2020-2024-pour-la-gestion-du-risque-lie-au-radon https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/plan-radon20-24-interactif-bd-18fev21.pdf Pl an nat i onal d'act i on 2016-2019 pour la gestion du risque lié au radon News letter su aggiornamenti normativi in Francia sul radon https://www.french-nuclear-safety.fr/asn-informs/publications/regulatory-updates-newsletter/regulatory-updates-newsletter-march-2021 Ministero della sanità e della prevenzione https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/batiments/article/plan-national-d-action-radon-pnar</p>
Germania	<p>Federal Office for Radiation Protection (BfS) - Radon Handbook of the Federal Office for Radiation Protection (in tedesco) 2019 https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/radonmassnahmenplan_en_bf.pdf</p>
Irlanda	<p>The-National-Radon-Control-Strategy-Phase-2 https://www.epa.ie/publications/monitoring--assessment/radon/The-National-Radon-Control-Strategy-Phase-2.pdf Fonte MiTe link non specifico non porta al report https://www.epa.ie/pubs/reports/radiation/The%20National%20Radon%20Control%20Strategy%20Phase%202.pdf</p>
Lussemburgo	<p>Radon - Plan d'action national 2021-2028 https://sante.public.lu/fr/espace-professionnel/plans-nationaux/plan-radon.html materiale divulgativo ministero della salute https://sante.public.lu/fr/publications/r/radon-brochure-batiments-2021.html Fonte MiTe link non funzionante https://sante.public.lu/fr/publications/p/plan-action-radon-2017/index.html</p>
Norvegia	<p>Fonte MiTe: https://www2.dsa.no/publication/strategy-for-the-reduction-of-radon-exposure-in-norway.pdf</p>
Repubblica Ceca	<p>https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/PZIZ/Radon/RANAP_ENG.pdf</p>
Confederazione Svizzera	<p>Ufficio Federale Sanità Pubblica (UFSP)- Piano di azione nazionale radon 2012 – 2020 Il Consiglio federale ha approvato il Piano d'azione radon 2021-2030 nella riunione dell'8 maggio 2020. https://www.bag.admin.ch/bag/it/home/strategie-und-politik/politische-auftraege-und-</p>

Paese	Riferimento documentale e link di alcuni piani d'azione
	aktionsplaene/radonaktionsplan.html#:~:text=Il%20Consiglio%20federale%20ha%20approvato,'azione%20radon%202012%2D2020 Fonte MiTe https://www.bag.admin.ch/bag/en/home/strategie-und-politik/politische-auftraege-und-aktionsplaene/radonaktionsplan.html
Canada	Health Canada - RADON REDUCTION GUIDE FOR CANADIANS 2014 Canada - Health Canada - CANADIAN RADON STRATEGY AND ACTION PLAN 2014 Canada -Health Canada- National Radon Program 2016
USA ¹⁸	19United States - Environmental Protection Agency (EPA) The National Radon Action Plan 2021-2025 https://www.epa.gov/radon/national-radon-action-plan-strategy-saving-lives https://19january2021snapshot.epa.gov/radon/national-radon-action-plan-strategy-saving-lives_.html Fonte MiTe https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-05/documents/nrap-a_strategy_for_saving_lives_-_final.pdf
UK	Fonte MiTe Public Healt Hngland UK National Radon Action Plan 2018 https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/766090/UK_National_Radon_Action_Plan.pdf

Dagli atti del simposio internazionale svolto in Olanda in maggio 2022²⁰ si desume che nei ventotto stati dell'Unione europea i piani di azione sono stati approvati solo in 23 Paesi. Il piano è in bozza in 3 Paesi quali Spagna, Italia e Portogallo, mentre in Lituania e in Lettonia non sono presenti piani ma sono state intraprese azioni per il radon²¹.

Mappe europee del radon

¹⁸ Attualmente, nessun regolamento federale applicabile disciplina i livelli di radon negli ambienti interni, vi sono solo delle linee guida con raccomandazioni e un obiettivo nazionale. L'EPA raccomanda l'abbattimento o la bonifica quando le concentrazioni di radon nell'aria interna sono uguali o superiori a 4 pCi/L.

¹⁹ Fonti

1. <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon>

2. <https://www.britannica.com/science/radium>

3. <https://www2.lbl.gov/abc/wallchart/chapters/03/6.html>

4. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>

²⁰ NORM X symposium & RICOMET conference, Utrecht, the Netherlands on May 9 – 13, 2022
<https://nucleus.iaea.org/sites/orpnet/resources/NORM%20X/Session%207%20-%20Katerina%20Navratilova%20Rovenska.pdf>

²¹ I Livello di riferimento luoghi di lavoro sono: 100 Bq m⁻³ Paesi Bassi, Danimarca 200 Bq m⁻³; Svezia 300 Bq m⁻³;

400 Bq m⁻³ Lettonia; 600 Bq m⁻³ Spagna. Il livello di riferimento per gli edifici pubblici, scuole e asili nido

- Per lo più lo stesso valore del livello di riferimento dei luoghi di lavoro: 200 Bq m⁻³ Estonia, Irlanda; 300 Bq m⁻³ Spagna

Le politiche sul radon sono molto eterogenee in tutta Europa: mentre alcuni Paesi hanno già implementato un piano d'azione nazionale sul radon, altri stanno appena iniziando il processo di predisposizione.

Per fornire una panoramica della problematica del Radon nel territorio Europeo si riportano due Immagine estrapolate dall'atlante europeo delle radiazioni naturali (Figura 1 e 2). L'atlante fornisce anche dati armonizzati sui livelli di radiazioni naturali in tutta l'UE e mira a sensibilizzare gli europei a vivere con la radioattività naturale.

Fig. 1 - Mappa europea indoor del radon, 2021. La mappa europea del radon indoor mostra le medie aritmetiche (AM) della concentrazione annuale di radon indoor nelle stanze al piano terra di abitazioni di dimensioni superiori a 10 km x 10 km di celle della griglia. consultazione agosto 2022 [HTTPS://REMON.JRC.EC.EUROPA.EU/ABOUT/ATLAS-OF-NATURAL-RADIATION/DIGITAL-ATLAS](https://remon.jrc.ec.europa.eu/about/atlas-of-natural-radiation/digital-atlas) (FONTE JRC)

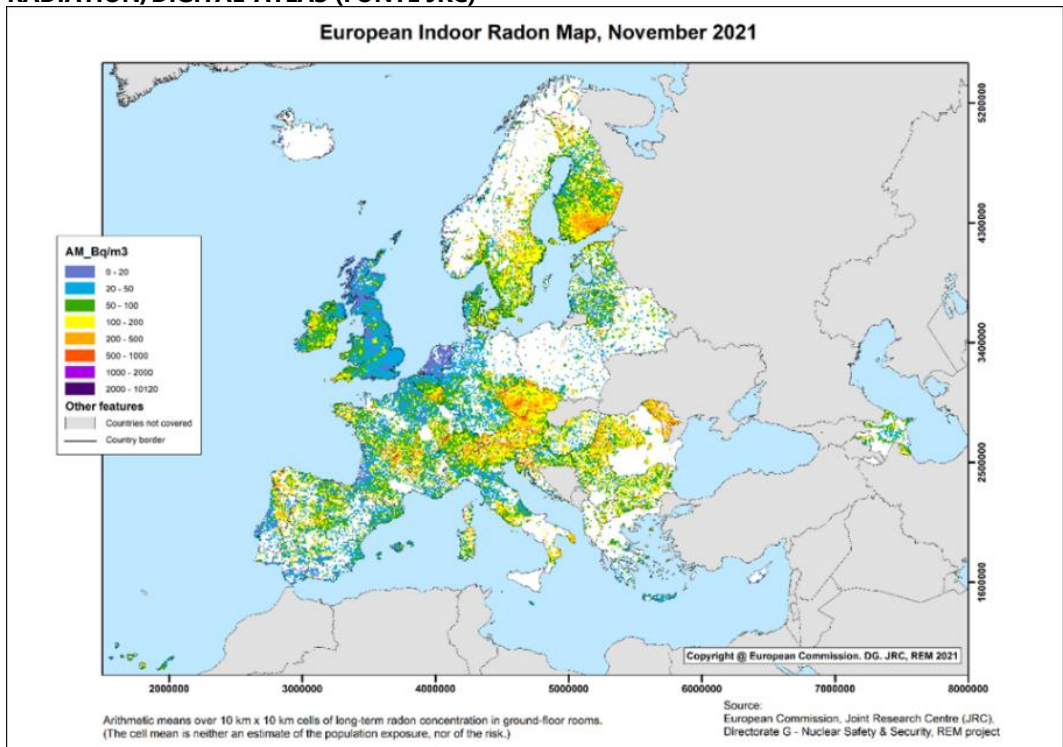
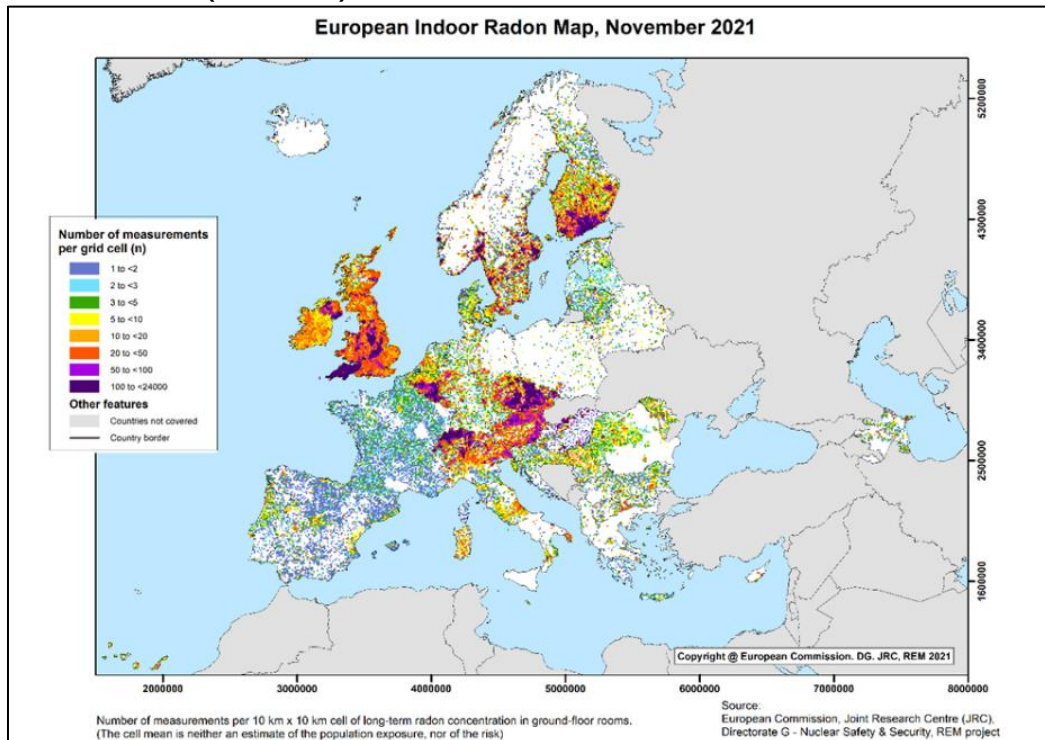


Fig. 2 - Mappa europea indoor del radon, 2021 la mappa riporta il numero di misurazioni (n) su 10 km x 10 km di celle della griglia della concentrazione annuale di radon indoor nelle stanze al piano terra. [HTTPS://REMON.JRC.EC.EUROPA.EU/ABOUT/ATLAS-OF-NATURAL-RADIATION/DIGITAL-ATLAS/INDOOR-RADON-N/INDOOR-RADON--NUMBER-OF-MEASUREMENTS](https://remon.jrc.ec.europa.eu/about/atlas-of-natural-radiation/digital-atlas/indoor-radon-n/indoor-radon--number-of-measurements) (FONTE JRC)



2.3 Norme e leggi europee

Direttiva 80/836/Euratom del Consiglio, del 15 luglio 1980, che modifica le direttive che fissano le norme fondamentali relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti

Direttiva 84/466/Euratom del Consiglio del 3 settembre 1984 che stabilisce le misure fondamentali relative alla protezione radiologica delle persone sottoposte ad esami e a trattamenti medici

Direttiva 84/467/Euratom del Consiglio del 3 settembre 1984 che modifica la direttiva 80/836/Euratom per quanto concerne le norme fondamentali relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti

Direttiva 89/618/Euratom del Consiglio, del 27 novembre 1989, concernente l'informazione della popolazione sui provvedimenti di protezione sanitaria applicabili e sul comportamento da adottare in caso di emergenza radioattiva

Raccomandazione 90/143/Euratom della Commissione del 21 febbraio 1990 sulla tutela della popolazione contro l'esposizione al radon in ambienti chiusi

Direttiva 90/641/Euratom del Consiglio, del 4 dicembre 1990, concernente la protezione operativa dei lavoratori esterni esposti al rischio di radiazioni ionizzanti nel corso del loro intervento in zona controllata

Direttiva 92/3/Euratom del Consiglio, del 3 febbraio 1992, relativa alla sorveglianza ed al controllo delle spedizioni di residui radioattivi tra Stati membri e di quelle verso la Comunità e fuori da essa

Direttiva 96/29/Euratom del Consiglio del 13 maggio 1996 che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti

Direttiva 97/43/Euratom del Consiglio del 30 giugno 1997 riguardante la protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti connesse a esposizioni mediche e che abroga la direttiva 84/466/Euratom

Direttiva 98/83/CE del Consiglio del 3 novembre 1998 concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano

Raccomandazione 2001/928/Euratom della Commissione del 20 dicembre 2001 sulla tutela della popolazione contro l'esposizione al radon nell'acqua potabile

Direttiva 2003/122/Euratom del Consiglio del 22 dicembre 2003 - Controllo delle sorgenti radioattive sigillate ad alta attività e delle sorgenti orfane

DIRETTIVA 2013/51/Euratom del Consiglio, del 22 ottobre 2013, che stabilisce requisiti per la tutela della salute della popolazione relativamente alle sostanze radioattive presenti nelle acque destinate al consumo umano

Direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio, del 5 dicembre 2013, che fissa le norme fondamentali di sicurezza uniformi relative alla protezione sanitaria delle persone soggette ad esposizione professionale, medica e della popolazione contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti. Abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom. Tra le novità, aumentando la tutela dei lavoratori esposti a fattori di rischio, la direttiva prevede che il responsabile della sorveglianza sanitaria possa richiedere che la sorveglianza prosegua anche dopo l'esposizione, per un periodo di tempo necessario alla protezione della salute del lavoratore informando il lavoratore stesso sull'opportunità di sottoporsi ad accertamenti sanitari anche dopo la cessazione dell'attività lavorativa. Vengono resi più stringenti i limiti per la radioattività naturale ed in particolare del Radon. La sorveglianza sanitaria in corso del rapporto di lavoro resta a carico del datore di lavoro, mentre gli accertamenti sanitari riferiti ad un momento successivo

alla cessazione del rapporto di lavoro resteranno a carico del servizio sanitario nazionale).

2.4 Norme e leggi nazionali

La direttiva è stata definitivamente recepita dal Decreto Legislativo 101 del 31 Luglio 2020, entrato in vigore il 27 Agosto 2020.

D.Lgs. 230/95 Attuazione delle Direttive Euratom 80/836, 84/467, 84/466,89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti

D.Lgs. 241/00 Attuazione della Direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti

D.Lgs. 187/00 Attuazione della Direttiva 97/43/EURATOM in materia di protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti connesse ad esposizioni mediche

D.Lgs. 257/01 Disposizioni integrative e correttive del Decreto legislativo 26 maggio 2000, n. 241, recante attuazione della Direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti

Circolare n. 5/2001 del 08/01/01 del Ministero del lavoro, Direzione Generale Rapporti di lavoro – Div. III, Prot. n. 51/RI Decreto legislativo 26/5/2000 n.241: attuazione della direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria dei lavoratori e della popolazione contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti.

D.Lgs. 31/01 Attuazione della direttiva 98/83 CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano

D.Lgs.52/07 Attuazione della direttiva 2003/122/CE EURATOM sul controllo delle sorgenti radioattive sigillate ad alta attività e delle sorgenti orfane (G.U. 24 aprile 2007, n. 95)

D.Lgs 28/16 Attuazione della direttiva 2013/51/EURATOM del Consiglio, del 22ottobre 2013, che stabilisce requisiti per la tutela della salute della popolazione relativamente alle sostanze radioattive presenti nelle acque destinate al consumo umano.

D.Lgs 101/20 Testo unico di riferimento per le radiazioni ionizzanti. Attuazione della direttiva 2013/59/EURATOM, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/EURATOM, 90/641/EURATOM, 96/29/EURATOM, 97/43/EURATOM e 2003/122/EURATOM e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117. (20G00121) (GU Serie Generale n.201 del 12-08-2020 - Suppl. Ordinario n. 29)

DECRETO LEGISLATIVO 25 novembre 2022, n. 203. Disposizioni integrative e correttive al decreto legislativo 31 luglio 2020, n. 101, di attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117.

2.5 Norme, leggi e linee guida a livello locale

Tab. 4 – Normative regionali

Regione	Riferimenti e link
Abruzzo	D.G.R. n. 552 del 14 settembre 2020 – Piano Regionale di Prevenzione 2014 - 2019 - Azione 15 del Programma 9 recante "Ambiente e Salute" – Adozione Linee Guida regionali per orientare i regolamenti edilizi in chiave eco- compatibile, ecosostenibile e orientati al contenimento del rischio Radon
Basilicata	D.G.R. n. 486 del 23 luglio 2019 – Approvazione del documento avente ad oggetto: "Radon: linee guida regionali per risanamento e prevenzione"
Calabria	Calabria Legge regionale 4 novembre 2011, n. 41 Norme per l'abitare sostenibile
Campania	Legge regionale 8 luglio 2019, n. 13 https://protezioneradon.it/wp-content/uploads/2020/09/Legge-Regione-Campania-Nr-13_08072019-Riduzione-Esposizioni-Radioattivita-Gas-Radon.pdf Norme in materia di riduzione dalle esposizioni alla radioattività naturale derivante dal gas "radon" in ambiente confinato chiuso - Consiglio Regionale della Campania Dossier di documentazione legislativa 24 settembre 2018 Norme in materia di riduzione dalle esposizioni alla radioattività naturale derivante dal gas radon in ambiente confinato chiuso – Regione Campania Legge Regionale 8 luglio 2019, n.13
Friuli-Venezia Giulia	Friuli Venezia Giulia: il Regolamento recante requisiti e modalità per la realizzazione, l'organizzazione, il funzionamento e la vigilanza nonché le modalità per la concessione dell'autorizzazione al funzionamento dei nidi d'infanzia ai sensi dell'articolo 13, comma 2, lettera a) e d) della legge regionale 20/2005
Lazio	Prevenzione e salvaguardia dal rischio gas radon Regione Lazio Legge Regionale n.14 DEL 31-03-2005 Prevenzione e salvaguardia della popolazione dal rischio di esposizione al gas radon Delibera del XII Municipio del Comune di Roma sul Radon del 4 febbraio 2010 Legge Regionale 31 marzo 2005, n.14 Prevenzione e salvaguardia dal rischio gas radon.
Liguria	In Liguria, da parte dell'ARPAL un'indagine preliminare in circa 60 abitazioni dislocate all'interno di 4 Comuni della Provincia di Savona. Regione Liguria – Giunta Regionale Atto N° 1224-2021 - Seduta N° 3710 - del 23/12/2021 - Numero d'Ordine 14 Prot/2021/120007 Oggetto Piano Regionale della Prevenzione (PRP) della Liguria anni 2021-2025 DGR 17 maggio 2019, n. 399 - Approvazione Piano di monitoraggio gas radon in edifici pubblici e privati della Liguria anno 2019-2020
Lombardia	26 giugno 2023 DGR n. XII/508 sul Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia

Regione	Riferimenti e link
	<p>Legge Regione Lombardia nr. 3 – 3 marzo 2022</p> <p>Modifiche al Titolo VI della l.r. 30 dicembre 2009, n. 33 (Testo unico delle leggi regionali in materia di sanità) e alla l.r. 10 marzo 2017, n. 7 (Recupero dei vani e locali seminterrati esistenti), in attuazione del d.lgs. 31 luglio 2020, n. 101 (Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117).</p> <p>Integrazione regolamenti edilizi – Prevenzione esposizioni Radon in ambienti indoor</p> <p>Report "Radon in Lombardia"</p> <hr/> <p>Recupero vani seminterrati - Regione Lombardia Legge Regionale n.7 10 marzo 2017</p> <p>Sintesi Legge Regione Lombardia Nr. 7 del 10/03/2017 – Recupero vani locali seminterrati</p> <hr/> <p>Linee Guida per la prevenzione delle esposizioni al gas radon in ambienti indoor Regione Lombardia Decreto 12678 del 21 dicembre 201122</p> <hr/> <p>Legge Regionale Nr. 3 del 3 marzo 2022</p> <p>Supplemento n. 10 - Lunedì 07 marzo 2022 – 2 – Bollettino Ufficiale Legge regionale 3 marzo 2022 - n. 3 Modifiche al Titolo VI della l.r. 30 dicembre 2009, n. 33 (Testo unico delle leggi regionali in materia di sanità) e alla l.r. 10 marzo 2017, n. 7 (Recupero dei vani e locali seminterrati esistenti), in attuazione del d.lgs. 31 luglio 2020, n. 101 (Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/ Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117)</p>
Marche	<p>Marche: Legge regionale 17 giugno 2008, n. 14 Norme per l'edilizia sostenibile.</p>
Molise	<p>Molise: recentemente, alla fine del 2013, è stata portata a termine da parte di ARPA Molise una campagna di misura in 42 edifici scolastici dislocati nel territorio di 7 Comuni della Regione, allo scopo di acquisire dati utili ai fini dell'individuazione delle aree a rischio radon.</p>
Piemonte	<p>12 gennaio 2023 Pubblicazione sul Bollettino Ufficiale della Regione Piemonte</p> <hr/> <p>Legge Regionale 18 febbraio 2010, n. 5</p>

²² <https://inu.it/leggi/13417/chi-siamo.html>

Regione	Riferimenti e link
Puglia	<p>Norme in materia di perequazione, compensazione urbanistica e contributo straordinario per la riduzione del consumo di suolo e disposizioni diverse - Regione Puglia Legge Regionale 30 aprile 2019, n.18</p> <p>Norme in materia di riduzione dalle esposizioni alla radioattività naturale derivante dal gas radon in ambiente confinato - Regione Puglia Legge Regionale 3 Novembre 2016 n. 30</p>
Province autonome di Trento e Bolzano	<p>Linee Guida per le misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei</p> <p>Coordinamento delle Regioni e delle Province autonome di Trento e di Bolzano - 6 febbraio 2003.</p>
Sardegna	<p>30 giugno 2022 Deliberazione 20/71 del 30/06/2022</p>
Sicilia	<p>Piano regionale di prevenzione approvato (D.G.R. n. 30/21 del 16.6.2015 e rimodulato e prorogato al 31.12.2019 con la D.G.R. n. 33/9 del 26.6.2018)</p> <p>Nell'ambito del Piano Regionale di Prevenzione sono stati realizzati e successivamente adottati:</p> <p>Linee di Indirizzo per la comunicazione del rischio ambientale per la salute - Azione P-8.2.2 del Piano Regionale di Prevenzione (D.G.R. n.61/27 del 18.12.2018). - Allegato A "Linee di indirizzo per la comunicazione del rischio ambientale per la salute" Indirizzi in materia di sostenibilità ed ecocompatibilità nella costruzione/ristrutturazione di edifici al fine di migliorare la qualità dell'aria indoor, anche in relazione al rischio radon, per orientare i regolamenti edilizi in chiave eco-compatibile -</p> <p>Azione P-8.2.4 del Programma P-8.2 del Piano Regionale di Prevenzione (D.G.R. n.5/31 del 29.01.2019)</p> <p>Classificazione del territorio regionale con individuazione delle aree a rischio radon - Azione P-8.2.4 del Programma P-8.2 del Piano Regionale di Prevenzione (D.G.R. n.7/49 del 12.02.2019) - (pubblicato nel Bollettino ufficiale della Regione autonoma della Sardegna n. 16 Parte I e II del 04/04/2019)</p> <p>Applicazione degli indirizzi regionali per la comunicazione del rischio ambientale per la salute al Piano di comunicazione radon Regione Sardegna - Azienda Tutela della Salute (ATS) - Dicembre 2019 (predisposto dalla Rete Regionale Integrata in materia di ambiente e salute e dal Gruppo di Comunicazione del rischio ambientale per la salute)</p>
Toscana	<p>Indagine regionale sul gas radon negli ambienti di vita e di lavoro. Individuazione delle aree ad elevata probabilità di alte concentrazioni di radon ai sensi dell'art. 10 sexies del D.Lgs. n. 230/95 - Diffusione dei dati statistici per comune riassuntivi delle misurazioni effettuate. Regione Toscana – DGR 1019/2012</p>
Veneto	<p>Veneto: Legge regionale 23 luglio 2013, n.20 "Prevenzione e salvaguardia dal rischio gas radon" Puglia Legge Regionale 3 novembre</p>

Regione	Riferimenti e link
	2016, n. 30 "Norme in materia di riduzione dalle esposizioni alla radioattività naturale derivante dal gas 'radon' in ambiente confinato".

¹ <https://inu.it/leggi/13417/chi-siamo.html>

2.6 Documenti internazionali

Rapporto World Health Organization Who Handbook on Indoor Radon: a public health perspective 2009 Nel 2005 il World Health Organization (Organizzazione Mondiale della Sanità) ha promosso l'International Radon Project. (IRP). Il primo meeting si è svolto a Ginevra a gennaio 2005: [The 1st Meeting of National Experts for WHO's International Radon Project](#)

Il secondo meeting si è svolto sempre a Ginevra a marzo 2006: **Report of the 2nd meeting of the WHO International Radon Project**

il terzo si è tenuto a Monaco a marzo 2007

IRP Final Report - Survey On Radon Guidelines, Programmes And Activities 2007

Progetto di durata triennale, a cui hanno partecipato esperti di oltre 30 Paesi, tra cui l'Italia (tramite l'Istituto Superiore di Sanità), ha l'obiettivo di identificare le strategie più efficaci per ridurre l'impatto sanitario dell'esposizione al radon della popolazione. In questo ambito è stato elaborato questo rapporto pubblicato nel 2009, il quale contiene una rassegna, e riporta raccomandazioni sui diversi aspetti della problematica radon con l'intento di favorire una strategia comune nei diversi Stati. In particolare, le raccomandazioni riguardano i seguenti sei aspetti:

- gli effetti del radon sulla salute;
- come si misura il radon;
- i sistemi di prevenzione e risanamento negli edifici;
- come comunicare il rischio da radon;
- analisi costo-efficacia delle strategie di controllo e riduzione del rischio da radon;
- programmi e piani nazionali radon RADPAR.

RECOMMENDATION BOOKLET 2012

<https://eu-neris.net/library/projects-reports/147-recommendations-bookletpdf-1.html>

Nell'ambito del progetto RADPAR (RADon Prevention And Remediation), che ha terminato i suoi lavori nel 2012 e a cui ha partecipato l'Italia (tramite esperti dell'Istituto Superiore di Sanità), sono stati prodotti una serie di documenti tecnici che affrontano diversi aspetti del problema radon. In questo ambito è stato prodotto anche un booklet di raccomandazioni - elaborate tenendo conto delle indicazioni degli organismi internazionali e dell'esperienza maturata in molti Paesi - che rappresentano un utile strumento per elaborare e migliorare le strategie nazionali per ottimizzare le attività da svolgere per la riduzione dell'impatto sanitario dell'esposizione al radon.

Le raccomandazioni RADPAR vertono sui seguenti argomenti:

- piani nazionali e attività regolatorie sul radon;
- protocolli per le misure di concentrazione di radon negli ambienti chiusi;
- metodi per migliorare la comunicazione alla popolazione del rischio associato al radon;
- metodi per risolvere il potenziale conflitto tra il risparmio energetico degli edifici e la riduzione dell'esposizione al radon;
- protocolli di misura per le tecniche usate per la riduzione del radon negli ambienti chiusi;
- corsi di formazione per le misure di radon, per le misure di prevenzione nei nuovi edifici, e le azioni di risanamento per gli edifici esistenti;
- analisi di costo-efficacia e costo-beneficio delle strategie usate per la riduzione del radon.

Nell'ambito del Progetto RADPAR l'ISS coordina il [Work Package Developing policies and strategies to promote effective radon prevention and remediation 2012](#)

International Atomic Energy Agency (AIEA) Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation 2015

L'AIEA ha pubblicato una guida di sicurezza sulla protezione della popolazione dall'esposizione in ambiente chiuso dovuta al radon e ad altre fonti naturali di radiazione per aiutare le autorità nazionali a ridurre l'esposizione al radon. Questa guida alla sicurezza comprende anche indicazioni su come preparare un piano d'azione per il radon.

2.6.1 Norme ISO

- ISO 11665:2012 Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 (composta da 9 parti)

-
- ISO 13164:2013 Water quality -- Radon-222 (composta da 4 parti)
 - ISO 6641:2014 Measurement of radioactivity in the environment -- Air -- Radon 220: Integrated measurement methods for the determination of the average activity concentration using passive solid-state nuclear track detectors

Nell'elenco sono dettagliate le norme sulla misura del radon in aria indoor, con fonte sottosuolo oppure materiali.

- EN ISO 11665-1:2019 Misura della radioattività nell'ambiente - Aria: radon-222 - Parte 1: Origini del radon e dei suoi prodotti di decadimento a vita media breve e relativi metodi di misura
- UNI EN ISO 11665-2:2019 Misura della radioattività nell'ambiente - Aria: radon-222 - Parte 2: Metodo di misura ad integrazione per la determinazione della concentrazione di energia potenziale alfa media dei suoi prodotti di decadimento a vita media breve
- UNI EN ISO 11665-3:2020 Misure di radioattività in ambiente - Aria: radon-222 - Parte 3: Metodo di misura puntuale della concentrazione di energia potenziale alfa dei suoi prodotti di decadimento a vita media breve
- UNI ISO 11665-4:2021 Misura della radioattività nell'ambiente - Aria: radon-222 - Parte 4: Metodo di misura ad integrazione per la determinazione della concentrazione media di attività usando un campionamento passivo e analisi successiva
- UNI EN ISO 11665-5:2020 Misure di radioattività in ambiente - Aria: radon-222 - Parte 5: Metodi di misura in continuo della concentrazione in attività
- UNI EN ISO 11665-6:2020 Misure di radioattività in ambiente - Aria: radon-222 - Parte 6: Metodi di misura puntuali della concentrazione in attività
- UNI EN ISO 11665-7:2015 Misurazione della radioattività nell'ambiente - Aria: radon-222 - Parte 7: Metodo di accumulazione per la stima del rateo di esalazione da una superficie
- UNI ISO 11665-8:2020 Misura della radioattività nell'ambiente - Aria: radon-222 - Parte 8: Metodologie per le indagini iniziali e supplementari negli edifici
- UNI ISO 11665-9:2019 Misura della radioattività nell'ambiente - Aria: Radon-222 - Parte 9: Metodi di prova per la determinazione del rateo di esalazione dei materiali da costruzione

-
- UNI EN ISO 11665-11:2019 Misura della radioattività nell'ambiente - Aria: radon-222- Parte 11: Metodo di prova per la misura del radon nel suolo con campionamento effettuato in profondità nel terreno
 - UNI CEN ISO/TS 11665-12:2021 Misura della radioattività nell'ambiente - Aria: radon-222 - Parte 12: Determinazione del coefficiente di diffusione in materiali impermeabili: metodo di misura della concentrazione di attività su un lato della membrana
 - ISO/TS 11665-13:2017 Measurement of radioactivity in the environment — Air: radon 222 — Part 13: Determination of the diffusion coefficient in waterproof materials: membrane two-side activity concentration test method
 - UNI EN ISO 16641:2016. Misurazione della radioattività nell'ambiente - Aria - Radon 220: Metodi di misurazione integrati per la determinazione della concentrazione media di attività utilizzando rivelatori passivi a stato solido di tracce nucleari
 - UNI/TR 11290:2008. Classificazione dei metodi di misurazione del 222Rn e dei suoi prodotti di decadimento
 - CEN/TR 17113:2017. Construction products - Assessment of release of dangerous substances - Radiation from construction products - Dose assessment of emitted gamma radiation.
 - UNI PdR 122/2022. Monitoraggio della qualità dell'aria negli edifici scolastici - Strumenti, strategie di campionamento e interpretazione delle misure
 - UNI EN 16798-1:2019. Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6.

Ad oggi non esiste una norma tecnica che dettaglia le strategie per la prevenzione (edifici nuovi) oppure la riduzione delle concentrazioni in edifici esistenti, nei quali fare un risanamento. Un esempio di norma tecnica che ad oggi ancora non esiste in Italia è rappresentato dalla DIN/TS 18117-1:2021 uno standard tecnico tedesco che approfondisce i seguenti temi: il documento contiene le basi e descrive le misure per proteggere le costruzioni dal radon. Le misure descritte sono strutturali e di ventilazione e sono differenziate per fabbricati di nuova costruzione o ristrutturati. Il documento è applicabile solo agli edifici residenziali o ai luoghi di lavoro. La parte 2 della norma è ad oggi ancora in fase di scrittura. La norma riguarderà i seguenti

ambiti: misure strutturali e di ventilazione per la protezione dal radon: classificazione, selezione e raccomandazioni per l'azione.



2.7 Documenti nazionali

Ministero della Salute

Piano Nazionale Radon – 2002

Il Piano Nazionale Radon (PNR) - predisposto in Italia nel 2002 in analogia a quanto fatto in altri Paesi - consiste in un piano pluriennale per realizzare, in modo coordinato a livello nazionale, il complesso di azioni necessarie per ridurre il rischio di tumore polmonare associato all'esposizione al radon. Dotarsi di un PNR è diventato obbligatorio per ogni Paese membro dell'UE, in base alla nuova direttiva europea in materia di radioprotezione, pubblicata il 17 gennaio 2014

Progetto - Avvio del Piano Nazionale Radon per la riduzione del rischio di tumore polmonare in Italia (acronimo PNR-CCM) 2005

La realizzazione del PNR ha preso il via tre anni dopo attraverso il progetto Avvio del Piano Nazionale Radon per la riduzione del rischio di tumore polmonare in Italia, approvato nel 2005 dal CCM (Centro Nazionale per la Prevenzione ed il Controllo delle Malattie). Il coordinamento di tale progetto è stato affidato all'Istituto Superiore di Sanità (ISS), e le attività hanno coinvolto, oltre all'ISS, l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA, ex-APAT), l'Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza sul Lavoro (ISPESL, ora INAIL), le Regioni (ARPA e assessorati alla sanità), nonché alcune università.

Progetto biennale Piano Nazionale Radon per la riduzione del rischio di tumore polmonare in Italia: seconda fase di attuazione (acronimo PNR-II) 2012

Per dare continuità alle attività intraprese nell'ambito del progetto PNR-CCM, nel 2012, il Ministero della

Salute ha approvato il progetto biennale Piano Nazionale Radon per la riduzione del rischio di tumore polmonare in Italia: seconda fase di attuazione (acronimo PNR-II), anch'esso affidato all'ISS.

2.8 Sitografia

- About Radiation, RERF – Radiation Effects Research Foundation, USA-Japan, URL: https://www.rerf.or.jp/en/about_radiation/
- Agents classified by the IARC monographs, International Agency for Research on Cancer, World Health Organization, URL: <https://monographs.iarc.fr/agents-classified-by-the-iarc/>
- Caldognetto E., Monitoraggio del gas radon, INFN Legnaro, 2018, URL: http://www.inl.infn.it/~newweb/images/stage_2018/INFN_Radon.pdf
- Catasto delle grotte e delle cavità artificiali della Puglia, CNR – IRPI, Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, 2019, URL: <http://www.irpi.cnr.it/project/catasto-delle-grotte-cavitaartificiali-della-puglia/>
- Chronostratigraphic Chart, International Commission on Stratigraphy, 2014, URL: <http://www.stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale>
- Curie, IUPAC Gold Book, URL: <http://goldbook.iupac.org/html/C/C01444.html>
- Decreto Legislativo 15 febbraio 2016, n.28, Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.55 del 07 – 03 – 2016, URL: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2016/03/07/16G00036/sq>
- Domande e risposte sul radon, Arpa Veneto, URL: <http://www.arpa.veneto.it/temiambientali/agenti-fisici/radiazioni-ionizzanti/radon/faq-domande-e-risposte-sul-radon#qual-illimite-di>
- Faq Radon, Arpa Puglia, URL: http://www.arpa.puglia.it/web/guest/faq_radon
- Gargano, Enciclopedia Treccani, URL: <http://www.treccani.it/enciclopedia/gargano>
- Generazione e migrazione di radon nel suolo, Osservatorio Geofisico Novara, URL: http://www.osservatorionovara.it/docu/radon_app.pdf
- Handbook of mineralogy, Mineralogical Society of America, URL: <http://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/uraninite.pdf>

-
- Hoffmann B., Radon exhalation measurement and assessment of building materials: why and now?, Federal Office for Radion Protection, Berlin, URL: https://www.ena-norm.eu/wpcontent/uploads/2018/03/4_5_2_Hoffmann.pdf
 - Il radon e il Piano Nazionale Radon (PNR), ISS Istituto Superiore di Sanità, URL: <http://old.iss.it/radon/index.php?id=234&tipo=>
 - Il Radon in Italia, Arpa Lombardia, URL: <https://www.arpalombardia.it/Pages/Radioattivita/Radon/In%20Italia.aspx>
 - Il radon in Italia: guida per il cittadino, ISPESL – Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro, 2007, URL: http://www.salute.gov.it/imgs/C_17_opuscoliPoster_160_allegato.pdf
 - I terremoti nella storia: la grande scossa del 31 maggio 1646 nel Gargano, un caso di terremoto recentemente rivalutato, INGV terremoti, URL: <https://ingvterremoti.wordpress.com/2015/05/30/i-terremoti-nella-storia-la-grande-scossa-del31-maggio-1646-nel-gargano-un-caso-di-terremoto-recentemente-rivalutato/>
 - La presenza di gas radon nei luoghi di lavoro, Guida agli adempimenti, Confcommercio, Ispesl, <https://www.inail.it/cs/internet/docs/presenza-radon-luoghi-lavoro.pdf?section=attivita>
 - Locci A., Fenomeni di trasporto di materia in sistemi biomedici, 2009, URL: <http://www.stestox.altervista.org/dis/fenomeni/2.%20Fenomeni%20di%20trasporto%20in%20sistemi%20biomedici.doc>
 - Moroni M., Depressurizzazione del suolo mediante pozzo radon, 2016, URL: <https://www.radon.it/it/depressurizzazione-del-suolo-mediante-pozzo-radon/>
 - Moroni M., Interrogazione rilievi di radon per provincia, 2013, URL: <https://www.radon.it/it/il-radon-per-provincia-interroga-il-ns-database>
 - OMS – World Health Organization, Who handbook on indoor radon – A public health perspective, https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44149/9789241547673_eng.pdf;jsessionid=7D_BC6958C06D810C428E92AED5A05983?sequence=1
 - Opuscolo MITE 2015 https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_opuscoliPoster_283_ulterioriallegati_ult_erioreallegato_15_alleg.pdf

-
- Radiazioni ionizzanti, INFN - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Ferrara, URL: <http://www.fe.infn.it/~evangelisti/Sicurezza/radiazioni%20ionizzanti.pdf>
 - Radon, ARPAT, URL: <http://www.arpat.toscana.it/temi-ambientali/radioattivita/radon>
 - Radon, EpiCentro – Istituto Superiore di Sanità, URL: <https://www.epicentro.iss.it/radon/103>
 - San Nicandro Garganico, Portale Istituzionale della Provincia di Foggia, URL: http://www.provincia.foggia.it/page_new.php?Rif=513
 - Standards for protection against radiation, U.S.NRC, United States Nuclear Regulatory Commission, URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/>
 - Table de radionucléides, URL: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Rn222_tables.pdf
 - The Catalogue of strong earthquakes in Italy 461 B.C.-1997 and Mediterranean Area 760 B.C. – 1500, INGV, URL: <http://storing.ingv.it/cfti/cfti4/quakes/14782.html#>
 - The Nobel Prize in Physics 1903, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1903/summary/>
 - Trattato sul funzionamento dell'Unione Europea, Parte Sesta, Titolo I, Capo 2, Sezione 1, Articolo 288, Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, 26.10.2012, URL: <https://eurlex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex:12012E288>
 - Uranio, Eni Scuola, http://www.eniscuola.net/wp-content/uploads/2011/03/pdf_nucleare_2.pdf
 - Zannoni G., Atti del seminario formativo "Il Radon nei fabbricati: cause, rischi e rimedi", Associazione Geologi Liberi Professionisti della Provincia di Ragusa, URL: <http://www.collegiogeometri.rg.it/public/upload/Seminario%20Radon%20-%20Ragusa%20-.pdf>
 - European Commission, Air Quality Standards <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>

ECIS comprende il repository centrale dei dati da cui vengono calcolati gli indicatori e successivamente caricati nell'applicazione web ECIS (<https://ecis.jrc.ec.europa.eu/>), che funge da front-end del sistema per visualizzare gli indicatori del cancro (tramite

grafici, mappe e tabelle) e per renderli disponibili per il download. L'applicazione web ECIS supporta quindi la ricerca e il processo decisionale in materia di salute pubblica con le statistiche più aggiornate sul cancro; funge anche da punto di riferimento informativo per i cittadini europei.

AUSTRALIAN RADON PROTECTION link utili:

<https://www.arpansa.gov.au/regulation-and-licensing/regulation/international-best-practice>

Publicazioni ICNIRP

Commissione internazionale per la protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ICNIRP)
L'ICNIRP è un organismo di esperti scientifici indipendenti che forniscono informazioni e consigli sui potenziali rischi per la salute derivanti dall'esposizione alle radiazioni non ionizzanti. Gran parte della guida dell'ICNIRP è pubblicata sotto forma di revisioni e rapporti scientifici e atti di riunioni scientifiche. ARPANSA contribuisce al lavoro di ICNIRP.

Publicazioni ICRP

Commissione internazionale per la protezione radiologica (ICRP)
L'ICRP è un'organizzazione indipendente che promuove per il pubblico beneficio la scienza della protezione radiologica, in particolare fornendo raccomandazioni e linee guida su tutti gli aspetti della protezione contro le radiazioni ionizzanti. Le sue raccomandazioni hanno ottenuto un'ampia accettazione e sono state implementate nei quadri internazionali e nazionali per la gestione dei rischi da radiazioni. ARPANSA contribuisce al lavoro dell'ICRP.

Publicazioni dell'OMS

Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS)

L'OMS è l'autorità di direzione e coordinamento per la salute all'interno del sistema delle Nazioni Unite. È responsabile di fornire leadership su questioni sanitarie globali, inclusa la definizione dell'agenda di ricerca sanitaria, la definizione di norme e standard, l'articolazione di opzioni politiche basate sull'evidenza, la fornitura di supporto tecnico ai paesi e il monitoraggio e la valutazione delle tendenze sanitarie. Pubblica linee guida e raccomandazioni su politiche sanitarie e interventi clinici. In termini di radioprotezione, l'OMS pubblica linee guida sul radon indoor, le radiazioni nell'acqua potabile e i radionuclidi negli alimenti. Ci sono anche pubblicazioni sulle emergenze da radiazioni e informazioni sugli incidenti da radiazioni a Chernobyl e Fukushima. ARPANSA contribuisce al lavoro dell'OMS come centro di collaborazione regionale e in vari gruppi di lavoro.

Pubblicazioni dell'AIEA

Agenzia internazionale per l'energia atomica (AIEA)

L'AIEA è il centro mondiale per la cooperazione in campo nucleare. L'Agenzia collabora con i suoi Stati membri (compresa l'Australia) per promuovere l'uso sicuro, protetto e pacifico delle tecnologie nucleari (e delle radiazioni). Gli standard di sicurezza dell'AIEA forniscono un quadro che comprende i fondamenti di sicurezza, i requisiti di sicurezza e le guide di sicurezza. L'AIEA produce anche orientamenti sulla sicurezza nucleare e documenti tecnici e pubblica i rapporti dell'International Nuclear Safety Group (INSAG).

Tutte le pubblicazioni dell'AIEA sono sviluppate attraverso un processo aperto e trasparente per raccogliere, sintetizzare e integrare le conoscenze e l'esperienza acquisite dall'uso effettivo delle tecnologie nucleari o delle radiazioni e dall'applicazione degli standard di sicurezza e delle linee guida per la sicurezza, inclusa la conoscenza delle tendenze e dei problemi emergenti di importanza normativa. ARPANSA, per conto dell'Australia, svolge un ruolo attivo nello sviluppo degli standard e delle linee guida dell'AIEA.

Pubblicazioni UNSCEAR

Il Comitato Scientifico delle Nazioni Unite sugli Effetti delle Radiazioni Atomiche (UNSCEAR) L'

UNSCEAR riferisce annualmente all'Assemblea Generale delle Nazioni Unite sui livelli e gli effetti dell'esposizione alle radiazioni ionizzanti e sui rischi associati per la salute delle persone e dell'ambiente. I governi e le organizzazioni di tutto il mondo si affidano alle valutazioni scientifiche dell'UNSCEAR come base per la stima dei rischi da radiazioni e per stabilire misure di protezione. L'Australia è uno dei 27 Stati membri delle Nazioni Unite che partecipano al lavoro dell'UNSCEAR.

2.8.1 Pubblicazioni SNPA e Organizzazioni istituzionali

- **ARPA Veneto** Rapporto sul problema dell'inquinamento da gas radon nelle abitazioni 2002
- **ISPRA (allora APAT)** (Linee Guida per le Misure di Radon in Ambienti Residenziali 2004
- **ARPA Umbria** Progetto per lo studio della presenza del gas radon all'interno di edifici ad uso scolastico 2005
- **ENEA** Il radon e la sua misurazione 2006
- **Regione Emilia-Romagna** Il radon ambientale in Emilia Romagna 2007
- **ARPA Lazio** radon Guida per la popolazione 2008
- **ARPA Sicilia** Piano regionale per il monitoraggio del Radon 2009
- **Regione Lombardia** Rapporto sullo stato dell'Ambiente in Lombardia 2010-2011
- **ARPA Umbria** Il radon nelle scuole dell'Umbria 2011
- **ARPA Toscana** Indagine regionale concentrazione Radon negli ambienti di vita e di lavoro 2012
- **Consiglio Regionale del Veneto** - Dossier Radon. Un Nobile Pericoloso 2012
- **ARPA Calabria** - La Carta Del Rischio Radon Di Catanzaro E Crotone 2012
- **Arpa Sicilia** Indagine Sul Radon In Provincia Di Ragusa 2008-2012
- **ARPA Marche** Rapporto 2013 sulla radioattività ambientale
- **ARPA Basilicata** Prima Indagine Conoscitiva Sui Livelli Di Concentrazione Radon Indoor Negli Edifici Scolastici Della Basilicata 2013
- **ISPRA** Linee guida ed indirizzi metodologi 57/2015 Task 02.01.01 – Banca Dati radon 2015
- **ARPA Sardegna** Progetto Classificazione Del Territorio Regionale Con Individuazione Delle Aree A Rischio Radon 2016
- **ARPA Puglia** Guida tecnica per le misure di concentrazione media annua di radon in aria in luoghi di lavoro, abitazioni, scuole e luoghi aperti al pubblico 2017
- **ARTA Abruzzo** Campagne Di Misura Del Radon Nelle Abitazioni Ed In Altri Edifici della Regione Abruzzo 2017



3 Analisi della letteratura scientifica

3.1 Introduzione

Il gas radon è riconosciuto essere un cancerogeno umano di gruppo 1, sia dalla WHO (*World Health Organization*) (2009) che dalla IARC (*International Agency for Research on Cancer 1988*). La concentrazione del radon outdoor è compresa tra 5 and 15 Bq m⁻³, tali livelli non presentano un rischio per la salute. D'altra parte, le progenie del radon a vita breve (P218, Pb214, Bi214 e P214) possono accumularsi in spazi chiusi (grotte, miniere, locali interni) ed emettere particelle alfa radioattive che dopo l'inalazione rimangono nei tessuti polmonari e mutano il DNA causando il cancro (ICRP 2007). L'effetto sulla salute del radon è noto da decenni, esso è responsabile di circa il 15% di morti per cancro ai polmoni a livello globale (WHO, 2009).

Secondo l'*International Residential Code* (2010), è prioritario intervenire sulle nuove costruzioni attuando un efficace metodo di controllo del radon, in particolare nelle aree in cui il livello di radon è elevato. Il Consiglio dell'Unione europea (2013) ha promulgato la direttiva sugli standard di sicurezza di base nel 2013 che richiede agli Stati membri di affrontare la questione del radon sviluppando piani d'azione. Molti Paesi europei e la maggior parte degli Stati degli USA hanno adottato codici conformi agli standard internazionali (*National Conference of State Legislatures*, 2015).

Nonostante l'aggiornamento della normativa edilizia e i manuali gratuiti e accessibili e linee guida, i proprietari di case esistenti, nella maggior parte dei Paesi, non hanno l'obbligo di misurare, mitigare e bonificare il radon. Non hanno neanche bisogno di dichiarare il livello del radon delle proprietà nelle transazioni immobiliari.

Per comprendere e approfondire la problematica del radon è stata effettuata una revisione bibliografica, analizzando i principali studi relativi al tema dell'efficientamento energetico e del rischio radon negli ambienti indoor.

3.2 Metodologia

La ricerca è stata effettuata utilizzando le seguenti banche dati:

- ArXiv (<https://www.arxiv.org>)
- DOAJ (<https://www.doaj.org>)
- Jstor (<https://www.jstor.org>)
- PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>)
- Science Direct (<https://www.sciencedirect.com>)

Il periodo preso in esame riguarda gli ultimi 10 anni: dal gennaio 2011 al settembre 2022.

Le parole chiave utilizzate sono: "energy efficiency " and "Indoor radon" and "mitigation".

La ricerca è stata effettuata, sia utilizzando l'operatore booleano *and* sia utilizzando il termine *indoor radon* da solo, nei casi in cui il risultato ottenuto fosse stato uguale a zero, quindi nessun articolo trovato.

Da una prima analisi sono state individuate n.4 aree di ricerca:

- mappatura delle aree a rischio radon
- misurazione e concentrazione del radon
- relazione tra interventi di efficientamento energetico e concentrazione del radon indoor
- mitigazione della concentrazione del radon indoor

3.2.1 Mappatura delle aree a rischio radon

Introduzione

Il radon negli ambienti confinati è il risultato di fattori geogenici e antropici, oltre che meteorologici. I fattori geogenici determinano la generazione e il trasporto di radon nel suolo e l'esalazione di radon dal suolo, mediante processi regolati da proprietà geologiche e pedologiche. I fattori antropici, invece, riguardano la tenuta stagna delle fondazioni degli edifici, i materiali da costruzione utilizzati e il deflusso di radon dall'edificio dovuto alle abitudini degli occupanti, *in primis* il ricambio d'aria. La concentrazione di radon nel gas del suolo è solitamente di diversi ordini di grandezza superiore a quella indoor, ma anche nelle aree geogeniche a basso rischio possono verificarsi alte concentrazioni di radon indoor se i fattori antropici favoriscono l'accumulo di radon nell'ambiente confinato. La concentrazione media del radon indoor negli edifici residenziali è molto variabile tra diverse regioni, principalmente a causa dell'ambiente geogenico, ma anche all'interno di una stessa regione tra edifici diversi a causa di fenomeni geologici/tettonici locali o per caratteristiche edilizie varie, quali l'età, il materiale da costruzione e il retrofit energetico, oltre che per le diverse abitudini di vita dei residenti che possono influire sull'intensità di ricambio dell'aria. La previsione e la mappatura del rischio radon sono complesse, sebbene siano una componente chiave nelle strategie nazionali sul radon. Le mappe del rischio radon, infatti, servono allo scopo di supportare il processo decisionale per individuare le aree prioritarie del radon e per migliorare la percezione del rischio e la comunicazione del rischio al pubblico. Le mappe di radon indoor che sono state prodotte in molti Paesi e regioni nel corso degli ultimi decenni (principalmente in Europa e Nord America) (Petermann & Bossew, 2021), spesso differiscono in termini quantitativi (ad es.

concentrazione media, superamento di una certa soglia), tecniche di misurazione, progettazione dell'indagine, metodo di mappatura applicato e di risoluzione spaziale (unità amministrative o geologiche, celle di griglia con dimensioni variabili delle celle). A causa dell'elevata variabilità locale, le mappe di radon su larga scala non forniscono informazioni sulla concentrazione di radon in un particolare edificio; a tali fini sono necessarie misurazioni in quel determinato edificio. Infine, le mappe solitamente rappresentano il valore medio della concentrazione di radon indoor al piano terra e quindi non sono rappresentative dell'esposizione al radon dei cittadini, poiché la maggior parte della popolazione non vive al piano terra.

Stato dell'arte

Cosma *et al.* (2013) hanno presentato una prima mappa del radon indoor in alcune regioni della Romania coprendo un totale di 1.747 abitazioni. Un ulteriore obiettivo è stato individuare alcuni fattori che possono esercitare un'influenza sulle concentrazioni di radon residenziale. I risultati sono stati inclusi nell'Atlante europeo del radon indoor²³, su invito del *Joint Research Centre* (JRC)²⁴. Le misurazioni sono state eseguite negli ultimi 10 anni utilizzando rilevatori di tracce nucleari CR-39 con un periodo di esposizione di 3-12 mesi ai livelli del piano terra, secondo il protocollo di misurazione NRPB (*UK National Radiological Protection Board*). La concentrazione media di radon calcolata per le abitazioni rumene è risultata essere di 126 Bq m⁻³ (esclusa l'area soggetta a radon di S_{tei-Ba^șit_a}). La mappa ha rivelato che il 13% di tutte le abitazioni censite superava una concentrazione di 400 Bq m⁻³ e l'85 % di queste si trova nella S_{tei-Ba^șit_a} (contea di Bihor). In quest'area si prevedeva un'elevata percentuale di abitazioni colpite (21% delle abitazioni oggetto di indagine con una concentrazione di radon superiore a 400 Bq m⁻³), principalmente a causa della presenza di ex miniere di uranio vicino agli insediamenti, in conformità con le indagini di altre ricerche pertinenti.

L'elevata variabilità delle concentrazioni di radon tra le regioni esaminate della Romania è probabilmente correlata alla diversa geologia. Di conseguenza, i fattori geologici devono essere ulteriormente studiati. Il tasso di emanazione del radon è sostanzialmente influenzato dalle caratteristiche del suolo, come la permeabilità del suolo e la concentrazione di radon nel gas del suolo. Poiché una maggiore permeabilità consente una maggiore migrazione del gas del suolo e del radon dal suolo all'edificio, è possibile prevedere livelli elevati di radon indoor in terreni più permeabili. Nel 2010 è stato avviato uno studio pilota nell'area di S_{tei-Ba^șit_a} al fine di implementare misure di mitigazione in 20 case con livelli di radon indoor superiori a 600 Bq m⁻³. Questi risultati rappresentano il punto di partenza di future indagini di misurazione più estese in Romania al fine di completare la mappatura del radon

²³ Cinelli, G., De Cort, M. & Tollefsen, T. (Eds.), *European Atlas of Natural Radiation*, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2019.

²⁴ Joint Research Centre. <https://ec.europa.eu/info/departments/joint-research-centre> it

indoor, avere una valutazione significativa e affidabile sulla distribuzione del radon nel Paese e definire tutte le aree soggette a radon dove potrebbe essere attuata la bonifica.

Frutos *et al.* (2019) hanno proposto un metodo per identificare il suolo urbano, gli alloggi e la popolazione potenzialmente soggetti al rischio di esposizione al radon e lo hanno applicato alla regione di Madrid. La procedura attinge dai sistemi informativi geografici (GIS) aggregati a scala comunale e dai dati sugli edifici eventualmente interessati provenienti dal censimento della popolazione e dalla mappa del potenziale rischio radon del Consiglio spagnolo per la sicurezza nucleare²⁵. Inoltre, gli autori hanno assunto che il suolo sia l'unica fonte di rischio di radon e la diffusione e l'avvezione gli unici meccanismi di trasporto, ritenendo, quindi più elevata la vulnerabilità nei locali in cui l'alloggio è a contatto con il terreno, ovvero i piani più bassi (piani interrati, piani terra e primi piani). Il metodo quantifica l'entità del problema sotto forma di indicatori sugli edifici, sul numero di alloggi e sulla superficie lorda che possono essere interessati in ciascuna categoria di rischio. L'applicazione della metodologia alla provincia di Madrid ha mostrato che nel 47% dei comuni sono collocate abitazioni situate in aree ad alto rischio di radon. L'utilizzo dei dati catastali per focalizzare l'attenzione sugli alloggi a più alto rischio ha prodotto informazioni sulla superficie dei locali vulnerabili (seminterrato, piano terra e primo piano). Nelle piccole città, l'area interessata dal rischio radon differiva solo in minima parte dal totale, data la quota consistente di edifici bassi in tali comuni. Secondo i risultati, in oltre il 70% della superficie edificata in 65 comuni su un totale di 179, è stato stimato che almeno il 10% delle abitazioni presenta livelli di radon superiori a 300 Bq m⁻³. Un numero consistente di comuni (96), invece, si trova in aree a basso rischio (meno del 10% della superficie edificata classificata come livello di rischio 4 o 5²⁶), principalmente nella parte meridionale della regione; infine, nei restanti 18 comuni dal 10% al 60% dell'area edificata si ha una classificazione di rischio 4 o 5.

Vukotic *et al.* (2019) hanno presentato gli esiti della prima indagine nazionale sul radon indoor in Montenegro²⁷ iniziata nel 2002 nelle zone centrali e costiere del Paese. Sulla base dei risultati dell'indagine sul radon, gli autori hanno prodotto due tipi di mappe del radon del Montenegro: una mappa delle concentrazioni medie di attività del radon nei comuni e una mappa delle concentrazioni medie di attività del radon nelle celle di 10 km × 10 km della rete nazionale. Le concentrazioni medie annue di attività del radon nei comuni variano da 40 a 201 Bq m e da 30 a 732 Bq m nei quadrati di 10 km × 10 km della rete nazionale. Infine, utilizzando i dati sulla popolazione e sul radon per i comuni, hanno stimato che la concentrazione media

²⁵ CSN Spanish Nuclear Safety Council, 2017. Cartografía Del Potential de Radón de España, FDE-02.17.

²⁶ Livelli di rischio del potenziale di radon secondo le categorie CSN: 5: 90° percentile > 400 Bq m⁻³; 4: 301 < 90° percentile < 400 Bq m⁻³; 3: 201 < 90° percentile < 300 Bq m⁻³; 2: 101 < 90° percentile < 200 Bq m⁻³; 1: 90° percentile < 100 Bq m⁻³.

²⁷ Per i dettagli dei risultati dell'indagine, si rimanda all'apposito paragrafo "Misurazione e concentrazione del radon".

annua di radon ponderata per la popolazione nelle abitazioni montenegrine sia pari a 100,5 Bq m mentre la media geometrica ponderata pari a 92,8 Bq m. Con il valore medio aritmetico ponderato e un fattore di conversione della dose ancora valido di 9 nSv per Bq h m, la dose media efficace dall'esposizione al radon indoor nelle case in Montenegro è stimata in 1,58 mSv y⁻¹.

Elío *et al.* (2019) hanno sviluppato una prima versione di una mappa pan-europea del radon indoor. Nel 2006, infatti, il *Joint Research Centre (JRC)* della Commissione europea ha avviato un progetto a lungo termine per la mappatura del radon a livello europeo. Per oltre 10 anni il JRC ha sviluppato l'Atlante europeo delle radiazioni naturali²⁸ con lo scopo di: aumentare le conoscenze del pubblico sulle radiazioni ionizzanti naturali; analizzare il livello di radioattività naturale causato da diverse fonti; produrre una migliore stima della dose annuale a cui è esposta la popolazione generale; confrontare le fonti naturali e artificiali. La mappa europea visualizza la concentrazione media annua di radon indoor misurata al piano terra degli edifici su una griglia di celle di 10 km × 10 km. Sulla base delle specifiche dei dati di input stabilite dal JRC, i Paesi europei hanno fornito statistiche sintetiche stimate su celle di griglia di 10 km × 10 km senza comunicare i dati originali, garantendo così la riservatezza dei dati per i singoli proprietari delle abitazioni. Al momento della stesura dell'articolo di Elío *et al.* (fine 2018), 32 Paesi (Stati membri dell'UE e non) hanno contribuito con dati e informazioni, coprendo circa il 50% del continente, lasciando però ancora un gran numero di celle sul territorio europeo senza dati. Inoltre, il numero di misurazioni per cella varia notevolmente, da molte con una sola misurazione fino a una sola con quasi 24.000 abitazioni campionate. Quindi, il completamento della mappa europea del radon indoor richiede ancora uno sforzo significativo da parte dei Paesi partecipanti, poiché una stima solida dell'esposizione al radon in una griglia di 10 km × 10 km richiede almeno 30 misurazioni del radon indoor e, al momento della stesura dell'articolo, la maggior parte delle celle della griglia campionate (78%) ha meno di 20 abitazioni analizzate. Per superare tali limitazioni è stato quindi necessario testare delle tecniche di interpolazione per stimare l'esposizione al radon su scala europea. Dei quattro metodi selezionati, due utilizzano esclusivamente le misure di concentrazione di radon indoor, ovvero l'*inverse distance weighting (IDW)* e l'*ordinary kriging (OK)*, e altre due tengono conto anche delle informazioni geologiche, ovvero il *collocated cokriging* con la concentrazione di uranio nel terreno come variabile secondaria (CCK) e il *regression kriging* con la geochimica del terreno e la geologia del substrato roccioso come variabili secondarie (RK). Dei quattro metodi testati, RK si è dimostrato il migliore per prevedere le concentrazioni medie di radon indoor. Combinando le previsioni di RK con i valori medi empirici (AM) nelle griglie con 30 o più misurazioni, è stata creata una mappa del radon indoor per tutta l'Europa. La mappa rappresenta il valore medio della concentrazione di radon indoor al piano terra e quindi non è rappresentativa

²⁸ Cinelli, G., De Cort, M. & Tollefsen, T. (Eds.), *European Atlas of Natural Radiation*, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2019.

dell'esposizione al radon dei cittadini europei, poiché la maggior parte delle persone non vive al piano terra. Tuttavia, è il primo passo verso una mappa dell'esposizione al radon e, in futuro, una stima della dose. Nelle versioni future, il modello includerà una scala più ampia della mappa geologica (ad esempio, scala 1:1 milione), nonché altri fattori geogenici che possono influenzare la concentrazione di radon indoor (ad esempio, unità di suolo, tipi di acquiferi). Inoltre, verrà analizzata l'influenza dei fattori antropici e di quelli che possono avere conseguenze sulle caratteristiche degli edifici e gli stili di vita (ad esempio, le temperature medie, le precipitazioni annuali, l'altitudine). Infine, le tecniche di apprendimento automatico sono considerate metodi promettenti per la modellazione dell'AM, poiché le previsioni di tipo *kriging* si esauriscono se sono coinvolti molti predittori (intercorrelati).

Nel 2005 il JRC aveva pubblicato una panoramica delle indagini sul radon condotte in circa 30 Paesi europei (Dubois, 2005) che mostrava che nessun Paese aveva utilizzato lo stesso approccio, in termini di progettazione di indagine, tecniche di misurazione e strategie di mappatura. Con tali differenze nella scelta della quantità mappata e nel tipo di visualizzazione, le mappe risultanti erano eterogenee, incompatibili a livello transfrontaliero e non confrontabili. Il trattato Euratom, principalmente il suo articolo 39 (Unione europea, 2016)²⁹, conferisce al JRC il mandato di raccogliere, presentare, valutare e interpretare i dati radiologici degli Stati membri dell'UE (Cinelli, 2019). I fornitori dei dati nazionali hanno riempito le celle con le seguenti statistiche calcolate dai loro dati originali: media aritmetica, deviazione standard (anche i rispettivi log-trasformati), mediana, minimo e massimo e numero di misurazioni per cella. La scelta della variabile da mappare può essere vista come un compromesso tra una mappa del radon indoor, che costituisce una *proxy* di una mappa dell'esposizione, e una mappa geogenica del "potenziale del radon". Poiché la maggior parte delle persone in effetti non vive in stanze al piano terra e non è esposta continuamente (cioè 24 ore al giorno, 365 giorni all'anno), la variabile mappata non riflette la reale esposizione al radon. Piuttosto, mostra una concentrazione indoor standardizzata, vale a dire limitata alle condizioni "piano terra" e "media annuale". D'altra parte, la variabile include ancora fattori antropici che influenzano i livelli di radon, ovvero stili di costruzione e abitudini di vita; quindi non è una misura del potenziale rischio radon, che è definito per includere solo i controlli del radon naturali (geogenici), ma non quelli antropogenici. Limitare i dati alla concentrazione media annuale di radon nelle stanze al piano terra delle abitazioni significa che i fornitori di dati devono stimare il rischio di esposizione al radon, idealmente da misurazioni a lungo termine. Dal 2010 il JRC ha inviato un questionario di garanzia di qualità ai fornitori di dati nazionali, chiedendo loro informazioni sui loro progetti di indagine, metodi di misurazione, rivelatori utilizzati e tecniche di elaborazione dei dati. Nella maggior parte dei 20 Paesi che hanno risposto a questo questionario, i dataset rappresentano una combinazione di diversi studi e sondaggi, spesso condotti con differenti scopi e disegni di indagine. A settembre 2018, 35 Paesi

²⁹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:12016A/TXT&from=EN>

europei hanno partecipato alla mappa europea del radon indoor. Il numero di misurazioni per cella e la copertura proporzionale del territorio nazionale variano ampiamente tra i Paesi e le regioni dei partecipanti, come già anticipato. Il numero di misurazioni per cella varia da una singola fino a un massimo di quasi 24.000 ma ci sono anche molte celle vuote. Si può quindi ritenere che la mappa rifletta lo stato delle indagini nazionali sul monitoraggio del radon indoor in Europa. La distribuzione geografica delle medie aritmetiche sulle celle della griglia rivela una tendenza spaziale nella concentrazione di radon indoor in tutta Europa e riflette essenzialmente la geologia sottostante. Regioni ad alta concentrazione di radon si trovano nelle zone granitiche del Massiccio Boemo, dello Scudo Fennoscandiano, della provincia granitica iberica, del Massiccio Centrale, della Corsica, della Cornovaglia e dei Monti Vosgi; nelle rocce cristalline delle Alpi Centrali e nelle rocce carsiche del Giura Svizzero e delle Dinaridi; negli scisti neri dell'Estonia settentrionale; in alcune strutture vulcaniche dell'Italia centrale e nel Devoniano inferiore delle Ardenne. Oltre alla geologia, contribuiscono anche fattori climatici e antropogenici che necessitano di ulteriori indagini. La media aritmetica di tutte le celle non vuote in Europa (per i Paesi partecipanti) è 103 Bq m^{-3} , mentre la mediana è 60 Bq m^{-3} , ma tale media spaziale (media sulle celle) è diversa dalla media sulle singole misurazioni ($AM=148 \text{ Bq m}^{-3}$, calcolata come media aritmetica di cella ponderata per il numero di misurazioni), dalla media delle medie dei Paesi ($AM=97 \text{ Bq m}^{-3}$) e ancora, in generale, dalla media ponderata per la densità di popolazione (nessun valore finora disponibile). Secondo l'*OMS Handbook on Indoor Radon* (OMS, 2009)³⁰, si raccomanda un livello di riferimento nazionale di 100 Bq m^{-3} per limitare il rischio per gli individui. Ove ciò non sia possibile, il livello scelto non deve superare i 300 Bq m^{-3} . Nella Direttiva *Basic Safety Standards* (Unione Europea, 2013), recentemente ammodernata e consolidata³¹, è richiesto un livello di riferimento per i luoghi di lavoro e le abitazioni al massimo di 300 Bq m^{-3} . Per tutti i Paesi partecipanti alla mappa europea del radon indoor, il 34% delle celle non vuote ha una media aritmetica superiore a 100 Bq m^{-3} e il 4% di esse è superiore a 300 Bq m^{-3} . Allo stesso modo, sono state calcolate le probabilità di superamento per ciascun Paese partecipante: nella Repubblica Ceca, oltre il 90% delle medie aritmetiche di tutte le celle supera i 100 Bq m^{-3} , mentre all'altra estremità della scala, nessuna delle celle nei Paesi Bassi ha una media aritmetica al di sopra di questo livello e, anche in questo caso, tali cifre possono essere spiegate dalla geologia sottostante. Tuttavia, per i Paesi che avevano comunicato dati entro settembre 2018 principalmente da aree ad alto tasso di radon (ad es. Grecia e Polonia), tali statistiche dovrebbero essere interpretate solo come indicative a livello regionale, almeno fino a quando non saranno disponibili dati con copertura nazionale.

Petermann e Bossew (2021), partendo dall'assunzione che la principale fonte di radon indoor sia il suolo sottostante gli ambienti costruiti, hanno utilizzato il potenziale

³⁰ <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673>

³¹ <https://op.europa.eu/it/publication-detail/-/publication/293b4d07-74fd-11e8-9483-01aa75ed71a1>

geogenico di radon³² (GRP) e un indice di rischio geogenico da radon (GRHI) per prevedere la componente geogenica del rischio di radon indoor in Germania. Hanno correlato i dati sul radon indoor alle mappe di GRP e GRHI e adattato modelli di regressione logistica per calcolare le probabilità che il radon indoor superi le soglie di 100 Bq m⁻³ e 300 Bq m⁻³. Per stimare il numero di edifici con radon indoor superiore a 100 Bq m⁻³ e 300 Bq m⁻³ per ciascun comune sono state stimate la probabilità mediata per ogni comune, considerando solo le stime all'interno dell'abitato, e la probabilità media di superamento per comune, accoppiata con il rispettivo parco edilizio residenziale.

I dati utilizzati provenivano da diverse indagini regionali che inizialmente non erano progettate per produrre una mappa nazionale di rischio radon indoor, ma spesso si concentravano su aree ad elevato potenziale di radon. Di conseguenza, le misurazioni mostrano un forte raggruppamento spaziale in alcune aree mentre altre aree rivelano una netta mancanza di dati (ad esempio, Germania nord-orientale). Pertanto, i dati non sono rappresentativi, né rispetto alla distribuzione della popolazione, né ai fattori di controllo. Poiché le singole osservazioni sono state condotte in condizioni non facilmente confrontabili (piano diverso, interrato non sempre presente, periodi di misurazione inferiori all'anno), è stata prevista la normalizzazione dei dati ad una situazione standard.

Dai risultati dello studio si rileva che l'indice di rischio geogenico da radon ha un potere predittivo generale migliore rispetto al potenziale geogenico di radon per prevedere la componente geogenica del rischio radon indoor in Germania. Le risultanti mappe di probabilità di superamento di 100 Bq m⁻³ e 300 Bq m⁻³ si basano su un modello globale, ovvero una specifica quantità geogenica di radon corrisponde ovunque alla stessa probabilità di superamento; sebbene questo modello globale abbia dimostrato di fornire previsioni in media accurate, è possibile aspettarsi deviazioni regionali, se a livello locale sono presenti condizioni specifiche che non sono coperte dai predittori. Inoltre, è prevedibile che il modello che rappresenta la probabilità di superamento di 100 Bq m⁻³ sia più accurato del modello che rappresenta la probabilità di superamento di 300 Bq m⁻³ a causa di un minore squilibrio di classe. Il più alto rischio geogenico indoor da Rn è stato riscontrato in alcuni altopiani tedeschi, il più basso nelle pianure della Germania settentrionale; la probabilità media di superamento nei comuni tedeschi è dell'11,6% per 100 Bq m⁻³ e dell'1,9% per 300 Bq m⁻³. Ciò corrisponde a uno stock di edifici residenziali che supera le rispettive soglie di 2 milioni per 100 Bq m⁻³ e di 350.000 per 300 Bq m⁻³. La maggior parte delle grandi aree urbane (77%) si trova in aree a basso rischio; le aree ad alto rischio (ossia in cui il superamento di 300 Bq m⁻³ è maggiore del 10%) comprendono solo lo 0,8% del patrimonio edilizio residenziale nazionale, ma il 6,3% degli edifici interessati. Le implicazioni per la protezione dal radon sono dupplici: (1) il concetto di

³² Il potenziale geogenico del radon (GRP) di un'area è la velocità con cui il radon migra in superficie, sia lungo le faglie o direttamente dal suolo poco profondo (Giustini *et al.*, 2022).

area prioritaria radon è efficiente in termini di costi, in quanto consente di identificare la maggior parte degli edifici che superano una concentrazione soglia con una data quantità di risorse, d'altra parte (2) poiché la maggior parte delle concentrazioni pericolose di radon indoor si verifica in aree a rischio medio-basso, è necessario considerare anche queste, per una riduzione ottimale del rischio di cancro al polmone.

È necessario stabilire relazioni tra il radon indoor e le quantità relative al radon geogenico, come il potenziale geogenico del radon o la concentrazione di uranio nel suolo (i cosiddetti predittori di radon), poiché solo il radon indoor è direttamente collegato ai valori di riferimento della direttiva sulla sicurezza. Giustini *et al.* (2022) hanno valutato il rischio radon locale di 3 comuni laziali con diversi potenziali geogenici del radon (GRP), in particolare Caprarola, Celleno e Ciampino. La selezione dei siti di studio si è basata su un'analisi preliminare della mappa, già disponibile, del potenziale di radon geogenico (GRP) della regione Lazio. Gli autori hanno creato poi nuove mappe del potenziale geogenico del radon integrando i dati della letteratura con nuovi dati sul campo (presenza gas del suolo, tasso di dose gamma terrestre, contenuto di radionuclidi nel suolo/rocce affioranti) raccolti durante il progetto LIFE-Respire (LIFE 16/ENV/IT/000553) nei tre comuni. Le mappe GRP dei tre comuni sono state poi confrontate con le mappe *Terrestrial Gamma Dose Rate* (TGDR) degli stessi siti e le nuove misurazioni del radon indoor per valutarne la fonte e il legame con gli scenari geologici. Ulteriore scopo è stato indagare la loro relazione con i livelli di radon indoor associati, valutare i dosaggi di radiazioni inalate e il rischio associato per gli abitanti per definire le aree prioritarie per il radon come previsto dalla Direttiva 2013/59/Euratom.

I risultati hanno evidenziato la correlazione positiva tra il contenuto di radionuclidi delle rocce affioranti, le concentrazioni di radon nel suolo e la presenza di elevati valori di radon indoor in aree con GRP medio-alto. I dati confermano che l'area Cimini-Vicani presenta dosaggi inalatori superiori al valore di riferimento di 10 mSv/a. I dati radon, raccolti nel comune di Caprarola, hanno un valore medio molto elevato (157,9 kBq m⁻³), circa due o tre volte maggiore di quelli calcolati per gli altri due comuni e tre volte superiore a quelli calcolati per quelli regionali (Lazio). Il tufo vulcanico è il materiale da costruzione più utilizzato a Caprarola (72%) e Celleno (65%), mentre a Ciampino il materiale dominante è il blocco di cemento (69%) seguito dal tufo minore (31%). I risultati hanno mostrato anche, in generale, che il potenziale geogenico del radon è strettamente legato al contesto geologico di un'area in termini di sorgente di radon (ad es. contenuto di radionuclidi nella roccia e nel suolo), vie di migrazione del radon (faglie e fratture) e meccanismo di esalazione del radon gassoso dal suolo all'atmosfera e all'ambiente interno. Su scala comunale vi è una buona corrispondenza tra le aree GRP più elevate e le più alte concentrazioni di radon indoor e valori di dose gamma, confermando così che la geologia interessa almeno i livelli più bassi (es. suolo e seminterrati) di un edificio.

In molti casi, la dose di radiazioni ricevuta dalle persone a causa del radon indoor è superiore al livello per il quale sono necessarie o raccomandate alcune azioni di mitigazione. Ai fini di una valutazione preliminare del rischio radiologico, la mappa GRP del Lazio mostra una buona corrispondenza con la distribuzione dei casi di tumore del polmone. Queste aree possono essere considerate come le Aree prioritarie Radon (definite nella Direttiva Europea), dove le amministrazioni comunali possono svolgere attività di monitoraggio su scala dettagliata e adottare sistemi di bonifica *ad hoc* secondo necessità.

Nello studio di Coletti *et al.* (2022), gli autori sono partiti dalla consapevolezza che le informazioni prodotte con le sole misurazioni di radon indoor hanno dei limiti: possono essere gravemente distorte da fattori non controllati ad esempio, il tipo di materiali da costruzione, il livello del pavimento, la ventilazione, la presenza di un seminterrato, la tipologia di utilizzo dei locali, numero di edifici per km²) che possono portare a una informazione potenzialmente incompleta, se non addirittura errata, del rischio associato all'esalazione di radon (European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italy (JRC), 2020³³). Un approccio corretto per intercettare realisticamente il comportamento del radon e il pericolo per la salute ad esso associato richiede informazioni essenzialmente accurate sui fattori geologici e strutturali che controllano l'esalazione del radon e il suo conseguente accumulo indoor. Il territorio scelto come oggetto di studio, il comprensorio dei Colli Euganei, rappresenta un caso interessante in quanto si tratta di un contesto geologico complesso situato in un'area densamente popolata, caratterizzata da un'elevata concentrazione di radon indoor, superiore alla media nazionale di 70 Bq m⁻³. L'obiettivo del presente lavoro è duplice: da un lato, sono stati studiati i fattori geologici che possono aumentare localmente la presenza di radon, come la concentrazione di gas nel suolo, le alterazioni idrotermali, i tipi di suolo e la distribuzione delle faglie; dall'altro lato, si sono utilizzate queste informazioni per costruire due mappe del potenziale geogenico di radon³⁴ utilizzando una regressione di kriging³⁵. In questa ricerca sono state sviluppate due mappe GRP basate su misurazioni sul campo delle concentrazioni di radon e thoron nel suolo e sulla spettrometria gamma di campioni di suolo e di roccia del distretto dei Colli Euganei (Nord Italia). Gli autori hanno realizzato un modello predittivo della concentrazione

³³ European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italy (JRC), 2020. Report on indoor and geogenic radon surveys in Europe, including their strategies, the methodologies employed, inconsistencies in the results, and potential methodologies to harmonise data and reduce inconsistencies. Metroradon 16ENV10 MetroRADON Deliverable D3. [16ENV10-MetroRADON-D3_accepted.pdf](#)

³⁴ *Geogenic Radon Potential* (GRP) è qui considerato il parametro che permette di stimare la quantità di radon che la Terra fornisce dalle formazioni geologiche vicine all'atmosfera. Per ulteriori informazioni consultare: Bossew, P., Kuta, P., Helebrant, J., 2020. Mean ambient dose rate in various cities, inferred from safecast data. J. Environ. Radioact. 225, 106363.

³⁵ Il kriging è un metodo di regressione usato nell'ambito dell'analisi spaziale (geostatistica) che permette di interpolare una grandezza nello spazio, minimizzando l'errore quadratico medio. Nell'ambito della statistica è meglio noto come processo gaussiano.

di radon del suolo, tenendo conto delle relazioni tra il radon del suolo e sette predittori (radiazione gamma terrestre (TGDR), thoron c220Rn), densità di faglia (FD), permeabilità del suolo (PERM), modello digitale del terreno (SLOPE), indice di umidità (TMI), indice di carico termico (HLT)). Grazie ai predittori gli autori hanno elaborato dei modelli spaziali locali utilizzando il metodo *Empirical Bayesian Regression Kriging* (EBRK) per trovare la migliore combinazione e definire il GRP dell'area dei Colli Euganei. Una seconda mappa di GRP basata sull'approccio di Neznal (GRPNd) è stata modellata utilizzando il TGDR e il ²²⁰Rn, come predittori della concentrazione di radon, e il FD come predittore della permeabilità del suolo. Le due mappe GRP sono state poi confrontate. I risultati evidenziano che il potenziale di radon è principalmente determinato dal tipo di roccia, ma la presenza di sistemi di faglie e le caratteristiche topografiche giocano un ruolo chiave nella migrazione del radon nel sottosuolo e nella sua esalazione. Le misurazioni in loco dei gas nel suolo, eseguite in modo casuale su tutta l'area studiata, hanno confermato sia una forte correlazione tra il tipo di roccia e l'esalazione di radon e thoron nel suolo, sia un'alta permeabilità lungo le zone di faglia. I risultati ottenuti forniscono un *background* scientifico per la pianificazione di nuove ed efficaci strategie di prevenzione del radon nell'area di studio e per supportare future indagini. Inoltre, possono essere un valido supporto per le amministrazioni locali per una pianificazione territoriale aggiornata.

Petermann *et al.* (2022) hanno focalizzato la loro attenzione sull'efficacia delle aree prioritarie per il radon³⁶ in Germania, mappando il rischio collettivo di esposizione al radon, correlando le informazioni sulla presenza di radon geogenico all'esposizione (misurando le concentrazioni di radon negli edifici residenziali). L'obiettivo del documento è l'analisi dell'efficacia del concetto di aree prioritarie per il radon (RPA) definite in base alla pericolosità geogenica per identificare gli edifici residenziali affetti da radon (cioè con alte concentrazioni) e, di conseguenza, ridurre l'esposizione e il conseguente rischio di mortalità per tumore al polmone correlati al radon.

Gli autori sono partiti dalla definizione di rischio:

Rischio = Pericolo*Esposizione*Vulnerabilità

Nel caso del radon, la pericolosità riflette la disponibilità (o il potenziale) geogenico del radon; l'esposizione riflette il numero di persone esposte al pericolo e la vulnerabilità riflette le caratteristiche dell'edificio. Il pericolo e la vulnerabilità riflettono le caratteristiche dell'edificio e il comportamento dei residenti che influiscono sull'accumulo di radon in ambienti chiusi. Una definizione di RPA basata sul pericolo è indipendente dal numero di persone colpite. In Germania, l'approccio basato sul pericolo è stato scelto di proposito per dare la priorità alla protezione a livello individuale alle persone che vivono in aree a più alto rischio. Allo stesso tempo, il legislatore era consapevole dei limiti di questo approccio, vale a dire che la

³⁶ *Radon priority areas*: sono le aree che hanno la priorità di intervento. L'EURATOM-BSS richiede agli Stati membri, all'articolo 103/3, di identificare le aree prioritarie per il radon (RPA), aree in cui la concentrazione di radon (come media annuale) supera, in un numero significativo di edifici, il livello di riferimento nazionale.

riduzione significativa dei decessi per tumore al polmone attribuibile alla politica sul radon era improbabile da raggiungere e quindi non è stato definito come indicatore di successo. L'approccio utilizzato è consistito nel collegare le mappe della probabilità di superamento del radon indoor (in funzione del rischio geogenico) con la densità degli edifici residenziali (edifici esposti). Le mappe ottenute rappresentano gli stock di edifici esposti al fine di rappresentare il rischio collettivo. Inoltre, la distribuzione di edifici esposti (esposizione) e la distribuzione degli edifici interessati (rischio) sono stati analizzati in relazione alla distribuzione geogenica del radon (pericolo). L'assegnazione di RPA basata sul rischio di radon geogenico è conveniente in quanto consente di trovare il maggior numero di edifici con una quantità limitata di risorse a causa dell'elevata prevalenza nelle zone ad alto rischio. Pertanto, può essere considerata un buon punto di partenza. Tuttavia, si prevede che la maggior parte degli edifici residenziali interessati da elevate concentrazioni di radon siano ubicati al di fuori delle zone ad alto rischio geogenico. Questa osservazione deriva dal fatto che le aree a più alto rischio geogenico sono per lo più scarsamente popolate in Germania. Tuttavia, il rischio collettivo più elevato si trova in aree densamente popolate con livelli di rischio di radon geogenico da moderato elevato. Di conseguenza, le distribuzioni di pericolosità geogenica e di rischio collettivo rilevano modelli spaziali contrastanti. Inoltre, intervenendo solo sulle alte concentrazioni di radon (ovvero superiori a 300 Bq m^{-3}) nelle aree ad alto rischio geogenico, si otterrebbe un effetto marginale sulla riduzione degli effetti sanitari, poiché meno dell'1% dei decessi per cancro ai polmoni attribuibili al radon si verifica in zone ad alto rischio geogenico con concentrazioni superiori a 300 Bq m^{-3} . Pertanto, per ridurre in modo significativo il numero totale di decessi per cancro ai polmoni, non è sufficiente concentrarsi solo sulle aree a più alto rischio geogenico e all'interno di queste aree solo sugli edifici con concentrazioni superiori a 300 Bq m^{-3} . Questa affermazione è particolarmente vera quando si assume una relazione lineare dose-risposta e non è possibile identificare una soglia al di sotto della quale non vi sia rischio di sviluppare il cancro al polmone per esposizione al radon (assunzione di LNT³⁷). Ma anche indipendentemente dall'ipotesi LNT e la considerazione solo degli edifici ad alto contenuto di radon (ad esempio, sopra 600 Bq m^{-3} o sopra 1000 Bq m^{-3}), l'analisi ha dimostrato che la maggioranza degli edifici interessati si trova all'esterno di aree ad alto rischio geogenico di radon. Gli autori concludono sostenendo che per proteggere le persone da un'elevata esposizione al radon (rischio individuale) e contemporaneamente ridurre il rischio collettivo, la politica del radon deve riguardare non solo le aree ad altro rischio. Pertanto, la legislazione tedesca sta affrontando tale problematica con misure complementari come: la promozione pubblica; le campagne di sensibilizzazione; l'applicazione di misure preventive per le

³⁷ Questo approccio si basa su una soglia lineare-nessuna relazione dose-risposta (ipotesi LNT). L'approccio LNT significa che il rischio relativo di cancro al polmone attribuibile al radon aumenta linearmente con l'aumentare dell'esposizione al radon (cioè concentrazione) senza alcuna soglia al di sotto della quale l'esposizione al radon è innocua. Il modello LNT è il modello standard per descrivere la relazione tra esposizione al radon e cancro ai polmoni.

nuove costruzioni su tutto il territorio nazionale; una valutazione delle leggi sulla radioprotezione in generale e delle RPA in particolare. Ulteriori componenti potrebbero essere il finanziamento pubblico per le operazioni di bonifica e la predisposizione di ulteriori misure applicabili per i non-RPA con forza giuridica uguale a quelle esistenti per i RPA.

Conclusioni

La strategia corretta per descrivere realisticamente il comportamento del radon necessita la raccolta di informazioni sulla fonte di radon (es. contenuto di radionuclidi nel suolo/roccia), sulla permeabilità del suolo e sui processi di migrazione del radon che ne regolano il movimento nel sottosuolo e il conseguente accumulo indoor. Queste informazioni consentono la costruzione del potenziale geogenico di radon di un'area che potrebbe essere utilizzato come proxy per prevedere la componente geogenica del rischio da radon indoor di un'area.

La concentrazione del radon indoor ha una componente spaziale e temporale variabile che dipende da fattori geogenici, da variazioni stagionali ma anche da fattori antropici. Come conseguenza dei suddetti fattori che influenzano la concentrazione del radon indoor, la previsione e la mappatura del rischio associato sono complesse, sebbene siano una componente chiave in molte strategie nazionali sul radon. Le mappe del rischio radon possono supportare il processo decisionale, identificandole aree a maggior rischio, aumentare la consapevolezza e la percezione del pericolo e facilitare la comunicazione del rischio al pubblico. Le mappe di radon indoor che sono state prodotte in molti Paesi e regioni nel corso degli ultimi decenni (principalmente in Europa e Nord America) spesso differiscono in termini quantitativi (ad es. concentrazione media, superamento di una certa soglia), tecniche di misurazione, progettazione dell'indagine, metodo di mappatura applicato e di risoluzione spaziale (unità amministrative o geologiche, celle di griglia con dimensioni variabili delle celle). A causa dell'elevata variabilità locale, le mappe di radon su larga scala non forniscono informazioni sulla concentrazione di radon in un particolare edificio; a tali fini sono necessarie misurazioni specifiche per ogni singolo edificio. Inoltre, le mappe solitamente rappresentano il valore medio della concentrazione di radon indoor al piano terra e quindi non sono rappresentative dell'esposizione al radon dei cittadini, poiché la maggior parte della popolazione non vive al piano terra. Nonostante ciò, la mappatura del radon negli ambienti confinati può essere utilizzata a supporto delle politiche sanitarie e ambientali per contribuire alla redazione di programmi efficaci di protezione dal radon.

Bibliografia

Cinelli G., De Cort M. & Tollefsen T. (Eds.), European Atlas of Natural Radiation, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2019.

Coletti, Chiara, *et al.* 2022. "The Assessment of Local Geological Factors for the Construction of a Geogenic Radon Potential Map Using Regression Kriging. A Case Study from the Euganean Hills Volcanic District (Italy)." *The Science of the Total Environment.*, vol. 808, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152064>.

Cosma C, Cucuș Dinu A, Dicu T, Preliminary results regarding the first map of residential radon in some regions in Romania, *Radiat Prot Dosimetry*, 2013 Jul;155(3):343-50.

Elío Javier, Cinelli Giorgia, Bossew Peter, Gutiérrez-Villanueva José Luis, Tollefsen Tore, De Cort Marc, Nogarotto Alessio, Braga Roberto, (2019), The first version of the Pan-European Indoor Radon Map, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 2451–2464, 2019.

Frutos Borja, Martín-Consuegra Fernando, Alonso Carmen, de Frutos Fernando, Sánchez Virginia, García-Talavera Marta, (2019), Geolocation of premises subject to radon risk: Methodological proposal and case study in Madrid, *Environmental Pollution Volume 247*, April 2019, Pages 556-563.

Giustini Francesca, Ruggiero Livio, Sciarra Alessandra, Beaubien Stan Eugene, Graziani Stefano, Galli Gianfranco, Pizzino Luca, Tartarello Maria Chiara, Lucchetti Carlo, Sirianni Pietro, Tuccimei Paola, Mario Voltaggio, Bigi Sabina, Ciotoli Giancarlo, Radon Hazard in Central Italy: Comparison among Areas with Different Geogenic Radon Potential, *Int J Environ Res Public Health*. 2022 Jan; 19(2): 666.

Petermann E., Bossew P., (2021), Mapping indoor radon hazard in Germany: The geogenic component, *Science of The Total Environment Volume 780*, 1 August 2021, 146601.

Petermann E, Bossew P, Hoffmann B. 2022. Radon hazard vs. radon risk - On the effectiveness of radon priority areas. *J Environ Radioact.*: 244-245:106833. doi: 10.1016/j.jenvrad.2022.106833. Epub 2022 Feb 4. PMID: 35131623.

Vukotic Perko, Antovic Nevenka, Zekic Ranko, Svrkota Nikola, Andjelic Tomislav, Svrkota Ranko, Mrdak Radivoje, Djurovic Andrija, Dlabac Aleksandar, Bjelica Natasa, Djurovic Tamara, Bogicevic Marija, Main findings from radon indoor survey in Montenegro, *Radiation Protection Dosimetry* (2019), pp. 1–16.

3.2.2 Misurazione e concentrazione del radon

Introduzione

In particolari condizioni che riguardano sia fattori geogenici e antropici, oltre che meteorologici, elevati livelli di radon possono accumularsi all'interno delle abitazioni. Come è noto, il radon è la seconda causa di morte, dopo il fumo, per cancro ai polmoni³⁸ ed è classificato dall'IARC cancerogeno umano di gruppo 1, inoltre il radon

³⁸ WHO, WHO Handbook on indoor radon, 2009". Dopo gruppo 1 la nota " IARC, IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans (v. 43), 1988.

indoor contribuisce per circa la metà della dose efficace media annuale di radiazioni ionizzanti ricevuta dalla popolazione generale da sorgenti naturali³⁹. Pertanto, le misurazioni delle concentrazioni di radon indoor sono essenziali ai fini della protezione della salute umana.

Sebbene il radon nel suolo, nelle rocce e nella struttura delle fondazioni dell'edificio rappresenti la principale fonte di radon, le concentrazioni indoor negli ambienti di vita variano ampiamente a seconda delle formazioni geologiche sottostanti, ma anche della variabilità stagionale, della struttura dell'edificio e dei materiali da costruzione utilizzati, della ventilazione e, più in generale, delle abitudini degli occupanti. La concentrazione di radon nell'aria indoor dipende anche dalla permeabilità del terreno e dall'ermeticità delle fondazioni. Anche la presenza di crepe molto piccole nelle fondazioni e nelle pareti sotto il livello del suolo può dar luogo a significative infiltrazioni di radon nell'ambiente indoor. Il tasso di ricambio dell'aria (velocità della ventilazione) interna, la temperatura e l'umidità relativa hanno effetti significativi sui livelli di radon negli edifici residenziali. L'unico modo corretto per conoscere i livelli di radon nell'edificio è attraverso misurazioni dirette; si può affermare, tuttavia, che è possibile stimare l'influenza dei diversi fattori sulle variazioni della concentrazione indoor del radon mediante modelli previsionali.

Stato dell'arte

Cucoş *et al.* (2012) hanno misurato le concentrazioni di radon in un gran numero di edifici in quattro località dell'area mineraria di uranio di Băiţa (contea di Bihor) collocata in Transilvania (Romania): 1.128 stanze al piano terra e cantine di 303 abitazioni unifamiliari. In questa contea sono stati misurati i livelli regionali più elevati di concentrazione di radon nel suolo e negli ambienti indoor, ragionevolmente spiegati dalla presenza delle miniere di uranio "Avram Iancu" e "Băiţa", sfruttate intensamente nel periodo 1950-1990, dei depositi di uranio, e dall'uso degli scarti delle miniere di uranio per i materiali da costruzione in edifici costruiti dopo il 1950. Gli alti livelli di radon possono essere associati alla struttura geologica delle unità strutturali di Bihor, Codru e Arieşeni. La litologia di queste unità è costituita da calcari (unità Bihor), dolomiti e calcari (unità Codru), argille e arenarie (unità Arieşeni). La struttura rocciosa è caratterizzata da intrusivi banatitici e batolitici (Cretaceo superiore-Paleogene inferiore) con graniti, granodioriti e pegmatiti associati ad un ambiente tettonico ad arco magmatico (Stumbea, 2003). Inoltre, la permeabilità del suolo piuttosto elevata consente una significativa diffusione del gas radon nel suolo (Neznal e Neznal, 2011).

Sono stati utilizzati rilevatori passivi CR-39, distribuiti sistematicamente negli ambienti di studio, al fine di sviluppare e implementare le tecniche correttive più

³⁹ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, 2008

efficaci per ridurre i livelli di radon negli ambienti interni e il rischio associato di cancro ai polmoni. Circa 2.300 rilevatori sono stati collocati nei livelli più bassi di ogni casa interessando almeno tre ambienti abitati (cucina, camere da letto, soggiorni, ingresso, ufficio o altri annessi) e nelle cantine. La rilevazione, inoltre, è stata accompagnata dalla compilazione di questionari. L'estesa campagna di misura è stata condotta da novembre 2010 a maggio 2011 e i rivelatori passivi di radon CR-39 sono stati esposti per due periodi consecutivi di tre mesi, al fine di calcolare la concentrazione media annua di radon applicando un fattore di correzione stagionale come proposto da Cosma (Cosma *et al.*, 2009) e simile a quelli sviluppati da Miglia (Miles e Howarth, 2008).

La media annuale della concentrazione di radon indoor per l'area di Băița è risultata essere $241 \pm 178 \text{ Bq m}^{-3}$, che è circa due volte superiore al valore medio di 126 Bq m^{-3} nazionale riportato per le abitazioni unifamiliari della Romania. Circa il 28% delle case indagate supera il livello di riferimento del gas radon nelle abitazioni di 300 Bq m^{-3} . Non è stata dimostrata chiaramente una correlazione tra la concentrazione di radon negli ambienti interni e nel suolo, nei materiali da costruzione, nella struttura delle fondazioni, nonché la distanza dalle miniere di uranio. L'assenza di correlazione è probabilmente causata dall'utilizzo di materiali di risulta delle miniere e di sabbia ghiaiosa del fiume Crișul Băița come materiali da costruzione. L'ampio intervallo di valori di concentrazione di radon, rilevati in differenti stanze situate nello stesso piano, evidenzia l'importanza di eseguire misurazioni accurate con più rivelatori, specialmente in aree ad elevato rischio radon, dove altri fattori legati alle caratteristiche dell'edificio potrebbero influenzare ulteriormente la concentrazione media di radon.

Rafique *et al.* (2012) hanno condotto una campagna di misure di radon nello stato di Azad Jammu e Kashmir, distretto di Hattian (Pakistan) che si trova lungo una linea di faglia tettonicamente attiva. Sono state selezionate 160 abitazioni, in un raggio di 30 km. Sono stati posizionati dosimetri nelle camere da letto e nei salotti di ciascuna abitazione. Le concentrazioni di radon osservate erano comprese tra 35 e 175 Bq m^{-3} , mentre le dosi medie annue a cui sono stati esposti gli abitanti variavano da 0,88 a 4,41 mSv con un valore medio di 2,62 mSv. A livello nazionale, i valori riportati nel presente studio sono superiori a quanto rilevato in studi precedenti. Le motivazioni possono essere diverse: la zona è tettonicamente attiva; il terremoto avvenuto nel 2005 potrebbe aver causato crepe, fessure e frane, favorendo la diffusione del radon verso la superficie terrestre; inadeguato sistema di ventilazione degli edifici; probabile presenza di tracce di uranio nei materiali da costruzione (fango, argilla, rocce sedimentarie e metamorfiche). Tuttavia, la concentrazione media di radon (104 Bq m^{-3}) ottenuta per il distretto di Hattian è risultata inferiore alle raccomandazioni dell'Health Protection Agency del Regno Unito (200 Bq m^{-3}).

Invece Norvegia, Svezia e Finlandia registrano concentrazioni indoor di radon tra le più alte al mondo, il che può essere in parte spiegato da una presenza piuttosto ampia di suoli e rocce ricchi di uranio come allume e graniti e sedimenti non consolidati

altamente permeabili come morene ed esker. Risultati di ampie indagini su larga scala di concentrazioni indoor di radon in Norvegia stimano che il 9% dell'attuale patrimonio abitativo (circa 175.000 abitazioni) ha una concentrazione media annua di radon superiore al livello di azione norvegese di 200 Bq m^{-3} (Strand *et al.*, 2001) raccomandato dall'Autorità norvegese per la protezione dalle radiazioni (NRPA). Jelle (2012) ha sviluppato un modello per il calcolo della concentrazione di radon indoor come strumento utile nel processo di selezione della misura più efficiente ed economica per raggiungere il livello di radon raccomandato. Semplificando, la concentrazione di radon nell'aria indoor può essere vista come una somma dei seguenti contributi: diffusione dall'aria esterna, esalazioni da materiali da costruzione, diffusione dal suolo. Normalmente la concentrazione di radon nell'aria esterna è prossima allo zero, ovvero il gradiente di diffusione del radon è normalmente dall'interno all'esterno (fuori terra), e dal suolo all'interno.

I risultati del lavoro di Jelle indicano che la diffusione del radon dal suolo all'interno dell'edificio è conseguente alla presenza di fessurazioni nelle fondazioni e alla differenza di pressione. Al fine di mantenere la concentrazione di radon nell'aria indoor il più bassa possibile, deve essere assicurata una soddisfacente ermeticità della barriera al radon, o, più in generale delle fondazioni dell'edificio. Le barriere anti-radon devono essere combinate a un sistema di ventilazione meccanica stabile e continua dell'aria interna, in modo tale che il ricambio d'aria sia sufficiente e venga ridotta la differenza di pressione tra l'aria indoor e l'ambiente circostante.

Lo studio di Akbari *et al.* (2013) si è focalizzato sugli effetti del tasso di ricambio dell'aria interna, della temperatura e dell'umidità relativa sul radon indoor in una casa unifamiliare collocata a Stoccolma, costruita su un substrato roccioso nel 1975. Il livello di radon di partenza dopo alcuni interventi di bonifica era di circa 600 Bq m^{-3} , proveniente principalmente dalle fondazioni dell'edificio a diretto contatto con il suolo. Lo studio si è basato su una soluzione analitica, misurazioni e una simulazione numerica. L'ingresso del radon nella casa unifamiliare e gli effetti della velocità di ventilazione, della temperatura e dell'umidità sono stati modellati utilizzando il pacchetto software FLUENT⁴⁰ in un modello tridimensionale a stato stazionario. Un monitor continuo del radon (CRM, electronic radon monitor) è stato utilizzato per misurare il radon indoor e verificare il metodo di modellazione numerica ed è stata eseguita anche una soluzione analitica per la convalida della simulazione numerica.

I risultati complessivi indicano che le concentrazioni di radon negli ambienti interni dipendono dalla velocità di ventilazione, dalla temperatura interna e dai livelli di umidità. In questo caso studio, l'impostazione della temperatura tra 20 e 22 °C e l'umidità relativa tra il 50 e il 60% in un tasso di ricambio d'aria specifico (in questo lavoro $Ach \frac{1}{4} 0,5$) hanno abbassato i livelli di radon negli ambienti interni. Alcune proprietà del radon, come il coefficiente di diffusione, il coefficiente di emanazione e la velocità di esalazione, sono correlate alla temperatura, all'umidità relativa e al

⁴⁰ FLUENT Incorporation, 2005. FLUENT User's Guide Version 6.3. FLUENT Inc., Lebanon, NH, USA.

campo di pressione. Il fattore di emanazione del radon dipende dall'umidità e raggiunge un valore massimo costante quando il contenuto di umidità aumenta tra 0,1 e 0,5. Poiché la velocità di esalazione del radon è una funzione del coefficiente di emanazione, anche la velocità di espirazione dipende dall'umidità. La velocità di esalazione del radon aumenta con la temperatura, ma questo effetto è minore dell'effetto dell'umidità.

La verifica del modello e delle sue prestazioni supporta l'idea che l'ingresso del radon nell'abitazione e gli effetti della velocità di ventilazione, della temperatura e dell'umidità possono essere ben definiti fisicamente e numericamente. Le prestazioni e la sensibilità del modello sono state confermate dalla variazione dei parametri di input e dalle condizioni al contorno. I risultati indicano che le condizioni e le ipotesi considerate fornivano una modellazione accettabile di questo ambiente.

Clouvas e. al. (2013) hanno effettuato e discusso i risultati di 1.948 misurazioni del radon indoor in 974 edifici, misure eseguite dal 1999 al 2012 in 8 delle 13 regioni amministrative della Grecia. Il 53% degli edifici era costituito da scuole, il 30% da abitazioni e il 17% da luoghi di lavoro principalmente in edifici pubblici (municipi, polizia, vigili del fuoco, ospedali) e una piccola percentuale da imprese private (negozi, hotel, ecc.). La scelta degli edifici da misurare è stata effettuata in collaborazione con gli enti locali, mentre la scelta delle otto regioni (la maggior parte della Grecia settentrionale e centrale più 11 isole) è dovuta principalmente al fatto che la radioattività naturale nella Grecia settentrionale è superiore a quella della Grecia meridionale e la maggior parte delle isole scelte sono di particolare interesse (origine vulcanica). I locali in cui sono state eseguite le misurazioni del radon indoor si trovavano, prevalentemente, al piano terra (80%), mentre il 17% si trovava al primo piano e il 3% ai piani superiori. Gli edifici greci sono per lo più di struttura in muratura (mattoni in cemento) e ventilati naturalmente. Le misurazioni del radon indoor sono state eseguite, principalmente, con camere a ionizzazione a elettretti e ha portato ai seguenti risultati: il 71% delle concentrazioni di radon è compresa tra 40 e 140 Bq m⁻³ con un valore più probabile di 71 Bq m⁻³; l'AM (media aritmetica) e il GM (media geometrica) della concentrazione di radon sono rispettivamente 112 e 86 Bq m⁻³; il valore massimo misurato della concentrazione di gas radon è risultato pari a 958 Bq m⁻³; solo in una piccola porzione degli edifici (1,4%) viene superato il livello di azione della Commissione Europea (400 Bq m⁻³); il valore di 200 Bq m⁻³ viene superato dal 10 % degli edifici.

Müllerová *et al.* (2014), partendo dall'evidenza che nei Paesi di Visegrad (Ungheria, Polonia e Slovacchia) le misurazioni effettuate nelle abitazioni residenziali hanno rilevato livelli di radon notevolmente superiori alla media dell'Europa orientale, che va da 41 a 140 Bq m⁻³, hanno misurato le concentrazioni del radon indoor nei 3 Paesi. È stato utilizzato un protocollo comune di misurazione che prevedeva regole dettagliate per l'esposizione dei rilevatori e una raccolta di informazioni inerenti all'edificio mediante questionario. L'articolo presenta i risultati preliminari dell'indagine svolta nel primo periodo da marzo 2012 a maggio 2012, per un totale

di 152 abitazioni. Ciascun partecipante al progetto ha scelto le aree del proprio Paese (aree soggette a radon); la scelta dei siti da analizzare si è basata sulle caratteristiche geologiche, sul contenuto di uranio e torio nel suolo e sulla concentrazione di attività del radon nel suolo. L'indagine è stata effettuata utilizzando i rilevatori CR-39 in tre località dei tre Paesi per rilevare l'emissione di particelle alfa e la loro progenie. Le concentrazioni di radon indoor sono risultate inferiori a 200 Bq m^{-3} in circa l'87% dei casi. Tuttavia, in Polonia e Slovacchia sono state trovate abitazioni con una concentrazione di radon $\sim 800 \text{ Bq m}^{-3}$. Le analisi preliminari hanno mostrato che esiste una relazione tra la distribuzione della frequenza della concentrazione di radon nelle case e l'anno della loro costruzione. Negli edifici costruiti prima del 1990 i livelli di radon indoor sono circa 80% più elevati rispetto a quelli più recenti successivi agli anni 1990. È stato inoltre riscontrato che le concentrazioni di radon indoor differiscono in modo significativo nelle diverse regioni della Slovacchia. In Polonia sono state osservate differenze tra i livelli di radon indoor nelle scuole/asili e le case residenziali: in quest'ultime le più alte concentrazioni di radon indoor non hanno superato i 300 Bq m^{-3} , mentre in alcune scuole sono stati osservati valori superiori a 400 Bq m^{-3} . In Ungheria è stata riscontrata una debole dipendenza tra le concentrazioni di radon indoor e l'ubicazione delle abitazioni, ma tutti questi risultati necessitano di ulteriori studi e approfondimenti e campagne di monitoraggio più lunghe.

Valmari *et al.* (2014) hanno rilevato i livelli di radon all'interno delle case finlandesi nel 2006-2007. Sono state effettuate misurazioni in 116.611 edifici, che rappresentano l'8% del patrimonio immobiliare finlandese, e 5.821 appartamenti, ovvero lo 0,5% di tutti gli appartamenti finlandesi. Il livello di riferimento fissato nel 1992 dal Ministero degli Affari Sociali e della Salute per le abitazioni esistenti, 400 Bq m^{-3} , è stato superato dal 3,8% delle abitazioni in villette unifamiliari, bifamiliari e a schiera, nonché dallo 0,7% degli appartamenti. Le sei regioni amministrative con i livelli medi di radon più elevati (all'epoca dello studio), costituiscono un'area integrata ad alto rischio radon nella parte meridionale e sudorientale della Finlandia, in cui risiede il 24% della popolazione. La percentuale di abitazioni che superavano i 400 Bq m^{-3} è stata del 9,4% nelle regioni ad alto rischio radon e del 2,0% nelle altre 14 regioni.

Dal 2004, il regolamento edilizio finlandese richiede che il radon sia preso in considerazione in tutti i lavori di costruzione. Le linee guida per la prevenzione del radon si concentrano sulle case con solaio a terra, che è il tipo più comune in Finlandia (80% delle nuove case, comprese le case con piano interrato o seminterrato). Le misure di prevenzione del radon raccomandate per le case con solaio a terra riguardano la sigillatura delle potenziali fessure, in particolare quelle tra solaio e muro di fondazione, con la posa in opera di un feltro bituminoso, nonché l'installazione di una tubazione del radon sotto il solaio con uno sfiato sul tetto.

La maggiore prevenzione ha ridotto significativamente i livelli di radon. Il livello di riferimento del radon per le nuove costruzioni, fissato dal Ministero degli Affari Sociali e della Salute, e specificato dal regolamento edilizio per il clima interno e la

ventilazione degli edifici, è di 200 Bq m⁻³. Il livello è stato superato dal 10,6% degli edifici costruiti dopo il 2006, mentre la percentuale era del 15,1% nel parco abitativo costruito precedentemente. Nelle aree ad alto rischio le attività di comunicazione e sensibilizzazione sono più attive e i residenti più consapevoli; infatti, le misurazioni sono richieste prevalentemente dai proprietari di edifici privati.

Le attività di prevenzione, misurazione e mitigazione del radon sono aumentate in Finlandia negli anni 2000, come dimostrato dalle numerose richieste delle autorità comunali, in particolare quelle situate nelle regioni ad alto rischio. La cooperazione tra le autorità locali e nazionali è stata essenziale per ridurre i livelli di radon nelle case finlandesi e è stata avviata negli anni '80 con il lavoro di rilevamento delle aree a rischio radon e attualmente prevede soprattutto la promozione di misurazioni e mitigazioni tramite campagne locali.

Žunić *et al.* (2014) hanno studiato la correlazione tra la concentrazione di radon indoor e l'ambiente geologico e geochimico (rocce, suolo e acqua) nella regione balcanica. Poiché in Serbia sono presenti depositi di uranio di diverso tipo, esistono in questo Paese condizioni per una maggiore esposizione della popolazione al radon negli spazi chiusi. Le misurazioni sono state condotte in tre regioni geologiche molto diverse: costa montenegrina (calcere), Kalna (con depositi di uranio) in Serbia e Gornja Stubla (con il minerale secondario di uranio autinite) in Kosovo e Metohija. Le misure del radon indoor sono state effettuate a Gornja Stubla in 65 case selezionate sulla base di precedenti mappe geologiche e geochimiche, in 75 case a Kalna, un ex distretto minerario di uranio nella Serbia orientale, e in 82 edifici lungo la costa montenegrina, utilizzando rivelatori di radon di tipo a traccia alfa a diffusione passiva chiusa SSI/NRPB, dove il mezzo di registrazione della traccia alfa era CR39. Una serie di rilevatori è stata collocata in una o più zone giorno (solitamente soggiorno e camera da letto) nell'arco di un periodo di dodici mesi e ogni singolo rivelatore è rimasto esposto in un'abitazione per un periodo di tre mesi sostituito poi da un nuovo rivelatore. In questo documento, la correlazione tra il tipo di substrato roccioso e il livello di radon indoor potrebbe essere utilizzata come strumento per la previsione delle aree soggette a un'elevata concentrazione di radon indoor. Ciò comporta che il rischio regionale da radon può essere previsto in una certa misura dalla geologia, così come affermato nella crescente letteratura sull'argomento. Come conseguenza pratica, in tali regioni dovrebbero essere eseguite indagini più frequenti. I risultati suggeriscono anche che le informazioni geologiche dovrebbero essere sfruttate maggiormente come mezzo per identificare le aree soggette a radon. Inoltre, si è riscontrata una correlazione stagionale con le concentrazioni di radon indoor, con variazioni fino ad un ordine di grandezza. Questo fenomeno è stato notato solo a Kalna, ma non sulla costa montenegrina o Gornja Stubla, sebbene sia anch'essa un'area uranifera. L'esistenza di tali eccessi indica che in tale regione il radon indoor dovrebbe essere monitorato per un periodo di tempo più lungo di almeno un anno. È stata riscontrata anche una 'elevata differenza pari ad un ordine di grandezza del radon indoor nelle diverse stanze dello stesso piano sia nella zona di Kalna che a

Gornja Stubla. Per stimare correttamente l'esposizione nelle regioni uranifere andrebbero effettuate misurazioni in tutte le stanze con tempo di occupazione significativo (principalmente soggiorno, camere da letto e cucine). Inoltre, andrebbero presi in considerazione anche altri aspetti quali le caratteristiche strutturali degli edifici, le peculiarità idro-geologiche della regione ed eventualmente le condizioni meteo-climatiche (precipitazioni, pressione atmosferica, ecc.).

La presenza di una elevata concentrazione media di radon indoor ($> 200 \text{ Bq m}^{-3}$ in abitazioni ed edifici scolastici) nella prefettura di Xanthi (Grecia settentrionale), ha spinto Kourtidis *et al.* (2015) ad approfondire tale problematica. Sono stati rilevati tre set di dati sul radon indoor a lungo termine (6 mesi o più) in tre case con un arco temporale di circa 48 ore, ottenendo così uno studio stagionale delle fluttuazioni del radon indoor. Uno di questi set di dati è stato acquisito in concomitanza con le misurazioni di T, P e delle precipitazioni, permettendo di stimare anche l'influenza della meteorologia sui livelli di radon indoor. Un set di dati di rilevamento estensivo del radon in diverse case della città è stato portato avanti con misurazioni del radon a breve termine in circa 25 case in due diverse stagioni. Sono state effettuate anche misure di radiazioni- γ outdoor nella parte vecchia della città con una risoluzione spaziale che consente la mappatura dei livelli di radiazioni- γ e in una casa del centro storico sono stati eseguiti pure rilievi indoor di radionuclidi. Infine, è stata misurata la radioattività nei materiali da costruzione delle tradizionali case in pietra e nei seminterrati è stato determinato il flusso indoor di ^{222}Rn . I risultati mostrano che la parte della città sovrastante i depositi di granito che potrebbe contenere minerali di uranio presenta livelli di radon indoor eccezionalmente alti, con medie mensili fino a 1500 Bq m^{-3} . Il 40% di case in questa parte della città registra livelli di radon superiori a 200 Bq m^{-3} , mentre l'11% superiori a 400 Bq m^{-3} . Sempre in questa zona della città è stata osservata una notevole variabilità interannuale, nonché il rapporto inverno/estate più elevato d'Europa (fino a 12). Gli alti livelli di radon indoor misurati in questi edifici non sono dovuti agli elevati tassi di emissione dai materiali da costruzione, ma piuttosto alla migrazione di radon dal suolo e agli alti tassi di penetrazione del radon negli edifici dal sottosuolo conseguenti alla tipologia di fondazioni in cemento in questi edifici, o una combinazione di questi. Infatti, il centro storico è caratterizzato da edifici che non presentano fondazione in cemento, i cui materiali da costruzione sono costituiti da pietre, in gran parte granodioritiche, provenienti dall'alveo di un vicino fiume. Dalle variabili meteorologiche studiate (T, P e precipitazioni), è stata trovata la correlazione più alta tra ^{222}Rn indoor e la temperatura, indicando l'influenza della ventilazione e/o l'effetto camino. Quindi, la meteorologia è il principale fattore trainante del radon indoor, con la temperatura che è il determinante più importante.

Scopo dell'articolo di Yarmoshenko *et al.* (2015) è la ricostruzione della distribuzione nazionale e della stima della concentrazione media aritmetica di radon indoor in Russia, utilizzando i dati dei rapporti annuali ufficiali (4-DOZ) dell'apposita istituzione nazionale. In Russia, la protezione contro il radon è richiesta dalla legge federale

"Sulla protezione della popolazione dalle radiazioni". Dal 1990, gli standard russi di sicurezza dalle radiazioni includono la restrizione sulla concentrazione di equilibrio equivalente (EEC) annuale interna degli isotopi del radon, calcolata come somma del ^{222}Rn EEC + 4.6 ^{220}Rn EEC. Nelle abitazioni esistenti, la restrizione è EEC degli isotopi del radon pari a 200 Bq m^{-3} . Per le nuove costruzioni, è stabilito un vincolo più restrittivo, ossia EEC degli isotopi del radon pari a 100 Bq m^{-3} . La protezione della popolazione russa contro il radon indoor è responsabilità del "Servizio federale russo per la sorveglianza sulla protezione dei diritti dei consumatori e il benessere umano" (Rospotrebnadzor); l'approccio al problema del radon indoor in sviluppato dal Servizio negli anni '90 e 2000, non include l'indagine sul radon indoor nel campione rappresentativo nazionale di edifici. Le misurazioni del radon indoor, che sono state eseguite nell'ambito dei programmi regionali annuali di monitoraggio delle radiazioni, si sono concentrate sulla ricerca di aree ad alto contenuto di radon. Al fine di controllare il rispetto delle restrizioni, le misurazioni in tutti i nuovi edifici erano un altro compito importante. Dal 2001, Rospotrebnadzor ha istituito il Sistema congiunto di controllo delle singole dosi alla popolazione e una banca informativa per raccogliere i dati delle misurazioni delle radiazioni eseguite dai dipartimenti regionali e da altri laboratori. La banca dati viene riesaminata annualmente, ne viene pubblicata una sintesi e i dati sul radon indoor sono presentati nel rapporto "4-DOZ", la più grande fonte di dati sull'esposizione al radon indoor della popolazione, in 83 regioni della Federazione Russa. Il sistema di raccolta dati si basa sui valori medi regionali e non include le informazioni sulla dispersione della concentrazione indoor, pertanto, non vi è alcuna possibilità di analizzare l'esposizione al radon nella Federazione Russa. Il riepilogo annuale del rapporto 4-DOZ include la EEC media degli isotopi del radon indoor (^{222}Rn EEC + 4,6 ^{220}Rn EEC) e il numero di misurazioni per regioni e per tre tipi principali di case: casa in legno, casa non in legno a un piano e casa multipiano non in legno. Gli ultimi due gruppi includono case costruite con materiali minerali come pietra, mattoni, cemento, ecc. La distribuzione della EEC degli isotopi del radon indoor nelle abitazioni della Russia è stata ricostruita considerando ogni programma regionale annuale di misurazioni in ogni tipo di edificio. Ai fini dell'analisi, gli autori hanno ipotizzato che tali indagini, condotte nel periodo 2008-2013, coprano tutto il territorio della Russia. Di conseguenza, il campione del modello di tutta la Russia è stato generato mediante l'integrazione di sottocampioni creati utilizzando i risultati di ciascun programma regionale.

Secondo la ricostruzione della distribuzione della concentrazione di radon indoor eseguita dagli autori, la concentrazione media di radon indoor in tutta la Russia è di 48 Bq m^{-3} . La concentrazione media di radon indoor per regione varia da 12 a 207 Bq m^{-3} . Il 95° percentile della distribuzione viene raggiunto a una concentrazione di radon indoor di 160 Bq m^{-3} . I punti deboli sono associati al metodo di selezione delle case utilizzato per le misurazioni e al campionamento a grappolo delle misurazioni. Il valore medio della concentrazione di radon può essere distorto a causa dell'elevato numero di misurazioni sia nelle aree potenzialmente interessate dal radon che nei nuovi edifici. Le misurazioni a breve termine introducono una maggiore incertezza

nei risultati rispetto al metodo del tracciamento nucleare. È necessario un sondaggio nazionale sul radon indoor in Russia, mentre la mappatura delle aree a rischio radon può essere considerata esaustiva. Il corretto campionamento delle abitazioni e l'utilizzo di misurazioni a lungo termine sono da considerare prioritari per la progettazione di un'indagine nazionale in Russia.

Nell'articolo del 2016, Müllerová *et al.* (2016) hanno presentato i risultati completi del progetto "Armonizzazione della determinazione della dose di radiazioni della popolazione proveniente dal radon" per i Paesi di Visegrad (Ungheria, Polonia e Slovacchia). L'indagine è durata un anno e i rilievi sono stati effettuati in primavera (da marzo a maggio 2012), estate (da giugno ad agosto 2012), autunno (da settembre a novembre 2012) e inverno (da dicembre 2012 a febbraio 2013). Prima di iniziare le misure di radon indoor, è stato elaborato congiuntamente un protocollo di misura (posizionamento e tipologia dei rivelatori, i e questionari), con l'obiettivo di fornire risultati comparabili; inoltre, agli abitanti delle case monitorate è stato distribuito un volantino con le informazioni sul monitoraggio del radon. Utilizzando il questionario sono state ottenute informazioni sul materiale da costruzione, l'ermeticità delle finestre, l'intensità della ventilazione, l'anno di costruzione, il numero di abitanti e il tempo trascorso nella stanza monitorata. Ciascun partecipante al progetto ha scelto le tre aree del proprio Paese (in Ungheria: Veszprém, Komárom-Esztergon e Somogy; in Polonia: Łódź, Lublino e Cracovia; in Slovacchia: Bratislava, Mochovce e Ružomberok), dove ci si aspettava una maggiore concentrazione di radon indoor rispetto alla media. Le caratteristiche geologiche sono state una delle ragioni principali per l'indagine sul radon indoor nelle località studiate, ma rilevanti erano anche il contenuto di uranio e torio nel suolo e le informazioni sulla concentrazione di attività del radon nel suolo. Le informazioni ottenute dal questionario hanno consentito di discutere il risultato dell'indagine in relazione alla tipologia dell'edificio, al materiale da costruzione e ad altri parametri che influenzano il livello di radon indoor. In totale è stato misurato la concentrazione di radon indoor in 123 edifici residenziali (case e uffici) e 33 scuole nei tre Paesi. L'indagine ha confermato l'aumento dei livelli di radon nelle case e nelle scuole senza cantina e le variazioni stagionali delle concentrazioni con il tipico comportamento del radon indoor, che riporta un minimo nella stagione estiva e un massimo nella stagione invernale. Diversamente nelle scuole si è registrato un massimo estivo di radon indoor nel 32% dei casi. Attività di concentrazione di radon significativamente più elevate (superiori a 300 Bq m^{-3} in tutte le stagioni dell'anno) sono state osservate in una casa situata in Slovacchia e in tre scuole in Polonia. Una media annuale della concentrazione di attività del radon indoor era 2–2,5 volte superiore al valore di riferimento raccomandato nella Direttiva del Consiglio 2013/59/EURATOM (300 Bq m^{-3}). Nella maggior parte delle stanze monitorate nelle case e nelle scuole il livello di radon indoor variava da 50 a 200 Bq m^{-3} e una concentrazione media annua di radon inferiore a 200 Bq m^{-3} è stata riscontrata nell'85% delle case e negli uffici e nel 79% delle scuole e degli asili nido.

Obiettivo del lavoro di Curado *et al.* (2017) è stato analizzare la concentrazione di radon in 3 case unifamiliari granitiche (case A, B e C), situate nella regione rurale Barcelos, nel nord del Portogallo, una delle regioni con la più alta concentrazione di radon indoor a causa della natura granitica del suolo. La costruzione delle abitazioni risale all'ultimo decennio; le facciate originali sono realizzate in pietra di granito rivestita con malta cementizia e pure i pavimenti al piano terra sono in granito. È stata condotta una campagna sperimentale nei mesi di agosto, settembre e ottobre 2016 misurando contestualmente la temperatura dell'aria indoor e l'umidità relativa, con una risoluzione di 1 ora, in modo continuo utilizzando monitor digitali per il radon. Poiché i locali misurati hanno una costruzione simile, ma le modalità di occupazione e ventilazione sono diverse, è stato possibile studiare l'effetto dell'occupazione e della ventilazione sulla concentrazione indoor di radon e correlarlo ai valori di temperatura e umidità relativa. Gli edifici sono stati monitorati continuamente per almeno 5 giorni. Poiché il radon è 9 volte più denso dell'aria, le misurazioni sono state effettuate nella "zona giorno" al piano più basso dell'edificio, il più suscettibile alle infiltrazioni di radon. Visto che il movimento dell'aria influisce sui risultati del test, i dispositivi sono stati posizionati lontano da porte e finestre. Un altro dispositivo è stato posizionato nella "zona giorno" al piano più alto per confrontare i valori misurati; la temperatura dell'aria esterna e l'umidità relativa sono state valutate utilizzando una stazione meteorologica locale. I risultati ottenuti sono in linea con gli altri studi. Gli autori hanno concluso che la ventilazione degli ambienti ha un forte potenziale di mitigazione degli inquinanti provenienti da fonti interne agli edifici. La casa unifamiliare A presenta valori di concentrazione di radon nettamente superiori al valore massimo di 400 Bq m^{-3} indicato dalla normativa nazionale⁴¹ perché è termicamente isolato. Anche la casa B presenta valori di concentrazione di radon superiori al valore massimo di 400 Bq m^{-3} , poiché si trova in una zona geologica granitica. La casa C mostra valori di concentrazione di radon nettamente inferiori al valore massimo di 400 Bq m^{-3} probabilmente perché le finestre sono realizzate con infissi in legno, che consentono un'elevata permeabilità, e i rilevatori del radon sono stati collocati in locali all'ultimo piano, lontani da terra dove la concentrazione di radon è probabilmente maggiore.

Park *et al.* (2018) hanno cercato di sviluppare un modello matematico per stimare le concentrazioni di radon indoor in Corea. Tra gennaio e aprile 2016 hanno misurato le concentrazioni di radon indoor in 196 residenze al piano terra, per un minimo di 90 giorni, utilizzando rivelatori passivi alfa, ottenendo una media aritmetica e una media geometrica di $117,86 \pm 72,03$ e $95,13 \pm 2,02 \text{ Bq m}^{-3}$, rispettivamente. I valori di concentrazione di radon sono stati rilevati in due diversi ambienti di ciascuna residenza, scegliendo tra soggiorni, camere da letto o spazi in cui i residenti trascorrono principalmente la maggior parte del loro tempo. Gli autori hanno anche

⁴¹ Ordinance 353-A/2013 of 4th December, 2013. Diário da República, 1.ª série, N.º 235. Ministry of Environment, Territory Planning, Health and Solidarity, Employment and Social Security. Lisbon, Portugal, (2013) (in Portuguese).

somministrato questionari per valutare le caratteristiche di ciascuna residenza, l'ambiente circostante e gli stili di vita dei residenti. Inoltre, sono stati esaminati i dati nazionali sulle concentrazioni di radon indoor di 7.643 case unifamiliari per il periodo 2011-2014 per determinare le concentrazioni di radon nel suolo e sono stati utilizzati i dati meteorologici sulla temperatura e sulla velocità del vento per approssimare i tassi di ventilazione. Il modello è stato sviluppato per tenere conto di quattro fattori principali che influiscono sulle concentrazioni di radon negli ambienti indoor: suolo, materiali da costruzione, aria esterna e ventilazione. Quando si adatta un modello a residenze abitate, invece, è abbastanza difficile raccogliere dati reali su questi parametri per tutte le residenze abitate. Pertanto, sono stati utilizzati i dati delle indagini nazionali sulle concentrazioni di radon negli ambienti indoor nelle case unifamiliari e i dati meteorologici per stimare i parametri privi di informazioni utilizzando codici speciali in MATLAB R2012b. Sebbene il modello non sia sufficiente per coprire l'intero flusso di radon, il metodo è, secondo gli autori, vantaggioso in situazioni in cui mancano misurazioni effettive per le variabili di input. Sono stati stimati i tassi di ventilazione utilizzando le risposte del residente sulla frequenza della ventilazione, senza utilizzare altre misure. Tuttavia, poiché la velocità di ventilazione è un'altra variabile importante del modello, la risposta errata del residente alla frequenza della ventilazione potrebbe causare una stima poco accurata. Nonostante tali limiti, gli autori hanno considerato diversi fattori importanti come le concentrazioni di radon nel suolo e il tasso di ventilazione. Di conseguenza, le concentrazioni di radon effettive e stimate erano complessivamente in accordo, ad eccezione di alcune residenze a bassa concentrazione. Il modello sviluppato può essere applicato come strumento per stimare le concentrazioni di radon indoor con valori parametrici realistici. Considerando la mancanza di variabili di input di informazioni disponibili, ulteriori studi dovrebbero cercare di analizzare fattori aggiuntivi come i tassi di esalazione del radon o le concentrazioni di radon nel suolo e i tassi di ventilazione per migliorare le prestazioni del modello.

Papp *et al.* (2018) hanno determinato le concentrazioni di radon residenziale, le concentrazioni di radon nel suolo e nelle acque nell'area settentrionale della contea di Mureș, in Romania, ottenendo un quadro dettagliato della distribuzione di queste concentrazioni nell'area indagata (suddivisa in 42 celle di 5 km × 5 km). Infatti, secondo la versione della European Indoor Radon Map pubblicata nel 2014, la Romania è al quarto posto per rischio di esposizione al radon, con il 65% delle celle che supera il livello di 100 Bq m⁻³, di cui il 10% è superiore a quello raccomandato (300 Bq m⁻³). Le misurazioni del radon indoor sono state effettuate mediante rilevatori a binario nucleare a stato solido CR-39, nel periodo invernale-primaverile ed estivo-autunnale nel 2016. Le misurazioni del radon nel suolo e nelle acque (pozzi e sorgenti) sono state effettuate nel periodo estivo. Sono state eseguite un numero medio di tre misurazioni del radon nel suolo e quattro misurazioni nelle acque (pozzi e sorgenti), mentre, secondo la densità di popolazione, il numero delle misurazioni indoor variava da 2 a 10 per cella. Su un totale di 157 misurazioni residenziali, la media geometrica delle concentrazioni di radon indoor era 105 Bq m⁻³, il 3% dei quali supera il livello di

riferimento. La dose media annua efficace per le persone esposte è stata di 2,18 mSv, paragonabile alle altre regioni della Romania. Un totale di 137 misurazioni del radon nel suolo e 190 nell'acqua sono state eseguite in località vicine alle abitazioni studiate. I risultati delle misure di radon nel suolo mostrano una media geometrica di 14,6 kBq m⁻³; il 64% delle celle mostra un rischio basso, mentre il 36% un rischio medio. I risultati delle misurazioni del radon nelle acque mostrano un valore medio geometrico di 5,0 Bq L⁻¹ e la dose media efficace stimata delle acque potabili era di 23,1 µSv all'anno, inferiore rispetto ad altre regioni della Romania.

Vukotic *et al.* (2019 a) hanno presentato gli esiti della prima indagine nazionale sul radon indoor in Montenegro iniziata nel 2002 nelle zone centrali e costiere del Paese. Le misurazioni sono state eseguite nel corso di un anno nelle case di metà del territorio del Paese con rilevatori di tracciatura CR-39, all'interno di una griglia nazionale di 5 km × 5 km e di griglie locali nelle città montenegrine di 0,5 km × 0,5 km, con lo scopo di studiare le zone più densamente abitate. L'indagine è proseguita nel 2014 nella zona settentrionale del Montenegro e le misurazioni sono state completate a fine 2015. Circa il 50% delle abitazioni montenegrine è al piano terra; le tipologie edilizie prevalenti sono gli edifici residenziali e le case unifamiliari, entrambi per lo più realizzati in cemento e mattoni e privi di sistemi HVAC. Nel 1998 il Montenegro ha adottato come valore nazionale di riferimento la concentrazione media annua di attività del radon di 400 Bq m⁻³ per le case esistenti e 200 Bq m⁻³ per le case di nuova costruzione, oltre a 1000 Bq m⁻³ per i luoghi di lavoro. Questa decisione si basava sulle raccomandazioni delle autorità internazionali per la protezione dal radon (EC, 1990; ICRP, 1993), ma senza conoscere la situazione del radon esistente nel Paese. Per la selezione delle abitazioni da esaminare è stato consultato un esperto edile in modo da individuare case rappresentative delle singole griglie. Inoltre, è stato utilizzato un approccio porta a porta, somministrando un questionario sulle caratteristiche fisiche delle case e sulle abitudini di vita dei loro occupanti. I 953 risultati validi hanno rilevato una concentrazione media di attività del radon nelle case montenegrine di 110 Bq m⁻³. Assumendo una distribuzione log-normale dei risultati sperimentali, si è calcolata la media geometrica pari a 58,3 Bq m⁻³ e la deviazione standard geometrica uguale a 2,91. Sulla base dei risultati dell'indagine sul radon, gli autori hanno suggerito un nuovo livello di riferimento nazionale del radon di 300 Bq m⁻³ e un "livello di azione urgente" di 1000 Bq m⁻³, con frazioni stimate della popolazione abitativa nazionale al di sopra di questi livelli del 7,4% e 0,8 % rispettivamente. Inoltre, avendo stimato anche le percentuali di abitazioni con concentrazioni di radon superiori ai livelli suggeriti per ciascuno dei 23 comuni del Montenegro, gli autori hanno indicato come aree prioritarie per il radon sei comuni, che hanno più del 10% di abitazioni con una concentrazione di radon superiore a 300 Bq m⁻³. Nell'articolo dello stesso anno, Vukotic *et al.* (2019 b) affermano, inoltre, che le concentrazioni di radon sono in media molto più elevate nelle zone rurali (144 Bq m⁻³) rispetto alle abitazioni urbane (86 Bq m⁻³), così come nelle case unifamiliari (126 Bq m⁻³) rispetto ai condomini (54 Bq m⁻³); sono più alte nelle case unifamiliari in pietra (175 Bq m⁻³) e più basse nei condomini in cemento

(29 Bq m⁻³). Le concentrazioni di radon nelle case con seminterrato sono in media quasi due volte inferiori rispetto a quelle senza seminterrato. Come previsto, si osserva una diminuzione significativa delle concentrazioni medie di radon passando dal piano terra ai piani superiori, ma non si rileva una diminuzione con l'aumento dello spessore delle fondazioni. Sulla base dei risultati dell'indagine sul radon, gli autori hanno prodotto due tipi di mappe del radon del Montenegro: una mappa delle concentrazioni medie di attività del radon nei comuni e una mappa delle concentrazioni medie di attività del radon nelle celle di 10 km × 10 km della rete nazionale. Le concentrazioni medie annue di attività del radon nei comuni variano da 40 a 201 Bq m⁻³ e da 30 a 732 Bq m⁻³ nei quadrati di 10 km × 10 km della rete nazionale. Infine, utilizzando i dati sulla popolazione e sul radon per i comuni, hanno stimato che la concentrazione media annua di radon, ponderata per la popolazione, nelle abitazioni montenegrine sia pari a 100,5 Bq m⁻³ mentre la media geometrica ponderata pari a 92,8 Bq m⁻³. Con il valore medio aritmetico ponderato e un fattore di conversione della dose ancora valido di 9 nSv per Bq h m⁻³, la dose media efficace dall'esposizione al radon indoor nelle case in Montenegro è stimata in 1,58 mSv y⁻¹.

L'articolo di Vukotic *et al.* (2020) presenta i risultati di una ricognizione nazionale sul radon eseguita in Montenegro in tutti gli edifici di istruzione pre-universitaria (asili nido, scuole primarie, superiori e professionali, istituti per bambini con bisogni speciali e dormitori per studenti). Gli edifici dell'istruzione pre-universitaria in Montenegro sono generalmente bassi, per lo più con un solo piano (terra) o due piani, raramente con tre o più piani. In città, la maggior parte di questi edifici ha un'area di contatto con il suolo molto ampia, mentre in campagna generalmente non differiscono dalle case unifamiliari. Gli edifici didattici sono in genere privi di un seminterrato e riscaldati a legna o elettricità, senza riscaldamento centralizzato e sistema di ventilazione. I materiali da costruzione sono per lo più cemento e mattoni, mentre nelle campagne prevalgono le case in pietra. Come anticipato precedentemente (Vukotic *et al.*, 2019a), nel 1998 il Montenegro ha adottato come riferimento una concentrazione media annua di attività del radon di 400 Bq m⁻³ come livello di riferimento nazionale per le abitazioni e 1000 Bq m⁻³ per i luoghi di lavoro ma, in quanto Paese candidato all'adesione all'Unione Europea, il Montenegro deve conformarsi alla direttiva 2013/59/Euratom e ai nuovi standard internazionali che richiedono di stabilire un livello di riferimento nazionale per la concentrazione media annua di attività di radon indoor non superiore di Bq m⁻³. Tale livello di riferimento si applica anche agli edifici in cui la cittadinanza trascorre periodi di tempo considerevoli, come appunto gli asili nido, le scuole e gli ospedali. In preparazione all'indagine sul radon, è stata organizzata una formazione per i rappresentanti di tutte le istituzioni educative sul metodo di misurazione del radon e sulla compilazione del questionario di accompagnamento. Quindi, a ciascuno di essi è stato assegnato un numero richiesto di rilevatori (Radosys, tipo RSFV). La misurazione del radon è stata effettuata in tutti i 519 edifici utilizzati per l'istruzione pre-universitaria in Montenegro, utilizzando rilevatori passivi per tutto l'anno scolastico 2016/2017 (da settembre a giugno), in tutte le aule, sale giochi, uffici e camere da letto al piano terra,

nonché in alcune stanze al primo piano. In 3.793 stanze campionate, sono stati installati 4078 rivelatori di radon, di cui 3793 di base e 285 di controllo. I dati ottenuti durante l'indagine sul radon sono stati valutati statisticamente e analizzati utilizzando il software R. Le concentrazioni di radon nelle stanze al piano terra degli edifici dell'istruzione pre-universitaria sono, in media, relativamente elevate. I loro valori medi per 2.855 stanze sono risultati pari a 261 Bq m^{-3} e la media geometrica pari a 152 Bq m^{-3} . Il valore massimo medio in 9 mesi, superiore a 3.600 Bq m^{-3} , è stato riscontrato in quattro stanze. I valori medi delle concentrazioni di radon in 468 edifici, mediati su tutte le stanze campionate al piano terra di un edificio, sono pari a 275 Bq m^{-3} e con una media geometrica pari a 174 Bq m^{-3} . Il valore medio massimo in un edificio è di 2810 Bq m^{-3} . Nel 28,8% degli edifici scolastici i valori medi di concentrazione di radon al piano terra sono superiori a 300 Bq m^{-3} e in 18 (3,8%) edifici superiori a 1000 Bq m^{-3} . L'urgente riduzione dell'esposizione al radon in questi 18 edifici è stata fortemente raccomandata al Ministero dell'Istruzione. Da allora, due di questi edifici sono stati bonificati ed è stata avviata la procedura di bonifica degli altri cinque. Le concentrazioni medie di radon al piano terra degli edifici scolastici seguono strettamente una distribuzione log-normale. L'influenza dei nove fattori (clima, area urbana/rurale, età dell'edificio, numero di piani, materiali da costruzione, basamento, soletta di fondazione, infissi e riscaldamento) sulle concentrazioni di radon negli edifici è stata analizzata per univariata (UVA) e metodi multivariati (MVA). L'analisi univariata ha rivelato la relazione significativa di quattro fattori (età degli edifici, seminterrato, materiali da costruzione e infissi) con concentrazioni di radon al piano terra degli edifici, mentre l'analisi multivariata ha aggiunto a tali fattori l'area urbano/rurale e il numero di piani degli edifici, ma escludeva i materiali da costruzione come fattore che influenza significativamente le concentrazioni di radon.

L'obiettivo dello studio successivo di Vukotic *et al.* (2021) è stato combinare i risultati e le conclusioni delle due indagini a larga scala eseguite in Montenegro (una nelle abitazioni e una nelle scuole) al fine di sviluppare un modello per prevedere quando le concentrazioni di radon indoor in Montenegro potrebbero superare l'attuale livello di riferimento nazionale di 200 Bq m^{-3} per i nuovi edifici. A tale scopo, ai risultati delle misurazioni di concentrazioni di radon indoor al piano terra è stato applicato il metodo della regressione logistica multivariata. La probabilità di occorrenza di una variabile dipendente (concentrazione del radon indoor $> 200 \text{ Bq m}^{-3}$), in termini di dipendenza da un insieme di 11 variabili categoriali, è stata valutata utilizzando il modello logistico sviluppato. Tali variabili erano: comune, tipo di clima, tipo di regione (urbana o rurale), tipo di edificio, periodo di costruzione dell'edificio, numero di piani, presenza/assenza di seminterrato, materiali da costruzione, spessore della soletta in calcestruzzo, tipo di infissi e tipo di riscaldamento. Un'analisi statistica di base delle concentrazioni indoor di radon, misurate ai piani terra di 1.200 edifici in tutto il Montenegro, ha rivelato una variabilità spaziale di concentrazione statisticamente significativa tra comuni, regioni climatiche e attraverso il divario rurale-urbano. La percentuale di edifici con concentrazione indoor $> 200 \text{ Bq m}^{-3}$ nei 23 comuni variava dal 3% a Budva, al 67% nel comune di Danilovgrad. A parte le differenze regionali, i

test di Kruskal–Wallis hanno confermato che ciascuna delle otto caratteristiche dell'edificio analizzate (tipo di edificio, periodo di costruzione, presenza/assenza del seminterrato, numero di piani, materiali da costruzione, spessore della lastra di cemento, tipo di telaio della finestra e tipo di riscaldamento) ha influito in modo significativo sulle concentrazioni di radon indoor. L'applicazione del modello finale a quattro comuni montenegrini rappresentativi ha suggerito l'adozione di precauzioni speciali nella pianificazione delle caratteristiche architettoniche e costruttive di nuove scuole, asili nido, edifici residenziali e case familiari nel comune di Danilovgrad e nuove scuole e asili nido nel comune di Niksic.

Lo scopo del recente studio di Baptista *et al.* (2022) è stato quello di determinare i fattori (geologici e antropogenici) che possono influenzare la dose annua di inalazione (AID) ricevuta dalla popolazione. Hanno condotto un'indagine sulle radiazioni ^{222}Rn (radon) e ^{220}Rn (torio) in edifici situati nella regione sud ovest dell'Angola. Inoltre, hanno raccolto campioni di roccia e hanno eseguito dei sondaggi per valutare la concentrazione di attività ^{226}Ra e ^{224}Ra , ^{222}Rn e ^{220}Rn e il potenziale di esalazione e di emanazione sia in superficie sia in profondità.

I risultati principali di questa ricerca possono essere riassunti come segue: generalmente i livelli di radon negli ambienti interni sono risultati inferiori a 300 Bq m^{-3} ; le concentrazioni di radon e thoron indoor non sono correlati, quindi entrambi devono essere considerati per ottenere una stima corretta del contributo del ^{220}Rn alla AID; il contributo del ^{220}Rn al TIRC⁴² è in media del 35%, ma può essere dominante, raggiungendo il 95%, tuttavia, il ^{220}Rn indoor era significativamente diverso a seconda dei materiali da costruzione utilizzati e dal tipo di utilizzo dell'edificio (le concentrazioni più elevate di ^{222}Rn e ^{220}Rn sono state osservate nelle abitazioni rispetto ai luoghi di lavoro.); l'AID ha una mediana di $1,50 \text{ mSv/a}$ nelle abitazioni, che è inferiore all'esposizione media stimata alle radiazioni dovute a fonti naturali, pari a $2,4 \text{ mSv/y}$, indicando che i rischi per la salute dovuti all'esposizione al radon, al thoron e alla loro progenie nell'area di studio non sono significativi. Inoltre, le concentrazioni più elevate di attività ^{222}Rn e ^{220}Rn in ambienti interni sono state osservate in edifici situati sopra graniti rossi di tipo A e rioliti porfiriche. Per quanto riguarda i materiali da costruzione, quelli a base di argilla e cemento sono stati associati a livelli mediani di ^{220}Rn più elevati e a stime di AID più elevate, rispetto ai materiali a base di pietra. Passando all'analisi dei campioni di roccia gli autori hanno rilevato correlazioni statisticamente significative tra ^{224}Ra e ^{226}Ra , e ^{220}Rn e ^{222}Rn e il potenziale di esalazione ed emanazione. L'analisi dei campioni di roccia ha rivelato che: le concentrazioni di attività di ^{224}Ra e le esalazioni di ^{220}Rn per unità di massa erano più elevate, ma meno variabili rispetto alle concentrazioni di attività di ^{226}Ra e le esalazioni di ^{222}Rn per unità di massa, rispettivamente; esiste una significativa variabilità delle proprietà radiologiche associata alla profondità e ai processi di erosione superficiale; le più alte concentrazioni di attività di ^{226}Ra e ^{224}Ra , e di

⁴² TIRC: Total Indoor Radon Concentration.

esalazioni di ^{222}Rn e ^{220}Rn per unità di massa, sono state osservate nei graniti rossi di tipo A e nelle rioliti porfiriche analogamente alle concentrazioni indoor di ^{222}Rn e ^{220}Rn . Per concludere gli autori sostengono che, negli studi per la valutazione della AID e per lo sviluppo di mappe di rischio, dovrebbero essere presi in considerazione sia i fattori geologici, sia antropici (come i materiali da costruzione, il tipo di utilizzo degli edifici e le abitudini degli abitanti) che possono contribuire a modificare la AID, sottolineando l'importanza di stimare indipendentemente le esalazioni di radon e thoron indoor così da poter determinare con precisione la dose annua ricevuta effettivamente dalla popolazione.

Nello stesso anno Olsthoorn *et al.* (2022) hanno condotto il primo studio su larga scala sulla correlazione tra concentrazioni di uranio e radon in Svezia. Per raggiungere questo obiettivo hanno correlato le misurazioni medie annuali del radon indoor con le misurazioni medie dell'uranio nelle corrispondenti aree identificate dal codice postale. Inoltre, hanno studiato l'effetto dei parametri di costruzione dell'edificio (ad esempio la ventilazione) sul coefficiente di correlazione; elemento utile per scegliere le tecniche di mitigazione adeguate al fine di ridurre l'esposizione al radon in Svezia. Il Geological Survey of Sweden (SGU) ha misurato le concentrazioni geologiche di uranio mediante spettrometria a raggi gamma nell'aria sin dalla fine anni '60, in quanto è noto da molto tempo che le concentrazioni di uranio sono correlate con le concentrazioni di radon indoor. In questa ricerca le misurazioni utilizzate sono state effettuate seguendo le regole fissate in un protocollo di misurazione dall'autorità svedese per la sicurezza contro le radiazioni. Le misurazioni sono state effettuate in 60.809 edifici nel periodo 2015-2020. È stata utilizzata una mappa di radiazioni gamma per ottenere una concentrazione di uranio equivalente (ppm eU) per ogni area identificata dai codici postali. Il contenuto di uranio aggregato è stato confrontato con la concentrazione media annua di radon all'interno delle abitazioni per diverse tipologie di edifici. I risultati delle misurazioni hanno riportato che la concentrazione media di radon osservata di 151 Bq m^{-3} è inferiore allo standard svedese di 200 Bq m^{-3} e allo standard europeo di 300 Bq m^{-3} . Tuttavia, è risultata superiore alla raccomandazione dell'OMS di 100 Bq m^{-3} . Gli autori hanno dimostrato l'esistenza di una correlazione positiva tra la mappa radiometrica dell'uranio nel terreno e le concentrazioni di radon indoor misurate nelle abitazioni in Svezia. È interessante notare sia che le abitazioni moderne mostrano concentrazioni di radon minori anche in aree caratterizzate da elevate concentrazioni medie di uranio. Infatti, le abitazioni costruite dopo il 2015 hanno registrato un valore medio della concentrazione di radon inferiore a 100 Bq m^{-3} . Ciò dimostra che l'edilizia moderna è efficace nel ridurre la correlazione con le concentrazioni di fondo di uranio e nel minimizzare il rischio per la salute associato all'esposizione al radon, ricordando anche che è stato stimato che circa il 35% dei casi di cancro al polmone attribuiti al radon, in Svezia, possono essere prevenuti abbassandone le concentrazioni indoor a 100 Bq m^{-3} . Questa tendenza conferma che le tecniche di mitigazione come la ventilazione attiva e l'isolamento delle fondazioni riducono il ruolo che la correlazione geogenica gioca nell'esposizione della popolazione al radon.

Silva e Dinis (2022) nello studio di follow-up sull'esposizione ai livelli di radon indoor in centri termali portoghesi, hanno effettuato misurazioni continue dei livelli di radon indoor in tre centri, per 1 anno (2018-2019), presentando anche un'analisi in serie temporale dei tassi di dose gamma registrati all'interno delle strutture. L'obiettivo era valutare l'esposizione professionale al radon indoor attraverso misurazioni il più possibile continue e identificare potenziali modelli nella variazione dei tassi di dose gamma attraverso l'analisi delle serie temporali. All'interno dei centri termali, un'ulteriore fonte di gas radon può essere costituita dalle acque termali. Infatti, quando il radon è presente nelle acque superficiali, come laghi e fiumi, viene rilasciato per agitazione mentre passa su rocce e terreni e si disperde nell'aria esterna. Le acque sotterranee provenienti da pozzi di solito contengono concentrazioni di radon più elevate rispetto alle acque superficiali. In circostanze specifiche, si riscontrano concentrazioni di radon molto elevate negli approvvigionamenti di acqua potabile provenienti da queste fonti. Pertanto, parte del radon disciolto può essere rilasciato nell'aria indoor attraverso l'uso dell'acqua. Il suo apporto, però, non è costante in quanto il radon viene rilasciato solo quando c'è agitazione dell'acqua, come quando si apre un rubinetto o una doccia. Ciò è supportato dagli studi dell'UNSCEAR (2000)⁴³ che hanno concluso che, in media, il 90% della dose attribuibile al radon nell'acqua potabile deriva dall'inalazione piuttosto che dall'ingestione. L'UE ha identificato la terapia termale come una delle attività professionali con potenziale di esposizione al radon nella direttiva 96/29/EURATOM. La più recente Direttiva 2013/59/EURATOM ha, per la prima volta, definito un quadro per il controllo dell'esposizione alle sorgenti di radiazioni naturali derivanti dalle attività lavorative, comprese le terme, con l'obiettivo di garantire una migliore protezione anche nei luoghi di lavoro e nelle abitazioni. Il documento introduce il gas radon nel sistema di radioprotezione e stabilisce come livello di riferimento 300 Bq m^{-3} per la concentrazione di radon indoor. Oltre a ciò, la normativa sull'esposizione professionale al radon nei luoghi di lavoro prevede una categorizzazione dei lavoratori esposti in cui per una dose superiore a 6 mSv/anno , la situazione dovrebbe essere gestita come una situazione di esposizione pianificata. Al di sotto di questo valore, l'obbligo è di tenere sotto controllo l'esposizione.

I risultati hanno mostrato che la concentrazione di radon indoor variava da 202 a 1.941 Bq m^{-3} (in un centro), da 52 a 191 Bq m^{-3} (in un secondo centro) e da 937 a 1.750 Bq m^{-3} (in un terzo centro). Circa il 60% dei valori ottenuti per la concentrazione di radon indoor supera il livello di riferimento di 300 Bq m^{-3} ⁴⁴. I tassi di dose gamma sono stati misurati continuamente con i rivelatori GAMMA SCOUT® per letture orarie ($\mu\text{Sv/h}$) tra 83 e 229 giorni. In media, i risultati sono simili in tutte le località considerate e variano tra 0,169 e 0,264 $\mu\text{Sv/h}$, sebbene le variazioni siano diverse in inverno e in estate. Le dosi efficaci calcolate erano comprese tra 3,49 e 18,65 mSv/anno (in un centro), tra 1,37 e 2,53 mSv/anno (in un secondo centro) e tra 13,89

⁴³ UNSCEAR. (2000). Publication E.00.IX.3. Sources and effects of 91 ionizing radiation, United Nations, New York.

⁴⁴ Decree-Law No. 108/2018

e 22,97 mSv/anno (in un terzo centro). Ai fini dell'esposizione professionale, i lavoratori sono classificati nella categoria A in nove siti su 20, secondo la direttiva europea 2013/59/Euratom, poiché l'esposizione supera una dose efficace di 6 mSv/anno e devono quindi essere sorvegliati in base a misurazioni individuali. Devono, quindi, essere intraprese azioni di mitigazione per ridurre la concentrazione di radon nell'ambiente di lavoro e mantenerla al di sotto del livello di riferimento.

Con l'eccezione dell'overflow registrato di 3.366, in tutte le località, i tassi di dose gamma erano inferiori a 1 $\mu\text{Sv/h}$, quindi il contributo alla dose efficace annuale è trascurabile. Tuttavia, la variazione dei ratei di dose gamma ha mostrato alcune alterazioni interessanti, indicando una relazione con il potenziale accumulo di progenie di radon in alcune situazioni particolari, come ad esempio durante alcuni periodi di chiusura della struttura.

L'analisi delle serie temporali ha permesso di adattare alcuni modelli alla variazione del tasso di dose gamma e, sebbene i modelli ottenuti non possano prevedere i tassi di dose gamma esatti, possono fornire informazioni che aiutano a stabilire strategie per una corretta pianificazione o essere utilizzati come strumento supplementare per la pianificazione e il processo decisionale in materia di esposizione professionale.

Nello studio di Banrion *et al.* (2022), è stata scelta l'area di Castleisland, nella contea di Kerry (Irlanda sud-occidentale), per la disponibilità di dati sul radon indoor e la presenza di significative anomalie del radon associate ai calcari carsici. È stato studiato l'uso del potenziale geogenico del radon come mezzo per valutare il rischio radon e confrontare le mappe di rischio risultanti con la mappa originale che si basa esclusivamente sui dati di concentrazione radon indoor e con la nuova mappa del radon indoor dell'EPA (Environmental Protection Agency), che incorpora parametri geologici. In Irlanda, il piano d'azione nazionale contro il radon è sostenuto dalla "Strategia nazionale di controllo del radon", "Radon nei luoghi di lavoro", "Radiazioni gamma dai materiali da costruzione" e "Esposizione interna al radon nelle abitazioni domestiche"⁴⁵. Di particolare importanza è la mappa originale del rischio radon, che delinea le aree di priorità radon, definendo le aree ad alto radon come "qualsiasi area in cui si prevede che il 10% o più delle abitazioni supererà il livello di riferimento di 200 Bq m⁻³"⁴⁶. Secondo la regolamentazione irlandese, nelle aree ad alto contenuto di radon i nuovi edifici sono obbligati ad adottare misure preventive per ridurre l'accumulo eccessivo di radon; inoltre, nelle aree ritenute ad alto rischio di radon, i datori di lavoro sono obbligati a misurare il radon e, se necessario, a garantire che il radon sia al di sotto del livello di riferimento. La mappa del rischio radon dell'Irlanda pubblicata dalla Environmental Protection Agency⁴⁷ (Fennell *et al.*, 2002, vedi nota

⁴⁵ Radiological Protection Act, 1991. (Ionising Radiation) Regulations, 2019. Statutory Instruments Ireland, S.I. No. 30 of 2019.

⁴⁶ Fennell, S.G., Mackin, G.M., McGarry, A.T., Pollard, D., 2002, February. Radon exposure in Ireland. Int. Congr. 1225, 71–77.

⁴⁷ Environmental Protection Agency, 2022. New EPA Radon maps show more homes and workplaces at risk from cancer-causing gas. <https://www.epa.ie/news-releases>.

precedente) ha una risoluzione spaziale di $10 \times 10 \text{ km}^2$ e si basa esclusivamente sulla concentrazione di radon indoor, ossia non contiene alcuna informazione geologica. Un recente aggiornamento della mappa da parte della Environmental Protection Agency incorpora le proprietà geogeniche. Sono state raccolte 135 misurazioni di gas nel suolo e di permeabilità, integrate con 180 misurazioni del radon indoor per un'area di 6 km^2 in circa 50 località. Sia le concentrazioni di gas nel suolo che di radon indoor variavano da valori molto bassi ($<10 \text{ kBq m}^{-3}$, $0,1 \text{ Bq m}^{-3}$) a valori estremamente alti ($>1.433 \text{ kBq m}^{-3}$, 65.000 Bq m^{-3}). Il metodo messo a punto dagli autori classifica quasi il 50% dell'area come un'area ad alto potenziale di radon e consente la valutazione dei controlli geogenici sulla distribuzione del radon includendo altre variabili geologiche. La varianza della concentrazione di radon indoor spiegata da fattori geogenici (geologia del substrato roccioso, geologia quaternaria, permeabilità del sottosuolo e gas radon nel suolo) è risultata del 34%, con concentrazione del gas nel suolo come principale contributore (16%). I test hanno illustrato che la geologia del substrato roccioso ha l'influenza più sostanziale sulle concentrazioni di gas nel suolo (39%), sebbene anche la permeabilità del sottosuolo (21%) e la geologia quaternaria (13%) abbiano effetti significativi. I risultati dimostrano che gli scisti neri sono associati ad anomalie della concentrazione radon nel suolo e indoor e probabilmente agiscono come una fonte di radon che può anche essere trasportato attraverso una maggiore permeabilità in zone di faglia non mineralizzate e estesi carsici sotterranei prevalenti nella regione. I fattori geologici (soprattutto il radon nel suolo, geologia del substrato roccioso e permeabilità del sottosuolo) predicono sufficientemente i livelli di radon indoor. Pertanto, il campionamento del radon nel suolo e della permeabilità del suolo, utilizzato insieme ad altri dati geogenici, può quindi facilitare l'individuazione delle aree prioritarie del radon, in particolare se sono disponibili mappe affidabili ad alta risoluzione, se esistono dati rilevanti relativi al radon (es. proprietà del suolo) e se le litologie sono assegnate con precisione come possibili fonti di radon. Tale approccio dimostra l'utilità delle mappe geogeniche ad alta risoluzione nella previsione delle categorie di rischio di radon indoor rispetto all'applicazione delle sole misurazioni del radon indoor. Questo metodo è particolarmente utile per valutare il potenziale del radon in aree in cui le misurazioni del radon indoor sono scarse o carenti, soprattutto a scala locale e nelle regioni rurali con una bassa densità di popolazione e una disponibilità limitata di dati sul radon indoor.

Soldati *et al.* (2022) hanno presentato i risultati di un esperimento svolto all'interno del museo geofisico di Rocca di Papa (Roma, Italia), caratterizzato da elevati livelli di radon indoor. Il comune di Rocca di Papa, infatti, sorge su un'area precedentemente soggetta all'attività del vulcano di Albano; pertanto, la composizione del suolo è prevalentemente di origine vulcanica, con prevalenza di tufo che, come è noto, rappresenta una fonte di radon. La Commissione internazionale per la protezione radiologica ha raccomandato per i luoghi di lavoro un livello di azione per l'aria interna da radon di 500 Bq m^{-3} (ICRP, 1993). Tale livello di riferimento (al di sopra del quale occorre intervenire per ridurre la concentrazione di radon) è stato adottato

dalla legge italiana (D. Lgs 241/2000) fino a luglio 2020; di conseguenza, la richiesta di certificati che confermino i livelli di radon sicuri negli edifici sta diventando una pratica comune. Più recentemente, la Direttiva EURATOM 2013/59 ha ulteriormente abbassato il livello di riferimento a 300 Bq m^{-3} e ha dato indicazioni per effettuare misurazioni in tutti gli edifici pubblici posti al piano interrato e al piano terra. Il D.Lgs 101/2020 ha recepito la Direttiva europea e, nonostante sia consigliato il monitoraggio nelle cosiddette 'aree prioritarie', con valutazioni riferite al piano terra, l'utilizzo di materiali edili ad alto indice di radioattività può renderlo indispensabile per monitorare anche i piani sopraelevati. Di conseguenza, anche includere i piani sopraelevati nel monitoraggio del radon indoor, può avere il duplice obiettivo di garantire un ambiente salubre nel suo complesso e di indagare le dinamiche di trasporto del radon all'interno dell'edificio. Sono stati, quindi, installati quattro sensori attivi per la misurazione in continuo della concentrazione di radon indoor a diversi piani dell'edificio. I sensori appartengono alla rete IRON-DB⁴⁸, una rete permanente a livello nazionale per misurazioni quasi in tempo reale delle emissioni di radon nel suolo. La rete è attiva da 12 anni ed è costituita da oltre 60 stazioni che coprono l'intera penisola italiana e la Sicilia, con una maggiore densità nell'Appennino centro-meridionale, interessato da alcune importanti sequenze sismiche negli ultimi decenni. Le quattro stazioni di radon sono state installate presso il museo tra marzo e settembre 2018, su tre diversi livelli dell'edificio (interrato, a diretto contatto con il suolo; al primo piano; al secondo piano). Gli strumenti, oltre alla concentrazione di radon, hanno misurato contemporaneamente la temperatura locale e l'umidità relativa, con un'acquisizione impostata a 4 ore. La novità dell'esperimento è l'impiego della tecnica attiva per il monitoraggio delle variazioni di radon indoor mediante rivelatori di radon prodotti dalla ditta Algade, mod. "AER C".

Come atteso, nel seminterrato si sono osservati i valori più elevati del radon medio, indicando che il contenuto di radon indoor nell'edificio è determinato principalmente dall'afflusso di gas radon dal terreno ed eventualmente dalle rocce che delimitano le pareti del seminterrato stesso. La diminuzione del livello di radon all'aumentare dell'altezza del piano del museo in cui sono installati i sensori suggerisce che i materiali da costruzione forniscano un contributo minore al contenuto di radon indoor, confermato anche dai valori relativamente bassi di concentrazione osservati durante l'estate. Se si confrontano i valori di concentrazione di radon indoor registrati con il livello di azione indicato nel D.Lgs. 101/2020 in vigore (300 Bq m^{-3}), tutti i locali del museo presi in considerazione superano di gran lunga i limiti. Tuttavia, le differenze della concentrazione di gas a seconda della stagione sono ampie: in tutte le stazioni il valore di radon mediato durante la stagione fredda supera ampiamente quello relativo ai mesi caldi e i dati sono più scarsamente distribuiti. Questo può essere, almeno in parte, un effetto del maggiore errore strumentale associato alle misurazioni di bassi livelli di radon. I risultati forniscono forti indicazioni che, su scala

⁴⁸ IRON-DB: a database for the Italian Radon mOnitoring Network, Valentina Cannelli 2017. Rapporti tecnici INGV ISSN 2039-7941

stagionale, radon e temperatura sono inversamente correlati per tutte le stazioni, con valori di radon più elevati osservati tra ottobre e giugno. La relazione inversa tra radon e temperatura è giustificata dal cosiddetto "effetto camino", che avviene in ambienti chiusi come quelli che ospitano gli strumenti; consiste nel movimento verso l'alto del gas risultante da una differenza di densità dell'aria interna ed esterna, causata a sua volta dal gradiente di temperatura. Maggiore è la differenza termica, maggiore è la forza di galleggiamento, che favorisce l'emissione del gas dal suolo; per questo si osservano concentrazioni di radon piuttosto elevate soprattutto in inverno e preferibilmente con gli impianti di riscaldamento accesi.

Il monitoraggio del radon indoor ha il duplice scopo di tutelare la salute degli occupanti e quello di analizzare le dinamiche della diffusione del radon negli edifici. Come primo passo verso la mitigazione del potenziale rischio di esposizione, sono stati installati quattro sensori attivi a diversi piani dell'edificio, al fine di monitorare continuamente, non solo l'esalazione del radon dal terreno, ma anche la sua diffusione dal suolo fino ai piani elevati. La raccolta, per un periodo superiore ai tre anni, di dati sulla concentrazione di radon ha permesso di identificare le fluttuazioni su scala stagionale e di chiarire la relazione tra le variazioni di radon e i cambiamenti della temperatura interna e dell'umidità relativa. L'analisi di questo insieme di dati rileva come la salubrità degli ambienti interni in termini di concentrazione di radon sia correlata a una serie di fattori, tra cui le condizioni ambientali e l'uso di sistemi di riscaldamento e ventilazione. Infine, il monitoraggio continuo del radon a diversi piani dell'edificio offre la possibilità unica di tracciare la diffusione verticale del radon, consentendo di effettuare una stima della velocità di risalita del radon.

Wang *et al.* (2022) hanno misurato il livello del radon a Pechino, da settembre 2018 ad agosto 2019, selezionando 800 abitazioni in modo casuale, ma tenendo conto della distribuzione distrettuale, della densità edilizia, della planimetria, dell'età di costruzione e coprendo tutti i 15 distretti amministrativi della città. In Cina sono state eseguite due volte a livello nazionale le indagini sul radon indoor (nel 1992⁴⁹ e nel 2006⁵⁰), dando come risultato una media aritmetica di 22,5 Bq m⁻³ in un'indagine e una media nazionale di 24 Bq m⁻³ (ponderata sulla popolazione) nella seconda. Di pari passo con lo sviluppo economico a livello nazionale negli ultimi tre decenni, la costruzione di abitazioni a Pechino è in forte espansione, con una preponderanza di grattacieli e grandi palazzi. Numerosi cambiamenti hanno interessato sia gli stili di costruzione, sia i materiali da costruzione utilizzati nell'edilizia (ampio utilizzo di cemento armato contenente anche residui di rifiuti industriali, come ceneri di carbone e scorie). Inoltre, la diffusione dei condizionatori d'aria domestici dovrebbe portare ad un aumento del livello di radon negli ambienti indoor. Ai fini di un piano d'azione nazionale completo e ben progettato, gli autori ritengono sia necessario pianificare

⁴⁹ Lin LQ, Ma GX, Wen HF, et al. Indoor radon measurements in the region of Beijing. *Chin J Environ Sci.* 1992;13(5):10–15.

⁵⁰ Fu PF, Zhao ZZ. Measurement and evaluation on indoor radon concentration in Beijing area in 2006. *Chin J Radiol Med Prot.* 2008;28(5):536–537.

una nuova indagine a livello nazionale. Per una buona rappresentatività, come raccomandato dall'OMS⁵¹ e dall'ISO⁵², per le misure è stato adottato il CR-39 come rivelatore di tracce alfa del metodo di misurazione integrato, ampiamente utilizzato in precedenti sondaggi in tutto il mondo. Il rilevatore è stato posizionato in luoghi ad alto tasso di occupazione, come la camera da letto o il soggiorno, mantenendo le normali condizioni di vita durante il periodo di misurazione. L'indagine su Pechino costituisce lo studio pilota per l'indagine nazionale. Le medie geometriche e aritmetiche annuali della concentrazione di radon nelle case degli intervistati sono risultate pari rispettivamente a $39,3 \pm 12,9$ e $42,0 \pm 13,7$ Bq m⁻³, variabili da $12,1 \pm 2,5$ a $119,0 \pm 7,8$ Bq m⁻³. La concentrazione di radon delle abitazioni al piano terra è risultata, come atteso, superiore a quella degli altri piani, mentre non si è riscontrata alcuna differenza di concentrazione tra tutti gli altri piani. Inaspettatamente, invece, non si è osservata nessuna differenza tra gli alloggi con ventilazione naturale e quelli dotati di condizionamento, ma va specificato che la modalità di ventilazione non è stata registrata oggettivamente con misure, ma dagli abitanti mediante questionario. È stata rilevata una maggiore concentrazione di radon negli edifici costruiti dopo il 2010 rispetto agli edifici costruiti negli anni '80, '90 e 2000. In conclusione, non si è osservata una grande variazione del livello di concentrazione di radon nelle abitazioni nell'area di Pechino rispetto alle precedenti indagini. Si ritiene che la maggiore concentrazione di radon negli edifici costruiti negli ultimi dieci anni sia dovuta all'utilizzo di differenti materiali da costruzione e al tasso di ventilazione interna, ma per i quali sono necessari ulteriori studi di approfondimento.

Adelikhah *et al.* (2022) hanno progettato un'indagine per misurare il contenuto di radioattività dei materiali da costruzione più comuni disponibili sul mercato locale di Mahallat (Iran), che rappresenta un'area esposta ad un livello elevato di radiazione di fondo naturale. In secondo luogo, hanno avuto l'obiettivo di stimare il contributo dei materiali da costruzione alle dosi esterne e interne ricevute dagli abitanti di Mahallat utilizzando il codice informatico RESRAD-BUILD⁵³ in una stanza modello standard sviluppata dall'Argonne National Laboratory (USA). Poiché i materiali da costruzione contengono quantità diverse di radionuclidi dalle serie di decadimento di ²³⁸U e ²³²Th e dall'isotopo ⁴⁰K, l'esposizione a cui sono soggetti gli abitanti risulta dalla combinazione di radiazione esterna diretta (vale a dire i radionuclidi nelle pareti, pavimento e soffitto e nelle particelle aerodisperse nell'aria), dall'inalazione di

⁵¹ World Health Organization. WHO handbook on indoor radon—A public health perspective. Geneva: WHO; 2009.

⁵² International Standardization Organization. ISO 11665-4. Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis. ISO; 2020.

⁵³ RESRAD-BUILD è un modello progettato per stimare la possibile dose di radiazioni ricevuta da un individuo che lavora o vive in un edificio contenente materiale radioattivo, tenendo conto di diverse vie di esposizione umana, compresa l'esposizione esterna direttamente dalla sorgente, l'esposizione esterna dovuta all'immersione dell'aria e l'esposizione interna dovuta a livelli indoor di ²²²Rn, ²²⁰Rn, loro progenie, ecc. Questo codice consente agli utenti di calcolare la dose integrata nel tempo durante il periodo di esposizione a intervalli di tempo specificati dall'utente.

particelle di polvere contaminate nell'aria, dall'inalazione di radon e dall'ingestione accidentale di particelle di polvere contaminate. Le vie di esposizione per stimare la dose efficace, quindi, includevano l'inalazione, l'esposizione esterna, la deposizione e l'immersione. A questo scopo, sono stati applicati in una simulazione tre diversi casi studio che utilizzano differenti composizioni di materiali da costruzione, tenendo conto delle diverse densità e spessori di tali materiali, per determinare quanta influenza ciascuno di essi ha sulla velocità di dose effettiva a cui sono esposti gli occupanti. I materiali da costruzione studiati, ossia mattoni, cemento, sabbia, piastrelle e ceramica, sono stati raccolti casualmente da fornitori e/o produttori locali. Poiché tutti gli edifici sono costruiti con una combinazione di materiali da costruzione di base, nella simulazione sono state applicate variazioni nelle proporzioni di tali materiali utilizzati per comporre pareti, pavimenti e soffitti, prendendo in considerazione le loro diverse densità e spessori per valutare l'influenza di tali parametri sulla variazione delle dosi esterne di radon a cui è esposto un individuo nella stanza simulata utilizzando il codice informatico RESRAD-BUILD. Le simulazioni sono state eseguite utilizzando come tempo di esposizione l'aspettativa di vita degli iraniani pari a 76 anni. Il tasso di dose effettiva massima a lungo termine è stato registrato dal caso di studio due (pavimento in cemento piastrellato), che variava da 504 a 1.433 $\mu\text{Sv yr}^{-1}$ ed era inferiore al limite massimo raccomandato dalla Commissione internazionale per la protezione radiologica (International Commission on Radiological Protection, ICRP). Anche le dosi esterne di radon più alte sono state stimate rispettivamente in 369 e 1.064 μSv . Secondo i risultati della simulazione, il contributo di ^{232}Th verso le dosi indoor è superiore a quello di ^{226}Ra a causa della condizione omogenea sia di ^{222}Rn che di ^{220}Rn nel modello standard della stanza simulato dal codice informatico RESRAD-BUILD, mentre l'omogeneità di ^{220}Rn in una stanza è altamente incerta a causa della sua breve emivita di 56 s. Inoltre, è stato anche stabilito che il principale contributo alla variazione della concentrazione di radon è il risultato delle variazioni del tasso di ricambio dell'aria. Infine, poiché il RESRAD-BUILD considera il decadimento dei radionuclidi e la crescita interna dei prodotti di decadimento, la dose potrebbe apparire sovrastimata a causa della crescita interna dei prodotti di decadimento di ^{232}Th , mentre non contribuiscono a tale incremento né il ^{226}Ra poiché raggiunge l'equilibrio molto più velocemente, né il ^{40}K a causa della lunga emivita. Inoltre, il materiale da costruzione non conterrebbe ^{226}Ra o ^{232}Th puri. I risultati indicano che il codice informatico RESRAD-BUILD è uno strumento utile per valutare il rischio radiologico per la salute umana degli edifici contaminati da radionuclidi e per monitorare e controllare la radioattività dei materiali da costruzione. I dati di questo studio potrebbero anche contribuire alla banca dati dei radionuclidi naturali presenti nei materiali da costruzione, migliorare le normative tecniche e le leggi vigenti in materia di contenuto radioattivo dei materiali da costruzione, contribuire alla formulazione di una proposta di un metodo per la riduzione dell'esposizione al radon e alla sensibilizzazione della popolazione e alla comunicazione del rischio. Prima dell'immissione sul mercato dei materiali da

costruzione, gli autori auspicano una legislazione nazionale nell'ordinamento iraniano che descriva i requisiti per l'esame radiologico dei materiali da costruzione.

Nello studio di Oni *et al.* (2022) è stato misurato il livello di radon in 132 uffici e 60 aule di 11 istituti terziari collocati in aree con diverse caratteristiche geologiche nel sud-ovest della Nigeria. In Africa c'è un basso livello di consapevolezza del rischio del radon indoor, soprattutto in Nigeria. Nel sud-ovest di questo Paese l'istruzione, in particolare quella terziaria, che coinvolge i giovani, è il principale investimento delle famiglie. Questi gruppi di individui trascorrono ore significative della giornata e dell'anno nelle aule, se in questi ambienti il radon indoor si accumula, esiste il rischio che questi individui siano soggetti a una esposizione significativa al gas. Le misure di radon sono state effettuate utilizzando Electret Passive Environmental Radon Monitor (E-PERM). I parametri meteorologici sono stati ottenuti dal database della National Aeronautics and Space Administration (NASA) e sono stati utilizzati script di codice MATLAB per sviluppare il modello di rete neurale artificiale (Artificial Neural Networks, ANN). Esistono, infatti, relazioni complesse tra gas radon, parametri meteorologici e geologici di un ambiente che possono essere stimate mediante modelli statistici. Le reti neurali artificiali (ANN) sono modelli computazionali che copiano le capacità decisionali e di apprendimento del cervello umano. Sono state scelte in questo studio per modellare dipendenze non lineari come le concentrazioni di radon su più variabili come la litologia e alcune variabili meteorologiche selezionate, tra cui la pressione barometrica, l'umidità relativa, la temperatura, le precipitazioni e la velocità del vento. In questo lavoro, i dati misurati della concentrazione di radon indoor in base agli effetti di parametri meteorologici e geologici sono stati analizzati e sottoposti ad apprendimento automatico, portando alla generazione di un modello ANN per la previsione della concentrazione di radon indoor negli uffici di istituti terziari selezionati all'interno del sud-ovest della Nigeria.

La concentrazione del radon osservata è stata generalmente bassa nelle aule, con una media di $28,28 \pm 0,4 \text{ Bq m}^{-3}$ e potrebbe non comportare alcun effetto sulla salute. Tra gli uffici, invece, sono stati identificati alcuni locali con valori di radon superiori al limite di 100 Bq m^{-3} , raccomandato dall'OMS, e per tali locali è necessario prevedere interventi di mitigazione. I risultati hanno mostrato che i valori della concentrazione di radon sono influenzati dai parametri litologici e meteorologici dell'area. Negli uffici costruiti su roccia granitica è stata osservata la più alta concentrazione media di radon pari a $64,3 \pm 1,7 \text{ Bq m}^{-3}$ mentre la più bassa è stata osservata in ambienti su roccia alluvionale, riportando un valore di $52,5 \pm 1,4 \text{ Bq m}^{-3}$. La litologia, i dati meteorologici e i dati misurati del radon sono stati tradotti in un modello predittivo utilizzando una rete neurale artificiale. Il modello ANN generato per l'area di studio ha mostrato un'elevata precisione e si è dimostrato essere uno strumento matematico rapido e pratico, utile per prevedere la concentrazione di radon indoor dai parametri meteorologici e geologici negli uffici delle istituzioni terziarie nel sud-ovest della Nigeria.

Larcombe *et al.* (2022) hanno pubblicato uno studio sul radon indoor condotto nelle abitazioni delle riserve nel nord Manitoba (Canada). Le condizioni generali delle case nel nord del Manitoba sono influenzate dalla necessità di sigillare le abitazioni per proteggere gli abitanti dal freddo, dal caldo, dalla pioggia, dalla polvere e dagli insetti in condizioni ambientali estreme come quelle del subartico. In particolare, le comunità delle Prime Nazioni nel nord del Canada sono isolate e quindi i materiali da costruzione per le nuove case e le forniture per la manutenzione degli alloggi vengono portati solo durante l'inverno su strade invernali temporanee. Ciò rende costoso costruire nuove abitazioni e impegnativo mantenere quelle esistenti; molte case necessitano di riparazioni, oppure sono sovraffollate e hanno una ventilazione inadeguata. Oltre alla casa stessa, l'ambiente fisico della costruzione può potenzialmente avere un impatto sulla salute degli occupanti, ma la presenza e gli effetti del gas radon sono trascurati negli studi sulla salute e sulla costruzione di alloggi nel nord del Canada. Secondo l'Health Canada, se i livelli di gas radon sono compresi tra 200 Bq m^{-3} e 600 Bq m^{-3} in un ambiente chiuso, dovrebbero essere intraprese azioni di mitigazione entro due anni ed entro un anno se sono superiori a 600 Bq m^{-3} ⁵⁴. Due comunità delle Prime Nazioni del nord Manitoba hanno quindi progettato uno studio per misurare la concentrazione di gas radon nelle case nelle loro riserve, per aumentare la consapevolezza sui rischi del gas radon e utilizzare le informazioni risultanti per mitigare il radon nelle case con valori elevati⁵⁵. Pertanto, è importante che venga fornito un messaggio adeguato a ridurre l'esposizione e di conseguenza l'incidenza del cancro⁵⁶. Dal 2007 al 2009 è stata condotta in tutto il Canada un'indagine per misurare i livelli di gas radon negli ambienti chiusi, ma gli alloggi ubicati nella riserva non sono stati specificatamente inclusi nell'indagine. Le due comunità delle Prime Nazioni che hanno partecipato allo studio non hanno un accesso stradale permanente tutto l'anno; in estate sono raggiungibili in aereo, mentre in inverno l'accesso è possibile tramite la strada del ghiaccio invernale per 2-3 mesi. Le famiglie partecipanti sono state informate mediante più eventi di ampia condivisione e anche dal gruppo di ricerca che ha somministrato porta a porta un dépliant informativo (infografica) scritto in inglese, nella lingua locale e foneticamente.

La concentrazione media di radon indoor è risultata pari a 174.7 Bq m^{-3} ; quarantadue case (21%) nello studio hanno presentato livelli di radon pari o superiori a 200 Bq m^{-3} e sette (16,6%) di quelle case, tutte localizzate in una delle due comunità, livelli superiori a 600 Bq m^{-3} . Questo studio non ha identificato alcuna caratteristica specifica delle case che fosse associata ai maggiori livelli di radon, ma in un recente

⁵⁴ Health Canada, (2017). Guide for Radon Measurements in Residential Dwellings (Homes).

⁵⁵ Lantz, P.M., et al., 2013. Radon, smoking, and lung cancer: the need to refocus radon control policy. *Am. J. Public Health* 103 (3), 443–447.

⁵⁶ Teras, L.R., et al., 2016. Residential radon exposure and risk of incident hematologic malignancies in the Cancer Prevention Study-II Nutrition Cohort. *Environ. Res.* 148, 46–54.

studio condotto ad Alberta⁵⁷, le case costruite nel 1992 o successivamente avevano livelli di radon più alti rispetto alle case più vecchie. Ciò può riguardare metodi di costruzione più moderni che possono comportare una riduzione della perdita di calore e del ricambio d'aria. La maggior parte delle abitazioni indagate nelle due comunità aveva intercapedini con pavimenti in terra/sabbia sigillati con una membrana di polietilene la cui integrità non è stata studiata in tutte le abitazioni, ma sono stati osservati in alcuni casi strappi che sono stati ispezionati visivamente. Tali strappi o aree non sigillate potrebbero consentire infiltrazioni di radon nelle zone giorno della casa. Le condizioni inadeguate degli alloggi nelle remote comunità delle Prime Nazioni settentrionali possono inoltre, favorire la trasmissione di malattie infettive e lo sviluppo di patologie polmonari croniche. La mancanza di un'adeguata ventilazione, la cattiva qualità dell'aria e il sovraffollamento sono fattori che contribuiscono all'insorgenza di tubercolosi, influenza, allergie e altre condizioni respiratorie. L'affollamento non è un fattore di rischio per lo sviluppo del cancro, tuttavia in una casa con alti livelli di gas radon il numero di persone esposte è potenzialmente superiore a quello delle aree urbane del Manitoba. Le case testate in una delle due comunità avevano un livello medio di radon significativamente più alto rispetto a quelle dell'altra comunità, probabilmente per la presenza di uranio nel sottosuolo. Al momento della pubblicazione dello studio sono in corso misure per risanare le case che hanno registrato livelli di radon pari o superiori a 200 Bq m⁻³ e oltre 600 Bq m⁻³. Secondo gli autori, è necessario comunicare e condividere le conoscenze sul radon, utilizzando tutti i mezzi disponibili: media e eventi locali (radio locale, feste/raduni), lingua locale e disporre di programmi di certificazione del radon specifici per gli alloggi delle comunità della Prima Nazione.

Do Nascimento Santos *et al.* (2022) hanno indagato la concentrazione di radon indoor in Brasile in abitazioni e in ambienti lavorativi, selezionati secondo eventi radioattivi naturali. In questo Paese gli studi relativi al radon negli ambienti indoor sono stati sviluppati dagli anni '90 con un focus sul monitoraggio delle abitazioni in diverse regioni, le cui medie aritmetiche erano al di sopra del limite di riferimento stabilito dall'OMS (2009)⁵⁸. Secondo il National Cancer Institute, in Brasile nel 2018-2019 (INCA, 2021⁵⁹), più di trentunomila persone sono state vittime di cancro ai polmoni, di cui il 10% a causa dell'esposizione al radon. Lo studio di do Nascimento Santos *et al.* (2022) si è concentrato su alcuni comuni negli stati di Paraíba e Rio Grande do Norte (nel nord-est del Paese), su un'area territoriale di circa 2.523,69 km² occupata da una popolazione totale di 64.293 abitanti e un totale di 60 punti di

⁵⁷ Stanley, F.K., et al., 2017. Comprehensive survey of household radon gas levels and risk factors in southern Alberta. *CMAJ Open* 5 (1), E255–E264.

⁵⁸ WHO, 2009. World Health Organization. Handbook on Indoor Radon, a Public Health Perspective. Hajo Zeeb and Ferid Shannoun, Geneva, p. 94

⁵⁹ INCA, 2021. Instituto Nacional de Câncer José de Alencar Gomes da Silva. Estimativa dos novos casos de câncer no Brasil para 2020. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/>. acesso em 17 de outubro de 2021.

campionamento. In questi comuni si verificano anomalie naturali dell'uranio associate ai processi di estrazione mineraria, una delle principali attività economiche di questi comuni. Le misure sono state effettuate utilizzando dosimetria passiva con α Espec-222, una variante con standardizzazione e realizzazione di una camera di diffusione dell'aria, a cui è stato aggiunto SSNTD tipo CR-39⁶⁰. Il periodo di monitoraggio passivo è stato di otto mesi, tempo sufficiente per valutare l'influenza stagionale. Sono state ottenute concentrazioni da 26,91 a 316,35 Bq m⁻³, con una dose massima efficace di quasi 8 mSv y⁻¹. L'incidenza sulle famiglie supera, di quasi il 31%, la media ottenuta per gli ambienti occupazionali. I comuni di Paraíba, dove sono presenti affioramenti rocciosi con uranio, hanno presentato risultati più elevati, con una media di quasi 176 Bq m⁻³ e una dose efficace superiore a 4 mSv y⁻¹. L'applicazione dei fattori di occupazione individuale per gli ambienti di casa e di lavoro ha permesso di combinare i modelli dosimetrici, rendendo lo scenario più vicino alla reale esposizione degli individui che lavorano e risiedono nello stesso comune, con una risposta dosimetrica inferiore del 21,45% rispetto al modello utilizzato in tutto il mondo. I diversi scenari applicati hanno permesso di ampliare la radiometria degli ambienti, generando una banca dati che precede studi di impatti ambientali e radioecologici, per trovare soluzioni congiunte e condivise al fine di aumentare la sicurezza degli edifici e tutelare la salute pubblica.

Maggiori esposizioni al gas sono state riscontrate a causa del maggiore tempo trascorso all'interno degli edifici nel periodo della pandemia di Covid-19, il cui incremento di dose è stato pari al 25%. Considerando i limiti primari stabiliti dagli organismi di controllo, fino al 40% degli ambienti monitorati sono risultati al di sopra dei limiti raccomandati e dovrebbero, quindi, essere periodicamente monitorati per minimizzare gli impatti sugli abitanti di queste aree.

Conclusioni

Sebbene il radon nel suolo, nelle rocce e nella struttura delle fondazioni attorno all'edificio rappresenti la principale fonte di radon, le concentrazioni indoor negli ambienti di vita variano ampiamente a seconda delle formazioni geologiche sottostanti, ma anche della variabilità stagionale, delle condizioni meteorologiche, della struttura dell'edificio e dei materiali da costruzione utilizzati, della ventilazione e, più in generale, delle abitudini degli occupanti. La concentrazione di radon nell'aria indoor dipende anche dalla permeabilità del terreno e dall'ermeticità della struttura inerente alle fondazioni. Anche la presenza di crepe molto piccole nelle fondazioni e nelle pareti sotto il livello del suolo può dar luogo a significative infiltrazioni di radon nell'ambiente indoor. La letteratura scientifica presenta diversi studi riguardanti l'analisi della concentrazione di radon indoor in vari Paesi e Regioni, utilizzando

⁶⁰ Santos, J.M.N., Santos Junior, J.A., Amaral, R.S., Bezerra, M.B.C.F., Fernandes, T.S., Rojas, L.A.V., Fernandez, Z.H., Araíjo, E.E.N., Azevedo, A.J.1.A.R., Correia, F.L.B., Milàn, M.O., 2021. α Espec-222 as a variant to the radon monitoring method using a solid state nuclear track. Appl. Radiat. Isot. 8 (178), 109948.

misurazioni in situ. I risultati mostrano che oltre al tasso di ricambio dell'aria (velocità della ventilazione) interna, anche la temperatura e l'umidità relativa hanno effetti significativi sui livelli di radon negli edifici residenziali. L'unico modo corretto per conoscere i livelli di radon negli ambienti di vita è attraverso misurazioni dirette. Alcuni articoli hanno confrontato la concentrazione di radon indoor con i limiti specificati nelle normative applicate, alcuni hanno anche confrontato i risultati prima e dopo gli interventi di mitigazione. Altri studi evidenziano l'importanza della ventilazione sulla concentrazione di radon nell'aria indoor e altri ancora hanno studiato l'effetto dell'occupazione e dello stile di vita sulle concentrazioni di radon.

Alcuni autori suggeriscono che la correlazione tra substrato roccioso e concentrazione di radon può essere utilizzata per la previsione del rischio di radon, soprattutto per le regioni in cui sono disponibili poche misurazioni. A causa del gran numero di variabili che influenzano la concentrazione di radon indoor, la campagna sperimentale deve essere progettata correttamente. L'indagine sulle concentrazioni di radon indoor in un campione rappresentativo di abitazioni è una fase significativa dei programmi nazionali e regionali che si occupano dell'esposizione al radon della popolazione. I risultati dell'indagine sul radon indoor costituiscono la base per la strategia di protezione contro il radon e per misure di protezione efficaci, fornendo suggerimenti per la politica nazionale sul radon.

Anche se l'unico modo corretto per conoscere i livelli di radon nell'edificio è attraverso campagne sperimentali, si può affermare, tuttavia, che è possibile stimare l'influenza dei diversi fattori sulle variazioni della concentrazione indoor del radon mediante modelli previsionali. I modelli, infatti, sono sviluppati per tenere conto dei fattori principali che influiscono sulle concentrazioni di radon negli ambienti indoor come caratteristiche del suolo, materiali da costruzione, aria esterna, temperatura e ventilazione.

Bibliografia

Adelikhah Mohammademad, Imani Morteza, Hegedűs Miklós, Kovács Tibor, Modelling of indoor external and internal exposure due to different building materials containing NORMs in the vicinity of a HNBRA in Mahallat, Iran, *Heliyon* 8 (2022).

Akbari Keramatollah, Mahmoudi Jafar, Ghanbari Mahdi, Influence of indoor air conditions on radon concentration in a detached house, *Radiation Protection Dosimetry* (2013), Vol. 157, No. 2, pp. 291–297.

Banrón M.H., Elío J., Crowley Q.G., Using geogenic radon potential to assess radon priority area designation, a case study around Castleisland, Co. Kerry, Ireland, *Journal of Environmental Radioactivity* 251-252 (2022) 106956.

Baptista E, Pereira AJSC, Domingos FP, Sêco SLR. 2022. Radon and thoron concentrations in the southwest region of Angola: dose assessment and implications for risk mapping. *Environ Geochem Health*. doi: 10.1007/s10653-022-01226-8.

Clouvas A., Xanthos S., Kolovou M., Potiriadis C., Takoudis G. and Guilhot J., Follow-up study of indoor radon in Greek buildings, *Radiation Protection Dosimetry* (2013), Vol. 157, No. 2, pp. 291–297.

Cucoş Dinu Alexandra, Cosma Constantin, Dicu Tiberius, Begy Robert, Moldovan Mircea, Papp Botond, Niţă Dan, Burghel Bety, Sainz Carlos, (2012), Thorough investigations on indoor radon in Băiţa radon-prone area (Romania), *Science of the Total Environment* 431 (2012) 78–83.

Curado António, Silva João, Carvalho Lúcia, Lopes Sérgio I., Indoor Radon concentration assessment in a set of single-family houses: case study held in Barcelos, North of Portugal, *Energy Procedia* 136 (2017) 109-114.

do Nascimento Santos Josineide Marques, José Araújo Dos Santos Júnior, Romilton Dos Santos Amaral, Zahily Herrero Fernández, Mariana Brayner Cavalcanti Freire Bezerra, Filipe Lopes de Barros Correia, Eduardo Eudes Nóbrega Araújo, Cassya Regina Pereira Guimarães, Maria Rita Silva Araújo, Nilson Vicente da Silva Medeiros, Marcela Ferreira Marques de Oliveira, Influx of radioactive gas in norm occurrences in Northeastern Brazil, *Applied Radiation and Isotopes* Volume 187, September 2022, 110319.

Jelle Bjørn Petter, (2012), Development of a model for radon concentration in indoor air, *Science of the Total Environment* 416 (2012) 343–350.

Kourtidis K., Georgoulis A.K., Vlahopoulou M., Tsirliganis N., Kastelis N., Ouzounis K., Kazakis N., Radon and radioactivity at a town overlying Uranium ores in northern Greece, *Journal of Environmental Radioactivity* 150 (2015) 220-227.

Larcombe Linda, Warkentin Pam, Singer Matthew, Denechezhe Simon, Dantouze Joe, Yassie Evan, Bussidor Jason, Dolovich Casandra, Orr Pamela, Radon gas

concentrations in on-reserve housing in two northern Manitoba First Nation communities, *Wellbeing, Space and Society* 3 (2022) 100090.

Müllerová Monika, Kozak Krzysztof, Kovács Tibor, Smetanová Iveta, Csordás Anita, Grzadziel Dominik, Holý Karol, Mazur Jadwiga, Moravcsík Attila, Neznal Martin, Neznal Matej, Indoor radon survey in Visegrad countries, *Appl Radiat Isot.* 2016 Apr;110:124-128.

Müllerová M., Kozak K., Kovács T., Csordás A., D Grzadziel., Holý K., Mazur J., Moravcsík A., Neznal M., Neznal M. and Smetanová I., Preliminary results of indoor radon survey in V4 countries, *Radiation Protection Dosimetry* (2014), pp. 1–4.

Olsthoorn Bart, Rönnqvist Tryggve, Lau Cheuk, Rajasekaran Sanguthevar, Persson Tomas, Månsson Martin, Balatsky Alexander V. 2022. Indoor radon exposure and its correlation with the radiometric map of uranium in Sweden, *Science of The Total Environment*, Volume 811. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151406>.

Oni Olatunde Michael, Aremu Abraham Adewale, Oladapo Olukunle Olaonipekun, Agboluaje Babatunde Azeez, Fajemiroye Joseph Ademola, Artificial neural network modeling of meteorological and geological influences on indoor radon concentration in selected tertiary institutions in Southwestern Nigeria, *Journal of Environmental Radioactivity* 2022 Oct;251-252:106933.

Papp Botond, Cucos Dinu Alexandra, Cosma Constantin, A comprehensive study of residential, geogenic and water radon in the North area of Mureş county, Romania, *Radiation Protection Dosimetry* (2017), pp. 1–7.

Park Ji Hyun, Whang Sungim, Lee Hyun Young, Lee Cheol-Min, Ryong Kang Dae, Measurement and modeling of indoor radon concentrations in residential buildings, *Environ Health Toxicol.* 2018 Jan 8;33(1).

Rafique M., Rahman S. U., Matiullah, (2012), Exposure of population from residential radon: a case study for district Hattian, Azad Kashmir, Sub-Himalayas, Pakistan, *Radiation Protection Dosimetry* (2012), Vol. 152, No. 1–3, pp. 98 –103.

Silva Ana Sofa, Dinis Maria de Lurdes, Assessment of indoor radon concentration and time-series analysis of gamma dose rate in three thermal spas from Portugal, *Environ Monit Assess* (2022) 194: 611.

Soldati G, Galli G, Piersanti A, Cannelli V., 2022. Multi-level continuous monitoring of indoor radon activity. *Environ Radioact.* 2022 Sep;250:106919. doi: 10.1016/j.jenvrad.2022.106919. Epub 2022 May 27. PMID: 35636067

Valmari T., Arvela H., Reisbacka H., Holmgren O., Radon measurement and mitigation activity in Finland, *Radiation Protection Dosimetry* (2014), Vol. 160, No. 1–3, pp. 18 – 21.

Vukotic Perko, Stojanovska Zdenka, Antovic Nevenka, Developing a method for predicting radon concentrations above a reference level in new montenegrin buildings, *Journal of Environmental Radioactivity* 227 (2021) 106500.

Vukotic Perko, Zekic Ranko, Andjelic Tomislav, Svrkota Nikola, Djurovic Andrija e Dlabac Aleksandar, Radon on the ground floor in the buildings of pre-university education in Montenegro, *NUKLEONIKA* 2020;65(2):53-58.

Vukotic Perko, Antovic Nevenka, Djurovic Andrija, Zekic Ranko, Svrkota Nikola, Andjelic Tomislav, Svrkota Ranko, Mrdak Radivoje, Bjelica Natasa, Djurovic Tamara, Dlabac Aleksandar, Bogicevic Marija, Radon survey in Montenegro – A base to set national radon reference and “urgent action” level, *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 196, January 2019, Pages 232-239. (a)

Vukotic Perko, Antovic Nevenka Zekic, Ranko, Svrkota Nikola, Andjelic Tomislav, Svrkota Ranko, Mrdak Radivoje, Djurovic Andrija, Dlabac Aleksandar, Bjelica Natasa, Djurovic Tamara, Bogicevic Marija, Main findings from radon indoor survey in Montenegro, *Radiation Protection Dosimetry* (2019), pp. 1–16. (b)

Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A., Zhukovsky M., Reconstruction of national distribution of indoor radon concentration in Russia using results of regional indoor radon measurement programs, *Journal of Environmental Radioactivity* 150 (2015) 99-103.

Wang Hao, Zhang Lei, Gao Peng, Guo Qiuju, A pilot survey on indoor radon concentration in Beijing, *Radiation Medicine and Protection* 3 (2022) 22–25.

Žunić Z.S., Ujić P., Nađđerđ L., Yarmoshenko I.V., Radanović S.B., Komatina Petrović S., Čeliković I., Komatina M., Bossew P., High variability of indoor radon concentrations in uraniumiferous bedrock areas in the Balkan region, *Applied Radiation and Isotopes* 94 (2014) 328–337.

3.2.3 Radon ed efficientamento energetico

Introduzione

Le concentrazioni di radon negli edifici dipendono da diversi fattori come la quantità di uranio nelle rocce e nei suoli sottostanti, la permeabilità dei suoli, la presenza di fessurazioni nel suolo che favoriscono l'infiltrazione negli edifici e il tasso di scambio di aria tra interno ed esterno. L'infiltrazione e la diffusione del radon dal suolo all'aria interna sono provocate dalla pressione differenziale causata dalla differenza di temperatura tra l'aria esterna e l'aria interna, che a sua volta è significativamente influenzata dal grado di tenuta dell'involucro dell'edificio. Una ricerca (Collignan *et*

al., 2016) sostiene che i più importanti parametri che influenzano la concentrazione indoor di radon sono:

- la natura del terreno e la sua permeabilità;
- la presenza di fessure nel suolo;
- le caratteristiche dell'edificio (la tipologia di fondazioni e il tasso di ventilazione).

Inoltre, gli autori hanno sottolineato che il miglioramento dell'ermeticità dell'involucro edilizio si riferisce principalmente alla parte dell'involucro dell'abitazione che si trova sopra il pavimento. Il pavimento a contatto con il suolo non è generalmente incluso. Quindi i differenziali di pressione tra l'interno e l'esterno potrebbero essere accentuati e aumentare l'infiltrazione di radon nell'abitazione attraverso il pavimento. Considerando questo fenomeno, insieme a una possibile riduzione del tasso di ventilazione, si possono prevedere concentrazioni interne di radon più elevate negli edifici sottoposti a interventi di riqualificazione energetica.

Le concentrazioni elevate di radon nell'aria indoor sono normalmente causate dal flusso convettivo di aria del suolo contenente radon (Arvela *et al.*, 2014). A causa dell'alta concentrazione di radon nel suolo, tipicamente 20.000-50.000 Bq m⁻³, anche flussi d'aria di ingresso molto bassi (0,1-1 m³ h⁻¹; 0,03-0,3 l s⁻¹) possono aumentare le concentrazioni di radon in ambienti chiusi al di sopra dei livelli di azione di 200-400 Bq m⁻³.

L'Unione europea (UE) ha fissato l'obiettivo per le nuove costruzioni nel 2002 nell'ambito della direttiva sul rendimento energetico degli Edifici (EPBD).

I prodotti e i materiali da costruzione, così come le tecnologie edilizie utilizzate attualmente nelle economie di costruzione sviluppate, creano complessi microambienti radiochimici di vita.

È stato dimostrato in numerosi studi epidemiologici che l'inquinamento dell'aria esterna sia un fattore di rischio per la salute, così anche la qualità dell'aria interna può determinare rischi per la salute pubblica, soprattutto in quanto il tempo trascorso in ambienti chiusi è di circa l'80%. I gas pericolosi, le particelle e le fibre che vengono continuamente emessi a temperatura ambiente da alcuni materiali da costruzione e da arredo possono influenzare la qualità dell'aria interna. Oltre all'esposizione al radon indoor, alcuni prodotti da costruzione utilizzati in edilizia, contenenti radionuclidi, possono aumentare l'esposizione interna a radiazioni ionizzanti.

Ad oggi per la realizzazione di edifici sostenibili vengono utilizzati materiali isolanti sia per la riduzione dell'inquinamento acustico che dei consumi energetici da raffrescamento e riscaldamento. L'isolamento termico degli edifici se non associato ad una adeguata ventilazione meccanica/naturale, potrebbe compromettere la qualità dell'aria interna, determinando un incremento della radiazione naturale di

fondo, proveniente anche dagli stessi componenti dei prodotti da costruzione, causando così diversi problemi di salute.

Altre attività, abitudini e stili di vita nelle abitazioni, come l'uso di prodotti per la casa e il fumo di tabacco, potrebbero accrescere le concentrazioni di agenti pericolosi nell'ambiente indoor.

Stato dell'arte

Fucic *et al.* (2011) hanno effettuato uno studio con lo scopo di dare una visione del microambiente determinato dai prodotti da costruzione attualmente utilizzati e tecnologie di costruzione comuni nell'edilizia. Radon indoor, cenere volante, nanoparticelle, zircone e additivi per calcestruzzo sono materiali da costruzione analizzati per il loro potenziale impatto sulla salute umana. I composti organici volatili (VOC) emessi dai rivestimenti di finitura e dall'arredamento degli edifici non sono stati inclusi, ma solo descritti in relazione ai prodotti da costruzione. I risultati dello studio possono essere utilizzati come indicazioni di base e possano fornire suggerimenti per la scelta dei materiali nell'edilizia sia di tipo economico, strutturale, acustico ed energetico, ma anche di tipo sanitario.

Poiché il radon è nove volte più pesante dell'aria, i bambini respirano l'aria più vicino al pavimento e con una frequenza maggiore per massa corporea, sono quindi più esposti al radon rispetto agli adulti. Le raccomandazioni dovrebbero essere più specifiche o i livelli consentiti dovrebbero essere più bassi per le case con bambini.

Oltre ai livelli di radon nel suolo, altri parametri come il clima hanno un impatto sull'invecchiamento del calcestruzzo, che può aumentare o diminuire il flusso di radon. Le concentrazioni di radon indoor possono dipendere anche dal materiale da costruzione, ad esempio si sono registrati livelli di radon più alti negli appartamenti di cemento che in case unifamiliari fabbricate con altri materiali.

L'utilizzo del granito come materiale decorativo nelle case ha suscitato interesse nella stima delle sue emissioni di radon. L'origine geologica del granito ha un impatto significativo sul livello di radiazioni emesse. Come aggregato, il granito è utilizzato anche nella produzione di calcestruzzo. Le misurazioni delle emissioni di radon mostrano che i valori più alti possono essere rilevati nei graniti del Brasile. In alcune aree come Egitto, la radioattività più alta è stata riscontrata anche nei marmi.

Le polveri di carbone utilizzate per la fabbricazione dei mattoni possono contenere elementi radioattivi come l'uranio (235U, 238U), torio (232Th) e potassio (40K) e possono essere responsabili dell'esposizione alle radiazioni della popolazione. Tuttavia, non esiste un programma europeo che dia una stima dell'esposizione della popolazione in Europa alle radiazioni da prodotti da costruzione.

I prodotti da costruzione contenenti ceneri volanti sono riconosciuti dalla Direzione della Commissione europea per la protezione dalle radiazioni come possibili fonti di

radioattività [European Commission, 1999]. In alcuni paesi come Israele, Finlandia e Danimarca, le norme nazionali definiscono la dose efficace annuale di 0,3 mSv per tutte le vie di esposizione alle radiazioni che provengono da materiali da costruzione.

I livelli indoor di radon sono più alti nelle case costruite con mattoni contenenti ceneri volanti che in case di calcestruzzo contenente ceneri volanti. I mattoni di cenere volante possono raggiungere una radioattività di 300 Bq/kg di ^{226}Ra a seconda dell'origine del carbone. Le attività del radon nelle case costruite con cenere volante e scorie nel periodo dal 1850 al 1930 variava da 55 a 426 Bq m⁻³ all'anno, mentre in edifici più recenti, dove non erano utilizzate ceneri e scorie, la radioattività era inferiore (tra 16 e 67 Bq m⁻³).

Quindi bisogna considerare oltre all'esposizione alle radiazioni ionizzanti presenti in natura, le ceneri volanti, che possono contenere alti livelli di radionuclidi. Queste sono utilizzate nella produzione di cemento e mattoni per ridurre la produzione dei rifiuti. Le ceneri volanti possono essere una fonte importante di radioattività interna, che può essere particolarmente pericolosa in aree con elevati livelli di radon nel suolo. In tali aree l'utilizzo di ceneri volanti dovrebbe essere strettamente controllato. I progressi tecnologici nella produzione di calcestruzzi di alta qualità, che hanno permesso la sostituzione di un'alta percentuale di cemento con le ceneri volanti, devono essere regolamentati con misurazioni del livello di radiazione.

La possibilità tecnica e tecnologica di utilizzare rifiuti come prodotto da costruzione non deve esimersi da un'attenta valutazione poiché alcuni materiali di scarto possono essere fonti di contaminazione interna.

Emissione di additivi dal cemento e da altri prodotti da costruzione che migliorano la stabilità dell'edificio, la durata dei materiali o le loro caratteristiche legate all'isolamento termico e acustico dovrebbero essere associate alle misurazioni dei contaminanti nei materiali utilizzati per finitura e arredamento di interni.

A seguito del possibile ruolo che il risparmio energetico potrebbe avere nell'alterare la qualità dell'aria indoor, conseguente ad una significativa riduzione del tasso di ricambio dell'aria, Froňka & Jílek (2014) hanno condotto uno studio per analizzare, non solo, l'alterazione del tasso di ricambio di aria (ACH), ma in particolare il tasso di ingresso del radon (RER) nell'ambiente indoor, sia in abitazioni che in edifici pubblici come le scuole e gli asili.

Per la misurazione della prima (ACH) è stata utilizzata, negli edifici selezionati per la campagna di ricerca, la tecnica di misurazione del gas tracciante (N₂O) e il RER di massa.

Le dinamiche di RER e ACH sono influenzate sia da fattori legati all'edificio sia al sito.

Nella maggior parte dei casi, la fonte di radon dominante è stata identificata con il sottosuolo. Comportamenti diversi del RER possono essere osservati nel caso in cui il materiale da costruzione sia la principale fonte di concentrazione di radon, come conseguenza del tasso di esalazione del radon relativamente stabile dai materiali da

costruzione. Inoltre, le prestazioni delle misure preventive e correttive del radon, non importa se attive o passive, sono della massima importanza per la valutazione del RER, come il tipo di ventilazione: forzata, naturale, effetto camino e ventilazione guidata dal vento, a cui si aggiungono le caratteristiche del suolo dove è ubicato l'edificio, gli effetti di schermatura delle strutture e le caratteristiche del terreno nelle vicinanze.

Il funzionamento dei sistemi di riscaldamento, in particolare quelli a pavimento, è un importante fattore di influenza che deve essere attentamente considerato nell'interpretazione dei dati sul radon. Conducibilità delle strutture e capacità termica dell'edificio, influenzando i modelli di flusso d'aria attraverso l'involucro dell'edificio e all'interno dell'edificio stesso, hanno un impatto significativo sulle prestazioni di ventilazione e sulle dinamiche RER.

In linea di principio, l'aumento della concentrazione media di radon in ambienti chiusi successivo agli interventi di retrofit energetico non può essere semplificato utilizzando l'ACH come unica variabile esplicativa per la descrizione di questo fenomeno. L'effetto delle tecnologie ad alta efficienza energetica sulla concentrazione interna di radon è notevolmente complesso, e l'impatto sulla alterazione del RER deve essere adeguatamente valutato. Sono state effettuate campagne di misurazione della durata di 7 giorni, per dimostrare l'effetto variabile della differenza di temperatura interna ed esterna sull'ingresso del radon e la dinamica dell'ACH.

Dal 2008, sono state effettuate una serie di diagnosi complete del radon su edifici nuovi ed esistenti, principalmente focalizzate sulle misure preventive e correttive del radon. Il ruolo significativo del retrofit energetico sulla concentrazione interna di radon è stato osservato e ben documentato. In generale, le misurazioni del tasso di ventilazione (ACH) hanno confermato la diminuzione dell'areazione degli edifici esistenti dopo la ristrutturazione orientata all'efficienza energetica dell'edificio. L'ACH medio nelle abitazioni non occupate è risultato essere al di sotto del livello di 0,1 h⁻¹, valore insufficiente a garantire una adeguata qualità dell'aria indoor. Gli interventi di riqualificazione energetica, che tendono a conformarsi ai requisiti standard dei nuovi edifici, possono essere ulteriormente controproducenti negli edifici esistenti. Inoltre, i locali tecnici che raggruppano le attrezzature per i servizi centralizzati negli edifici come i sistemi HVAC, l'acqua e le forniture di gas ed elettricità sono stati spesso riconosciuti come la principale via di ingresso del radon a causa delle infiltrazioni e delle condizioni specifiche del campo di pressione.

Jiránek & Kačmaříková (2014) hanno studiato l'influenza delle misure di risparmio energetico sulla concentrazione interna di radon in una casa prefabbricata, del 1975, fatta di pannelli murali in cemento clinker contenenti da 1000 fino a 4000 Bq kg⁻¹ di ²²⁶Ra.

Le misure applicate per ridurre la perdita di calore aumentano la tenuta all'aria dell'involucro dell'edificio. Tali misure includono l'installazione del sistema composito

di isolamento termico esterno (ETICS) sulle pareti esterne, l'aumento dello spessore dell'isolamento termico nelle strutture del tetto, aggiungendo l'isolamento termico del soffitto sotto i solai o sopra le cantine, e la sostituzione di finestre e porte d'ingresso. Come conseguenza dell'aumento dell'ermeticità, la ventilazione della casa si riduce, e questo può avere un effetto negativo sulla qualità dell'aria dell'ambiente interno. I risultati hanno mostrato, infatti, come gli interventi sono stati causa dell'aumento della concentrazione interna di radon di 3,4 volte, da 337 a 1117 Bq m⁻³. Tale incremento non è riconducibile al tasso di esalazione del radon più elevato, ma è dovuto principalmente alla diminuzione della ventilazione. Questo potrebbe comportare anche un aumento del rischio aggiuntivo del 125% di cancro ai polmoni negli edifici sottoposti a riqualificazione energetica.

Gli edifici a basso consumo energetico hanno $E_{A}^{61} < 50$ kWh m⁻² a⁻¹ e le case passive hanno un valore di $E_{A} < 20$ kWh m⁻² a⁻¹. Il valore E_{A} della casa studiata era 6,2 volte più alto prima del retrofit termico rispetto al valore delle case a basso consumo energetico, e da 2,2 a 2,7 volte più alto dopo l'adeguamento termico. Dopo l'implementazione delle misure di risparmio energetico, il fabbisogno annuo totale di energia per il riscaldamento è diminuito da 47,7 a 16,9 MWh, con un risparmio energetico annuale di 30,8 MWh.

Inoltre, gli autori sottolineano l'importanza della selezione di un sistema di ventilazione che consideri i costi a lungo termine per l'installazione, il funzionamento e la manutenzione del sistema e riscaldamento supplementare della casa.

In conclusione, le misure di risparmio energetico sono in molti casi responsabili di una sostanziale diminuzione del tasso di ventilazione, che può diminuire fino a 3 o 4 volte, con un incremento proporzionale della concentrazione di radon; superando i valori di riferimento raccomandati da OMS, ICRP, IAEA e dagli organismi nazionali di regolamentazione. Quando si convertono edifici esistenti in edifici ad alta efficienza energetica, l'equilibrio tra il risparmio energetico e la qualità dell'ambiente interno è quindi un fattore che deve essere preso in considerazione.

La ricerca di Arvela *et al.* (2014) è nata all'interno del progetto RADPAR WP6, che mirava alla valutazione delle tecnologie inerenti, la mitigazione del radon compresa la relazione tra risparmio energetico negli edifici e l'esposizione al radon. Lo studio si è svolto in Finlandia e si è posto due obiettivi principali: esaminare la differenza di pressione tra indoor e outdoor, ed esplorare le conseguenze dell'ermeticità degli edifici sulla qualità dell'aria e sulle differenze di pressione che influenzano la concentrazione di radon nelle case con diverse strategie di ventilazione.

A causa delle richieste di risparmio energetico, a seguito della direttiva sul rendimento energetico degli Edifici (EPBD) del 2002, l'implementazione di

⁶¹ Specific Annual Energy need for heating = fabbisogno annuo totale di energia per il riscaldamento

ventilazione meccanica con recupero di calore (MSEV⁶²) è diventata una pratica consueta nei paesi dell'UE. In Finlandia, tutte le nuove costruzioni sono attualmente dotate di MSEV.

Lo scambio d'aria in un edificio comprende l'infiltrazione e la ventilazione forzata. Il concetto di infiltrazione è usato per il flusso involontario di aria esterna in un edificio, mentre nella ventilazione forzata si usano ventilatori di scarico e/o ventilatori di alimentazione. Nelle case progettate con ventilazione naturale (NAV⁶³) sono utilizzati sia il flusso involontario, sia il flusso attraverso i condotti intenzionali. La differenza di pressione che guida sia l'infiltrazione d'aria nell'edificio che il flusso di aria dal suolo contenente radon è determinata da tre effetti principali: l'effetto camino (creato dalle differenze di densità dell'aria all'interno dell'edificio e nell'aria esterna); la ventilazione meccanica; il vento.

Gli studi condotti all'Università di Tecnologia di Tampere e all'Università di Aalto a Espoo e al Centro di ricerca tecnica della Finlandia hanno incluso la misurazione della differenza di pressione attraverso l'involucro dell'edificio, della temperatura, del tasso di scambio dell'aria e del ACH50⁶⁴. L'impatto delle strategie di ventilazione sulla concentrazione di radon è stato valutato teoricamente attraverso un'analisi che ha preso in considerazione l'altezza e il volume della casa, la differenza di pressione naturale e l'infiltrazione e il tasso di ventilazione meccanica osservato in Finlandia, così come i valori ACH50 osservati e le differenze di pressione risultanti nelle case con NAV, MEV⁶⁵ e MSEV.

Le conclusioni a cui giungono gli autori possono essere riassunte come segue. Prima di tutto, le misure che riducono lo scambio d'aria negli edifici aumentano la concentrazione interna di radon. Per la prevenzione del radon, negli edifici a basso consumo energetico, è necessario porre attenzione alla tenuta d'aria dei pavimenti e alle fondazioni degli edifici.

⁶² MSEV: Ventilazione meccanica di alimentazione e scarico con recupero di calore. Questa è anche chiamata ventilazione bilanciata nel caso in cui le portate d'aria di alimentazione e di scarico sono in equilibrio. Tipicamente, il sistema fornisce aria fresca a camere da letto e salotti dove le persone passano più tempo e scarica l'aria dalla cucina e dai bagni. Nei climi freddi il sistema è dotato di recupero di calore.

⁶³ NAV: Ventilazione naturale. Lo scambio d'aria avviene attraverso fessure, crepe e altre aperture non artificiali e condotti e sfiati intenzionali. La forza motrice è la differenza di pressione dovuta al vento e alla differenza di temperatura interna ed esterna.

⁶⁴ Per l'ermeticità nelle case passive, il requisito minimo è un ACH50 non superiore a 0.6 vol/h. Ciò significa che in presenza di un differenziale di pressione pari a 50 pascal, serve un'ora per avere il 60 % di ricambio d'aria all'interno di un edificio.

(<https://www.e->

[genius.at/fileadmin/user_upload/lernfelder/energieeffiziente_gebaeudekonzepte/alt/it/web/come_pianificare_lo_strato_di_tenuta_allaria.html](https://www.e-genius.at/fileadmin/user_upload/lernfelder/energieeffiziente_gebaeudekonzepte/alt/it/web/come_pianificare_lo_strato_di_tenuta_allaria.html))

⁶⁵ MEV: Ventilazione meccanica controllata a scarico (definita VMC in Italia). Un ventilatore è usato per estrarre l'aria interna da una casa, tipicamente dai bagni. L'aria fresca si infiltra attraverso le perdite nell'involucro dell'edificio e attraverso gli sfiati passivi intenzionali.

Nel caso di edifici ermetici, le differenze di pressione causate dalla ventilazione meccanica hanno un ruolo importante, oltre al tasso di ricambio dell'aria. L'interazione tra ventilazione meccanica e sigillatura dell'edificio può comportare un incremento della differenza di pressione negli edifici favorendo un incremento delle concentrazioni di radon indoor. Anche la presenza di fessurazioni nelle fondazioni può influenzare la concentrazione di radon.

Stime analitiche semplificate e confronto della concentrazione di radon nelle case con diverse strategie di ventilazione hanno rilevato che i livelli di radon nelle case MEV sono vicini a quelli in case con NAV. Nelle case MSEV, le concentrazioni di radon sono più basse, con una differenza del 30%, poiché permettono di controllare la differenza di pressione. Nelle nuove case MSEV con un ACH50 di 0,6 h⁻¹ le stime analitiche prevedono un aumento del 100% della concentrazione di radon rispetto alle case più vecchie con un ACH50 di 4,0 h⁻¹.

I risultati hanno dimostrato che nelle tipiche case finlandesi a due piani con NAV e MEV, le concentrazioni di radon sono inferiori del 30% rispetto alle case con un solo piano. Nelle case con MSEV, l'effetto del numero di piani sulla concentrazione è inferiore. Questi effetti derivano dall'interazione tra la geometria della casa, il volume, le differenze di pressione e scambio d'aria.

Dal 2004, i nuovi requisiti energetici hanno obbligato i costruttori a implementare la ventilazione meccanica con recupero di calore. Questo ha portato a differenze di pressione dell'aria molto più basse, tipicamente 2-6 Pa e in riduzioni importanti delle concentrazioni di radon.

Dopo l'identificazione, nel 1995, dei requisiti per la costruzione di edifici efficienti dal punto di vista energetico in Russia, è diventato importante monitorare i livelli di concentrazione di radon indoor nelle abitazioni, dato che, oltre all'effettiva riduzione della permeabilità all'aria dell'involucro edilizio, l'applicazione di tali tecnologie ha come conseguenze una diminuzione del tasso di scambio d'aria e un aumento dell'accumulo di radon. Yarmoshenko *et al.* 2014 hanno condotto uno studio per indagare il problema del radon interno in sette edifici moderni, costruiti dopo il 2000, a Ekaterinburg, in Russia. Le misurazioni delle concentrazioni interne di radon sono state eseguite, dal 2009 al 2013, con il rilevatore di radon AlphaGUARD installato nel soggiorno per sei mesi, così da coprire le variazioni stagionali. Oltre alla concentrazione di radon, è stata registrata anche la temperatura interna. La temperatura esterna necessaria per la stima della dipendenza del livello di radon dalle differenze di temperatura interna/esterna è stata ricavata dai dati meteorologiche ufficiali. Inoltre, l'analisi delle serie temporali della concentrazione di radon ottenute, comprendeva la stima dei tassi di ingresso del radon, i tassi di scambio dell'aria, il contributo dei tassi di ingresso diffusivo e convettivo e della concentrazione effettiva di ²²⁶Ra nei materiali da costruzione.

I risultati riportano i seguenti elementi principali:

La media delle concentrazioni di radon indoor ricade nell'intervallo 48-203 Bq m⁻³. Con questa ricerca gli autori mostrano come i livelli di concentrazione siano aumentati nei sette edifici ad alta efficienza energetica che hanno fatto registrare un valore medio di 133 Bq m⁻³, rispetto agli edifici costruiti tra gli anni 1970 e 1980, dove la media, nel 90% delle abitazioni di questo gruppo, non ha superato il livello 70 Bq m⁻³.

Il contenuto di ²²⁶Ra non causa l'aumento della concentrazione di radon negli edifici ad alta efficienza energetica rispetto a quelli costruiti in precedenza (la radioattività dei materiali da costruzione è sotto controllo in Russia dal 1989).

L'alta concentrazione di radon indoor e l'alto contributo dell'ingresso del radon per diffusione negli edifici studiati sono causati dalla bassa permeabilità dell'involucro dell'edificio e da un basso tasso di scambio d'aria.

Nel corso del tempo, la maggiore concentrazione di radon all'interno degli edifici moderni ad alta efficienza energetica rispetto agli edifici ad alta permeabilità costruiti in precedenza, potrebbe comportare un incremento dell'esposizione media della popolazione.

Milner *et al.* (2014) nel loro studio hanno focalizzato l'attenzione sull'impatto negativo dell'esposizione indoor al radon e sul rischio di cancro ai polmoni per la popolazione, come conseguenze degli interventi di efficienza energetica delle abitazioni, che possono non garantire una adeguata ventilazione delle abitazioni. La ricerca si è svolta in Inghilterra, dove nel 2008 è stato emanato il Climate Change Act, con il quale il governo britannico ha sancito per legge gli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra come impegno verso un'azione globale sul cambiamento climatico e il settore abitativo è centrale per il raggiungimento degli obiettivi governativi.

Gli autori ipotizzano uno scenario attuale e quattro scenari di mitigazioni futuri del parco immobiliare in Inghilterra:

- Scenario 1: isolamento termico dell'edificio non associato a sistemi di ventilazione meccanica;
- Scenario 2: isolamento termico associato a ventilazione meccanica (fori di ventilazione e ventilatori di estrazione); che assicurano una ventilazione mirata parzialmente compensativa;
- Scenario 3: isolamento termico associato a ventilazione meccanica e recupero di calore installati nel 20% di abitazioni a maggior tenuta d'aria (permeabilità $\leq 3 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{h}$; condizione in cui tali sistemi offrono una soluzione potenzialmente efficiente);
- Scenario 4: isolamento termico associato a ventilazione meccanica e recupero di calore, presumendo che nel 10% dei casi non siano adeguati o utilizzati in maniera appropriata per mantenere una corretta ventilazione.

Per ciascuno degli scenari attuale e futuri, gli autori hanno stimato la concentrazione di radon negli ambienti interni utilizzando il modello multizona convalidato, CONTAM.17 e hanno stimato le emissioni di gas serra.

Per stimare l'impatto sulla mortalità da cancro ai polmoni, attribuibile alle alterazioni delle concentrazioni di radon, gli autori hanno utilizzato il modello IOMLIFET,28 che raccoglie i dati della popolazione e i tassi di mortalità per tutte le cause e specifica per cancro ai polmoni dell'Inghilterra e del Galles.

I risultati riportano che nello scenario 1, i livelli di radon aumentano del 56,6% (da 21,2 Bq m⁻³ a 33,2 Bq m⁻³), determinando anche un incremento significativo delle abitazioni che superano i livelli raccomandati dal Public Health England Action Level (200 Bq m⁻³) e aumentando la percentuale di popolazione esposta (da 0,6% al 2,0%) a concentrazioni di radon superiori al livello d'azione. Nello scenario 2, l'aggiunta di una ventilazione specifica (che si presume funzioni correttamente nel 60% delle case) riduce l'aumento dei livelli di radon, ma non li riporta ai livelli attuali. Nello scenario 3 il numero di abitazioni con elevate concentrazioni di radon, e di conseguenza della popolazione esposta, sono ridotti in modo considerevole (in media 19, 6 Bq m⁻³). Nello scenario 4 che ipotizza una non efficienza del 10% dei sistemi di ventilazione si stima un modesto aumento dei livelli di radon (in media 21,8 Bq m⁻³).

Questo studio suggerisce che gli interventi di efficienza energetica che aumentano la tenuta d'aria delle abitazioni senza una ventilazione compensativa, ovvero che compensi la riduzione del tasso di ricambio, potrebbe determinare un incremento delle concentrazioni indoor di radon e l'esposizione della popolazione e del rischio attribuibile di cancro ai polmoni, circa 5000 anni di vita persi per cancro ai polmoni e fino a 278 morti in più ogni anno. Solo l'uso della ventilazione meccanica e del recupero di calore consente un miglioramento dell'efficienza energetica senza ulteriori oneri sanitari (cancro ai polmoni attribuibile al radon), a meno che gli scenari non siano associati ad adeguati interventi di bonifica al radon. L'eccesso di mortalità per cancro al polmone è stato riscontrato non solo nelle case con radon al di sopra del livello d'azione britannico di 200 Bq m⁻³ o anche del livello obiettivo di 100 Bq m⁻³, ma si verificherebbe nelle abitazioni esposte a livelli di radon ben al di sotto di quelli in cui la bonifica convenzionale è considerata economicamente efficace.

Gli autori concludono sostenendo che il radon è solo una delle diverse esposizioni ambientali che possono subire modifiche aumentando la tenuta d'aria delle abitazioni, alcune delle quali, tra cui il fumo di tabacco passivo e il particolato di origine indoor, possono essere influenzate negativamente, mentre altre, tra cui le temperature interne in inverno, possono essere migliorate. Ottimizzare le strategie di ventilazione per la salute è quindi più complesso se si prendono in considerazione tutte le esposizioni rilevanti. Tuttavia, la ricerca ha messo in evidenza i potenziali problemi che possono essere causati da misure di efficienza energetica che mirano alle perdite di calore da ventilazione incontrollata. Almeno per il radon, è necessaria cautela per assicurare che il perseguimento dell'efficienza energetica non aumenti il

carico di malattia nella popolazione nel suo complesso. Infine, hanno sottolineato come, tutte le forme di azione di mitigazione possono comportare impatti sia negativi che positivi sulla salute della popolazione e dovrebbero essere attentamente pianificate.

Ringer (2014) ha affrontato la questione delle concentrazioni di radon negli edifici e come queste sono influenzate dalle caratteristiche dell'edificio. Analizzando studi comparativi tra nuove abitazioni ad alta efficienza energetica e nuove abitazioni convenzionali, in Austria, Svizzera e Germania, l'autore ha mostrato come la combinazione di un involucro edilizio altamente ermetico e di un sistema di ventilazione meccanica possa assicurare in generale bassi livelli di radon interni (ad esempio i livelli di radon di circa 100 case passive⁶⁶ e a basso consumo energetico in Austria, è circa un terzo inferiore a quello delle nuove case convenzionali), ma dall'altra parte se gli interventi di efficientamento e di ventilazione meccanica non sono progettati, realizzati e mantenuti in maniera adeguata possono determinare aumenti nella concentrazione di radon indoor.

L'autore raccomanda quindi di ripetere le misurazioni delle concentrazioni di radon dopo modifiche sostanziali all'edificio o al sistema di ventilazione. L'adeguamento termico degli edifici esistenti potrebbe aumentare il livello di radon all'interno. L'impatto dell'adeguamento termico può essere molto diverso per singole abitazioni e deve quindi essere verificato per ogni singolo edificio. Si raccomanda di effettuare una misurazione del radon prima del retrofit termico e di includere semplici misure per il radon nel processo di ristrutturazione o - secondo il principio dell'ottimizzazione - di includere negli interventi semplici misure di mitigazione del radon; come ad esempio: l'impermeabilizzazione tra il seminterrato e lo spazio abitativo o l'installazione di un'apertura per l'aria nel seminterrato. I risultati di uno studio svizzero in cui 163 abitazioni sono state misurate prima e dopo gli interventi di retrofit termico, riportano un aumento medio del livello di radon del 26%. Tra le varie misure, quella che ha maggiore impatto sul livello interno di radon è stata la sostituzione delle finestre. Se il tasso di ricambio dell'aria si riduce notevolmente a causa del retrofit termico, allora l'installazione di un sistema di ventilazione meccanica è necessario per garantire una buona qualità dell'aria indoor. Infine, il posizionamento del materiale isolante sulle pareti esterne deve essere fatto seguendo i requisiti prescritti per evitare che il gas dal suolo salga nell'intercapedine tra il cappotto termico e il muro ed entri nell'edificio attraverso fessurazioni nell'involucro dell'edificio.

Gli scopi principali dello studio di Zhukovsky & Vasilyev (2014) sono di effettuare: le misurazioni delle concentrazioni del radon in edifici costruiti con tecnologie moderne;

⁶⁶ Casa Passiva (o Passivhaus) si riferisce specificamente allo Standard Internazionale della Casa Passiva come sviluppato, definito e amministrato dal Passive House Institute (PHI) di Darmstadt, Germania. Questo standard è uno degli elementi chiave per lo standard degli Edifici a Energia Quasi Zero (NZEB), concetto introdotto dalla direttiva sul rendimento energetico degli edifici (EPBD).

lo studio della dinamica di accumulo del radon a seconda delle condizioni climatiche e del regime di funzionamento degli edifici; test di laboratorio su materiali da costruzione e materie prime utilizzate nella costruzione di moderni edifici a Ekaterinburg; la modellazione del flusso di radon negli appartamenti sulla base delle misure di laboratorio e delle misurazioni sul campo.

Per indagare l'influenza delle moderne tecnologie di costruzione degli edifici sull'accumulo di radon indoor, sono stati selezionati edifici costruiti utilizzando prevalentemente cemento monolitico o blocchi di cemento aerato. Sono state selezionate 10 stanze per ogni tipo di edificio. Tutti gli edifici in questo studio sono stati costruiti dopo il 2000. Le misurazioni della concentrazione di radon sono state effettuate entro 2 mesi nella stagione autunnale (settembre-ottobre) utilizzando rivelatori di tracce a stato solido (LR-115). Le misurazioni sono state effettuate a intervalli di 1 ora utilizzando un monitor radon AlphaGUARD.

I risultati confermano l'ipotesi che le nuove tecnologie di costruzione possono influenzare i livelli di accumulo di radon nelle abitazioni, sia l'uso di materiali quali il calcestruzzo monolitico e le laste monolitiche, sia le tecniche moderne di sigillatura dell'involucro. Per quanto riguarda i livelli di radionuclidi naturali (incluso ^{226}Ra) nei materiali usati nella costruzione di edifici moderni anche se rispettano i requisiti normativi (i coefficienti di emanazione del radon per i materiali da costruzione sono 0,17 per il calcestruzzo monolitico e 0,22 per il calcestruzzo aerato), possono essere responsabili di un aumento delle concentrazioni indoor di radon se non associati ad una adeguata ventilazione.

Pressyanov *et al.* (2015) hanno condotto uno studio pilota in Bulgaria, utilizzando due CD (o DVD) di età diversa, per rilevare retrospettivamente i cambiamenti significativi dei livelli di radon indoor causati dalle ristrutturazioni. Il materiale policarbonato di cui sono fatti i CD/DVD ha un'alta capacità di assorbimento del radon. Quando un disco è esposto a ^{222}Rn , gli atomi di radon sono intrappolati sulla superficie del disco e penetrano in profondità. Per la lettura dell'incisione dei dischi è stata applicata una procedura di laboratorio standardizzata.

Gli autori hanno utilizzato un intervallo di confidenza del 95% per la stima delle incertezze dei dati, che dipendono dal tempo di esposizione dei dischi e dalle concentrazioni di radon prima e dopo la ristrutturazione.

Tutte le 20 stanze incluse nello studio avevano subito almeno la sostituzione delle finestre con serramenti ad alta efficienza energetica. Sedici delle camere erano al piano terra e 4 al primo piano. In 7 delle 20 stanze è stato osservato un significativo aumento della concentrazione di attività del radon, nelle 13 restanti non è stato rilevato alcun cambiamento significativo. In nessuna stanza è stata trovata una diminuzione significativa della concentrazione. In 5 delle stanze la concentrazione media di radon dopo la ricostruzione era superiore a 100 Bq m^{-3} (livello raccomandato dall'OMS).

Per quanto riguarda l'influenza della temperatura sull'assorbimento del radon in un CD/DVD, l'analisi ha rilevato che le differenze significative osservate potrebbero essere spiegate solo nel caso in cui l'aumento della temperatura media superasse i 20 °C, aumento non realistico nelle stanze abitate. Quindi, gli autori hanno concluso che probabilmente l'aumento dei livelli di radon sia legato agli interventi di efficientamento energetico.

In Russia dal 1995, sono stati stabiliti i requisiti per la costruzione di edifici efficienti dal punto di vista energetico e inseriti nei codici edilizi russi. Nei nuovi edifici, ad alta efficienza energetica, si è riscontrato un aumento delle concentrazioni di radon conseguenti ad una diminuzione del tasso di ventilazione. L'obiettivo principale dello studio di Vasilyev *et al.* (2015) è di sviluppare un metodo sperimentale per stimare i parametri di ingresso del radon nelle abitazioni urbane a più piani che rappresentano il principale tipo di abitazioni nelle città moderne russe. Sulla base di lavori precedenti, questo studio presenta un adattamento dei metodi per la stima dei parametri che determinano i livelli di concentrazione di radon in condizioni reali. I livelli di radon sono stati studiati in edifici moderni (costruiti dopo il 2000) con caratteristiche di costruzione rispondenti ai requisiti di alta efficienza energetica, ubicati nella città di Ekaterinburg, in Russia, attraverso misurazioni continue della concentrazione di radon e la determinazione del tasso di ventilazione per un periodo di almeno 6 mesi.

I risultati hanno registrato un aumento della concentrazione media di radon; da 42 Bq m⁻³ a 166 Bq m⁻³, probabilmente conseguente alla riduzione della media del tasso di ventilazione media nelle abitazioni urbane, dovuto alle misure messe in atto per aumentarne l'efficienza energetica.

Tra il 2011 e il 2014 l'organizzazione non governativa CLCV (Consommation, Logement et Cadre de Vie) ha organizzato una campagna di monitoraggio delle concentrazioni indoor di radon, in Bretagna (Francia) su un campione di circa 3400 abitazioni. Partendo dai dati raccolti Collignan *et al.* (2016) hanno valutato l'influenza dell'adeguamento termico e di altre caratteristiche dell'edificio sulla concentrazione indoor di radon, anche alla luce dei risultati già disponibili in letteratura, che dimostravano una relazione tra retrofit termico degli edifici e aumento delle concentrazioni del radon.

Le misure sono state raccolte utilizzando un dosimetro passivo per ogni abitazione, per un periodo di due mesi durante la stagione in cui è in funzione il sistema di riscaldamento, seguendo le indicazioni della norma NF ISO 11665e8 (2013). Inoltre, attraverso un questionario autosomministrato sono state raccolte le caratteristiche dell'edificio (come il periodo di costruzione, il materiale di costruzione, il tipo di fondazione e il retrofit termico). La partecipazione al sondaggio è stata volontaria e il campione finale non è risultato rappresentativo del territorio in termini di popolazione e abitazioni. Tuttavia, l'insieme dei dati è ampio, comprendendo 3233 case che corrisponde al 15% delle abitazioni nell'area target. Inoltre, tutte le abitazioni hanno un potenziale di radon relativamente omogeneo e lo stesso clima oceanico,

due fattori importanti che influenzano la concentrazione interna di radon, permettendo così di determinare l'influenza delle caratteristiche dell'edificio.

I risultati hanno riportato i seguenti valori: la concentrazione mediana è 147 Bq m^{-3} . La media geometrica è di 155 Bq m^{-3} . In Francia sono applicati due valori limite per gli edifici pubblici in zone a rischio radon: 400 Bq m^{-3} (livello per il quale sono necessarie semplici misure di attenuazione per ridurre la concentrazione) e 1000 Bq m^{-3} (livelli per cui è richiesto un audit dell'edificio e misure di mitigazione). Facendo riferimento a questi valori, l'82% delle abitazioni ha riportato una concentrazione di radon inferiore a 400 Bq m^{-3} , il 13% tra 400 e 1000 Bq m^{-3} e il 5% sopra i 1000 Bq m^{-3} . Inoltre, il 75% delle abitazioni ha una concentrazione di radon inferiore a 300 Bq m^{-3} (concentrazione limite annuale indicata dalla direttiva Euratom).

Per quanto riguarda le caratteristiche delle abitazioni, sono state considerate come sottoposte a un retrofit termico se una o più delle tre seguenti specifiche sono state riportate nel questionario: sostituzione delle finestre, isolamento termico o un sistema di ventilazione. Il 56% delle case era stato sottoposto a retrofit termico. I risultati hanno mostrato che una grande maggioranza dei lavori di ristrutturazione termica (72%) è stato eseguito senza intervenire sulla ventilazione. Inoltre, si è registrato che le concentrazioni interne di radon variano significativamente in base a: il numero di piani dell'edificio, il piano in cui è effettuato il campionamento, il tipo di fondazioni, il periodo di costruzione, il materiale di costruzione principale, il sistema di ventilazione, l'uso del riscaldamento a legna e il retrofit termico. Più specificamente, i test bivariati mostrano che le case più vecchie hanno concentrazioni di radon più elevate rispetto alle case di più recente costruzione.

La distribuzione delle concentrazioni di radon è più bassa nelle case costruite su vespai, più alta nelle case con fondazioni in muratura, in case costruite con granito e altre pietre, e in case senza alcun sistema di ventilazione rispetto a quelle con sistemi naturali o meccanici. Le case riscaldate a legna hanno concentrazioni di radon più alte di quelle che usano un'altra tipologia di riscaldamento. Infine, le abitazioni sottoposte ad interventi di efficientamento hanno concentrazioni di radon più elevate rispetto alle case non ristrutturate ($p < 0,001$), con concentrazioni mediane di 180 Bq m^{-3} e 114 Bq m^{-3} rispettivamente. Più precisamente, le concentrazioni interne di radon aumentano del 21% in media nelle case che hanno subito un retrofit termico rispetto a quelle che non erano mai state sottoposte a tali interventi.

Quindi i risultati evidenziano la necessità di considerare la qualità dell'ambiente interno quando si affrontano interventi di efficientamento energetico per non compromettere la qualità dell'aria interna, tenendo sempre in considerazione che il materiale di costruzione e il tipo di fondazione possono condizionare le concentrazioni di radon indoor.

Le raccomandazioni delle organizzazioni internazionali, come ICRP, UNSCEAR e OMS, si basano sul presupposto che il suolo sia la fonte principale di radon, ma questo è vero per le case unifamiliari, mentre negli edifici a più piani la principale fonte di

ingresso del radon è l'esalazione dai materiali da costruzione. A seguito dell'implementazione delle misure di efficienza energetica Vasilyev & Yarmoshenko (2017) hanno sentito l'esigenza di valutarne l'effetto.

La ricerca si è svolta a Ekaterinburg (Russia). Il campione selezionato è composto da 81 abitazioni edificate dopo il 2000. Per l'indagine sul radon sono stati utilizzati rilevatori a traccia Kodak LR-115. Il periodo di misurazione è durato 2 mesi. Per valutare la concentrazione di radon in 371 edifici costruiti prima del 2000 si sono utilizzati risultati ottenuti con ricerche condotte nell'ambito dei programmi regionali di misurazione delle radiazioni in 83 regioni della Russia.

I risultati hanno riportato i seguenti valori: il valore medio aritmetico della concentrazione di radon nel campione di case costruite prima del 2000 era 38 Bq m^{-3} , la media geometrica era 29 Bq m^{-3} , $\text{GSD}^{67} = 2,14$; nel campione di edifici ad alta efficienza energetica, il valore medio aritmetico della concentrazione di radon nel campione era 93 Bq m^{-3} , la media geometrica era 73 Bq m^{-3} , $\text{GSD} = 2,08$. I dati registrano un aumento delle concentrazioni indoor e della esposizione alle radiazioni, a seguito delle opere di riqualificazione energetica degli edifici. Nel caso di Ekaterinburg, preso come caso rappresentativo per la sua struttura e le misure di efficienza energetica, è stata sviluppata una previsione della distribuzione delle concentrazioni di radon in Russia nel 2030. Le previsioni hanno stimato che la concentrazione media di radon aumenterebbe di un di $1,26 \text{ Bq m}^{-3}$ e $1,47 \text{ Bq m}^{-3}$ negli anni 2015 e 2030, rispettivamente e che la percentuale di edifici che riporta concentrazioni sopra il livello di riferimento di 300 Bq m^{-3} aumenterebbe di 5 e 10 % negli anni 2015 e 2030, rispettivamente. Gli autori concludono sostenendo l'importanza di agire per la mitigazione e prevenzione del radon. Dato che una delle misure più efficaci per ridurre le alte concentrazioni di radon nei condomini è l'ottimizzazione della ventilazione, è necessario rivedere i sistemi di ventilazione negli edifici ad alta efficienza energetica. Inoltre, centrale è la scelta dei materiali da costruzione e dovrebbe essere stabilita una limitazione della concentrazione di ^{226}Ra al loro interno.

Nel 2010, il U.S. Department of Energy (DOE) ha promosso una iniziativa per valutare i risultati ottenuti con il Weatherization Assistance Program (WAP⁶⁸), nato per finanziare le opere di riqualificazione energetica degli edifici. Questa valutazione ha selezionato oltre 30 studi riguardanti i seguenti argomenti: il risparmio energetico, gli interventi di riqualificazione energetica e la qualità dell'aria interna in case multifamiliari e case mobili. Lo studio sulla qualità dell'aria interna è stato intrapreso per valutare la misura in cui il WAP ha avuto un impatto positivo o negativo sulla qualità dell'aria indoor delle case oggetto di studio. Nel loro articolo Pigg *et al.* (2018) hanno esaminato 514 case ubicate in 35 stati americani, misurando i parametri dell'aria indoor includendo radon, formaldeide, monossido di carbonio e umidità.

⁶⁷ Geometric standard deviation.

⁶⁸ <https://www.energy.gov/eere/wap/about-weatherization-assistance-program>

Oltre ai livelli di contaminanti, sono stati raccolti dati sulle caratteristiche dell'edificio (es: numero di piani, dimensioni, fondazioni, tipologia di riscaldamento, di ventilazione, ecc). Inoltre, sono stati condotti test di tenuta dell'aria della casa in conformità con il RESNET Mortgage Industry National Home Energy Systems Standard. Le diagnosi sono state condotte per misurare le modifiche degli inquinanti indoor. Il campione selezionato è stato suddiviso in due gruppi: di trattamento e di controllo.

In relazioni al radon, le raccomandazioni della Environmental Protection Agency (EPA) stabiliscono 4 picocurie per litro di radon (4 pCi/L) come il livello di azione oltre il quale si raccomanda la mitigazione. L'EPA ha anche classificato tutte le contee degli Stati Uniti come zone radon 1, 2 o 3 in base al loro potenziale di radon. La zona radon 1 ha il potenziale più alto, con un livello interno medio previsto superiore a 4 pCi/L. Le case della zona 2 dovrebbero avere una media di 2-4 pCi/L, e le case della zona 3 dovrebbero avere una media inferiore a 2 pCi/L.

Il campione delle abitazioni è stato ponderato, prendendo in considerazione zone con alto potenziale di radon, ubicate prevalentemente in regioni con inverni più freddi. Le misurazioni sono state effettuate prima e dopo le opere di riqualificazione energetica, ponendo attenzione ai cambiamenti delle condizioni atmosferiche esterne, che possono influenzare i risultati. I livelli di radon sono stati misurati per sette giorni nei seminterrati e nei vespai, nonché nello spazio abitativo principale al primo piano sopra il livello del suolo, utilizzando contenitori a barriera secondo il protocollo EPA.

Tra gli interventi di efficientamento, la sigillatura, riducendo i tassi di scambio dell'aria, può aumentare i livelli di radon. D'altra parte, il lavoro di sigillatura al di sotto del livello del suolo può ridurre l'ingresso del radon nelle case, e la sigillatura dei condotti potrebbe ridurre le infiltrazioni di radon.

Tra le misure sono state considerate come indicative quelle rilevate nei piani più bassi occupati. I dati indicano che circa la metà delle case monofamiliari nel programma hanno cantine e circa un terzo di queste sono occupate. Quindi, i livelli di radon nel seminterrato, che erano generalmente più alti di quelli del primo piano, sono rilevanti per circa una casa su sei. Va notato che i livelli di radon sono noti per variare significativamente in brevi periodi di tempo. Sebbene ciò renda incerto il confronto dei risultati dei test a breve termine, l'obiettivo dello studio è stato quello di valutare l'impatto medio della impermeabilizzazione sui livelli interni di radon, e il campione è stato dimensionato ad hoc. Inoltre, per ridurre l'influenza di altre variabili sulle concentrazioni di radon, è stata utilizzata una randomizzazione per suddividere il campione nei gruppi di trattamento e di controllo. Tuttavia, una limitazione dello studio è che i test sono stati condotti interamente durante la stagione del riscaldamento e quindi i risultati non possono essere presi come indicativi dei livelli annuali di radon. I risultati confermano che i più alti livelli medi di radon nella stagione

di riscaldamento si verificano tra le case costruite nella zona 1 dell'EPA⁶⁹, e i livelli medi più bassi si trovano tra le case mobili e le case nelle contee della zona 3 dell'EPA, comunque anche nella zona 1, il livello medio di radon era inferiore al livello d'azione raccomandato dall'EPA. Tuttavia, circa il 12% delle case del campione aveva livelli superiori a 4 pCi/L. Le concentrazioni di radon nei livelli fuori terra sono inferiori a quelli misurati negli scantinati e nei seminterrati a parità di tipologia di fondazioni. I dati indicano che in media, i livelli di radon sopra il livello del suolo sono circa il 70% di quelli egli spazi semi interrati. Questo dimostra che l'utilizzo del seminterrato come luogo di vita comporta una potenziale maggiore esposizione al radon. In media, i livelli di radon aumentano di $0,14 \pm 0,13$ pCi/L ($5,2 \pm 4,8$ Bq m⁻³) nel gruppo di trattamento dopo la ristrutturazione e sono diminuiti di $0,29 \pm 0,18$ pCi/L ($10,7 \pm 6,7$ Bq m⁻³) nel gruppo controllo. Questo porta ad un aumento medio netto (trattamento meno controllo) di circa $0,4 \pm 0,2$ pCi/L ($14,8 \pm 7,4$ Bq m⁻³) nei livelli di radon indoor. La diminuzione osservata nei livelli di radon nel gruppo di controllo è spiegata dalle differenze nella temperatura esterna tra i periodi pre e post trattamento. Un'analisi esplorativa è stata eseguita anche per valutare quali variabili predicono i cambiamenti nei livelli di radon. Alcuni dei fattori considerati erano ambientali, come la temperatura, le precipitazioni, la copertura nevosa; altri erano misure di impermeabilizzazione come la sigillatura delle crepe nelle fondazioni, l'installazione di ventilazione, l'isolamento termico. I risultati hanno dimostrato che le opere di sigillatura eseguite avevano un piccolo impatto negativo, ma statisticamente significativo sui livelli di radon, in quanto i lavori di sigillatura dell'aria possono ridurre i tassi di scambio d'aria e quindi aumentare i livelli di radon nelle abitazioni. Data la variabilità del radon dovuta ad altri fattori, non è possibile ascrivere la variazione delle concentrazioni esclusivamente ai lavori di riqualificazione energetica, ma per il campione complessivo dello studio si è registrato un aumento. Questi risultati suggeriscono anche che ulteriori misure, come il miglioramento della coibentazione verso il terreno e della ventilazione, dovrebbero essere valutate per la loro capacità di compensare possibili aumenti di radon indoor a seguito degli interventi di riqualificazione.

Nel 2018 Derbez *et al.* hanno condotto una ricerca sul campo in 72 abitazioni sottoposte ad efficientamento energetico per valutare le modifiche delle concentrazioni degli inquinanti indoor. I parametri misurati hanno incluso la concentrazione di 19 composti organici volatili e aldeidi, biossido di azoto, particolato (PM2.5), radon, temperatura e umidità relativa. In generale, le misurazioni interne ed esterne sono state eseguite per una settimana in due stanze (soggiorno e camera da letto) delle abitazioni con e senza il sistema di riscaldamento in funzione (nei mesi di gennaio e luglio). Inoltre, è stato somministrato agli occupanti un questionario, per raccogliere informazioni sull'edificio e le abitudini della famiglia.

⁶⁹ Zone Radon EPA: Zone 1 elevato (>4 pCi/L); Zone 2 moderato (2-4 pCi/L); Zone 3 basso (<2 pCi/L).

Si riportano i risultati relativi alla concentrazione di radon, in quanto oggetto dello studio. Il radon è stato misurato con un dosimetro passivo (rivelatori Kodalpha LR 115, Dosirad, Francia) per un periodo di almeno due mesi e solo durante la stagione invernale.

Come è ormai noto per ridurre il consumo di energia, l'ermeticità dell'involucro dell'edificio è un fattore determinante per evitare dispersione di calore, ma può comportare una riduzione del ricambio d'aria se non associato a un sistema di ventilazione adeguato. Ciò è particolarmente rilevante in Francia dove la popolazione trascorre in media più di 16 ore in casa. Nel 2012 in Francia prende avvio il programma di raccolta dati su efficientamento energetico degli edifici e qualità dell'aria indoor, voluto dall' Osservatorio della qualità dell'aria interna (OQAI).

Il campione è stato selezionato in base a requisiti minimi di consumo energetico totale tra i 40 e 75 kWh/m² per abitazioni di nuova costruzione e tra 64 e 120 kWh/m² per quelle ristrutturate. Delle 72 abitazioni, 44 erano recenti (costruite tra il 2008 e il 2012) e 28 erano ristrutturate (costruite tra il 1876 e il 1988 e ristrutturate nel periodo 2010-2013).

Per quanto concerne le misurazioni di radon i risultati sono i seguenti: la concentrazione mediana di radon misurata solo con il sistema di riscaldamento in funzione era pari a 28 Bq m⁻³.

In conclusione, anche se risultati non sono generalizzabili, a causa del campione selezionato e delle caratteristiche delle misurazioni effettuate, per quanto concerne la misurazione del radon indoor, i risultati delle concentrazioni sono statisticamente simili tra il campione oggetto di studio e il parco immobiliare francese. Va comunque sempre valutata una corretta ventilazione e la tipologia dei materiali da costruzione utilizzati quando si effettuano interventi di riqualificazione energetica per evitare il possibile incremento di inquinanti indoor (VOC e radon) che hanno potenziali effetti negativi sulla salute.

Lo studio di Pampuri *et al.* (2018) riporta i risultati ottenuti da una indagine sulla concentrazione di radon indoor, svolta in 154 edifici del Canton Ticino (Svizzera), misurando le concentrazioni prima e dopo la loro riqualificazione energetica. Proprio grazie ad una campagna organizzata dalle autorità sanitarie locali, più della metà degli edifici sono stati soggetti a misurazioni della concentrazione di radon, vista la rilevanza del problema in Svizzera. Gli autori partono dal presupposto che il risparmio energetico e la qualità dell'aria interna (IAQ) siano correlati e quindi gli impatti degli interventi debbano essere valutati sia in termini di miglioramento delle prestazioni energetiche sia in termini di conservazione del comfort interno, garantendo anche una sana IAQ.

Il valore di riferimento per le abitazioni definito nell'ordinanza svizzera sulla radioprotezione, (Strahlenschutzverordnung n. 814.501) è di 300 Bq m⁻³.

I dati sono stati ottenuti incrociando quelli del National Radon Database (Federal Office of Public Health) con quelli del risanamento energetico degli edifici, in particolare dal programma federale per l'energia dell'Ufficio federale dell'energia (disponibile su www.dasgebäudeprogramm.ch).

La scelta degli edifici è ricaduta su quelli che avevano effettuato misurazioni della concentrazione di radon prima della ristrutturazione dell'edificio, così da poter confrontare i due risultati, e sono in maggioranza case con una o due unità. In questa indagine, le misurazioni del radon, sia prima sia dopo gli interventi di riqualificazione, sono state effettuate utilizzando i dosimetri Radtrak Radonova3, con un'esposizione variabile tra 1 e 3 mesi. In ogni abitazione, è stato posizionato un dosimetro nella stanza più utilizzata, ubicata al piano più basso dell'edificio, durante la stagione invernale (riscaldamento in funzione).

Il campione originariamente selezionato era composto da 198 casi: 81 hanno sostituito le finestre; 42 hanno isolato il tetto, 28 casi hanno isolato il soffitto delle stanze riscaldate. In altri 47 edifici ristrutturati, gli interventi sono stati diversi o più complessi. Alla fine, il campione si è ridotto a 154 edifici a causa di differenti motivazioni (dalla non volontà di partecipare dei proprietari a misurazioni prese in maniera scorretta). In generale le concentrazioni di radon prima degli interventi di retrofit energetico sono inferiori al livello raccomandato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (300 Bq m^{-3}) per le zone ad alta concentrazione di radon. La concentrazione media di radon negli edifici svizzeri è di 78 Bq m^{-3} , ma, in casi particolarmente critici nel Ticino, le concentrazioni hanno superato i 10.000 Bq m^{-3} .

Confrontando i risultati ottenuti dalle misurazioni si registra un aumento del valore delle concentrazioni di radon indoor, poiché anche se il valore massimo registrato sembra essere diminuito da 1733 Bq m^{-3} a 1351 Bq m^{-3} , è aumentato il valore medio da 156 Bq m^{-3} a 190 Bq m^{-3} . Il cambiamento più significativo è l'aumento della mediana da 94 Bq m^{-3} a 121 Bq m^{-3} , con una differenza del 29%. Ciò significa che dopo il risanamento energetico, la metà degli edifici monitorati ha presentato concentrazioni di radon superiori a 121 Bq m^{-3} . Poi gli autori hanno suddiviso le abitazioni in due gruppi in base alla tipologia di intervento (1 sostituzione delle finestre; 2 interventi di isolamento termico senza sostituzione delle finestre). Per l'intero campione, la media aritmetica della concentrazione di radon dopo la bonifica è aumentata del 22%, da 155 Bq m^{-3} a 190 Bq m^{-3} dopo l'intervento energetico. L'aumento è più importante per gli edifici di categoria 1, le misure sono passate da 148 Bq m^{-3} a 198 Bq m^{-3} (+33%). Per gli edifici della categoria 2, l'aumento della concentrazione di radon è stato inferiore (+11%). In questo caso, le concentrazioni sono aumentate da 163 Bq m^{-3} a 181 Bq m^{-3} . Al fine di ottenere prove statistiche sul fatto che il retrofit energetico influisca sulla concentrazione di radon, gli autori hanno eseguito due test (Kolmogorov-Smirnov e Wilcoxon rank). Questi dati mostrano che la ristrutturazione energetica degli edifici può portare in alcuni casi ad un aumento sostanziale delle concentrazioni di radon in ambienti chiusi, confermando risultati già

suggeriti da precedenti studi. In particolare, la sostituzione delle finestre ha un'influenza statisticamente significativa sull'aumento delle concentrazioni di radon.

La forza di questa ricerca risiede: nel numero senza precedenti di dati reali disponibili, nel campione di diversi edifici residenziali tipici e tipologie di riqualificazione energetica, tutti fattori che permettono di raggiungere la significatività statistica. I risultati sottolineano la necessità di considerare il risparmio energetico e la qualità dell'aria interna contemporaneamente, nell'ambito dell'orientamento degli investimenti pubblici e privati per la tutela della salute.

L'obiettivo dello studio di Baeza *et al.* (2018) è stato quello di indagare se le diverse tecniche costruttive degli edifici avessero influenza sulle concentrazioni indoor di radon, anche perché in Spagna il radon non è preso in considerazione nei regolamenti in vigore, ma altri requisiti richiesti da norma (ad esempio la ventilazione e l'efficienza energetica) possono influenzare la concentrazione interna di radon. Le abitazioni selezionate per la ricerca sono monofamiliari costruite tra il 1729 e il 2014, e sono ubicate in un'area a rischio radon in Spagna caratterizzata da concentrazioni nel suolo con valori medi compresi tra 70-126 Bq/kg, e tassi di esalazione tra 49-100 Bq m⁻²s. Gli edifici sono stati costruiti secondo la normativa vigente (nessuna indicazione per le abitazioni prima del 1940 fino ad arrivare all'ultima versione del Codice Tecnico dell'Edilizia nel 2006) e secondo le tecniche costruttive e architettoniche del periodo; fattori che sono stati utilizzati per classificarle: Tradizionale (prima del 1940); Vecchio (dal 1940 al 1980); Nuovo (dopo il 1980).

Le concentrazioni interne di radon sono state misurate nelle stanze situate al piano terra, in tre abitazioni monofamiliari per ognuna delle nove località selezionate. Inoltre, il suolo superficiale (0-5 cm) è stato campionato in cinque punti diversi per determinarne la concentrazione di radon e i tassi di esalazione superficiale. Come abitazione di controllo, ne è stata selezionata una nuova (costruita dopo il 1980), utilizzata per valutare la variazione stagionale del radon interno misurato mensilmente al piano terra.

La concentrazione di ²²⁶Ra nel campione di terreno è stata determinata mediante spettrometria gamma, utilizzando contenitori di carbone secondo la procedura EPA⁷⁰. L'influenza delle condizioni stagionali (rapporto tra ampiezza e valore medio annuale) può comportare variazioni del 69-85% delle concentrazioni di radon indoor.

L'esalazione superficiale del radon è stata determinata mediante il metodo di accumulo descritto nella norma ISO/FDIS 11665-7⁷¹. Questa può essere una fonte significativa di radon indoor, ma osservando i risultati si nota che per la maggior parte delle abitazioni la concentrazione era maggiore del contributo dovuto solo

⁷⁰ EPA, U.S. Environmental Protection Agency, 1987. EPA 520/6-87-005. EERF Standard Operating Procedures for Radon-222 Measurement Using Charcoal Canisters (Montgomery, Alabama, U.S.A).

⁷¹ ISO, 2012. ISO/FDIS 11665-7. Measurement of Radioactivity in the Environment - Air: Radon-222 - Part 7: Accumulation Method for Estimating Surface Exhalation Rate

all'esalazione dal suolo. Il rapporto tra il valore medio del radon esalato e la concentrazione interna di radon era 0,82 per le abitazioni tradizionali, 0,34 per quelle vecchie e 0,31 per quelle nuove. Tali differenze potrebbero essere influenzate dalle tecniche costruttive.

La concentrazione indoor di radon nelle abitazioni selezionate è stata determinata in momenti diversi, poiché la loro disponibilità e accessibilità era determinata dai proprietari. Al fine di minimizzare l'influenza della variabilità stagionale sull'analisi secondo i diversi stili architettonici.

Analizzando i risultati si evince che, il valore medio della concentrazione interna di radon aumenta negli edifici più recenti. In ogni tipo architettonico, si possono trovare valori bassi di radon all'interno. Tuttavia, il riscontro di un incremento di concentrazioni superiori a 300 Bq m^{-3} è rispettivamente del 30%, 100% e 83% per i tipi architettonici Tradizionale, Vecchio e Nuovo. Anche osservando le abitazioni suddivise per data si può registrare un aumento della concentrazione interna di radon nelle abitazioni più recenti. Tuttavia, in due località, le abitazioni tradizionali sono state completamente ristrutturate rispettivamente nel 1986 e nel 1990, secondo le norme di costruzione in vigore. Questo sembra implicare un aumento della concentrazione di radon all'interno a causa di regolamenti più restrittivi riguardanti la tenuta d'aria delle abitazioni, in relazione con il rumore e gli aspetti di efficienza energetica.

Quindi gli autori concludono sostenendo che i tassi di esalazione superficiale del radon dal suolo non possono spiegare da soli le concentrazioni del radon indoor; e che la sua concentrazione era più alta nelle abitazioni di recente costruzione, poiché i regolamenti in vigore applicano criteri per il risparmio energetico che tende ad aumentare la tenuta d'aria delle abitazioni; ipotesi rafforzata anche dalle misurazioni dei livelli di concentrazione di radon indoor nelle case tradizionali ristrutturate, che hanno registrato livelli di radon indoor maggiori rispetto alle abitazioni non ristrutturate.

Zannoni nella sua ricerca (2018) ha affrontato la relazione tra l'efficientamento energetico e l'aumento della concentrazione degli inquinanti indoor, tra cui il radon, mostrando alcune tecniche sperimentali di prevenzione e bonifica sia per edifici nuovi sia già esistenti in Italia. Come già più volte ricordato il radon è un gas radioattivo, classificato dalla IARC (International Agency for Research on Cancer) come cancerogeno di tipo 1. L'autore ha sottolineato come, anche se la problematica è conosciuta, e alcuni regolamenti edilizi in Italia includono disposizioni finalizzate alla protezione contro i rischi per la salute, è ancora spesso sottovalutata dai progettisti. Oggi sono disponibili metodi di protezione economici e di semplice attuazione. Dato che il terreno è la principale fonte di radon, è proprio la fondazione degli edifici su cui è necessario intervenire. Nelle nuove costruzioni potrebbe essere sufficiente inserire una membrana (bitume, polietilene, PVC) tra il piano terra e la fondazione. Importante è l'azione di sigillatura, in quanto piccoli fori potrebbero creare punti di

accesso per il radon. Un'altra soluzione, utile nelle aree a rischio, è la costruzione di uno spazio interposto, possibilmente pulito e vuoto, ventilato sotto il seminterrato., e alcuni paesi hanno già inserito nelle normative edilizie l'obbligo di realizzare uno spazio interposto per i nuovi edifici nelle zone a rischio radon. Nelle zone in cui invece non è possibile realizzare uno spazio interposto, si può costruire una cisterna sottostante al seminterrato. Questa non impedisce al gas di entrare negli edifici come lo spazio interposto, ma è un sistema preparatorio: terminata la costruzione, si misura la concentrazione indoor, se è al di sotto della soglia di rischio, la cisterna viene abbandonata; al contrario se la concentrazione supera il livello di rischio, si posizionerà un ventilatore nel perimetro della cisterna per creare un effetto di depressurizzazione sotto l'edificio, aspirando il gas verso il terreno. In questo modo il radon sarà evacuato prima che possa entrare nell'edificio.

Nel caso di edifici esistenti, si interviene con le tecniche di bonifica. Nel caso in cui esistesse già uno spazio interposto, sarebbe possibile praticare un foro nella parete perimetrale e inserire un ventilatore, creando così un vuoto nello spazio interposto, ma questa soluzione non funzionerebbe se lo spazio interposto fosse pieno di materiale compatto o elementi strutturali a limitare l'azione del ventilatore. Nel caso in cui non ci fosse uno spazio interposto, si potrebbe realizzare un punto di aspirazione con un tubo in PVC (Ø100/120 mm, forato sul perimetro), protetto da un tessuto non tessuto e infilato nel terreno sotto l'edificio. Infine, se non fosse possibile posizionare il punto di aspirazione all'interno dell'edificio, si possono collocare il tubo in PVC e il ventilatore appena all'esterno dell'edificio. Inoltre, l'autore ha sostenuto come molto utile è stato svolgere la ricerca in edifici di grandi dimensioni che hanno dato la possibilità di verificare le tecniche studiate, giungendo alla conclusione che per ottenere un risultato, è necessario utilizzare almeno due tecniche di bonifica nello stesso edificio o di applicare la stessa tecnica due volte in punti diversi. Tra le tecniche descritte la più utilizzata è la depressurizzazione di uno spazio interposto,

Infine, l'autore sottolinea la complessità della gestione dei rapporti con gli inquilini, in quanto ancora parzialmente inconsapevoli degli effetti del radon sulla salute, e di come le relazioni diventassero ancora più difficili nel caso di edifici ad alta efficienza energetica, in quanto le bonifiche potevano interagire con l'efficienza energetica stessa., dimostrando come le due tematiche dovrebbero essere affrontate insieme, in quanto: risparmio energetico, benessere e qualità dell'aria indoor sono strettamente connessi e interrelati.

Du *et al.* (2019) hanno condotto una ricerca all'interno del progetto INSULAt⁷²E, calcolando i valori del consumo energetico e i parametri⁷³ della qualità dell'aria interna (IAQ), prima e dopo gli adeguamenti energetici, in 45 edifici multifamiliari

⁷² Obiettivi principali del progetto erano di sviluppare un protocollo per la valutazione degli effetti dei retrofit sulla qualità ambientale interna, la salute e il benessere degli occupanti.

⁷³ Gli autori segnalano: il biossido di carbonio (CO₂), il monossido di carbonio (CO), biossido di azoto (NO₂), formaldeide (CH₂O), composti organici volatili selezionati (benzene, toluene, etilbenzene e xilene (BTEX)), radon e contenuto microbico nella polvere depositata.

finlandesi (240 appartamenti) e in 20 edifici lituani (96 appartamenti). Di questi 37 edifici in Finlandia e 15 in Lituania sono stati sottoposti a retrofit energetico.

A livello normativo i due paesi differiscono per quanto riguarda l'uso dell'energia, il patrimonio edilizio e le modalità di attuazione delle politiche nazionali all'interno dell'UE. In termini di attuazione della direttiva EPBD, il governo finlandese ha finanziato gli interventi di retrofit energetico degli edifici residenziali e ha aggiornato frequentemente i regolamenti (Codice nazionale dell'edilizia e "Isolamento termico negli edifici"), mentre il governo lituano solo dal 2005 all'interno del Multi-Apartment Building Renovation Program (2005-2010).

Gli edifici selezionati per lo studio dovevano essere inseriti in un progetto di efficientamento energetico da realizzare entro il 2014. Insieme alle misurazioni sul campo, gli autori si sono avvalsi di un questionario per la raccolta di informazioni sugli edifici. Questi sono stati suddivisi in: edifici "caso" (ristrutturati); edifici "di controllo" (senza ristrutturazioni). Gli edifici caso sono stati ulteriormente suddivisi in due sottogruppi in base all'entità dei retrofit: riqualificazione energetica mirata (FER) che affronta singoli interventi di efficientamento; e retrofit energetici profondi (DER: Deep Energy Retrofit).

Gli edifici scelti avevano in media un'età di 42 ± 12 anni in Finlandia e 39 ± 14 in Lituania. In Finlandia, l'efficienza energetica negli edifici esistenti era relativamente alta e la maggior parte degli edifici aveva una ventilazione meccanica, quindi, sono state fatte principalmente attività di riqualificazione FER (74%). In Lituania, invece l'efficientamento energetico era piuttosto basso gli edifici avevano una ventilazione naturale. Principalmente sono state fatte attività DER⁷⁴ e il sistema di ventilazione presente era quello naturale.

I risultati hanno mostrato che a seguito dei lavori di adeguamento, il consumo di energia per il riscaldamento è diminuito in media del 24% e del 49% rispettivamente negli edifici finlandesi e lituani. Per quanto riguarda la qualità dell'aria indoor, negli edifici finlandesi sono significativamente diminuiti, i funghi e i batteri, invece, sono aumentate le concentrazioni di BTEX. Dopo la riqualificazione degli edifici lituani, si registra un significativo aumento delle concentrazioni di radon (aumento medio stimato $13,8 \text{ Bq m}^{-3}$ dopo il retrofit; l'aumento è relativamente piccolo, ma statisticamente significativo). Gli autori sottolineano che le misurazioni sono state fatte circa un anno dopo l'adeguamento; quindi, gli effetti a lungo termine non potevano essere stimati. Il radon è stato misurato per due mesi negli edifici finlandesi

⁷⁴ "Il Deep Energy Retrofit (DER) è un progetto di ristrutturazione di edifici progetto di ristrutturazione di un edificio in cui l'intensità dell'uso energetico del sito (compresi i carichi di rete) è stata ridotta di almeno il 50% rispetto al valore di riferimento precedente alla ristrutturazione, ma non meno di quanto minimo richiesto dagli attuali standard nazionali". Ruediger Lohse, Reinhard Jank, and Alexander Michael Zhivov. 2017. Chapter 6 Deep Energy Retrofit (DER). In: M.E. Goodsite, S. Juhola (eds.), Green Defense Technology, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, DOI 10.1007/978-94-017-7600-4_6

(alpha track method⁷⁵) e per un mese negli edifici lituani (Standard electrets E - PERMTM, Rad Elec Inc⁷⁶). L'aumento delle concentrazioni di radon potrebbe essere legato alla diminuzione della ventilazione dovuta a un involucro edilizio più isolante a cui si aggiunge un sistema di ventilazione naturale che non fornisce un ricambio d'aria adeguato; e anche a interventi di ristrutturazione effettuate dagli inquilini (pavimenti, mobili), ma anche legati alle abitudini abitative (per esempio la frequenza di apertura delle finestre e la regolazione delle valvole dei radiatori, dati raccolti con i questionari), modifiche che potrebbero aumentare o diminuire le concentrazioni di radon a seconda dei materiali scelti e del sistema di ventilazione.

Gli autori sottolineano quanto sia importante promuovere ulteriori progetti di ricerca che sulla scia di INSULATe, integrino i vari aspetti che legano efficientamento energetico e qualità dell'aria indoor, in quanto entrambi sono strettamente legati alla salute e al benessere degli esseri umani e ad un approccio sostenibile.

Meyer (2019) nel suo studio indaga la relazione tra la concentrazione di radon nelle case ristrutturate ad alta efficienza energetica e a basso consumo energetico (case passive) in Germania. Dal 2002, anno di emanazione dell'ordinanza sul risparmio energetico, i regolamenti sul consumo energetico per i nuovi edifici sono stati continuamente aggiornati per limitare il consumo di energia e i costi operativi. Uno degli effetti conseguenti delle nuove tecniche costruttive è il ridotto scambio d'aria, spesso conseguenza di un sistema di ventilazione carente.

Il ricambio d'aria nell'edificio è determinato da differenze di pressione, che dipendono dalla temperatura, dalla direzione e dalla forza del vento, nonché dalle perdite verso l'esterno. L'eliminazione di tali perdite con il risanamento energetico riduce quindi lo scambio d'aria. L'infiltrazione di radon dal sottosuolo è un fenomeno legato alle differenze di pressione che può avere un ruolo decisivo per la concentrazione di radon indoor. Sigillando i flussi d'aria incontrollati attraverso l'involucro dell'edificio, le differenze di pressione tra l'interno dell'edificio e l'atmosfera cambiano; questo può modificare il tasso di ingresso del radon.

La maggior parte degli studi comparativi tra case convenzionali e case ristrutturate ad alta efficienza energetica ha mostrato l'aumento della concentrazione del radon indoor in queste ultime.

Meyer ha effettuato le misurazioni delle concentrazioni di radon, con rilevatori track etch (Makrofol) per un anno, in quattro stanze dei 155 edifici selezionati. Le abitazioni sono state selezionate in base alla localizzazione in aree ad elevata presenza di radon nel suolo e soprattutto alla disponibilità degli inquilini a partecipare. Sono stati confrontati edifici ristrutturati (passivi e non passivi) e non ristrutturati, presi da un

⁷⁵ Reisbacka H. Radon measurement method with passive alpha track detector at STUK, Finland. in: Proceedings of Third European IRPA Congress, 14 –18 June 2010, Helsinki, Finland.

⁷⁶ Pilkyte L, Butkus D, Morkunas G. Assessment of external dose indoors in Lithuania. Radiat Prot Dosimetry. 2006; 121:140 –147.

campione di riferimento, generato⁷⁷ dal database nazionale (National Radon Database). Inoltre, ai partecipanti è stato somministrato un questionario per registrare le caratteristiche dell'edificio. I dati completi sono stati raccolti per 131 case, ma solo 113 edifici hanno soddisfatto i requisiti per l'analisi statistica. Le stanze considerate nei campioni sono tutte al piano terra e sono usate come soggiorno. Di questi, 40 sono case passive e 73 case ristrutturate. Le case passive sono termicamente ben isolate, in gran parte a tenuta d'aria. Per soddisfare i requisiti di risparmio energetico, hanno sistemi di ventilazione per lo più con recupero di calore. Negli edifici ristrutturati, sono state installati nuovi serramenti e le pareti esterne sono state isolate termicamente; più raramente, i soffitti o i tetti. Questi edifici non hanno sistemi di ventilazione ad eccezione della ventilazione meccanica temporanea nei bagni in alcuni edifici.

I risultati dell'analisi statistica non indicano differenze significative tra le due tipologie (case passive e non ristrutturate). Al contrario, la distribuzione dei valori misurati per le case ristrutturate è significativamente più ampia di quella dei valori misurati nel campione di riferimento. Sia il valore medio che la mediana delle concentrazioni di radon sono circa due volte più alte negli edifici ristrutturati. Concentrazioni di radon superiori a 300 Bq m⁻³ sono state trovate esclusivamente negli spazi abitativi delle case ristrutturate.

È quindi probabile che l'aumento dei livelli di radon negli edifici ristrutturati sia causato dalla riduzione dei tassi di ricambio dell'aria, cioè che sia una conseguenza della ristrutturazione finalizzata al risparmio energetico.

L'attuale EnEV⁷⁸ (normative sull'efficienza energetica in Germania) stabilisce che gli edifici devono essere costantemente a tenuta d'aria. In questo contesto, è richiesta la creazione di un sistema di ventilazione, ma nella maggior parte dei casi, la ventilazione manuale è considerata sufficiente. Nel 2017 l'installazione sistemi di ventilazione era presente solo nel 5,3% degli edifici ristrutturati e nel 29% degli edifici che hanno effettuato una riqualificazione energetica. Per concludere quindi lo studio mostra che le concentrazioni di radon previste dopo la ristrutturazione di edifici esistenti possono aumentare. Le concentrazioni di radon nelle case ristrutturate superano i valori soglia (100 o 300 Bq m⁻³) più frequentemente che nelle case non ristrutturate, a parità di potenziale geogenico di radon e di tipo di edificio.

La ricerca di Collignan e Powaga (2019) studia gli effetti della depressurizzazione e tasso di ricambio di aria sulle concentrazioni indoor di radon (IRnAC), che dipendono principalmente dalle caratteristiche dell'edificio (ad es. l'ermeticità) e dalla natura e dalle prestazioni del sistema di ventilazione. L'obiettivo di questo studio è analizzare l'impatto dei sistemi di ventilazione e interventi di retrofit termico (finalizzate alla

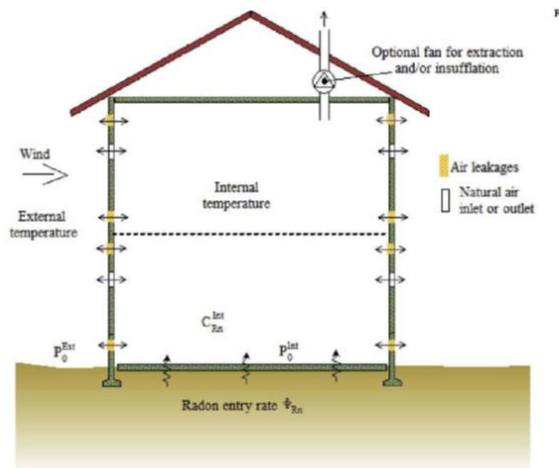
⁷⁷ Per l'estrazione delle abitazioni dal database è stata eseguita una ricerca che seguisse degli specifici criteri, così da renderle paragonabili alle altre tipologie di case del campione generale.

⁷⁸ EnEV-2015. Energieeinsparverordnung vom 24.07.07, geändert durch Artikel 3 der Verord. vom 24.10.15. BGBl. I S. 15

riduzione del consumo di energia) sui meccanismi che regolano le concentrazioni interne di radon. Per illustrare l'impatto dei diversi parametri sulla depressurizzazione del suolo, è stato utilizzato il modello SIREN⁷⁹ (vedi Figura 3) sviluppato al CSTB. Per semplificazione, i calcoli sono stati fatti senza considerare il fattore vento.

⁷⁹ modello numerico nodale a zona singola basato sulla risoluzione dell'equazione di bilancio di massa. Ogni flusso d'aria di massa m' tra gli ambienti interni e quelli esterni tra l'interno e l'esterno può avvenire attraverso le perdite d'aria dell'involucro o attraverso i componenti di ventilazione.

Fig. 3. PRINCIPIO DEL MODELLO DI VENTILAZIONE SIREN (FONTE: COLLIGNAN E POWAGA, 2019).



I sistemi di ventilazione utilizzati e modellati per questo studio rappresentano i sistemi di ventilazione più utilizzati in Francia, sono i seguenti:

- Nessun sistema di ventilazione: il ricambio dell'aria dell'abitazione è generato solo attraverso le perdite d'aria.
- Sistema di ventilazione naturale (NVS): questo tipo di sistema di ventilazione induce ingressi e uscite d'aria naturali in posizioni basse e alte della facciata.
- Sistema di ventilazione meccanica di scarico (a semplice flusso) (MEVS): l'aria entra in modo naturale in stanze (camere da letto e soggiorni) attraverso ingressi d'aria naturale e poi viene trasferita nell'abitazione prima di essere estratta meccanicamente nei locali umidi (cucina, bagno e servizi igienici).
- Sistema di ventilazione meccanica bilanciata (MBVS): l'aria entra meccanicamente nei locali abitativi (camere da letto e soggiorni) e poi viene trasferita nell'abitazione prima di essere estratta meccanicamente nei locali umidi (cucina, bagno e servizi igienici).
- Sistema di ventilazione meccanica di mandata (MSVS): l'aria entra meccanicamente nei locali abitativi (camere da letto e soggiorni) e poi viene trasferita all'interno dell'abitazione prima di essere estratta attraverso le bocchette naturali in locali umidi (cucina, bagno e servizi igienici).

Si noti che nei calcoli presentati non si tiene conto dell'impatto del comportamento degli occupanti (apertura delle finestre).

I risultati mostrano che per gli edifici che utilizzano un sistema di ventilazione naturale (NVS), la differenza di temperatura tra interno ed esterno (AT) ha un forte impatto sulla depressurizzazione del suolo. Maggiore è l'AT, maggiore è la depressurizzazione del suolo. Inoltre, il tasso di ricambio d'aria naturale è più importante in presenza dell'effetto camino. L'IRnAC risultante dipenderà dall'intensità del tasso di ingresso del radon in entrata, che è legato al livello di depressurizzazione interna e alla diluizione del radon all'interno per il ricambio dell'aria. Tuttavia, generalmente, in presenza dell'effetto camino, più alto è il valore di AT e maggiore è l'IRnAC risultante. Inoltre, è stato eseguito il calcolo, nella stessa abitazione per confrontare l'uso del sistema di ventilazione meccanica ad estrazione (MEVS) e del sistema di ventilazione meccanica di mandata (MSVS) per analizzare il loro impatto sulla pressione interna sulla concentrazione di radon. Si è ottenuto che il rinnovo medio dell'aria è approssimativamente equivalente per i due calcoli ed è circa 0.35 h-1.

Tuttavia, si sono registrate alcune differenze a causa dell'impatto delle variazioni delle condizioni meteorologiche sulla ventilazione.

I sistemi di ventilazione influenzano anche i livelli della pressione: la depressurizzazione dell'edificio generata utilizzando il MEVS è più importante di quella con il MSVS. Di conseguenza, il tasso di ingresso del radon indoor nel tempo è maggiore per il MEVS che per il MSVS. Infine, il rapporto tra l'IRnAC medio annuo utilizzando il MSVS e quello utilizzando il MEVS è 0,47.

Gli autori, quindi, sostengono che l'uso del MSVS rispetto al MEVS è più efficace nel proteggere un edificio dal radon, sottolineando però che MSVS o il MBVS sbilanciato potrebbe comportare maggiore umidità nelle abitazioni.

Lo studio mostra l'impatto di alcuni parametri ambientali sull'ingresso del radon nell'edificio e sulla conseguente concentrazione di attività radon in ambiente interno (IRnAC).

Risulta che per una determinata configurazione dell'edificio e presenza di radon nel terreno, l'IRnAC dipende dalle condizioni meteorologiche, dalla permeabilità all'aria dell'edificio, dal tipo di ventilazione dell'edificio e dal livello di ricambio d'aria. Questi parametri possono avere un impatto, da un lato, sul livello di depressurizzazione all'interno dell'edificio, che determina l'intensità di ingresso del radon, e dall'altro, sui livelli di diluizione all'interno.

Sulla base dei calcoli annuali, questi risultati mostrano anche che il processo di retrofit termico deve essere associato ad un adeguato sistema di ventilazione per evitare un aumento significativo dell'IRnAC.

Nell'ambito dello sviluppo di una politica di riduzione dei consumi energetici i risultati ottenuti hanno mostrato che l'IRnAC può essere fortemente influenzata dalle variazioni della permeabilità dell'edificio e dalla tipologia di ventilazione.

Symonds *et al.* (2019) hanno condotto uno studio utilizzando misurazioni del radon effettuate in 470.689 abitazioni nel Regno Unito tra il 1980 e il 2015, collegate alle

informazioni sull'abitazione contenute nel Database sull'Efficienza Energetica delle Abitazioni (HEED). Lo scopo di questo studio è investigare le eventuali relazioni che possono esistere tra le caratteristiche delle abitazioni e le concentrazioni di radon interno, con un particolare focus sull'impatto delle misure di efficienza energetica che modificano l'involucro edilizio. Vengono prese in considerazione l'installazione di doppi vetri, l'isolamento del sottotetto e delle pareti, e la messa in opera di dispositivi anti riflusso dell'aria.

Il dataset HEED è stato utilizzato per analizzare l'associazione tra le caratteristiche delle abitazioni e le prestazioni energetiche con le concentrazioni di radon indoor. I risultati mostrano che le misure di efficienza energetica che aumentano l'ermeticità delle proprietà hanno una relazione negativa con i livelli di radon interni. Le abitazioni dotate di doppi vetri installati avevano misurazioni di radon con una media geometrica significativamente più alta, pari al 67% (IC al 95%: 44, 89) in più rispetto a quelle senza un intervento di isolamento registrato. Anche quelle con isolamento del sottotetto (47%, IC al 95%: 26, 69) e isolamento delle pareti (32%, IC al 95%: 11, 53) hanno mostrato concentrazioni di radon più elevate. L'adozione di misure multiple sembra avere una relazione cumulativa con le concentrazioni di radon indoor, le abitazioni dotate di doppi vetri associate con a l'isolamento del sottotetto che quello delle pareti presentano i livelli più elevati, con una media geometrica del 79% (IC al 95%: 56, 103) maggiore rispetto alle abitazioni senza interventi di isolamento registrati.

Gli interventi di retrofit dell'involucro edilizio aumentano la resistenza termica dell'involucro edilizio; tuttavia, riducono anche i tassi di ventilazione, consentendo al radon e ad altri inquinanti prodotti internamente di accumularsi. La conseguente riduzione dei tassi di flusso d'aria dovuta all'isolamento potrebbe comportare un gradiente di pressione negativo tra l'interno e l'esterno, che richiama aria attraverso il pavimento. La protezione da correnti d'aria potrebbe avere meno effetti modificatori; poiché oltre a impedire al radon di uscire dalle abitazioni, potrebbe in alcuni casi agire come barriera all'ingresso del radon. Ad esempio, se l'intervento di retrofit prevede l'installazione di pannelli di fibra dura sui pavimenti in legno e l'applicazione di sigillature ai battiscopa, potrebbe comportare una riduzione dei livelli di radon.

Un parco abitativo sempre più efficiente dal punto di vista energetico, potrebbe comportare un notevole aumento dell'esposizione della popolazione e, di conseguenza, dei tassi di cancro ai polmoni correlati al radon. Ciò sottolinea l'importanza della valutazione e del monitoraggio del rischio radon in combinazione con i miglioramenti dell'efficienza energetica, specialmente nelle aree a rischio radon.

Migliorare le prestazioni energetiche del parco abitativo del Regno Unito è fondamentale per raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni di carbonio. Tuttavia, è importante evitare di compromettere la qualità dell'aria interna attraverso una valutazione e una pratica di implementazione attente.

Florică Ș, *et al.* (2020) hanno analizzato le fonti naturali e antropogeniche del radon in 100 casi studio nei cinque più grandi comuni della Romania, a seguito dell'adozione della Legge 526/2018, che recepisce la normativa europea (C.E. 2013/59/Euratom).

La letteratura ha dimostrato che oltre alle caratteristiche geologiche di un sito, l'ingresso del radon indoor dipende da fattori ambientali come la ventilazione, i modelli di occupazione o le caratteristiche edilizie e architettoniche. Inoltre, recenti studi hanno attestato che, sebbene la variazione dei livelli di radon in ambienti chiusi dipenda principalmente dalle caratteristiche fisico-chimiche del substrato (tipo di roccia e permeabilità), i parametri che influenzano i percorsi di ingresso e trasporto possono giocare un ruolo decisivo nell'accumulo di radon. Partendo da queste conoscenze dopo un accurato studio delle caratteristiche geologiche delle cinque città considerate (Bucarest, Cluj-Napoca, Ias j, Sibiu e Timis para), gli autori hanno svolto le loro indagini relative a:

- concentrazione di radon nel suolo;
- permeabilità del suolo;
- l'esalazione superficiale del radon (permeabilità della casa);
- concentrazione di radon all'interno.

Per la raccolta dei dati, hanno collocato dei rilevatori di tracce nucleari all'interno di mille edifici residenziali, per due campagne consecutive della durata di sei mesi. In ogni edificio sono stati collocati due rivelatori passivi⁸⁰, uno per ciascuna delle due stanze più vissute di ogni abitazione. Sulla base dei risultati di queste misurazioni, sono state selezionate 100 case con concentrazioni di radon superiori a 200 Bq m⁻³, per una diagnosi approfondita.

La concentrazione di gas radon nel suolo è stata determinata in situ, utilizzando il monitor portatile RM-2 (Radon v.o.s., Repubblica Ceca) e applicando il metodo Neznal⁸¹. Le misurazioni della permeabilità del suolo sono state effettuate utilizzando Radon-Jok⁸² (Radon v.o.s., Repubblica Ceca) per valutare il potenziale di radon (RP⁸³)

⁸⁰ Il protocollo di lavoro per le misurazioni passive è descritto in Cucos, Dinu, A., Cosma, C., Dicu, T., Begy, R., Moldovan, M., Papp, B., et al. (2012). Thorough investigations on indoor radon in Baita radon-prone area (Romania). *Science of the Total Environment*, 431,78–83. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.013>.

⁸¹ Il metodo richiede la determinazione della concentrazione di radon da campioni di gas del suolo estratti da una profondità di 80 cm con una sonda metallica, 15 punti di campionamento per ogni 800 m² di suolo nudo. Il metodo è descritto in: Neznal, M., Neznal, N., Matolín, M., Barnet, I., & Miksova, J. (2004). The new method for assessing the radon risk of building sites. Prague: Czech Geological Survey."

⁸² Il principio delle misure Radon-Jok si basa sulla capacità di estrarre gas dal suolo con l'aiuto della pressione negativa.

⁸³ L'RP è calcolato secondo l'equazione presente in Neznal et al. 2004 cit.

e l'indice di radon (RI^{84}) del sito di costruzione, essenziale per l'identificazione delle aree "calde" in termini di concentrazione di radon. La permeabilità del suolo è calcolata in base all'equazione di Darcy, che riguarda il flusso dei fluidi attraverso mezzi porosi. In questo studio si è presa in considerazione solo la concentrazione di attività di $^{226}\text{Ra}^{85}$ per la sua diretta correlazione con il radon indoor. I dati su CO_2 , CO , composti organici volatili (VOC), umidità relativa, pressione e temperatura sono stati raccolti utilizzando il sistema ICA, sviluppato da LiRaCC⁸⁶.

Per quanto riguarda il calcolo dell'efficienza energetica dell'edificio gli autori hanno fatto riferimento alla metodologia nazionale (Romanian Energy Performance Methodology, 2006) per la certificazione energetica, prendendo in considerazione i dati climatici e le proprietà dell'involucro dell'edificio. Per determinare il consumo energetico hanno determinato: il livello di isolamento globale; il calcolo delle perdite e dei guadagni di calore; l'efficienza dei sistemi HVAC, lo scenario di occupazione, l'ombreggiamento dell'edificio e il tipo di sistema di emissioni di calore. Sommando questi fattori hanno rappresentato l'influenza del fattore occupazionale sulla concentrazione interna di radon.

I risultati ottenuti riportano che la media geometrica delle misurazioni per la concentrazione di radon residenziale è di 325 Bq m^{-3} , circa 4 volte la media geometrica della Romania. Il dato è spiegabile con la selezione delle case, che avevano una concentrazione di radon superiore a 200 Bq m^{-3} . La concentrazione di CO_2 aveva una media geometrica di 1078 ppm con limiti che andavano da 432 a 3375 ppm.

Gli autori mettono in relazione le caratteristiche petrografiche dei depositi delle cinque regioni esaminate, con i valori delle concentrazioni di radon nel suolo e indoor; mostrando che la concentrazione del radon indoor non può essere correlata direttamente alla variazione del radon presente nel suolo, in quanto non è stata osservata alcuna correlazione statisticamente significativa tra la concentrazione interna di radon e parametri come l'esalazione di radon dal pavimento, la concentrazione di radon nelle fessure, la concentrazione di radon nel suolo, il potenziale del suolo o l'indice di radon.

⁸⁴ L'indice di radon del sito di costruzione indica il livello di rischio di rilascio di radon dal basamento ed è l'espressione quantitativa dell'RP di un sito. L'indice di radon di un edificio riflette il grado di protezione dalle radiazioni di cui l'edificio ha bisogno, che dipende dalle caratteristiche del suolo e dal tipo di fondazione dell'edificio

⁸⁵ Il metodo di misurazione utilizzato è descritto in: Cosma, C., Cucus, A., Papp, B., Begy, R., Dicu, T., Moldovan, M., et al. (2013). Radon measurements and radon remediation in Ba'tit a-S'ei prone area. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 8(2), 191–199.

⁸⁶ Il sistema è spiegato in: Tunyagi, A., Dicu, T., Cucus, A., Burghel, B., Dobrei, G., Lupulescu, A., Moldovan, M., Nit a, D., Papp, B., Zsacsvai, K., T, enter, A., Beldean-Galea, M.S., Anton, M., Grecu, S., Cioloca, L., Milos, R., Botos, M.L., Chiorean, C.G., Cat-alina, T., Istrate, M.A., & Sainz, C. An innovative system for monitoring radon and indoor air quality. *Romanian Journal of Physics*, 2019 (Accepted)

Considerando che tutte le case dello studio avevano valori di concentrazione di radon indoor superiori a 200 Bq m^{-3} e che la variazione di radon nel suolo era abbastanza significativa, ma non direttamente correlata con la variazione di radon indoor, si può certamente affermare che, insieme alle caratteristiche geologiche, i fattori relativi alle caratteristiche di costruzione hanno un peso importante nell'accumulo di radon indoor. Inoltre, si è notato che tutte queste case ad alta efficienza energetica hanno una media piuttosto alta di CO_2 , che a sua volta è stata correlata positivamente con i livelli di radon interni. Questa osservazione porta alla conclusione che le case ad alta efficienza energetica tendono ad avere un basso tasso di scambio d'aria che può produrre effetti negativi sulla qualità dell'aria interna attraverso l'accumulo di CO_2 , radon o umidità. D'altra parte, i risultati hanno anche mostrato che le case più vecchie, costruite con materiali a base di terra, sono altamente permeabili al radon. La conclusione degli autori è quindi che le misure preventive per il radon dovrebbero essere applicate a tutti i nuovi edifici e che le misurazioni passive interne a lungo termine sono il metodo più affidabile per valutare il rischio radon per la salute umana.

La ricerca di Mc Carron *et al.* (2020) nasce con l'obiettivo di colmare la lacuna esistente nella letteratura irlandese e del Regno Unito, che non hanno ancora indagato la relazione tra le caratteristiche degli edifici certificati "casa passiva" e le concentrazioni indoor di radon. Dato che si stima che il radon causi 1100 morti all'anno nel Regno Unito e circa 300 casi di cancro ai polmoni in Irlanda ogni anno possono essere collegati al radon, e considerando che un abitante medio di un paese industriale trascorre circa il 90% del suo tempo in ambienti chiusi; gli autori hanno sentito l'esigenza di comprendere l'effetto degli standard di rendimento energetico e della ventilazione, sulle concentrazioni indoor di radon. A livello normativo, nel Regno Unito, il Public Health England (PHE), nel 2010, indica come livello d'azione (AL) 200 Bq m^{-3} e il livello obiettivo (TL) di 100 Bq m^{-3} .

L'ipotesi alla base dello studio è che un edificio certificato casa passiva, caratterizzata da alti livelli di ermeticità e da una ventilazione meccanica bilanciata con recupero di calore (MVHR), dovrebbe comportare concentrazioni di radon indoor inferiori. Gli obiettivi sono:

- valutare i risultati rispetto ai livelli di riferimento stabiliti e alla media nazionale;
- confrontare i livelli di distribuzione del radon tra i piani superiori e inferiori delle abitazioni;
- identificare l'influenza dei materiali da costruzione sulle concentrazioni di radon corrispondenti;
- determinare le concentrazioni di radon all'interno del campione standard della Casa Passiva Retrofit (EnerPHit⁸⁷);

⁸⁷ Lo standard Casa Passiva include uno standard di retrofit chiamato EnerPHit che prende in considerazione le limitazioni degli edifici già esistenti che quindi non sono stati costruiti seguendo i principi della fisica delle

-
- effettuare un'analisi comparativa di casi studio delle concentrazioni di radon in ambienti interni in un'area ad alto rischio di radon.

Il campione selezionato comprende 97 edifici certificati Casa Passiva in Irlanda e nel Regno Unito e consiste di due classificazioni: 92 sono certificate Casa Passiva e cinque soddisfano lo standard EnerPHit Casa Passiva (cioè casa passiva retrofit). In aggiunta a queste, 25 case di confronto sono state selezionate semplicemente per la loro vicinanza alle corrispondenti case certificate. Tra le case passive, la più vecchia è stata costruita nel 2005, mentre la più recente nel 2019. L'intero campione è composto da abitazioni a due piani. La più grande di queste è di 455 m² mentre la più piccola è di 104 m². Delle 97 case, 58 sono in muratura e le restanti 39 sono in legno.

Tutte sono certificate come case passive, e tutte hanno una ventilazione meccanica bilanciata, unità di recupero del calore e hanno un livello di tenuta d'aria (n50) di <0,6 per le case nuove e per l'EnerPHit <1,0. Le caratteristiche dell'edificio e i materiali sono rilevanti, poiché le fonti più comuni di radon sono la presenza di gas del suolo e l'off-gassing dei materiali da costruzione contenenti radon. Il numero ridotto di case ristrutturate secondo lo standard EnerPHit è significativo in quanto altri studi dimostrano che l'adeguamento energetico delle case può ridurre il potenziale di ventilazione del gas radon, aumentandone i livelli. Le case ristrutturate non sempre hanno incluso la protezione al radon della pavimentazione. Pertanto, è difficile prevedere l'effetto dell'applicazione delle tecniche di Casa Passiva agli edifici esistenti sulle concentrazioni interne di radon; un sistema MVHR correttamente installato e funzionante potrebbe ridurre il livello di radon, ma se l'involucro dell'edificio non fosse completamente sigillato, potrebbe aumentare il livello di radon.

La metodologia per testare l'ipotesi è stata quella di esaminare il maggior numero di edifici certificati di case passive utilizzando lo stesso standard e gli stessi protocolli impiegati nell'ambito della strategia nazionale sul radon per facilitare un quadro comparativo. Il metodo di misurazione utilizzato per testare le concentrazioni interne di radon è stato tramite rivelatori di gas radon a diffusione di tracce alfa CR-39 posizionati nella zona giorno principale (stanza 1) e nella camera da letto principale (stanza 2) per poco più di tre mesi. Questo è stato effettuato in tre diverse fasi di monitoraggio da ottobre 2017 a giugno 2019. I risultati sono presentati come concentrazione media annuale e media destagionalizzata. In questa ricerca è stato adottato il livello di incertezza di $\pm 27\%$ ⁸⁸.

Nessuna delle 97 case passive certificate aveva concentrazioni di radon superiori al livello di riferimento nazionale di 200 Bq m⁻³. Solo il 6,79% del campione ha superato il livello obiettivo di 100 Bq m⁻³. La concentrazione massima misurata era di 166 Bq

costruzioni che sostiene lo standard generale (es: orientamento dell'edificio, della struttura, della forma o della quantità di vetri

⁸⁸ Il dato è relativo al laboratorio che ha effettuato le misurazioni il laboratorio Radon del Protection institute of Ireland (RPII)

m^{-3} in un'abitazione in Irlanda del Nord, che si trovava in una zona definita a rischio⁸⁹ più elevato, mentre la concentrazione media irlandese era di 77 Bq m^{-3} , inferiore rispetto agli 89 Bq m^{-3} riportati nell'NRS del 2002. Il livello medio di radon indoor delle case certificate è risultato pari a 36 Bq m^{-3} , la media delle case di confronto è risultata essere di 88 Bq m^{-3} . L'osservazione più sorprendente che emerge dai dati mostra un rapporto di distribuzione del radon più uniforme tra i piani superiori e inferiori delle case passive, dato che non si è riscontrato nelle abitazioni standard. Possibili spiegazioni possono risiedere nel sistema di ventilazione differente, e nel fatto che la casa passiva ha una specifica ermeticità e il principio del flusso incrociato per la progettazione della ventilazione meccanica che permette la circolazione e il trasferimento dell'aria in tutto l'edificio, ridistribuendo così le concentrazioni di radon, a differenza di molte delle abitazioni standard. Il confronto dei materiali da costruzione ha mostrato che il campione in legno ha prodotto una concentrazione di radon più bassa di 32 Bq m^{-3} rispetto ai 38 Bq m^{-3} del campione in muratura. I risultati del campione standard EnerPHit indicavano livelli di radon più alti 72 Bq m^{-3} rispetto al resto del campione di case passive 36 Bq m^{-3} ; tuttavia, questo era ancora un livello più basso rispetto al campione di confronto misurato in questo studio 88 Bq m^{-3} e le cifre registrate nell'ultima indagine nazionale sul radon 77 Bq m^{-3} .

Per il futuro bisognerebbe porre attenzione allo studio delle concentrazioni di radon provenienti dai materiali da costruzione, in particolare alla recente direttiva UE che impone livelli di riferimento per l'emissione di radiazioni gamma dai materiali da costruzione. Inoltre, si potrebbe lavorare di più sui differenziali di pressione prodotti dai vari sistemi di ventilazione meccanica impiegati nelle abitazioni europee nell'ambito dell'EBPD. Infine, si potrebbe effettuare questa ricerca su un campione più ampio di progetti EnerPHit di case passive, in paesi come il Nord America e il Canada dove il radon è un problema rilevante.

Sempre nel 2020 Yarmoshenko *et al.* hanno pubblicato i risultati di una indagine condotta in quattro città russe (Ekaterinburg, Chelyabinsk, San Pietroburgo e Krasnodar). Lo scopo di questo studio è stato quello di spiegare il possibile aumento della concentrazione di radon nei nuovi edifici ad alta efficienza energetica, rispetto alle tipiche case convenzionali costruite secondo gli standard precedenti. I cambiamenti nelle tecnologie di costruzione hanno avuto un impatto sui processi di accumulo del radon nelle abitazioni, facendo diventare quindi importante controllare la radioattività naturale durante la costruzione e il funzionamento degli edifici per proteggere la popolazione dal radon indoor. In Russia, i requisiti sull'efficienza energetica degli edifici sono stati stabiliti dal 1996⁹⁰. In particolare, l'ermetizzazione

⁸⁹ L'Agenzia per la protezione dell'ambiente (EPA) ha condotto il National Radon Survey (NRS) dell'Irlanda tra il 1992 e il 1999. L'indagine ha caratterizzato le aree dell'Irlanda in termini di rischio radon, e uno dei risultati chiave è stato che la concentrazione media nazionale di radon indoor ponderata geograficamente a quel tempo era di 89 Bq m^{-3} .

⁹⁰ L'unione europea ha adottato la direttiva sul rendimento energetico nell'edilizia (DIRETTIVA 2010/31/UE) che obbliga a costruire solo edifici a energia quasi zero nei paesi europei entro il 2021.

dell'edificio può ridurre l'uscita del radon e di altri inquinanti indoor e causarne l'accumulo. In generale, il cambiamento della concentrazione di radon dipende dalle condizioni di ingresso, dal modello di ventilazione e dai contributi relativi dei meccanismi di diffusione e convettivi del trasporto del radon.

Una parte significativa del patrimonio abitativo nelle città russe è composta da condomini a più piani dotati di sistemi di ventilazione naturale. Nel 2017, più del 75% dei circa 9000 nuovi condomini sono stati assegnati alle classi di alta efficienza energetica. A causa delle basse perdite d'aria attraverso l'involucro esterno dell'edificio, i sistemi di ventilazione naturale non riescono a fornire una quantità sufficiente di aria fresca e a garantirne il ricambio.

Le misurazioni della concentrazione di radon indoor sono state eseguite in due campioni di case. Il primo comprendeva appartamenti in nuovi condomini a più piani con una classe di efficienza energetica elevata; il secondo era formato da condomini multipiano costruiti prima del 2000 (a bassa efficienza energetica). Le misurazioni del radon sono state effettuate in 478 appartamenti utilizzando rilevatori di tracce nucleari CR-39. Due rivelatori sono stati installati in ogni appartamento. Negli appartamenti con più di una stanza, i rilevatori di radon sono stati collocati nel soggiorno e nella camera da letto. I rilevatori di radon sono stati esposti per una media di tre mesi.

Per analizzare l'associazione tra il livello di efficienza energetica e la concentrazione di radon indoor, gli autori hanno sviluppato un metodo basandosi sui risultati di precedenti studi sul radon a Ekaterinburg, precedentemente descritti. Per stimare quantitativamente il potenziale di efficienza energetica di un edificio, è stato sviluppato un indice di efficienza energetica (EEI), che fornisce una stima combinata delle caratteristiche costruttive, architettoniche e tecniche di un edificio relative al risparmio energetico. Sulla base delle informazioni raccolte per gli edifici studiati, un EEI individuale è stato assegnato ad ogni unità abitativa.

Tenendo conto che l'approccio scelto per la correzione stagionale⁹¹ dovrebbe essere considerato come la fonte di incertezza per il confronto della concentrazione di radon indoor tra le città, i risultati hanno dimostrato che:

- la concentrazione media di radon più bassa si osserva nelle case a pannelli e in mattoni con un numero di piani superiore a cinque e costruite secondo i progetti standard del 1970-1990 (circa 21 Bq m⁻³ in tutte le città);

⁹¹ Esistono due approcci di base per la correzione stagionale delle misure di concentrazione di radon in ambienti chiusi. 1) la correzione stagionale utilizza coefficienti di correzione stagionali noti; 2) la normalizzazione della temperatura che suggerisce di stimare una concentrazione annuale di radon in base alla differenza tra la temperatura durante il periodo di misurazione e il valore medio annuale. Nel presente studio, la temperatura dell'atmosfera esterna durante l'esposizione dei rilevatori negli appartamenti corrispondeva approssimativamente alla temperatura media annuale, quindi le concentrazioni misurate sono state considerate come una valutazione vicina ai valori annuali.)

-
- livelli relativamente più alti di concentrazione sono osservati in edifici bassi (2-5 piani) del periodo di costruzione 1930-1960. (33 Bq m⁻³ differenze significative tra le città in esame);
 - la più alta concentrazione media si osserva nei nuovi edifici ad alta efficienza energetica (media di quattro città 49 Bq m⁻³).

Le spiegazioni che offrono gli autori prendono in considerazione differenti elementi che possono contribuire alla concentrazione di radon indoor:

- la temperatura esterna e la condizione meteorologica delle città,
- la concentrazione di attività del radio-226,
- le caratteristiche dei materiali da costruzione,
- la ventilazione.

Concludendo gli autori sottolineano come la novità della loro ricerca risieda nell'aver messo in relazione il rilevamento della concentrazione di radon nelle abitazioni con le loro caratteristiche architettoniche e costruttive, con una stima quantitativa del potenziale di efficienza energetica di un edificio. Per la prima volta è stato proposto un parametro di efficienza energetica (EEI) che descrive l'efficienza energetica di un edificio in termini di riduzione dei ricambi d'aria.

Un'analisi comparativa dei risultati delle misurazioni effettuate nelle quattro città ha fornito la prova della relazione tra l'efficienza energetica di un edificio e la concentrazione interna di radon, mostrando come la concentrazione di radon nei moderni edifici multipiano ad alta efficienza energetica sia in media più alta rispetto alle tipiche abitazioni costruite negli anni precedenti; l'aumento dell'efficienza energetica, provocando un minore tasso di ventilazione e una maggiore concentrazione del radon.

In uno studio di stima computazionale, McGrath *et al.* (2021) si sono prefissi l'obiettivo generale di valutare le implicazioni per le concentrazioni di radon, dovute a scenari di retrofit efficienti dal punto di vista energetico, incorporando tassi di ingresso di radon dinamici e prevedendo le concentrazioni di radon post-retrofit in diverse tipologie edilizie. Lo studio ha mirato a quantificare le variazioni percentuali dei contributi di radon, dovute a vari cambiamenti nelle condizioni termiche, permeabilità all'aria dell'edificio e diverse linee guida per la ventilazione. Le simulazioni sono inquadrare nel contesto edilizio irlandese, ma, secondo gli autori, l'approccio computazionale è applicabile a livello globale. L'Irlanda ha una media nazionale di radon di 77 Bq m⁻³; anche se le misurazioni vanno da 10 a 49.000 Bq m⁻³ con l'8% delle abitazioni che supera il livello di riferimento di 200 Bq m⁻³. La ricerca esistente ha dimostrato che l'adeguamento energetico delle abitazioni può portare a una maggiore ermeticità e studi di ricerca internazionali hanno riportato che i livelli di radon dopo l'adeguamento possono aumentare fino al 42-340%. La letteratura scientifica sul tema radon mette in luce molti dei fattori legati all'edificio e alle

condizioni ambientali che influenzano i cambiamenti del livello di radon indoor, risultanti dall'efficientamento energetico degli edifici, ma molti di questi fattori, alcuni dei quali sono interdipendenti, sono stati studiati singolarmente. Secondo gli autori, quindi, uno studio computazionale offre l'opportunità per una valutazione multifattoriale. Sono stati combinati 3 modelli in abitazioni a ventilazione naturale: uno simulava la temperatura indoor (modello EnergyPlus), uno il flusso di aria e la pressione (modello CONTAM) e uno le concentrazioni radon (modello IAPPEM), per un totale di 3.780 combinazioni simulate, che rappresentano una matrice di combinazione delle tre diverse abitazioni, tre diverse posizioni esterne, caratteristiche pre/post termiche, sette diversi esponenti del flusso di radon, cinque diverse permeabilità all'aria e sei diverse strategie di ventilazione retrofit. Per tutti gli scenari di riqualificazione energetica simulati, quando la permeabilità all'aria dell'edificio è diminuita e non sono state installate misure di ventilazione aggiuntive, si è verificato un corrispondente aumento della concentrazione di radon. Gli aumenti più consistenti delle concentrazioni di radon sono stati associati ad abitazioni che aumentavano la loro ermeticità e non avevano sistemi di ventilazione preesistenti; le concentrazioni previste di radon in queste abitazioni sono aumentate fino al 107%. Indipendentemente dal potenziale geogenico del radon, l'influenza della posizione (costiera, suburbana, rurale) ha portato a concentrazioni di radon previste che differivano fino al 37% quando tutti gli altri parametri rimanevano costanti. In misura minore, anche i profili di temperatura più elevati dovuti a misure di riqualificazione energetica, senza corrispondenti cambiamenti nella permeabilità all'aria, hanno portato a un aumento della concentrazione di radon. I risultati evidenziano che le concentrazioni di radon potrebbero potenzialmente aumentare o diminuire nelle abitazioni a seconda delle strategie di ventilazione adottate durante il retrofit e che un approccio "adatto a tutti" non funziona.

Il lavoro di Silva *et al.* (2022) è incentrato sulla progettazione di un modello qualitativo di pre-diagnosi per la valutazione del potenziale di radon in ambienti interni, per diversi scenari di efficienza energetica, prendendo in considerazione un insieme di variabili rilevanti, accuratamente selezionate, per caratterizzare l'esposizione al rischio degli occupanti. Un modello di pre-diagnosi è uno strumento interattivo in cui l'utente può verificare la necessità di effettuare uno studio di valutazione del radon, partendo da un insieme di variabili; inoltre partecipa attivamente alla raccolta dati, in quanto sono gli utenti stessi a fornire informazioni relative alle proprie abitazioni e ai tassi di occupazione.

Gli autori hanno condotto, quindi, un'indagine preliminare per identificare tutte le caratteristiche che influenzano maggiormente la qualità dell'aria interna (IAQ) e l'efficienza energetica dell'edificio, principalmente per quanto riguarda la geologia locale, l'isolamento termico, i sistemi di ventilazione, le soluzioni energetiche, le risorse di energia rinnovabile e gli orari di occupazione, creando un inventario. I parametri selezionati sono stati successivamente ponderati e combinati in indicatori di performance attraverso una revisione della letteratura. Praticamente si assegna un

peso a ciascuna variabile, e queste sono le caratteristiche che permetteranno di costruire un modello di pre-diagnosi per valutare il potenziale di radon. Quando il risultato indica un potenziale basso, non è necessario implementare le procedure di mitigazione; se il modello di pre-diagnosi punta verso la verifica di un potenziale elevato, è necessario adottare misure di valutazione in situ per quantificare le concentrazioni di radon e per calcolare le dosi a cui possono essere esposti gli occupanti dell'edificio.

Dalla revisione della letteratura è emersa una correlazione tra la concentrazione di radon in ambienti interni e diversi fattori, che possono essere esterni o interni all'edificio. I fattori esterni sono legati alla geologia e alle condizioni climatiche. I fattori interni sono costituiti dal tipo di fondazione, dall'esistenza di un seminterrato, dai materiali da costruzione e dall'efficienza energetica dell'edificio, dal piano (distanza dal piano di calpestio), dal piano di calpestio, dal sistema di ventilazione, dai dispositivi di riscaldamento e i sistemi energetici, dai precedenti interventi di riqualificazione energetica e dall'umidità relativa interna.

Per implementare il modello di pre-diagnosi, è stata realizzata e popolata una piattaforma per la valutazione del potenziale di radon indoor, piattaforma che raccoglie dati sulle radiazioni gamma dal Laboratorio nazionale portoghese di energia e geologia (LNEG). Questi dati vengono utilizzati per stimare il potenziale geogenico di radon. A questi dati si uniscono le informazioni fornite dall'utente. I dati inseriti sono poi combinati con i dati storici della concentrazione di radon negli ambienti interni, migliorati con gli orari di occupazione, i profili di ventilazione e l'efficienza energetica dell'edificio.

In caso di risultati di potenziale elevato, all'utente sarà raccomandato di procedere a una valutazione dettagliata della concentrazione di radon negli ambienti interni e di attuare misure di bonifica per ridurre l'esposizione al rischio radon. Sulla base delle misurazioni del radon in situ, deve essere proposta e attuata una strategia di mitigazione specifica.

La ventilazione attiva in situ, automatica o manuale, pur migliorando la qualità dell'aria interna, può avere un impatto negativo sull'efficienza energetica dell'edificio, aumentando le perdite di calore.

Gli edifici ristrutturati di recente svolgono un ruolo importante nell'attuale sviluppo del modello, poiché le pareti ben isolate, finestre e tetti ben isolati, con elevate prestazioni di efficienza energetica, possono portare a una riduzione del rinnovamento dell'aria, finalizzata a ottimizzare il comfort termico invernale. Tuttavia, le strategie di ventilazione sono fondamentali per migliorare la qualità dell'aria interna e ridurre il potenziale di radon indoor senza compromettere l'efficienza energetica dell'edificio. Le strategie di mitigazione del radon dovrebbero realizzare un buon compromesso tra qualità dell'aria interna ed efficienza energetica, al fine di migliorare la qualità dell'aria interna con un basso impatto sull'efficienza energetica.

In una review sistematica del 2022 Wang *et al.* si pongono come obiettivi principali di raccogliere e valutare le conoscenze su come le misure di risparmio energetico e l'uso dell'energia possano influenzare la qualità dell'aria indoor e la salute.

Dalla ricerca bibliografica iniziale che contava 5576 articoli, ne sono stati selezionati e inclusi in questa revisione, 68 studi sul campo, di cui 45 studi sulla salute e 23 studi che hanno misurato l'esposizione in relazione agli aspetti energetici degli edifici.

Per quanto concerne il radon, sono stati trovati 11 studi di esposizione al radon. Di questi, 9 hanno riportato che l'adeguamento termico delle abitazioni è associato ad un incremento della concentrazione di radon. Di questi 9 studi: 3 combinavano l'isolamento termico con un'ulteriore sigillatura dell'edificio (ad esempio finestre); 6 hanno riportato concentrazioni medie di radon superiori a 100 Bq m^{-3} . Tuttavia, 3 studi su 11 hanno dimostrato che l'adeguamento dell'efficienza energetica nelle abitazioni con l'installazione di ventilazione meccanica, la messa in posa di membrane anti-radon o sistemi di depressurizzazione del sottosuolo o del pozzetto, possono ridurre la concentrazione di radon.

In generale dall'analisi degli studi si evince che gli immobili classificati come edifici verdi possono migliorare la salute. Un riscaldamento più efficiente e l'aumento dell'isolamento termico possono migliorare la salute nelle abitazioni in condizioni di povertà energetica. Tuttavia, le misure di risparmio energetico negli edifici sigillati e l'isolamento termico, senza l'installazione della ventilazione meccanica, possono compromettere la salute. Gli interventi di riqualificazione energetica possono aumentare le concentrazioni di radon in ambienti chiusi. L'installazione di un sistema di ventilazione meccanica può risolvere molti degli effetti negativi legati all'ermeticità degli edifici e all'efficienza energetica. Tuttavia, un flusso di ventilazione più elevato può aumentare l'esposizione interna agli inquinanti presenti nell'aria esterna, in aree con alti livelli di inquinamento.

In particolare, riguardo al radon si sottolineano le raccomandazioni del WHO, di non superare il livello di concentrazione indoor di 100 Bq m^{-3} nelle abitazioni; di prestare attenzione all'esposizione al radon quando si eseguono interventi di riqualificazione energetica.

Conclusioni

Dall'analisi della letteratura scientifica, relativa al rapporto tra incremento del radon indoor ed efficientamento energetico degli edifici, si può affermare esserci una diretta connessione tra le nuove pratiche di costruzione e di ristrutturazione e i livelli di radioattività nelle abitazioni.

Tutti gli studi sopra citati riportano come risultato che la più alta concentrazione media di radon si registra nei nuovi edifici ad alta efficienza energetica, se non associati ad un adeguato sistema di ventilazione meccanica, poiché una maggiore ermeticità ha come conseguenza una minore permeabilità dell'edificio. La ventilazione è una delle caratteristiche centrali sia per le case che rispondono ai requisiti di efficientamento energetico elevato, sia per la qualità dell'aria indoor, sia per l'influenza che ha sulle concentrazioni interne di radon. I sistemi di ventilazione meccanica possono indurre una pressione negativa o anche esercitare una pressione positiva sull'involucro dell'edificio. Per quanto riguarda la pressione negativa del radon sull'edificio, l'involucro ha il potenziale di accelerare la migrazione del radon nell'abitazione.

È necessario, prima di effettuare interventi di riqualificazione energetica, raccogliere i dati sulla qualità dell'aria indoor e sul benessere degli occupanti. Inoltre, gli interventi di efficientamento energetico all'interno delle politiche dovrebbero prendere in considerazione i co-benefici di un ambiente indoor sano, per esempio in termini di impatto sanitario (esiti sanitari dovute all'esposizione ad elevate concentrazioni indoor di radon, VOC, ecc..). È anche fondamentale: accrescere la consapevolezza degli occupanti sulla problematica del radon indoor; utilizzare e sviluppare le nuove tecnologie a sostegno della realizzazione dei progetti; promuovere la redazione di linee guida internazionali che integrino e armonizzino le normative, le linee guida e i piani dei singoli Paesi.

Una metodologia efficace e olistica, che prende in considerazione molti parametri di qualità dell'aria, fattori termici, acustici e luminosi, negli interventi di efficientamento energetico, è lo schema di classificazione TAIL⁹². Esso consente di valutare i cambiamenti nella qualità dell'ambiente interno (IEQ) associati alla ristrutturazione energetica profonda (DER) di un edificio e di classificare i livelli di qualità dell'aria interna risultanti dai fattori termici, acustici e luminosi.

Poiché la classificazione TAIL si basa principalmente su misurazioni, non può essere determinata prima della fase di ristrutturazione per aiutare a progettare l'IEQ. Per colmare questa lacuna Wei *et al.*, (2022) hanno sviluppato il metodo PredicTAIL, che consente di prevedere le variazioni di dieci dei dodici parametri TAIL come risultato della ristrutturazione energetica profonda (DER).

⁹² Lo schema di valutazione TAIL utilizza dodici parametri che caratterizzano la qualità dell'ambiente termico (T), dell'ambiente acustico (A), della qualità dell'aria interna (I) e dell'ambiente luminoso (visivo) (L).

Questi parametri sono la temperatura dell'aria interna, l'umidità relativa, il livello di pressione acustica, l'illuminazione e le concentrazioni di anidride carbonica, formaldeide, benzene, radon e PM2,5. Nessuna previsione è stata fatta invece per il tasso di ventilazione e lo sviluppo di muffa. Il livello di qualità di ogni parametro è valutato in conformità alla norma EN 16798-1 e alle raccomandazioni della Organizzazione Mondiale della Sanità.

Nel progetto di ristrutturazione energetica, la strategia è migliorare l'efficienza energetica e verificarla con simulazioni energetiche: il raggiungimento di un'elevata efficienza energetica è l'obiettivo primario. Si possono definire diverse strategie di ristrutturazione. Per valutare l'evoluzione dell'IEQ di un edificio associata a questi scenari di ristrutturazione, il presente lavoro mira a integrare lo schema di classificazione TAIL con uno strumento predittivo da utilizzare come strumento decisionale durante la fase di progettazione. Questo strumento ha lo scopo di guidare il processo di ristrutturazione energetica in modo tale che la IEQ caratterizzata da TAIL non venga compromessa.

I risultati hanno dimostrato che il metodo PredicTAIL è in grado di documentare l'impatto di diverse azioni di ristrutturazione sui parametri IEQ in base alla classificazione TAIL; è quindi uno strumento utile quando si devono prendere decisioni in merito alle ristrutturazioni.

Il WHO (2021) segnala che per quanto concerne il radon è necessario che ogni paese sviluppi e aggiorni il proprio piano d'azione nazionale per il radon che assicuri sia la prevenzione del radon, per i nuovi edifici, che la mitigazione, per gli edifici esistenti, al fine di controllare l'esposizione al radon della popolazione e ottenere una riduzione complessiva del rischio. Inoltre, tra le altre indicazioni, raccomanda di: stabilire livelli di riferimento nazionali per la concentrazione di radon indoor negli edifici ad alta frequentazione di pubblico e nei luoghi di lavoro; testare e monitorare i livelli di radon soprattutto nel contesto dei programmi di efficienza energetica. Suggerisce inoltre, di incorporare il radon come fattore di rischio nelle strategie nazionali di controllo del cancro, della conservazione dell'energia e della qualità dell'aria indoor, nei programmi di promozione della salute e di imporre la misurazione e la bonifica del radon come elemento delle transizioni immobiliari. Infine, sottolinea l'importanza della formazione dei professionisti nell'ambito del radon e contemporaneamente l'informazione dei cittadini sui rischi ad esso associati.

La letteratura scientifica sul tema della qualità dell'aria (con focus sul radon) e dell'efficientamento energetico presenta diverse variabili, tra queste:

- Destinazione d'uso degli immobili: scuole, residenziale e uffici sono le destinazioni più studiate.

-
- Numero degli edifici oggetto dello studio: due sono gli approcci – analisi statistica di un campione rappresentativo di edifici oppure analisi di un singolo edificio dettagliando specifici aspetti
 - Edifici nuovi o ristrutturazioni
 - Numero di piani dell'edificio, contatto con il terreno e collocazione dei locali tecnici e delle pertinenze.

Di seguito sono dettagliati le attuali evidenze scientifiche, i temi aperti e i temi oggetto di dibattito.

1. Evidenza scientifica

- Vi è correlazione tra alcuni interventi di efficientamento energetico con l'aumento delle concentrazioni di radon
- I differenziali di pressione tra interno ed esterno sono uno dei driver delle variazioni di concentrazioni di radon
- Oltre al terreno anche alcuni materiali da costruzione possono essere fonte di radon (esempio: granito, mattoni e cementi contenenti ceneri, ..)
- Alcune misure di efficientamento energetico sono responsabili della riduzione del tasso di ventilazione negli edifici.
- Le misure che riducono il tasso di ventilazione di un ambiente possono aumentare il radon indoor. Tale aspetto è anche legato alla modifica del differenziale di pressione interno/esterno causata dalla riduzione del tasso di ventilazione.
- La sostituzione delle finestre è l'intervento che è correlato al maggior aumento delle concentrazioni di radon se non abbinato ad un sistema di ventilazione adeguato
- La tipologia di ventilazione (naturale, meccanica, ibrida) e la sua funzionalità influenzano le concentrazioni di radon (possono aumentarle oppure ridurle)
- I seminterrati abitabili presentano potenziale di rischio radon maggiore
- È necessario affrontare il tema del radon congiuntamente a quello del risanamento energetico
- Le abitudini abitative incidono nelle concentrazioni di radon.

Schema generale dell'effetto di alcuni interventi sull'involucro (senza ventilazione meccanica)

2. Temi aperti (dei quali ancora non si hanno risposta)

- Gli edifici nuovi hanno concentrazioni maggiori di quelli vecchi/ di quelli riqualificati
- I sistemi impiantistici (gas, elettrico, HVAC) possono essere una delle principali vie di accesso per il radon (centrali termiche)

3. Temi oggetto di dibattito (ovvero quelli nei quali ci sono conclusioni contrastanti).

- La geologia e la geomorfologia è direttamente correlata alle concentrazioni di radon negli edifici
- I misuratori economici possono essere utili per la determinazione delle concentrazioni di radon
- La gestione della ventilazione (portate, ricambi dell'aria) in funzione delle concentrazioni di radon.

La letteratura scientifica non italiana deve essere accuratamente valutata per verificare la replicabilità dei risultati nelle tecnologie edilizie nazionali. Ovvero, le tipologie costruttive attuali e anche del passato di stati quali ad esempio la Danimarca, la Finlandia e l'Olanda sono molto differenti rispetto alle tecnologie costruttive italiane. Inoltre anche le tecnologie impiantistiche sono differenti a causa delle caratteristiche dei relativi contesti climatici. Tale considerazione implica necessità di grande attenzione alle considerazioni riportate in letteratura. Sarebbe infatti di fondamentale importanza replicare gli studi sia statistici che di dettaglio in Italia, con le tipologie costruttive più utilizzate.

Bibliografia

Arvela H, Holmgren O, Reisbacka H, Vinha J. (2014). Review of low-energy construction, air tightness, ventilation strategies and indoor radon: results from Finnish houses and apartments. *Radiat Prot Dosimetry*. 162(3): 351-63. doi: 10.1093/rpd/nct278. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24243314/>

Baeza A., García-Paniagua, J., Guillén J., Montalbán B. (2018). Influence of architectural style on indoor radon concentration in a radon prone area: A case study. *Sci Total Environ*. 1;610-611:258-266. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.056. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717320545?via%3Dihub>

Collignan B, Le Ponner E, Mandin C. (2016). Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics. *J Environ Radioact.* 165:124-130. doi: 10.1016/j.jenvrad.2016.09.013. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X16304222?via%3Dihub>

Collignan B, Powaga E. (2019). Impact of ventilation systems and energy savings in a building on the mechanisms governing the indoor radon activity concentration. *J Environ Radioact.* 196:268-273. doi: 10.1016/j.jenvrad.2017.11.023.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X17306926?via%3Dihub>

Derbez M., Wyart G., Le Ponner E., Ramalho O., Ribéron J., Mandin C. (2018). Indoor air quality in energy-efficient dwellings: Levels and sources of pollutants. *Indoor Air.*, 28(2):318-338. doi: 10.1111/ina.12431. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ina.12431>

Du L, Leivo V., Prasauskas T, Täubel M, Martuzevicius D, Haverinen-Shaughnessy U. (2019). Effects of energy retrofits on Indoor Air Quality in multifamily buildings. *Indoor Air.*; 29(4):686-697. doi: 10.1111/ina.12555. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ina.12555>

Epstein L., Koch J., Riemer T., Orion I., Haquin G. (2014). Radon concentrations in different types of dwellings in Israel. *Radiat Prot Dosimetry.* 162(4): 605-8. doi: 10.1093/rpd/nct346. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24381204/>

European Commission. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials; 1999. DG Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, Radiation Protection 122

Florică Ș, Burghiele BD, Bican-Brișan N, Begy R, Codrea V, Cucos A, Catalina T, Dicu T, Dobrei G, Istrate A, Lupulescu A, Moldovan M, Niță D, Papp B, Pap I, Szacsvai K, Țenter A, Sferle T, Sainz C. (2020). The path from geology to indoor radon. *Environ Geochem Health.* 42(9):2655-2665. doi: 10.1007/s10653-019-00496 -z. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-019-00496-z>

Froňka A. & Jílek K. (2014). Radon entry rate analyses using in situ tracer gas method application. *Radiat Prot Dosimetry.* 160(1⁻³): 143-8. doi: 10.1093/rpd/ncu074. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24736298/>

Fucic A., Fucic L., Katic J *et al.*, 2011 Radiochemical indoor environment and possible health risks in current building technology. *Building and Environment* Volume 180, August 2020, 107067. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.020> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132311001946>

Jiránek M., Kačmaříková V. (2014). Dealing with the increased radon concentration in thermally retrofitted buildings. *Radiat Prot Dosimetry.* 160(1⁻³): 43-7. doi: 10.1093/rpd/ncu104. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24729563/>

-
- Mc Carron B., Meng X., Colclough S. (2020). An Investigation into Indoor Radon Concentrations in Certified Passive House Homes. *Int J Environ Res Public Health*. 10;17(11):4149. doi: 10.3390/ijerph17114149. <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/11/4149/htm>
- McGrath James A., Aghamolaei Reihaneh, O'Donnell James, Byrne Miriam A., Factors influencing radon concentration during energy retrofitting indomestic buildings: A computational evaluation, *Building and Environment* Volume 194, May 2021, 107712.
- Meyer W. (2019). Impact of constructional energy-saving measures on radon levels indoors. *Indoor Air*. 29(4):680-685. doi: 10.1111/ina.12553. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ina.12553>
- Milner J. Shrubsole C., Das P., Jones B., Ridley I., Chalabi Z., Hamilton I., Armstrong B., Davies M., Wilkinson P. (2014). Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study. *BMJ: British Medical Journal* 348. doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.f7493> <https://www.bmj.com/content/348/bmj.f7493>
- Pampuri L., Caputo P., Valsangiacomo C. (2018). Effects of buildings' refurbishment on indoor air quality. Results of a wide survey on radon concentrations before and after energy retrofit intervention. *Sustainable Cities and Society* 42: 100-106. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.007>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670718307121>
- Pigg S, Cautley D, Francisco PW. (2018). Impacts of weatherization on indoor air quality: A field study of 514 homes. *Indoor Air*. 28(2):307-317. doi: 10.1111/ina.12438. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ina.12438>
- Pressyanov D, Dimitrov D, Dimitrova I. (2015). Energy-efficient reconstructions and indoor radon: the impact assessed by CDs/DVDs. *J Environ Radioact*. 143:76-79. doi: 10.1016/j.jenvrad.2015.02.016. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25748339/>
- Ringer W. (2014). Monitoring trends in civil engineering and their effect on indoor radon. *Radiat Prot Dosimetry*. 160(1-3): 38-42. doi: 10.1093/rpd/ncu107. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24729564/>
- Vasilyev AV, Yarmoshenko IV, Zhukovsky MV. (2016). Low air exchange rate causes high indoor radon concentration in energy-efficient buildings. *Radiat Prot Dosimetry* 164(4):601-5. doi: 10.1093/rpd/ncv319. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25977350/>
- Silva, JP., Lopes, N, Curado, A. Nunes L, LopesS. (2022). A pre-diagnosis model for radon potential evaluation in buildings: A tool for balancing ventilation, indoor air quality and energy efficiency. *Energy Reports*. 8. 539-546. 10.1016/j.egyr.2022.02.100. https://www.researchgate.net/publication/358883582_A_pre-diagnosis_model_for_radon_potential_evaluation_in_buildings_A_tool_for_balancing_ventilation_indoor_air_quality_and_energy_efficiency
- Symons P., Rees D., Daraktchieva z., McColl N., et all. 2019. Home energy efficiency and radon: An observational study. *Indoor Air*. 2019; 29:854-864.

Vasilyev A. & Yarmoshenko I. (2017). Effect of energy-efficient measures in building construction on indoor radon in Russia. *Radiat Prot Dosimetry* 174(3):419-422. doi: 10.1093/rpd/ncw149. <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/174/3/419/2530062?redirectedFrom=fulltext>

Yarmoshenko IV, Vasilyev AV, Onishchenko AD, Kiselev SM, Zhukovsky MV. (2014). Indoor radon problem in energy efficient multi-storey buildings. *Radiat Prot Dosimetry*. 160(1⁻³): 53-6. doi: 10.1093/rpd/ncu110. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24723188/>

Yarmoshenko IV, Onishchenko AD, Malinovsky GP, Vasilyev AV, Nazarov EI, Zhukovsky MV. (2020). Radon interventions around the globe: Radon concentration in conventional and new energy efficient multistorey apartment houses: results of survey in four Russian cities. *Int J Environ Res Public Health*. 10;17(11):4149. doi: 10.3390/ijerph17114149. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-75274-4.pdf>

Wang C, Wang J, Norbäck D. A Systematic Review of Associations between Energy Use, Fuel Poverty, Energy Efficiency Improvements and Health. *Int J Environ Res Public Health*. 2022 Jun 16;19(12):7393. doi: 10.3390/ijerph19127393. PMID: 35742650; PMCID: PMC9223700. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9223700/pdf/ijerph-19-07393.pdf>

Wei Wenjuan; Wargocki Pawewl, Mandin Corinne. (2022). PredicTAIL, a prediction method for indoor environmental quality in buildings undergoing deep energy renovation based on the TAIL rating scheme. *Energy & Buildings* 258(11) 1839.

World Health Organization. (2021). Radiation. In *Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment*. WHO. <https://www.jstor.org/stable/resrep35857.12>

Zannoni G. Energy saving and indoor air pollution in Italy: the radon problem. *Open Access J Sci*. 2018;2(3):188–191. DOI: 10.15406/oajs.2018.02.00068

Zhukovsky M.V. & Vasilyev A.V. (2014). Mechanisms and sources of radon entry in buildings constructed with modern technologies. *Radiat Prot Dosimetry*. 160(1⁻³): 48-52. doi: 10.1093/rpd/ncu111. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24729591/>

3.2.4 Misure di mitigazione del radon

Introduzione

Nella costruzione di nuovi edifici (prevenzione) e negli edifici esistenti (mitigazione o bonifica) è importante considerare la problematica del radon. Le principali strategie di prevenzione e mitigazione del radon si concentrano su:

- sigillatura delle vie di ingresso del radon;

-
- ventilazione;
 - inversione delle differenze di pressione interna e il terreno sottostante l'edificio, con l'impiego di tecniche di depressurizzazione del suolo.

Nella maggior parte dei casi, è necessaria una combinazione di strategie per ottenere la massima riduzione delle concentrazioni di radon. Quando si effettuano interventi di efficientamento energetico negli edifici va prestata particolare attenzione alla ventilazione per evitare una maggiore concentrazione di radon indoor che potrebbe causare una maggiore esposizione e un aumento del rischio di cancro ai polmoni.

Sebbene sia noto l'effetto sulla salute del radon, responsabile di circa il 15% dei decessi per cancro ai polmoni nel mondo (OMS, 2009), solo alcuni paesi hanno intrapreso azioni costituzionali per affrontare la minaccia. Il Codice Residenziale Internazionale (2010), asserisce che un metodo efficace di controllo del radon dovrebbe essere attuato in tutte le nuove costruzioni, in particolare nelle aree dove i livelli di radon sono elevati. Il Consiglio dell'Unione Europea (2013) ha emanato la Direttiva sugli standard di sicurezza di base nel 2013 che richiama gli Stati ad affrontare il problema del radon sviluppando piani d'azione nazionali. Molti stati europei e la maggior parte dei paesi degli Stati Uniti hanno adottato codici edilizi conformi agli standard internazionali (Conferenza Nazionale delle Legislature statali, 2015).

Le politiche adottate includono regolamenti edilizi che raccomandano tassi per la ventilazione e prescrivono la sigillatura delle vie d'ingresso del radon. I paesi hanno adottato linee guida che specificano i livelli di riferimento per le abitazioni in termini di concentrazione media annua. Un esempio è il livello di riferimento del radon (300 Bq m^{-3}) per le abitazioni, dell'International Atomic Energy Agency General Safety Requirements Part 3 (GSR Part 3), co-sponsorizzato da otto organizzazioni, tra cui l'OMS (International Atomic Energy Agency, 2014).

Per ridurre il rischio di esposizione della popolazione l'OMS raccomanda un livello di riferimento di 100 Bq m^{-3} . Se non è possibile raggiungere tale livello si raccomanda di non superare i 300 Bq m^{-3} .

Nonostante la presenza di codici edilizi aggiornati, manuali gratuiti e linee guida, ai proprietari di case nella maggior parte dei paesi non è richiesto di testare e bonificare il radon. Non è nemmeno necessario dichiarare le concentrazioni del radon negli edifici durante le transazioni immobiliari.

Numerosi studi in tutto il mondo hanno valutato l'efficacia di interventi di mitigazione attivi (utilizzo di un elettroventilatore), passivi (solo da ventilazione naturale) nonché altre tecniche di mitigazione. Tuttavia, quale sia il miglior sistema di mitigazione nei diversi contesti non è ancora chiaro.

Nella nostra ricerca abbiamo esaminato studi condotti in tutto il mondo per comprendere quale sia il metodo più efficace nel ridurre il radon al di sotto del livello

di riferimento; e che sia anche conveniente, attuabile nella maggior parte degli edifici e di facile manutenzione.

La maggior parte degli studi sono stati condotti nel Nord America (Canada), in Europa e in Cina, quello che si nota è che i livelli di riferimento normativi nei diversi paesi differiscono in modo sostanziale; pertanto, gli obiettivi relativi alle concertazioni da raggiungere sono spesso molto diversi e a volte molto distanti dai livelli raccomandati dall'OMS per la protezione della salute.

Stato dell'arte

Arvela *et al.* (2012) hanno effettuato uno studio in Finlandia sui livelli indoor di radon e hanno visto che la percentuale di case residenziali che superano il livello di riferimento per le nuove costruzioni (200 Bq m^{-3}) era del 16% in un'indagine nazionale a campione effettuata nel 2006-2007. La media nazionale e la mediana per edifici residenziali bassi erano 121 e 75 Bq m^{-3} , rispettivamente. In 6 delle 20 province finlandesi, la percentuale di case che superava i 200 Bq m^{-3} era del 25-50 %, la concentrazione mediana variava da 120 a 200 Bq m^{-3} . I tipi di suolo permeabile, la concentrazione di uranio nei suoli e il clima freddo sono le principali ragioni per l'elevata concentrazione di radon in ambienti chiusi. Complessivamente l'80% degli edifici residenziali finlandesi bassi rappresenta un tipo di fondazione con un alto rischio di radon. Le misure preventive nelle nuove costruzioni sono quindi una parte essenziale dei tentativi di ridurre le concentrazioni di radon nelle abitazioni. Il codice edilizio per la prevenzione del radon e le linee guida pratiche associate sono state riviste in Finlandia nel 2003-2004. Da allora, le misure preventive sono diventate più comuni e le pratiche di prevenzione più efficaci.

Il codice edilizio finlandese per la costruzione delle fondazioni richiede che il radon sia preso in considerazione in tutti i lavori di costruzione. Le case dovrebbero essere progettate e costruite in modo che la concentrazione interna di radon sia mantenuta $< 200 \text{ Bq m}^{-3}$. La guida per le nuove costruzioni resistenti al radon si concentra sulle pratiche necessarie nelle case con fondazioni a terra e nelle case con pareti a contatto con il suolo. Le misure preventive essenziali sono l'installazione di tubazioni preparatorie per il radon sotto la soletta e la sigillatura del giunto tra la soletta e il muro delle fondazioni con una striscia di feltro bituminoso. In un sistema passivo di tubazioni per il radon, lo sfiato è sul tetto. La differenza di temperatura e il vento creano un flusso d'aria che riduce la concentrazione di radon presente nella superficie porosa della ghiaia del sottosuolo. Quando è necessario, si può installare un ventilatore nello scarico delle tubature che, quando è attivo, riduce efficacemente la concentrazione di radon all'interno. Le misurazioni del radon sono durate 2 mesi, da marzo a maggio 2009. Il rilevatore di tracce alfa, che è stato utilizzato, registra la concentrazione media di radon durante il periodo di misurazione. Un questionario standard è stato somministrato per la raccolta delle informazioni relative alle caratteristiche delle fondazioni di altre caratteristiche generali degli edifici. Un

questionario speciale per la prevenzione del radon è stato progettato per ottenere informazioni sulle misure preventive adottate, sui lavori di impermeabilizzazione e sull'installazione di tubature per il radon. Nell'indagine sulle nuove costruzioni, sono state effettuate misure in un totale di 1561 case residenziali basse; di cui 1070 unifamiliari e 491 villette a schiera. Il tasso finale di partecipazione alla survey con misure valide è stato del 48% (2866 case). La concentrazione media di radon negli appartamenti (49 Bq m^{-3}) era notevolmente inferiore a quella nelle case basse (121 Bq m^{-3}). La media nazionale per tutte le 2866 case era di 96 Bq m^{-3} . Le concentrazioni estive sono risultate inferiori a quelle invernali e primaverili. La concentrazione media di radon di tutte le case residenziali basse misurata nell'indagine sulle nuove costruzioni è stata di 95 Bq m^{-3} e la mediana di 58 Bq m^{-3} . Le case sono state completate tra il 2006-2008. I risultati erano quindi comparabili con quelli del precedente sondaggio a campione (2006). Le distribuzioni geografiche delle case in queste due indagini erano abbastanza simili. Il confronto dei risultati ha rilevato che i valori medi e mediani del radon nell'indagine sulle nuove costruzioni (2009) erano inferiori del 21 e 23% rispetto ai rispettivi valori medi annui dell'indagine a campione (2006). Probabilmente tale difformità in parte è da ascrivere a differenze di temperatura media registrata nelle due indagini. L'analisi dei risultati dell'indagine sulle nuove costruzioni ha rilevato differenze regionali nell'attività di prevenzione del radon, che era chiaramente più alta nelle province con le più elevate concentrazioni di radon indoor. La concentrazione media di radon per tutto il paese nella nuova indagine sulle nuove costruzioni (2009) era del 33% inferiore alla concentrazione invernale dell'indagine a campione (2006). Nella zona ad alto contenuto di radon, la diminuzione è stata del 47% e nel resto del paese del 26%. Le concentrazioni di radon erano di gran lunga inferiori nelle case con una lastra di cemento monolitica e in quelle con un'intercapedine (concentrazione media di radon 45 Bq m^{-3} e mediana di 30 Bq m^{-3}), rispetto alle case con fondazioni a platea, (media 97 Bq m^{-3} e mediana di 68 Bq m^{-3}) e alle case seminterrate con pareti a contatto con il suolo (media 161 Bq m^{-3} e mediana 97 Bq m^{-3}). La ragione principale di questi valori elevati era l'assenza di adeguate misure preventive del radon.

Le misure preventive per il radon sono state classificate in quattro categorie:

- (1) nessuna misura;
- (2) tubazioni passive per il radon (scarico aperto sopra il tetto) e sigillatura con feltro bituminoso (fig. 4);
- (3) tubazioni passive per il radon senza impermeabilizzazione (fig. 5)
- (4) conduttura del radon aperta o tappata; il proprietario della casa non poteva confermare se lo scarico fosse aperto sopra il tetto o tappato.

Le misure preventive erano state eseguite nel 54% delle case unifamiliari con fondazioni in muratura. Questa percentuale era del 92% nelle sei province con la più alta concentrazione interna di radon e del 38% altrove nel paese. Rispetto al

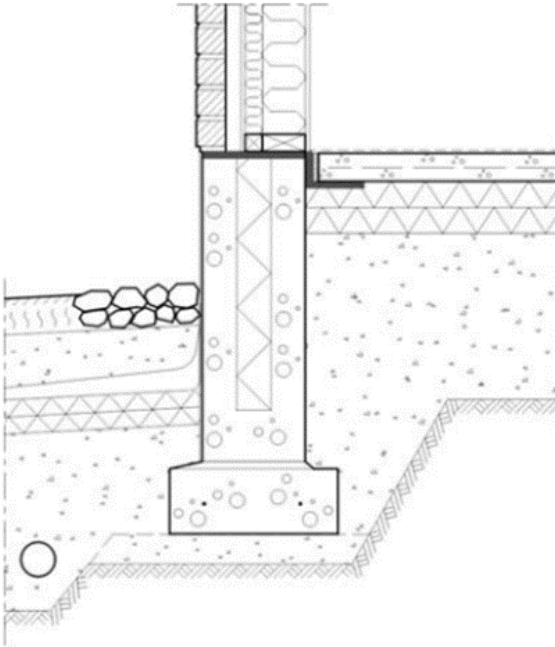
sondaggio a campione del 2006, i nuovi regolamenti emessi nel 2003-2004 hanno raddoppiato le attività di prevenzione a livello nazionale.

Nelle case monofamiliari con soletta sul terreno, le tubature passive per il radon e l'installazione di una striscia di feltro bituminoso hanno ridotto la concentrazione interna di radon del 57%. La riduzione media per il radon senza misure di impermeabilizzazione era del 41 %.

Nel considerare la piccola differenza tra le case con tubazioni passive e sigillatura e quelle con le sole tubazioni passive, va notato che il lavoro di sigillatura era spesso difettoso. Nel caso degli edifici semiinterrati e interrati, l'installazione di tubazioni passive ha ridotto i valori della mediana del 30%. I limiti di confidenza erano molto più ampi rispetto ai risultati per le case unifamiliari, a causa del basso numero di case e della complessità delle operazioni di sigillatura. Le concentrazioni superiori al livello di riferimento erano anche più frequenti nelle case seminterrate. Le strategie di ventilazione e la loro prevalenza nelle case costruite in epoche diverse possono anche modificare le concentrazioni di radon. La ventilazione naturale era la strategia prevalente fino agli anni '80. Nel 2000-2005 la prevalenza della MSEV (ventilazione forzata) era del 45%, mentre nelle case unifamiliari la prevalenza era del 76%. Nel 2004, il codice edilizio, per rispondere ai requisiti di risparmio energetico, ha costretto l'industria edilizia a introdurre MSEV con proprietà di recupero del calore. Determinando una prevalenza di MSEV di quasi il 100% in tutti gli edifici costruiti tra 2006-2008.

Secondo i risultati di questo studio, le attività di prevenzione variano ampiamente tra le diverse aree del Paese. Le autorità locali richiedono comunemente misure di prevenzione nelle aree con le più alte concentrazioni di radon, il che ha anche portato a una considerevole diminuzione delle concentrazioni interne di radon. D'altra parte, nelle zone in cui non è stata fatta alcuna prevenzione, le concentrazioni di radon all'interno sono rimaste come prima o sono addirittura aumentate. Gli edifici di nuova costruzione sottoposti a misure di mitigazione del radon hanno mostrato minori livelli di umidità. Le misure di prevenzione possono anche ridurre l'ingresso di altre sostanze nocive dal suolo negli spazi abitativi. L'effetto delle tubature passive per il radon è così significativo che l'installazione delle stesse è raccomandata in tutto il paese. Gli interventi di prevenzione hanno ridotto le concentrazioni interne di radon nelle case costruite dopo il 2006. Tali interventi potrebbero portare a una riduzione media del 50% delle concentrazioni, riducendo in modo considerevole l'esposizione al radon e i conseguenti effetti nocivi per la salute.

Fig. 4. SIGILLATURA DELLO SPAZIO TRA IL MURO DI FONDAZIONE E LA SOLETTA SECONDO LE LINEE GUIDA FINLANDESI (ARVELA ET AL., 2012)



suolo, la misurazione istantanea della concentrazione di radon sotto il pavimento, la permeabilità degli strati del sottopavimento, la misurazione istantanea della differenza di pressione tra lo strato del sottopavimento e l'interno.

L'analisi ha rilevato che l'efficienza calcolata per le singole case varia tra il 70 e il 98%, il che significa che la concentrazione interna di radon diminuisce dal 30% fino al 2% dei valori iniziali. Si stima che l'intervento di depressurizzazione sia efficace nell'80% dei casi, confermando l'ipotesi che questa sia una delle più efficaci azioni correttive.

Grazie alla bonifica tramite SSD, la concentrazione media interna di radon è diminuita da 1476 a 142 Bq m⁻³ cioè a 1/10 del livello iniziale. Inoltre, è stato riscontrato che l'efficienza varia tra il 70 e il 98%, che è due volte maggiore rispetto all'applicazione delle membrane anti-radon. L'efficienza è principalmente influenzata dalla permeabilità del suolo e dall'ermeticità dei pavimenti che poggiano a terra. Una maggiore efficienza è stata riscontrata per le case con una maggiore ermeticità dei pavimenti e con uno strato di sottopavimento con permeabilità superiore a quella del sottosuolo.

La ricerca ha quindi dimostrato che il sistema SSD raggiunge un'efficienza dell'80%, con un'affidabilità del 94%, e può quindi essere considerato come una delle misure di risanamento del radon più efficaci. Questo studio ha inoltre permesso di identificare i fattori significativi che influenzano l'efficienza della misura. I fattori più importanti sono il rapporto tra lo strato di sottofondo e la permeabilità del suolo più profondo, e l'ermeticità dei pavimenti. Una maggiore efficienza è stata osservata per le case con pavimenti in cemento e con uno strato di sottopavimento con una permeabilità superiore a quella del sottosuolo. In questi casi la lunghezza totale dei tubi forati o perforati può essere significativamente ridotta, e si possono utilizzare ventilatori con una portata inferiore e un consumo energetico minore.

Cosma *et al.* (2015) hanno misurato le concentrazioni di radon indoor stagionalmente in 303 edifici residenziali in Romania, mediante rilevatori di radon CR-39. Le misurazioni sono state effettuate da dicembre 2010 a giugno 2011. È stata rilevata una concentrazione media annuale di radon indoor di 241 Bq m⁻³ (±74%), con valori massimi di circa 2000 Bq m⁻³. Circa il 10% delle case esaminate presenta in almeno una stanza al piano terra valori di concentrazione interna di radon superiori a 600 Bq m⁻³. L'analisi statistica dei dati misurati conferma che i livelli di concentrazione di radon indoor dipendono principalmente dal suolo sottostante e dalle caratteristiche dell'edificio. In 20 case in cui i livelli di radon indoor superavano i 600 Bq m⁻³, il radon è stato ulteriormente misurato, al fine di attuare tecniche di mitigazione.

L'analisi delle fonti e dei livelli di radon interni è stata effettuata in 20 case nella regione di Bait, a-S, tei ed è stata selezionata una casa pilota per sviluppare, testare e attuare le tecniche di mitigazione del radon più efficaci.

L'obiettivo del lavoro è stato quello di testare le tecniche di mitigazione del radon basate su:

-
- depressurizzazione e pressurizzazione del sottosuolo dell'edificio;
 - combinazione del sistema di depressurizzazione del sottosuolo con un ventilatore elettrico ed eolico;
 - applicazione di una membrana barriera anti-radon,
 - combinazione del sistema di depressurizzazione del suolo con la membrana anti-radon.

La casa pilota (da Fanat, e, contea di Bihor) è una casa familiare al piano terra, costruita tra il 1976 e il 1978. Solo una parte abitata della casa è stata utilizzata per le analisi e gli interventi di mitigazione.

Le misurazioni diagnostiche dettagliate del radon eseguite all'interno e intorno alla casa consistono in:

- ispezione della casa, determinazione dell'indice di radon del sito di costruzione;
- rilevamento di perdite tra il sottosuolo e l'edificio;
- misurazioni continue delle concentrazioni interne di radon e misurazioni della dose gamma.

Per valutare le fonti e i percorsi di radon più importanti all'interno dell'edificio, sono state eseguite misurazioni continue delle concentrazioni di radon indoor. Per identificare le anomalie gamma (o disomogeneità) del campo di radiazioni gamma nella casa, che indicano la presenza di materiali radioattivi nei muri, nei pavimenti o nelle otturazioni, sono state effettuate misurazioni della dose gamma. Dalle misure è risultata evidente l'influenza dei materiali da costruzione sui livelli di radioattività interna.

Le tecniche di mitigazione basate sulla depressurizzazione e la pressurizzazione del sottosuolo dell'edificio sono state eseguite da quattro estrattori di radon attivi montati nel sottosuolo della cantina. Tre di questi sono stati installati all'esterno e uno al centro della casa, dove sono state misurate le più alte concentrazioni di radon. Gli estrattori sono stati testati in due modalità di lavoro:

- depressurizzazione tramite l'estrazione del gas dal sottosuolo dell'edificio, aumentando il flusso d'aria sotto il pavimento e riduzione della quantità di gas radon indoor;
- pressurizzazione del sottosuolo dell'edificio, ottenendo così un leggero aumento di pressione rispetto alla pressione atmosferica;
- combinazione di depressurizzazione del sottosuolo mediante un ventilatore elettrico e uno eoliano di 30 W, e una membrana anti-radon.

Le tecniche di mitigazione basate sulla depressurizzazione e la pressurizzazione del sottosuolo dell'edificio sono state testate in 12 esperimenti. Sono state misurate continuamente le concentrazioni di radon nell'abitazioni prima e dopo l'avvio dei

ventilatori elettrici degli estrattori. Il periodo prima di applicare le tecniche di mitigazione è stato di 10 giorni nel marzo 2012, in cui la concentrazione media era compresa tra 297 Bq m^{-3} e 787 Bq m^{-3} nelle diverse stanze.

I risultati preliminari delle misurazioni confermano che la fonte più importante di radon interno è il suolo del sito di costruzione.

I risultati del test del sistema di depressurizzazione del sottosuolo mostrano un'efficienza dal 75% al 50%. Nel caso della combinazione del sistema di depressurizzazione del sottosuolo tramite eolico e ventilatore elettrico, i risultati dei test mostrano un'efficienza settimanale per il ventilatore eolico (<10%) e una buona efficienza per i ventilatori eolici ed elettrici accoppiati (tra il 40% e l'80%). Le tecniche di mitigazione utilizzate hanno comportato livelli di radon inferiori a 200 Bq m^{-3} .

L'uso della membrana anti-radon mostra un'efficienza di mitigazione superiore al 70%, e la combinazione della membrana con il sistema di depressurizzazione del suolo mostra un'efficienza superiore all'80%.

I risultati delle misurazioni post-mitigazione per il piano terra erano tutti più bassi dei corrispondenti livelli del seminterrato.

Brossard *et al.* (2015) hanno effettuato misure delle concentrazioni di radon per 2 mesi e mezzo in 424 edifici a Maniwaki (Québec). Dalle analisi è risultato che metà degli edifici aveva concentrazioni di radon $>200 \text{ Bq m}^{-3}$ (valori raccomandati dalle linee guida radon). Sono state effettuati interventi di mitigazione tra il l'autunno del 2009 e la primavera del 2011. Gli interventi di mitigazione hanno previsto l'utilizzo dei ventilatori in diverse posizioni e con diversi punti di scarico. Le tecniche di scarico sopra il livello del suolo (AGL) per la depressurizzazione attiva del suolo (ASD) sono stati in grado di ridurre il radon a livelli accettabili. Lo studio raccoglie informazioni disponibili su un grande numero di case e pone attenzione sull'impatto del ghiaccio, il suo possibile impatto sulla riduzione dell'eliminazione del radon e sulla efficacia degli SSDS che operano in climi freddi. Nello studio sono state esaminate 85 case unifamiliari con fondazioni in cemento. Misurazioni iniziali sono state condotte nel seminterrato per circa due mesi e mezzo durante la primavera del 2009. Durante l'inverno sono state effettuate misure post mitigazione. Oltre alle misurazioni post-mitigazione effettuate nel seminterrato, sono stati testati anche i livelli del piano terra per indagare il potenziale di riduzione del radon in 22 case con sistemi di depressurizzazione sotto il livello del suolo (AGL). Le aperture nello spazio del sottopavimento (crepe e giunti pavimento-parete) sono state solitamente sigillate con del calafataggio acrilico. Sono stati utilizzati ventilatori di diverse dimensioni e sono state scavate nelle case sottoposte a mitigazione con sub slab depressurization (SSD).

Tra gli obiettivi dello studio vi era quello di confrontare le prestazioni dei sistemi di depressurizzazione attiva del suolo a degli scenari di scarico (ARL e AGL)⁹³ in termini di riduzione del radon e di congelamento dello scarico. I profili di riduzione del radon sono simili per entrambi gli scenari, ma il ghiaccio ostruttivo si è verificato 3,5 volte più spesso nei sistemi di scarico ARL che in quelli AGL con un solo caso di ostruzione grave (più del 50% della superficie del tubo) segnalato per lo scarico ARL. Le pressioni di aspirazione del radon non sono state compromesse, così come le riduzioni di radon.

Sei casi di ostruzione grave degli scarichi ARL sono stati segnalati dai proprietari di casa nel gennaio 2013, verificatisi dopo 4 giorni di temperature medie tra -24 °C e -28° C. I quattro tentativi di mitigazione fatti con l'installazione di ventilatori a recupero di calore (HRV) non hanno avuto successo.

Nella mitigazione del radon raggiungere i livelli di concentrazione di radon esterno è generalmente il miglior risultato che si possa ottenere. Gli studi e le misure precedenti non hanno preso in considerazione le concentrazioni di radon nell'aria esterna. Una stima più realistica del potenziale di riduzione del radon potrebbe essere ottenuta considerando la media delle misurazioni esterne, specialmente quando i livelli esterni di radon sono elevati.

Dowdall *et al.* (2017) descrivono il protocollo di indagine progettato per misurare la concentrazione media nazionale di radon indoor in Irlanda e la sua attuazione in un anno. L'obiettivo principale dell'indagine era determinare l'attuale concentrazione di radon indoor ponderata geograficamente per l'Irlanda e stabilire un valore base rispetto al quale è possibile valutare i progressi futuri dell'NRCS⁹⁴.

La concentrazione geografica media di radon indoor nazionale è una metrica utile per valutare l'effetto di qualsiasi intervento messo in atto per ridurre i livelli di radon. Confrontando la concentrazione media di radon indoor prima e dopo l'intervento, è possibile effettuare una valutazione dell'efficacia di tale intervento. Confrontando le concentrazioni medie di radon nelle case costruite prima e dopo l'introduzione dei regolamenti edilizi nel 1998, è possibile valutare l'efficacia dell'obbligo di installare una membrana anti-radon nei nuovi edifici nelle aree con elevate concentrazioni di radon.

È stato messo a punto un protocollo di indagine in cui il risultato fosse paragonabile a quello dell'NRS (National Radon Survey 2002) che ha riscontrato un valore medio di 89 Bq m⁻³.

L'approccio adottato è stato quello di:

⁹³ Scarico sopra il livello del suolo con il ventilatore situato nel seminterrato (AGL) o scarico sopra la linea del tetto con il ventilatore posizionato nel sottotetto (ARL)

⁹⁴ National Radon Control Strategy (www.epa.ie)

-
- 1) definire la metodologia per la selezione dei quadrati della griglia da campionare;
 - 2) utilizzare la simulazione Monte Carlo per determinare il numero richiesto di quadrati e abitazioni della griglia;
 - 3) selezionare i quadrati della griglia da cui verranno scelte casualmente le abitazioni;
 - 4) selezionare le abitazioni effettive da invitare a partecipare.

Solo i quadrati della griglia con più di 5 misurazioni del radon nella NRS del 2002 sono stati inclusi nel processo di stratificazione. Ciò ha fornito un totale di 751 quadrati della griglia stratificati e suddivisi in categorie di rischio radon. I dati NRS del 2002 hanno dimostrato che la distribuzione delle concentrazioni di radon indoor in qualsiasi quadrato della griglia potrebbe essere modellata come una distribuzione lognormale con un offset di 6 Bq m^{-3} , considerando il radon ambientale di fondo. Questa metodologia di indagine ha richiesto misurazioni del radon in 600 case selezionate casualmente da quadrati della griglia rappresentativi del rischio di radon e della posizione geografica.

Questo protocollo di indagine è risultato valido per stimare l'attuale concentrazione media nazionale di radon indoor, con un livello di accuratezza paragonabile alla metodologia NRS del 2002. Il numero di inviti emessi per l'indagine è stato 3878; gli indirizzi sono stati selezionati casualmente da An Posts Geodirectory⁹⁵. Sono state ricevute in totale 864 risposte e 755 sono state accettate. Un certo numero di risposte (109) sono state scartate in quanto si trovavano in riquadri della griglia già saturi o erano stati restituiti da indirizzi di misurazione al di fuori del quadrato della griglia richiesto. Complessivamente il tasso di risposta al sondaggio è stato del 22%, con un range compreso tra il 7 e il 50% a seconda del quadrato della griglia. Il protocollo di indagine richiedeva una dimensione del campione di 10 misurazioni per quadrato della griglia. A ciascuno dei 755 partecipanti sono stati forniti due rilevatori di radon insieme alle istruzioni per posizionare i rilevatori come descritto nel protocollo di misurazione dell'EPA. Inoltre, ai partecipanti è stato chiesto di completare un breve questionario, il cui scopo principale era quello di raccogliere informazioni sulla data di costruzione della casa in modo da poter esaminare l'efficacia del regolamento edilizio introdotto nel 1998.

Al ritorno in laboratorio, i rivelatori sono stati analizzati utilizzando le procedure di prova dei servizi di misurazione del radon e delle radiazioni dell'EPA, accreditate secondo ISO 17025 dall'Irish National Accreditation Board (INAB). I risultati della misurazione del radon delle abitazioni sono stati confrontati con il livello di riferimento nazionale di 200 Bq m^{-3} . Ogni partecipante ha ricevuto un rapporto di prova contenente i risultati della misurazione del radon. Laddove un risultato

⁹⁵ Geodirectory, 2016.

registrasse un valore al di sopra del livello di riferimento nazionale di 200 Bq m^{-3} , sono state fornite anche indicazioni sui metodi di bonifica del radon. La concentrazione di fondo di 6 Bq m^{-3} è stata sottratta dai livelli di radon indoor. Utilizzando il protocollo di misura dell'EPA, la concentrazione media di radon è risultata pari a 95 Bq m^{-3} . Un totale di 53 abitazioni esaminate presentava concentrazioni di radon superiori al livello di riferimento nazionale. La concentrazione massima misurata era di 1001 Bq m^{-3} in un edificio nella contea di Wexford, si tratta di una costruzione a due piani in un'area HRA⁹⁶, edificata prima dell'introduzione del requisito nei regolamenti edilizi del 1998. La stima media nazionale non ponderata del radon indoor nelle 649 case era di 82 Bq m^{-3} . Applicando il fattore di ponderazione di 1.07, la stima ponderata del livello medio nazionale di radon indoor era di 77 Bq m^{-3} , con un intervallo di confidenza del 95 % compreso tra 71 Bq m^{-3} e 83 Bq m^{-3} , evidenziando una riduzione del 13% della concentrazione media nazionale di radon, indicativa dell'efficacia degli interventi effettuati per ridurre i livelli di radon indoor dalla fine degli anni '90. Case costruite prima del 1998 hanno registrato una concentrazione media di radon di 86 Bq m^{-3} rispetto ai 64 Bq m^{-3} delle case edificate dopo il 1998, con una riduzione del 26%. La concentrazione media di radon nelle case costruite prima del 1998 è paragonabile alla concentrazione media nazionale di radon indoor di 89 Bq m^{-3} rilevata nella NRS del 2002, dove si può presumere che la maggior parte delle case sia stata costruita prima del 1998.

Il numero di abitazioni che supera il livello di riferimento di 200 Bq m^{-3} è risultato essere l'8% in questa indagine, rispetto al 9% nella NRS del 2002.

Concludendo l'analisi dei dati per data di costruzione mostra che i livelli di radon negli edifici successivi al 1998 sono inferiori rispetto a quelli precedenti. Ciò indica che l'introduzione di misure preventive contro il radon nei nuovi edifici è stata efficace nel ridurre la concentrazione media nazionale di radon indoor con una conseguente riduzione dell'esposizione della popolazione irlandese al gas radon.

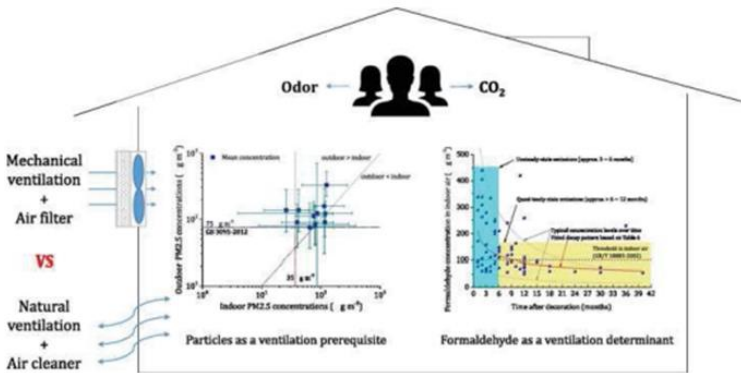
Ye *et al.* (2017) in questa revisione si sono concentrati sui principali inquinanti indoor (bioeffluenti, particelle, VOC, SVOC, muffa/umidità e radon) negli edifici residenziali in Cina, esaminando la letteratura scientifica disponibile e riassumendo i dati di concentrazione indoor. Esaminando i metodi di ventilazione che possono determinare effetti avversi acuti e cronici sulla salute, sono state messe a confronto le metodologie di ventilazione. Le due modalità di ventilazione utilizzate negli edifici residenziali cinesi sono la ventilazione naturale con un depuratore d'aria (modalità 1) e la ventilazione meccanica con un'unità di filtraggio dell'aria (modalità 2), le due metodologie sono state confrontate in termini di applicabilità e adattabilità in Cina. (vedi fig. 6)

Si presume che la modalità 1 sia in grado di soddisfare i requisiti del tasso di ventilazione, anche se l'attuale standard GB 50736-2012 si applica solo alle abitazioni

⁹⁶ High radon area

che hanno installato sistemi di ventilazione meccanica. Entrambe le modalità hanno il potenziale per raggiungere una buona IAQ. Tuttavia, la differenza è che la modalità 1 ha lo scopo di soddisfare il tasso di ventilazione minimo, mentre la modalità 2 lo soddisfa intrinsecamente.

Fig. 6. YE ET AL. (2017) MODALITÀ DI VENTILAZIONE DIREZIONALE CHE MIGLIORANO LA IAQ



Gli autori riportano le concentrazioni del radon indoor in edifici residenziali urbani e rurali in 30 città cinesi. Le concentrazioni massime rilevate sono 550 Bq m⁻³ e sono state riscontrate nei nuovi edifici. La concentrazione di radon variava negli edifici costruiti prima del 1980, 1980s, 1990s e dopo 2000 in un range compreso tra 7 Bq m⁻³ a 107 Bq m⁻³, tra 6 Bq m⁻³ e 200 Bq m⁻³, tra 1.9 Bq m⁻³ e 167.6 Bq m⁻³ e 5 Bq m⁻³ e 238 Bq m⁻³ in condizioni di normale ventilazione. Considerando che la concentrazione media annuale raccomandata da yGB/T 18883-2002 è di 400 Bq m⁻³, l'inquinamento di radon indoor negli edifici cinesi è accettabile. Al di sotto dei 400 Bq m⁻³ non vanno intraprese misure di mitigazione. Anche se i livelli di concentrazione di radon indoor nelle abitazioni cinesi non sono generalmente critici, la ventilazione è ancora un fattore cruciale per ridurre l'esposizione degli occupanti al radon indoor. Tuttavia, l'evidenza mostra che la relazione esposizione-risposta è lineare, senza una soglia (OMS, 2010), indicando che, minore è la concentrazione di radon, minore è l'esposizione e l'impatto sulla salute; tale assunzione valida per tutti gli inquinanti è particolarmente rilevante per l'esposizione al radon, per i suoi gravi effetti sanitari. Se fossero adottati i valori suggeriti dalle linee guida dell'OMS come limite di concentrazione, il quadro dell'esposizione al radon in Cina non sarebbe rassicurante. Da questo studio si evince come la ventilazione sia ancora fondamentale per ridurre la concentrazione di radon e che la ventilazione meccanica sia più affidabile ed efficace, rispetto alla ventilazione naturale.

Le modalità analizzate per il miglioramento dell'IAQ per gli edifici residenziali cinesi sono: 1) ventilazione naturale (o finestra) con un filtro dell'aria; e 2) ventilazione

meccanica con un'unità di filtrazione dell'aria. Non è ancora chiaro quale modalità sia migliore per determinate condizioni. Sia gli ambienti esterni che quelli interni, nonché i costi iniziali e il consumo energetico devono essere valutati attentamente prima di selezionare una delle due modalità. La selezione della modalità di attuazione del tasso di ventilazione dovrebbe basarsi sia sui potenziali effetti sanitari sia sulle condizioni ambientali ed economiche.

Tunno *et al.* (2017) hanno misurato le concentrazioni di radon in 438 scuole in provincia di Lecce, riscontrando i livelli di radon ($215 + 20 \text{ Bq m}^{-3}$) più elevati della Regione ($52 + 2 \text{ Bq m}^{-3}$). Il 7% delle scuole aveva valori superiori ai 500 Bq m^{-3} , è stato pertanto programmato un piano di azione per la bonifica del radon. Il progetto ha elaborato protocolli di misurazione del radon e documenti tecnici per identificare sistemi di controllo del radon specifici per ogni tipologia di edificio (tipo di fondazioni, materiali da costruzione, età della costruzione, ecc.) Il progetto ha anche previsto la formazione di professionisti dell'edilizia. L'analisi dei dati ottenuti nella prima indagine è stata utilizzata per valutare le prospettive future derivanti dall'implementazione del nuovo livello di riferimento del radon nei luoghi di lavoro, introdotto dalle nuove norme di sicurezza dell'UE.

I sistemi di controllo del radon più utilizzati sono stati la depressurizzazione attiva dell'intercapedine (ACD) e la depressurizzazione sub-lab (SSD). In alcuni casi, dove la depressurizzazione passiva e attiva standard non ha funzionato, è stato necessario adottare la pressurizzazione positiva dell'aula (CP). Un'efficace pressurizzazione positiva degli spazi interni (aule) è una soluzione vantaggiosa non solo per limitare l'ingresso del radon, ma in quanto comporta una diluizione di altri comuni inquinanti indoor. Il sistema di pressurizzazione positiva consiste in piccoli ventilatori elettrici posti appena sotto la stanza da risanare. Il sistema funziona soffiando aria fresca filtrata nelle aule. Per essere efficace, tuttavia, la pressurizzazione positiva richiede l'ermeticità dell'involucro dell'edificio e ulteriori precauzioni, come la presenza di porte di ventilazione e procedure di gestione accurate. Nella Provincia di Lecce, la concentrazione media interna di radon non superava i 200 Bq m^{-3} nel 66% delle scuole. Inoltre, il 22% delle scuole aveva medie annuali di radon comprese nell'intervallo di $200\text{-}400 \text{ Bq m}^{-3}$, il 7% delle scuole superava l'attuale livello di azione italiano di 500 Bq m^{-3} . Un'analisi aggiornata dei valori con gli standard di sicurezza dell'UE mostra che il 13% delle scuole aveva medie annuali di radon nell'intervallo $300\text{-}500 \text{ Bq m}^{-3}$ con una deviazione standard pari a $393 \pm 52 \text{ Bq m}^{-3}$, una mediana di 390 Bq m^{-3} e un valore medio di 389 Bq m^{-3} , indicando che la percentuale complessiva di scuole situate in aree che necessitano di risanamento maggiore del 20%. Per registrare le variazioni dei livelli di radon prima e dopo i lavori di bonifica, dosimetri passivi a elettrete⁹⁷ sono stati collocati in ogni stanza. In generale, i valori medi di radon pre-risanamento erano compresi tra 337 e 2841 Bq m^{-3} ; i valori più bassi prima del risanamento sono stati trovati dove il monitoraggio settimanale pre-risanamento

⁹⁷ Elettrete: materiale dielettrico che ha una carica elettrica quasi permanente

è stato eseguito durante la stagione più calda. Le medie del radon post-risanamento variavano tra 84 e 644 Bq m⁻³. Nelle prime due settimane dopo l'inizio del lavoro, l'efficacia delle mitigazioni variava dal 26% al 95%. Analizzando i risultati complessivi, si può osservare una riduzione generale dei livelli di radon all'interno degli edifici: le medie del radon dopo il risanamento sono più basse, ma a volte ancora superiori al livello di riferimento UE (nella scuola ID = 10 i livelli riscontrati erano superiori ai 500 Bq m⁻³).

Analogamente, dopo la bonifica i valori di deviazione standard (SD) rilevati erano nell'intervallo 0,6-241 Bq m⁻³, inferiori all'intervallo pre-risanamento (51-506 Bq m⁻³), il che significa che la bonifica ha comportato non solo una diminuzione dei livelli di radon ma anche una distribuzione più uniforme. Gli interventi di bonifica sono risultati efficaci in tutte le scuole eccetto una. Nella maggior parte dei casi le riduzioni erano nell'ordine del 60%-80%, anche se alcune scuole (post risanamento) superavano ancora le concentrazioni annuali di radon di 300 Bq m⁻³; un risultato non ottimale di risanamento probabilmente attribuibile alla permeabilità del suolo sotto l'edificio. Il "fenomeno carsico" può spiegare una concentrazione media di radon indoor nelle scuole molto più alta di quella stimata per l'intera Regione. L'ACD (depressurizzazione del vespaio) generalmente crea un vuoto che intrappola il gas e lo evacua attraverso un tubo fino al tetto; il sistema SSD di solito consiste in un pozzetto (punto di aspirazione), un tubo di sfiato in PVC perforato (diametro = 100 mm) e un ventilatore (potenza elettrica = 85 Watt). Il pozzetto è posizionato a 2⁻³ m in profondità nel terreno, deve essere posizionato almeno 80 cm sotto il livello delle fondazioni e riempito con ghiaia grossa. Per evitare l'ostruzione del foro, il tubo in PVC deve essere rivestito con un materiale "non tessuto". Il sistema è molto efficace, facile da adottare e idoneo ad aree con elevata permeabilità.

Il presente documento descrive un progetto di bonifica di alcuni edifici scolastici e dei relativi aspetti critici rilevanti. In particolare, in alcune scuole il nuovo monitoraggio a lungo termine ha confermato livelli elevati di radon, e la necessità di introdurre sistemi di controllo del radon.

Il controllo di qualità delle misure eseguite con l'EIC ha confermato la riproducibilità dell'acquisizione dei dati e la buona concordanza dei metodi con i risultati del monitoraggio. I dispositivi a elettretre si sono confermati essere un buon strumento quando le misurazioni della concentrazione di radon devono essere eseguite simultaneamente in molti locali e per periodi di tempo non lunghi, come nel caso della bonifica.

Al-Arydah (2018) ha esaminato le cinque provincie canadesi Ontario, Alberta, Manitoba, Québec e British Columbia, che presentavano i livelli di radon più elevati, per rispondere alle seguenti domande:

-
1. Quale provincia ha il più alto carico di KP⁹⁸?
 2. Quale provincia ha il più alto rischio di KP causato dal radon?
 3. Quali sono le percentuali di case con livelli di radon superiori a 200 Bq m⁻³? Quanti casi di KP sono causati da alti livelli di radon?
 4. I sistemi di mitigazione del radon nelle case riducono i casi di KP e il loro carico sulla popolazione?
 5. L'ipotesi BEIR VI⁹⁹ per la popolazione statunitense, che afferma che il 95% dei decessi per KP negli uomini e il 90% dei decessi per KP nelle donne che sono ES¹⁰⁰, è adatta alla popolazione canadese?
 6. Il programma ottimale di mitigazione del radon è efficace?

Sono stati raccolti i dati nel 2009 dei lavoratori fumatori e non fumatori; dati mortalità 2006-2009; dati relativi ai livelli di radon al primo piano delle abitazioni nel periodo ottobre 2010 marzo 2011. L'onere maggiore per KP nel periodo 2006-2009 è stato osservato in Ontario e in Québec. Sono stati stimati il numero di morti per KP causate dal radon indoor a diversi livelli di radon, negli edifici residenziali utilizzando due scenari: fumatori e non fumatori. In Ontario, in Alberta e in British Columbia sono stati riscontrati quattro casi di KP di differenza tra i due scenari; a Manitoba 5 casi di KP; nel Québec 20 casi. È stato quindi calcolato il PAR (Population Attributable Risk) è la frazione di decessi in KP correlati al radon. È stato stimato il numero di decessi per KP causato dal radon indoor a diverse concentrazioni di radon utilizzando due scenari: il 95% dei decessi per KP negli uomini e il 90% dei decessi per KP nelle donne sono ES vs. l'85% dei decessi per KP in entrambi i generi sono ES.

Il PAR è stato calcolato ripetutamente per i differenti livelli di concentrazione del radon (100, 101, 102, ..., 300 Bq m⁻³). Poiché l'efficienza del sistema di mitigazione del radon dipende dalle dimensioni dell'edificio, dal design e dal metodo usato per la mitigazione, il valore target del radon può essere considerato variabile. Pertanto, è stato necessario studiare il PAR in funzione del livello di radon raggiunto considerando un livello d'azione di 200 Bq m⁻³. In Ontario il PAR è stato ridotto del 18%; ad Alberta del 14%; a Manitoba del 35%.; nel Québec e British Columbia del 21%. Inoltre, nel periodo in analisi 2006-2009 si sono registrati i seguenti superamenti dei livelli di azione (200 Bq m⁻³):

- 6% in Ontario, responsabili della perdita di 913 vite;
- 9% in Alberta responsabili della perdita di circa 211 vite;

⁹⁸ Cancro polmonare

⁹⁹ Il modello di esposizione-concentrazione per età (EAC) BEIR VI (National Research Council, 1999), è basato su 11 coorti di minatori, comprendenti più di un milione di anni-persona di osservazione, è il modello di proiezione del rischio radon più completo sviluppato finora.).

¹⁰⁰ Non fumatrici

-
- 19% a Manitoba responsabili di circa 260 vite;
 - 7% in Québec responsabili di circa 972 vite;
 - 5% in British Columbia responsabili di circa 258.

È stato, quindi, dimostrato che vi erano poche differenze nei casi di KP causati dal radon tra i due scenari: 95% delle morti per KP nei maschi e il 90% delle morti per KP nelle femmine che sono ES (BEIR VI) contro 85% dei decessi per KP in entrambi i sessi che sono ES. I sistemi di mitigazione del radon nelle case avrebbero potuto prevenire tutti questi casi se fossero stati effettuati interventi di mitigazione negli edifici con livelli di radon superiori a 200 Bq m^{-3} . In sintesi, la riduzione del radon nelle case è un modo efficace per diminuire il carico di KP nelle province canadesi.

Gaskin *et al.* (2019) hanno condotto un'analisi costo-efficacia per valutare l'impatto di 16 scenari di mitigazione del radon su un periodo di cento anni in Canada. Gli anni di vita ponderati per la qualità (QALY¹⁰¹) sono usati per rappresentare il guadagno di salute. Sono state modellate tre soglie medie annuali di mitigazione del radon: 200 Bq m^{-3} [l'attuale linea guida canadese] (Health Canada, 2017), 100 Bq m^{-3} [la linea guida raccomandata dall'OMS] (World Health Organization, 2018), e 50 Bq m^{-3} indagine nazionale sul radon condotto tra il 2009 e il 2011 (Health Canada, 2012). Il sondaggio nazionale sul radon si basava su misurazioni della durata di 3 mesi, effettuate durante la stagione del riscaldamento (da ottobre a marzo). I dati sul radon residenziale al di sotto del limite di rilevamento di 15 Bq m^{-3} sono stati approssimati in questa analisi alla metà di quel valore $7,5 \text{ Bq m}^{-3}$: Sono stati raccolti dati sulle abitudini al fumo e sulla mortalità (2012) per ogni provincia e territorio. Dati sulla mortalità e incidenza per KP sono stati corretti per età e abitudine al fumo. Per la valutazione del rischio è stato utilizzato il modello di esposizione-età-concentrazione (EAC) BEIR VI (National Research Council, 1999). Le misure protettive passive per ridurre il radon residenziale nei nuovi edifici comportano il 50% di riduzione; la depressurizzazione attiva del suolo determina l'85% di riduzione. Le misure preventive passive in fase di costruzione sono risultate le migliori in termini di costo efficacia per tutte le Province del Canada.

Effettuare misure di prevenzione del radon nelle nuove costruzioni è risultato conveniente ed efficace. Gli autori raccomandano di rendere obbligatorie le misure di prevenzione del radon nelle poche province che non hanno ancora adottato il Codice Edilizio Nazionale, inoltre raccomandano di promuovere la mitigazione volontaria del radon delle abitazioni esistenti attraverso l'educazione pubblica e un incentivo di credito d'imposta.

Lo scenario di intervento sul radon più conveniente, rispetto alle misure di prevenzione passiva nelle nuove abitazioni è la combinazione di interventi di misure preventive nelle nuove abitazioni e la mitigazione delle abitazioni esistenti.

¹⁰¹ quality-adjusted life year

Un investimento per la salute pubblica nella bonifica del radon nelle abitazioni nuove ed esistenti potrebbe comportare una riduzione delle esposizioni al radon.

Investimenti nella prevenzione del cancro ai polmoni attraverso la bonifica del radon residenziale e lo screening del cancro ai polmoni potrebbero essere considerati validi su un orizzonte temporale esteso in una popolazione con un sistema di sanità pubblica che include programmi di trattamento per il cancro ai polmoni.

Gli interventi sul radon nelle abitazioni dovrebbero essere attuati in Canada per ridurre l'esposizione e contribuire a diminuire il crescente carico di cancro ai polmoni in una popolazione canadese che invecchia.

Khan *et al.* 2019 nella loro review hanno esaminato quali siano i sistemi di controllo del radon più efficaci in termini di riduzione del radon al di sotto del livello di azione; quale sia la migliore tempistica per testare e installare tali sistemi negli edifici residenziali nuovi ed esistenti e quali fattori vadano considerati nella pianificazione di interventi di mitigazione.

Sono stati raccolti studi pubblicati tra 1999 e 2018 sull'efficacia degli interventi per la mitigazione del radon. Prevalentemente sono studi condotti in Europa, Australia e Nord America. I risultati mostrano che il sistema attivo di pressurizzazione del suolo o del sottosuolo (SSDS) ha ridotto il livello di radon fino al 99% nelle abitazioni esistenti che avevano elevati livelli di radon. Questo metodo fornisce una consistente riduzione del radon a un costo ragionevole rispetto ad altri metodi passivi. La SSDS (sia suolo che pozzetto) è la tecnica più efficace di bonifica per le case esistenti. Tale metodica risulta essere più costosa rispetto all'installazione di una barriera o una membrana anti-radon per gli edifici in costruzione. Nei casi in cui le concentrazioni di radon sono elevate si può abbinare una ventilazione naturale sotto il pavimento con un pozzetto passivo sotto il livello del pavimento in cemento.

Attre tecniche di mitigazione del radon testate nel Regno Unito e in altri paesi dell'UE, con diversi livelli di efficacia sono:

- la ventilazione: ventilazione bilanciata a recupero di calore; ventilazione interna attiva e passiva, e ventilazione sotto il pavimento;
- pressurizzazione,
- semplice sigillatura;
- pozzi di radon (l'efficienza del pozzo dipende dall'omogeneità degli strati del suolo, dalla permeabilità del suolo, dal contenuto, profondità del pozzo e capacità della pompa utilizzata).

Nelle aree dove i livelli di radon sono bassi la semplice apertura delle finestre è efficace, anche se tale soluzione non è permanente. Sono state testate anche metodiche di filtrazione del radon (elettrofiltro, pulitore d'aria con un filtro meccanico

e filtro ad alta efficienza HEPA¹⁰²), ma non si sono dimostrati efficaci. La combinazione di tecniche attive (SSD attiva) e passive (membrane e barriere) è la più efficace nel ridurre le concentrazioni di radon. Il periodo migliore per testare e mitigare il radon è ottobre -novembre (periodo in cui la ventilazione naturale è minore per le condizioni metereologiche), mentre per installare sistemi di mitigazioni è preferibile intervenire in fase di costruzione degli edifici o di vendita. La concentrazione interna di radon riflette l'equilibrio tra il tasso di ingresso del radon da tutte le fonti e la perdita del radon per decadimento radioattivo naturale e diluizione attraverso la ventilazione. Più precisamente, il tasso di ingresso del radon in un edificio è la somma dei contributi dal soil-gas (generalmente la fonte primaria), il rilascio dai materiali da costruzione, dall'acqua per approvvigionamento idrico da pozzi o trivellazioni, acqua potabile e la combustione del gas naturale usato per il riscaldamento e la cottura. L'ingresso del radon prodotto dai materiali da costruzione è essenzialmente diffusivo, l'ingresso dal sottosuolo è legato alla pressione, alle differenze di temperatura tra interno ed esterno e all'uso di sistemi di riscaldamento e ventilazione. Cambiamenti metereologici e stili di vita modificano i livelli di radon indoor. L'efficacia degli interventi di mitigazione non dipende solo dalle concentrazioni iniziali di radon, ma anche dalle caratteristiche degli edifici e dalle abitudini dei residenti. Tra gli altri fattori ci sono il costo della mitigazione, la disponibilità a pagare per il consumo di energia, l'accuratezza delle misure diagnostiche, la progettazione e l'installazione del sistema di mitigazione. Gli studi hanno dimostrato che l'efficacia della mitigazione del radon è legata al livello di radon iniziale. Questo sottolinea l'importanza di utilizzare diverse tecniche di mitigazione in base alle aree ad alto (il 21% delle case ha superato il livello di riferimento) e a basso rischio (0,5%- 4% delle case sopra il livello di riferimento). Questo supporta anche la necessità di mappare le aree a rischio radon.

In conclusione, dalla revisione si evince che il sistema di pressurizzazione del suolo o del pozzetto sotto il pavimento (SSDS) sono le più efficaci con una riduzione del livello di radon fino al 99% nelle case esistenti. La combinazione di tecniche (attive e passive) è sempre più efficace di qualsiasi singolo sistema di mitigazione.

Questa revisione ha messo in evidenza che, molti paesi, con elevati livelli di radon in tutto il mondo iniziano a riconoscere, negli ultimi anni, l'importanza di una sana qualità dell'aria interna. Tale aspetto è evidenziato dalla adozione di nuovi codici edilizi, che richiedono ai costruttori di installare una membrana passiva impermeabile al radon tra le lastre del seminterrato delle nuove costruzioni per prevenirne l'ingresso.

Tuttavia, la revisione degli studi ha rilevato che il semplice posizionamento di una membrana passiva non è la soluzione pratica più efficace; tali interventi dovrebbero essere rafforzati con metodi attivi quali l'installazione di un ventilatore a motore montato sul pozzetto. In paesi estremamente freddi, questa combinazione di membrana passiva e calafataggio non fornisce un rimedio efficace, mentre si è

¹⁰² High Efficiency Particulate Air filter

dimostrato utile, specialmente in Nord America, l'utilizzo di tubi perforati sotto il pavimento (SSDS) che possono essere attivati con ventilatori quando il livello di radon sale. Nelle vecchie case esistenti in zone ad alto tasso di radon, un'efficace mitigazione del radon indoor si ottiene con la combinazione di tecniche di mitigazione stabile a lungo termine specifiche per l'edificio, come un SSDS, combinate con la sigillatura di fessure e aperture nel seminterrato.

Burghlea *et al.*, 2021 hanno effettuato uno studio con l'obiettivo di esaminare l'intervento più efficiente nel ridurre il radon indoor in 30 edifici residenziali che avevano installato di recente un retrofit. Tra le misure con monitoraggio passivo sono state esaminate le seguenti tecniche:

- sistema di depressurizzazione meccanica sotto il pavimento;
- sistema di depressurizzazione meccanica del pozzetto;
- sistema di ventilazione centralizzata a recupero di calore;
- sistema di ventilazione a recupero di calore decentralizzato.

Le migliori prestazioni nella riduzione del radon sono state registrate in quelle case in cui la principale tecnica di mitigazione era basata sulla depressurizzazione sub-slab (61% - 95% di riduzione) seguita dal pozzetto sotterraneo (73% - 85% di riduzione), con riduzione dei livelli di radon sotto i valori raccomandati di 300 Bq m⁻³. La fornitura meccanica centralizzata e decentralizzata e la ventilazione meccanica centralizzata e decentralizzata con recupero di calore sono risultati meno efficienti la minore efficienza nel ridurre le concentrazioni di radon (25% - 67% di riduzione) ma hanno dimostrato una buona efficacia nel ridurre gli altri inquinanti indoor, con un miglioramento complessivo della qualità dell'aria interna (CO₂, VOC, RH, temperatura).

Yanchao *et al.* (2021) nel loro studio hanno verificato l'efficacia della purificazione dell'aria sulla riduzione delle concentrazioni dei prodotti di decadimento del radon. Il purificatore d'aria, con filtri ad alta efficienza, è efficace nel ridurre le concentrazioni dei prodotti di decadimento del radon legati e non legati al radon dell'80% e del 60%. Tale efficacia non si riduce nei dieci giorni di utilizzo, mentre i vecchi purificatori perdevano efficacia nei tre mesi di utilizzo.

Nei regolamenti di numerosi paesi Europei è richiesta l'installazione di membrane anti-radon nei nuovi edifici. In Spagna lo Spanish Technical Building code richiede l'istallazione di membrane anti-radon nei nuovi edifici costruiti in aree ad elevato rischio radon. La capacità di diffusione del radon dipende dalla composizione chimica dei materiali utilizzati. Le barriere anti-radon hanno solitamente una capacità di diffusione compresa tra 10-8 e 10-15 m²/s. Altra caratteristica da considerare nei materiali è la capacità di assorbimento del radon. Ruvira *et al.* (2022 a) hanno effettuato delle analisi per validare la metodologia sperimentale per calcolare il coefficiente di diffusione del radon in base alla norma ISO/TS 1655-13:2017 rispetto al coefficiente di diffusione calcolato con il metodo di controllo (Sisalex 871). Sono

stati calcolati i coefficienti di diffusione dei materiali LPDE¹⁰³; PP; PVC e del nuovo materiale PMMA. Il coefficiente di diffusione ottenuto è tra 10-12 e 10-14 m²/s, in accordo con il range riportato in letteratura. Tali valori indicano che i materiali sono adatti allo scopo di prevenire la diffusione del radon. È stata anche misurata la capacità di assorbimento dei diversi materiali. La capacità di assorbimento variava da 24.6 e 44.5 cps. Sisalex, PP e PVC hanno mostrato capacità di assorbimento simili (27.6 e 30.4 cps), e possedevano uno spessore simile (0.5-0.54 mm), mentre PS e PE avevano uno spessore maggiore (1.16-1.18 mm) e un maggiore assorbimento (35.9 - 55.5 cps). Il PMMA¹⁰⁴ invece, nonostante uno spessore maggiore, presenta minori capacità di assorbimento (26 cps). Forse a causa del suo contenuto di ossigeno che tende a formare deboli legami con il radon.

Lo studio mostra sia l'applicabilità della metodologia per misurare la diffusione di radon, sia che tutti i materiali analizzati sono adatti per essere usati come membrana anti-radon, con una riduzione di circa 99% per concentrazioni di radon maggiori di 800 Bq m⁻³. Lo studio ha mostrato che lo spessore delle barriere ha influenza sulla capacità di assorbimento. Uno spessore superiore ai 0,5 mm è sufficiente ad assicurare un decremento delle concentrazioni di radon nel tempo, mentre la composizione chimica dei materiali influenza la capacità del radon di attraversarli, ad esempio la presenza legami di ossigeno crea legami deboli con il radon, tenendolo lontano da queste superfici.

In un altro studio Ruvira *et al.* (2022 b) hanno confrontato l'efficacia dei differenti materiali come barriere anti-radon. Lo spessore minimo di queste barriere deve essere di almeno 2 mm e avere un coefficiente di diffusione inferiore a 10-11m²/s. Lo standard ISO/TS 11655:13 2017 stabilisce la metodologia e il processo standard di calcolo del coefficiente di diffusione. I materiali utilizzati sono materiali polimerici combinati con alluminio. e contengono PE, PP, PVC e alluminio e hanno uno spessore che varia da 40 a 120 µm. Lo studio ha l'obiettivo di verificare l'efficacia di queste barriere composte da un singolo materiale o da una combinazione, in monostrato, multistrato rispetto ai materiali in laminato, materiali difficili da riciclare. Gli autori hanno misurato la diffusione e l'assorbimento del radon e sono giunti alla conclusione che i materiali multistrato sono più efficaci, la presenza di alluminio è essenziale per raggiungere una efficacia significativa.

Il materiale più efficace è il PE-AL-PE-AL-PE¹⁰⁵ che riduce del 99,92% le concentrazioni di radon, con un coefficiente di diffusione di 3,6+ 0.44 *10⁻¹⁴m²/s, soddisfacendo i parametri indicati dallo Spanish Technical Building code. Inoltre, lo studio mostra che vi è una relazione tra spessore dei materiali e assorbimento del radon. Il PE assorbe maggiormente il gas rispetto all'AL. In caso di un materiale multistrato l'assorbimento è inferiore della somma dei singoli materiali.

¹⁰³ Polietilene a bassa densità

¹⁰⁴ Polimetilmetacrilato

¹⁰⁵ PE - Polietilene, PP- Polipropilene; PVC- Polivinilcloruro

L'utilizzo dei materiali multistrato sembra essere efficace nel ridurre il radon quanto i materiali laminati, ma con minor impatto ambientale.

Nel 2014 in Pennsylvania hanno riscontrato elevati livelli radon, in alcuni edifici localizzati a Lehigh Country. Il Department of Environmental Protection (DEP) della Pennsylvania (Lewis *et al.* 2022) ha effettuato una campagna aggressiva di misure di Radon indoor negli edifici che avevano livelli di radon estremamente elevati. Sono state effettuate sia misure indoor (con monitor passivi) che outdoor (con dosimetri OSL¹⁰⁶) posizionati sia all'esterno che sottoterra a 1.2-1.8 m per un anno. Le misure indoor effettuate in 87 edifici hanno rilevato, in 19 di questi, valori di radon indoor >37.000 Bq m⁻³ (il livello di azione dell'US EPA¹⁰⁷ è di 148 Bq m⁻³). L'efficacia dei metodi di mitigazione con la depressurizzazione sub-slab ha ridotto del 99.98% le concentrazioni di radon indoor.

Le misure outdoor hanno rilevato concentrazioni medie di 222-Rn di 70,3 + 44 Bq m⁻³ con valori compresi tra 22 + 3 e 266 + 40 Bq m⁻³. I dosimetri di controllo avevano rilevato valori compresi tra <14+ 2 e 18,9+ 3 Bq m⁻³. Tali valori sono indicativi di elevati livelli ambientali di radon, sei volte maggiori della media dello stato.

Fortunatamente gli edifici esaminati erano nuovi e non hanno comportato gravi esposizioni alla popolazione. Sono state indicate misure di mitigazione, sia di tipo passivo per le case in costruzione, che di tipo attivo, sono stati installati sistemi di ventilazione meccanica in tutti gli edifici. In alcuni casi sono stati necessari sistemi di mitigazione aggiuntivi per ridurre le concentrazioni al di sotto dei limiti raccomandati dalle LG EPA. Infine, è stato raccomandato di eseguire annualmente una misurazione del radon e un sistema di allarme sonoro in caso di malfunzionamento dei sistemi di ventilazione. È stato anche raccomandato nei casi si coltivassero ortaggi in giardino di usare terreno e compost di diversa provenienza.

In un'analisi effettuata in 19 abitazioni di un nuovo complesso residenziale di 87 edifici, nella Contea di Lehigh, in Pennsylvania, a circa 58 km a nord-ovest di Filadelfia, sono state riscontrate concentrazioni di 222Rn nel seminterrato superiori a 37.000 Bq m⁻³, il valore più alto registrato era di 648.000 +/- 1.031 Bq m⁻³. L'Agenzia per la protezione dell'ambiente (EPA) degli Stati Uniti raccomanda un livello di azione per il 222Rn di 148 Bq m⁻³. Lewis *et al.* (2022) hanno descritto i test indoor effettuati nel complesso residenziale. I primi test sul radon sono iniziati nell'autunno del 2014, essi consistevano in un kit, a base di carbone attivo, spedito ai proprietari di casa con indicazione su dove e come posizionarlo. Successivamente, ma sempre prima che gli edifici venissero abitati, sono stati effettuati nuovi test piuttosto approfonditi: monitoraggi in continuo, monitoraggi passivi del radon e campionamenti di gas radon e della sua progenie nel seminterrato e al primo piano; indagini gamma nel seminterrato, al primo e al secondo piano e all'esterno di ogni abitazione. In tutti i nuovi edifici, tranne uno, sono state installate barriere passive anti-radon nella fase

¹⁰⁶ Optically Stimulated Luminescent

¹⁰⁷ Environmental Protection Agency

di costruzione. In tutti i casi, ai sistemi passivi sono stati aggiunti ventilatori, necessari per ridurre le concentrazioni di radon estremamente elevati. In diverse abitazioni sono stati necessari ulteriori interventi di mitigazione del radon, quali l'aggiunta di ulteriori punti di aspirazione, per ridurre le concentrazioni e rispettare i valori di riferimento indicati nelle linee guida dell'EPA. La depressurizzazione del sottosuolo ha comportato una efficace riduzione delle concentrazioni di radon. Negli edifici che presentavano valori superiori a 37.000 Bq m^{-3} , si è riscontrata una riduzione del 99,84%, stessa efficacia è stata riscontrata negli edifici che presentavano concentrazioni inferiori ai 37.000 Bq m^{-3} . Sono stati effettuati anche test del radon outdoor: è stata rilevata una concentrazione media su 19 misurazioni valide di 222 Rn di $70 \pm 44 \text{ Bq m}^{-3}$. I rilevatori di controllo mostravano valori compresi tra $<14 \pm 2 \text{ Bq m}^{-3}$ e $18,5 \pm 3 \text{ Bq m}^{-3}$, indici di elevati livelli di 222Rn ambientale. Le cause delle elevate concentrazioni di 226Ra nel suolo di quest'area specifica sono ascrivibili alle caratteristiche geogeniche del suolo. Nello studio vengono presentati sia i dati di misurazione del radon indoor e outdoor, sia le concentrazioni di 238U e 226Ra nella roccia e nel suolo.

Wang *et al.*, 2022 hanno esaminato l'efficacia della ventilazione nel ridurre le concentrazioni di radon negli ambienti sotterranei. La ventilazione è uno dei sistemi più utilizzati ed efficaci per ridurre la concentrazione di radon negli ambienti sotterranei. Il maggior consumo energetico dei sotterranei è, infatti, rappresentato dal sistema di ventilazione. La concentrazione di radon si riduce con l'incremento della frequenza di ventilazione. Il processo di esalazione, diffusione e concentrazione è influenzato da fattori quali temperatura, umidità, velocità dell'aria, pressione ecc. È importante chiarire che il primo fattore che influenza l'esalazione, la diffusione e la concentrazione di radon è migliorare la ventilazione. Gli spazi sotterranei sono di grande interesse per la pianificazione e il design urbano, essi offrono una soluzione nello sviluppo urbano, hanno la caratteristica di essere caldi in inverno e freddi in estate e rivestono interesse per le politiche di risparmio energetico. D'altra parte, se non sono adeguatamente ventilati, la qualità dell'aria indoor potrebbe risentirne. In questi ambienti le principali fonti di esalazione del radon sono le pareti, i pavimenti e i soffitti. Misurazioni effettuate in 234 spazi sotterranei per un anno hanno rilevato concentrazioni elevate (2482 Bq m^{-3}) fino a 6 volte superiori ai limiti raccomandati, tali concentrazioni mostravano andamenti giornalieri e stagionali. La ventilazione è la misura più largamente utilizzata e la più efficace per ridurre le concentrazioni di radon nelle tecniche di ingegneria sotterranea. La permeabilità dell'edificio associata ad un sistema di ventilazione potrebbe influenzare la concentrazione di radon. D'altra parte, ricambi d'aria troppo veloci possono determinare un flusso inverso che può influenzare la dispersione di radon. Piccoli incrementi della frequenza di ventilazione possono comportare rapide riduzioni del radon indoor. Studi hanno mostrato che aumentare la frequenza della ventilazione da 0.00 h^{-1} a $0,50 \text{ h}^{-1}$ può ridurre le concentrazioni di radon fino a 66 volte e di due volte aumentando la frequenza di ventilazione da 0.50 h^{-1} a 0.80 h^{-1} . Gli studi precedenti hanno analizzato le relazioni tra ventilazione e concentrazioni di radon, ma pochi hanno esaminato i fenomeni di

diffusione del radon indoor. Le soluzioni di risparmio energetico basate sulla ventilazione intermittente per un controllo dinamico delle concentrazioni di radon sono oggetto di questo studio di Wang *et al.* Gli autori, analizzando il processo di migrazione del radon in una stanza, hanno costruito un modello numerico che tiene conto del meccanismo di produzione, esalazione e diffusione del radon, proponendo una nuova strategia di ventilazione intermittente per mitigare la concentrazione di radon negli spazi sotterranei, in cui le due principali sorgenti di radon sono le fondazioni e il rilascio del gas dai materiali di costruzione. Sono state confrontate tre strategie di ventilazione (assenza di ventilazione, ventilazione continua e ventilazione intermittente) con diverse velocità dell'aria e rapporti di aria fresca. La ventilazione intermittente che sia attiva quando le concentrazioni di radon indoor superano la soglia dei 400 Bq m⁻³ (valori di riferimento) è efficace nel ridurre concentrazioni del gas quanto la ventilazione continua, ma presenta maggiori benefici di risparmio energetico. A parità di concentrazione di radon, la ventilazione intermittente è stata utilizzata con la stessa velocità dell'aria, ma con un tempo di avvio ridotto del 79,4%, 86,0%, 90,8%, 92,8%, 91,25%, rispetto alla ventilazione continua. Maggiore è il rapporto di aria fresca, più basso è il limite di concentrazione di radon e più veloce sarà il raggiungimento dello stato di equilibrio dinamico della concentrazione di radon. Durante la ventilazione intermittente, la riduzione del rapporto di aria fresca può aumentare notevolmente il recupero e l'utilizzo del calore dell'aria di ritorno, riducendo così la potenza dell'unità di condizionamento. Considerando i vantaggi complessivi del sistema di ventilazione in termini di risparmio energetico, è necessario realizzare un piano di ventilazione intermittente adeguato a soddisfare i requisiti di riduzione del radon nell'intervallo di bassa velocità del vento. Se si sceglie una bassa velocità del vento, si ottengono anche i vantaggi di un minore rumore associato al sistema di ventilazione e di un maggiore comfort.

La Verde *et al.* (2022) hanno analizzato i risultati di due survey sulle concentrazioni di radon condotte tra il 2006/2007 e il 2019/2020 nei centri Termali di Ischia (SPA). Sono state condotte misurazioni nei luoghi di lavoro posti nei seminterrati e piani terra con dosimetri passivi CR-39. È stata quindi valutata l'efficacia delle misure di mitigazione, che hanno ridotto le concentrazioni del 74%.

Le tecniche di mitigazione variavano da un semplice incremento della ventilazione alla sigillatura dei punti di ingresso del radon (fessure delle fondazioni, apertura intorno alle pompe) fino all'istallazione di sistemi di depressurizzazione.

I principali rimedi messi in atto sono stati la ventilazione attiva (installazione di estrattori) e passiva (più frequente apertura delle finestre 3 ore prima di iniziare l'attività lavorativa, per rispettare gli standard di confort climatico indoor della SPA). In questo studio raccomandazioni date ai proprietari delle SPA sono state di implementare la ventilazione attiva o passiva per ridurre le concentrazioni elevate di radon.

Per ogni SPA sono state calcolate le concentrazioni medie di radon. I risultati hanno mostrato una grande variabilità di valori ($2014 \pm 156 \text{ Bq m}^{-3}$) nella survey del 2006-2007. Tale variabilità è da ascrivere alla diversa tipologia degli ambienti monitorati, spesso i bagni e gli ambienti della SPA sono collocati nei piani semiinterrati e sono scarsamente ventilati, mentre le altre stanze al piano terra sono ventilate in modo molto diverso

La normativa vigente per i luoghi di lavoro ai tempi della prima survey era di 500 Bq m^{-3} (la normativa corrente raccomanda per i luoghi di lavoro 300 Bq m^{-3}) nelle 10 SPA monitorate i valori rilevati erano molto più alti ($2104 \pm 156 \text{ Bq m}^{-3}$ e $28.2 \pm 2.16 \text{ mSvy}^{-1}$ e $2021 \pm 156 \text{ Bq m}^{-3}$ e $27.1 \pm 2.56 \text{ mSvy}^{-1}$ nel seminterrato e primo piano rispettivamente.

Nella seconda survey (2019/2020) delle 15 SPA monitorate, solo una eccedeva i valori consigliati di 300 Bq m^{-3} con valori di $430 \pm 84 \text{ Bq m}^{-3}$. Questo mostra come le misure mitigative siano stati efficaci, nessuna SPA ha superato i 6 mSvy^{-1} . Ulteriori misure mitigative dovranno, comunque, essere implementate. L'efficacia dei sistemi di mitigazione è stata superiore al 74%. Non sono stati necessari interventi strutturali. Ogni centro termale è stato anche valutato dal punto di vista geologico caratterizzando sia il terreno che i materiali da costruzione utilizzati (tufo, pietra lavica), mostrando come sia il terreno che i materiali siano rappresentativi di una zona vulcanica.

Le surveys indicano l'importanza di monitorare le concentrazioni di radon nelle aree a rischio e poter metter in atto misure di mitigazione al fine di ridurre l'esposizione della popolazione e ridurre il rischio sia per i lavoratori che per i clienti dei centri termali.

Nunes *et al.* (2022) effettuano una revisione della letteratura sulle correlazioni tra esposizione al radon indoor e incidenza di tumore al polmone.

Per quanto riguarda la bonifica del rischio, è stata condotta un'analisi e presentata in due prospettive principali:

- 1) l'identificazione e l'applicazione di misure correttive negli edifici preesistenti;
- 2) l'implementazione di misure preventive durante la progettazione e prima della costruzione, entrambe incentrate sulla mitigazione degli impatti negativi dell'esposizione al radon indoor sulla salute della popolazione.

L'implementazione di misure di mitigazione per ridurre il rischio di esposizione al radon negli ambienti interni è stata oggetto di interesse da parte degli studi, soprattutto perché queste misure rispondono alle preoccupazioni delle popolazioni, soprattutto dal momento in cui diventano consapevoli del rischio a cui possono essere potenzialmente esposte.

Sono diversi gli studi che presentano misure di mitigazione che contribuiscono alla riduzione del rischio, da un lato, ma anche a ridurre efficacemente i casi di tumori

indotti dal radon, vale a dire cancro ai polmoni. Le misure di mitigazione proposte nei vari lavori possono includere diverse tipologie:

- le misure costruttive, quali l'applicazione di materiali isolanti, come vernici speciali e schermi, che impediscono il passaggio del radon dal terreno agli ambienti interni e che possono essere utilizzati nella ristrutturazione di edifici preesistenti e nei nuovi edifici in fase di costruzione o anche la costruzione di airbox tra il terreno e i pavimenti/pareti quando possibile;
- le misure relative alla ventilazione degli spazi interni, quali l'installazione di sistemi di purificazione dell'aria, associati o meno a sistemi di monitoraggio dei parametri di qualità dell'aria, oppure implementazione di protocolli di ventilazione manuale degli spazi (l'apertura di porte e finestre per la circolazione dell'aria).

Il radon è elencato dall'OMS come la seconda causa di cancro ai polmoni dopo il tabacco. L'emanazione di questo gas dal suolo e dalle rocce nell'ambiente non presenta problemi significativi. Tuttavia, quando il rilascio avviene in ambienti chiusi e occupati, è necessario valutare i rischi e gli impatti sulla salute. La frequentazione di ambienti interni contribuisce all'aumento dell'esposizione degli occupanti e della dose cumulativa di radiazioni, il cui impatto negativo dipende, sia dalla concentrazione media giornaliera di radon negli ambienti interni, sia dalla media giornaliera del periodo di occupazione. Gli studi analizzati in questo lavoro indicano la necessità di implementare misure di riduzione del radon. Molte di queste misure sono state presentate in diversi piani d'azione nazionali già attuati e attualmente in uso. Queste misure, ad esempio la realizzazione di campagne di valutazione nazionali volte a identificare il potenziale di presenza del radon, consentono l'attuazione di misure di bonifica, come lo sviluppo di meccanismi di ventilazione intelligenti o l'applicazione di misure di protezione passiva, che formano una barriera al gas radon, riducendone l'ingresso negli ambienti interni.

Conclusioni

Dall'analisi della letteratura si rileva che i principali sistemi di mitigazione del radon adottati sono: la depressurizzazione del sottosuolo, la ventilazione attiva dell'intercapedine e la ventilazione naturale e forzata.

In particolare, risulta efficace l'installazione di una membrana passiva impermeabile al radon nel seminterrato delle nuove costruzioni per prevenirne l'ingresso se associata con misure di mitigazione attive quali l'installazione di un ventilatore a motore nel pozzetto; mentre negli edifici esistenti, in zone ad alto tasso di radon, una mitigazione efficace si ottiene combinando tecniche specifiche per l'edificio, come un SSDS, combinate con la sigillatura di fessure e aperture nel seminterrato.

Le azioni di prevenzione nelle nuove abitazioni sono più efficaci in termini di costi rispetto alla mitigazione delle abitazioni esistenti. In alcune aree a basso rischio i costi di misurazione possono essere più elevati dei costi di mitigazione (per abitazioni esistenti) a causa dell'alto numero di case che dovrebbero essere testate rispetto al numero di abitazioni che necessitano interventi di mitigazione. Anche se le analisi indicano che i programmi di bonifica potrebbero non essere efficaci dal punto di vista dei costi su base nazionale, la bonifica dovrebbe essere intrapresa in aree con alte concentrazioni di radon in quanto considerate un rischio di cancro ai polmoni su basi individuali.

Bibliografia

Arvela H., Holmgren O., Reisbacka H., 2012 Radon prevention in new construction in Finland: a nationwide sample survey in 2009 *Radiat Prot Dosimetry*. 2012 Mar;148(4):465-74. doi: 10.1093/rpd/ncr192. Epub 2011 May 31. DOI:10.1093/rpd/ncr192 <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/148/4/465/1607959?redirectedFrom=fulltext&login=true>

Al-Arydah M 2018 Estimating the burden of lung cancer and the efficiency of home radon mitigation systems in some Canadian provinces *Sci Total Environ*. 2018 Jun 1;626:287-306. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.028. Epub 2018 Feb 19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.028>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718300287>

Brossard M., Brazeau Ottawa C., Falcomer R., Whyte J., 2015 Radon mitigation in cold climates at Kitigan Zibi Anishinabeg Health Phys. 2015 Feb;108(1 Suppl 1): S13-8. doi: 10.1097/HP.000000000000206. https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/2015/02001/Radon_Mitigation_in_Cold_Climates_at_Kitigan_Zibi.3.aspx

Burghilea B.D., Botoşab M., Beldean-Galea S., 2021 Comprehensive survey on radon mitigation and indoor air quality in energy efficient buildings from Romania *Science of The Total Environment* August 2020_ 751:141858 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141858>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720353870>

Codice Residenziale Internazionale (2010), International Residential Code, 2010. Annual Report 2009. ICRP Reference 4836-3026- 9958. Retrieved from. <http://www.icrp.org/docs/ICRP%20Annual%20Report%2009.pdf>.

Codice Residenziale Internazionale, 2017. International Residential Code, 2017. IRC-residential Building: 2016 Group B Committee Action Hearings. Retrieved from. <http://media.iccsafe.org/codes/2015-2017/GroupB/CAH/IRC-B.pdf>.

Conferenza Nazionale di Legislature statali, 2015. National Conference of State Legislatures, 2015. Radon Legislation and Statutes. Retrieved from.

<http://www.ncsl.org/research/environment-and-natural-resources/radon.aspx>.
National Research Council Canada, 2017.

Consiglio dell'Unione Europea (2013) Euratom, 2014. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom a. Off J Eur Commun L13.

Cosma C, Papp B, Cucuș Dinu A, Sainz C. 2015 Testing radon mitigation techniques in a pilot house from Băița-Ștei radon prone area J Environ Radioact. 2015 Feb;140:141-7. doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.11.007. Epub 2014 Dec 4 DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.11.007
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X14003270?via%3Dihub>

Dowdall A., Murphy P., Pollard D., Fenton D., 2017 Update of Ireland's national average indoor radon concentration - Application of a new survey protocol J Environ Radioact. 2017 Apr;169:1-8. doi: 10.1016/j.jenvrad.2016.11.034. Epub 2016 Dec 24. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.11.034
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X16306671?via%3Dihub>

Gaskin J., Coylen d., Whyte J., BirkettaN., Krewksia D., 2019 A cost effectiveness analysis of interventions to reduce residential radon exposure in Canada Journal of Environmental Management Volume 247, 1 October 2019, Pages 449-461 doi: 10.1016/j.jenvman.2019.06.032. Epub 2019 Jun 27.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719308412?via%3Dihub>

Health Canada, 2017. Guide for Radon Measurements in Residential Dwellings (Homes) (Ottawa, Canada).

International Atomic Energy Agency General Safety Requirements Part 3 (GSR Part 3) Radiation Protection And Safety Of Radiation Sources: International Basic Safety Standards IAEA Safety Standards Series GSR Part 3, Interim Edition
[https://rowman.com/ISBN/9789201209108/Radiation-Protection-And-Safety-Of-Radiation-Sources-International-Basic-Safety-Standards-IAEA-Safety-Standards-Series-GSR-Part³-Interim-Edition](https://rowman.com/ISBN/9789201209108/Radiation-Protection-And-Safety-Of-Radiation-Sources-International-Basic-Safety-Standards-IAEA-Safety-Standards-Series-GSR-Part-3-Interim-Edition)

La Verde G.; . D'Avino V;; Pugliese M. 2022. Radon surveys and effectiveness of remedial actions in spas on the Ischia island (Italy). Applied Radiation and Isotope Volume 185, July 2022, 110221

Lewis RK, Bleiler DS, Smith RC, Allard DJ. Residential Homes with Extremely High Indoor Radon Concentrations in Southern Lehigh County, Pennsylvania. Health Phys. 2022 Nov 1;123(5):360⁻³64. doi: 10.1097/HP.0000000000001604

-
- Jiránek M. (2014). Sub-slab depressurisation systems used in the Czech Republic and verification of their efficiency. *Radiat Prot Dosimetry*. 162(1-2): 63-7. doi: 10.1093/rpd/ncu219. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25004940/>
- Khan S. M., Gomes J., Krewskic D. R. 2019. "Radon interventions around the globe: A systematic review" *Heliyon* Volume 5, Issue 5, May 2019, e01737w <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01737>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019336813>
- National Research Council, 1999. Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI. National Academies Press.
- Nunes L.J.R., Curado A, Graça LCCD, Soares S, Lopes S, I 2022. Impacts of Indoor Radon on Health: A Comprehensive Review on Causes, Assessment and Remediation Strategies. *Int J Environ Res Public Health*. 2022 Mar 25;19(7):3929. doi: 10.3390/ijerph19073929.PMID: 35409610
- Ruvira B.; García-Fayos B. Juste B. ; Arnal J.M.; Verdú G. 2022 (a). Experimental estimation of the diffusion coefficient in radon barrier materials based on ISO/TS 11665-13:2017. *Radiation Physics and Chemistry* Volume 193, April 2022, 109993
- Ruvira B. García-Fayos B. ; Verdú G. 2022 (b) Determination of the radon diffusion coefficient of thin polyethylene and aluminium foils used as single or multilayer configuration barrier. *Radiation Physics and Chemistry*. Available online 16 June 2022, 110329
- Tunno T., Paola Caricato A.P., Fernandez M. *et al.*, 2017 Critical aspects of radon remediation in karst limestone areas: some experiences in schools of South Italy. *J Radiol Prot*. 2017 Mar 20;37(1):160-175. doi: 10.1088/1361-6498/aa5599. Epub 2017 Jan 24. DOI: 10.1088/1361-6498/aa5599
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6498/aa5599>
- Yanchao S., Bing s., Hongxing C., Yunyun W., 2021 Study on the effect of air purifier for reducing indoor radon exposure "Applied Radiation and Isotopes Volume 173, July 2021, 109706" Pub Date: 2021-04-07, DOI: 10.1016/j.apradiso.2021.109706
<https://en.x-mol.com/paper/article/1380071177418989568>
- Ye W, Zhang X, Gao, J. Cao G., Zhou X., Su X., 2017 Indoor air pollutants, ventilation rate determinants and potential control strategies in Chinese dwellings: A literature review *Sci Total Environ*. 2017 May 15;586:696-729. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.047.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717302887>
- Wang B; Tao Song T, Yang X., 2022. Design on intermittent ventilation strategy for radon removal in underground space. *Journal of Environmental Radioactivity* Volumes 253–254, November 2022, 107007
- WHO, 2009. Handbook On Indoor Radon A Public Health Perspective ISBN 978 92 4 154767 3 <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673>

WHO, 2018. Housing And Health Guidelines ISBN 978-92-4-155037-6
<https://www.who.int/publications/i/item/9789241550376>

WHO, 2021. Policies, Regulations & Legislation Promoting Healthy Housing: A Review
ISBN 978-92-4-001129-8 <https://www.who.int/publications/i/item/9789240011298>

3.2.5 Conclusioni generali

Le concentrazioni di radon all'interno degli edifici dipendono da molteplici fattori come il tipo di edificio, il design e i materiali da costruzione, la geologia locale, la permeabilità del suolo, ecc. fattori che possono variare notevolmente anche tra case limitrofe. Le concentrazioni di radon in una singola casa possono essere determinate solo attraverso la misurazione.

Una politica nazionale sul radon dovrebbe concentrarsi sull'identificazione delle aree geografiche ove è maggiore il rischio di esposizione al radon e sulla sensibilizzazione del pubblico sul rischio sanitario associato.

Per l'efficacia di un programma di prevenzione al radon è fondamentale la collaborazione con altri programmi di promozione della salute (ad esempio, sui rischi di una inadeguata qualità dell'aria indoor e del fumo di tabacco) e la formazione dei professionisti dell'edilizia e di altre parti interessate coinvolte nell'attuazione della prevenzione e della mitigazione del radon.

È inoltre prioritario stabilire un livello di riferimento nazionale per il radon per definire il livello di rischio. Per le abitazioni che presentano concentrazioni di radon superiori ai livelli di rischio sono necessarie raccomandazioni. Stabilito un livello di riferimento, vanno presi in considerazione fattori quali: la mappatura del radon, il numero di edifici che presentano elevate concentrazioni, la media aritmetica del livello indoor e la prevalenza del fumo.

La Direttiva europea 2013/59/EURATOM, in attesa di recepimento in alcuni Paesi, fissa come livello di riferimento 300 Bq m^{-3} in termini di concentrazione media annua di attività di radon in aria sia per le abitazioni esistenti sia per i luoghi di lavoro.

L'OMS, invece, propone un livello di riferimento più restrittivo, pari a 100 Bq m^{-3} per minimizzare i rischi per la salute dovuti all'esposizione in ambienti chiusi. Tuttavia, se questo livello non può essere raggiunto nelle condizioni specifiche del Paese, il livello di riferimento scelto non dovrebbe superare i 300 Bq m^{-3} che rappresenta circa 10 mSv all'anno secondo i calcoli della Commissione internazionale per la protezione radiologica.

Il livello di riferimento nazionale deve considerare anche fattori socio-economici (ICRP 2008¹⁰⁸), oltre la mappatura del radon e il numero di edifici esistenti che presentano elevate concentrazioni di radon.

Relativamente agli edifici di nuova costruzione, il rispetto dei limiti di riferimento è più semplice e richiede costi inferiori rispetto alle abitazioni esistenti. Le concentrazioni di radon nei nuovi edifici dovrebbero essere, pertanto, inferiori al livello nazionale di riferimento. Ridurre la concentrazione media di radon per l'intera popolazione attraverso l'implementazione di regolamenti e codici edilizi appropriati

¹⁰⁸ International Commission on Radiological Protection (2008). Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 103. Elsevier

è un approccio che deve essere delineato e sostenuto da un programma nazionale sul radon.

Mettere in atto regolamenti o codici che richiedono l'installazione di misure di prevenzione del radon in tutte le case in costruzione è un metodo efficace ed economico per proteggere la popolazione. Se attuate correttamente, tali misure ridurranno, nel tempo, il livello medio nazionale di radon e il numero di nuove case con concentrazioni superiori al livello di riferimento.

Per gli edifici esistenti invece gli studi indicano che SSDS (sistema di depressurizzazione del sottosuolo o del pozzetto attivo) sia il miglior sistema di mitigazione, anche se, in alcuni casi, dovrebbe essere combinato con un altro sistema di mitigazione attiva (ventilazione del pozzetto) e installato da un professionista qualificato del radon, per garantire che le concentrazioni rimangano nei limiti.

Due approcci sono comunemente usati per identificare le case con livelli elevati di radon:

- campagne di misura locali, regionali o nazionali dove vengono misurate tutte le case in una data zona (per esempio zona a rischio radon);
- misure effettuate dai proprietari delle abitazioni grazie a programmi di sensibilizzazione pubblica. Alcuni paesi offrono anche un sostegno finanziario parziale o totale per effettuare tali misurazioni.

Aiuti finanziari o incentivi fiscali dovrebbero esser concessi ai proprietari di case o immobili che effettuano ristrutturazioni nelle loro abitazioni per incoraggiarli a includere misure di mitigazione.

I Paesi dovrebbero anche considerare di raccomandare o richiedere la misurazione e il risanamento del radon al momento della compra-vendita degli immobili in modo da garantire l'identificazione delle abitazioni che superano i livelli di riferimento del radon ed eventualmente la messa in atto interventi di bonifica.

La scelta degli interventi di prevenzione e mitigazione del radon può essere effettuata sulla base di un'analisi del rapporto costo-efficacia. In questo approccio, i costi sanitari netti sono fissati in relazione ai benefici per la salute per una varietà di azioni o politiche, fornendo un indice con cui queste azioni possono essere messe in ordine di priorità. Le misure preventive in tutti i nuovi edifici sono efficaci in termini di costi nelle aree in cui più del 5% delle attuali abitazioni ha concentrazioni di radon superiori a 200 Bq m⁻³ (WHO, 2018).

Nei Paesi europei in cui tra lo 0,5% e il 15% delle case si rilevano concentrazioni di radon superiori a 200 Bq m⁻³, sono necessarie misure correttive. I messaggi chiave dell'Organizzazione mondiale della sanità rilevanti per il settore dell'edilizia sono i seguenti:

-
- (a) strategie sia per la prevenzione del radon nelle nuove abitazioni che per la mitigazione nelle abitazioni esistenti per ottenere una riduzione complessiva del rischio;
 - (b) formazione dei professionisti del settore dell'edilizia, in quanto attori principali per la prevenzione e la mitigazione del radon;
 - (c) redazione di linee guida a livello nazionale basate sulla ricerca e/o standard per la prevenzione e la mitigazione del radon.

4 Certificazioni per l'efficienza energetica in Italia e in realtà confrontabili

I PROTOCOLLI PER LA CERTIFICAZIONE ENERGETICO AMBIENTALE A LIVELLO NAZIONALE E INTERNAZIONALE E LA QUALITÀ DELL'ARIA INDOOR (RADON)

4.1 La legislazione europea sull'efficienza energetica degli edifici

Direttiva 2002/91/CE, rendimento energetico nell'edilizia (2002) – La Direttiva 2002/91/CE, "Energy Performance of Buildings Directive, EPBD", entrata in vigore il 16 Dicembre 2002, pone le basi in materia di efficienza energetica. L'EPBD stabilisce come gli impatti dell'edilizia sul rendimento energetico siano effetti a lungo termine. La novità di questa direttiva è presente nell'Art. 7, "Attestato di certificazione energetica", dove viene indicato come in fase di costruzione, compravendita o locazione di un edificio, l'attestato di certificazione energetica, con validità di 10 anni, deve essere messo a disposizione del proprietario.

Patto dei Sindaci – Iniziativa locale lanciata dalla Commissione EU nel 2008 con il Pacchetto EU Clima ed Energia e successivamente trasformata nel 2015 nel nuovo Patto dei Sindaci per il clima e l'energia con un rinnovato impegno e una visione condivisa per il 2050 al fine di affrontare le sfide interconnesse: mitigazione dei cambiamenti climatici, adattamento ed energia sostenibile. I tre obiettivi principali sono:

- Accelerare la decarbonizzazione dei nostri territori, contribuendo così a mantenere il riscaldamento globale medio al di sotto di 1,5°C;
- Rafforzare le nostre capacità di adattarsi agli impatti degli inevitabili cambiamenti climatici, rendendo i nostri territori più resilienti;
- Aumentare l'efficienza energetica e l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili sui nostri territori, garantendo così l'accesso universale a servizi energetici sicuri, sostenibili e accessibili a tutti.

Dato l'esponenziale aumento della popolazione mondiale sempre più persone vivranno nelle città, e con l'aumentare della richiesta di abitazioni, gli edifici avranno un ruolo ancor più rilevante riguardo gli impatti sull'ambiente e sull'energia.

Ad oggi sono oltre 11.000 i firmatari del Patto dei Sindaci nell'UE, di cui più di 7.000 hanno presentato i piani d'azione; in Italia sono oltre 5.000 le amministrazioni locali e regionali firmatarie del Patto dei Sindaci Europa.

Direttiva 20-20-20 2009/28/CE, pacchetto per il clima e l'energia (2009) - Il pacchetto Clima raggruppa varie leggi per garantire, entro il 2020, all'unione Europea il raggiungimento degli obiettivi sul clima e sull'energia. Gli obiettivi principali sono tre (22):

1. taglio del 20% delle emissioni di gas a effetto serra (rispetto ai livelli del 1990);
2. 20% del fabbisogno energetico ricavato da fonti rinnovabili;
3. miglioramento del 20% dell'efficienza energetica".

Direttiva 2010/31/UE, EPBD recast, prestazione energetica nell'edilizia (2010) - Mira a migliorare le prestazioni energetiche degli edifici nell'ambito dell'unione europea, tenendo conto delle varie condizioni climatiche e locali.

- Stabilisce i requisiti minimi e un quadro comune per il calcolo delle prestazioni energetiche.
- A seguito di una revisione della sua attuazione, la Direttiva 2010/31/UE è stata modificata nel 2018 dalla Direttiva (UE) 2018/844. L'obiettivo principale era accelerare la ristrutturazione degli edifici esistenti, promuovendo anche l'impiego delle tecnologie intelligenti negli stessi. Come parte del Pacchetto Energia pulita, la direttiva di modifica si integra nella legislazione sull'efficienza energetica.

Emerge inoltre l'indicazione, per gli edifici realizzati dopo il 2020 e per gli edifici pubblici edificati dopo il 2018, di un consumo di energia prossimo allo zero: per la prima volta si sente parlare quindi di "case a energia quasi zero". In particolare, con l'espressione "casa a energia quasi zero" (NZEB- Nearly Zero Energy Building), ci si riferisce ad una struttura ad elevata prestazione energetica e con un altissimo grado di sostenibilità, il cui fabbisogno energetico dovrebbe essere coperto perlopiù da energia generata da fonti rinnovabili e possibilmente prodotta nelle vicinanze.

Energy roadmap 2050 (2011) - Rispetto ai livelli del 1990, l'Unione Europea si è posta come obiettivo la riduzione delle emissioni di gas serra dell'80-95% entro il 2050. L'analisi degli scenari illustra come l'approvvigionamento energetico dipenderà in gran parte dalle energie rinnovabili. Per questo motivo è necessario un aumento della quota di energia rinnovabile oltre il 2020.

Direttiva 2012/27/UE, efficienza energetica (2012) - La Direttiva 2012/27/UE, entra in vigore il 25 ottobre 2012, e stabilisce un quadro comune di misure per la promozione dell'efficienza energetica nell'unione Europea. Il fine primario è il raggiungimento dell'obiettivo relativo all'efficienza energetica del 20 % entro il 2020. «Al fine di cogliere le opportunità di crescita e occupazione nei settori qualificati del commercio e dell'edilizia, nonché nella produzione di prodotti edili e nelle attività professionali, quali l'architettura, la consulenza e l'ingegneria, gli Stati membri dovrebbero mettere

a punto una strategia a lungo termine al di là del 2020 per mobilitare gli investimenti nella ristrutturazione di edifici residenziali e commerciali al fine di migliorare la prestazione energetica del parco immobiliare». A tal proposito, risulta essenziale, in campo edilizio, aumentare il tasso delle ristrutturazioni, in quanto è uno dei settori con le maggiori potenzialità di risparmio energetico.

PAEE - Piano di Azione Nazionale per l'Efficienza Energetica. Piano connesso al D.lgs. 102/2014, nonché attuazione della direttiva sopracitata 2012/27/UE; decreto che stabilisce un quadro di misure per la promozione e il miglioramento dell'efficienza energetica.

Direttiva UE 2018/844, prestazione energetica nell'edilizia ed efficienza energetica (2018) - In particolare, la legge europea, interviene modificando le seguenti direttive: direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia; direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. La nuova direttiva nasce dall'esigenza di favorire il raggiungimento di nuovi obiettivi di efficientamento e prestazione energetica, ovvero: – ridurre le emissioni di gas a effetto serra di almeno il 40% entro il 2030; – favorire lo sviluppo di un sistema energetico sostenibile, competitivo, sicuro e decarbonizzato entro il 2050. Per raggiungere gli obiettivi vengono quindi introdotte alcune novità, tra le più importanti:

- obbligo di migliorare la prestazione energetica di edifici nuovi ed esistenti;
- prevedere strategie nazionali di ristrutturazione degli immobili e indicatori d'intelligenza;
- sostegno allo sviluppo di infrastrutture di ricarica per veicoli elettrici.

Direttiva UE 2018/2001 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (rifusione) – promuove e stabilisce un quadro comune per la promozione dell'energia da fonti rinnovabili. Fissando un obiettivo vincolante dell'Unione per la quota complessiva di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia dell'Unione nel 2030. Detta anche norme relative al sostegno finanziario per l'energia elettrica da fonti rinnovabili, all'autoconsumo di tale energia elettrica, all'uso di energia da fonti rinnovabili nel settore del riscaldamento e raffrescamento e nel settore dei trasporti, alla cooperazione regionale tra gli Stati membri e tra gli Stati membri e i paesi terzi, alle garanzie di origine, alle procedure amministrative e all'informazione e alla formazione. Fissa altresì criteri di sostenibilità e di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra per i biocarburanti, i bioliquidi e i combustibili da biomassa.

ISO 15392 (2019) - Sostenibilità negli edifici e nelle opere di ingegneria civile. Documento che sostituisce la precedente ISO 15392 del 2008 sul comportamento dell'edificio lungo tutto il suo ciclo vita. Stabilisce i principi generali per il contributo degli edifici allo sviluppo sostenibile. Si basa sul concetto di sviluppo sostenibile applicato al ciclo di vita delle opere di costruzione. Grazie alla nuova pubblicazione,

vengono estesi gli obiettivi legati all'Agenda 2030. Nel 2008 venivano presi in considerazione solo gli obiettivi 10SDG e 11SDG (rispettivamente Disuguaglianze ridotte e Città e Comunità sostenibili), mentre oggi si parla anche di: Buona salute e benessere, Lavoro dignitoso e crescita economica, Industria Innovazione e Infrastrutture, Consumo e produzione responsabili, Azioni per il clima, La vita sott'acqua e sulla terra.

Il Green Deal europeo (2019) - La Commissione europea ha adottato una serie di proposte per trasformare le politiche dell'UE in materia di clima, energia, trasporti e fiscalità in modo da ridurre le emissioni nette di gas a effetto serra di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990. Il Green Deal europeo è un pacchetto di iniziative strategiche che mira ad avviare l'UE sulla strada di una transizione verde, con l'obiettivo ultimo di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Sostiene la trasformazione dell'UE in una società equa e prospera con una economia moderna e competitiva. Mette in evidenza la necessità di un approccio olistico e intersettoriale in cui tutti i settori strategici pertinenti contribuiscano all'obiettivo ultimo in materia di clima. Il pacchetto comprende iniziative riguardanti clima, ambiente, energia, trasporti, industria, agricoltura e finanza sostenibile, tutti settori fortemente interconnessi.

Il quadro 2030 per l'energia e il clima (2020) - In linea con il Green Deal europeo, la Commissione Europea ha aumentato l'obiettivo di limitare le emissioni di gas serra entro il 2030. La politica energetica dell'UE si articola su quattro linee di intervento:

1. Sicurezza dell'approvvigionamento, per assicurare una fornitura affidabile di energia quando e dove necessario;
2. Garantire il funzionamento del mercato dell'energia e dunque la sua competitività, per assicurare prezzi ragionevoli per utenze domestiche e imprese;
3. Promuovere il risparmio energetico, l'efficienza energetica e lo sviluppo di energie nuove e rinnovabili, attraverso l'abbattimento delle emissioni di gas ad effetto serra e la riduzione della dipendenza da combustibili fossili;
4. Promuovere l'interconnessione delle reti energetiche.

Il programma prevede che tutti gli Stati membri dell'UE contribuiscano agli obiettivi attraverso piani nazionali integrati per l'energia e il clima basati sul progetto comune. I piani devono coprire le cinque dimensioni dell'unione dell'energia: decarbonizzazione, sicurezza energetica, efficienza energetica, mercato interno dell'energia e ricerca, innovazione e competitività.

Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile - è un programma d'azione sottoscritto nel 2015, anno della COP21 (Accordo di Parigi), dai governi dei 193 Paesi membri dell'Organizzazione delle Nazioni Unite. Agenda composta da 17 Sustainable Development Goals (SDG) interconnessi ad oltre 160 target da raggiungere entro il 2030.

4.2 La normativa di riferimento sulla certificazione energetica in Italia

La certificazione energetica era stata introdotta in Italia, come principio, dalla Legge 10/91 (Norme in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia) nell'articolo 30. La sua applicazione venne demandata ad un decreto successivo che non vide però mai la luce. Nel 2005, recependo la Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16/12/2002 sul rendimento energetico nell'edilizia (meglio nota come Direttiva EPBD), venne emanato il D.Lgs 192/2005 che pose limiti al valore del fabbisogno di energia primaria. A seguire, a correzione ed integrazione del D.Lgs 192/2005, uscì il D.Lgs 311/2006 che reintrodusse la obbligatorietà della Certificazione Energetica. L'articolo 11 del D.Lgs 311/2006 indicava inoltre che fino all'entrata in vigore dei decreti attuativi (Art. 4), il calcolo della prestazione energetica degli edifici nella climatizzazione invernale e, in particolare, del fabbisogno annuo di energia primaria, era disciplinato dalla legge 9 gennaio 1991, n.10, come modificata dal D.Lgs 192/05, dalle norme attuative e dalle disposizioni dell'Allegato I.

In questa fase di transizione si introdusse uno strumento sostitutivo, la qualificazione energetica che rimase in vigore fino all'uscita delle Linee Guida nazionali per la Certificazione Energetica (D.M. 26/06/2009). Le prime due norme attuative vennero infine pubblicate con il DPR 59/2009 ("Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettera a) e b), del Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della Direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia"). La terza norma attuativa, D.P.R. 16/04/2013, n. 75, ha infine definito i requisiti professionali e i criteri di accreditamento per assicurare la qualificazione e l'indipendenza degli esperti o degli organismi a cui affidare la certificazione energetica degli edifici e l'ispezione degli impianti di climatizzazione.

Il D.L. 63/2013 (cosiddetto "Decreto Ecobonus" entrato in vigore dal 06 giugno 2013 e convertito in legge con modificazioni dalla Legge 03/08/2013 n. 90) ha poi aggiornato il D.Lgs 192/2005 decretando il passaggio da ACE (Attestato di Certificazione Energetica) ad APE (Attestato di Prestazione Energetica). La metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, prevista all'interno del Decreto, è entrata in vigore con l'emanazione dei relativi provvedimenti attuativi. Il 23 dicembre 2013 viene pubblicato il D.Lgs 145/2013, convertito con modificazioni dalla Legge 21/02/2014, n. 9, che dispone la modifica dell'allegato A del Decreto Legislativo 192/2005 "Ulteriori definizioni".

Nel 2015 viene nuovamente aggiornato il quadro di riferimento normativo, con la pubblicazione sul supplemento ordinario n. 39 alla GU n. 162 del 15 luglio 2015 del D.M. 26 giugno 2015. Il primo Decreto riguarda gli schemi e le modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica di progetto ai fini dell'applicazione delle prescrizioni e dei requisiti minimi di prestazione energetica negli edifici; il secondo è relativo all'applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e

definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici; il terzo è riguardante l'Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.

Principali riferimenti normativi Nazionali

Legge 10/91 del 9 gennaio 1991 - Norme per l'attuazione del piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.

DPR 26 agosto 1993, n.412 - Riporta il Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10.

D.Lgs. 192/2005 e s.m. e i. - Attua la direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia. La versione qui riportata è quella coordinata con il Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311 ("Disposizioni correttive ed integrative al Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192"), con il Decreto Ministeriale 26 giugno 2009 ("Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici") e con la Legge 23 luglio 2009 n. 99 ("Disposizioni per lo sviluppo e l'internazionalizzazione delle imprese, nonché in materia di energia"). L'obiettivo del D.Lgs 192/05 è quello di ridurre i consumi di energia, ridurre le emissioni di CO₂ e creare nuove opportunità di lavoro per le aziende esistenti, favorendo anche la nascita di nuove imprese stimolando l'innovazione tecnologica. Il D.Lgs 192/2005 Il presente decreto stabilisce i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica, contribuire a conseguire gli obiettivi nazionali di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra posti dal protocollo di Kyoto, promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico. Il presente decreto disciplina in particolare:

- la metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche integrate degli edifici;
- l'applicazione di requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici;
- i criteri generali per la certificazione energetica degli edifici;
- le ispezioni periodiche degli impianti di climatizzazione;
- i criteri per garantire la qualificazione e l'indipendenza degli esperti incaricati della certificazione energetica e delle ispezioni degli impianti;
- la raccolta delle informazioni e delle esperienze, delle elaborazioni e degli studi necessari all'orientamento della politica energetica del settore;
- la promozione dell'uso razionale dell'energia anche attraverso l'informazione e la sensibilizzazione degli utenti finali, la formazione e l'aggiornamento degli operatori del settore.

L'art. 11 ("Requisiti della prestazione energetica degli edifici") è stato sostituito dal D.P.R. 59/09 ("Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b)") e abrogato dal DM 26/06/09 ("Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici").

D.Lgs. 311/2006 Fornisce disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia. Il D.Lgs. 311/2006 modifica alcuni articoli del D.Lgs 192/2005, la normativa transitoria e reintroduce la certificazione energetica per gli edifici esistenti. Le principali novità introdotte dal D.Lgs 311/2006 sono:

- stabilire che gli edifici immessi nel mercato immobiliare debbano dichiarare il proprio consumo energetico (certificazione energetica dell'edificio);
- prevedere che le Regioni, in accordo con gli enti locali, predispongano (entro il 31 dicembre 2008) un programma di sensibilizzazione dei cittadini e di riqualificazione energetica del parco immobiliare territoriale.
- rendere più severo l'obbligo di avere determinati livelli di prestazione energetica e isolamento su tutti gli edifici nuovi e su quelli ristrutturati di determinate dimensioni e determinati livelli di isolamento su tutte le parti ristrutturate di quelli esistenti (pareti, tetti, pavimenti);
- imporre che l'acqua domestica venga riscaldata con l'energia solare nei nuovi edifici o in occasione di nuova installazione di impianti termici o di ristrutturazione degli impianti termici esistenti, per una frazione almeno del 50% del fabbisogno di acqua calda;
- introdurre l'obbligo di "protezioni solari" esterne per i nuovi palazzi, riducendo il ricorso a condizionatori;
- introdurre nella pianificazione del territorio il parametro energetico;
- anticipare al 1° gennaio 2008 i livelli di isolamento termico previsti per il 1° gennaio 2009. Introdurre poi un livello di isolamento molto più incisivo dal 1° gennaio 2010 che garantirà la riduzione dei fabbisogni termici dei nuovi edifici del 20-25% rispetto ad oggi.

D.Lgs. 115/2008 - Attua la direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE. Il presente decreto, al fine di contribuire al miglioramento della sicurezza dell'approvvigionamento energetico e alla tutela dell'ambiente attraverso la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, stabilisce un quadro di misure volte al miglioramento dell'efficienza degli usi finali dell'energia sotto il profilo costi e benefici. Per tali finalità, il presente decreto:

- definisce gli obiettivi indicativi, i meccanismi, gli incentivi e il quadro istituzionale, finanziario e giuridico necessari ad eliminare le barriere e le imperfezioni esistenti sul mercato che ostacolano un efficiente uso finale dell'energia

-
- crea le condizioni per lo sviluppo e la promozione di un mercato dei servizi energetici e la fornitura di altre misure di miglioramento dell'efficienza energetica agli utenti finali.
 - Il presente decreto si applica:
 - ai fornitori di misure di miglioramento dell'efficienza energetica, ai distributori di energia, ai gestori dei sistemi di distribuzione e alle società di vendita di energia al dettaglio
 - ai clienti finali
 - alle Forze armate ed alla Guardia di finanza, limitatamente al capo IV del Titolo II e solamente nella misura in cui l'applicazione del presente decreto legislativo non è in contrasto con la natura e l'obiettivo primario delle attività delle Forze armate e della Guardia di finanza e ad eccezione dei materiali utilizzati esclusivamente a fini militari.

Sintesi delle principali novità previste dal D.Lgs. 115/2008

- Il D.Lgs. 115/08 stabilisce che in attesa dei decreti attuativi, in materia di diagnosi energetica e di certificazione energetica valgono le norme tecniche nazionali UNI TS 11300. Questo per le regioni che ancora non abbiano adottato un loro regolamento specifico e fino a che non saranno pubblicati di decreti di cui al D.Lgs. 192/05, art.4:
- questo decreto, all'Articolo 11, comma 1 e 2, introduce l'esclusione dai computi per le determinazioni dei volumi, delle superfici e dei rapporti di copertura, lo spessore delle murature;
- esterne, delle tamponature o dei muri portanti, superiori ai 30 centimetri (per i nuovi interventi, oltre i 20 cm per quelli esistenti), il maggior spessore dei solai e tutti i maggiori volumi e superfici necessari ad ottenere una riduzione minima del 10 per cento dell'indice di prestazione energetica;
- per quanto riguarda la semplificazione delle procedure autorizzative, il D.Lgs. 115/08, sancisce che per l'installazione di pannelli solari termici e fotovoltaici, nel caso che siano integrati;
- architettonicamente o complanari alla copertura, e che comunque non modificano la sagoma dell'edificio, non è necessario presentare la DIA (Denuncia Inizio Attività) al comune;
- all'ENEA viene assegnato il compito di Agenzia per l'Energia, con funzioni di supporto al Ministero dello Sviluppo Economico, di monitoraggio, di rafforzamento dell'azione del Legislatore;
- vengono definite chiaramente le ESCO, come società che forniscono servizi energetici ovvero altre misure di miglioramento dell'efficienza energetica nelle

installazioni o nei locali dell'utente e, ciò facendo, accettando un certo margine di rischio finanziario;

- vengono definiti il contratto servizio energia ed il contratto servizio energia plus introdotto dal DPR 412/93, e si specifica l'importanza per il settore pubblico di individuare una controparte;
- vengono definiti quali sono i soggetti abilitati alla certificazione energetica, ovvero tecnici operanti in veste di dipendenti di enti, organismi pubblici società di servizi pubblico o privata, professionisti liberi o associati, iscritti ai relativi ordini e collegi ed abilitati. Inoltre, nel caso in cui il tecnico abbia competenze specifiche, dovrà operare in collaborazione con un altro tecnico abilitato, al fine di costituire un gruppo di lavoro che copra tutti gli ambiti necessari.

DPR 59/2009 del 2 aprile - Riporta il Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettera a) e b), del Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della Direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia. Il presente decreto definisce i criteri generali, le metodologie di calcolo e i requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici e degli impianti termici per la climatizzazione invernale e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, di cui all'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n.192, rimandando a successivi provvedimenti i criteri generali, le metodologie di calcolo e i requisiti minimi per la prestazione energetica degli impianti termici per la climatizzazione estiva. A seguire vediamo la sintesi delle principali novità introdotte dal DPR 59/2009:

- All' articolo 2 vengono introdotte nuove definizioni: Sistemi Filtranti delle superfici trasparenti, Trasmittanza Termica Periodica (Yie) e Copertura a Verde.
- Vengono adottate (articolo 3) le norme tecniche nazionali ad oggi disponibili ed in particolare le UNI TS 11300-1 e le UNI TS 11300-2. Le UNI TS 11300-1 riguardano la determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, mentre le UNI TS 11300-2 la determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e la produzione dell'acqua calda sanitaria (ACS).

Non essendo quindi possibile determinare il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva, per tale aspetto il decreto fissa solo i valori limite di fabbisogno termico.

- Gli strumenti di calcolo applicativi delle metodologie di cui sopra (software commerciali), devono garantire che i valori degli indici di prestazione energetica calcolati abbiano uno scostamento massimo di $\pm 5\%$ rispetto ai corrispondenti parametri determinati con l'applicazione dello strumento nazionale di riferimento predisposto dal CTI.
- Per tutte le categorie di edifici (art. 3 DPR 412/93), nel caso di edifici di nuova costruzione e nei casi di ristrutturazione di edifici esistenti si procede in sede

progettuale alla determinazione dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale (EPI), e alla verifica che lo stesso risulti inferiore ai valori limite riportati nell'allegato C del D.Lgs. 192/2005 e s.m.e i.

- Vengono introdotti nuovi limiti di legge per quanto riguarda la prestazione energetica per la climatizzazione estiva dell'edificio e la trasmittanza periodica Y_{ie} per il controllo dell'inerzia dell'involucro.
- All'articolo 4 comma 9, viene indicata la preferenza, al mantenimento di impianti termici centralizzati, se già esistenti, per edifici con un numero di unità abitative superiore a 4, di categoria E1 o E2, con potenze nominali superiori a 100 kW.
- Come già disposto dal D.Lgs. 192/2005, la relazione tecnica deve essere depositata in Comune in doppia copia contestualmente alla Denucia Inizio Lavori.

DM 26/7/2009 - Le linee guida nazionali (sono state pubblicate il 10/06/2009 e costituiscono la piena attuazione della direttiva Europea 2002/91/CE e dell'articolo 4, comma 1 del D.Lgs. 192/2005. Il presente decreto infatti definisce:

- le Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici
- gli strumenti di raccordo, concertazione e cooperazione tra lo Stato e le regioni.

Il campo di applicazione delle linee guida nazionali riguarda gli edifici che rientrano nelle categorie indicate all'articolo 3 del DPR 412/93. Il DM 26/06/2009 è composto da 8 articoli e 2 allegati. Nell'allegato A sono contenute le linee guida che a loro volta sono suddivise in altri 7 allegati. Nell'allegato B sono elencate le norme tecniche di riferimento. Vediamo in sintesi i punti principali del DM:

- le disposizioni contenute nelle Linee guida si applicano per le regioni e province autonome che non abbiano ancora provveduto ad adottare propri strumenti di certificazione energetica degli edifici in applicazione della direttiva 2002/91/CE e comunque sino alla data di entrata in vigore dei predetti strumenti regionali di certificazione energetica degli edifici. Si chiede solo che le regole tecniche emanate dalle Regioni (Norme tecniche di riferimento), siano conformi a quelle sviluppate in ambito europeo e nazionale;
- l'attestato di certificazione energetica deve contenere l'efficienza energetica dell'edificio, i valori di riferimento a norma di legge e le classi prestazionali, oltre a indicazioni economicamente sostenibili per interventi di riqualificazione energetica;
- Nell'articolo 6 viene definita la validità dell'Attestato di Certificazione Energetica in 10 anni, purché siano rispettate le prescrizioni normative vigenti per le operazioni di controllo di efficienza energetica, compreso le eventuali conseguenze di adeguamento, degli impianti di climatizzazione asserviti agli edifici, ai sensi dell'articolo 7, comma 1, del decreto legislativo 192/2005. Nel caso di mancato rispetto delle predette disposizioni l'attestato di certificazione

decade il 31 dicembre dell'anno successivo a quello in cui è prevista la prima scadenza non rispettata per le predette operazioni di controllo di efficienza energetica. L'attestato di certificazione energetica è aggiornato ad ogni intervento di ristrutturazione, edilizio e impiantistico, che modifica la prestazione energetica dell'edificio;

- la prestazione energetica complessiva dell'edificio è espressa attraverso l'indice di prestazione energetica globale EPgl, dato dalla somma dei seguenti termini:

$$EPgl = EPI + EPacs + EPe + EPill$$

dove:

- EPI è l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale;
- EPacs l'indice di prestazione energetica per la produzione dell'acqua calda sanitaria;
- EPe l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva;
- EPill l'indice di prestazione energetica per l'illuminazione artificiale.

Nella fase di avvio dell'applicazione delle Linee Guida vengono considerati i soli contributi per la climatizzazione invernale, la produzione di acqua calda sanitaria, mentre per l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva è prevista per ora solo una valutazione qualitativa dell'involucro.

Sulla base delle finalità, dell'esperienza e delle opportunità offerte dalla certificazione energetica possono essere usate diverse metodologie di riferimento per la determinazione della prestazione energetica degli edifici, differenti per utilizzo e complessità. Sono pertanto considerati il Metodo calcolato di progetto, che prevede la valutazione della prestazione energetica a partire dai dati di ingresso del progetto energetico dell'edificio come costruito e dei sistemi impiantistici a servizio dell'edificio come realizzati, per gli edifici di nuova costruzione e per quelli completamente ristrutturati ed il Metodo di calcolo da rilievo sull'edificio standard, che prevede la valutazione della prestazione energetica a partire dai dati di ingresso ricavati da indagini svolte direttamente sull'edificio esistente.

D.Lgs. 29/03/2010 n. 56 - Modifiche ed integrazioni al decreto 30 maggio 2008, n. 115, recante attuazione della direttiva 2006/32/CE, concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e recante abrogazioni della direttiva 93/76/CEE.

DM 6 agosto 2010 - Incentivazione della produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica della fonte solare.

Allegato al Decreto 10 settembre 2010 - Linee guida per l'autorizzazione alla costruzione e all'esercizio degli impianti di produzione elettricità alimentati da fonti rinnovabili, nonché linee guida tecniche per gli impianti stessi (GU n. 219 del 18-9-2010).

Decreto 10/09/2010 - Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili.

D.Lgs. 3/3/2011 n. 28, attuazione della Direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.

Decreto Ministero Sviluppo Economico 5 maggio 2011 - Decreto Ministero Sviluppo Economico 5 maggio 2011, incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti solari fotovoltaici.

Decreto Ministero Sviluppo Economico 5 luglio 2012 - Attuazione dell'art. 25 del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28, recante incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti solari fotovoltaici (c.d. Quinto Conto Energia).

Decreto Ministero Sviluppo Economico 6 luglio 2012 Attuazione dell'art. 24 del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28, recante incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti a fonti rinnovabili diversi dai fotovoltaici.

DM 22 novembre 2012 Modifica dell'Allegato A del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.

Decreto Ministero Sviluppo Economico 22 novembre 2012 - Modifica del decreto 26 giugno 2009, recante "Linee guida per la certificazione energetica degli edifici".

DM 28 dicembre 2012 - Conto Termico - Incentivazione della produzione di energia termica da fonti rinnovabili ed interventi di efficienza energetica di piccole dimensioni.

DM 28 dicembre 2012 - Titoli Efficienza Energetica - Determinazione degli obiettivi quantitativi nazionali di risparmio energetico che devono essere perseguiti dalle imprese di distribuzione dell'energia elettrica e il gas per gli anni dal 2013 al 2016 e per il potenziamento del meccanismo dei certificati bianchi.

DM 28 dicembre 2012 - Titoli Efficienza Energetica (Allegato 1) - Titoli efficienza energetica - allegato 1. Schede tecniche da 30 a 38 -

DM 28 dicembre 2012 - Titoli Efficienza Energetica (Allegato 2) - Titoli efficienza energetica - allegato 2. Schede tecniche da 39 a 47

DPR 16 aprile 2013 n. 74 - È stato pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale del 27 giugno 2013 il riportante i criteri di "gestione" degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva e per la produzione di ACS. Tra le novità: temperature di riferimento per il condizionamento e obblighi di verifica sui rendimenti minimi degli impianti esistenti. Questo decreto si rivolge essenzialmente agli impianti termici e alla loro manutenzione, introducendo la novità che da ora in poi le ispezioni agli impianti di climatizzazione invernale – svolte per legge da Comuni e Province – vengano fatte solo sugli impianti di potenza superiore a 100 kW. Per impianti di potenza compresa

fra 10 kW e 100 kW, basterà un Rapporto di controllo tecnico, redatto dal manutentore al termine delle operazioni, e da lui inviato agli Enti competenti. Altra novità di rilievo: gli scaldacqua al servizio delle singole unità abitative non sono più considerati impianti termici per cui cessa, per loro, l'obbligo di ispezione periodica. Infine, si segnala la novità dell'obbligo di ispezione per impianti di climatizzazione estiva di potenza superiore a 100 kW, mentre per quelli compresi fra 12 kW e 100 kW, resterà valido il Rapporto di controllo tecnico, sostitutivo all'ispezione (come per gli impianti di climatizzazione invernale).

DPR 75 del 16 aprile 2013 - Regolamento recante disciplina dei criteri di accreditamento per assicurare la qualificazione e l'indipendenza degli esperti e degli organismi a cui affidare la certificazione energetica degli edifici, a norma dell'articolo 4, comma 1, lettera c), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192 (pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale il 27/06/2013). Nel Decreto si specificano le figure professionali abilitate a svolgere il ruolo di certificatori senza frequentare un corso e quali necessitano invece di un corso (di cui si descrivono i contenuti). Si indicano inoltre i criteri per garantire l'indipendenza dei certificatori.

D.Lgs. 4 giugno 2013, n. 63 - Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale.

Legge 90 del 3 agosto 2013 - Conversione in legge, con modificazioni, del D.Lgs. 4 giugno 2013, n. 63, recante disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale (GU n.181 del 3-8-2013).

Circolare Ministero Sviluppo Economico - 8 agosto 2013 - Chiarimenti in merito all'applicazione delle disposizioni di cui al decreto-legge 4 giugno 2013, n.63 come convertito, con modificazioni, dalla legge 3 agosto 2013, n.90, in materia della prestazione energetica degli edifici.

Schema di procedura autorizzazione corsi di certificazione energetica - 21 novembre 2013 - Schema di procedura, del Ministero dello Sviluppo Economico, per il rilascio dell'autorizzazione allo svolgimento dei corsi di formazione per la certificazione energetica degli edifici a livello nazionale.

D.L. 23 dicembre 2013, n. 145 - 23 dicembre 2013 - Convertito con modificazioni dalla L. 21/02/2014, n. 9 (in G.U. 21/2/2014, n. 43), ha disposto (con l'art. 1, comma 7-bis) la modifica dell'allegato A del D.Lgs. 192/2005 "Ulteriori definizioni" (G.U. 23/12/2013, n.300). Tale decreto stabilisce che non è più necessario allegare copia dell'APE al contratto di locazione di singole unità immobiliari, lasciando immutata

l'obbligatorietà di inserire nei contratti l'apposita clausola con la quale l'acquirente o il conduttore dichiarano di aver ricevuto le informazioni e la documentazione in merito alla prestazione energetica dell'unità immobiliare. Tale clausola può essere omessa solo nel caso di trasferimenti a titolo gratuito (donazioni). Vengono inoltre modificate le sanzioni introdotte nel Decreto Ecobonus: in caso di omessa dotazione, dichiarazione o allegazione, se dovute, le parti sono soggette al pagamento in solido e in parti uguali di sanzioni.

Legge 147/2013 "Legge di Stabilità" - La Legge di Stabilità rinvia l'operatività della disciplina di cui al comma 3-bis reintroducendo l'obbligo di allegazione dell'APE ai contratti di locazione, ma tale obbligo viene rinviato a data da destinarsi.

Legge 9/2014 "Destinazione Italia" - La Legge di conversione del Decreto Destinazione Italia conferma quanto già stabilito dal Decreto Destinazione Italia, specificando, tuttavia, che il pagamento della sanzione amministrativa non esenta comunque dall'obbligo di presentare la dichiarazione o la copia dell'attestato di prestazione energetica entro 45 giorni.

Decreto 10 febbraio 2014 - Modelli di libretto di impianto per la climatizzazione e di rapporto di efficienza energetica di cui al decreto del Presidente della Repubblica n. 74/2013. (14A01710) (GU n.55 del 7⁻³-2014).

D.L. 24 giugno 2014, n. 91 - 24 giugno 2014 - D.L. 24 giugno 2014, n. 91, convertito con modificazioni dalla L. 11 agosto 2014, n. 116 (in S.O. n. 72, relativo alla G.U. 20/8/2014, n. 192), ha disposto (con l'art. 30, comma 2-quinquies) la modifica dell'art. 8, comma 1 (G.U. 24/06/2014, n.144).

D.Lgs. 4 luglio 2014, n. 102 - 4 luglio 2014 - D.Lgs. 4 luglio 2014, n. 102 "Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE. (GU n.165 del 18-7-2014)"

D.Lgs. 21 novembre 2014, n. 175 - 21 novembre 2014 - D.Lgs. 21 novembre 2014, n. 175 dispone (con l'art. 34, comma 1, lettere a) e b)) la modifica dell'art. 6, comma 3 del D.Lgs. 192/2005 riguardante la documentazione progettuale di cui all'art. 28, comma 1, della L. 9 gennaio 1991, n. 10 (G.U. 28/11/2014, n.277).

Decreto interministeriale 26 giugno 2015 – Linee guida - Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, Pubblicato nel Supplemento ordinario n. 39 alla Gazzetta Ufficiale n. 162 del 15 luglio 2015. Il presente decreto si pone la finalità di favorire l'applicazione omogenea e coordinata dell'attestazione della prestazione energetica degli edifici e delle unità immobiliari, nel seguito, per brevità, solamente edifici o immobili, su tutto il territorio nazionale.

Decreto interministeriale 26 giugno 2015 – Relazione tecnica di progetto - Schemi e modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica di progetto ai fini dell'applicazione delle prescrizioni e dei requisiti minimi di prestazione energetica

negli edifici, Pubblicato nel Supplemento ordinario n. 39 alla Gazzetta Ufficiale n. 162 del 15 luglio 2015.

Decreto interministeriale 26 giugno 2015 – Requisiti minimi - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici, Pubblicato nel Supplemento ordinario n. 39 alla Gazzetta Ufficiale n. 162 del 15 luglio 2015.

Decreto legislativo 10 giugno 2020 n.48

Attuazione della direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.

SEN- Strategia Energetica Nazionale – Con D. M. del novembre 2017, del Ministero dello Sviluppo Economico e del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, è stata adottata la Strategia Energetica Nazionale del 2017 per gestire il cambiamento del sistema energetico. Strategia volta ad investire circa 175 mld di euro per incrementare l'efficienza energetica (110 mld di euro) e l'uso delle rinnovabili verso la de-carbonizzazione. Comprende tre specifici obiettivi, ovvero aumentare la competitività, maggior attenzione all'ambiente e alla sicurezza. In particolare, si vogliono allineare i prezzi nazionali con quelli europei, riducendo costi legati alle rinnovabili tramite liberalizzazioni ed investimenti; la Strategia mira a ridurre anche la dipendenza energetica esterna, passando dal 76% al 64%, diversificando l'origine delle fonti aumentando il mix rinnovabile. Gli obiettivi della Strategia Energetica Nazionale sono più ambiziosi dell'Agenda 2030.

Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima 2030 (PNIEC) – Piano volto a cambiare la politica ambientale ed energetica del nostro Paese verso la decarbonizzazione. Vengono toccate diverse tematiche come la sicurezza e l'efficienza energetica, lo sviluppo del mercato interno dell'energia, la ricerca, l'innovazione e la competitività. Piano pubblicato dal Ministero dello Sviluppo Economico il 21/01/2020, predisposto dal MATTM (ambiente e tutela territorio e mare) e dal MIT (infrastrutture e trasporti). Recepisce novità del Decreto Legge sul clima e investimenti legati al Green New Deal. L'obiettivo entro il 2030 è quello di incrementare l'uso delle FER (fonti energetiche rinnovabili) ed aumentare i risparmi da politiche attive. Nello specifico, si parla di un utilizzo delle rinnovabili del 30%, aumento dell'efficienza energetica fino a 104 Mtep e una riduzione di CO2 del 33%.

4.3 I protocolli per la certificazione energetico-ambientale

Introduzione

Negli ultimi anni è risultata sempre più forte la volontà di trasformare il sistema energetico attuale in un sistema più sostenibile, in grado di limitare l'uso di energia da fonti fossili, principali responsabili del cambiamento climatico. Nel quadro delle azioni climatiche dell'UE, in cui vengono definiti gli obbiettivi a lungo termine (2050), risulta evidente come il settore degli edifici ricopra un ruolo molto importante. Infatti, il settore edilizio in Europa è responsabile di circa il 40% del consumo di energia e il 30% delle emissioni di gas serra; inoltre, grandi sforzi sono richiesti per il rinnovo del patrimonio esistente, dal momento che si è stimato che circa due terzi degli edifici esistenti siano inefficienti (secondo il Parlamento Europeo, circa il 75% degli edifici è inefficiente dal punto di vista energetico).

A livello nazionale, il patrimonio edilizio esistente ammonta a circa 120 milioni di vani che costituiscono la nostra struttura urbana e sono formati da: - edifici che consideriamo "storici", ai fini della tutela, della consistenza di circa 30 milioni di vani, realizzati in oltre 3.000 anni di storia e che costituiscono l'identità stessa della civiltà italiana, da considerare un "bene unico e irriproducibile"; - fabbricati che costituiscono le periferie urbane e non, la cui consistenza è stimabile in circa 90 milioni di vani.

È noto, inoltre, come il settore degli edifici abbia un impatto significativo sull'ambiente e sulla società. Le persone trascorrono la maggior parte del loro tempo in ambienti chiusi, e per questo motivo l'attenzione si sta ponendo sempre di più sulla capacità degli edifici di garantire condizioni ottimali e salubri per gli occupanti, dando quindi molta importanza al loro benessere, comfort interno e salute. Negli ultimi anni, oltre alla riduzione dell'impatto energetico-ambientale degli edifici, l'EPBD del 2018 (Direttiva UE 2018/844) introduce un approccio human-centric, avente l'obiettivo di dare importanza al comfort e al benessere delle persone quando si trovano all'interno di ambienti chiusi. Inoltre, il tema è diventato ancora più di rilievo nell'attuale panorama internazionale, a seguito dell'emergenza della diffusione del virus COVID-19, evidenziando l'importanza di controllare la qualità degli ambienti interni per salvaguardare le persone.

La Direttiva promuove quindi miglioramenti della prestazione energetica degli edifici esistenti che contribuiscano alla creazione di ambienti interni salubri, rimuovendo – tra le altre cose – amianto e altre sostanze nocive. In questo caso è importante garantire misure di miglioramento della prestazione rivolte non solo all'involucro, ma di tutti gli elementi pertinenti e i sistemi tecnici di un edificio, come gli elementi passivi che contribuiscono alle tecniche passive volte a ridurre il fabbisogno energetico per il riscaldamento o il raffrescamento, il consumo energetico per l'illuminazione e la ventilazione, migliorando in tal modo il comfort termico e visivo.

I ponti termici, l'inadeguatezza dell'isolamento e le infiltrazioni d'aria possono generare temperature superficiali al di sotto della temperatura di rugiada dell'aria, oltre che umidità. È fondamentale, pertanto, garantire un isolamento completo e omogeneo dell'edificio, compresi i balconi, le finestre, i tetti, i muri, le porte e i pavimenti, ed è opportuno prestare particolare attenzione a evitare che la temperatura di una qualsiasi superficie interna dell'edificio scenda al di sotto della temperatura di rugiada.

Nell'ambito edilizio gli aspetti che incidono sul benessere sono vari. Per esempio, la qualità dell'aria, della luce e il comfort termico, incidono sul benessere fisico; invece, il benessere intellettuale o emotivo può essere influenzato dal design interno ed esterno di un edificio o dall'integrazione con la natura.

Volendo fare un esempio, degli effetti che si potrebbero avere nel caso in cui non venga garantito un adeguato benessere interno, si può fare riferimento alla Sindrome dell'edificio malato (SBS).

Essa riguarda una serie di problemi di salute derivanti dalle condizioni dell'ambiente interno, che sia esso un ufficio o una residenza. Per esempio, le cause possono essere identificate nell'uso di materiali non testati, aperture naturali che limitano l'ingresso della luce, la qualità dell'aria indoor e l'utilizzo di attrezzature come stampanti e computer. Tra i sintomi si trova mal di testa, tosse, affanno, irritazione degli occhi, del naso e della gola. È evidente come questa relazione tra causa-effetto abbia una conseguenza diretta sul benessere e sulla produttività degli occupanti. Per questo motivo, al fine di garantire un adeguato comfort interno e benessere dell'utenza è essenziale che gli edifici rispettino precisi criteri, in modo da garantire un equilibrio tra aspetti oggettivi e soggettivi.

Il tema del benessere (well-being) viene affrontato in genere da tutti i protocolli di sostenibilità energetico-ambientale degli edifici, nati in periodi antecedenti alle certificazioni energetiche oggi in vigore, le quali, a livello nazionale, vengono identificate negli APE - Attestati di Prestazione Energetica, monitorati questi ultimi dall'ENEA all'interno del SIAPE (Sistema Informativo sugli Attestati di Prestazione Energetica), istituito con Decreto Interministeriale 26/06/2015, al fine di restituire una immagine dettagliata dello stato dell'arte sulla riqualificazione energetica del parco edilizio nazionale.

La nascita dei primi protocolli di sostenibilità energetico ambientale avviene negli anni '90, nel Regno Unito il protocollo Building Research Establishment Environmental Assessment Method, BREEAM, e negli Stati Uniti la Leadership in Energy and Environmental Design, LEED. A seguire comunità imprenditoriali e professionali come US Green Building Council o organi tecnici come ITACA, elaborano l'obiettivo di promuovere e supportare la costruzione sostenibile.

I protocolli hanno l'intento di valutare ed esprimere la sostenibilità dell'edificio, non solo dal punto di vista energetico, ma anche considerando i possibili impatti che un

edificio può avere sull'ambiente e sulle persone che vivono o lavorano al suo interno. Garantire e valutare l'applicazione di strategie di riduzione dell'impatto ambientale nel progetto e nella costruzione dell'edificio o di un gruppo di edifici. I protocolli permettono inoltre la comparabilità tra edifici e possono essere utilizzati come linea guida per la determinazione degli obiettivi di sostenibilità. In generale sono caratterizzati da una grande attenzione all'efficienza energetica, area tematica che ha generalmente il peso maggiore sulla valutazione globale dell'edificio. Altro aspetto comune, per quanto con declinazioni differenti a seconda del sistema, è la valutazione dell'impatto ambientale a tutto il ciclo di vita dell'edificio: dalla costruzione alla sua dismissione o riqualificazione. Gli aspetti legati alla qualità degli ambienti interni e al benessere dei fruitori, sono inoltre presenti in tutti i protocolli, ma con una rilevanza e un numero di indicatori differente in base ad ogni protocollo.

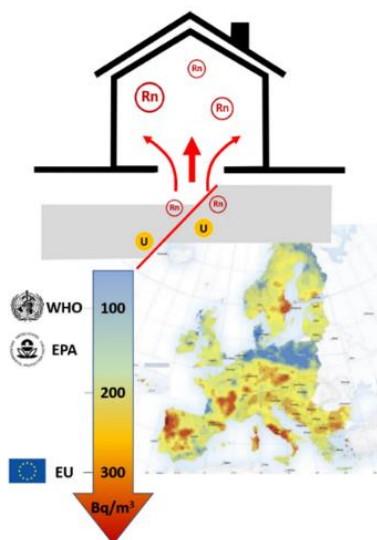
Fig. 7. SCHEMA GENERICO DEGLI AMBITI DI VALUTAZIONE DEI PROTOCOLLI DI SOSTENIBILITÀ ENERGETICO AMBIENTALE



In riferimento alla qualità dell'ambiente interno, il rischio Radon negli edifici ha grande rilevanza. Questo è un gas che può essere presente nelle abitazioni, negli uffici, nelle scuole ecc. e che ad alte concentrazioni è molto nocivo per la salute, è inquadrato al secondo posto dopo il fumo, come causa per l'insorgenza di tumori polmonari. Il gas Radon è una sostanza naturale radioattiva che ha origine dal decadimento nucleare del radio, prodotto a sua volta dal decadimento dell'uranio. Si tratta di un gas nobile che ha origine nel terreno soprattutto se di origine vulcanica. I metalli prodotti dal decadimento del Radon contaminano l'aria e l'acqua spostandosi attraverso le fessure, le crepe e le tubature. I solai degli edifici a contatto con il terreno sono i più esposti e possono avere alte concentrazioni di Radon. Mentre

negli edifici di nuova costruzione è più semplice predisporre tutti gli accorgimenti per impedire la penetrazione del gas Radon all'interno, negli edifici esistenti l'obiettivo è limitarne la concentrazione. Opportune misure preventive sono efficaci nel ridurre la presenza di Radon nelle abitazioni e negli ambienti di lavoro. Tra i provvedimenti che possono avere effetti sulla riduzione della concentrazione di Radon c'è l'aumento del ricambio d'aria da ottenere con la ventilazione naturale o forzata, con l'impiego di sistemi attivi. Un altro intervento è la chiusura ermetica delle vie di accesso del Radon verso l'edificio e l'isolamento degli interstizi intorno alle condotte di acqua, gas, elettricità e scarichi. Risulta utile anche sigillare con guarnizioni isolanti elastiche le porte di accesso ai piani interrati ed eventuali botole. Efficace l'inserimento di membrane isolanti anti-Radon nei solai e nelle pareti dei piani interrati in fase di ristrutturazione, ma è una soluzione da abbinare ad altri interventi per ridurre le concentrazioni nocive. In alternativa si possono posare pannelli in vetro cellulare a tenuta stagna. Essendo la zona più a contatto con il terreno, il vespaio posto alla base dell'edificio deve essere ventilato in maniera naturale o forzata. In alternativa, in assenza di vespaio si può realizzare un pozzetto Radon per portare il gas all'esterno.

Fig. 8. RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DELL'INGRESSO DEL RADON IN UN EDIFICIO, MAPPA EUROPEA DELLA CONCENTRAZIONE DELL'URANIO NEI SUOLI (EUROPEAN ATLAS OF NATURAL RADIATION) E VALORI DI RIFERIMENTO DI RADON INDOOR SECONDO WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION), EPA (US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY) E EU (EUROPEAN UNION)
FONTE: [HTTPS://WWW.RINNOVABILI.IT/AMBIENTE/INQUINAMENTO/RISCHIO-RADON-AMBIENTI-CHIUSI/](https://www.rinnovabili.it/ambiente/inquinamento/rischio-radon-ambienti-chiusi/)



In figura 8 vengono inseriti i valori Radon di riferimento della Comunità Europea in base alle indicazioni fornite dalla Direttiva 2013/59/EURATOM, recepita in Italia dal

Decreto Legislativo 101/2020; in questi documenti viene indicato come soglia un valore di concentrazione media annua di radon indoor pari a 300 Bq m^{-3} , sia nelle abitazioni sia nei luoghi di lavoro. Il livello massimo di riferimento scende a 200 Bq m^{-3} per le abitazioni di nuova costruzione.

Poiché le riqualificazioni per l'efficiamento energetico ambientale degli edifici portano a "sigillare" l'edificio al fine di evitare le dispersioni termiche, lo studio condotto sui diversi protocolli di certificazione energetico ambientale, va ad analizzare come questi ultimi intervengono nello specifico, sulla parte riguardante la qualità ambientale interna e le relative misure, indicatori e parametri individuati al fine di garantire una elevata qualità dell'aria negli ambienti interni e la riduzione dal rischio Radon negli edifici.

4.3.1 I protocolli internazionali

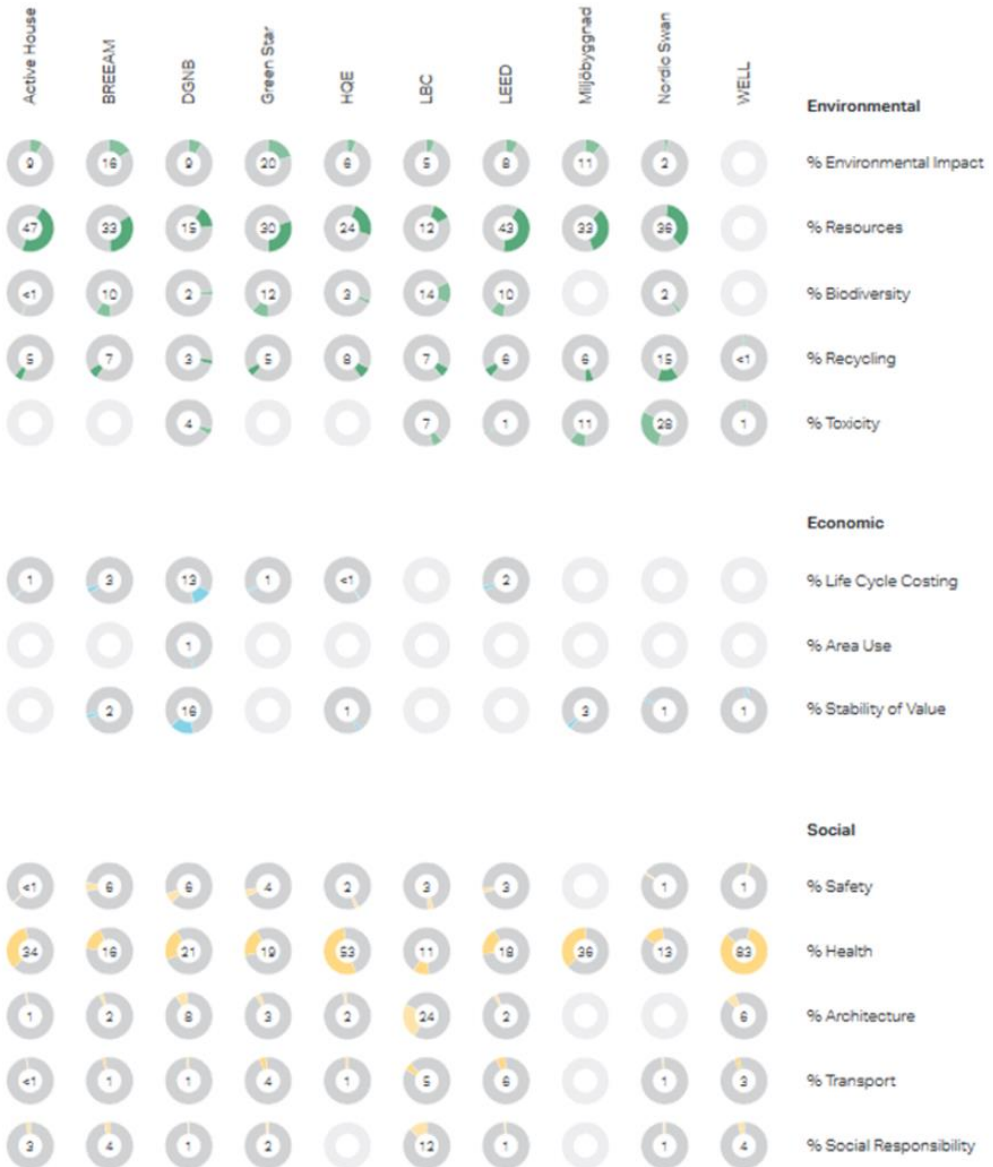
I protocolli di sostenibilità energetico ambientale sono strumenti a base volontaria per la valutazione della qualità ambientale, ecologica e sociale nel settore delle costruzioni. La maggior parte di essi si basa sui sistemi di "rating", ovvero un insieme di "crediti" con un corrispondente punteggio. Nello studio dei protocolli qui condotto, si evidenzia in particolare il campo relativo alla qualità dell'aria indoor (e/o al well-being o health), sempre presente in tutti i protocolli, e in genere all'interno di questo campo si distinguono diversi indicatori, tra cui spesso viene richiesto il parametro sui valori del Radon, con conseguenti azioni da mettere in campo.

Nel documento *Guide to Sustainable Buildings Certifications*, una guida redatta da molteplici autori, a cura di una collaborazione tra il Danish Building Research Institute – SBi, e la compagnia di innovazione 3XN Architects-GXN, vengono studiati una serie di protocolli energetico ambientali attraverso un'analisi categorizzata sotto tre dimensioni di sostenibilità:

- aspetti ambientali
- aspetti economici
- aspetti sociali

Ministri dei Paesi nordici 2005), WELL (Stati Uniti 2014). La selezione dei marchi di certificazione è stata effettuata tramite il criterio di maggior presenza del marchio nell'ambito dell'industria edilizia all'interno dei paesi danesi e confinanti, anche se alcuni dei marchi sono stati selezionati per determinate caratteristiche particolari come il marchio WELL, che si dedica in assoluto alla dimensione sociale.

Fig. 10. PESO DEI CRITERI IN RIFERIMENTO AI 10 MARCHI ANALIZZATI NEL DOCUMENTO GUIDE TO SUSTAINABLE BUILDINGS CERTIFICATIONS A CURA DEL DANISH BUILDING RESEARCH INSTITUTE E SBI.



Come riportato in Figura 10, la classifica del peso rispetto al parametro salute viene così riscontrata: 83% per il protocollo WELL, 53% per il protocollo HQE, 36% per MILJOBYGGNAD, 34% per Active House, 21% per DGNB, 19% per Green Star, 18% per il LEED, 16% per il BREEAM, 13% per Nordic Swan, 11% per LCB. E' possibile da qui rilevare che il protocollo WELL tra questi è quello con l'indice più elevato. Di seguito viene analizzato più in dettaglio.

WELL (USA)

Il protocollo WELL Building Standard nasce nel 2014; è gestito dall'International Well Building Institute (IWBI) ed è stato rilasciato dall'USGBC come il protocollo LEED. A differenza del precedente protocollo LEED, che ha l'obiettivo di certificare la sostenibilità dell'edificio, il protocollo WELL si focalizza sulla capacità dell'edificio in esame di garantire condizioni ottimali per le persone che lo occupano, in termini di comfort globale, benessere e salute. A differenza del LEED, questa certificazione deve essere rinnovata ogni 3 anni in quanto le condizioni dell'edificio nel tempo possono cambiare.

Le persone che occupano lo spazio sono suddivise in:

- OCCUPANTE: qualsiasi individuo che si trovi entro i confini dell'edificio;
- OCCUPANTE REGOLARE: un soggetto che trascorre almeno 30 ore al mese per almeno cinque giorni entro i confini dell'edificio, come un dipendente;
- VISITATORE: qualunque persona che non sia un occupante regolare. A tal fine viene definita la figura del dipendente, ossia una persona che lavora per il proprietario del progetto entro i confini del progetto. Invece, il dipendente idoneo è un dipendente identificato come idoneo ai benefici.

Il WELL si compone di 7 aree tematiche, denominate Concept:

1. ARIA
2. ACQUA
3. ALIMENTAZIONE
4. LUCE
5. MOVIMENTO
6. COMFORT TERMICO
7. MENTE

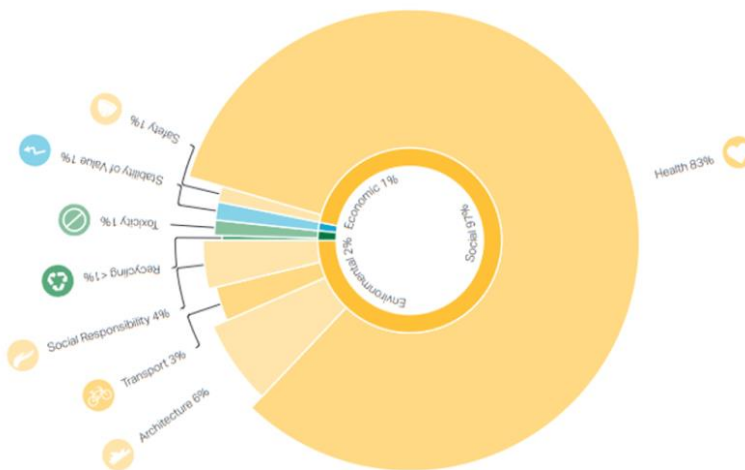
Il protocollo WELL trova il suo sviluppo nell'integrazione della ricerca scientifica, della salute ambientale, dei fattori comportamentali, degli esiti sanitari e dei fattori di rischio demografico. Tutti questi aspetti incidono sulla salute umana del singolo individuo e della collettività. Per questo motivo il protocollo fornisce un iter per

integrare la salute umana nella progettazione di edifici e in tutte le sue fasi, dalla progettazione alla gestione.

La certificazione WELL può essere ottenuta da qualsiasi tipo di edificio che sia esso pubblico o privato, che sia una scuola, un edificio residenziale, per uffici, negozi, ospedali e ristorante. In particolare, viene richiesta dalle aziende. Le tipologie sono:

- NEW AND EXISTING BUILDINGS: La certificazione riguarda l'intero edificio quindi si ha la possibilità di rispettare più features.
- NEW AND EXISTING INTERIORS: In questo caso viene analizzata solo una parte di edificio o un intero edificio non sottoposto a ristrutturazione;
- CORE AND SHELL: Questa tipologia riguarda la struttura e tutti gli elementi come finestre, acqua, ventilazione, riscaldamento e raffreddamento che caratterizzano l'edificio.

Fig. 11. ANALISI WELL SU EDIFICI NUOVI ED ESISTENTI, PERCENTUALI PER CATEGORIA



Per il protocollo WELL, nell'ambito delle categorie illustrate in figura 11 la salute ricopre ben l'83%.

Per quanto riguarda la qualità dell'aria indoor: il concetto di WELL Air mira a raggiungere elevati livelli di qualità dell'aria interna durante la vita di un edificio attraverso diverse strategie che includono l'eliminazione o la riduzione della fonte, la progettazione di edifici attivi e passivi e le strategie operative e gli interventi sul comportamento umano.

In particolare, per quanto riguarda il gas Radon, è previsto nella parte 4 della sezione AIR il criterio di soddisfare le soglie di Radon. WELL richiede un'adeguata ventilazione al fine di introdurre aria fresca dall'esterno attraverso mezzi meccanici e / o naturali

per diluire gli inquinanti atmosferici generati dall'uomo e dai prodotti. I criteri della certificazione WELL riguardanti la qualità dell'aria sono numerosi e complessi.

BREEAM (Regno Unito)

Il marchio BREEAM, Building Research Establishment Environmental Assessment Method, creato dalla compagnia britannica che si occupa di ricerca nel settore delle costruzioni Research Establishment (BRE), nasce nel Regno Unito nel 1990. Il metodo assiste i progettisti e professionisti nelle varie fasi di costruzione o ristrutturazione di un edificio, coprendo varie destinazioni d'uso, tra cui uffici, residenze, unità industriali, tribunali, prigioni e scuole. Il protocollo è formato principalmente da due famiglie:

- nuove costruzioni e ristrutturazioni (BREEAM New Construction, BREEAM Refurbishment & Fit-out);
- edifici esistenti (BREEAM In-Use).

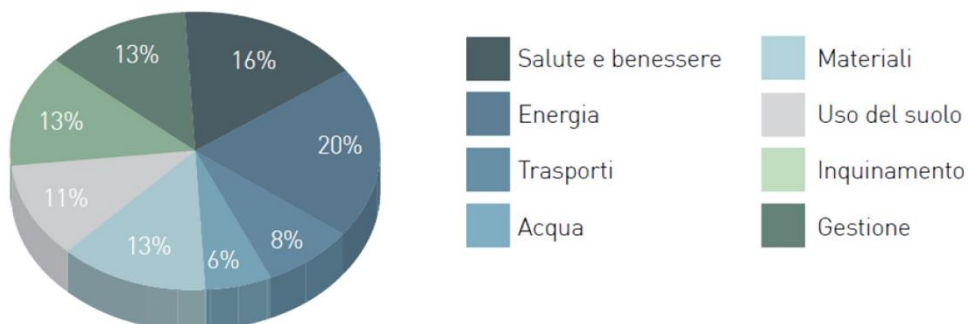
Il processo di valutazione è definito tramite l'assegnazione di un punteggio per ogni criterio che viene soddisfatto dall'edificio. Le categorie di criteri per la certificazione dell'edificio riguardano i seguenti temi, i cui pesi per l'ottenimento del punteggio finale sono riportati in figura 12:

1. **GESTIONE:** messa in funzione, monitoraggio, riciclaggio dei rifiuti, minimizzazione dell'inquinamento, ottimizzazione dei materiali
2. **SALUTE E BENESSERE:** l'attenzione e la sicurezza verso l'utente, ventilazione adeguata, umidificazione, illuminazione, comfort termico, (qui il campo salute e benessere ha un peso del 16%);
3. **ENERGIA:** efficienza energetica e emissioni di CO₂ generate dai sistemi energetici installati;
4. **TRASPORTI:** emissioni, strutture di trasporto alternative;
5. **ACQUA:** riduzione del consumo, misurazione, rilevamento delle perdite;
6. **MATERIALI:** mitigazione dell'amianto, impianti di riciclaggio, riutilizzo di strutture, facciate o materiali, uso di aggregati frantumati e legname sostenibile;
7. **USO DEL SUOLO:** terreni usati in precedenza, uso di terreni contaminati bonificati;
8. **ECOLOGIA:** terreni con basso valore ecologico o minimo cambiamento di valore, mantenere i principali sistemi ecologici sul terreno, minimizzazione degli impatti sulla biodiversità;
9. **INQUINAMENTO:** sistemi di rilevamento delle perdite, trattamento in loco, fonti di energia locali o rinnovabili, progettazione dell'inquinamento

luminoso, evitare l'uso di sostanze che riducono l'ozono e sostanze che riducono l'ozono e il riscaldamento globale.

All'indicatore health e well being per quanto riguarda gli edifici esistenti tiene conto del parametro VOC e formaldeide e della ventilazione naturale e forzata.

Fig. 12. PESO DEI CRITERI DEL PROTOCOLLO BREEAM



Ugualmente per gli edifici di nuova costruzione, i criteri sull'indoor air quality, si suddividono in quattro parti:

- Un prerequisito, che rispetta il Piano per la qualità dell'aria (IAQ – Indoor Air Quality) il cui obiettivo è quello di facilitare un processo che porti alla progettazione, con specifiche tecniche e installazioni tali da ridurre al minimo l'inquinamento dell'aria interna durante l'occupazione dell'edificio;
- La ventilazione, per ridurre al minimo la concentrazione interna degli inquinanti e il ricircolo dell'aria (ventilazione naturale, forzata o mista);
- Emissione dai materiali da costruzione, devono rispettare i limiti di emissione come da normativa;
- Misurazioni riferite alla qualità dell'aria interna dopo la costruzione dell'edificio, con particolare riferimento ai VOC e alla formaldeide.

LiderA (Portogallo)

LiderA è un sistema volontario per sostenere lo sviluppo di soluzioni e valutare la sostenibilità dell'ambiente costruito. Il protocollo nasce nel 2000 al fine di definire un sistema di supporto e valutazione allo sviluppo della sostenibilità per edifici, spazi esterni e aree costruite. Esso viene utilizzato per certificare edifici sia residenziali, sia non (hotel, edifici commerciali, etc.). Il sistema è basato su sei criteri fondamentali, i cui pesi per l'ottenimento del punteggio finale sono riportati in Figura 13

-
1. **INTEGRAZIONE SOCIALE:** valorizzazione del territorio, ottimizzazione ambientale, miglioramento ecologico, interconnessione degli habitat;
 2. **RISORSE:** integrazione del paesaggio, protezione e valorizzazione del patrimonio, efficienza dei consumi e certificazione energetica, design passivo, intensità di carbonio, consumo di acqua potabile, gestione locale dell'acqua, durata, materiali locali, materiali a basso impatto, produzione alimentare locale;
 3. **CARICHI AMBIENTALI:** trattamento delle acque reflue, flusso di riutilizzo delle acque reflue, flusso delle emissioni atmosferiche, produzione di rifiuti, gestione dei rifiuti pericolosi, recupero dei rifiuti, fonti di rumore esterne, inquinamento luminoso e termico;
 4. **COMFORT AMBIENTALE:** livelli di qualità dell'aria, comfort termico, livelli di illuminazione, comfort acustico: in particolare il comfort ambientale ha un peso del 15% e all'interno di questo la qualità dell'aria ha un peso del 5%.
 5. **ASPETTI SOCIO-ECONOMICI:** accesso al trasporto pubblico, mobilità a basso impatto, soluzioni inclusive, flessibilità e adattabilità agli usi, dinamica economica, occupazione locale, servizi locali, interazione con la comunità, capacità di controllo, condizioni per la partecipazione e la governance, controllo dei rischi naturali, controllo delle minacce umane, costi del ciclo di vita;
 6. **USO SOSTENIBILE:** condizioni di utilizzo dell'ambiente, sistema di gestione ambientale, innovazioni.

Fig. 13. PESO DEI CRITERI DEL PROTOCOLLO LIDERA

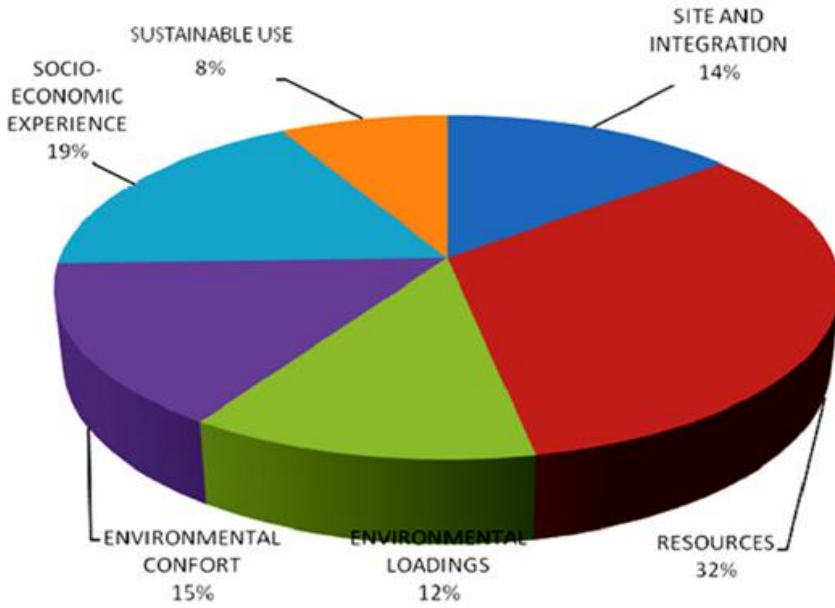


Fig. 14. SCHEMA DELLE CATEGORIE E DELLE AREE DEL PROTOCOLLO LIDERA

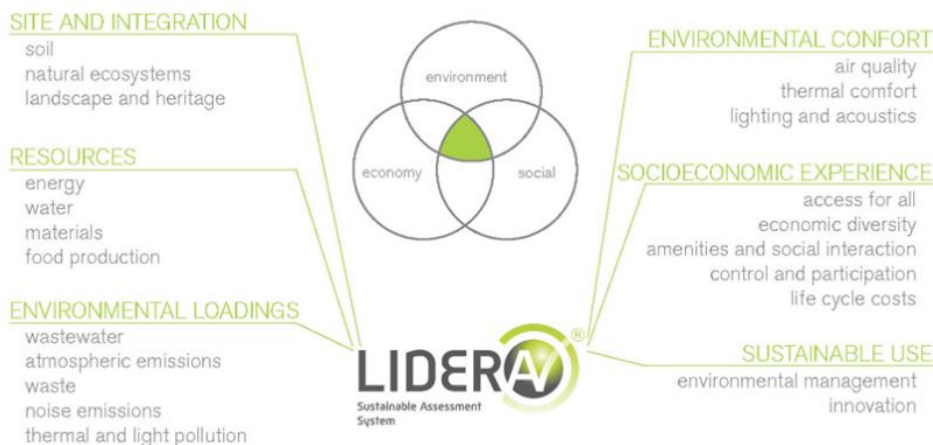


Fig. 15. TABELLA DELLE AREE E DEI CRITERI RELATIVI ALLA CATEGORIA COMFORT AMBIENTALE DEL PROTOCOLLO LIDERA

Table 4 - Environmental Comfort: Areas and basic criteria considered

CATEGORY	AREA	Wi	Pre-Req.	CRITERIA	C No.
ENVIRONMENTAL COMFORT	AIR QUALITY	5%	S	Air Quality Levels	C24
	THERMAL COMFORT	5%	S	Thermal Comfort	C25
4 Criteria	LIGHTING AND	5%	S	Lighting levels	C26
15%	ACOUSTIC			Acoustic insulation / noise levels	C27

Dalla tabella in figura 15, è possibile rilevare i criteri adottati per la categoria comfort ambientale, tra questi all'interno della qualità dell'aria viene specificato che è necessario valutare i vari elementi che possono influenzare tale qualità, non solo in ambienti interni (come la ventilazione naturale, emissioni da VOC e microcontaminazioni), ma anche dall'esterno (come le condizioni del cento e specialmente i livelli della qualità dell'aria). La presenza di vegetazione può migliorare la qualità dell'aria esterna.

LEED (Stati Uniti)

Il protocollo LEED® Leadership in Energy an Environmental Design, sviluppato negli Stati Uniti dal U.S. Green Building Council è quello più adottato nel mondo, diffuso in oltre 100 paesi e può essere applicato anche in Italia.

Il protocollo prende in considerazione tutte le aree tematiche riguardanti la sostenibilità edilizia. La certificazione è formata da diversi protocolli quali:

- **PROGETTAZIONE DI EDIFICI + COSTRUZIONE:** per la progettazione e la costruzione di edifici completi il protocollo si concentra sull'accessibilità, sugli standard più attuali e sulle esperienze di progetto del mondo reale. Tra i campi di applicazione si trovano le nuove costruzioni e le ristrutturazioni importanti, lo sviluppo di core e shell, le scuole, la vendita al dettaglio, data center, i magazzini e i centri di distribuzione, l'ospitalità e la sanità.
- **RESIDENZIALE:** Si rivolge a edifici residenziali di nuova costruzione o ristrutturazioni importanti. Sono incluse le case unifamiliari, plurifamiliari e le case multifamiliari Core e Shell. (Core e Shell è il sistema di valutazione appropriato da utilizzare se più del 40% della superficie lorda è incompleta al momento della certificazione)
- **CITTA' E COMUNITA':** Fornisce alle città e alle comunità un modo coerente a livello globale per misurare e comunicare le prestazioni e rappresenta una nuova via per le città resilienti, verdi, inclusive e intelligenti.
- **INTERIOR DESIGN + COSTRUZIONE:** Il protocollo si concentra sulle realtà degli spazi interni. Tra questi spazi interni troviamo: interni commerciali, vendita al dettaglio e ospitalità.
- **OPERAZIONI + MANUTENZIONE:** Il progetto potrebbe essere in fase di miglioramento o di costruzione scarsa o assente. Tra queste si trovano gli edifici esistenti e gli interni esistenti.

Punta a promuovere la progettazione di edifici Green, stimolando la competizione ed aumentando la consapevolezza delle comunità. Pone rilevanza nell'ottimizzazione della relazione tra edificio ed ambiente.

L'obiettivo è quello di ottenere alte prestazioni sfruttando le interrelazioni tra i sistemi. Le aree tematiche (concept) affrontate da LEED sono:

- **PROCESSO INTEGRATO**
- **POSIZIONE E TRASPORTI**
- **SITI SOSTENIBILI**

-
- EFFICIENZA IDRICA
 - ENERGIA E ATMOSFERA
 - QUALITÀ AMBIENTALE INTERNA
 - MATERIALI E RISORSE
 - INNOVAZIONE
 - PRIORITÀ REGIONALI

Per quanto riguarda la qualità ambientale interna, viene valutata la qualità dell'aria interna dell'ambiente costruito e viene previsto un piano di gestione che definisce strategie e azioni per garantire un comfort termico, acustico e una buona illuminazione. Migliorare la qualità dell'aria interna nell'edificio dopo la costruzione e durante l'occupazione per proteggere la salute umana, la produttività e il benessere.

Per gli edifici di nuova costruzione sono stabilite:

- Prestazioni minime di qualità dell'aria interna (spazi con ventilazione naturale e spazi con ventilazione meccanica) con riferimento agli standard ASHRAE per i sistemi HVAC (riscaldamento, ventilazione e aria condizionata);
- Controllo del fumo nell'ambiente;
- Strategie migliorate per la qualità dell'aria interna (comprende installazione di filtri antiparticolato per sistemi di ventilazione che forniscono aria esterna, così come i sistemi che forniscono aria di ricircolo, aumentare i tassi di ventilazione dell'aria in base agli occupanti, etc.)
- Materiali a basse emissioni, tenendo conto delle problematiche ecologiche;
- Costruzione del piano di gestione della qualità dell'aria interna: promuove il benessere degli occupanti degli edifici riducendo al minimo i problemi di qualità dell'aria interna associati alla costruzione e alla ristrutturazione;
- Valutazione della qualità dell'aria indoor: stabilire una migliore qualità dell'aria interna dell'edificio dopo la costruzione e durante l'occupazione per proteggere la salute, la produttività e il benessere. (vengono effettuati diversi test sui VOC, PM10-PM2,5-CO e Ozono).

GREEN STAR (Australia)

Il protocollo nasce nel 2003 in Australia nell'ambito del Green Building Council of Australia. GBCA è un sistema volontario per la certificazione ambientale degli edifici. Esso si occupa di certificare varie tipologie di edifici, sia nuovi, sia esistenti, residenziali

e non. Il sistema di valutazione si basa su 9 macroaree, i cui pesi per l'ottenimento del punteggio finale sono riportati in figura 16 e sono:

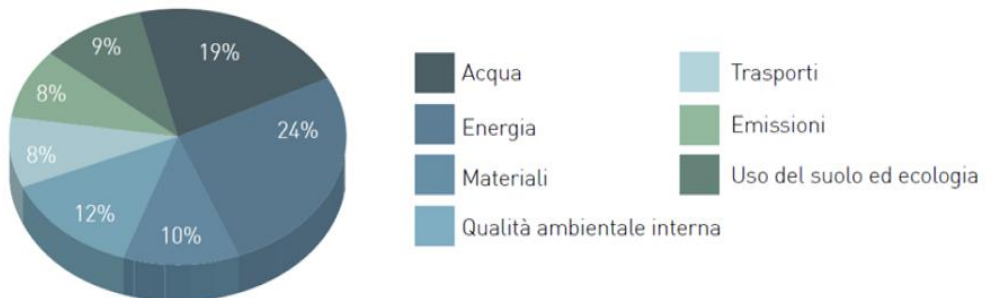
1. Gestione
2. Qualità dell'ambiente interno
3. Energia
4. Trasporto
5. Acqua
6. Materiali
7. Uso del suolo ed ecologia
8. Emissioni
9. Innovazioni

In questo caso la qualità dell'ambiente interno ha un peso del 12%. Anche qui viene inserita la ventilazione naturale e/o meccanica.

Ogni categoria è formata da crediti atti a migliorare le prestazioni ambientali. Per ogni credito viene assegnato un punteggio in base alla soddisfazione di esso. Il punteggio finale viene ponderato in base al numero di crediti disponibili in ogni categoria di valutazione, prendendo anche in considerazione la posizione geografica dell'edificio. L'unica categoria che non viene presa in considerazione nella ponderazione del risultato è l'ultima: l'innovazione.

Il GBC certifica solo gli edifici che raggiungono un punteggio di quattro stelle o superiore.

Fig. 16. PESO DEI CRITERI DEL PROTOCOLLO GREEN STAR



DGNB (Germania)

Il protocollo è stato fondato nel 2007 dal Consiglio Tedesco per l'edilizia sostenibile. DGNB, Deutsches Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, si basa su una pianificazione integrale che definisce gli obiettivi dell'edilizia sostenibile. Il sistema è fondato su tre paradigmi principali: analisi del ciclo vita, approccio olistico e orientamento alle prestazioni. È applicato a nuove costruzioni, edifici in uso, ristrutturazioni, aree urbane, interni commerciali.

Il processo di valutazione si basa su 5 aree tematiche:

1. QUALITÀ ECOLOGICA
2. QUALITÀ ECONOMICA
3. QUALITÀ FUNZIONALE E SOCIO-CULTURALE
4. QUALITÀ TECNICA
5. QUALITÀ DEL PROCESSO

La qualità dell'aria indoor come criterio si trova nella tematica Qualità Funzionale e Socio Culturale. L'obiettivo è garantire che l'aria interna sia di qualità sufficiente a non influire negativamente sulla salute e sul benessere degli utenti. Garantire un'elevata qualità dell'aria negli ambienti utilizzando prodotti a basse emissioni e fornendo un adeguato tasso di ricambio d'aria aumenta il benessere, la produttività e la soddisfazione degli utenti. La garanzia di un'aria interna che non influisca negativamente sugli utenti viene valutata tramite la concentrazione di sostanze volatili nell'aria interna composti organici (VOC) (indicatore 1) e tramite il tasso di ventilazione (indicatore 2).

All'interno delle aree tematiche la Qualità Funzionale e Socio Culturale pesa il 23% e i criteri in totale sono 8, quali: comfort termico, qualità dell'aria indoor, comfort acustico, comfort visivo, controllo dell'utente, qualità degli spazi interni ed esterni, sicurezza e protezione, design per tutti.

Fig. 17. PESO DEI CRITERI DI CERTIFICAZIONE NEL PROTOCOLLO DGNB



PASSIVE HOUSE INSTITUT

Passive House (o Passivhaus) si riferisce specificamente allo standard internazionale Passive House sviluppato, definito e amministrato dall'Istituto Passive House di Darmstadt, Germania.

Passive House ha una serie molto chiara di requisiti, è possibile così verificare se un edificio ne soddisfa i requisiti. Lo standard Passive House impiega un sistema misto di modalità di ventilazione, che combina un meccanismo di ventilazione compreso il recupero di calore (MVHR) dall'aria di scarico che verrebbe altrimenti perso.

Ciò riduce al minimo la perdita di energia verso l'esterno, migliora le prestazioni di isolamento e riduce l'umidità in ingresso nell'involucro edilizio. È necessario effettuare la prova di tenuta all'aria mediante il Blower-Door test, conforme alle prescrizioni delle norme UNI EN 13829 o ISO 9972, in quanto le case passive sono ermetiche. Nel caso di situazioni dubbie o evidenti discrepanze fra le due norme, si considera valida la UNI EN 13829. A differenza di quanto prescritto dalla norma, per gli edifici passivi è necessario effettuare il Blower Door test in condizioni di depressione e sovrappressione. Il test di pressione deve essere relativo solo ad involucri riscaldati.

Questo standard contrasta nettamente con i metodi naturali di ventilazione in cui una ventilazione sufficiente per gli occupanti viene raggiunta, in parte, a causa di perdite d'aria dell'involucro edilizio.

La casa passiva utilizza lo standard della categoria di qualità dell'aria europea IDA 2 (livello IAQ-CO₂ medio $\frac{1}{4}$ 400–600 ppm) per definire i parametri operativi MVHR.

Gli edifici Passive House sono caratterizzati da livelli particolarmente elevati di comfort interno con un consumo energetico minimo. Lo standard Passive House offre un'eccellente efficienza economica soprattutto per le nuove costruzioni. Le Classi Casa Passiva Classic, Plus o Premium possono essere raggiunte a seconda dell'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili.

Le case passive consentono un risparmio energetico relativo al riscaldamento e al raffrescamento degli ambienti fino al 90% rispetto al tipico patrimonio edilizio e oltre il 75% rispetto alla media delle nuove costruzioni. Le Case Passive utilizzano meno di 1,5 l di petrolio o 1,5 m³ di gas per riscaldare un metro quadrato di spazio abitativo per un anno – sostanzialmente meno dei comuni edifici "a basso consumo energetico". Grandi risparmi energetici sono stati dimostrati in climi caldi dove gli edifici tipici richiedono anche un raffreddamento attivo.

Fig. 18. CERTIFICATI PASSIVE HOUSE PER EDIFICI NUOVI E RIQUALIFICATI



Per gli edifici esistenti si utilizza EnerPHit. Gli edifici Passive House e gli edifici ristrutturati secondo lo standard EnerPHit sono edifici in cui le condizioni interne altamente confortevoli possono essere raggiunte durante tutto l'anno con un apporto energetico estremamente basso. Devono soddisfare requisiti molto severi per quanto riguarda la progettazione, la pianificazione e l'esecuzione.

La certificazione EnerPHit è possibile solo per gli edifici per i quali si effettua una ristrutturazione per raggiungere lo standard di Casa Passiva.

Per gli edifici esistenti non si può raggiungere lo standard utilizzato per le nuove costruzioni, sarebbe antieconomico o impossibile in termini pratici, dovuto alle caratteristiche costruttive. Dunque in linea di principio non è possibile emettere un certificato EnerPHit per nuove costruzioni. Se più del 25% dell'area della parete esterna opaca di un retrofit EnerPHit presenta un isolamento interno, viene utilizzata la designazione EnerPHit+i ("+" in apice).

Per quanto riguarda le concentrazioni di Radon, sono stati condotti diversi studi sulle Passive House, come riportati nel capitolo "Radon ed Efficiamento energetico", ma gli standard della casa passiva possono apportare una notevole riduzione dei livelli di Radon, grazie alla tenuta all'aria, alla ventilazione meccanica con recupero di calore, eseguendo sempre con attenzione le operazioni di gestione e mantenimento dell'edificio.



4.3.2 I protocolli nazionali

ITACA

Il Protocollo ITACA (Istituto per l'Innovazione e Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale), nelle sue diverse declinazioni, è uno strumento di valutazione del livello di sostenibilità energetica e ambientale degli edifici. Tra i più diffusi sistemi di valutazione, il Protocollo permette di verificare le prestazioni di un edificio in riferimento non solo ai consumi e all'efficienza energetica, ma prendendo anche in considerazione il suo impatto sull'ambiente e sulla salute dell'uomo, favorendo così la realizzazione di edifici sempre più innovativi, a energia zero, a ridotti consumi di acqua, nonché materiali che nella loro produzione comportino bassi consumi energetici e nello stesso tempo assicurino un elevato comfort. Il Protocollo garantisce inoltre l'oggettività della valutazione attraverso l'impiego di indicatori e metodi di verifica conformi alle norme tecniche e leggi nazionali di riferimento. Realizzato nel 2001 dall'Istituto per l'Innovazione e trasparenza degli appalti e la compatibilità ambientale e successivamente approvato il 15 gennaio 2004 dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome. In seguito, il Protocollo è stato adottato da numerose Regioni e amministrazioni comunali in diverse iniziative volte a promuovere e ad incentivare l'edilizia sostenibile attraverso: leggi regionali, regolamenti edilizi, gare d'appalto, piani urbanistici, ecc. Il Protocollo è derivato dal modello di valutazione internazionale SBTool, sviluppato nell'ambito del processo di ricerca Green Building Challenge, e contestualizzato al territorio italiano in relazione alla normativa di riferimento ed ai propri caratteri ambientali.

È utilizzato da ACCREDIA come strumento tecnico per il sistema nazionale di ispezione nelle costruzioni; è utilizzato da UNI come strumento tecnico nella prassi di riferimento della sostenibilità ambientale nelle costruzioni.

La sostenibilità energetica e ambientale degli edifici è l'obiettivo principale del Protocollo, in linea con le certificazioni internazionali. I temi dell'efficienza energetica e della riduzione dei consumi energetici vengono affiancati dall'attenzione verso l'impatto degli edifici in esame sull'ambiente circostante e sulle persone.

Tali obiettivi sono raggiunti seguendo i seguenti principi:

- 1- individuazione di criteri che permettono di misurare le varie prestazioni ambientali dell'edificio posto in esame;
- 2 - definizione delle prestazioni di riferimento (benchmark) con cui confrontare quelle dell'edificio ai fini dell'attribuzione di un punteggio corrispondente al rapporto della prestazione con il benchmark;
- 3 - pesatura dei criteri che ne determinano la maggiore e minore importanza
- 4 - punteggio finale sintetico che definisce il grado di miglioramento dell'insieme delle prestazioni rispetto al livello standard.

Il protocollo può essere applicato sia ad edifici di nuova costruzione sia ad edifici oggetto di ristrutturazione, il processo di valutazione è diverso a seconda della tipologia dell'edificio.

Le aree di studio del protocollo sono:

1. Qualità del sito;
2. Consumo di risorse;
3. Carichi ambientali;
4. Qualità ambientale interna;
5. Qualità del servizio;
6. Accessibilità al trasporto pubblico;
7. Utilizzo dei materiali riciclati o di recupero;
8. Presenza di aree per la raccolta dei rifiuti.

Il sistema di valutazione si basa sull'assegnazione di un punteggio parziale ad ogni criterio, successivamente pesati, per ottenere il punteggio finale dell'edificio. Varie sono le fasi di definizione del punteggio:

1. CARATTERIZZAZIONE, in cui si calcolano le prestazioni dell'edificio
2. NORMALIZZAZIONE, in cui si attribuisce un valore adimensionale ai vari indicatori
3. AGGREGAZIONE, dove si sommano i punteggi parziali normalizzati.

La Prassi di riferimento UNI/PdR 13:2019 dal 9 luglio 2019 ha sostituito il Protocollo ITACA per Edifici Residenziali e Non Residenziali. La PdR è un documento pubblicato da UNI (concordato nel Tavolo ITACA-UNI) previsto dal Regolamento UE n.1025/2012 che descrive i principi metodologici e procedurali per la valutazione della sostenibilità ambientale degli edifici, ai fini della loro classificazione attraverso l'attribuzione di un punteggio di prestazione. Oggetto della valutazione è il singolo edificio e la sua area esterna di pertinenza nell'ambito dell'attività di nuova costruzione o di ristrutturazione.

La UNI/PdR 13:2019 contiene l'adeguamento dello strumento alle novità relative alla normativa tecnica ed all'introduzione dei Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici, di cui al DM 11 ottobre 2017.

I criteri di valutazione per il calcolo del punteggio di prestazione di edifici residenziali, definiti sulla base dell'inquadramento generale e dei principi metodologici descritti nella UNI/PdR 13:2019, sono stati organizzati in "schede criterio".

All'interno delle schede, nell'AREA D "Qualità ambientale indoor", criterio D2 "Ventilazione", vengono inseriti tre criteri:

- efficacia della ventilazione naturale (codice criterio D.2.1.);
- qualità dell'aria e ventilazione meccanica (codice criterio D.2.2.);
- Radon (codice criterio D.2.6.).

Il protocollo tiene conto del rischio Radon nelle sue valutazioni.

CASACLIMA Nature

La certificazione di qualità CasaClima Nature valuta la sostenibilità di un edificio sulla base dei seguenti indicatori:

- efficienza energetica complessiva dell'edificio
- impatto ambientale dei materiali utilizzati nella costruzione
- uso efficiente della risorsa idrica
- elevata qualità dell'aria e dei materiali a basse emissioni
- provvedimenti per la protezione da gas radon
- utilizzo della luce naturale
- comfort acustico

Sulla base del protocollo CasaClima Nature l'Agenzia ha sviluppato un'intera famiglia di sigilli di qualità, che tengono conto delle specificità e delle esigenze di diversi ambiti di applicazione:

- ClimaHotel per strutture turistiche sostenibili;
- CasaClima Welcome per strutture ricettive di piccole dimensioni;
- CasaClima Work&life per edifici, per uffici e servizi;
- CasaClima Wine per cantine vinicole;
- CasaClima school per edifici scolastici.

Accanto alla sostenibilità dell'edificio nella certificazione rientrano ulteriori aspetti ecologici, economici e sociali. Vengono valutati criteri come la gestione dei rifiuti, l'uso di lampade ed elettrodomestici efficienti, l'utilizzo di prodotti locali, una mobilità e una logistica sostenibili, il monitoraggio del consumo di risorse o i provvedimenti per incrementare la qualità di vita e la sostenibilità dalla progettazione all'utilizzo. La Certificazione verifica l'attuazione concreta e il soddisfacimento dei criteri. La re-

Certificazione verifica ogni due anni se nella fase di utilizzo dell'edificio gli standards di qualità e gli obiettivi di sostenibilità prefissati vengono mantenuti.

CasaClima Nature certifica un edificio non solo dal punto di vista energetico ma anche in relazione agli impatti sull'ambiente e sulla salute e il benessere delle persone che ci vivono. CasaClima Nature introduce una valutazione oggettiva dell'ecocompatibilità dei materiali e dei sistemi impiegati nella costruzione e dell'impatto idrico dell'edificio. A garanzia del comfort e della salubrità degli ambienti interni sono richiesti precisi requisiti per la qualità dell'aria interna, per l'illuminazione naturale, per il comfort acustico e per la protezione dal gas radon.

Fig. 19. TABELLA DEI CRITERI CASA CLIMA NATURE

Efficienza energetica involucro	Fabbisogno energetico per riscaldamento \leq classe A
Efficienza energetica complessiva	Indice di emissione di CO ₂ \leq classe A
Impatto ambientale dei materiali da costruzione	Energia primaria non rinnovabile (PEI n.r.) Potenziale di acidificazione (AP) Potenziale di effetto serra (GWP ₁₀₀) Punteggio Nature \leq 300 punti
Impatto idrico	Indice di impatto idrico Wkw \geq 35%
Qualità aria interna	Presenza della ventilazione meccanica controllata e/o Materiali e prodotti a basse emissioni (VOC e formaldeide)
Protezione dal gas radon	Misure per la protezione dal gas radon Rn-222
Illuminazione naturale	Fattore medio di luce diurna FmLD \geq 2% o Rapporto aeroilluminante di almeno 1/5 o Almeno 70% delle superfici verticali esterne vetrate
Comfort acustico	Prestazioni di fonoisolamento mediante collaudo acustico in opera

La certificazione CasaClimaNature, nella direttiva tecnica del 2017 inserisce i riferimenti sul radon che si riportano di seguito:

Requisiti

Per edifici di nuova costruzione è richiesta un'analisi preventiva del rischio radon basata su:

- mappatura del radon indoor
- analisi geomorfologica del sito (sottoscritta da un geologo), in cui si identifichino eventuali situazioni localizzate di rischio radon. L'analisi geomorfologica del sito non è necessaria nel caso in cui la mappatura

identifichi già la zona come zona a rischio radon (concentrazione media annua > 200 Bq m⁻³).

In assenza di analisi geomorfologica del sito o in assenza di mappatura è sempre richiesta l'adozione dei provvedimenti di protezione dal rischio radon di cui al punto 5.2.

Le informazioni sulle zone a rischio radon possono essere richieste alle agenzie regionali o provinciali per l'ambiente (ARPA o APPA).

Fig. 20. TABELLA DI RIFERIMENTO DEI VALORI LIMITE E VALORI OBIETTIVO DEL GAS RADON, PER CASA CLIMA NATURE

	METODO DI VALUTAZIONE	VALORI LIMITE DI CONCENTRAZIONE DI RADON Rn-222 (media annua) oltre cui è obbligatorio adottare provvedimenti progettuali e costruttivi:	VALORI OBIETTIVO Direttiva 2013/59 EURATOM
Edificio nuovo o ampliamento	Valutazione preventiva del rischio	200 Bq/m³	100 Bq/m³

Per edifici residenziali con ventilazione meccanica controllata il requisito si ritiene automaticamente soddisfatto se vengono rispettati i seguenti ulteriori criteri:

- gli edifici non si trovano in zone classificate secondo mappa ad alto rischio radon (concentrazione media annua > 400 Bq m⁻³);
- la ventilazione meccanica controllata è installata in tutte le unità abitative e rispetta i requisiti di cui al punto 4.1 della presente direttiva;
- le portate di immissione e estrazione sono bilanciate o all'interno dell'edificio viene garantita una leggera sovrappressione;
- l'aspirazione dell'aria esterna è collocata almeno 80 cm sopra il livello del terreno;
- gli ambienti riscaldati (anche in modo non continuativo) non presentano strutture verticali a diretto contatto con il terreno.

Provvedimenti

Nel caso in cui da mappa del radon si superino i valori limite di concentrazione di gas radon (concentrazione media annua > 200 Bq m⁻³ come da tabella N9) o l'analisi geomorfologica del sito individui situazioni a rischio è necessario adottare opportuni provvedimenti per la protezione dal gas radon in fase costruzione dell'edificio.

Tali provvedimenti andranno opportunamente documentati con:

-
- elaborati di progetto
 - fotodocumentazione in fase di cantiere
 - schede tecniche delle soluzioni adottate
 - misura in fase di utilizzo nel caso di zone ad elevato rischio radon (sopra i 400 Bq m⁻³)

Inoltre, riguardo la qualità dell'aria all'interno degli edifici deve essere soddisfatto almeno uno dei seguenti criteri:

presenza della ventilazione meccanica controllata e/o materiali e prodotti a basse emissioni (VOC e formaldeide).

GBC ITALIA

Questo sistema di rating (applica il sistema di certificazione LEED in Italia) promuove la salubrità, la durabilità, l'economicità e le migliori pratiche ambientali nella progettazione e nella costruzione degli edifici.

Il sistema di valutazione è organizzato in sei categorie ambientali:

- **Sostenibilità del Sito (SS):** (1 prerequisito, 8 crediti - max 26 punti): questa sezione affronta gli aspetti ambientali legati al sito entro il quale verrà costruito l'edificio e al rapporto di questo con l'intorno. Gli obiettivi sono limitare l'impatto generato dalle attività di costruzione, controllare il deflusso delle acque meteoriche, stimolare modalità e tecniche costruttive rispettose degli equilibri dell'ecosistema.
- **Gestione delle Acque (GA):** (1 Prerequisito, 3 Crediti - max 10 punti): questa sezione approccia le tematiche ambientali legate all'uso, alla gestione e allo smaltimento delle acque negli edifici monitorando l'efficienza dei flussi d'acqua e promuovendo la riduzione dei consumi idrici e il riutilizzo delle acque meteoriche.
- **Energia e Atmosfera (EA):** (3 Prerequisiti, 6 Crediti - max 35 punti): in questa sezione viene promosso il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici, l'impiego di energia proveniente da fonti rinnovabili o alternative e il controllo delle prestazioni energetiche dell'edificio.
- **Materiali e Risorse (MR):** (1 Prerequisito, 7 Crediti - max 14 punti): in quest'area vengono prese in considerazione le tematiche ambientali correlate alla selezione dei materiali, alla riduzione dell'utilizzo di materiali vergini, allo smaltimento dei rifiuti e alla riduzione dell'impatto ambientale dovuto ai trasporti.

-
- Qualità Ambientale Interna (QI): (2 Prerequisiti, 8 Crediti - max 15 punti): questa sezione affronta le preoccupazioni ambientali relazionate alla qualità dell'ambiente interno, che riguardano la salubrità, la sicurezza e il comfort, il consumo di energia, l'efficacia del cambio d'aria e il controllo della contaminazione dell'aria.
 - Innovazione nella Progettazione (IP): (2 crediti - max 6 punti): questa sezione ha come obiettivo l'identificazione degli aspetti progettuali che si distinguono per le caratteristiche di innovazione e di applicazione delle pratiche di sostenibilità nella realizzazione di edifici.
 - Priorità Regionale (PR): (1 Credito - max 4 punti): tale area ha come obiettivo quello di incentivare i gruppi di progettazione a focalizzare l'attenzione su caratteristiche ambientali del tutto uniche e peculiari della località in cui è situato il progetto.

-



I livelli di certificazione di GBC HOME sono quattro, a seconda del punteggio conseguito:

Base	40-49
Argento	50-59
Oro	60-79
Platino	≥ 80

Per ogni categoria sono presenti prerequisiti e crediti. Tutti i crediti valgono almeno 1 punto, i prerequisiti sono obbligatori e non danno punteggio. Il sistema di valutazione ha una base di 100 punti; le categorie IP (Innovazione nella Progettazione) e PR (Priorità Regionali) permettono di conseguire ulteriori 10 punti bonus.

Si riporta quanto scritto per la categoria Qualità Ambientale Interna nel manuale GBC Home V2, del 2016:

Fig. 21. TABELLA SUL PUNTEGGIO RELATIVO AI CRITERI DEL GBC ITALIA.

CREDITO	TITOLO	PUNTEGGIO
QI Prerequisito 1	Controllo delle contaminazioni generate dalle attività umane	Obbligatorio
QI Prerequisito 2	Protezione dal radon	Obbligatorio
QI Credito 1	Sistemi di ventilazione e controllo dell'umidità	1-5 Punti
QI Credito 2	Qualità dell'aria indoor in fase di costruzione	1-2 Punti
QI Credito 3	Materiali a bassa emissione	1-3 Punti 
QI Credito 4	Luce naturale	1-2 Punti 
QI Credito 5	Acustica	2-3 Punti
QI Credito 6	Bilanciamento delle reti di distribuzione	5 Punti

Prerequisito 1 Aspetti ambientali

Le esigenze di efficienza energetica e le odierne modalità costruttive portano ad una progressiva chiusura ermetica degli edifici e quindi la permanenza di eventuali contaminazioni, pertanto, la progettazione e realizzazione degli immobili richiede particolare cura al fine di limitare quanto più possibile l'ingresso di inquinanti. Un'adeguata estrazione nelle cucine e nei bagni contribuisce a ridurre l'umidità, ed inoltre riduce il rischio di formazione di muffe, il quale risulta essere un problema sanitario rilevante nelle abitazioni. La perdita dei gas di scarico di combustione all'interno dell'abitazione, l'emissione di inquinanti esalate da sostanze e veicoli presenti nelle autorimesse possono generare una riduzione della qualità dell'aria interna, soprattutto in abitazioni costruite in maniera ottimale e ben isolate. Analogamente l'installazione dei sistemi di ventilazione meccanica all'interno dell'autorimessa rischia di convogliare eventuali contaminanti all'interno degli spazi abitati. Il monossido di carbonio si può diffondere attraverso le pareti posate a secco nel caso in cui queste non abbiano ancora lo strato di finitura o in cui le sigillature non siano state eseguite correttamente. Le apparecchiature dotate di camere di combustione stagne con ventilazione diretta o forzata possono ridurre in maniera considerevole il rischio che i gas di combustione si disperdano all'interno dell'abitazione in condizioni di pressione negativa. L'adozione di sistemi di monitoraggio risulta essere la soluzione più efficace per ridurre il rischio di esposizione al monossido di carbonio causato da perdite, malfunzionamenti e comportamenti pericolosi. La contaminazione incrociata tra unità private in edifici multifamiliari è un aspetto da tenere in particolare attenzione in quanto, oltre a causare inquinamento all'interno di spazi privati prospicienti, è spesso causa di fastidio e malumori nel vicinato.

Prerequisito 1 Aspetti economici

La corretta progettazione del sistema edificio–impianti contribuisce in modo sostanziale al contenimento dei costi connessi al conseguimento del presente prerequisito. Una adeguata estrazione localizzata può ridurre il rischio di danni causati da umidità e una conseguente riduzione dei costi di manutenzione e ripristino dei locali. L'utilizzo di motori e/o ventilatori rispondenti ai regolamenti europei consentono di limitare il consumo energetico a parità di prestazioni richieste. L'installazione di apparecchiature dotate di camere di combustione stagne permette una maggiore flessibilità di installazione. Sigillare l'autorimessa permette di ridurre l'esposizione agli inquinanti negli spazi abitati. L'adozione di sistemi di ventilazione all'interno di tali spazi contribuisce a diluire la concentrazione dei contaminanti; i costi correlati all'installazione di tali sistemi sono in genere contenuti, in quanto le portate d'aria

necessarie sono molto limitate e non sono necessarie particolari attenzioni. Limitare il passaggio di inquinanti tra unità private permette di minimizzare l'esposizione dei singoli alla contaminazione generata dai vicini. Il maggiore costo per risolvere tale problematica è estremamente limitato, in quanto si riduce a una maggiore cura progettuale e alla scelta delle migliori soluzioni per gli elementi apribili tra spazi privati e comuni.

Il prerequisito 2 da rispettare è la misurazione del Radon.

Si riporta di seguito quanto descritto nel manuale GBC:

PROTEZIONE DAL RADON - Prerequisito obbligatorio

Finalità: ridurre l'esposizione al gas radon per gli occupanti dell'edificio.

Requisiti: stabilire preliminarmente la classe di rischio al gas radon consultando il documento "Radon Prone Areas" emanato dall'ARPA della regione di appartenenza. La classe di rischio è assegnata in base alle misurazioni dei livelli di radon effettuate nelle unità immobiliari appartenenti allo stesso Comune, con superamento dei limiti di 200 Bq m⁻³ (rischio basso) o 400 Bq m⁻³ (rischio alto) per almeno il 10% dei casi. I possibili interventi di mitigazione del rischio radon sono così classificati.

▪ per ventilazione:

1. costruzione di vespaio ventilato;
2. posizionamento di tubi drenanti sotto l'edificio con interasse massima di 6 m posti nell'asse nord-sud ed in collegamento con l'aria esterna tramite pozzi perdenti. Un pozzo perdente può essere collegato con al massimo 2 tubi drenanti;
3. realizzazione di autorimesse ai piani inferiori, purché ventilate permanentemente mediante adeguate aperture oppure meccanicamente; nel caso in cui l'autorimessa non ricopra completamente l'impronta dell'edificio

nella porzione esclusa è necessario prevedere l'installazione di tecniche di mitigazione complementari.

▪ per schermatura:

1. utilizzo di membrana anti-radon applicata a vasca nella struttura a ridosso della superficie interrata;
2. utilizzo di calcestruzzo impermeabile all'acqua e al gas radon per la realizzazione delle strutture interrate.

Gli interventi da svolgere sono relazionati alla definizione delle tre classi di rischio, come di seguito individuato:

- rischio basso ($\leq 200 \text{ Bq m}^{-3}$): nessun intervento di mitigazione richiesto;
- rischio medio (compreso tra 200 Bq m^{-3} e 400 Bq m^{-3}): adozione di almeno una delle tecniche preventive di mitigazione al gas radon di seguito descritte, selezionando la soluzione migliore (per ventilazione o per schermatura) in base alle caratteristiche e alle possibilità di intervento dell'edificio in questione;
- rischio alto ($\geq 400 \text{ Bq m}^{-3}$): adottare almeno due tecniche di mitigazione al gas radon, una per ciascuna tipologia (ventilazione e schermatura) ed inoltre, solo per edifici ristrutturati, applicare un sistema di ventilazione attiva;
- rischio non quantificato: qualora il territorio in cui debba sorgere l'edificio non ricada in una delle classi di rischio o l'area non sia stata oggetto di misure durante la campagna di misurazione per definire le "Radon Prone Areas", effettuare una campagna di misure secondo le indicazioni dell'ARPA al fine di definire la classe di rischio e rientrare di conseguenza nei punti precedenti. In assenza di dati specifici di presenza di radon è richiesta l'attuazione preventiva di strategie e tecniche di mitigazione in combinazione con un sistema di ventilazione attiva.

Prerequisito 2 Aspetti ambientali

Il radon è un agente cancerogeno che causa soprattutto un aumento del rischio di contrarre il tumore polmonare. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO World Health Organization), attraverso l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC), ha classificato fin dal 1988 il radon nel Gruppo 1, nel quale sono elencate le 95 sostanze dichiarate cancerogene per l'uomo. Il radon è un gas inerte ed elettricamente neutro, per cui non reagisce con altre sostanze. Di conseguenza, così come viene inspirato, viene espirato. Tuttavia, è anche radioattivo, ossia si trasforma in altri elementi, chiamati prodotti di decadimento del radon o più generalmente "figli". Questi sono elettricamente carichi e si attaccano al particolato presente in aria

che può essere inalato e fissarsi sulle superfici dei tessuti polmonari. Gli atomi, così depositati, (in particolare due isotopi del polonio, Po-218 e Po-214) sono ancora radioattivi ed emettono radiazioni alfa che possono danneggiare le cellule. I danni prodotti sono generalmente riparati dai meccanismi biologici. In alcuni casi uccidono le cellule, ma esiste anche la probabilità che il danno cellulare sia di tipo degenerativo e che la cellula mantenga la sua capacità di riproduzione entrando a far parte di un processo cancerogeno. Fino ad oggi non sono stati dimostrati altri effetti diversi dal tumore polmonare. Tra gli anni 80 e 90 è stata realizzata dall'APAT, dall'Istituto Superiore della Sanità e dai Centri Regionali di Riferimento della Radioattività Ambientale degli assessorati regionali alla Sanità, oggi confluiti nelle Agenzie per la protezione dell'ambiente regionali e provinciali (ARPA e APPA), un'indagine nazionale sulla esposizione al radon nelle abitazioni. Il valore della concentrazione media è risultato: 70 Bq m^{-3} . Valore relativamente elevato rispetto alla media mondiale valutata intorno a 40 Bq m^{-3} e a quella europea di circa 59 Bq m^{-3} . Nelle varie regioni esiste una situazione molto diversificata con concentrazioni medie regionali che vanno da poche decine di Bq m^{-3} fino ad oltre 100 Bq m^{-3} e singole abitazioni che arrivano fino a migliaia di Bq m^{-3} . La concentrazione di radon dipende da molti fattori: dalla presenza di uranio e radio nel suolo e nei materiali da costruzione, dalla permeabilità del suolo e dalle abitudini di vita. Anche in aree dove generalmente si riscontrano basse concentrazioni esiste la possibilità che in alcuni edifici vi sia una presenza elevata di radon. Si stima che le morti per cancro polmonare attribuite al radon siano circa 3000 l'anno solo in Italia (da 1000 a 5500) cioè circa il 2% del totale delle vittime annuali di cancro. Il rischio associato al radon è direttamente correlato all'esposizione alla concentrazione dello stesso; pertanto, la progettazione di un edificio per ridurre l'esposizione al radon può significativamente tradurre il rischio per la salute. Nelle aree del paese che non sono considerate ad alto rischio per la presenza di radon, GBC HOME (e spesso anche i regolamenti locali) richiede siano adottate tecniche di costruzione che permettano la protezione dal radon. In altre aree, il rischio di presenza di radon può essere inferiore, ma sono comunque incoraggiate le tecniche sopra menzionate. In aggiunta, per ridurre l'esposizione al radon, le tecniche di costruzione richieste per questo prerequisito permettono di ridurre le esposizioni anche ad altri inquinanti provenienti dal suolo e per questo sono generalmente considerate tecniche di buona pratica. Alcune aree hanno altri gas provenienti dal terreno oltre al radon. Le tecniche di mitigazione del radon possono aiutare a minimizzare la penetrazione anche di questi gas nell'edificio.

Prerequisito 2 Aspetti economici

I costi per rendere un edificio resistente al radon sono modesti. È pertanto opportuno implementare metodi di mitigazione del radon nella progettazione e realizzazione di nuovi edifici. Interventi di protezione dal radon in edifici esistenti possono risultare estremamente complessi e onerosi.

Approccio e implementazione

Ai fini del conseguimento del presente prerequisito si suggeriscono le seguenti tecniche di mitigazione:

- costruzione di un vespaio ventilato;
- posizionamento di tubi drenanti sotto l'edificio con interasse massima di 6 m posti nell'asse nord- sud ed in collegamento con l'aria esterna tramite pozzi perdenti. Un pozzo perdente può essere collegato con al massimo 2 tubi drenanti;
- schermatura al radon tramite membrana anti-radon applicata a vasca nella struttura a ridosso della superficie interrata;
- utilizzo di calcestruzzo impermeabile all'acqua e al gas radon per la realizzazione delle strutture interrate.

Tab. 5. I Protocolli nazionali di sostenibilità energetico ambientale

Nome Protocollo	Qualità ambientale interna	Qualità dell'aria indoor	Ventilazione forzata	Ventilazione e naturale	Ventilazione e recupero del calore	Prevenzione più Radon
ITACA (UNI PdR 13:2019)	SI	SI	SI	SI		SI basa sulla normativa di riferimento
CasaClimaNature	SI	SI	SI	SI		Direttiva 2013/59/EURATOM (standard di riferimento)
GBC Italia	SI	SI	SI	SI		DLgs n 241 del 2000 (standard di riferimento)
WELL	SI	SI	SI	SI		
DGNB			SI	SI		
LEED	SI	SI	SI	SI		
GRREN STAR	SI	SI	SI	SI		
LiderA	SI	SI	SI	SI		
Passive House	SI	SI	SI	SI	SI	SI

La volontà di incrementare l'efficiamento energetico di una singola unità abitativa si è esteso anche al campo dei Quartieri Sostenibili attraverso i Protocolli di Certificazione Ambientale. Tra i più conosciuti:

- BREEAM – valutazione complessiva effettuata su diversi punti, nello specifico si parla di coinvolgimento della comunità (dagli attori istituzionali all'educazione), benessere economico sociale (tra cui i vari inquinamenti, luminoso ed acustico), risorse ed energia (grande attenzione all'efficiamento energetico e alla riduzione dei consumi generali), land-use (difendendo la biodiversità circostante e la riduzione del consumo del suolo), trasporti ed innovazione. Raggiungendo una valutazione dell'85% si dichiara l'outstanding, inferiore al 30% si dichiara l'inclassificabilità;
- LEED – la valutazione finale si basa sulle seguenti voci: smart location, pattern/design, infrastrutture green, innovazione e credito regionale. Grande peso viene dato dal design del quartiere e alle infrastrutture. È presente una rilevante somiglianza tra il protocollo LEED ed GBC ITALIA;
- DGNB – ai punti, che costituiscono la valutazione complessiva di questo protocollo, viene dato lo stesso peso massimo (22.5%) tranne che per la Qualità del Processo (10%). Le valutazioni tengono in considerazione l'aspetto

Ambientale, Economico, Sociale (riduzione della insicurezza), del Sito ed in base alle tecniche utilizzate (come l'isolamento).

L'Eco-quartiere mira a valutare la capacità di una città a sviluppare Quartieri Sostenibili. Particolare attenzione viene data all'uso efficiente delle risorse, al trasporto ed alla biodiversità, cercando di coinvolgere la Comunità ed il Benessere.

Conclusioni

Dallo studio condotto attraverso il campione dei protocolli selezionati per la ricerca sul Radon e l'inquinamento indoor, si rileva che l'importanza del benessere e del comfort degli ambienti interni per i fruitori degli edifici è di grande rilievo. Tutti i protocolli, sebbene in misura diversa, pongono attenzione alle misure di comfort degli ambienti interni e alla qualità dell'aria interna. In particolare, per i protocolli analizzati in campo nazionale, l'indicatore sul Radon è sempre presente, anche in base ai riferimenti normativi, con requisiti diversi per edifici esistenti o di nuova costruzione, mentre per i protocolli internazionali non sempre si hanno parametri ad hoc sul Radon ma piuttosto la qualità dell'aria interna prende in considerazione altri indicatori, tra i quali spesso vengono considerati i VOC, il PM10 etc. Tra i protocolli internazionali il WELL è sicuramente quello che ha maggior attenzione alla problematica della salute con una percentuale che raggiunge l'83%.

È importante però sottolineare che, sia nelle riqualificazioni che nelle nuove costruzioni, è sempre più presente l'innovazione tecnologica e in particolare la domotica, risulta quindi fondamentale condurre la gestione dell'edificio con cura e appropriata preparazione. Il manufatto edilizio deve essere gestito, mantenuto e mantenuto in modo corretto al fine di restituire quel comfort per il quale è stato progettato. Ad esempio, quando si parla di ventilazione meccanica/forzata, il sistema dell'impianto deve sempre funzionare correttamente per garantire il miglior livello di qualità degli ambienti interni. Pertanto, oltre a soddisfare la qualità richiesta attraverso i parametri dei protocolli di certificazione energetico-ambientale, è fondamentale garantire una buona conduzione dell'edificio e dei suoi impianti.

Bibliografia

Prassi di riferimento UNI/PdR 13.09:2019

Tesi di laurea Il tema del benessere nelle certificazioni di sostenibilità: il protocollo WELL – Erica Asta – Politecnico di Torino

Certified passive house: an effective control of radon in domestic construction, Barry McCarron – Queen's University Belfast

LiderA voluntary system for the sustainability of built environments, Manuel Duarte Pinheiro – www.lidera.info

La certificazione dei materiali edilizi: tra sostenibilità ambientale e qualità dell'aria indoor, Daniele Bruschi, Elisa Pennacchia - Scienza E Tecnica, Nn. 515-516-517, 2013

Guide to Sustainable Building Certifications, published by SBI and GXN –, Funded by Realdania and The Dreyer Foundation Dreyersfond agosto 2018

Building energy standards and labelling in Europe, Moore, Christopher; Dr. Shrestha, Shritu; Gokarakonda, Sriraj - Wuppertal Institute 2019

Radon, misure di risanamento negli edifici esistenti, Gräser Joachim (AGES, Austria), Grimm Christian (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg), Kaineder Heribert (Amt der Oö. Landesregierung, Oberösterreich), Körner Simone e Loch Michael (Bayerisches Landesamt für Umwelt, Baviera), Minach Luigi (Agenzia provinciale per la protezione dell'ambiente, Alto Adige), Ringer Wolfgang (AGES, Austria), Roserens Georges-André (Ufficio federale della sanità pubblica, Svizzera), Valsangiacomo Claudio (SUPSI, Svizzera). Verifica: Diessa Diana e Palacios-Gruson Martha (Ufficio federale della sanità pubblica, Svizzera)- Pubblicazione comune dei servizi specializzati radon di Austria, Svizzera, Germania del Sud, Alto Adige - 2012

Valutazione del rischio radon alla luce del D.Lgs. 101/2020 aggiornamenti ed obblighi del DL, C. Giovani – ARPA FVG, 2021

A pilot study of radon levels in certified passive house buildings, Barry McCarron, Xianhai Meng, Shane Colclough - Article in Building Services Engineering Research and Technology -- January 2019

Sitografia

https://www.la-certificazione-energetica.net/normative_certificazione_energetica_italia.html

<https://www.energiaenergetica.enea.it/detraioni-fiscali/ecobonus/documenti-di-riferimento/normativa-sull-efficienza-energetica.html>

Rischio Radon negli edifici: cosa dice la normativa e come intervenire - Habitissimo ITA

file:///C:/Users/Utente/Downloads/radon-protezione_edifici.pdf

<https://www.arpat.toscana.it/notizie/arpatnews/2014/174-14/174-14-tecniche-di-mitigazione-per-ridurre-la-concentrazione-di-radon>

<https://www.arpa.fvg.it/documents/2855/2.-RADON-AVANZATO-Scuola-perlambiente-Stampa.pdf>

<https://www.teknoring.com/news/efficienza-energetica/protocolli-di-sostenibilita-italiani-e-internazionali-a-confronto/>

5 Conclusioni

La vasta letteratura scientifica è stata suddivisa in quattro aree di ricerca:

- mappatura delle aree a rischio radon
- misurazione e concentrazione del radon
- relazione tra interventi di efficientamento energetico e concentrazione del radon indoor
- mitigazione della concentrazione del radon indoor.

La letteratura scientifica sull'esposizione al gas radon nel settore residenziale a seguito di interventi di efficientamento energetico è molto ampia; i principali studi sono stati condotti in Svizzera, in Germania, nel Regno Unito e in Russia. Ad oggi non esiste per il contesto italiano uno studio scientifico esteso e rappresentativo delle diverse aree (regioni, province o comuni), destinazioni d'uso (residenziale, scuole, uffici) e tipologie di edifici (nuovi e non, riqualificati, in muratura, in legno, in cemento armato ecc.) sull'esposizione al gas radon a seguito di interventi di efficientamento energetico.

Nonostante una consolidata letteratura scientifica che ha evidenziato la stretta connessione tra gli interventi con profilo energetico e le concentrazioni di radon, il problema risulta di complessa soluzione, questo a causa di molteplici aspetti quali: la conoscenza della problematica - in molteplici casi il radon è un tema sconosciuto a tutti, dai tecnici agli utenti finali, le tempistiche - le riqualificazioni energetiche spesso prevedono tempi di realizzazione di poche settimane o mesi, incompatibili con la valutazione annuale delle concentrazioni di radon, i costi - nonostante i costi potrebbero essere molto ridotti o quasi annullati dai costi degli interventi di efficienza energetica le soluzioni contro il radon possono essere onerose e a priori non è mai possibile garantire l'efficacia di un intervento.

La nuova direttiva in materia di prestazione energetica degli edifici (EPBD VIII) richiede per tutti gli edifici residenziali esistenti il raggiungimento della classe energetica D entro il 2033, oltre al divieto di impiego di sistemi di riscaldamento a combustibili fossili dal 2035, con la conseguente spinta verso l'elettrificazione del mercato edilizio. Tra gli ambiti che necessitano approfondimento vi sono le modifiche relative all'involucro (sostituzione di infissi, cappotto termico interno ed esterno), le modifiche impiantistiche (sistemi di emissione, sistemi di ventilazione, sistemi di generazione). In questo contesto, alla luce degli esiti della letteratura scientifica è necessario

affrontare sinergicamente il tema della riduzione dei consumi e del miglioramento della qualità dell'aria interna, attraverso la creazione di normative, linee guida e protocolli per guidare scelte progettuali dei nuovi edifici e di quelli da riqualificare.

Una coerente protezione dal radon richiede un approccio globale: le misure puramente integrative potrebbero essere giustificabili esclusivamente per ristrutturazioni urgenti di vecchi edifici. Per edifici nuovi e per i risanamenti globali, invece, la protezione contro il radon indoor deve essere parte integrante delle normali misure costruttive.

QUADERNI
AMBIENTE E SOCIETÀ

27 / 2023