



Allegato 1

Radon indoor

Prima individuazione delle aree prioritarie in Lombardia

Attività svolta in attuazione dell'art. 11
del D.Lgs. 101/2020 s.m.i.

ARPA Lombardia

Aprile 2023

Sommario

1. INTRODUZIONE
 2. IL RADON. INFORMAZIONI GENERALI
 3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELLA REGIONE
 4. BASE DATI SPERIMENTALE
 - 4.1. ANALISI DEI DATI
 5. CRITERIO PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE AREE PRIORITARIE
 - 5.1. INDIVIDUAZIONE DEI COMUNI IN AREA PRIORITARIA
 6. COMMENTI E CONSIDERAZIONI
 7. CONCLUSIONI E SVILUPPI
 8. BIBLIOGRAFIA
- APPENDICE I - TECNICHE DI MISURA DEL RADON INDOOR
- APPENDICE II - CARATTERISTICHE DELLA FUNZIONE DI DISTRIBUZIONE LOG-NORMALE



1. Introduzione

Questa relazione contiene la prima individuazione in Lombardia delle aree prioritarie, in attuazione di quanto previsto dall'art. 11 del D.Lgs. 101/2020¹ s.m.i. (nel seguito Decreto). Le aree prioritarie sono definite, ai sensi del Decreto, come le zone in cui si prevede che la concentrazione media annua di attività di radon in aria superi il livello di riferimento, assunto pari a 300 Bq/m³, in un numero significativo di edifici. La loro individuazione ha lo scopo di definire priorità d'intervento nelle strategie di gestione del problema radon, sia in termini di misurazione che di attuazione di interventi di prevenzione.

Il Piano nazionale d'azione per il radon, previsto dall'art. 10 del Decreto, deve definire i criteri per la classificazione delle aree prioritarie. Fino alla data della loro pubblicazione, il criterio transitorio di individuazione delle aree prioritarie è stabilito dal Decreto come segue:

- sono classificate in area prioritaria le zone nelle quali la stima della percentuale di edifici che supera il livello di 300 Bq/m³² è pari o superiore al 15%. La percentuale degli edifici è determinata con indagini o misure di radon effettuate o riferite o normalizzate al piano terra (art. 11, comma 3 del Decreto).

L'individuazione delle aree prioritarie è posta in capo alle Regioni, ai sensi dell'art. 11 del Decreto. La Legge regionale n. 3 del 3 marzo 2022³ attribuisce ad ARPA, in collaborazione con le ATS, il compito di supportare la Regione nelle attività di prevenzione e protezione dal rischio di esposizione al gas radon in ambienti chiusi.

Questa relazione, predisposta dalla U.O. Centro Regionale Radioprotezione (CRR) di ARPA Lombardia, è finalizzata a dare attuazione alla competenza posta in capo alla Regione per la prima individuazione delle aree prioritarie, sulla base dei dati e delle informazioni ad oggi disponibili.

2. Il radon. Informazioni generali

Il radon è un gas nobile radioattivo, inodore ed incolore, prodotto dal decadimento radioattivo dell'uranio. Le quantità di radon presenti nel terreno e nelle rocce variano a seconda delle caratteristiche geomorfologiche. A causa delle sue caratteristiche chimiche, il radon può diffondere dal luogo in cui si forma e raggiungere lo spazio esterno: all'aperto si disperde e si diluisce mentre in ambienti chiusi può accumularsi, raggiungendo a volte concentrazioni rilevanti. La concentrazione di radon in un edificio varia non solo in base al terreno su cui sorge e ai materiali da costruzione utilizzati, ma anche in base a caratteristiche strutturali come, ad esempio, la

¹ Decreto legislativo 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.

² L'unità di misura della concentrazione di radon in aria è il Becquerel per metro cubo (Bq/m³), ovvero il numero di decadimenti radioattivi di atomi di radon che avvengono in un secondo in 1 m³ d'aria

³ 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).

ventilazione naturale (porte e finestre) o forzata, il tipo di collegamento tra edificio e suolo, l'efficiamento energetico.

Il radon indoor proviene principalmente dal terreno e, in misura minore, dai materiali da costruzione. A causa della differenza di temperatura tra interno di un edificio ed esterno, l'interno è generalmente in depressione rispetto all'esterno e il radon diffonde verso l'interno dell'edificio stesso, secondo un fenomeno noto come effetto camino. Le principali vie di ingresso del radon negli edifici sono:

- fessure nei pavimenti;
- giunzioni del pavimento e della parete;
- passaggi degli impianti termici, idraulici, elettrici e del gas.

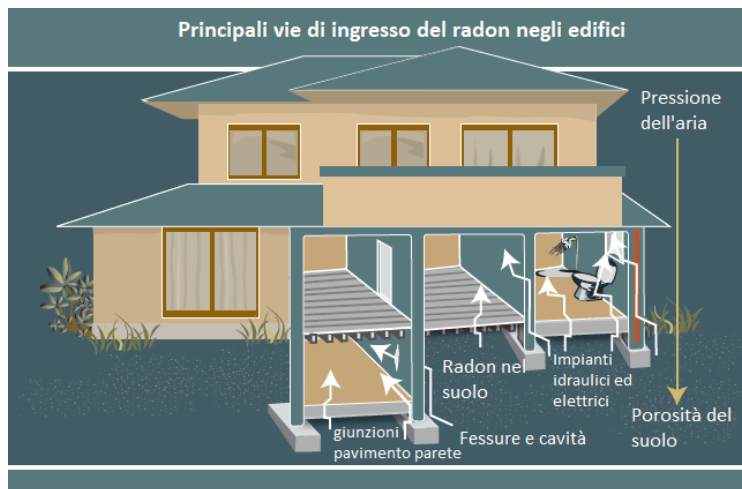


Fig. 1 – Principali vie di ingresso del radon negli edifici [1]

Le concentrazioni di radon indoor sono caratterizzate da significative variazioni giornaliere e stagionali. Le prime ore del mattino sono normalmente caratterizzate da concentrazioni di radon indoor più elevate, a causa del mancato ricambio di aria e della differenza di temperatura tra interno ed esterno. Allo stesso modo, in inverno si registrano normalmente concentrazioni di radon più alte rispetto a quelle misurate nel periodo estivo. Per tenere conto di queste variazioni, le misure di concentrazione di radon hanno solitamente la durata di un anno solare.

In generale il problema dell'esposizione al radon viene sottovalutato perché non è percepito come un fattore di rischio rispetto ad altri tipi di esposizione (ad esempio i campi elettromagnetici), eppure l'Organizzazione mondiale della sanità (OMS), attraverso l'International Agency for Research on Cancer (IARC), ha classificato il radon come appartenente al gruppo 1 delle sostanze cancerogene per l'essere umano. Infatti, diversi studi epidemiologici hanno evidenziato una correlazione tra l'esposizione continua al radon e il rischio di sviluppare un tumore polmonare. L'entità del rischio cresce all'aumentare della concentrazione a cui si è esposti e all'aumentare della durata dell'esposizione. Il rischio esiste anche per esposizioni prolungate a concentrazioni di radon medio-basse, come quelle che si possono trovare comunemente nelle abitazioni [2] e nei luoghi di lavoro. È stato stimato un aumento lineare del rischio di sviluppare il tumore ai polmoni pari a circa il 16% per ogni 100 Bq/m³ di incremento di concentrazione media di radon (fig. 2) [3].

Gli studi hanno inoltre evidenziato un incremento del rischio dovuto all'effetto sinergico tra esposizione al radon e fumo di sigaretta: si stima che il rischio di sviluppare un tumore al polmone sia 25 volte più alto per un fumatore rispetto ad un non fumatore esposto alle stesse concentrazioni di radon [3]. Applicando i risultati di studi epidemiologici europei [3, 4], l'Istituto Superiore di Sanità (ISS) ha stimato che in Italia su un totale di 30000 casi di tumore polmonare ogni anno, circa 3300 (cioè circa il 10% dei casi) sono attribuibili al radon [5]. L'ISS inoltre ritiene che la maggior parte dei casi coinvolga fumatori ed ex-fumatori, a causa dell'effetto sinergico tra radon e fumo di sigaretta [5].

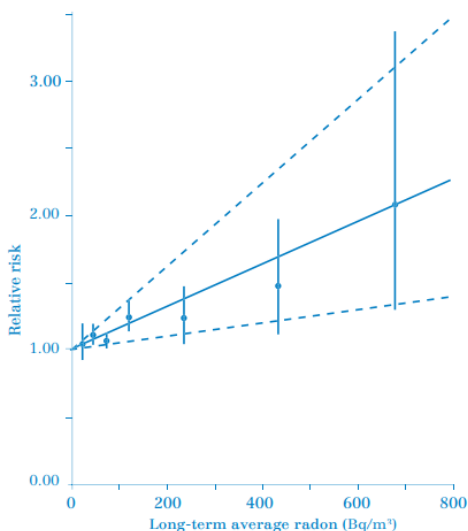


Fig. 2 – Rischio relativo di incidenza di casi di tumore al polmone in funzione della concentrazione media long-term di radon nelle abitazioni [3]

Al fine di ridurre il numero di casi di tumore ai polmoni è quindi necessario intervenire abbassando le concentrazioni di radon nelle abitazioni e nei luoghi di lavoro anche tramite l'attuazione di interventi di risanamento degli edifici. Ciò permetterebbe di ottenere risultati significativi in tema di salute pubblica.

Ulteriori informazioni sul radon e sugli effetti sanitari associati alla sua esposizione sono disponibili alle pagine tematiche dell'Istituto Superiore di Sanità e dell'Organizzazione Mondiale della Sanità⁴.

3. Inquadramento geologico della regione

Il radon appartiene alla catena di decadimento dell'uranio 238, che è presente in concentrazioni diverse in tutti i tipi di roccia (sedimentaria, metamorfica e magmatica). Sebbene in linea di massima le concentrazioni siano più alte nelle rocce magmatiche, possibili anomalie sono riscontrabili in tutti i tipi di rocce, in presenza di venature o impurezze. Un'altra caratteristica che influenza le concentrazioni di radon è la permeabilità del suolo, che definisce la capacità di

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

trasporto del radon dalla sorgente alla superficie. Anche le disomogeneità geologiche, individuate dalle faglie e da sistemi di fratturazione, possono influenzare le concentrazioni di radon.

Queste premesse evidenziano come i fattori geologici possano potenzialmente condizionare la presenza di radon indoor e richiedono un inquadramento geologico della regione, riportato di seguito.

La Lombardia geomorfologicamente può essere divisa in tre macroaree: fascia alpina a nord, Pianura Padana e, nella parte meridionale della regione, fascia appenninica dell'Oltrepò Pavese.

Le litologie delle Alpi Centrali sono composte da rocce metamorfiche di diverso grado: gneiss, micascisti, filladi, ofioliti, anfiboliti e altre, e da rocce magmatiche intrusive: graniti, granodioriti, tonaliti, dioriti. Nella fascia alpina sono presenti anche rocce di tipo sedimentario che non hanno subito il metamorfismo alpino, come ad esempio le rocce carbonatiche e dolomitiche. Nell'area Subalpina le rocce calcaree e dolomitiche rendono questa zona una delle più importanti d'Italia per i fenomeni carsici. Queste rocce sedimentarie appoggiano su un basamento di rocce metamorfiche, testimonianza di una orogenesi precedente a quella alpina, e sono di tipo gneissiche e anfibolitiche con presenza di lenti di marmo. A rendere ulteriormente complessa la situazione sono i movimenti tettonici (sovrascorrimenti) che causano la difficile comprensione dei rapporti tra le varie unità. Un'ulteriore divisione della fascia alpina, dal punto di vista geologico, è determinata dalla "Linea Insubrica" che in Lombardia prende il nome di "Linea Jorio-Tonale", che divide le Alpi Centrali a nord dalle Alpi Meridionali o fascia Subalpina a sud.

La Pianura Padana è un bacino di subsidenza, riempitosi con il materiale proveniente dall'erosione delle Alpi da parte di ghiacciai e fiumi.

La fascia appenninica dell'Oltrepò Pavese è composta in prevalenza da unità terrigene ed un'unità composta per la quasi totalità da gessi. Tra le rocce terrigene, arenacee o argillitiche notoriamente non solubili, e che non danno forme di carsismo, è possibile trovare delle arenarie a cemento carbonatico.

La mappa in fig. 3 rappresenta le litologie presenti in Lombardia. Da questa mappa risulta evidente la relativa omogeneità dal punto di vista litologico della fascia di pianura, caratterizzata dalla presenza di una significativa coltre alluvionale di ghiaie, sabbie e limi. La fascia alpina e subalpina e dell'Oltrepò Pavese risultano invece caratterizzate da una estrema variabilità geologica e geomorfologica. Queste informazioni sono state utilizzate allo scopo di studiare le correlazioni delle aree tra le concentrazioni di radon più elevate e specifiche caratteristiche geologiche o geomorfologiche del territorio.



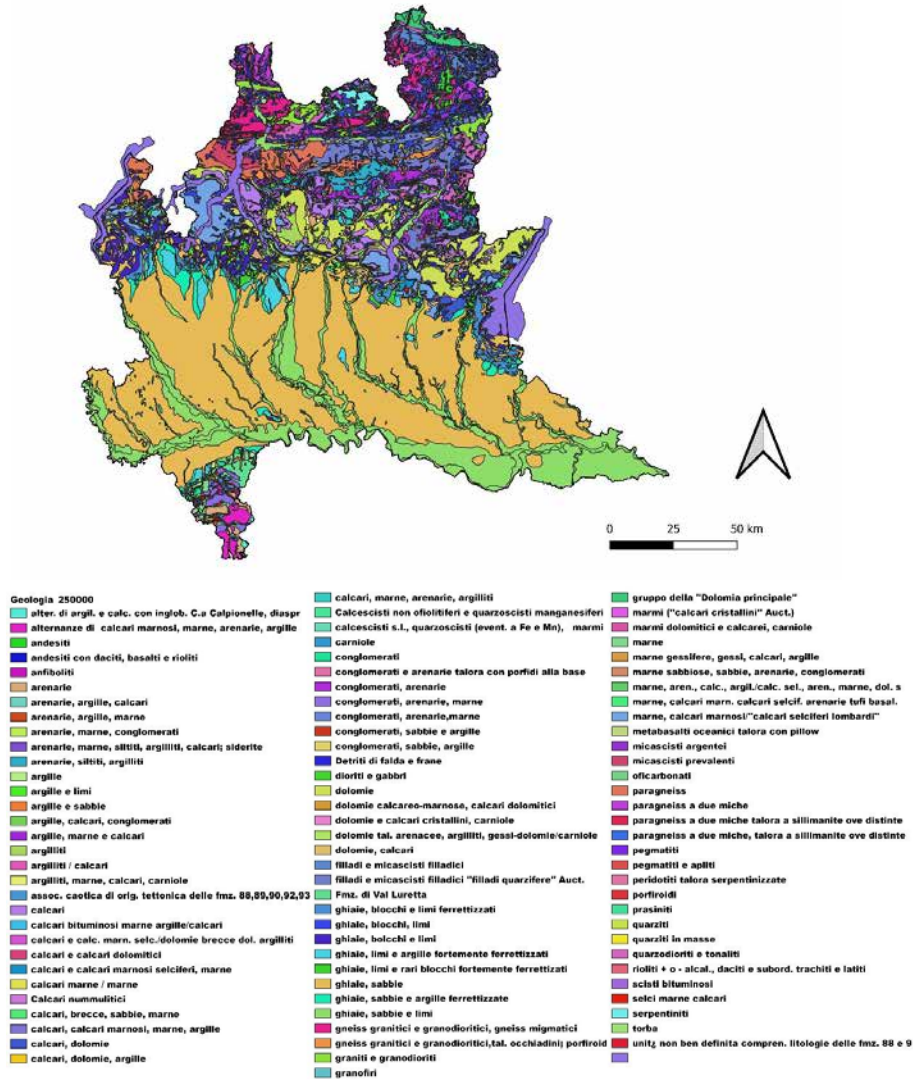


Fig. 3 – Mappa litologica della Lombardia (<https://www.geoportale.regione.lombardia.it/>)

4. Base dati sperimentale

La base dati ad oggi disponibile per la prima individuazione delle aree prioritarie è costituita dai dati raccolti nel corso di due campagne regionali distinte effettuate negli anni 2003-2004 e 2009-2010, nel contesto di attività svolte in ottemperanza al D.Lgs. 241/00⁵ e finalizzate ad ottenere una prima mappatura dei livelli di concentrazione di radon indoor estesa a tutto il territorio regionale, realizzata secondo criteri di tipo geografico.

La campagna 2003-2004 era stata progettata suddividendo il territorio in maglie di diverse dimensioni, in funzione delle caratteristiche geologiche e morfologiche dominanti nelle diverse aree della regione, individuando in ciascuna maglia un numero di misure variabile da 5 a 10 da effettuarsi in ambienti al piano terra, presso luoghi di lavoro, scuole o edifici residenziali [6].

Nel dettaglio, le maglie di campionamento erano state definite come segue:

- per la fascia di pianura (substrato sottostante le coltri alluvionali a 50 m e oltre dal piano campagna): maglie di 16 x 10 km;
- per la fascia montana/pedemontana, incluso l’Oltrepò Pavese (substrato roccioso inferiore a 50 m dal piano campagna): maglie di 8 x 5 km o di dimensioni inferiori, ovvero maglie di 2,5 x 8 km oppure di 4 x 5 km laddove sia stato ritenuto opportuno intensificare il piano di campionamento in funzione di una attesa maggiore variabilità dovuta alle caratteristiche geologiche e/o geomorfologiche del territorio.

Successivamente, era stato programmato nel corso del biennio 2009-2010 un supplemento di indagine che ha consentito di aumentare in alcune maglie la base dati disponibile.

Tutte le misure hanno avuto durata annuale.

Il reclutamento dei partecipanti ed il posizionamento dei rivelatori erano stati effettuati dal personale delle Aziende Sanitarie Locali (oggi Agenzie di Tutela della Salute).

L’esecuzione delle misure era stata effettuata da ARPA Lombardia presso il Laboratorio di radioattività ambientale della sede di Bergamo (ora U.O. Centro Regionale Radioprotezione) utilizzando la tecnica dei rivelatori a tracce nucleari di tipo CR-39 (vedi box di approfondimento in Appendice I). Il metodo di misura è stato gestito nel rispetto di un rigoroso programma di assicurazione qualità del dato; le tarature sono riferibili a standard nazionali, l’accuratezza è garantita dalla regolare partecipazione a programmi di interconfronto. Attualmente il metodo è accreditato ai sensi della norma ISO 17025.

Nelle figure 4 e 5 è riportata la suddivisione del territorio regionale in maglie e la distribuzione dei punti di misura. Nelle maglie tratteggiate, in cui non erano presenti centri urbanizzati, non è stata effettuata alcuna misura.

⁵ Decreto legislativo 26 maggio 2000, n. 241. Attuazione della direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti.

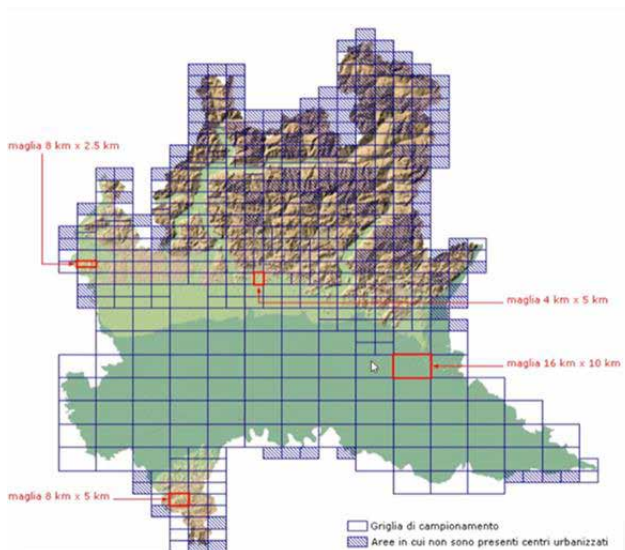


Fig. 4 – Suddivisione del territorio in maglie di campionamento

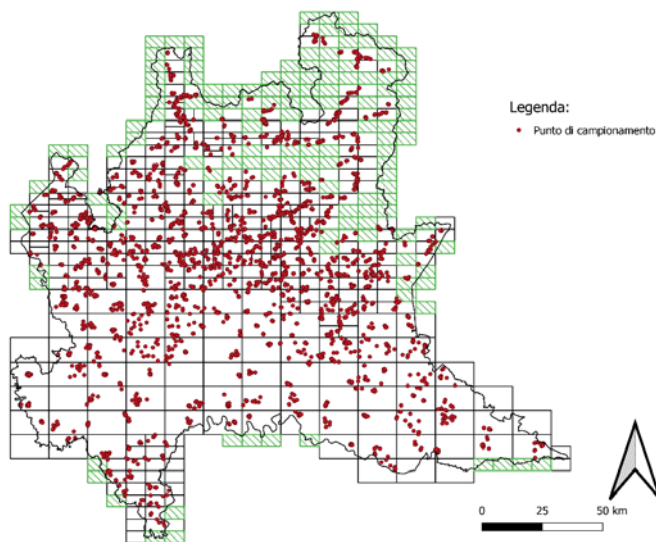


Fig. 5 – Distribuzione dei punti di misura nelle maglie di campionamento. Le maglie tratteggiate in verde corrispondono ad aree del territorio in cui non vi è presenza di centri urbanizzati.

4.1. Analisi dei dati

Complessivamente sono state effettuate, nel corso delle due campagne di campionamento, 3933 misure della concentrazione media annuale di radon indoor distribuite in 551 comuni, pari al 37% dei comuni lombardi (numero totale di comuni presenti in Lombardia - dato riferito al mese di gennaio 2022: 1506); il numero di misure per comune varia da 1 a 37. I punti di misura, tutti situati al piano terra, sono posti in luoghi di lavoro, scuole ed abitazioni residenziali.

La distribuzione delle misure per provincia e per tipologia di ambiente è presentata nelle tabelle che seguono.

Tab. 1 – Numero di misure per provincia

Provincia	Numero di misure
Bergamo	668
Brescia	871
Como	248
Cremona	148
Lecco	280
Lodi	94
Monza Brianza	57
Milano	231
Mantova	175
Pavia	322
Sondrio	508
Varese	331
Totale	3933

Tab. 2 – Numero di misure per tipologia di ambiente

Tipologia di ambiente chiuso	Numero di misure
Luoghi di lavoro	1329
Scuole	542
Abitazioni	2062
Totale	3933

La figura 6 presenta l'intero set di dati attraverso l'istogramma della distribuzione delle misure effettuate su tutto il territorio regionale.



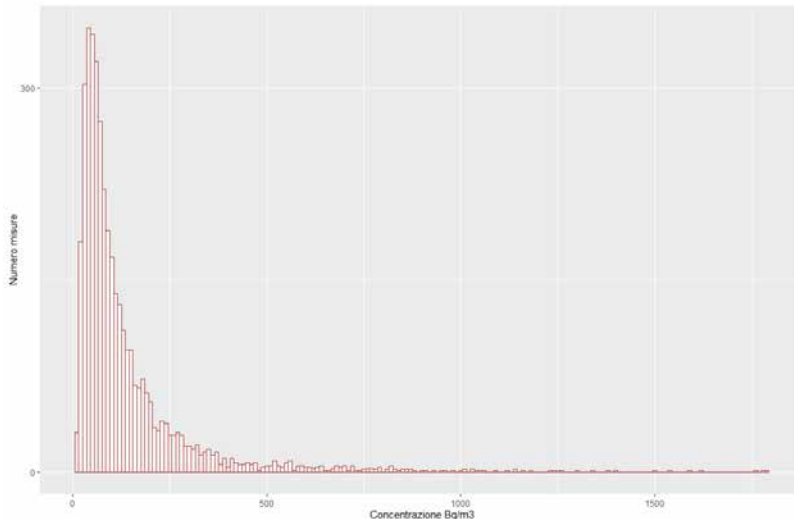


Fig. 6 – Istogramma della distribuzione delle misure a piano terra (3933 dati)

La concentrazione media annuale misurata varia da 8 a 1793 Bq/m³.

L' 8,1% degli ambienti chiusi sottoposti a misura presenta valori di concentrazione media annua di radon indoor superiori a 200 Bq/m³ e il 3,6% valori superiori a 300 Bq/m³.

La distribuzione dei dati relativa all'intera regione è caratterizzata da una media aritmetica pari a 137 Bq/m³ e da una media geometrica ⁶ pari a 89 Bq/m³. Si osserva, per inciso, che i dati sopra riportati differiscono dai valori di media aritmetica e geometrica pubblicati ed associati alla campagna di misure 2003-2004 [7]. Tali difformità sono dovute all'inclusione, nell'analisi in corso, dei dati aggiuntivi raccolti nel corso del 2009-2010 che hanno ulteriormente arricchito la base dati incrementando il numero di misure disponibili nella fascia pedemontana e montana, in cui i valori di concentrazione sono mediamente più elevati. In questa fase si è ritenuto di tenere conto di tutte le informazioni disponibili sulla base di misure effettuate da ARPA.

Le mappe nelle figure da 7-a a 7-d presentano la distribuzione sul territorio dei risultati per classe di concentrazione, senza distinzione tra le diverse tipologie di ambienti. Il fatto che i dati relativi ad ambienti residenziali possano essere trattati statisticamente insieme a quelli relativi a luoghi di lavoro o scuole è ancora oggetto di studio: è possibile che in tali ambienti esistano reali diversità nelle concentrazioni di radon, considerata la differenza nelle caratteristiche costruttive e d'uso (ambienti di dimensioni mediamente differenti, condizioni di ventilazione, ecc.) ⁷. Questa ipotesi è stata valutata eseguendo alcune analisi comparative dei set di dati relativi a diverse tipologie di ambienti, senza che vi fosse evidenza di differenze significative. Per tale motivo, in questa fase delle attività di studio e mappatura questa possibilità non è stata ulteriormente indagata ed i dati disponibili sono stati analizzati senza ulteriori distinzioni in funzione della tipologia di ambiente.

⁶ Media aritmetica e media geometrica sono due distinti indicatori statistici di un insieme di dati.

La media aritmetica è la somma dei valori numerici divisa per il numero di dati considerati.

La media geometrica di n valori è la radice n-esima del prodotto degli n valori. Rispetto alla media aritmetica, la media geometrica è molto più sensibile alla presenza di valori molto piccoli.

⁷ Allo scopo di minimizzare possibili differenze tra tipologie di ambienti diversi nelle campagne di misura condotte nel 2003-2004 e 2009-2010 erano state date indicazioni per la scelta degli ambienti scolastici e lavorativi in cui effettuare misure, che dovevano avere dimensioni paragonabili a quelle degli ambienti residenziali (non sono stati inclusi capannoni, garage, palestre, ecc.).

Nel prosieguo della relazione i punti di misura saranno identificati in modo generico come “ambienti chiusi”, a prescindere dall’effettiva destinazione d’uso degli ambienti.

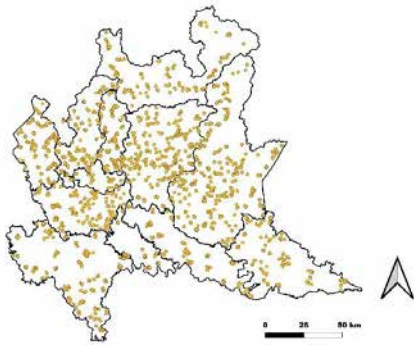


Fig. 7-a - Rn-222 < 100 Bq/m³

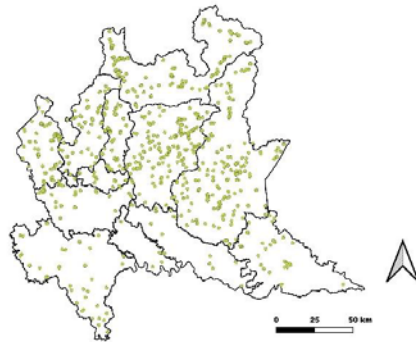


Fig. 7-b – 100 Bq/m³ < Rn-222 < 200 Bq/m³

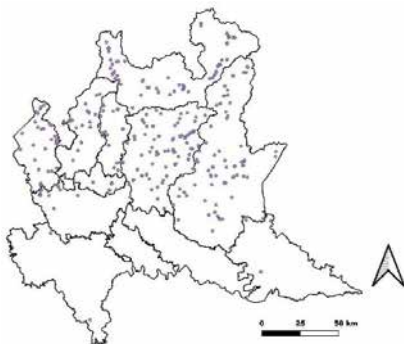


Fig. 7-c – 200 Bq/m³ < Rn-222 < 300 Bq/m³

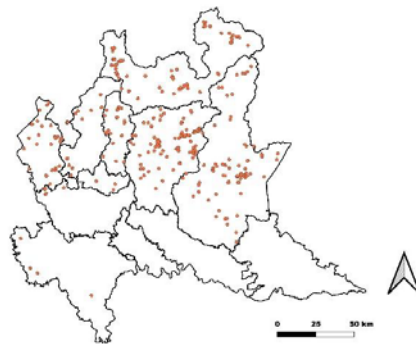


Fig. 7-d Rn-222 > 300 Bq/m³

Fig. 7 – Rappresentazione della distribuzione sul territorio dei risultati per classe di concentrazione. Campagne 2003 -2010. Misure a piano terra

L’analisi visiva delle mappe in fig. 7 evidenzia che i valori mediamente più elevati si rilevano, come atteso, nella fascia montana e pedemontana.

Ai fini dell’individuazione delle aree prioritarie è importante determinare quale sia la distribuzione statistica dei dati osservati. Modalità e risultati di questa analisi sono presentati nei paragrafi seguenti.



La distribuzione dei dati relativi all'intera regione ed alle singole province viene riportata nelle figure 8 e 9 mediante la tecnica del box-plot⁸, una rappresentazione grafica che viene utilizzata per descrivere la distribuzione di un campione tramite indici di dispersione e di posizione.

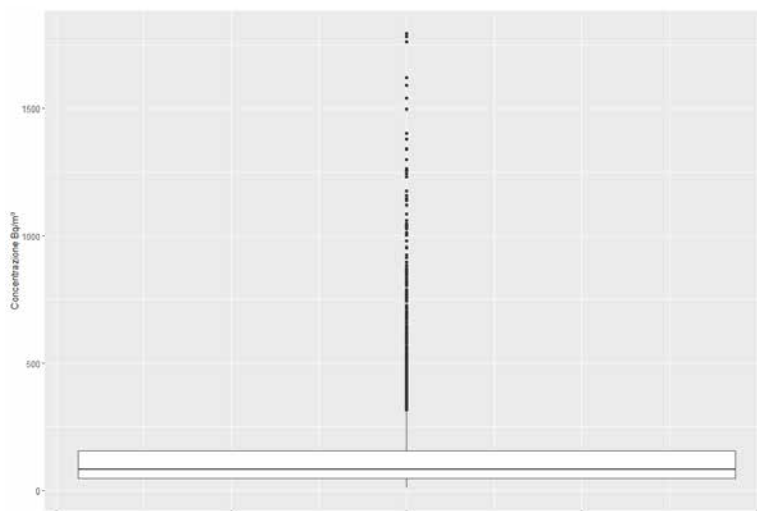


Fig. 8 – Rappresentazione mediante box-plot dei valori misurati, dati relativi a tutta la regione (3933 dati)

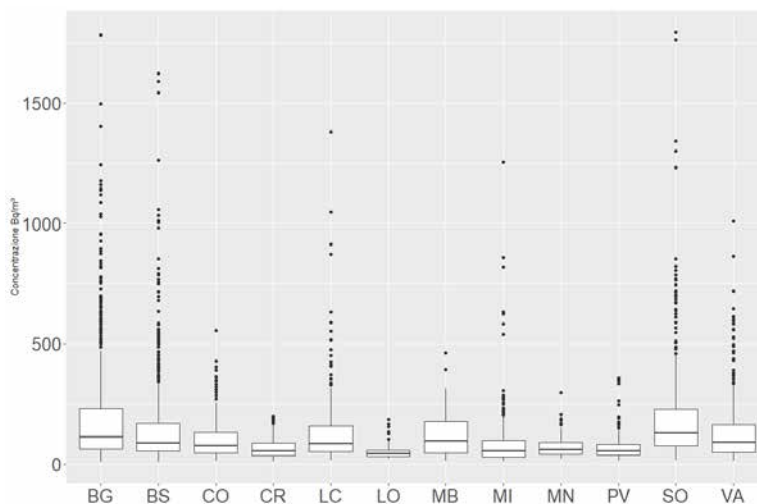


Fig. 9 – Rappresentazione mediante box-plot dei valori misurati, dati suddivisi per provincia

⁸ Un box-plot è un modo per rappresentare la distribuzione dei dati di una variabile. La linea centrale nella scatola rappresenta la mediana dei dati, cioè il valore al di sotto e al di sopra del quale si trova la metà dei dati. Se i dati sono simmetrici, la mediana è al centro della scatola. Se, invece, i dati sono asimmetrici, la mediana sarà più vicina alla parte inferiore o a quella superiore della scatola. La parte inferiore e superiore della scatola mostrano rispettivamente il 25° e il 75° percentile, cioè il valore al di sotto del quale si trova rispettivamente il 25% e il 75% dei dati. La lunghezza della scatola è la differenza tra i due percentili e si chiama range interquartile (IQR). Le linee che si estendono a partire dalla scatola sono chiamate baffi. I dati che ricadono al di fuori dei baffi, rappresentati come punti, sono possibili outlier della distribuzione, cioè valori maggiori della variazione attesa.

Queste rappresentazioni grafiche dei risultati forniscono una prima evidenza del fatto che la distribuzione dell'insieme dei dati, sia su base regionale che provinciale, è asimmetrica.

L'assunzione che la distribuzione delle concentrazioni di radon nelle abitazioni sia approssimabile ad una log-normale è introdotta dalla pubblicazione UNSCEAR del 1982 [8] e supportata da ulteriori studi successivi. Questa ipotesi, rilevante ai fini della successiva individuazione delle aree prioritarie, viene ulteriormente indagata per il set di dati sotto analisi.

La figura 10 presenta l'intero set di dati attraverso l'istogramma della distribuzione di tutte le misure effettuate sul territorio regionale, sovrapposto ad una distribuzione teorica di tipo log-normale⁹.

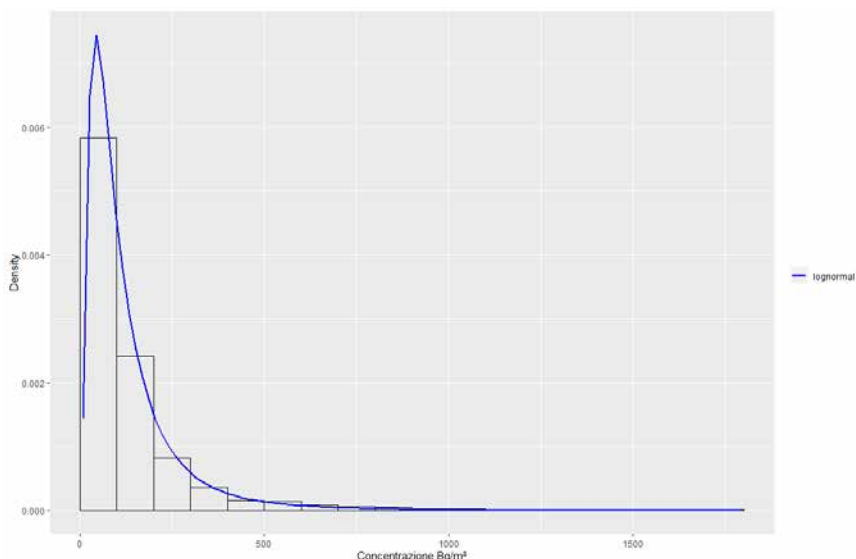


Fig. 10 – Istogramma della distribuzione delle misure a piano terra (3933 dati)

I parametri matematici descrittivi dell'insieme di dati considerato sono riportati in tabella 3; come atteso per le distribuzioni di tipo log-normale, media geometrica e mediana risultano, in prima approssimazione, confrontabili.

Tab. 3 – Parametri matematici descrittivi

Riassunto (3933 misure)	
Media aritmetica	137,4
Media geometrica	89,7
Deviazione standard	169,1
Deviazione standard geometrica	2,39
Mediana	81,9

⁹ In teoria delle probabilità la distribuzione lognormale, o log-normale, è la distribuzione di probabilità di una variabile aleatoria X il cui logaritmo logX segue una distribuzione normale.



Il grafico in figura 11 presenta la funzione di distribuzione cumulativa (CDF) dei dati, definita come la probabilità che la variabile osservata (in questo caso la concentrazione media annuale di radon) assuma un qualsiasi valore minore di un valore x . La funzione empirica (in nero) viene confrontata con la curva teorica (in blu) relativa ad una distribuzione di tipo log-normale.

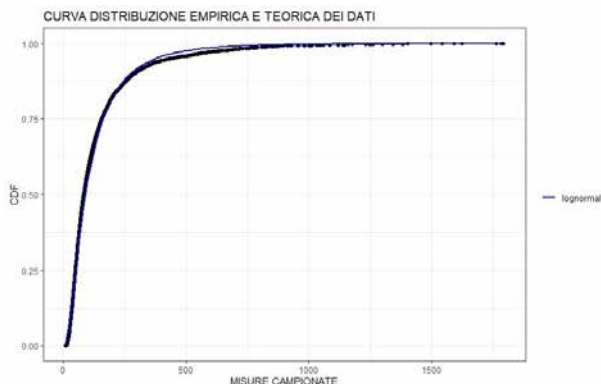


Fig. 11 – Funzione di distribuzione cumulativa nell’ipotesi di distribuzione log-normale

L’ ipotesi di log-normalità della distribuzione viene quindi verificata mediante l’applicazione del test Shapiro Wilk, di seguito riportato.

Utilizzando il pacchetto *EnvStats*: An R Package for Environmental Statistics del software Cran-R (Millard, 2013), si procede al calcolo dei parametri statistici necessari per verificare l’ipotesi nulla, vale a dire che la distribuzione statistica dei dati sia di tipo log-normale. Il test di Shapiro Wilk restituisce in uscita il valore di un parametro statistico, denominato W , che può assumere valori compresi tra 0 ed 1. Per valori del parametro W vicini ad 1, l’ipotesi che la distribuzione dei dati sia log-normale viene accettata al livello di confidenza del 95% (S.S. Shapiro, M.B. Wilk, 1965). Per il set di dati in esame il test ha restituito un valore di W pari a 0,99, attestando l’accettabilità dell’ipotesi che la distribuzione sia log-normale.

Come ulteriore verifica, si è proceduto alla normalizzazione del set di dati sperimentali calcolando il logaritmo naturale del valore della concentrazione media di radon indoor (Bq/m^3) del campione regionale, ed alla successiva verifica della normalità dell’insieme dei dati. La funzione di distribuzione cumulativa (CDF) dei dati normalizzati risulta sovrapponibile a quella di una normale (fig. 12).

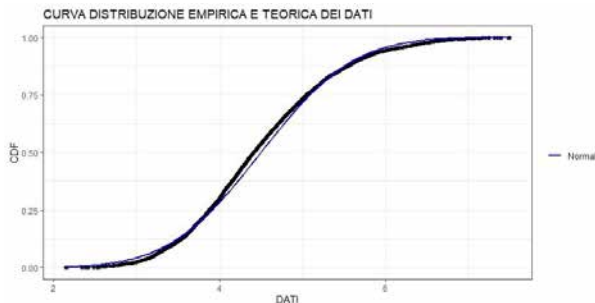


Fig. 12 – Funzione di distribuzione cumulativa – Set di dati normalizzati



Alla luce di quanto sopra riportato si può quindi assumere che la distribuzione dei dati di concentrazione media annuale di radon indoor in Lombardia sia approssimativamente di tipo log-normale. Per tale distribuzione la deviazione standard geometrica (DSG) è risultata pari a 2,39 (vedi tabella 3)¹⁰. Questo parametro sarà utilizzato nelle analisi che seguono per l'individuazione delle aree prioritarie.

5. Criterio per l'individuazione delle aree prioritarie

La classificazione di una zona come area prioritaria, sulla base di quanto stabilito dal Decreto, prevede l'individuazione delle zone nelle quali la stima della percentuale di edifici che supera il livello di 300 Bq/m³ è pari o superiore al 15%, dove la percentuale degli edifici è determinata con indagini o misure di radon effettuate o riferite o normalizzate al piano terra.

I dati sperimentali ad oggi disponibili in Lombardia garantiscono una buona copertura del territorio regionale, con una densità di informazione maggiore nelle aree in cui la variabilità attesa delle concentrazioni di radon indoor è maggiore in conseguenza della variabilità dal punto di vista geologico e geomorfologico dell'area montana e pedemontana. Per contro, il numero di comuni per i quali sono effettivamente disponibili dati sperimentali è limitato (circa un terzo del totale), ed il numero di ambienti chiusi campionati in ogni comune rappresenta una frazione minima dell'abitato totale.

Questo dato di partenza giustifica la scelta di effettuare la prima individuazione delle aree prioritarie assumendo come nota la distribuzione di densità di probabilità della concentrazione di attività di radon; la percentuale di casi in cui si ha il superamento del livello di riferimento LR viene valutata a partire dai parametri di forma della distribuzione (deviazione standard geometrica¹¹) e dalla media geometrica associata ad ogni unità di campionamento [9] (vedi box di approfondimento in Appendice II). Secondo questo approccio, sotto l'ipotesi di log-normalità della distribuzione dei dati, la percentuale di ambienti chiusi in cui si ha il superamento del livello di riferimento LR si può identificare tramite la variabile standard Z , definita come segue:

$$Z = \frac{\ln(LR) - \ln(MG)}{\ln(DSG)}$$

dove:

LR: Livello di riferimento

MG: Media geometrica dell'unità di campionamento selezionata

DSG: Deviazione standard geometrica della distribuzione

¹⁰ Considerata l'estrema variabilità dal punto di vista geologico e geomorfologico della regione, la valutazione di log-normalità dei dati sperimentali è stata effettuata anche raggruppando distintamente i dati relativi alla fascia di pianura (identificata come la fascia con altitudine inferiore a 700 m) rispetto a quelli relativi alla fascia montana e pedemontana (altitudine > 700 m). In entrambi i casi si è avuto conferma che i dati si distribuiscono, approssimativamente, secondo una log-normale. La DSG è risultata pari a 2,13 per la fascia di pianura e a 2,42 per la fascia montana e pedemontana. Poiché la differenza nei valori di DSG tra le diverse aree non conduce, nella pratica, a risultati differenti nell'individuazione delle aree prioritarie, si è scelto di non tenere conto di questa analisi di dettaglio.

¹¹ La DSG descrive la dispersione di un insieme di numeri attorno alla media geometrica.

La funzione Z rappresenta lo scarto tra la media geometrica MG dell'unità di campionamento e il livello di riferimento LR, in rapporto al valore di deviazione standard geometrica DSG della distribuzione. A valori di Z differenti corrispondono valori diversi della % di ambienti chiusi che supera il livello di riferimento; assumendo che tale percentuale sia pari al 15%, è possibile individuare le aree prioritarie calcolando per ciascuna unità di campionamento il valore di Z in funzione della media geometrica MG¹².

Utilizzando il criterio sopra descritto è stata condotta una prima analisi utilizzando come unità di campionamento le maglie già utilizzate per la costruzione della base dati. Questo approccio, adottato nella definizione delle campagne di misura, aveva permesso di garantire la copertura di tutto il territorio regionale con una densità di informazione correlata alla variabilità attesa delle concentrazioni, pur con una numerosità di misure relativamente limitata. Per ogni maglia è stata calcolata la media geometrica delle misure che vi ricadono. Calcolando per ciascuna maglia il valore di Z sopra definito, si è ottenuto il risultato presentato nella mappa in fig. 13.

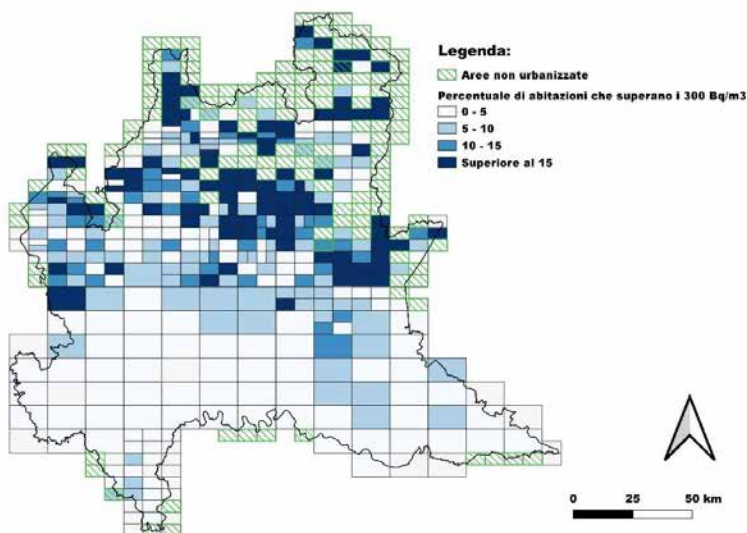


Fig. 13 – Classificazione delle maglie di campionamento in funzione della % di superamento del LR

Questa mappa rappresenta una prima individuazione dei livelli di probabilità di rilevare concentrazioni di radon superiori al livello di riferimento nelle diverse zone della regione suddivisa in maglie. I colori corrispondono a percentuali diverse del numero di ambienti chiusi che si stima superino il livello di riferimento di 300 Bq/m³, da valori inferiori al 5% (in bianco) a valori superiori al 15% (in blu). L'ultima classe di concentrazione comporterebbe, secondo le indicazioni del Decreto, l'individuazione come area prioritaria.

¹² La variabile Z è definita dai valori della funzione deviata normale standardizzata. Assumendo per LR il valore di 300 Bq/m³ fissato dal D.Lgs. 101/2020 s.m.i. ed adottando per la DSG il valore di 2,39 calcolato per l'insieme complessivo dei dati, sono classificate in area prioritaria le unità di campionamento per le quali risulta $Z < 1,04$, valore che corrisponde ad una percentuale del 15% di ambienti chiusi in cui si ha il superamento del livello di riferimento LR.

5.1. Individuazione dei comuni in area prioritaria

La caratterizzazione del territorio regionale presentata in figura 13, che restituisce un primo quadro della distribuzione dei livelli di radon in Lombardia, non è direttamente o facilmente riferibile ai Comuni che, di fatto, rappresentano in prima approssimazione l'unità di campionamento più utile ai fini della declinazione operativa degli adempimenti di legge.

Per tale motivo è stato necessario modificare l'unità di campionamento passando dalla "maglia", utilizzata nella pianificazione e realizzazione delle campagne di misura, al "comune". L'intero set di dati disponibili è stato rianalizzato valutando la numerosità delle misure disponibili in ciascun comune e verificando per ciascuno di essi il rispetto del seguente criterio "di minima"¹³: si è ritenuto di disporre di informazioni sufficienti alla classificazione del comune nei casi in cui per il comune stesso fosse disponibile un numero N di misure proporzionale alla popolazione: $N \geq \text{Pop}^{0,3}$, e comunque non inferiore a 10. Per i comuni adiacenti con pochi abitanti (< 2500 abitanti), situati su terreni uniformi dal punto di vista geomorfologico, è stato effettuato un accorpamento allo scopo di disporre di un numero di misure accettabile secondo il criterio sopra riportato. Per i comuni (o accorpamenti di comuni) per i quali si disponeva di un numero di misure sufficienti si è quindi proceduto al calcolo della media geometrica; contestualmente, si è verificato che anche a livello comunale i valori di DSG tendono, all'aumentare del numero di dati disponibili, al valore di 2,39 valutato per l'intero set di dati (fig. 14).

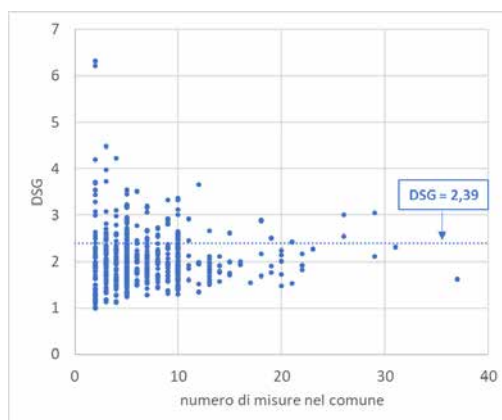


Fig. 14 – Tendenza delle DSG comunali ad un valore asintotico all'aumentare della numerosità del campione (2,39)

Sulla base di quanto sopra riportato si è arrivati alla definizione di un primo elenco di 90 comuni classificati in area prioritaria. L'elenco di dettaglio è riportato in tabella 4 e nella mappa in fig. 15.

Tab. 4 – Elenco dei comuni lombardi classificati in area prioritaria

ELENCO DEI COMUNI LOMBARDI CLASSIFICATI IN AREA PRIORITARIA			
	COMUNE	PROV	ABITANTI
1	ABBADIA LARIANA	LC	3198
2	ALGUA	BG	656
3	ANFO	BS	448

¹³ Il criterio è stato ricavato da quanto proposto nella bozza del Piano Nazionale d'Azione per il Radon, in fase di definizione

ELENCO DEI COMUNI LOMBARDI CLASSIFICATI IN AREA PRIORITARIA			
	COMUNE	PROV	ABITANTI
4	AVIATICO	BG	575
5	BAGOLINO	BS	3747
6	BESANO	VA	2508
7	BISUSCHIO	VA	4268
8	BRANZI	BG	666
9	CAINO	BS	2141
10	CAMPODOLCINO	SO	927
11	CARONA	BG	286
12	CASARGO	LC	837
13	CASSIGLIO	BG	110
14	CASTANO PRIMO	MI	10871
15	CASTELLO DELL'ACQUA	SO	614
16	CASTIONE DELLA PRESOLANA	BG	3348
17	CASTO	BS	1623
18	CHIAVENNA	SO	7161
19	CLUSONE	BG	8498
20	COSTA DI SERINA	BG	4753
21	CUNARDO	VA	2887
22	DERVIO	LC	2582
23	FERRERA DI VARESE	VA	705
24	FINO DEL MONTE	BG	1141
25	FONTENO	BG	566
26	FOPPOLO	BG	167
27	GANDELLINO	BG	961
28	GEROLA ALTA	SO	161
29	GHEDI	BS	18496
30	GORDONA	SO	1925
31	GROMO	BG	1133
32	GROSIO	SO	4356
33	IDRO	BS	1865
34	ISOLA DI FONDRA	BG	171
35	LAVENONE	BS	487
36	LENNA	BG	553
37	LIVIGNO	SO	6904
38	LODRINO	BS	1624
39	LOVERO	SO	625
40	MACCAGNO CON PINO E VEDDASCA	VA	2390
41	MAZZO DI VALTELLINA	SO	1024
42	MESE	SO	1798
43	MEZZOLDI	BG	164
44	MOIO DE' CALVI	BG	195
45	MONTIRONE	BS	5067

Serie Ordinaria n. 26 - Mercoledì 28 giugno 2023

ELENCO DEI COMUNI LOMBARDI CLASSIFICATI IN AREA PRIORITARIA			
	COMUNE	PROV	ABITANTI
46	ODOLO	BS	1917
47	OLIVETO LARIO	LC	1193
48	OLMO AL BREMBO	BG	486
49	OLTRESSENDA ALTA	BG	144
50	ONORE	BG	919
51	PIARIO	BG	1007
52	PIAZZA BREMBANA	BG	1193
53	PIAZZATORRE	BG	389
54	PIAZZOLO	BG	87
55	PIURO	SO	1873
56	PONTE DI LEGNO	BS	1761
57	PONTE IN VALTELLINA	SO	2250
58	PONTE NOSSA	BG	1716
59	PREMANA	LC	2174
60	PREMOLO	BG	1058
61	RIVA DI SOLTO	BG	881
62	SABBIO CHIESE	BS	3915
63	SALTRIO	VA	2983
64	SAMOLACO	SO	2860
65	SAN GIACOMO FILIPPO	SO	369
66	SELVINO	BG	1990
67	SERNIO	SO	476
68	SOLTO COLLINA	BG	1777
69	SONGAVAZZO	BG	696
70	SPRIANA	SO	79
71	TEMU'	BS	1105
72	TORRE DI SANTA MARIA	SO	2388
73	TOVO DI SANT'AGATA	SO	626
74	VALBONDIONE	BG	972
75	VALDIDENTRO	SO	4129
76	VALDISOTTO	SO	3595
77	VALFURVA	SO	2508
78	VALGOGLIO	BG	586
79	VALLIO TERME	BS	1408
80	VALNEGRA	BG	215
81	VALVESTINO	BS	173
82	VANZAGHELLO	MI	5246
83	VARENNA	LC	723
84	VERVIO	SO	202
85	VESTONE	BS	4174
86	VEZZA D'OGGIO	BS	1474
87	VILLA DI CHIAVENNA	SO	6612

ELENCO DEI COMUNI LOMBARDI CLASSIFICATI IN AREA PRIORITARIA			
	COMUNE	PROV	ABITANTI
88	VILLA D'OGNA	BG	968
89	VIONE	BS	622
90	VOBARNO	BS	8259

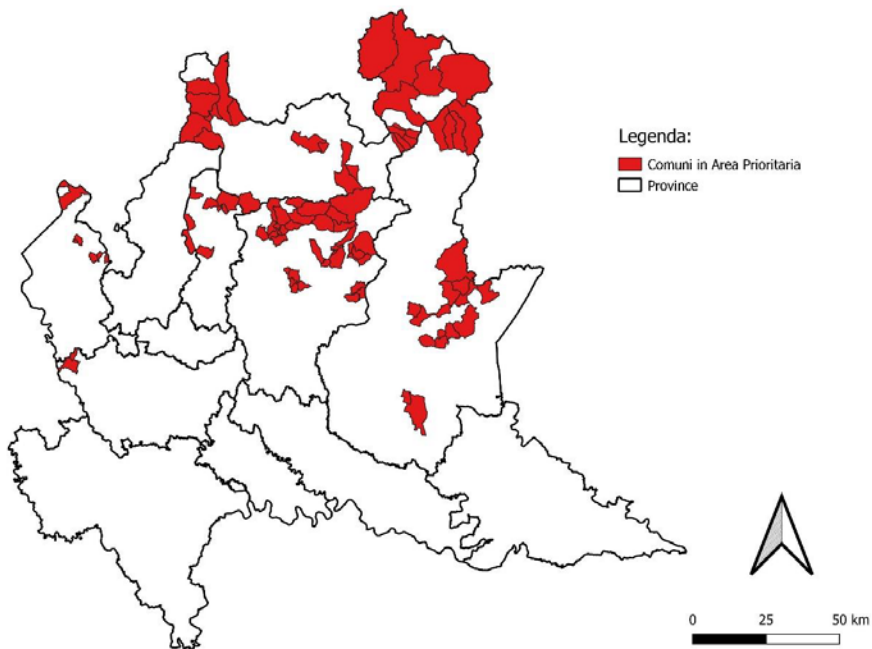


Fig. 15 – Comuni lombardi classificati in area prioritaria

La percentuale di comuni in area prioritaria risulta pari al 5% dei comuni lombardi. La popolazione residente ammonta a circa 200000 abitanti [10].

La distribuzione dei comuni in area prioritaria (suddivisione per provincia) è la seguente:

Tab. 5 – Distribuzione su base provinciale dei comuni classificati in area prioritaria

Provincia	N. di comuni	Abitanti
BG	34	39027
SO	23	53462
BS	19	60306
LC	6	10707
VA	6	15741
MI	2	16117
Totale	90	195360

Tutti i comuni classificati in area prioritaria sono ubicati, con l'unica eccezione di due comuni in provincia di Milano, nella fascia alpina o subalpina e sono distribuiti tra le province di Bergamo, Brescia, Sondrio, Lecco e Varese.

6. Commenti e considerazioni

Allo scopo di verificare la correttezza e l'attendibilità dei risultati ottenuti è stata condotta, per quanto possibile, una valutazione della coerenza tra i risultati ottenuti in Lombardia e quelli ottenuti nelle zone limitrofe della Confederazione Svizzera (a nord della regione) e del Piemonte (a ovest), che hanno già provveduto ufficialmente all'individuazione delle aree prioritarie (figg. 16 e 17).

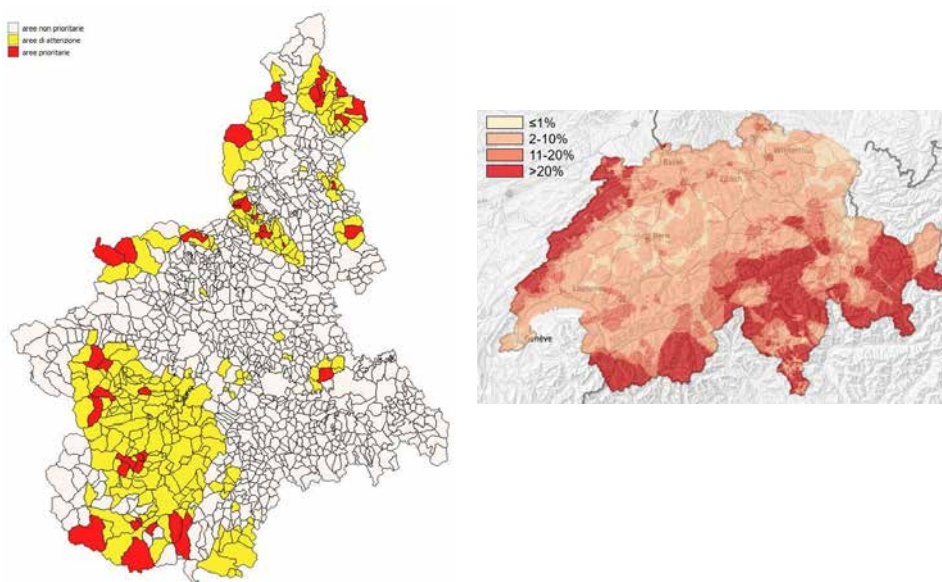


Fig. 16 – A sinistra: Regione Piemonte. Individuazione delle aree prioritarie. I comuni in rosso sono classificati in area prioritaria ai sensi dell'art. 11 comma 3 del D. Lgs. 101/2020. Fonte: Regione Piemonte - Deliberazione della Giunta Regionale 25 novembre 2022, n. 61-6054.

A destra: Confederazione svizzera. I colori indicano la probabilità di superare il livello di riferimento per il radon di 300 Bq/m³. Fonte: Ufficio federale della sanità pubblica (UFSP), 2018

Il riscontro mostrato in figura 17, anche se in modo puramente visuale, dà evidenza di una corrispondenza di massima nella caratterizzazione di zone limitrofe contigue.



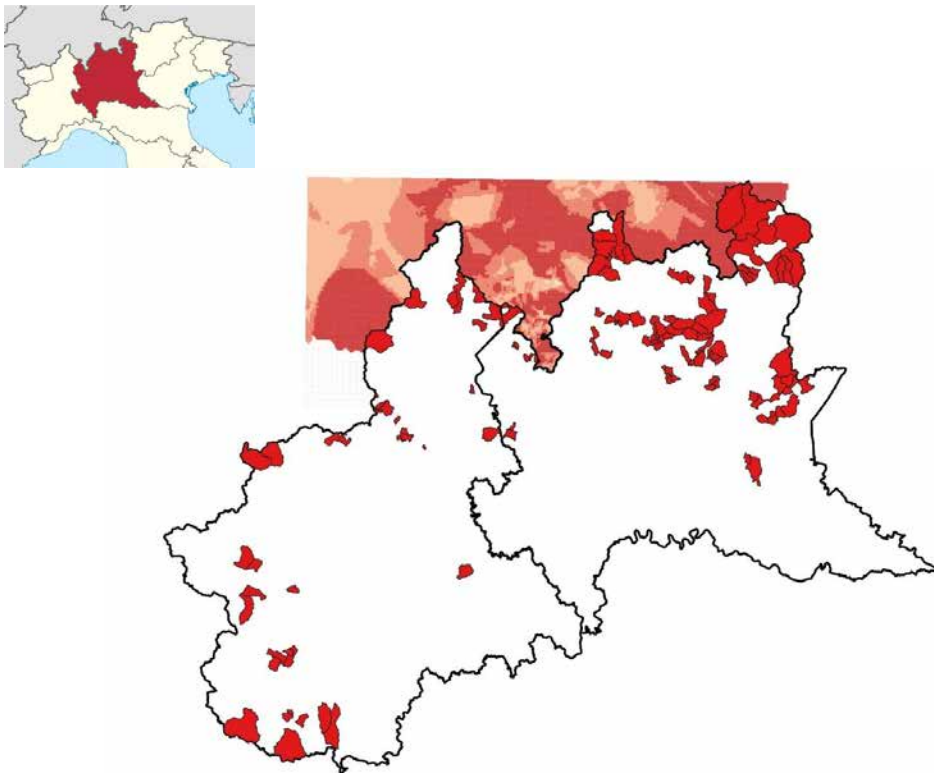


Fig. 17 – Raffronto dei risultati relativi alla individuazione delle aree prioritarie in Lombardia, Piemonte e nella Confederazione svizzera

Le rimanenti regioni o province autonome confinanti con la Lombardia non hanno provveduto, ad oggi, all'individuazione delle aree prioritarie ai sensi del D.Lgs. 101 pur avendo già svolto, in molti casi, analisi di dettaglio della situazione di esposizione al radon. E' stato quindi effettuato, ove possibile, un raffronto con le informazioni disponibili rispetto ai valori di concentrazione di radon indoor propri di diverse aree da cui si evince, in particolare:

- una coerenza dei dati rilevati nella fascia sud della Lombardia con quelli delle aree confinanti in Emilia Romagna [11];
- una coerenza tra la situazione dell'estremo nord-est della provincia di Sondrio con quella delle aree limitrofe della Provincia Autonoma di Bolzano [12];
- una coerenza tra la situazione del confine a est della Lombardia con quella delle aree limitrofe della regione Veneto [13].

L'individuazione delle aree prioritarie sulla base dei livelli di concentrazione consente di definire una scala di priorità nell'attuazione di interventi sia di misurazione che di risanamento, finalizzata alla riduzione del rischio individuale per chi risiede o lavora nelle aree a maggior concentrazione di radon indoor. Tutte le misure sono state effettuate al piano terra. Non sono state considerate le caratteristiche specifiche dell'edificato (numero di piani, presenza di interventi di risparmio energetico, ecc.). I valori medi comunali non sono stati pesati per la popolosità di ogni area. I dati ad oggi disponibili non sono, pertanto, rappresentativi dell'effettiva esposizione della popolazione ma rappresentano, piuttosto, una prima individuazione delle aree a maggior probabilità di elevate concentrazioni di radon. In particolare, in termini di gestione e riduzione del rischio collettivo assume particolare rilevanza la valutazione dell'eventuale sovrapposizione delle aree a maggior concentrazione di radon indoor con quelle a maggior densità abitativa [14]. In Lombardia tale sovrapposizione non si verifica (fig. 18) e, in termini numerici assoluti, è verosimile che la maggior parte degli edifici con concentrazioni di radon superiori al livello di riferimento si trovi al di fuori delle aree prioritarie. Per tale motivo, ai fini della riduzione del rischio, assume particolare importanza l'adozione generalizzata di interventi volti a ridurre l'esposizione al gas radon sia negli edifici esistenti che in quelli di nuova costruzione mediante la realizzazione di misure di prevenzione e mitigazione dell'ingresso e delle concentrazioni di radon negli edifici.

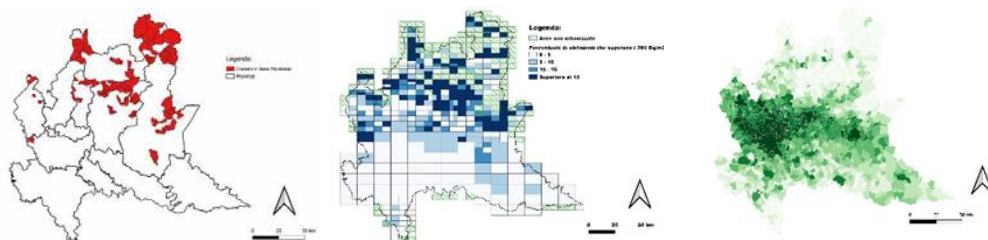


Fig. 18 – Confronto delle mappe di: (a) individuazione aree prioritarie; (b) concentrazione radon indoor; (c) densità abitativa

Infine, non hanno avuto esito conclusivo i tentativi di correlare le aree su cui insistono i comuni in area prioritaria con specifiche caratteristiche geologiche o geomorfologiche del territorio. Allo stato delle conoscenze, è possibile unicamente confermare l'assenza di situazioni significative rispetto al rischio radon nell'area della Pianura Padana, caratterizzata dalla presenza di una coltre alluvionale di ghiaie, sabbie e limi (fig. 19).



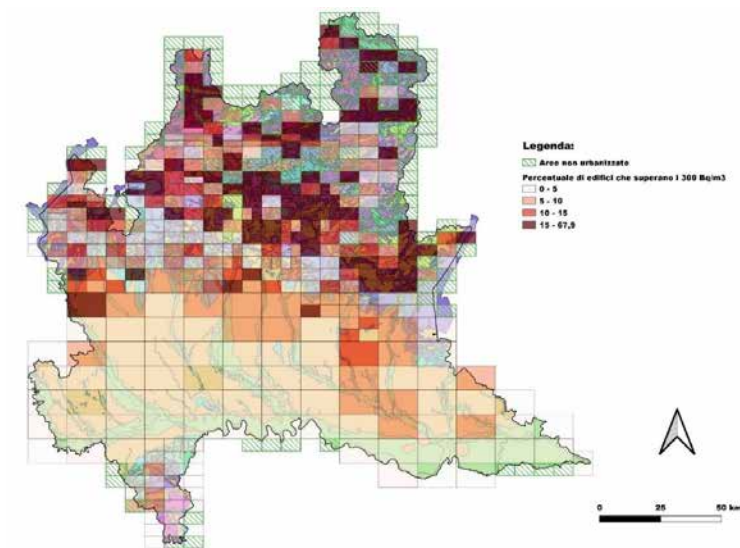


Fig. 19 – Sovrapposizione della mappa litologica e della mappa di classificazione delle maglie in funzione della % di superamento del LR

7. Conclusioni e sviluppi

Questo documento riporta la prima individuazione in Lombardia delle aree prioritarie ex art. 11 comma 3 del D.Lgs. 101/2020 s.m.i.

La classificazione dei comuni in area prioritaria è stata effettuata sulla base delle misure e delle informazioni ad oggi disponibili. L'elenco dei comuni in area prioritaria sarà quindi aggiornato, secondo necessità, ogni volta che il risultato di nuove indagini o una modifica dei criteri lo renda necessario. In particolare, l'elenco sarà rivisto a valle della pubblicazione dei nuovi criteri emanati in attuazione del Piano nazionale d'azione per il radon di cui all'art. 10 del Decreto.

Nei comuni identificati come area prioritaria dovrà essere attuato quanto previsto dal Decreto, sia per i luoghi di lavoro (artt. 16 e 17) che per le abitazioni (art. 19). In particolare, i primi adempimenti cui dare seguito dopo la pubblicazione dell'elenco nella Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana sono riportati di seguito:

- **Luoghi di lavoro:** l'esercente provvede, nei luoghi di lavoro situati in locali semi-sotterranei o situati al piano terra, ad effettuare la misurazione della concentrazione media annua di attività di radon in aria entro 18 mesi dalla pubblicazione nella Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana dell'elenco dei comuni in area prioritaria.
Le misurazioni devono essere effettuate avvalendosi di servizi di dosimetria riconosciuti ai sensi dell'articolo 155 del Decreto ovvero, nelle more dei riconoscimenti, avvalendosi

di organismi idoneamente attrezzati, vale a dire di servizi che soddisfino i requisiti minimi indicati nell'allegato II del Decreto ¹⁴.

L'esito delle misurazioni deve essere attestato, valutato e gestito nel rispetto di quanto stabilito negli artt. 17 e 18 del Decreto cui si rimanda per ogni ulteriore approfondimento.

- **Abitazioni:** la Regione promuove, nelle aree prioritarie, campagne e azioni per incentivare i proprietari di immobili adibiti ad uso abitativo, aventi locali situati al pianterreno o a un livello semi sotterraneo o sotterraneo, a effettuare la misura della concentrazione di radon avvalendosi dei servizi di cui all'articolo 155, o intraprendono specifici programmi di misurazione. La Regione provvede altresì nelle aree definite prioritarie a intraprendere specifici programmi di misurazione della concentrazione di radon nell'ambiente chiuso per il patrimonio di edilizia residenziale pubblica, provvedendo conseguentemente all'adozione di misure correttive. Nel caso in cui le misurazioni all'interno di abitazioni esistenti presentino una concentrazione media annua di attività di radon in aria superiore al livello di riferimento per gli edifici di nuova costruzione (200 Bq/m³), la Regione promuove e monitora l'adozione di misure correttive in attuazione del principio di ottimizzazione.

Ai fini della riduzione del rischio di esposizione dei lavoratori e della popolazione assume particolare importanza l'adozione generalizzata di interventi volti a ridurre l'esposizione al gas radon sia negli edifici esistenti che in quelli di nuova costruzione mediante la realizzazione di misure di prevenzione e mitigazione dell'ingresso e delle concentrazioni di radon negli edifici. Nelle more dell'entrata in vigore di quanto stabilito in attuazione del Piano nazionale d'azione per il radon, resta valido ai sensi della L.R. 3/2022 ¹⁵ (art. 66 septiesdecies e art. 3) l'obbligo posto in capo ai comuni di integrare i regolamenti edilizi comunali con norme tecniche specifiche per la protezione dall'esposizione al gas radon in ambienti chiusi nonché il riferimento alle «Linee guida per la prevenzione delle esposizioni al gas radon in ambienti indoor», approvate sulla base di indicazioni tecniche internazionali con decreto dirigenziale n. 12678 del 21 dicembre 2011, che costituiscono un valido strumento operativo per i Comuni, per i progettisti e per i costruttori edili, fornendo indicazioni e suggerimenti riguardanti la realizzazione di nuovi edifici radon resistenti e le soluzioni tecniche da adottare per ridurre l'esposizione al gas radon nel caso di edifici esistenti, in raccordo con gli interventi finalizzati al risparmio energetico.

¹⁴ Requisiti minimi degli organismi idoneamente attrezzati, nelle more del riconoscimento di idoneità dei servizi di dosimetria di cui all'art. 155 (Allegato II, Sezione I, comma 5):

- a) denominazione, codice fiscale, indirizzo ed eventuale indirizzo web;
- b) individuazione del responsabile tecnico con formazione professionale adeguata ed esperienza documentata in materia di almeno due anni;
- c) individuazione delle persone abilitate ad eseguire le misure;
- d) indicazione sui metodi di misurazione con riferimento a norme internazionali o nazionali o sui metodi sviluppati dal laboratorio e sottoposti a validazione;
- e) certificato di taratura con indicazione della riferibilità a campioni primari;
- f) programma di controllo di qualità misure del metodo di misurazione impiegato;
- g) assicurazione della qualità dei risultati anche attraverso la partecipazione a programmi idonei di confronti interlaboratori;
- h) adozione di procedure e istruzioni scritte per i metodi di misurazione, comprese quelle per le tarature e il controllo di qualità.

¹⁵ 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).

Resta infine ferma la necessità di integrare la base dati disponibile allo scopo di raccogliere ulteriori dati di concentrazione di radon indoor nelle aree nelle quali vi è evidenza, potenzialmente, di riscontrare valori elevati, pur nell'assenza al momento attuale di dati sufficienti ai fini della classificazione o meno come aria prioritaria. Saranno quindi programmate nuove campagne di misura mirate ai comuni che si trovano nelle aree potenzialmente a maggior rischio e non ancora sufficientemente indagate (fig. 20).

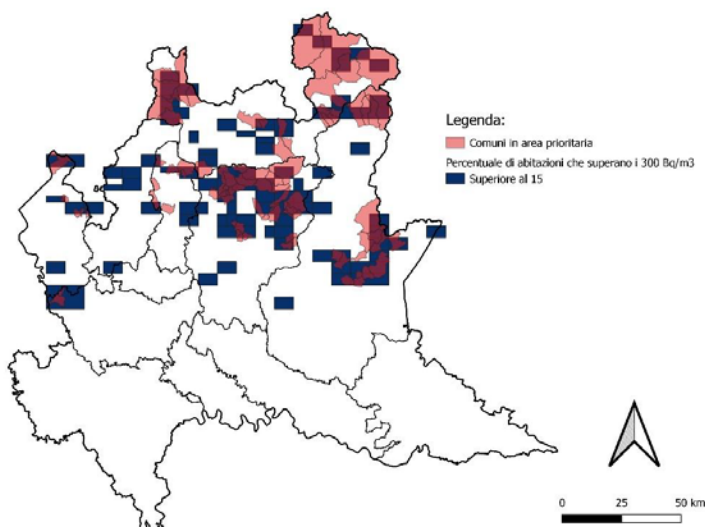



Fig. 20 – Maglie di campionamento in cui la % di abitazioni che supera il livello di riferimento è maggiore del 15%. Sono indicati i comuni già individuati in area prioritaria. Nelle aree potenzialmente a maggior rischio e non ancora sufficientemente indagate saranno programmate nuove campagna di misura i cui esiti produrranno, ove necessario, un aggiornamento dell'elenco dei comuni in area prioritaria.

L'elenco dei comui in area prioritarie sarà aggiornato periodicamente, sulla base dei nuovi dati che dovessero rendersi disponibili e comunque a valle della pubblicazione delle indicazioni e dei criteri tecnici previsti in attuazione del Piano nazionale d'azione per il radon di cui all'art. 10 del Decreto.

8. Bibliografia

- [1] UNEP United Nations Environment Programme. Radiation: effects and sources. 2016. ISBN: 978-92-807-3517-8
- [2] Bochicchio et al., 2013. Quantitative evaluation of the lung cancer deaths attributable to residential radon: A simple method and results for all the 21 Italian Regions, Radiation Measurements 50 (2013) 121-126
- [3] Darby, S. et al., 2005. Radon in homes and lung cancer risk: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. Br. Med. J. 330, 223-226
- [4] Darby S. et al., 2006. Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7,148 subjects with lung cancer and 14,208 subjects without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe. Scandinavian Journal of Work, Environment and Health, 2006, 32(Suppl. 1):1-83
- [5] ISS Istituto Superiore di Sanità. <http://radon.iss.it/tag/radon/>
- [6] De Bartolo et al., 2005. Piano di monitoraggio per l'individuazione delle radon prone areas nella regione Lombardia. Atti del Convegno Nazionale di Radioprotezione AIRP 2005
- [7] Borgoni et al., 2007. Radon in Lombardia: dai valori di concentrazione indoor misurati, all'individuazione dei comuni con elevata probabilità di alte concentrazioni. Un approccio geostatistico. Atti del Convegno Nazionale di Radioprotezione AIRP 2007
- [8] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 1982 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex D - Exposures to radon and thoron and their decay products
- [9] Chiaberto et al., 2021. Verso un'armonizzazione delle mappe radon nazionali. Atti del Convegno Nazionale di Radioprotezione AIRP 2021, 17-31
- [10] Censimento ISTAT 2022: Popolazione residente al 1 gennaio 2022 in Lombardia. <http://dati.istat.it/>
- [11] Regione Emilia Romagna. Collana Contributi n. 51 "Il radon ambientale in Emilia Romagna. Costruzione di una base dati informativa, analisi integrata e interpretazione dei dati"
- [12] Provincia Autonoma di Bolzano. Radon in Alto Adige. Concentrazione di radon in edifici abitati. Fonte: <https://ambiente.provincia.bz.it/radiazioni/mappa-radon.asp>
- [13] ARPA Veneto – Relazione tecnica "Iniziativa per la prevenzione dal radon negli ambienti di vita in Veneto", dicembre 2001
- [14] Bochicchio et al., 2017. Radon reference levels and priority areas considering optimisation and avertable lung cancers, Radiation Protection Dosimetry (2017), Vol. 177, No. 1-2, pp. 87-90
- 

Appendice I - Tecniche di misura del radon indoor

Esistono diverse tecniche di misura del radon indoor, da selezionare in base allo scopo ed alle informazioni che si vogliono ottenere.

Le tecniche di misura del radon indoor si dividono in base al tipo di strumentazione utilizzata, attiva o passiva.

La scelta del metodo di misura dipende dallo scopo e dalle informazioni che si desiderano ottenere: le tecniche con strumentazione attiva forniscono una misura delle fluttuazioni della concentrazione di radon e vengono utilizzate ad esempio per valutare l'efficacia di un risanamento; le tecniche con strumentazione passiva forniscono un valore medio temporale della concentrazione di radon in un periodo medio-lungo e sono richieste per le misure ai sensi della normativa vigente.

Le misure utilizzate ai fini dell'individuazione delle aree prioritarie in Lombardia sono state effettuate per un periodo di esposizione di un anno con la tecnica passiva dei CR-39, rivelatori di materiale plastico (polialilil-diglicol-carbonato PADC) sensibili alle radiazioni alfa. Il rivelatore viene inserito in un contenitore in plastica (camera di diffusione) chiuso con un tappo. Il gas radon entra nella camera di diffusione e le particelle alfa prodotte dal suo decadimento e da quello dei suoi "figli" interagiscono col materiale del rivelatore causando dei danni ai legami chimici e generando delle tracce latenti sulla superficie del rivelatore. Al termine del periodo di esposizione i CR-39 sono sottoposti ad un trattamento chimico che permette di rendere le tracce leggibili tramite metodi ottici. La concentrazione di radon viene infine calcolata grazie ad una relazione di proporzionalità con il numero di tracce e il tempo di esposizione.

ARPA Lombardia è accreditata ai sensi della norma ISO 17025 per la misura della concentrazione di radon indoor con la tecnica dei CR-39.



Fig. 1. Rivelatore CR-39



Fig. 2. Sistema Radosys

Appendice II - Caratteristiche della funzione di distribuzione log-normale

Si riportano di seguito le principali caratteristiche della distribuzione log-normale utilizzata ai fini della prima individuazione delle aree prioritarie (Chiaberto et al., 2021).

Le aree prioritarie sono quelle porzioni di territorio delle Regioni in cui la percentuale di edifici, determinata con misurazioni di radon effettuate, supera il Livello di Riferimento (LR) di 300 Bq/m³.

Si considerano come base dati le concentrazioni medie annuali di radon nelle abitazioni situate a piano terra. L'indicatore che esprime la percentuale di abitazioni in cui si ha il superamento del LR si può esprimere come segue:

$$P_{>LR} = 100 \cdot \int_{LR}^{\infty} f(C) dC$$

L'individuazione delle aree prioritarie si basa quindi sull'assunzione che le concentrazioni di radon seguano approssimativamente una distribuzione log-normale, la cui funzione densità di probabilità $f(C)$ è data da:

$$f(C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \frac{e^{-\frac{(\ln(C)-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{C}$$

dove i parametri μ e σ della log-normale possono essere stimati dalle singole misurazioni sperimentali C_i secondo le seguenti formule:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(C_i) = \ln(MG)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\ln(C_i) - \mu]^2} = \ln(DSG)$$

In queste formule MG e DSG sono la media geometrica e la deviazione standard geometrica. Tali parametri possono essere ricavati sperimentalmente nel seguente modo:

$$MG = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n C_i} = e^{\mu}$$

$$DSG = e^{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\ln(C_i) - \mu]^2}} = e^{\sigma}$$

Inoltre, si può dimostrare che la mediana della distribuzione log-normale è uguale alla media geometrica.

Infine, la media aritmetica (MA)

$$MA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$$

è legata alla media geometrica (MG) dalla seguente relazione:

$$MA = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} = MG \cdot e^{\frac{\sigma^2}{2}}$$

Sotto l'ipotesi di log-normalità della distribuzione dei dati, la percentuale di abitazioni in cui si ha il superamento del livello di riferimento LR si può calcolare tramite la variabile standard Z, definita dai valori della funzione devinata normale standardizzata maggiori o uguali al 15%:

$$Z = \frac{\ln(LR) - \ln(MG)}{\ln(DSG)}$$

dove:

LR: Livello di riferimento - Media annua della concentrazione di radon, pari a 300 Bq/m³

MG: Media geometrica dell'unità di campionamento selezionata

DSG: Deviazione standard geometrica della distribuzione

Allegato 2 – Elenco dei comuni lombardi in area prioritaria a rischio radon

ELENCO DEI COMUNI LOMBARDI CLASSIFICATI IN AREA PRIORITARIA			
	COMUNE	PROV	ABITANTI
1	ABBADIA LARIANA	LC	3198
2	ALGUA	BG	656
3	ANFO	BS	448
4	AVIATICO	BG	575
5	BAGOLINO	BS	3747
6	BESANO	VA	2508
7	BISUSCHIO	VA	4268
8	BRANZI	BG	666
9	CAINO	BS	2141
10	CAMPODOLCINO	SO	927
11	CARONA	BG	286
12	CASARGO	LC	837
13	CASSIGLIO	BG	110
14	CASTANO PRIMO	MI	10871
15	CASTELLO DELL'ACQUA	SO	614
16	CASTIONE DELLA PRESOLANA	BG	3348
17	CASTO	BS	1623
18	CHIAVENNA	SO	7161
19	CLUSONE	BG	8498
20	COSTA DI SERINA	BG	4753
21	CUNARDO	VA	2887
22	DERVIO	LC	2582
23	FERRERA DI VARESE	VA	705
24	FINO DEL MONTE	BG	1141
25	FONTENO	BG	566
26	FOPPOLO	BG	167
27	GANDELLINO	BG	961
28	GEROLA ALTA	SO	161
29	GHEDI	BS	18496
30	GORDONA	SO	1925
31	GROMO	BG	1133
32	GROSIO	SO	4356
33	IDRO	BS	1865
34	ISOLA DI FONDRA	BG	171
35	LAVENONE	BS	487
36	LENNA	BG	553
37	LIVIGNO	SO	6904
38	LODRINO	BS	1624
39	LOVERO	SO	625
40	MACCAGNO CON PINO E VEDDASCA	VA	2390
41	MAZZO DI VALTELLINA	SO	1024
42	MESE	SO	1798

Serie Ordinaria n. 26 - Mercoledì 28 giugno 2023

ELENCO DEI COMUNI LOMBARDI CLASSIFICATI IN AREA PRIORITARIA			
	COMUNE	PROV	ABITANTI
43	MEZZOLDO	BG	164
44	MOIO DE' CALVI	BG	195
45	MONTIRONE	BS	5067
46	ODOLO	BS	1917
47	OLIVETO LARIO	LC	1193
48	OLMO AL BREMBO	BG	486
49	OLTRESSENDA ALTA	BG	144
50	ONORE	BG	919
51	PIARIO	BG	1007
52	PIAZZA BREMBANA	BG	1193
53	PIAZZATORRE	BG	389
54	PIAZZOLO	BG	87
55	PIURO	SO	1873
56	PONTE DI LEGNO	BS	1761
57	PONTE IN VALTELLINA	SO	2250
58	PONTE NOSSA	BG	1716
59	PREMANA	LC	2174
60	PREMOLO	BG	1058
61	RIVA DI SOLTÒ	BG	881
62	SABBIO CHIESE	BS	3915
63	SALTRIO	VA	2983
64	SAMOLACO	SO	2860
65	SAN GIACOMO FILIPPO	SO	369
66	SELVINO	BG	1990
67	SERNIO	SO	476
68	SOLTO COLLINA	BG	1777
69	SONGAVAZZO	BG	696
70	SPRIANA	SO	79
71	TEMU'	BS	1105
72	TORRE DI SANTA MARIA	SO	2388
73	TOVO DI SANT'AGATA	SO	626
74	VALBONDIONE	BG	972
75	VALDIDENTRO	SO	4129
76	VALDISOTTO	SO	3595
77	VALFURVA	SO	2508
78	VALGOGLIO	BG	586
79	VALLIO TERME	BS	1408
80	VALNEGRA	BG	215
81	VALVESTINO	BS	173
82	VANZAGHELLO	MI	5246
83	VARENNA	LC	723
84	VERVIO	SO	202
85	VESTONE	BS	4174
86	VEZZA D'OGGIO	BS	1474

ELENCO DEI COMUNI LOMBARDI CLASSIFICATI IN AREA PRIORITARIA			
	COMUNE	PROV	ABITANTI
87	VILLA DI CHIAVENNA	SO	6612
88	VILLA D'OGNA	BG	968
89	VIONE	BS	622
90	VOBARNO	BS	8259