

# **IL MONITORAGGIO DEL GAS RADON NEL LAZIO**

**2013**

## IL MONITORAGGIO DEL GAS RADON NEL LAZIO

### Rapporto a cura di:

ARPA Lazio, Servizio tecnico  
Alessandro Domenico Di Giosa

ISPRA

Giancarlo Torri,  
Anna Maria Sotgiu,  
Francesco Salvi,  
Valeria Innocenzi,  
Patrizia Leone

### RIASSUNTO

Il report illustra i risultati delle campagne di monitoraggio del radon svolte nella regione Lazio dall'ISPRA e dall'ARPA Lazio nel periodo 2003-2011. Le indagini svolte nascono dall'esigenza di raccogliere un insieme di dati e di metodologie finalizzati alla classificazione nel territorio della regione Lazio delle zone ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon, nel rispetto della normativa.

Sono stati raccolti dati su circa 4.600 abitazioni campionate casualmente nel territorio con le stesse metodologie di base e impiegati circa 700 volontari per un controllo totale di circa 5300 abitazioni. Per la misura della concentrazione di radon sono stati utilizzati circa 25000 rilevatori di tracce nucleari a stato solido.

I dati raccolti hanno consentito di elaborare delle cartografie riguardanti le zone con probabilità di elevate concentrazioni di radon. I criteri adottati per le elaborazioni cartografiche sono stati scelti in modo arbitrario, in assenza di parametri definiti dalla normativa, tenendo in considerazione le esperienze acquisite in campo internazionale e nazionale.

**Parole chiave:** radon, monitoraggio

### Contatti autori:

alessandro.digiosa@arpalazio.it  
francesco.salvi@isprambiente.it  
giancarlo.torri@isprambiente.it

© ARPA Lazio – Rieti 2013

Riproduzione autorizzata citando la fonte

**Coordinamento editoriale:** ARPA Lazio – Divisione polo didattico

### Foto di copertina

Mappe della probabilità stimata di superare il livello di riferimento di 300 Bq m<sup>-3</sup>

Tutte le fotografie pubblicate, laddove non diversamente riportato, sono dell'Archivio fotografico dell'ARPA Lazio

# INDICE

LEGENDA.....	Pag.	4
INTRODUZIONE.....	"	5
1. GENERALITÀ SUL RADON.....	"	7
1.1. CARATTERISTICHE DEL RADON .....	"	7
1.2. SORGENTI E MECCANISMI DI INGRESSO DEL RADON INDOOR .....	"	7
1.3. IL RADON E LA GEOLOGIA .....	"	8
1.4. IL QUADRO NORMATIVO .....	"	8
1.4.1. I valori di riferimento.....	"	9
1.5. ASPETTI SANITARI .....	"	10
2. LE CAMPAGNE DI MONITORAGGIO NELLA REGIONE LAZIO .....	"	13
2.1. CAMPIONAMENTO DELLE ABITAZIONI .....	"	13
2.2. CAMPIONAMENTO ANAGRAFICO .....	"	14
2.3. CAMPIONAMENTO GEOGRAFICO .....	"	15
2.4. RECLUTAMENTO DELLE FAMIGLIE .....	"	16
2.5. DISTRIBUZIONE E RITIRO DEI RILEVATORI RADON .....	"	17
3. MATERIALI E METODI DI MISURA.....	"	19
3.1. OBIETTIVI E REQUISITI DELLA MISURA .....	"	19
3.2. IL METODO DELLA MISURA.....	"	19
3.3. CARATTERIZZAZIONE E TARATURA DEI RILEVATORI.....	"	20
3.4. CONTROLLI DI QUALITÀ.....	"	20
4. RISULTATI DELLE CAMPAGNE DI MONITORAGGIO .....	"	21
4.1. STATISTICHE DESCRITTIVE.....	"	21
4.2. METODOLOGIE PER LA CLASSIFICAZIONE DELLE ZONE A MAGGIORE PROBABILITÀ DI ALTE CONCENTRAZIONI DI RADON .....	"	23
4.2.1. Metodologia statistica.....	"	24
4.2.2. Metodologia geostatistica .....	"	25
CONCLUSIONI.....	"	27
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	"	29
RINGRAZIAMENTI .....	"	33
INDICE DELLE FIGURE.....	"	35
INDICE DELLE TABELLE.....	"	37
ELENCO ALLEGATI .....	"	39
APPENDICE A .....	"	40

---

**LEGENDA**

<b>ANPA</b>	Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (dal 6 ottobre 2002 confluita nell'APAT)
<b>APAT</b>	Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (dal 6 agosto 2008 confluita nell'ISPRA)
<b>ARPA</b>	Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente
<b>CRI</b>	Croce Rossa Italiana
<b>GIS</b>	Geographic Information System
<b>GM</b>	Media Geometrica
<b>GSD</b>	Deviazione Standard Geometrica
<b>IARC</b>	International Agency for Research on Cancer
<b>ICRP</b>	International Commission for Radiological Protection
<b>INMRI</b>	Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti
<b>ISPRA</b>	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
<b>ISS</b>	Istituto Superiore di Sanità
<b>LR</b>	Livello di Riferimento
<b>M</b>	Molarità
<b>MATM</b>	Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare
<b>NIH</b>	National Institutes of Health
<b>NIRS</b>	National Institute of Radiological Sciences
<b>P</b>	Pressione
<b>SIT</b>	Sistema Informativo Territoriale
<b>SSNTD'S</b>	Solid State Nuclear Track Detectors
<b>UNSCEAR</b>	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
<b>V</b>	Volume
<b>WHO</b>	World Health Organization

# INTRODUZIONE

Nel panorama della protezione dell'ambiente, l'individuazione e la conoscenza delle potenziali fonti di inquinamento rappresentano un passaggio necessario per l'impostazione di corrette e adeguate politiche di prevenzione e di risanamento. Spesso le fonti di pressione ambientale sono attribuite alle attività umane ma, in alcuni casi, hanno un'origine naturale.

La radioattività è un fenomeno di origine sia naturale che artificiale, costantemente presente nell'ambiente in cui viviamo. È noto che, in assenza di incidenti in impianti nucleari, il maggior contributo alla dose totale ricevuta dalla popolazione deriva dalla radioattività naturale (UNSCEAR, 2008), di cui la maggior parte è causata dall'esposizione al radon. Questo gas naturale, prodotto dal decadimento radioattivo di elementi presenti nel nostro pianeta fin dalla sua origine, si disperde rapidamente nell'ambiente esterno, mentre nei luoghi chiusi, come abitazioni, case, scuole e ambienti di lavoro, si accumula raggiungendo, in alcuni casi, concentrazioni particolarmente elevate, fonti di rischio non trascurabile per la salute.

L'esposizione della popolazione al radon presente nell'aria rappresenta il principale fattore di rischio di tumore polmonare, dopo il fumo da sigaretta. L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC), dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO-OMS), ha classificato il radon tra i cancerogeni accertati del Gruppo 1, di cui fanno parte 113 agenti, dei 970 presi in esame fino ad oggi, per i quali vi è evidenza di cancerogenicità<sup>1</sup>. La percentuale di tumori polmonari attribuibili alla esposizione al radon rispetto al totale dei tumori varia in funzione della concentrazione e del tempo di esposizione (BEIR VI, 1999; Samet et al., 1990; WHO, 2001; EPA, 2003). Recenti stime attribuiscono al radon un rischio in eccesso pari a circa il 16% per 100 Bq m<sup>-3</sup> (Darby, et al. 2005).

Il Consiglio dell'Unione Europea ha in corso di approvazione una direttiva (CE, 2012) nella quale è indicato, per le abitazioni, un livello di riferimento di concentrazione media annuale di radon indoor non superiore a 300 Bq m<sup>-3</sup>.

I luoghi di lavoro sono, invece, soggetti al D. Lgs. n. 230/95 e s.m.i., che recepisce la direttiva 96/29/Euratom. Il decreto fissa alcuni criteri per le modalità di misura, attribuisce specifici compiti a determinate amministrazioni e stabilisce distinti "livelli di azione" per la concentrazione media annuale di radon in aria pari a 500 Bq m<sup>-3</sup> (300 Bq m<sup>-3</sup> proposti nella nuova direttiva) e per la dose efficace pari a 3 mSv y<sup>-1</sup>.

Il decreto segnala come ambienti di lavoro oggetto di controllo obbligatorio per il radon tutti i luoghi sotterranei, in particolar modo tunnel, sottovie, catacombe, grotte e terme. Le Regioni e le Province autonome devono individuare "le zone o i luoghi di lavoro con caratteristiche determinate ad elevate probabilità di alte concentrazioni di attività di radon", ove l'obbligo delle misure si estende anche ai locali non sotterranei, con priorità per i locali seminterrati e al piano terra. Il decreto stabilisce che le Regioni e le Province autonome devono provvedere ad una prima individuazione delle zone ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon entro il 31 agosto 2005. I criteri e le linee guida dell'attività di caratterizzazione del territorio, che viene tecnicamente definita "mappatura radon", devono essere emanati da una Sezione Speciale della Commissione Tecnica per le esposizioni a sorgenti naturali di radiazioni che a tutt'oggi non si è ancora insediata, comportando quindi una diffusa incertezza sul modo di operare e sui criteri da adottare.

Diverse regioni hanno svolto azioni al fine di individuare delle aree a maggior probabilità di alte concentrazioni. In generale, le indagini preliminari per le mappature a livello nazionale / regionale si basano su misure di concentrazione di radon annuali, in abitazioni e in luoghi di lavoro diffusi sul territorio, dalle quali, applicando determinati algoritmi di calcolo e opportuni criteri, è possibile ricavare una classificazione delle zone. Si ritiene, inoltre, che una mappatura effettuata prendendo in

<sup>1</sup> <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>

esame edifici di tipo residenziale sia da considerarsi valida anche per gli edifici destinati ad attività lavorative (ICRP, 1993). Ove sussistano dubbi circa l'equivalenza tra abitazioni e talune tipologie di luoghi di lavoro, per quel che riguarda la presenza di radon, andrebbero effettuate indagini ad hoc su tali luoghi di lavoro.

Tra il 2003 e il 2007, l'ISPRA (allora APAT, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici) ha realizzato un progetto finanziato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATM), nell'ambito della Legge 93/2001 "Disposizioni in campo ambientale", dal titolo "Qualificazione delle metodologie per la misura delle concentrazioni di radon e per l'individuazione delle zone a maggiore probabilità di alte concentrazioni di radon". Questo progetto ha previsto l'esecuzione di un'indagine pilota sul territorio delle province di Roma e Viterbo, al fine di acquisire esperienza nella programmazione e nell'esecuzione di indagini volte ad individuare le aree ad elevata probabilità di alte concentrazioni di radon. Le misure sono state condotte con la collaborazione della Regione Lazio e dei comuni e delle province interessate, per un periodo di un anno, suddiviso in due semestri di misura, in circa 2.200 abitazioni dislocate in tutti i comuni nell'area in esame.

Successivamente, la Regione Lazio, tenuto conto dell'indagine precedente, ha incaricato l'ARPA Lazio (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Lazio) di effettuare le analoghe indagini nelle province di Frosinone, Latina e Rieti per garantire la copertura dell'intera regione e una procedura di misurazione omogenea. Nel 2008, l'ARPA Lazio ha quindi stipulato con l'ISPRA una Convenzione "per il completamento delle indagini volte alla individuazione delle zone a maggiore probabilità di alte concentrazioni di attività di radon nella regione Lazio".

La Convenzione ha portato all'esecuzione della misura della concentrazione di radon in circa 3.000 abitazioni dislocate nelle tre province laziali per un periodo di un anno, suddiviso in due periodi sostanzialmente con lo stesso modus operandi dell'indagine precedente relativa alle province di Roma e Viterbo. Parallelamente sono state raccolte, per il tramite di un questionario, informazioni sulla struttura degli edifici e sulle abitudini di vita degli occupanti, utili all'analisi e alla valutazione del fenomeno. Gli Enti pubblici partecipanti al progetto sono stati l'ARPA Lazio, l'ISPRA e le 197 amministrazioni comunali ricadenti nell'area in esame. Un importante contributo alla distribuzione, al ritiro dei rilevatori per la misura della concentrazione di radon presso le famiglie aderenti all'indagine e al riempimento del questionario è stato inoltre apportato dalla Croce Rossa Italiana (CRI).

Come parametro di riferimento, utile alla classificazione del territorio, è stata scelta la percentuale di edifici che, in una definita porzione del territorio, supera un determinato livello di concentrazione di radon. Tenuto conto della natura del fenomeno è stata costituita una base di dati per la verifica dell'eventuale correlazione tra radon indoor e geologia del territorio.

Le due indagini svolte tra il 2003 ed il 2012 hanno consentito di informare tutte le 378 amministrazioni comunali della regione Lazio e circa 24.000 famiglie, coinvolte a vario titolo, sul problema dell'esposizione al radon.

Non essendo stati emanati criteri, direttive, linee guida o normative in genere su come classificare le aree in termini di probabilità di alte concentrazioni di radon, le elaborazioni cartografiche (mappe radon) fornite in questo rapporto sono solamente indicative e non rappresentano quindi le aree nelle quali sono obbligatorie le misure in nei luoghi di lavoro ai sensi del D.Lgs. n.230 e s.m.i. Tuttavia il corpo dei dati prodotto è tale che, qualora siano esplicitati i criteri con i quali caratterizzare il territorio, si ritiene che possa essere ampiamente sufficiente ai fini della classificazione delle aree.

Deve infine essere evidenziato che la classificazione per zone territoriali è un'attività dinamica che può modificarsi in ragione di misure aggiuntive, di raffinamento dei dati esistenti, di acquisizione o di miglioramento di strumenti di calcolo e di analisi dei dati. Pertanto i risultati riportati nel presente documento sono una fotografia relativa allo stato di fatto attuale.

Nella direttiva proposta dal Consiglio dell'Unione Europea è previsto che gli stati membri si dotino di un piano nazionale di azione al fine di gestire il rischio derivante dall'esposizione al radon. Il Ministero della Salute ha promosso l'avvio di un Piano Nazionale radon nell'ambito del quale sono state considerate anche le attività di mappatura del territorio.

# 1. GENERALITÀ SUL RADON

## 1.1. Caratteristiche del radon

Il radon è un gas nobile radioattivo, di numero atomico pari a 86, chimicamente ed elettricamente neutro. Risulta incolore, insapore e inodore e, quindi, non è avvertito dai sensi. Presenta una densità pari a 7,5 volte quella dell'aria atmosferica ed è solubile in acqua.

In natura è presente in tre isotopi,  $^{222}\text{Rn}$  (radon),  $^{220}\text{Rn}$  (toron) e  $^{219}\text{Rn}$  (actinon), prodotti durante il decadimento delle serie radioattive rispettivamente dell' $^{238}\text{U}$  del  $^{232}\text{Th}$  e dell' $^{235}\text{U}$ .

L'emivita dell'isotopo  $^{222}\text{Rn}$  è maggiore rispetto a quella del  $^{220}\text{Rn}$  e del  $^{219}\text{Rn}$ . Questo ne determina una mobilità di gran lunga superiore e, di conseguenza, consente il raggiungimento di distanze relativamente elevate rispetto al luogo di formazione. Generalmente, la concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  è la più rilevante tra gli isotopi. Tuttavia, in alcuni casi, il contenuto di  $^{232}\text{Th}$  nel suolo e nei materiali da costruzione può comportare un contributo non trascurabile di  $^{220}\text{Rn}$ .

In questo rapporto, l'attenzione sarà focalizzata sul  $^{222}\text{Rn}$  e, da qui in avanti, con il nome generico di radon si intenderà l'isotopo 222.

Il  $^{222}\text{Rn}$  a sua volta decade, emettendo particelle  $\alpha$ , e genera una catena di nuclei instabili, chiamati "prodotti di decadimento del radon", fino ad arrivare al nucleo stabile del  $^{206}\text{Pb}$ .

I prodotti di decadimento del  $^{222}\text{Rn}$  sono chimicamente attivi e costituiscono atomi di sostanze solide pesanti. I primi quattro,  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ , hanno tempi di dimezzamento brevi (pochi minuti o frazioni di secondo) e decadono emettendo particelle  $\alpha$  e  $\beta$ . In particolare, il  $^{218}\text{Po}$  e il  $^{214}\text{Po}$  sono  $\alpha$  emettitori e sono responsabili del maggior contributo alla dose. Essi sono comunemente chiamati "prodotti di decadimento a tempo di dimezzamento breve".

I prodotti di decadimento successivi ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) hanno tempi di dimezzamento più lunghi.

## 1.2. Sorgenti e meccanismi di ingresso del radon indoor

La principale fonte della presenza di radon negli ambienti confinati (indoor) è costituita dal suolo soprattutto nei casi di concentrazioni molto elevate (molte centinaia di  $\text{Bq m}^{-3}$  o più). Tuttavia, in diversi Paesi tra cui l'Italia, alcuni materiali da costruzione di origine naturale si sono rivelati importanti sorgenti di radon. Anche l'acqua, se proviene da sorgenti profonde in terreni ricchi di radio, può rappresentare una sorgente rilevante. Secondo un rapporto dell'UNSCEAR (UNSCEAR, 2000), il contributo di radon indoor emesso dal suolo può essere stimato tra il 40 e il 70%, mentre quello da materiali edili è valutato tra il 15 e il 20%.

Il radon entra negli edifici attraverso vie di comunicazione presenti nella struttura (fessurazioni, giunzioni del pavimento, pareti, condotte, tubazioni, passaggi dei servizi, ecc.). La principale causa dell'ingresso del radon è la differenza di pressione tra interno ed esterno dell'edificio. Tale differenza di pressione è dovuta a due principali fenomeni (Nazaroff e Nero, 1988):

- "Effetto camino", dovuto alla maggiore temperatura interna di un edificio, in particolare di notte e ancora di più nelle stagioni fredde;
- "Effetto vento" dovuto alla differenza di velocità dell'aria tra esterno ed interno dell'edificio.

A causa dei numerosi parametri che contribuiscono all'emanazione, migrazione ed accumulo di radon, la sua concentrazione presenta una grande variabilità sia in termini spaziali (due abitazioni molto vicine e simili tra loro possono avere concentrazioni di radon molto diverse), che temporali (tra le ore diurne e notturne, durante i cicli meteorologici, da una stagione all'altra, ecc.) (Globe e Socolow, 1990).

Le fluttuazioni dovute alle condizioni climatiche impongono, per non sottostimare o sovrastimare il rischio associato all'esposizione, che le misure della concentrazione di radon siano riferibili alla media annuale.

### 1.3. Il radon e la geologia

È noto che l'emissione di radon è influenzata dalla geologia (Oliver e Khayrat, 2001; Gundersen *et al.*, 1988; Schumann e Owen, 1988) e che l'esalazione di radon di una certa area è il risultato della combinazione delle proprietà delle rocce e dei suoli. Il contenuto di uranio e radio presente in quest'ultimi è il principale responsabile della presenza del radon. Le diverse modalità di formazione delle rocce e dei suoli producono concentrazioni variabili di questi elementi. Le rocce che affiorano sulla superficie terrestre sono raggruppate in tre principali tipologie: sedimentarie, metamorfiche e magmatiche.

Le rocce sedimentarie sono quelle che più diffusamente affiorano in superficie e sono prevalentemente formate da materiale eroso dalla superficie terrestre, trasportato in diversi modi (fiumi, vento, forza di gravità, ecc.) e accumulato in ambiente subaereo (depositi continentali) o sul fondo di bacini marini (depositi marini) o lacustri. Durante il processo di diagenesi (compattazione e litificazione), i sedimenti sciolti si trasformano in roccia. In queste rocce la distribuzione di uranio e radio è influenzata essenzialmente dalla natura della roccia madre; più in generale oltre all'origine primaria (cioè al contenuto di radionuclidi genitori nelle rocce di origine) l'arricchimento / impoverimento di U, Th nelle rocce può essere legato anche a processi secondari quali l'interazione acqua-roccia, a loro volta legati alle condizioni chimico fisiche (es. pH, potenziale redox).

Le rocce metamorfiche si formano per variazioni di temperatura e pressione da preesistenti rocce di qualsiasi tipo che rimangono solide durante tutti i processi di modificazione. In queste rocce la presenza di uranio e radio è, in generale, dipendente dal contenuto delle rocce originarie e dall'interazione acqua – roccia che ne può modificare il tenore originario.

Le rocce magmatiche, infine, sono quelle che si formano dal consolidamento di un magma. Se il magma viene emesso in superficie attraverso un apparato vulcanico, la roccia che si forma per raffreddamento viene detta "vulcanica effusiva". Se una massa di magma non raggiunge la superficie terrestre e si raffredda all'interno della crosta terrestre, allora la roccia che si forma viene chiamata "intrusiva" (es. graniti e granitoidi). La tendenza dell'uranio a concentrarsi nei magmi ricchi in silice, da cui si formano le rocce intrusive, ne determina la distribuzione in queste ultime. Nei tufi la concentrazione varia a seconda del chimismo; in particolare, i tufi dell'area laziale sono ricchi in uranio.

La concentrazione di uranio e radio, dunque, può variare anche all'interno dello stesso tipo di materiale, poiché determinata da numerosi fattori. Essa, però, non è la sola causa della concentrazione di radon presente nel suolo, la quale dipende anche dalla possibilità del gas di essere espulso dal reticolo cristallino dei minerali che lo contengono.

L'emanazione (cioè la capacità di "uscire fuori" dalla roccia) e la migrazione del radon verso la superficie sono fortemente dipendenti dalle dimensioni dei granuli, per le rocce sedimentarie, e dal grado di fratturazione, per le rocce "litoidi". Un elevato grado di fratturazione, aumenterà il potere di emanazione dalla roccia e la velocità di migrazione attraverso la stessa. Per questo motivo le zone di faglia e/o le aree idrotermali costituiscono vie preferenziali di migrazione del radon, a causa della elevata permeabilità indotta dallo stato di fratturazione e della presenza di gas endogeni (essenzialmente CO<sub>2</sub>, nella realtà italiana) o acque di origine profonda che risalgono velocemente in superficie e che agiscono come trasportatori, "carrier" del radon.

Pertanto la concentrazione di radon nel suolo è molto variabile, a causa della grande varietà dei parametri che possono determinarla. Oltre al tipo di roccia, vanno considerati parametri quali quelli legati ai cambiamenti meteo-climatiche stagionali e giornaliere che, influenzando la pressione atmosferica, la temperatura, l'umidità e altre condizioni, condizionano a loro volta la diffusione del radon dal suolo verso la superficie.

Il territorio italiano, complesso e recente dal punto di vista geologico, necessita di un'analisi che coinvolga un elevato numero di parametri geologici, complicando ulteriormente sia la comprensione della dinamica del radon nel sottosuolo sia la relazione tra la distribuzione del gas e le caratteristiche geologiche (ANPA, 2000).

### 1.4. Il quadro normativo

Gli aspetti normativi in materia di radon hanno come obiettivo finale la "riduzione del rischio" ad un livello che può essere considerato "accettabile". Tali provvedimenti vanno dall'emanazione di vere e proprie leggi, con valore di riferimento e sanzioni, a raccomandazioni con valori suggeriti. Il quadro normativo può essere sintetizzato nella tabella seguente.



	NORMATIVA		
	COMUNITARIA	ITALIANA	REGIONE LAZIO
AMBIENTI DI LAVORO	Direttive EURATOM 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3	D. Lgs. 230/1995 "Attuazione delle direttive EURATOM 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti"	L.R. 31 Marzo 2005, n. 14- Prevenzione e salvaguardia dal rischio gas radon (Bollettino Ufficiale della Regione Lazio del 9 aprile 2005, n. 10)
	Direttiva 96/29/EURATOM del 13.5.96	D. Lgs. n.241 del 26.5.2000 "Attuazione della direttiva 96/29/EURATOM del 13.5.96 in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti"	
	Proposta di direttiva del Consiglio UE n. 17623/1/12 del 20/12/2012 di individuazione degli standard di protezione contro l'esposizione alle radiazioni ionizzanti		
AMBIENTI RESIDENZIALI	Raccomandazione Commissione Europea 90/143/EURATOM	---	
	Proposta di direttiva del Consiglio UE del 20/12/2012 di individuazione degli standard di protezione contro l'esposizione alle radiazioni ionizzanti		

Tab. 1: Normativa in materia di radon

#### 1.4.1. I valori di riferimento

I valori di riferimento, individuati in termini di concentrazione di attività di radon media in un anno, sono riportati nella tabella seguente. Si segnala che attualmente non è stato stabilito dalla normativa nazionale e regionale un valore di riferimento per gli ambienti residenziali.

	VALORI DI RIFERIMENTO	
	Valore [Bq/mc]	Normativa / Comunità scientifica
<b>AMBIENTI DI LAVORO<sup>2</sup> (incluse le scuole)</b>	<b>500</b>	D. Lgs. 230/1995 s.m.i.
<b>AMBIENTI RESIDENZIALI</b>	<b>400</b> per gli edifici esistenti	Raccomandazione Commissione Europea 90/143/EURATOM
	<b>200</b> per gli edifici da costruire	
	<b>≤ 300</b>	Proposta di direttiva del Consiglio UE n. 17623/1/12 del 20/12/2012 di individuazione degli standard di protezione contro l'esposizione alle radiazioni ionizzanti
	<b>100 - 300</b>	(World Health Organization, 2009 Handbook on indoor radon: a public health perspective)
	<b>300</b>	International Commission for Radiological Protection, 2009

Tab. 2: Valori di riferimento della concentrazione di attività di radon media in un anno

2 Il D.Lgs. 230/1995 s.m.i. individua come ambienti di lavoro soggetti a controlli per il radon tutti i luoghi sotterranei ed esplicitamente tunnel, sottovie, catacombe, grotte e terme, e incarica le Regioni e le Province autonome di effettuare una prima individuazione delle zone o delle tipologie dei luoghi di lavoro in superficie, con precise caratteristiche, ad elevate probabilità di alte concentrazioni di attività di radon (art.10 sexies). Un primo elenco delle zone doveva essere individuato entro il 31 agosto 2005, mentre la normativa non riporta la data di scadenze per l'individuazione delle tipologie dei luoghi di lavoro.

## 1.5. Aspetti sanitari

Il principale effetto dell'esposizione al radon è un aumento di rischio di tumore polmonare proporzionale alla concentrazione e al tempo di esposizione.

Una delle metodologie per la valutazione del rischio associato alla esposizione al radon è lo "studio epidemiologico" che può essere di tipo "descrittivo", basato su statistiche numeriche, temporali o geografiche, di tipo "sperimentale", basato sulla rimozione del probabile fattore causale nel determinismo di una malattia, di tipo "analitico", basato su ricerche sistemiche delle correlazioni tra lo stato di salute e la presenza di un agente responsabile (Checcacci *et al.*, 1993).

Nell'analisi delle conseguenze all'esposizione di radiazioni ionizzanti si è seguito, in modo preponderante, l'indirizzo dell'epidemiologia analitica. L'impostazione dottrinarie della radioprotezione è basata sulle conclusioni emerse da tali studi che ricercano correlazioni quantitative tra esposizioni a radiazioni e incidenza o mortalità oncogena.

Tra i principali organismi, che operano a livello mondiale in tal senso, figurano:

- International Commission on Radiological Protection, ICRP.
- World Health Organization, WHO.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR (USA).
- National Institutes of Health, NIH (USA).
- Biological Effects of Ionizing Radiation, BEIR (USA).

L'Istituto Superiore di Sanità (ISS) ha stimato che, dei circa 31 000 casi di tumore ai polmoni che si registrano in Italia ogni anno, il 10% circa è attribuibile al radon. Questo dato comprende per la gran parte fumatori, a causa della sinergia tra radon e fumo. In particolare, l'ISS ha stimato che i casi di tumore polmonare dovuti al radon siano tra i 1.000 e i 5.500. Inoltre, lo studio epidemiologico italiano condotto nel Lazio ha evidenziato una possibile correlazione tra radon e dieta: l'aumento di rischio prodotto dal radon risulta maggiore nei soggetti con dieta povera di alimenti antiossidanti (Bochicchio *et al.*, 2005(1)).

I risultati degli studi epidemiologici spingono a ritenere che il rischio cresce linearmente con l'esposizione. Vi è un assenso generale nell'assumere che non esista un valore soglia di esposizione al di sotto del quale il rischio è nullo. La probabilità di fenomeni oncogeni, infatti, non dipende dal numero di radiazioni che colpiscono una singola cellula epiteliale, ma dal numero totale di interazioni tra cellule e radiazioni, che è proporzionale all'esposizione (ICRU, 1980; BEIR VI, 1999).

Inoltre, a parità di esposizione totale, si assume l'ipotesi che la situazione di maggiore rischio si presenti per esposizioni a bassi livelli di concentrazione per tempi prolungati piuttosto che per picchi di concentrazione in tempi ridotti (ICRU, 1980).

Esistono studi su altri possibili effetti sanitari. Tuttavia, in base alle attuali conoscenze, non sono emerse correlazioni significative (ICRU, 1980; BEIR VI, 1999).

In realtà, il maggior rischio per la salute umana non è rappresentato tanto dal radon quanto dai suoi prodotti di decadimento, in particolare quelli a vita breve. Ciò noto, l'uso della terminologia "rischio radon" viene adoperato essenzialmente per semplicità. Infatti il radon, oltre ad essere chimicamente stabile, ha un tempo di dimezzamento pari a 3,82 giorni. Pertanto, la frazione maggioritaria inalata di questo gas viene espulsa, contribuendo in misura meno rilevante ai danni dell'apparato respiratorio. I prodotti di decadimento del radon sono invece chimicamente reattivi e hanno un tempo di dimezzamento breve. Una volta generati, rimangono in parte liberi o associati in *cluster*, cioè agglomerati di particelle con diametro inferiore a 1nm (frazione non attaccata o libera), e in parte si associano al particolato atmosferico (frazione attaccata), depositandosi sulle superfici (effetto *plate-out*) o rimanendo sospesi in aria. I prodotti di decadimento che rimangono sospesi in aria (frazione non attaccata e frazione attaccata non depositata) possono essere inalati. Peraltro, i sistemi di filtraggio interni dell'apparato respiratorio non sono in grado di bloccare le particelle più piccole che quindi si fissan sui tessuti più interni. I prodotti di decadimento, a loro volta, continuano a decadere emettendo radiazioni e, tra questi, i radionuclidi emettitori  $\alpha$  a vita breve,  $^{218}\text{Po}$  e  $^{214}\text{Po}$  forniscono il maggior contributo alla dose assorbita dai bronchi e dai polmoni, provocando danni che, in alcuni casi, possono modificare la struttura cellulare e innescare un processo cancerogeno.

---

La misura dei prodotti di decadimento del radon risulta di particolare difficoltà e di elevato costo, specie se deve essere rappresentativa di un arco temporale lungo, necessario per stime corrette del rischio, o se deve coprire rilevamenti su un grande numero di soggetti (indagini su migliaia di edifici). La misura della concentrazione di radon gas è molto più semplice ed economica e, fortunatamente, è possibile quantificare il rapporto tra la presenza dei prodotti di decadimento e la concentrazione di radon gas.



## 2 LE CAMPAGNE DI MONITORAGGIO NELLA REGIONE LAZIO

Le attività della campagna di monitoraggio del radon indoor nella regione Lazio sono state svolte nell'ambito di due programmi portati a termine tra il 2003 e il 2011. Nel periodo 2003-2007, l'ISPRA ha realizzato il progetto, finanziato dal Ministero dell'ambiente, dal titolo "Qualificazione delle metodologie per la misura delle concentrazioni di radon e per l'individuazione delle zone a maggiore probabilità di alte concentrazioni di radon", nell'ambito della legge 93/2001 che ha imposto l'esecuzione di un'indagine pilota sul territorio delle province di Roma e Viterbo. Successivamente, dall'esigenza della Regione Lazio di ottemperare al D.L.vo 241/00, è stata stipulata, nel 2008, tra l'ISPRA e l'ARPA Lazio la "Convenzione per il completamento delle indagini volte alla individuazione delle zone a maggiore probabilità di alte concentrazioni di attività di radon nella regione Lazio", al fine di estendere la campagna di monitoraggio alle restanti province di Frosinone, Latina e Rieti. Di fatto, la metodica eseguita nella seconda indagine è stata ripresa in toto dalla precedente, seppur con alcune differenze dovute all'esperienza maturata con l'indagine su Roma e Viterbo. Gli obiettivi primari delle indagini sono stati la stima della concentrazione di attività di radon indoor nelle abitazioni della regione Lazio e lo sviluppo di metodologie di classificazione del territorio in zone a maggiore probabilità di alte concentrazioni di radon.

### 2.1. Campionamento delle abitazioni

Al fine del raggiungimento degli obiettivi dell'indagine ed in particolare della classificazione delle aree a diversa probabilità di alte concentrazioni di radon, è stato necessario procedere all'acquisizione di un campione di abitazioni, in cui effettuare le misure, secondo criteri che rispettassero i requisiti dell'indagine. Pertanto è stata sviluppata una strategia di campionamento basata sulla sovrapposizione di due diverse tecniche: il "Campionamento Anagrafico" e il "Campionamento Geografico".

La necessità di sovrapporre le due tecniche di campionamento nasce dall'esigenza di acquisire un campione rappresentativo sia della popolazione/edificio che del territorio, conferendo un adeguato peso ai centri abitati più densamente popolati, senza trascurare i territori meno densamente popolati.

Nella definizione della strategia di campionamento si è tenuto conto, oltre che degli obiettivi, delle seguenti ulteriori condizioni:

- le risorse disponibili, sia in relazione al grande numero di misure da effettuare sia per i contatti con i Comuni per la gestione della distribuzione dei rilevatori e con le famiglie, per la compilazione del questionario relativo alle caratteristiche dell'abitazione;
- l'opportunità che i dati acquisiti siano ugualmente rappresentativi di diverse unità territoriali, dei limiti amministrativi dei comuni, delle aree geologicamente affini, relativamente all'esalazione di radon.

Il campione anagrafico è rappresentato da un insieme di famiglie selezionate dalle anagrafi comunali, la cui numerosità, vincolata alle risorse disponibili, è calcolabile con un semplice algoritmo basato sul numero di famiglie residenti all'interno del singolo comune. Tale metodologia attribuisce un peso maggiore ai centri densamente popolati, generando zone fittamente campionate a discapito di altre, a volte, completamente vuote. Il campione geografico supplisce a questa eterogeneità spaziale con una selezione di abitazioni più uniformemente distribuita sul territorio. A questo scopo, è fondamentale conoscere la collocazione geografica delle abitazioni presenti sul territorio e dunque fornirsi di dati georeferenziati attraverso i quali selezionare, con opportuni criteri, le abitazioni da misurare.

Le due differenti metodologie sono basate su uno stesso schema logico di costruzione del campione (Fig. 1).



Fig. 1: Schema generale del campionamento

Ad ogni famiglia è associata un'abitazione. Partendo dall'insieme di tutte le abitazioni disponibili sul territorio (universo), viene dapprima definito un campione obiettivo costituito dalle abitazioni nelle quali si ritiene di effettuare la misura. Il numero delle abitazioni del campione obiettivo è stato stabilito, considerando un adeguato margine di copertura, su un valore superiore a quello ritenuto sufficiente per lo sviluppo e l'applicazione delle metodologie di classificazione del territorio.

Trattandosi di misure all'interno di abitazioni private si deve, inoltre, considerare una percentuale di rifiuti da parte delle famiglie ad aderire all'indagine. I rifiuti dipendono in particolare dalle capacità di comunicazione verso i cittadini nel presentare il problema radon e nella richiesta di partecipazione. Per questi motivi si costruisce un campione esteso superiore al campione obiettivo<sup>3</sup>.

Una volta definito il campione esteso vengono stabilite delle regole di adesione attraverso le quali si ottiene il consenso delle famiglie alla partecipazione e si giunge, quindi, al campione effettivo, ossia alle famiglie che effettivamente partecipano all'indagine o, in altri termini, alle quali sono consegnati i rilevatori. Al termine dell'indagine, a seguito di ulteriori defezioni, smarrimenti di rilevatori o altri imprevisti, si avrà un numero di misure inferiore a quello inizialmente avviato. Queste costituiscono il campione definitivo, quello per il quale si hanno dati validi. A questo va aggiunto un certo numero di famiglie che, a seguito della conoscenza dell'indagine, richiedono di partecipare volontariamente e alle quali è stata consentita tale opportunità indicandoli come "volontari".

## 2.2. Campionamento anagrafico

Il campionamento anagrafico (Fig. 2) mira alla generazione di un campione casuale all'interno dell'universo costituito dalle famiglie iscritte alle anagrafi comunali. Il campione anagrafico si ottiene tramite estrazione casuale dalle liste anagrafiche.

La dimensione del campione obiettivo varia a seconda del comune. La numerosità del campione obiettivo è stata calcolata per ogni comune in base ad un algoritmo dipendente principalmente dalla popolazione e dalle risorse disponibili (numero di misure, costi di gestione dell'indagine ecc.).

3 Nell'indagine nelle Province di Roma e Viterbo è stato scelto un campione esteso doppio rispetto al campione obiettivo; nell'indagine nelle province di Frosinone, Latina e Rieti è stato scelto un campione esteso triplo.



Fig. 2: Schema del campionamento anagrafico

Il numero delle famiglie residenti nel singolo comune è stato, quindi, elevato ad una potenza pari a 0.27, valore ottenuto tenendo conto del vincolo rappresentato dal numero massimo di rilevatori a disposizione. È stato fissato, inoltre, un numero minimo di famiglie per comune pari a 5. Va evidenziata la scelta fatta per il Comune di Roma Capitale nel quale, dato l'elevato numero di famiglie, sono state campionate 150 abitazioni senza tenere conto dell'algoritmo di elevazione a potenza del numero di famiglie residenti.

Calcolata in questo modo la dimensione del campione obiettivo, per ogni comune il campione esteso è rappresentato da un multiplo (doppio per l'indagine Roma e Viterbo, triplo per l'indagine Frosinone, Latina, Rieti) del campione obiettivo.

Al termine della fase di misura il campione definitivo è stato georeferenziato attraverso un processo di geocoding<sup>4</sup>.

### 2.3. Campionamento geografico

Il campionamento anagrafico, basato sull'estrazione casuale, produce un campione che per sua natura si addensa laddove vi sono centri abitati più densamente popolati. Ciò comporta una minore rappresentatività al territorio periferico generalmente meno densamente abitato.

Il campionamento geografico (Fig. 3) ha invece come obiettivo quello di ottenere un campione pressoché uniforme sul territorio.

Il metodo si basa sull'utilizzo di un reticolo composto da celle quadrate di 6 km di lato che rappresentano le unità elementari di territorio (definite celle C di riferimento). Il campionamento geografico pone delle ulteriori difficoltà rispetto al caso precedente. Non essendo disponibile un insieme totale dei dati di partenza georeferenziati (universo), da cui estrarre il campione obiettivo, è stata usata la base dati (georeferenziata) delle utenze telefoniche che rappresenta la miglior approssimazione disponibile al momento. Il risultato è un universo georeferenziato rappresentato da uno strato di informazione geografica vettoriale con geometria puntiforme in cui ad ogni punto sono associate una o, in alcuni casi, più abitazioni.

Attraverso successive elaborazioni è stata creata la relazione spaziale tra il reticolo delle celle C e i punti geografici delle abitazioni, allo scopo di associare ad ogni abitazione il codice identificativo

4 La georeferenziazione è il prerequisito per la rappresentazione dei dati su supporto cartografico. I processi di georeferenziazione (o geocodifica) consistono nell'attribuzione di una coppia di coordinate geografiche a ciascun punto d'interesse (indirizzo).



Fig. 3: Schema del campionamento anagrafico

della corrispondente cella C in cui essa si trova. Il prodotto finale è una base dati geografica in cui ogni record contiene il codice famiglia univoco, il nome della famiglia, l'indirizzo completo, il numero di telefono, le coordinate geografiche del punto corrispondente e l'identificativo di cella C a cui esso appartiene.

Il campione obiettivo è costituito da 9 abitazioni per ogni cella C, laddove possibile, in quanto potrebbero non essere presenti abitazioni in numero sufficiente. In realtà, come precedentemente accennato nella definizione del campione obiettivo, si ritiene che anche solo 5-6 dati per ogni cella possano essere adeguati a sviluppare ed applicare le metodologie di classificazione del territorio. Anche in questo caso, per tenere conto degli eventuali rifiuti, è stato estratto un campione esteso, selezionando casualmente dall'universo georeferenziato un numero di famiglie pari a 27 (nelle province di FR, LT, RI) o 18 (nelle province di RM e VT), laddove presenti, per ogni cella C.

## 2.4. Reclutamento delle famiglie

Per reclutamento del campione si intende una serie di attività il cui prodotto finale è la lista delle famiglie che hanno aderito all'indagine e alle quali viene recapitato il materiale per la misura della concentrazione di radon.

La necessità di eseguire misure all'interno delle abitazioni richiede necessariamente il consenso dei residenti e la loro adesione all'indagine. Affinché tale consenso sia ottenuto, occorre che le attività di questa fase siano preparate con cura, predisponendo le condizioni che ne facilitino la riuscita. È fondamentale che le famiglie siano prima di tutto informate sul problema e che ne percepiscano l'importanza senza esserne allarmate.

Tutte le famiglie del campione esteso (anagrafico e geografico) sono state avvisate dell'indagine inizialmente attraverso lettere del Sindaco del Comune di appartenenza, dell'ISPRA e della Regione Lazio (per le province di Roma e Viterbo), e dell'ISPRA e dell'ARPA Lazio (per le province di Frosinone, Latina e Rieti) corredate da un depliant informativo sul radon.

La collaborazione tra l'ISPRA, la Regione Lazio, l'ARPA Lazio e i Comuni ha conferito ai vari contatti il dovuto carattere istituzionale. Si è ritenuto che la partecipazione dei Comuni consentisse, attraverso un contatto diretto con i cittadini, una maggiore percentuale di adesioni.

L'adesione all'indagine è stata richiesta telefonicamente per mezzo di una ditta di call-center.

Per quanto riguarda l'adesione del campione effettivo anagrafico, il call-center per ogni comune ha seguito la seguente regola: interruzione della richiesta di adesione al momento del raggiungimento del campione obiettivo o all'esaurimento del campione esteso.

Per quanto riguarda l'adesione del campione effettivo geografico, il call-center per ogni comune



ha seguito la seguente regola: le famiglie del campione esteso che ricadono all'interno della stessa cella sono state contattate fino al raggiungimento dei 9 punti di campionamento (o il numero obiettivo ridotto in caso di celle di confine) dopo di che le telefonate sono state interrotte passando alla cella successiva.

A seguito del processo di reclutamento si è ottenuto il campione effettivo.

Alcune famiglie del campione esteso, hanno richiesto volontariamente di partecipare alle indagini, pur se non raggiunte dal sistema di reclutamento. A queste è stata consentita la partecipazione inserendole come volontari.

## 2.5. Distribuzione e ritiro dei rilevatori radon

La misura della concentrazione di radon prevede un'esposizione di rilevatori per un intero anno suddiviso in due periodi.

Una volta ottenuto il consenso delle famiglie ad effettuare le misure presso la propria abitazione (campione effettivo), si è proceduto alla distribuzione della strumentazione, alla sostituzione dopo il primo periodo di esposizione e al ritiro finale.

Sono state adottate differenti metodiche di gestione dei rilevatori nelle province di Roma e Viterbo e in quelle di Frosinone, Latina e Rieti principalmente in relazione alla disponibilità da parte dei comuni a farsi carico della distribuzione, sostituzione e ritiro.

Nelle province di Roma e Viterbo, gli strumenti sono stati gestiti, in caso di assenso da parte del Comune, dai messi comunali per il tramite di contatti porta a porta, mentre nei comuni non disponibili sono stati spediti via posta dall'ISPRA.

Il call-center, ha verificato la movimentazione dei rilevatori e il loro corretto posizionamento grazie a contatti diretti con tutte le famiglie. Ha, inoltre, fornito il supporto per la compilazione di un questionario descrittivo dell'edificio, dell'abitazione e dei locali di misura.

Nelle province di Frosinone, Latina e Rieti, invece, la maggior parte dei Comuni ha preso in carico la gestione degli stessi radon e il supporto alla compilazione del questionario. Gli operatori dei comuni erano stati edotti dall'ISPRA e dall'ARPA Lazio sulle modalità di posizionamento, attivazione, sostituzione e ritiro dei e sul questionario. Per i Comuni che non hanno preso in carico la gestione dei rilevatori, tale fase, compreso il supporto alla compilazione dei questionari, è stata effettuata dalla Croce Rossa Italiana per il tramite dei propri volontari dopo opportuna formazione.

A tutte le famiglie del campione effettivo è stato consegnato, oltre alla strumentazione e al questionario, anche l'opuscolo informativo "Radon, guida per la popolazione".

Al termine dei due periodi di misura, a seguito di ulteriori defezioni e di misure ritenute non valide, il numero dei dati raccolti è stato inferiore al campione effettivo. L'insieme delle abitazioni per le quali si hanno dati validi costituisce il campione definitivo ovvero la base di dati sulla quale effettuare le analisi statistiche e lo sviluppo e l'applicazione delle metodologie di classificazione del territorio.

Nella tabella 3 è riportato il numero di abitazioni del campione definitivo suddiviso per campione anagrafico, campione geografico e per i volontari.

Campione definitivo	Anagrafico	Geografico	Volontari	Totale
Numero di abitazioni	2070	2485	726	5281

Tab. 3: La dimensione del campione definitivo



## 3. MATERIALI E METODI DI MISURA

### 3.1. Obiettivi e requisiti della misura

In relazione all'obiettivo generale dell'indagine è stata necessaria la determinazione della concentrazione annuale di attività di radon in aria in circa 2300 abitazioni per la prima indagine, nelle province di Roma e Viterbo, e in circa 3000 abitazioni per la seconda indagine, nelle province di Frosinone, Latina e Rieti, per un totale di circa 5300 abitazioni.

Relativamente alla strategia di misura, si è scelto di effettuare quattro distinte misure per ogni abitazione così suddivise:

- due punti di misura per ogni abitazione, preferibilmente uno in una camera da letto (rilevatore L) e uno in un ambiente tipo soggiorno (rilevatore S);
- per ogni punto di misura, due diversi periodi di campionamento coincidenti, per quanto possibile, con i due periodi caldo e freddo, ma con una durata complessiva di un anno. Un periodo è stato compreso generalmente tra novembre e aprile, l'altro tra aprile e novembre. La concentrazione media per ogni singola abitazione è stata calcolata dalla media aritmetica dei valori annuali dei due locali L e S. Ognuno di tali valori annuali è stato ottenuto, a sua volta, come media pesata per i due periodi di esposizione. Nel caso in cui non fossero disponibili tutte le quattro misure, sono state effettuate delle stime sulla base di un fattore correttivo (calcolato sulla base delle abitazioni con tutte le quattro misure) per tener conto della variabilità della concentrazione di radon durante i diversi periodi dell'anno.

Per ogni abitazione sono state effettuate, quindi, quando possibile, quattro rilevazioni per un totale di circa 20000 misure di concentrazione di attività di radon.

La scelta della tecnica di misura e di tipologia rilevatore è stata frutto di un'analisi che ha preso in considerazione, oltre ai suddetti requisiti e alla numerosità:

- le prestazioni delle diverse tecniche di misura disponibili
- le capacità di misura del laboratorio ISPRA
- il costo delle misure.

### 3.2. Il metodo della misura

La scelta della tecnica di misura della concentrazione di attività di radon in aria è ricaduta sui rilevatori di tracce nucleari a stato solido (SSNTD's). Tale scelta è stata dettata essenzialmente dal basso costo dei dispositivi di misura in relazione alla numerosità delle misure da effettuare e dall'elevata affidabilità delle misure che questo tipo di strumenti hanno raggiunto.

Il principio generale di funzionamento di questi si basa sulla sensibilità del materiale di cui sono costituiti alle radiazioni di tipo alfa emesse dal radon e dai suoi prodotti di decadimento. Le radiazioni alfa sono, infatti, in grado di danneggiare la struttura molecolare del materiale, producendo quelle che vengono definite "tracce".

A seguito di un trattamento chimico della superficie del rilevatore, le zone danneggiate dalle radiazioni alfa subiscono una trasformazione differenziata rispetto al materiale non danneggiato che rende visibili le tracce formate ad un microscopio ottico a luce trasmessa.

Lo sviluppo chimico è effettuato con una soluzione di idrossido di sodio 6.25 M (25% P/V) a 96°C per un'ora.

Il numero delle tracce, ottenuto attraverso un sistema automatico di analisi di immagine e conteggio, è proporzionale alla "esposizione" ossia alla concentrazione di radon media durante il periodo di esposizione e alla durata del campionamento.

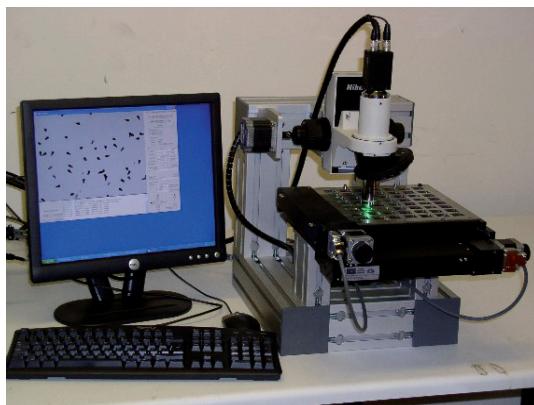


Fig. 4: Schema del campionamento anagrafico

### 3.3. Caratterizzazione e taratura dei rilevatori

Per entrambe le indagini di misura, i rilevatori sono stati forniti in diversi lotti di produzione di circa 2000 unità l'uno. Il fornitore produce un certificato di conformità nel quale dichiara la misura dello spessore nominale del rilevatore (1.5 mm), il numero del lotto (batch), la data della manifattura ed i risultati di prove di omogeneità effettuate su un campione del lotto. Tuttavia il produttore avvisa l'utilizzatore di effettuare ulteriori prove per assicurare che i rilevatori siano idonei all'uso. Pertanto, per ogni indagine è stata effettuata una caratterizzazione di tutti i lotti approvvigionati con le analisi delle risposte di rilevatori, scelti casualmente all'interno dei singoli lotti, alle sorgenti puntiformi di radiazioni alfa, alle esposizioni nella camera radon dell'ISPRA e in occasione della taratura effettuata presso l'Istituto di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (INMRI) dell'ENEA.

La caratterizzazione ha consentito di selezionare i lotti da utilizzare per le indagini per i quali è stata riscontrata un'uniformità di risposta e di escludere alcuni lotti per i quali, viceversa, tale uniformità non è stata riscontrata.

### 3.4. Controlli di qualità

Tutte le fasi della misura sono state sottoposte a controlli di qualità. Ogni singolo sviluppo chimico dei rilevatori è stato controllato mediante la verifica della risposta di strumenti di controllo, opportunamente irraggiati, ad una sorgente puntiforme di radiazioni alfa. La fase di conteggio delle tracce è stata verificata, in ogni sessione di misura, per il tramite della comparazione dei risultati dei rilevatori e il numero di tracce evidenziate. Sono state predisposte ed utilizzate per questi controlli di qualità apposite carte di controllo con valori di riferimento, livelli di attenzione e livelli di azione.

Durante il corso delle due indagini, i rilevatori sono stati sottoposti a 7 interconfronti nazionali e internazionali presso il Public Health England (PHE) inglese (ex National Radiological Protection Board-NRPB), il National Institute of Radiological Sciences (NIRS) del Giappone e l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (INMRI-ENEA) per la verifica delle prestazioni di misura.

I risultati degli interconfronti hanno confermato le buone prestazioni del metodo adottato in occasione di entrambe le indagini.

## 4. RISULTATI DELLE CAMPAGNE DI MONITORAGGIO

In questo capitolo sono riportati i risultati dell'analisi dei dati di concentrazione di radon indoor acquisiti sul territorio della regione Lazio. In aggiunta alle statistiche descrittive, sono riportate diverse carte tematiche sulla distribuzione della percentuale di edifici che superano determinati livelli di concentrazione di radon, elaborate sulla base di criteri di classificazione arbitrari.

### 4.1. Statistiche descrittive

Alle due indagini hanno partecipato 374 comuni su un totale di 378<sup>5</sup>, con oltre 5300 abitazioni nelle quali sono state effettuate misure di radon. Inoltre, l'indagine ha permesso di raccogliere un insieme di informazioni sulle caratteristiche degli edifici, delle abitazioni e dei locali di misura, utili ai fini della valutazione dei fattori che influenzano la presenza di radon indoor.

In figura 5 è rappresentata la distribuzione spaziale delle abitazioni misurate nella regione sovrapposta al reticolo di campionamento e ai limiti amministrativi provinciali.

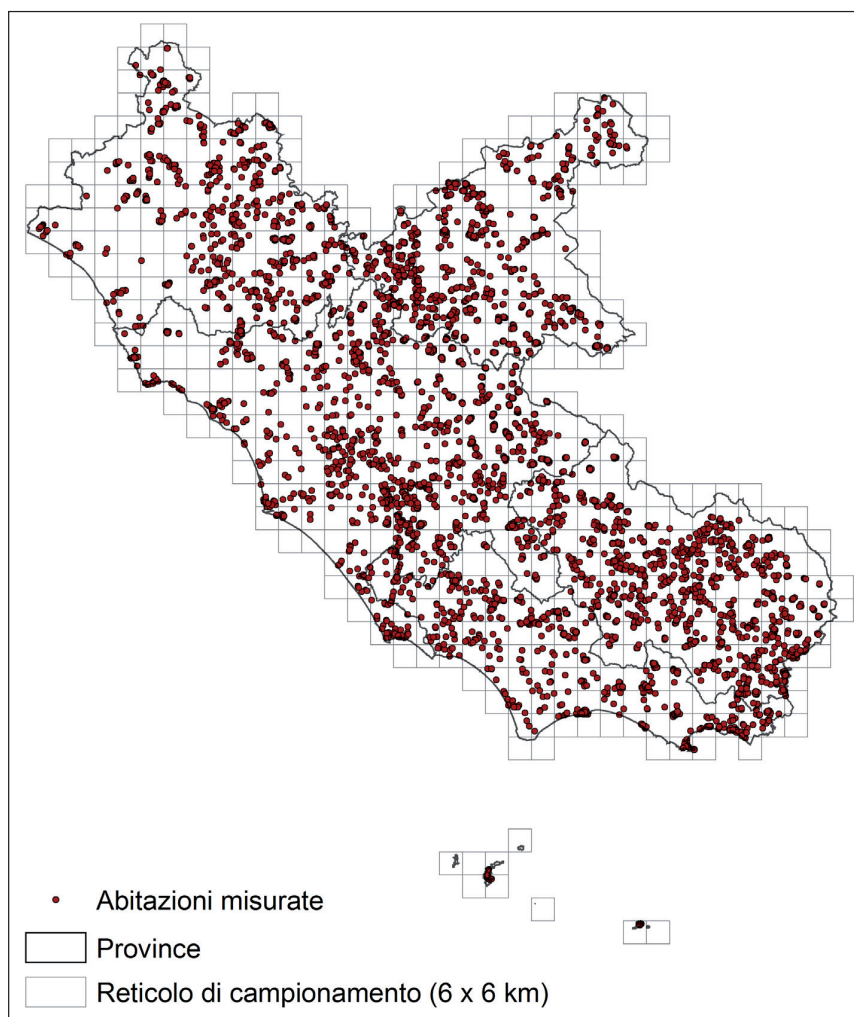


Fig. 5: Distribuzione spaziale delle abitazioni misurate

5 I dati analizzati si riferiscono a 374 comuni in quanto un comune ha iniziato in ritardo l'indagine e le analisi sono state effettuate successivamente alle elaborazioni statistiche.

In tabella 4 sono riportate le statistiche descrittive relative ai campioni parziali anagrafico (A), geografico (G), e volontario (V) e al campione totale.

	CAMPIONE A	CAMPIONE G	CAMPIONE V	CAMPIONE TOTALE AGV
<b>N. misure</b>	2.070	2.485	726	5.281
<b>Valore concentrazione Min [Bq m<sup>-3</sup>]</b>	8	5	4	4
<b>Valore concentrazione Max [Bq m<sup>-3</sup>]</b>	2.154	1.806	950	2.154
<b>Media Aritmetica [Bq m<sup>-3</sup>]</b>	119	123	120	121
<b>Deviazione standard</b>	142	134	116	135
<b>Standard error</b>	3	3	4	2
<b>Mediana [Bq m<sup>-3</sup>]</b>	83	85	84	84
<b>Media Geometrica [Bq m<sup>-3</sup>]</b>	86	87	83	86
<b>Deviazione Standard Geometrica [Bq m<sup>-3</sup>]</b>	2	2	2	2
<b>% &gt; 100 Bq m<sup>-3</sup></b>	40%	42%	43%	41%
<b>% &gt; 300 Bq m<sup>-3</sup></b>	6%	6%	6%	6%
<b>% &gt; 500 Bq m<sup>-3</sup></b>	2%	2%	2%	2%

Tab. 4: Statistica descrittiva del campione totale e dei campioni parziali (concentrazioni in Bq m<sup>-3</sup>)

I risultati di una precedente indagine nazionale condotta tra il 1989 e il 1997 dall'ISPRA, dall'ISS e dagli assessorati regionali alla sanità riportano per il Lazio, su un totale di 304 abitazioni in 7 comuni, un valore medio di  $119 \pm 6$  Bq m<sup>-3</sup> (Bochicchio et al., 2005(2)), confrontabile con il risultato ottenuto dall'indagine eseguita dall'ISPRA e dall'ARPA Lazio.

Da una prima analisi dei dati risulta che, tenendo conto del complesso delle misure, le medie per i tre gruppi anagrafico, geografico e volontari sono confrontabili tra loro. Pertanto si è deciso di effettuare le successive elaborazioni statistiche sull'insieme dei tre campioni (anagrafico, geografico e volontari).

In figura 6 è riportata la distribuzione delle concentrazioni radon misurate nel Lazio.

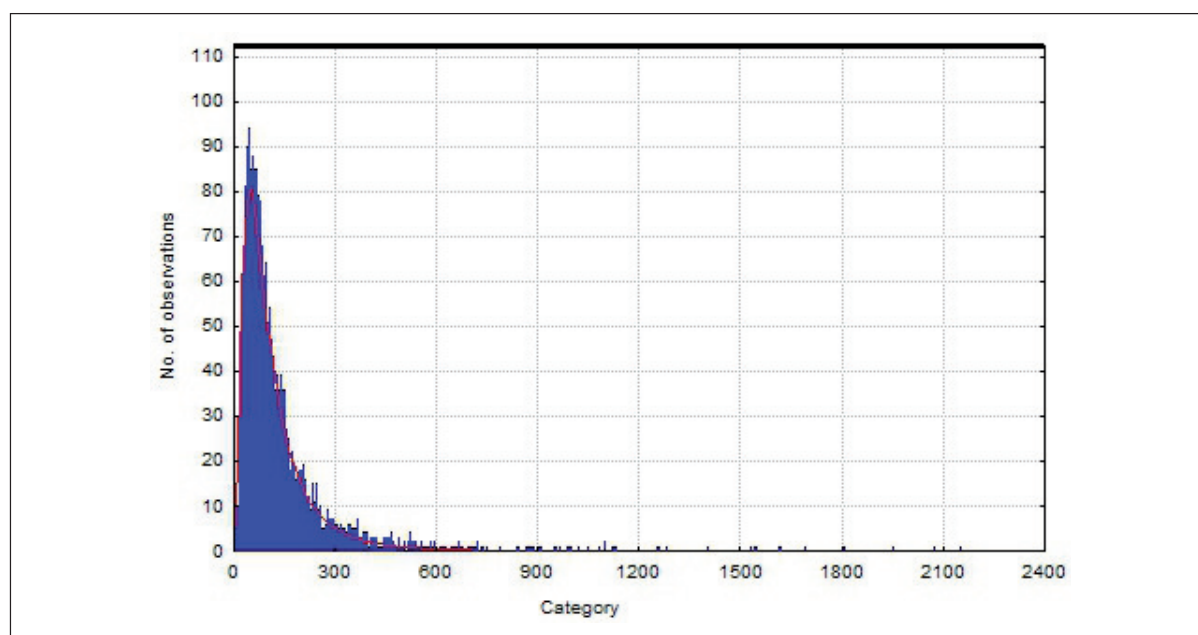


Fig. 6: Distribuzione delle concentrazioni radon misurate nel Lazio

La distribuzione dei livelli di radon risulta essere ben rappresentata da una log-normale, considerando il contributo dovuto alla presenza di radon outdoor (Gunby et al., 1993, Miles, 1994).

In tabella 5 sono riportate le statistiche descrittive dei dati suddivisi per provincia.

PROVINCIA	FR	LT	RI	RM	VT	TOTALE
<b>N. comuni</b>	91	33	73	121	60	378
<b>Popolazione</b>	498.055	555.692	160.467	4.221.163	321.008	5.756.385
<b>Superficie (km2)</b>	3.244	2.250	2.749	5.352	3.612	15.182
<b>N. misure</b>	1.288	675	1.036	1.418	864	5.281
<b>Valore concentrazione min [Bq m<sup>-3</sup>]</b>	4	5	6	5	6	4
<b>Valore concentrazione max [Bq m<sup>-3</sup>]</b>	1.953	1.692	626	2.154	2.075	2.154
<b>Media aritmetica [Bq m<sup>-3</sup>]</b>	142	127	104	96	144	121
<b>Deviazione standard</b>	148	142	78	122	170	135
<b>Standard error</b>	4	5	2	3	6	2
<b>Media Geometrica [Bq m<sup>-3</sup>]</b>	101	90	82	67	104	86
<b>Deviazione Standard Geometrica [Bq m<sup>-3</sup>]</b>	2	2	2	2	2	2
<b>% &gt; 100 Bq m<sup>-3</sup></b>	51%	43%	38%	29%	51%	41%
<b>% &gt; 300 Bq m<sup>-3</sup></b>	9%	7%	3%	4%	9%	6%
<b>% &gt; 500 Bq m<sup>-3</sup></b>	3%	2%	0%	1%	3%	2%

Tab. 5: Statistica descrittiva nelle cinque province del Lazio (concentrazioni in Bq m<sup>-3</sup>)

I risultati delle misure, aggregati per i singoli comuni che hanno partecipato all'indagine con almeno 5 misure effettuate, sono riportati in appendice.

Va evidenziato che la concentrazione media di radon nella città di Roma Capitale riscontrata in questa indagine risulta essere pari a 62 Bq m<sup>-3</sup>, valore nettamente inferiore rispetto ai 117 Bq m<sup>-3</sup> rilevati in occasione dell'indagine 1989-1997 (*Qualità dell'ambiente urbano*, I Rapporto APAT, 2004). Nonostante siano stati effettuati tutti i controlli e le verifiche del caso, non sono stati individuati motivi che spiegano tale discrepanza. Dovrebbe, pertanto, essere realizzata una ulteriore specifica indagine sul territorio del comune di Roma Capitale.

#### 4.2. Metodologie per la classificazione delle zone a maggiore probabilità di alte concentrazioni di radon

La classificazione delle zone a maggiore probabilità di alte concentrazioni di radon (radon prone areas) è uno strumento che contribuisce alla definizione di strategie di intervento diversificate sul territorio in relazione alla diversa incidenza del fenomeno.

Generalmente, la classificazione è rappresentata con l'ausilio di mappe tematiche, nelle quali sono riportate le diverse zone individuate sulla base di specifici criteri.

Esistono diversi approcci metodologici nella produzione delle mappe. Tra i vari approcci due sono quelli maggiormente utilizzati. Un primo approccio è quello di utilizzare misure di radon indoor (Miles, 1994), in alcuni casi integrate da informazioni geologiche (Miles e Appleton, 2005). L'altro si basa sui soli dati geologici (Akerblom et al., 1995) o sul collegamento tra questi e la concentrazione di radon indoor attraverso modelli statistici che considerano parametri variabili a seconda delle caratteristiche degli edifici (Thomas et al., 2002).

Il primo approccio è più diretto e richiede campagne estese con un numero rilevante di misure indoor, possibilmente pianificate in modo tale da considerare le diverse unità geologiche. Il secondo approccio è indiretto in quanto tende a riprodurre attraverso modelli statistici il trasferimento del gas dal suolo all'interno delle abitazioni.

In questo lavoro è stato applicato il primo approccio che risulta anche quello più diffusamente utilizzato. La generazione delle mappe di classificazione del territorio è stata eseguita con due differenti metodologie: statistica e geostatistica. La metodologia statistica si basa su un'analisi dei dati all'interno di aree (poligoni, confini amministrativi, aree geologiche ecc.) e le mappe risultanti rappresentano, per ogni area, la percentuale di abitazioni che superano il livello di riferimento scelto. La metodologia geostatistica si basa su un'elaborazione dei dati generando mappe che rappresentano la stima puntuale, o per aree, della probabilità di superare il livello standard. In quest'ultimo caso, le mappe rappresentano la probabilità che un'ipotetica abitazione situata in un determinato punto superi il livello o che un'abitazione all'interno di un'area definita superi quel livello.

#### 4.2.1. Metodologia statistica

La metodologia più diffusa per la generazione di mappe di classificazione del territorio, basate sulle sole misure indoor o integrate con l'informazione geologica, viene chiamata in letteratura "Grid Square Method" (Miles, 1994). Tale tecnica prevede come parametro di calcolo la frazione di abitazioni che in una determinata area supera un livello di riferimento di concentrazione di radon. Pertanto, ai fini della classificazione devono essere definiti il valore di riferimento e le classi della distribuzione del parametro.

Il Grid Square Method utilizza un reticolo regolare con il quale suddividere l'area di interesse dell'indagine in celle quadrate all'interno delle quali stimare la frazione di abitazioni che eccedono il livello di riferimento (LR). Il metodo si basa sulla stima dei parametri dei dati (opportunosamente trattati) per calcolare la frazione della distribuzione che oltrepassa una precisa soglia (Miles et al., 1991).

Per stimare la percentuale di abitazioni che superano il livello è stata calcolata, in ogni cella del reticolo, la funzione deviata normale standardizzata  $Z$ , definita come:

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

dove LR è il livello di riferimento scelto, MG la media geometrica e DSG la deviazione standard geometrica.

Dalle tabelle di probabilità della distribuzione di frequenza normale, si può ricavare per ogni valore di  $Z$  la percentuale attesa di abitazioni eccedenti il livello di riferimento scelto.

Attraverso l'applicazione di tecniche di riempimento e smoothing (Miles, 1994), è possibile estendere il calcolo della funzione  $Z$  anche alle celle vuote (zone prive di abitazioni, oppure nelle quali, anche dopo ripetuti tentativi, non si sia riusciti ad ottenere l'adesione all'indagine) e, quindi, di stimare la percentuale attesa di abitazioni eccedenti il livello di riferimento scelto su tutta la regione di interesse.

In figura 7 sono mostrate le mappe della percentuale attesa di abitazioni eccedenti i livelli di riferimento scelti pari a 100, 300 e 500 Bq m<sup>-3</sup>. Tali valori sono stati scelti, in assenza di precisi criteri o linee guida nazionali sulle modalità di individuazione delle zone a maggiore probabilità di alte concentrazioni, in modo arbitrario, ma, si basano su normative e indicazioni nazionali ed internazionali. Nel 2009, l'Organizzazione Mondiale della Sanità ha proposto che le autorità nazionali adottino un valore di riferimento di 100 Bq m<sup>-3</sup>. Tuttavia, se particolari condizioni di un paese non consentissero l'adozione di tale valore, questo non dovrebbe comunque essere superiore a 300 Bq m<sup>-3</sup>. Il valore di 500 Bq m<sup>-3</sup>, invece, è indicato dal D.Lgs. 230/95 e s.m.i. quale livello di azione, in termini di concentrazione, per gli ambienti di lavoro. Le classi utilizzate per suddividere la scala dei valori della percentuale di abitazioni che superano i livelli di riferimento sono state scelte in modo arbitrario: 1, 5, 10, 20, 30 e maggiore del 30 per cento.



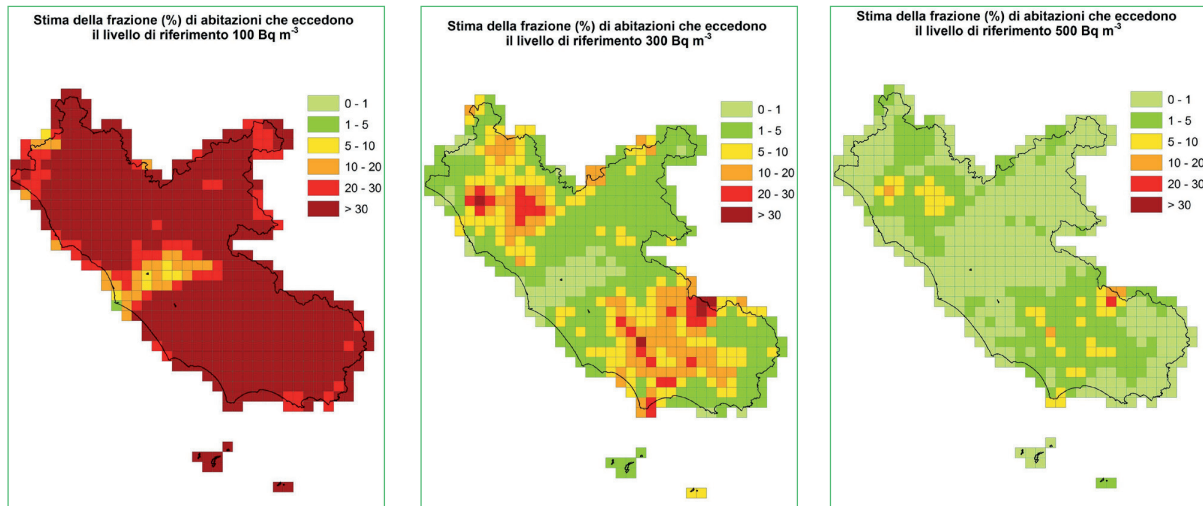


Fig. 7: Mappe della percentuale di abitazioni eccedenti il livello di riferimento di 100 Bq m<sup>-3</sup>, 300 Bq m<sup>-3</sup> e 500 Bq m<sup>-3</sup> dopo la procedura di riempimento e smoothing

#### 4.2.2. Metodologia geostatistica

La statistica spaziale include una vasta gamma di metodi e modelli (Cressie, 1993) finalizzati all'analisi di dati riferiti al territorio o, più in generale, spazialmente distribuiti. Nell'ambito della statistica spaziale, la geostatistica si riferisce ai metodi e modelli applicati a dati campionati in una regione dello spazio, i quali sono misure dirette di valori di un fenomeno spaziale continuo nei punti di campionamento o statisticamente correlati ad essi (Diggle e Ribeiro, 2007). I metodi geostatistici studiano la variabilità spaziale dei parametri che descrivono tali fenomeni attraverso la loro modellizzazione al fine di caratterizzare e stimare i fenomeni stessi sul territorio. Metodi geostatistici sono stati applicati, recentemente, al problema del radon indoor in termini di individuazione della probabilità di superare determinati valori di riferimento a livello nazionale (Raspa et al. 2010, Bertolo et al. 2009; Pegoretti e Verdi 2009, Verdi e Pegoretti 2006) e internazionale (Dubois et al., 2007).

Per la generazione delle mappe di classificazione del territorio è stata utilizzata la tecnica conosciuta come "disjunctive kriging" (Matheron, 1976, Rivoirard, 1994, Chile`s e Delfiner, 1999, Raspa et al. 2010) uno stimatore intermedio tra l'ordinary kriging (una combinazione lineare dei dati) e la conditional expectation (una funzione multi-variabile dei dati).

Anche in questo caso, come per la metodologia statistica sopra descritta, sono stati scelti valori di riferimento pari a 100, 300 e 500 Bq m<sup>-3</sup> e per suddividere la scala dei valori della probabilità di superare i livelli di riferimento sono state scelte le stesse classi: 1, 5, 10, 20, 30 e maggiore del 30 per cento. In Fig. 8 sono riportate le mappe della probabilità di superare i livelli di riferimento indicati.

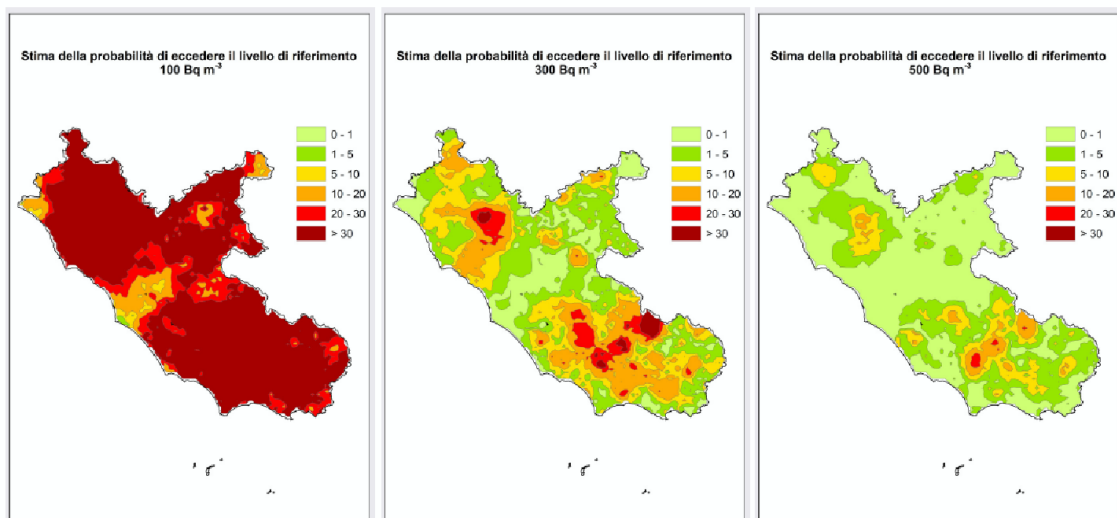


Fig. 8: Mappe della probabilità stimata di superare il livello di riferimento di 100 Bq m<sup>-3</sup>, 300 Bq m<sup>-3</sup> e 500 Bq m<sup>-3</sup>



## CONCLUSIONI

Le campagne di monitoraggio del radon illustrate nel report nascono dall'esigenza di raccogliere un insieme di dati e di metodologie finalizzati alla classificazione del territorio della regione Lazio in termini di zone ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon, nel rispetto della normativa.

Obiettivo del presente lavoro è stato quello di raccogliere, attraverso un'indagine campionaria, un insieme di dati sulla base del quale poter classificare il territorio, a prescindere dai criteri e dalle metodologie di analisi adottati.

Sono stati raccolti dati su circa 4.600 abitazioni campionate casualmente nel territorio con le stesse procedure di base e impiegati circa 700 volontari per un controllo totale di circa 5200 abitazioni. Per la misura della concentrazione di radon sono stati utilizzati circa 25000 rilevatori di tracce nucleari a stato solido.

I dati raccolti hanno consentito di elaborare delle cartografie, rappresentanti le aree con maggiore probabilità di elevate concentrazioni di radon. I criteri adottati per le elaborazioni cartografiche sono stati scelti in modo arbitrario in assenza di criteri definiti dalla normativa, tuttavia si sono tenute in considerazione le esperienze effettuate in campo internazionale e nazionale.

Le mappe di questo tipo sono in continua evoluzione in ragione dell'aggiornamento delle informazioni e di nuovi strumenti di analisi. Si ritiene che l'insieme di dati finora prodotto sia tale da poter essere utilizzato anche nel caso siano scelti criteri diversi.

È importante evidenziare che le mappe non rappresentano il rischio connesso all'esposizione al radon, ma una classificazione del territorio in base alla maggiore o minore probabilità di avere elevate concentrazioni di radon. Ciò significa che nelle zone ad alta probabilità di superare il livello di riferimento scelto si ha una maggiore possibilità di trovare edifici in cui la concentrazione media annuale di radon ecceda tale livello, ma tuttavia non tutti gli edifici in quella zona presentano questa caratteristica. Allo stesso modo, nelle zone dove è bassa il rischio di superare il livello di riferimento è comunque possibile trovare abitazioni in cui la concentrazione di radon raggiunge valori elevati.

Le mappe costituiscono un utile strumento a supporto della pianificazione di eventuali azioni di approfondimento, prevenzione, mitigazione o rimedio da intraprendere e quindi per l'ottimizzazione delle risorse da impiegare. Ad esempio, nel caso si intendesse individuare in modo puntuale abitazioni con elevate concentrazioni risulterebbe più vantaggioso in termini di bilancio costi-benefici effettuare indagini principalmente nelle zone classificate a più elevata probabilità di alte concentrazioni.

Sulla base delle misure effettuate, nell'ambito dell'indagine regionale, si riporta nelle tabelle seguenti una stima della popolazione potenzialmente esposta a valori medi annui superiori a 300 Bq/mc e del numero di abitazioni e comuni coinvolti (sono stati utilizzati i dati del censimento ISTAT 2011).

La stima è basata su 348 comuni del Lazio poiché in 26 comuni il numero di misure effettuate è minore di 5, mentre 4 comuni non hanno partecipato all'indagine regionale (il totale della popolazione dei 30 comuni non considerati è pari a 128 670 e la suddivisione dei 30 comuni per provincia è: VT-3; LT-2; RI-3; RM-19; FR-3).

	Numero comuni dell'indagine regionale	Popolazione Residente – totale nei 348 comuni dell'indagine regionale	Popolazione Residente esposta valori medi annui superiori a 300 Bq m <sup>-3</sup>	% Popolazione Residente esposta valori medi annui superiori a 300 Bq m <sup>-3</sup>
<b>Regione Lazio</b>	<b>348</b>	<b>5 370 867</b>	<b>182 979</b>	<b>3.4</b>
Provincia di Viterbo	57	308 467	32 100	10.4
Provincia di Rieti	70	150 480	4 786	3.2
Provincia di Roma	102	3 905 322	69 393	1.8
Provincia di Latina	31	524 561	29 355	5.6
Provincia di Frosinone	88	482 037	47 345	9.8

Tab. 6: Stima della popolazione potenzialmente esposta a valori medi annui superiori a 300 Bq m<sup>-3</sup>

	Numero comuni dell'indagine regionale in cui almeno 1 misura è > 300 Bq/mc	Famiglie – totale nei 348 comuni dell'indagine regionale	Famiglie nei 348 comuni con valori medi annui superiori a 300 Bq/mc	% Famiglie nei 348 comuni con valori medi annui superiori a 300 Bq/mc
<b>Regione Lazio</b>	<b>154</b>	<b>2 254 475</b>	<b>73 928</b>	<b>3.3</b>
Provincia di Viterbo	29	132 320	13 768	10.4
Provincia di Rieti	19	65 239	2 099	3.2
Provincia di Roma	39	1 659 751	28 166	1.7
Provincia di Latina	15	205 308	11 373	5.5
Provincia di Frosinone	52	191 857	18 522	9.7

Tab. 7: Stima delle famiglie potenzialmente esposta a valori medi annui superiori a 300 Bq m<sup>-3</sup>

Alla luce dei risultati delle indagini e delle analisi effettuate è possibile individuare delle azioni che le diverse Autorità competenti sul tema del radon potrebbero, compatibilmente con le risorse disponibili, sviluppare in futuro:

- informazione dei cittadini e delle amministrazioni;
- definizione di azioni di prevenzione per le nuove abitazioni;
- pianificazione e realizzazione di nuove campagne di monitoraggio;
- individuazione e risanamento degli edifici.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Akerblom, G., Anderson, P., Clavensjo, B., *Soil gas radon-A source for Indoor Radon Daughters in Radiation Protection Dosimetry* 7 (1984), 1-4, 49-54.

ANPA, *Il Sistema Informativo Territoriale per la valutazione del potenziale di esalazione di radon dal suolo*, a cura di Paolo Orlando, Roma, 2000.

APAT, *Qualità dell'ambiente urbano*, I Rapporto APAT, 2004

Bertolo, A., Bigliotto, C., Giovani, C., *Spatial distribution of indoor radon in Triveneto (Northern Italy): a geostatistical approach in Radiation Protection Dosimetry* 137 (2009), 3-4, 318-323

Bochicchio, F., Campos-Venuti, G., Piermattei, S., *Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions in Radiation Measurements*, 40 (2005), 2-6, 686 - 694.

Bochicchio, F., Forastiere, F., Farchi, S., *Residential radon exposure, diet and lung cancer: a case-control study in a Mediterranean region in International journal of cancer*, 114(2005), 6, 983-991.

Borgoni, R., Tritto, V., Bigliotto, C., *A Geostatistical Approach to Assess the Spatial Association between Indoor Radon Concentration, Geological Features and Building Characteristics: The Case of Lombardy, Northern Italy in International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8 (2011), 5, 1420-1440.

Buttafuoco, G.; Tallarico, A.; Falcone, G., *Mapping soil gas radon concentration: a comparative study of geostatistical methods in Environmental Monitoring and Assessment* 131 (2007), 1-3, 135-151.

European Commission 2012/242, *Proposal for a Council Directive laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation*, Brussels, 2012

Checchacci L., Meloni C., Pelissero G., *Igiene*, 2. Ed., Milano, Casa Editrice Ambrosiana, 1993.

Chile`s, J. P., Delfiner, P., *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*, Hoboken (N.J.), Wiley, 2012.

Cressie, N., *Statistics for spatial data*, New York, Wiley, 1993.

Darby, S., *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies in British Medical Journal*, 330 (2005), 223.

Diggle, P.J., Ribeiro, P.J., *Model-based Geostatistics*, New York, Springer, 2007.

Dubois, G., Bossew, P., Friedmann, H., *A geostatistical autopsy of the Austrian indoor radon survey in Science of The Total Environment* 377 (2007), 2-3, 378-395.

EPA, *EPA Assessment of Risks from Radon in Homes*, Office of Radiation and Indoor Air United States, Washington, Environmental Protection Agency, 2003

Globe R., Noble, N.L., Socolow R., *High radon houses: implications for epidemiology and risk assessment*, Worcester, MA, Clark University, Center for Technology, Environment, and Development, 1990

Green BMR, Great Britain, National Radiological Protection Board, *Gamma-radiation levels outdoors*, Great Britain, Chilton, Oxfordshire, National Radiological Protection Board, 1989

Gunby, J.A., Darby, S.C., Miles, J.C., *Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom in Health Physics*, 64 (1993), 1, 2-12

Gundersen L., C.S., Reimer, G.M., Agard, S.S., *Correlation between geology, radon in soil gas, and indoor radon in the Reading Prong in Marikos M., Proceedings of GEORAD, Geology in Causes of Radionuclide Anomalies*, Rolla, MO : Missouri Dept. of Natural Resources, Division of Geology and Land Survey, 1988

International Commission on Radiological Protection, *Protection Against Radon-222 at Home and at Work, a report of a task group of the International Commission on Radiological Protection* in ICRP Publication 23 (1993), 2, 1-45,

International Commission on Radiological Protection, *Statement on Radon*, Approved by the Commission in November 2009

International Commission on Radiation Units and Measurements, *Quantities and Units for Use in Radiation Protection* (Report n°51), 1990

Magnoni, M. Tofani, S., *Valutazione della concentrazione di radon nelle abitazioni del Piemonte* in La qualità dell'aria negli ambienti interni, Atti del Convegno Nazionale ARIA 92, Pisa 28-29 ottobre 1992

Matheron, G., *The theory of regionalized random variables and its applications*, Report Vol.5. Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Fontainebleau, Ecole des Mines de Paris, 1971.

Matheron, G., *A simple substitute for conditional expectation: disjunctive kriging* in *Advanced Geostatistics in the Mining Industry*, Guarascio, M., David, M. Huijbregts, Ch. Eds., Reidel, Dordrecht, Holland, 1976 p. 37–51.

Miles J., *Mapping the proportion of the housing stock exceeding a radon reference level* in *Radiation Protection Dosimetry* 56 (1994), 1-4, 207–210.

Miles, J. C., Appleton, J. D., *Mapping variations in radon potential both between and within geological units* in *Journal of Radiological Protection*, 25 (2005), 3, 257–276.

Miles, J., *Mapping radon-prone areas by lognormal modeling of the house radon data* in *Health Physics*. 74(1998), 3, 370–378.

Miles, J.C.H., Green, B.M.R., Lomas, P.R., *Radon in U.K. homes: Defining the areas affected* in *Radiation Protection Dosimetry* 36 (1991), 2-4, 117-120.

National Research Council, *Health effects of exposure to radon*, Committee on Health Risks of Exposure to Radon, Board on Radiation effects research, National Research Council, Washington, D.C., National Academy Press, 1999

Nazaroff, W.W., Nero, A.V., *Radon and its decay products in indoor air*, New York, Wiley, 1988

Oliver M. A., Khayrat A. L., *A geostatistical investigation of the spatial variation of radon in soil* in *Computers and Geosciences* 27 (2001), 8, 939-957

Pegoretti, S., Verdi, L. *Machine learning for the analysis of indoor radon distribution, compared with ordinary kriging* in *Radiation Protection Dosimetry*, 137(2009), 3-4, 324-328

Raspa, G., Salvi, F., Torri G., *Probability mapping of indoor radon-prone areas using disjunctive kriging* in *Radiation Protection Dosimetry*, 138 (2010), 1, 3-19

Regione del Veneto, Agenzia Regionale per la Prevenzione e la Protezione Ambientale del Veneto, *Indagine regionale per l'individuazione delle aree ad alto potenziale di radon nel territorio Veneto*, 2010 [http://www.arpa.veneto.it/agenti\\_fisici/htm/radon\\_9.asp](http://www.arpa.veneto.it/agenti_fisici/htm/radon_9.asp)

Rivoirard, J., *Introduction to Disjunctive Kriging and non-linear geostatistics*, Oxford, Clarendon Press, 1994

Samet J.M., Hornung R.W., *Review of radon and lung cancer risk* in *Risk Analysis* 10 (1990), 1, 65–75

Schumann, R.R., Owen, D.E., *Relationships between geology, equivalent uranium concentration, and radon in soil gas*, Fairfax County, Virginia, U.S. Geological Survey Open-File Report 88-18, 1988

Thomas, J., Hulka, J., Tomásek, L., *Determination of radon prone areas by probabilistic analysis of indoor survey results and geological prognostic maps in the Czech Republic* in *International Congress Series* 1225 (2002), 49–54

UNI CEI ENV 13005: 2000, *Guida all'espressione dell'incertezza di misura*

UNI ISO 8258: 2004, *Carte di controllo di Shewhart*

---

UNSCEAR 2000 REPORT, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, United Nations, 2000

UNSCEAR 2008 REPORT, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, Report to the General Assembly, with scientific annexes: Volume I, 2008

Verdi, L., Pegoretti, S., *Mappatura del Radon in Alto Adige: un'analisi di tipo geostatistico. Proceedings of the Terzo Convegno Nazionale Controllo Ambientale degli Agenti Fisici: dal monitoraggio alle azioni di risanamento e bonifica*, Biella, Italy 7–9 June 2006, ARPA Piemonte, 2006

World Health Organization, *Air quality guidelines for Europe*, 2. ed., Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe, 2001

World Health Organization, *Handbook on indoor radon: a public health perspective*, Edited by Hajo Zeeb and Ferid Shannoum, Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe, 2009





---

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il Prof. Giuseppe Raspa dell'Università di Roma "La Sapienza" per il supporto riguardante le analisi di tipo geostatistico e il Dott. Maurizio Guerra dell'ISPRA per il supporto sugli aspetti geologici legati al problema radon.

Si ringraziano la dott.ssa Gentilina Bidolli, la dott.ssa Piera Innocenzi, il p.i. Marco Cavaioli e il p.i. Stefano Mirti dell'ISPRA per il supporto nella fase di georeferenziazione dei siti di misura.

Si ringraziano vivamente tutti i referenti comunali che hanno partecipato alle varie fasi dell'indagine, dal campionamento e reclutamento dei partecipanti ai contatti diretti con le famiglie e alla distribuzione, sostituzione e ritiro dei rilevatori.

Si ringraziano il dott. Gabriele Deodato, il dott. Giorgio Evangelisti e il dott. Andrea Morucci per il prezioso contributo fornito nell'ambito della campagna di monitoraggio.

Si ringraziano, infine, la dott.ssa Claudia Fontana, il dott. Paolo Bennati e la dott.ssa Rosa Grazia Musumeci del Servizio Misure Radioattività Ambientale - Laboratorio Centrale e i presidenti e i volontari dei comitati provinciali e locali della Croce Rossa Italiana che hanno svolto una parte delle attività di reclutamento del campione, distribuzione dei rilevatori e riempimento del questionario.



## INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1: Schema generale del campionamento.....	Pag	14
Fig. 2: Schema del campionamento anagrafico .....	"	15
Fig. 3: Schema del campionamento anagrafico .....	"	16
Fig. 4: Schema del campionamento anagrafico .....	"	20
Fig. 5: Distribuzione spaziale delle abitazioni misurate .....	"	21
Fig. 6: Distribuzione delle concentrazioni radon misurate nel Lazio.....	"	22
Fig. 7: Mappe della percentuale di abitazioni eccedenti il livello di riferimento di 100 Bq m <sup>-3</sup> , 300 Bq m <sup>-3</sup> e 500 Bq m <sup>-3</sup> dopo la procedura di riempimento e smoothing.....	"	25
Fig. 8: Mappe della probabilità stimata di superare il livello di riferimento di 100 Bq m <sup>-3</sup> , 300 Bq m <sup>-3</sup> e 500 Bq m <sup>-3</sup> .....	"	25



## INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1 : Normativa in materia di radon .....	Pag	9
Tab. 2: Valori di riferimento della concentrazione di attività di radon media in un anno .....	"	9
Tab. 3: La dimensione del campione definitivo .....	"	17
Tab. 4: Statistica descrittiva del campione totale e dei campioni parziali (concentrazioni in Bq m <sup>-3</sup> ) .....	"	22
Tab. 5: Statistica descrittiva nelle cinque province del Lazio (concentrazioni in Bq m <sup>-3</sup> ) .....	"	23
Tab. 6: Stima della popolazione potenzialmente esposta a valori medi annui superiori a 300 Bq m <sup>-3</sup> .....	"	28
Tab. 7: Stima delle famiglie potenzialmente esposta a valori medi annui superiori a 300 Bq m <sup>-3</sup> .....	"	28



---

## ELENCO ALLEGATI

Tavola 01: Stima della frazione (%) di abitazioni che eccedono il livello di riferimento pari a  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  (metodologia statistica)

Tavola 02: Stima della frazione (%) di abitazioni che eccedono il livello di riferimento pari a  $300 \text{ Bq m}^{-3}$  (metodologia statistica)

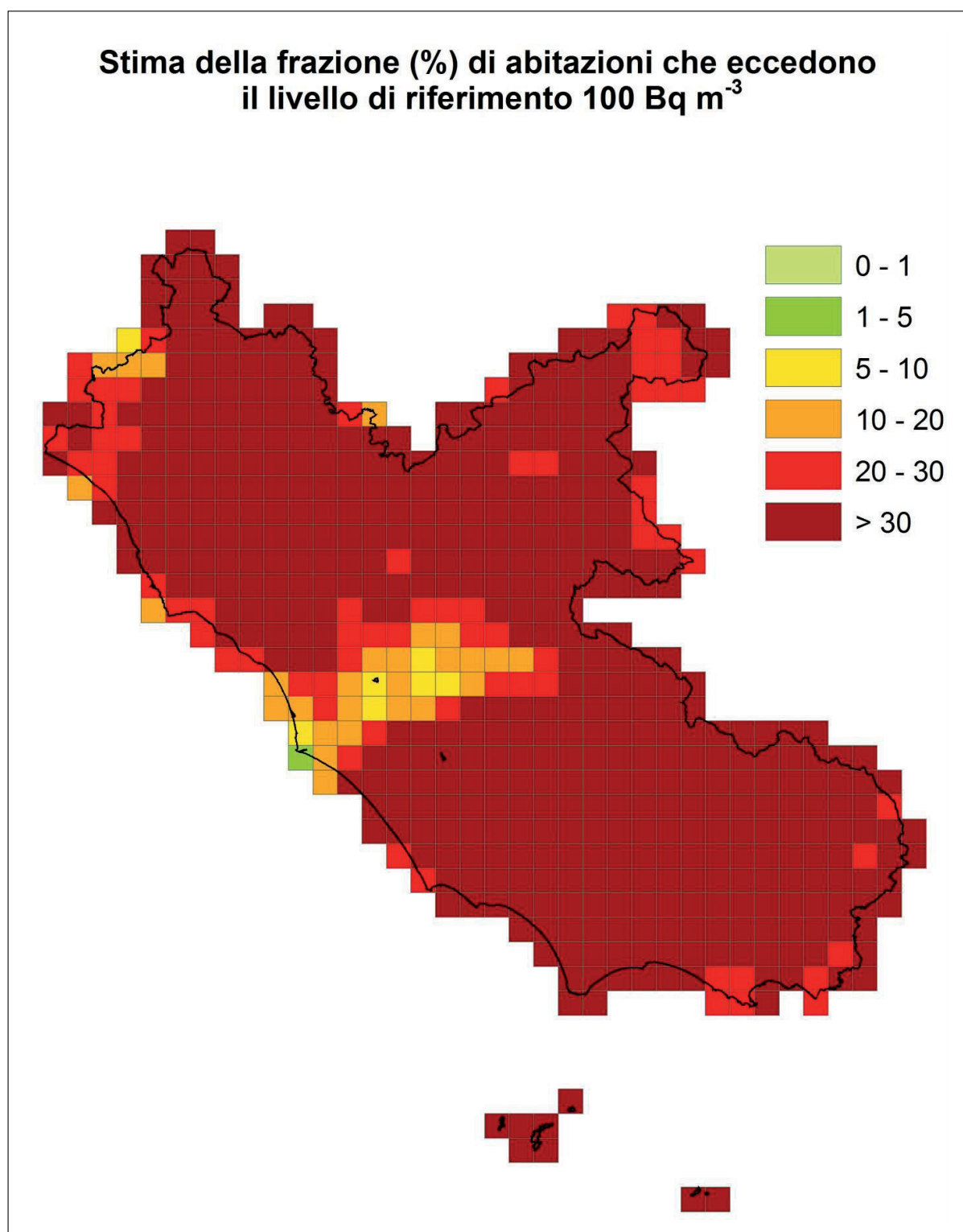
Tavola 03: Stima della frazione (%) di abitazioni che eccedono il livello di riferimento pari a  $500 \text{ Bq m}^{-3}$  (metodologia statistica)

Tavola 04: Stima della probabilità di eccedere il livello di riferimento pari a  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  (metodologia geostatistica)

Tavola 05: Stima della probabilità di eccedere il livello di riferimento pari a  $300 \text{ Bq m}^{-3}$  (metodologia geostatistica)

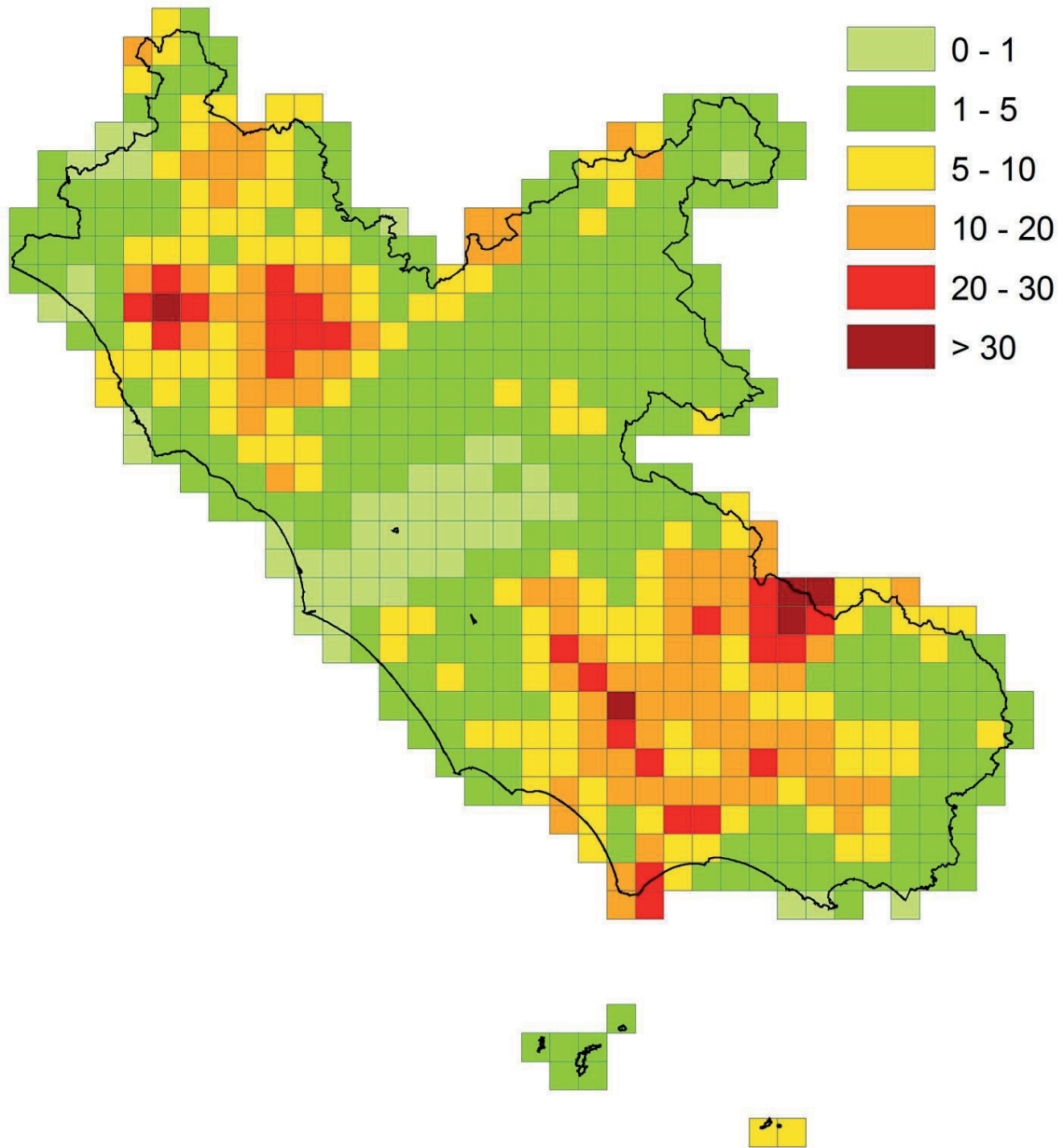
Tavola 06: Stima della probabilità di eccedere il livello di riferimento pari a  $500 \text{ Bq m}^{-3}$  (metodologia geostatistica)

Tavola 01

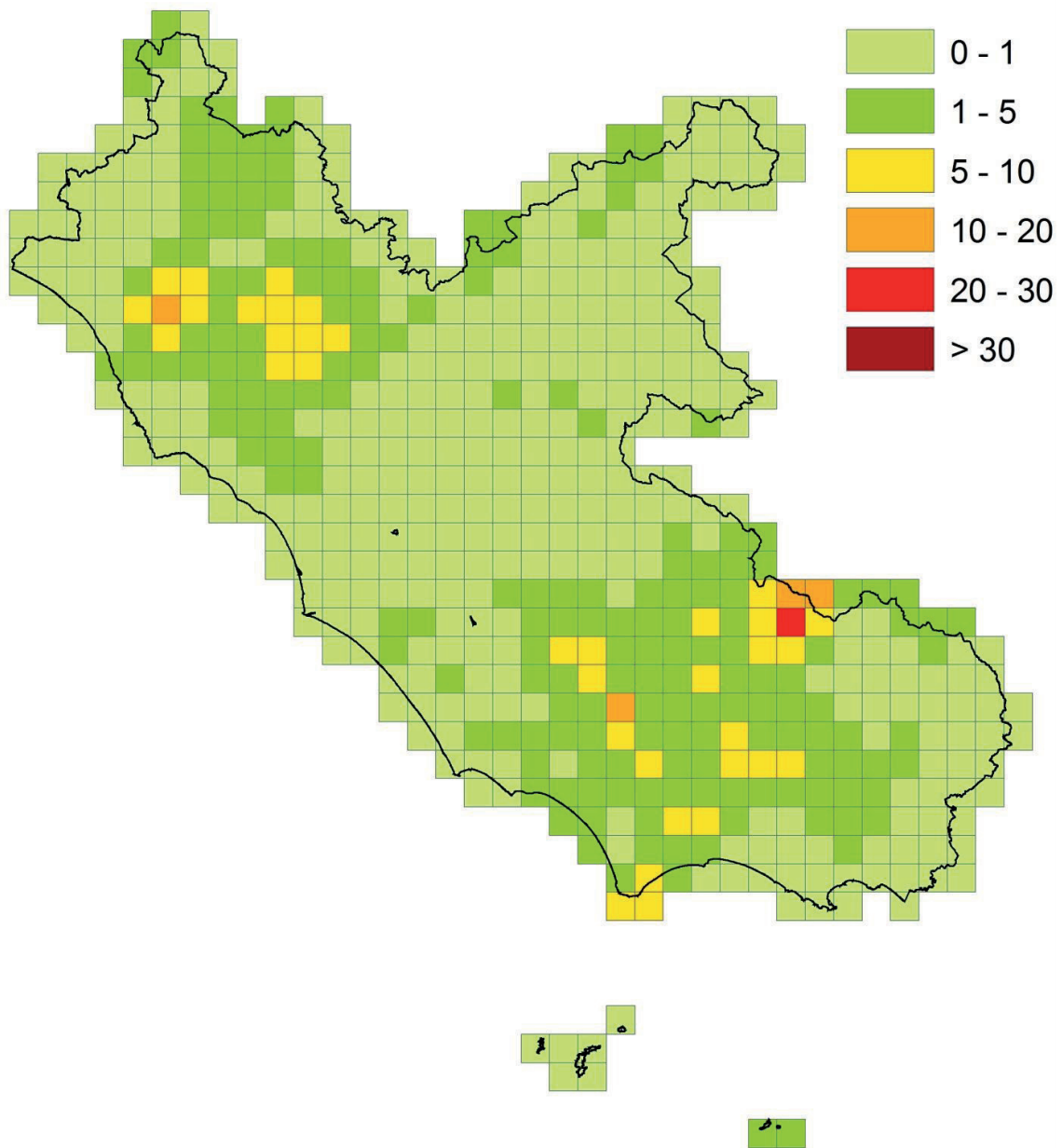




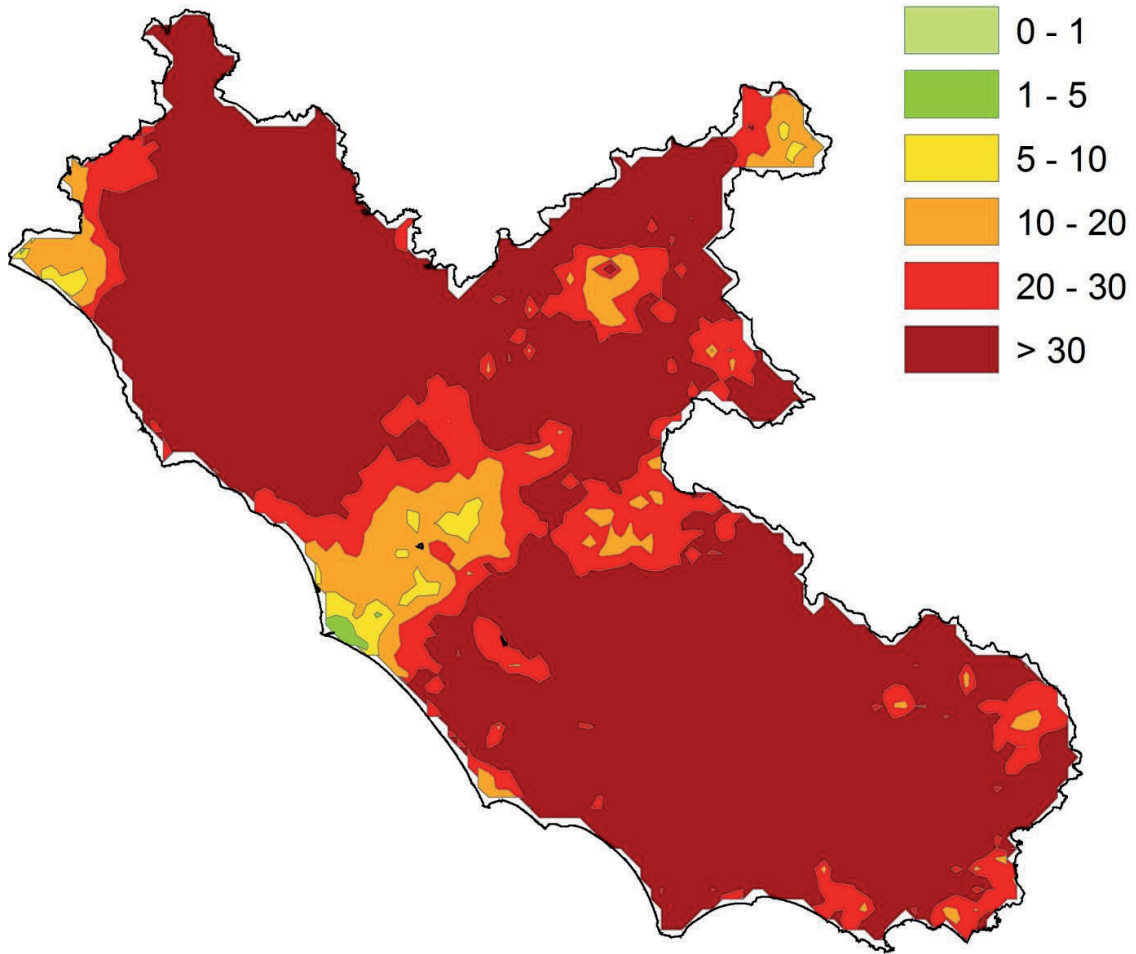
**Stima della frazione (%) di abitazioni che eccedono  
il livello di riferimento  $300 \text{ Bq m}^{-3}$**



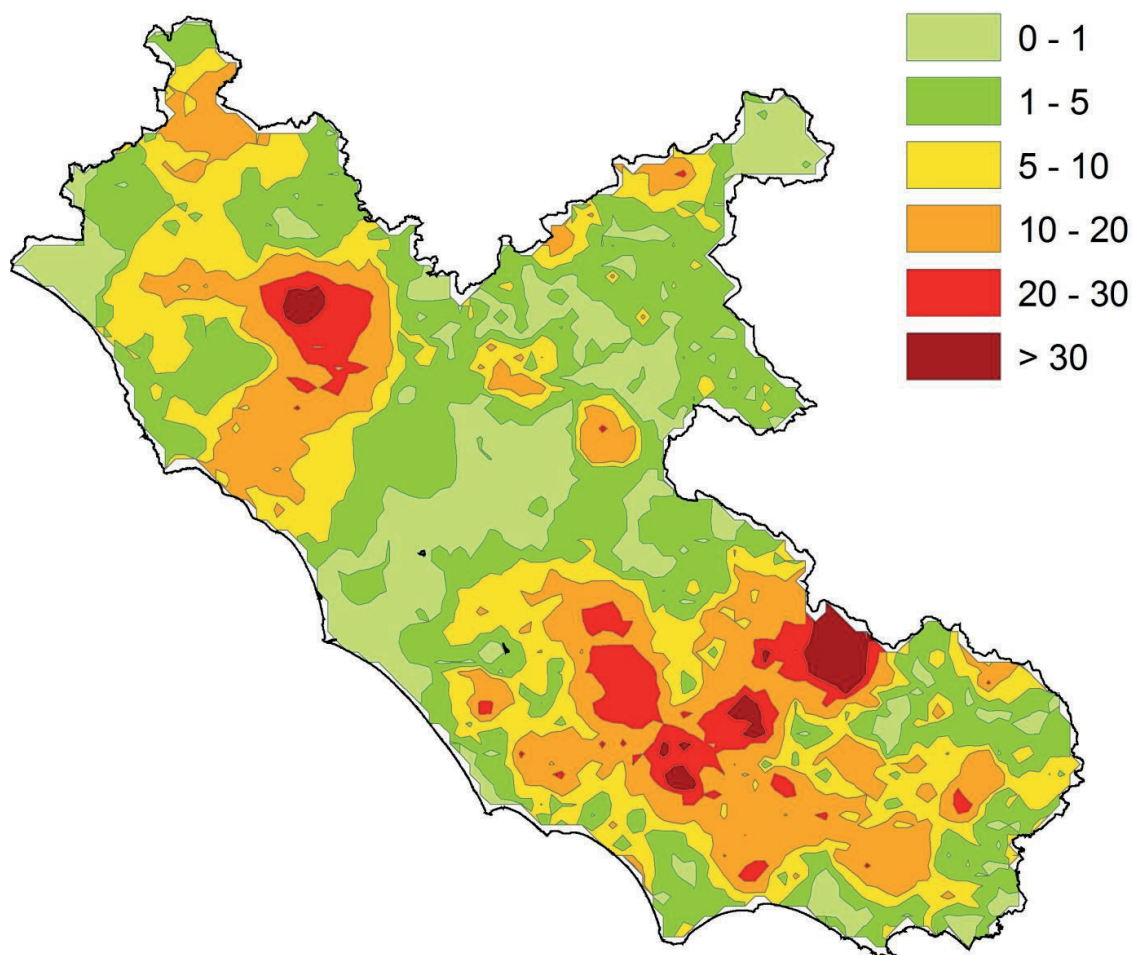
**Stima della frazione (%) di abitazioni che eccedono  
il livello di riferimento  $500 \text{ Bq m}^{-3}$**



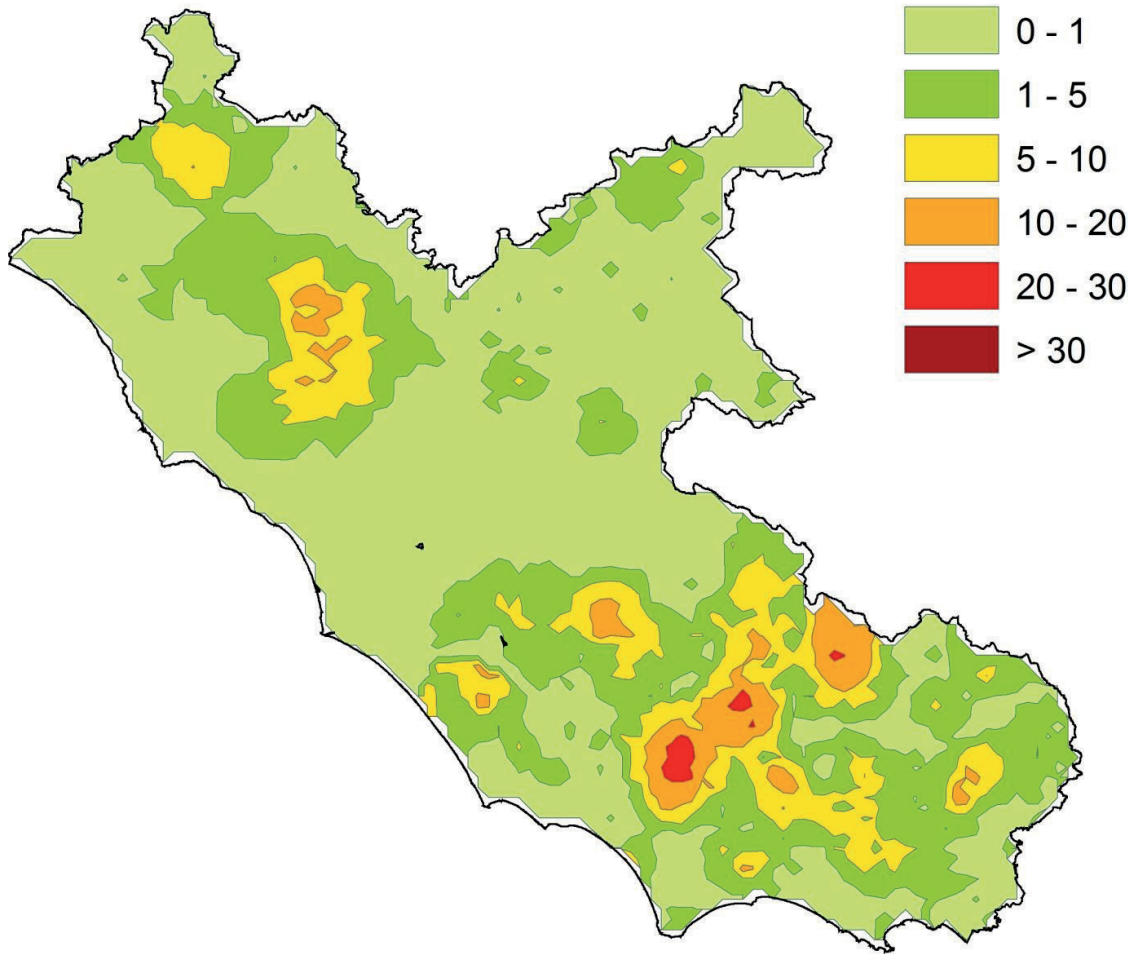
### Stima della probabilità di eccedere il livello di riferimento 100 Bq m<sup>-3</sup>



### Stima della probabilità di eccedere il livello di riferimento 300 Bq m<sup>-3</sup>



### Stima della probabilità di eccedere il livello di riferimento 500 Bq m<sup>-3</sup>





## APPENDICE A

Statistiche descrittive dei risultati delle misure di concentrazione di attività di radon nei comuni con almeno 5 misure che hanno partecipato all'indagine.

COMUNE	PROV	N	Min	Max	Media	Dev.St.	St.Err.	Media Geom. (xi)	Dev. St.Geom. (xi)
ACCUMOLI	RI	14	35	180	79	43	11	70	2
ACQUAFONDATA	FR	8	36	325	148	90	32	124	2
ACQUAPENDENTE	VT	36	21	317	96	60	10	80	2
ACUTO	FR	12	69	520	198	135	39	162	2
AFFILE	RM	9	24	196	86	56	19	71	2
ALATRI	FR	32	14	465	145	141	25	79	3
ALBANO LAZIALE	RM	14	30	198	80	51	14	67	2
ALLUMIERE	RM	13	9	385	129	101	28	93	3
ALVITO	FR	17	19	212	50	44	11	41	2
AMASENO	FR	16	83	505	184	129	32	154	2
AMATRICE	RI	34	23	204	61	37	6	54	2
ANAGNI	FR	22	32	361	122	75	16	102	2
ANGUILLARA SABAZIA	RM	22	21	430	111	110	24	81	2
ANTICOLI CORRADO	RM	9	54	430	141	125	42	110	2
ANTRODOCO	RI	16	23	208	84	60	15	67	2
ANZIO	RM	13	18	155	72	42	12	60	2
APRILIA	LT	44	19	1080	137	164	25	99	2
AQUINO	FR	8	63	376	170	100	35	148	2
ARCE	FR	17	20	286	117	72	17	93	2
ARCINAZZO ROMANO	RM	27	45	313	135	88	17	112	2
ARDEA	RM	8	16	74	48	21	7	43	2
ARICCIA	RM	14	19	228	68	53	14	56	2
ARLENA DI CASTRO	VT	11	29	135	71	42	13	60	2
ARNARA	FR	9	39	297	125	102	34	95	2
ARPINO	FR	17	22	165	68	40	10	59	2
ARSOLI	RM	10	27	274	90	77	24	70	2
ARTENA	RM	7	50	350	155	102	38	130	2
ASCREA	RI	11	40	181	106	42	13	97	2
ATINA	FR	9	67	131	96	23	8	94	1
AUSONIA	FR	19	16	331	85	70	16	67	2
BAGNOREGIO	VT	17	63	392	168	98	24	144	2
BARBARANO ROMANO	VT	7	40	204	92	56	21	79	2
BASSANO IN TEVERINA	VT	13	18	173	72	39	11	63	2
BASSANO ROMANO	VT	9	42	346	134	102	34	106	2
BASSIANO	LT	9	36	1046	273	334	111	160	3
BELLEGRA	RM	7	50	136	73	29	11	70	1
BELMONTE CASTELLO	FR	9	44	357	100	102	34	76	2
BELMONTE IN SABINA	RI	8	31	92	57	21	7	54	1
BLERA	VT	25	29	280	126	66	13	109	2
BOLSENA	VT	22	32	643	143	144	31	102	2

COMUNE	PROV	N	Min	Max	Media	Dev.St.	St.Err.	Media Geom. (xi)	Dev. St.Geom. (xi)
BOMARZO	VT	5	41	356	160	146	65	109	3
BORBONA	RI	15	40	301	112	80	21	92	2
BORGO VELINO	RI	10	18	276	85	79	25	61	2
BORGOROSE	RI	37	20	298	101	76	13	78	2
BOVILLE ERNICA	FR	17	26	215	103	58	14	87	2
BRACCIANO	RM	14	30	320	80	84	23	58	2
BROCCOSTELLA	FR	13	34	195	90	52	15	78	2
CALCATA	VT	8	58	168	105	43	15	98	2
CAMPAGNANO DI ROMA	RM	19	29	189	73	38	9	65	2
CAMPODIMELE	LT	18	37	906	202	234	55	130	2
CAMPOLI APPENNINO	FR	13	22	354	123	92	26	92	2
CANALE MONTERANO	RM	9	64	507	213	154	51	167	2
CANEPINA	VT	13	42	520	158	128	35	123	2
CANINO	VT	8	37	243	92	83	29	69	2
CANTALICE	RI	20	20	196	111	51	11	96	2
CANTALUPO IN SABINA	RI	9	37	147	76	40	13	68	2
CAPENA	RM	5	21	90	51	31	14	44	2
CAPODIMONTE	VT	15	27	966	237	286	74	135	3
CAPRANICA	VT	16	77	947	236	209	52	188	2
CAPRANICA PRENESTINA	RM	5	73	172	120	43	19	114	1
CAPRAROLA	VT	9	65	474	205	153	51	163	2
CARBOGNANO	VT	9	101	568	251	175	58	206	2
CARPINETO ROMANO	RM	8	32	364	119	108	38	89	2
CASALATTICO	FR	9	37	216	116	60	20	101	2
CASALVIERI	FR	16	16	468	105	115	29	65	3
CASAPE	RM	5	21	101	50	34	15	41	2
CASAPROTA	RI	9	20	321	130	105	35	93	2
CASPERIA	RI	15	21	280	115	80	21	93	2
CASSINO	FR	34	5	530	93	92	16	66	2
CASTEL DI TORA	RI	12	34	175	106	50	15	93	2
CASTEL GANDOLFO	RM	10	25	163	53	40	13	45	2
CASTEL MADAMA	RM	9	16	400	77	125	42	38	3
CASTEL S. ELIA	VT	6	77	142	121	24	10	118	1
CASTEL S. PIETRO ROMANO	RM	8	25	165	92	48	17	79	2
CASTEL SANT'ANGELO	RI	9	42	351	128	102	34	100	2
CASTELFORTE	LT	19	21	253	74	50	11	63	2
CASTELLIRI	FR	10	41	195	84	43	14	76	2
CASTELNUOVO DI FARFA	RI	11	34	140	67	33	10	60	2
CASTELNUOVO DI PORTO	RM	17	15	289	82	69	17	61	2
CASTELNUOVO PARANO	FR	7	68	181	136	47	18	128	2
CASTIGLIONE IN TEVERINA	VT	17	35	204	83	41	10	76	2
CASTRO DEI VOLSCI	FR	17	77	322	152	62	15	142	1
CASTROCIELO	FR	14	59	438	154	121	32	121	2
CAVE	RM	11	49	1124	236	327	99	138	3
CECCANO	FR	24	27	332	134	81	17	109	2
CELLENO	VT	11	19	303	138	84	25	111	2



COMUNE	PROV	N	Min	Max	Media	Dev.St.	St.Err.	Media Geom. (xi)	Dev. St.Geom. (xi)
CELLERE	VT	9	29	305	126	81	27	105	2
CEPRANO	FR	9	26	699	243	209	70	163	3
CERRETO LAZIALE	RM	12	46	185	91	44	13	83	2
CERVARA DI ROMA	RM	8	36	150	79	43	15	70	2
CERVARO	FR	10	43	494	115	137	43	83	2
CERVETERI	RM	23	15	321	91	87	18	62	2
CIAMPINO	RM	31	10	950	166	184	33	109	3
CICILIANO	RM	20	37	256	86	58	13	73	2
CISTERNA DI LATINA	LT	40	16	374	122	97	15	88	2
CITTADUCALE	RI	8	28	113	57	28	10	52	2
CITTAREALE	RI	20	28	275	92	59	13	77	2
CIVITA CASTELLANA	VT	31	31	540	130	114	21	101	2
CIVITAVECCHIA	RM	10	13	62	33	18	6	28	2
CIVITELLA D'AGLIANO	VT	5	41	221	94	74	33	76	2
CIVITELLA S. PAOLO	RM	7	36	174	84	54	20	70	2
COLFELICE	FR	10	38	274	144	80	25	121	2
COLLALTO SABINO	RI	10	36	147	79	45	14	68	2
COLLE DI TORA	RI	12	68	256	139	60	17	128	2
COLLE SAN MAGNO	FR	11	24	367	92	96	29	69	2
COLLEFERRO	RM	15	24	358	113	101	26	84	2
COLLEGIOVE	RI	8	31	162	91	48	17	78	2
COLLEPARDO	FR	12	31	451	169	130	38	125	2
COLLEVECCHIO	RI	15	51	239	143	58	15	131	2
COLLI SUL VELINO	RI	11	9	224	71	56	17	55	2
COLONNA	RM	10	26	412	163	140	44	115	2
CONCERVIANO	RI	9	26	154	75	39	13	66	2
CONFIGNI	RI	11	71	219	133	49	15	125	1
CONTIGLIANO	RI	21	27	230	85	53	12	73	2
CORCHIANO	VT	7	65	201	106	50	19	98	2
CORENO AUSONIO	FR	16	18	243	80	61	15	63	2
COTTANELLO	RI	11	41	188	88	49	15	77	2
ESPERIA	FR	39	44	552	178	115	18	152	2
FABRICA DI ROMA	VT	15	68	1252	223	298	77	152	2
FALVATERRA	FR	9	63	278	170	73	24	156	2
FARA IN SABINA	RI	27	16	626	181	108	21	155	2
FARNESE	VT	16	19	188	62	47	12	49	2
FERENTINO	FR	26	37	367	130	77	15	111	2
FIAMIGNANO	RI	13	23	330	84	85	24	61	2
FIANO ROMANO	RM	20	20	201	86	61	14	66	2
FILETTINO	FR	11	53	250	149	69	21	132	2
FIUGGI	FR	15	32	650	193	188	49	136	2
FIUMICINO	RM	30	15	125	56	31	6	47	2
FONDI	LT	34	16	226	71	47	8	58	2
FONTANA LIRI	FR	17	35	286	104	74	18	83	2
FORTECHIARI	FR	10	34	238	95	61	19	80	2
FORANO	RI	11	50	435	156	110	33	130	2
FORMELLO	RM	8	25	176	84	45	16	73	2
FORMIA	LT	25	19	252	90	74	15	67	2
FRASCATI	RM	12	15	736	123	197	57	67	3

COMUNE	PROV	N	Min	Max	Media	Dev.St.	St.Err.	Media Geom. (xi)	Dev. St.Geom. (xi)
FRASSO SABINO	RI	10	21	203	85	66	21	65	2
FROSINONE	FR	25	34	521	125	119	24	94	2
FUMONE	FR	11	53	801	252	234	71	179	2
GAETA	LT	19	18	203	72	56	13	55	2
GALLESE	VT	16	6	245	107	76	19	77	3
GALLICANO NEL LAZIO	RM	12	21	392	104	112	32	70	2
GALLINARO	FR	11	12	165	73	48	14	56	2
GAVIGNANO	RM	12	23	368	126	117	34	89	2
GENAZZANO	RM	15	21	446	147	126	33	104	2
GENZANO	RM	13	14	183	56	52	14	41	2
GERANO	RM	9	45	178	79	43	14	72	2
GIULIANO DI ROMA	FR	17	55	340	130	80	19	111	2
GORGA	RM	7	36	376	113	124	47	77	2
GRADOLI	VT	10	15	218	84	56	18	69	2
GRAFFIGNANO	VT	13	31	116	79	23	6	75	1
GRECCIO	RI	14	47	341	174	97	26	147	2
GROTTAFERRATA	RM	21	29	541	106	109	24	79	2
GROTTE DI CASTRO	VT	10	15	146	63	40	13	51	2
GUARCINO	FR	20	40	404	145	98	22	120	2
GUIDONIA MONTECELIO	RM	19	17	190	86	53	12	67	2
ISOLA DEL LIRI	FR	14	26	197	91	56	15	76	2
ITRI	LT	19	10	297	74	64	15	58	2
JENNE	RM	8	74	293	132	74	26	119	2
LABICO	RM	11	58	553	198	173	52	144	2
LABRO	RI	15	21	163	70	50	13	55	2
LADISPOLI	RM	7	15	362	81	125	47	43	3
LANUVIO	RM	10	24	482	131	178	56	70	3
LARIANO	RM	11	29	255	94	73	22	73	2
LATERA	VT	8	37	664	153	210	74	96	2
LATINA	LT	65	10	414	104	81	10	79	2
LENOLA	LT	20	49	258	122	55	12	110	2
LEONESSA	RI	46	20	581	125	121	18	90	2
LICENZA	RM	6	20	97	52	28	11	46	2
LUBRIANO	VT	9	54	177	112	48	16	102	2
MAENZA	LT	10	38	504	150	148	47	103	2
MAGLIANO ROMANO	RM	10	40	203	100	48	15	91	2
MAGLIANO SABINA	RI	17	40	255	141	78	19	118	2
MANDELA	RM	8	22	205	98	60	21	80	2
MANZIANA	RM	9	36	220	130	68	23	111	2
MARANO EQUO	RM	7	34	103	68	25	9	64	1
MARCELLINA	RM	9	20	232	69	70	23	49	2
MARCETELLI	RI	9	20	93	51	30	10	44	2
MARINO	RM	15	16	160	66	38	10	56	2
MARTA	VT	5	46	173	113	57	26	99	2
MENTANA	RM	10	18	126	54	34	11	45	2
MICIGLIANO	RI	11	34	108	69	25	8	65	1
MINTURNO	LT	28	24	208	74	47	9	61	2
MOMPEO	RI	12	41	214	112	65	19	95	2
MONTALTO DI CASTRO	VT	22	19	149	62	33	7	53	2

COMUNE	PROV	N	Min	Max	Media	Dev.St.	St.Err.	Media Geom. (xi)	Dev. St.Geom. (xi)
MONTASOLA	RI	11	34	177	91	44	13	82	2
MONTE PORZIO CATONE	RM	13	27	394	128	116	32	87	3
MONTE ROMANO	VT	12	42	199	115	52	15	104	2
MONTE SAN BIAGIO	LT	23	36	392	139	99	21	112	2
MONTE SAN GIOVANNI CAMPANO	FR	24	36	530	159	124	25	124	2
MONTE SAN GIOVANNI IN SABINA	RI	19	22	591	111	126	29	81	2
MONTEBUONO	RI	18	42	338	108	76	18	91	2
MONTECOMPATRI	RM	15	38	786	129	184	48	89	2
MONTEFIASCONE	VT	39	40	515	132	91	14	112	2
MONTEFLAVIO	RM	11	44	190	114	43	13	106	2
MONTELANICO	RM	5	23	353	111	139	62	64	3
MONTELEONE SABINO	RI	12	42	168	99	45	13	90	2
MONTELIBRETTI	RM	19	16	117	55	27	6	48	2
MONTENERO SABINO	RI	14	35	418	121	105	28	94	2
MONTEROSI	VT	10	49	287	137	74	24	121	2
MONTEROTONDO	RM	13	17	177	71	54	15	53	2
MONTOPOLI DI SABINA	RI	18	25	204	82	51	12	70	2
MONTORIO ROMANO	RM	6	37	116	70	36	15	63	2
MORICONE	RM	8	22	94	45	24	8	40	2
MOROLO	FR	13	50	1617	403	490	136	218	3
MORRO REATINO	RI	16	26	466	153	132	33	111	2
NAZZANO	RM	6	20	123	62	35	14	54	2
NEMI	RM	16	25	553	137	136	34	98	2
NEPI	VT	12	65	2075	326	559	161	176	3
NEROLA	RM	9	14	107	62	30	10	54	2
NESPOLO	RI	14	23	204	81	48	13	69	2
NETTUNO	RM	29	11	98	49	23	4	43	2
NORMA	LT	5	50	293	113	102	45	89	2
ORIOLO ROMANO	VT	15	27	1529	360	434	112	224	3
ORTE	VT	18	21	148	68	42	10	56	2
ORVINIO	RI	12	51	347	148	91	26	124	2
PAGANICO SABINO	RI	10	40	199	91	59	19	78	2
PALESTRINA	RM	8	44	1404	280	467	165	127	3
PALIANO	FR	25	5	145	66	41	8	48	3
PALOMBARA SABINA	RM	11	13	190	55	53	16	39	2
PASTENA	FR	9	108	555	243	135	45	217	2
PATRICA	FR	9	41	674	278	256	85	177	3
PERCILE	RM	7	40	213	97	60	23	83	2
PESCOROCCHIANO	RI	25	37	496	95	96	19	74	2
PESCOSOLIDO	FR	13	25	243	109	70	19	88	2
PETRELLA SALTO	RI	15	21	236	112	66	17	90	2
PIANSANO	VT	17	23	219	63	48	12	52	2
PICINISCO	FR	14	30	227	70	49	13	61	2
PICO	FR	14	37	375	140	89	24	116	2
PIEDIMONTE SAN GERMANO	FR	11	8	585	192	190	57	110	4
PIGLIO	FR	24	36	234	140	60	12	126	2

COMUNE	PROV	N	Min	Max	Media	Dev.St.	St.Err.	Media Geom. (xi)	Dev. St.Geom. (xi)
PIGNATARO INTERAMNA	FR	15	23	381	106	94	24	78	2
POFI	FR	13	45	354	157	95	26	130	2
POGGIO BUSTONE	RI	6	30	210	81	66	27	66	2
POGGIO CATINO	RI	13	41	161	90	39	11	83	2
POGGIO MIRTETO	RI	14	37	379	135	110	29	102	2
POGGIO NATIVO	RI	12	23	170	75	47	14	63	2
POGGIO SAN LORENZO	RI	11	33	263	137	90	27	106	2
POLI	RM	8	18	128	63	36	13	53	2
POMEZIA	RM	9	15	103	54	32	11	45	2
PONTECORVO	FR	18	7	259	119	85	20	77	3
PONTINIA	LT	11	84	205	130	36	11	126	1
PONZA	LT	24	20	278	93	65	13	77	2
PONZANO ROMANO	RM	7	23	209	103	63	24	85	2
POSTA	RI	19	36	193	93	49	11	82	2
POSTA FIBRENO	FR	7	29	201	96	65	25	77	2
POZZAGLIA SABINA	RI	12	44	125	94	26	7	90	1
PRIVERNO	LT	17	32	458	142	122	30	105	2
PROCENO	VT	7	57	143	103	31	12	99	1
PROSEDI	LT	13	34	288	106	79	22	84	2
RIANO	RM	18	32	147	72	33	8	66	2
RIETI	RI	50	6	325	81	67	10	61	2
RIGNANO FLAMINIO	RM	7	23	211	83	62	24	67	2
RIPI	FR	7	44	275	116	83	31	94	2
RIVODUTRI	RI	12	24	208	102	65	19	80	2
ROCCA CANTERANO	RM	7	34	356	128	125	47	88	2
ROCCA D'ARCE	FR	13	29	302	109	87	24	85	2
ROCCA DI PAPA	RM	12	51	2154	311	587	169	153	3
ROCCA MASSIMA	LT	12	82	1692	368	434	125	256	2
ROCCA PRIORA	RM	6	110	276	194	69	28	183	1
ROCCA S. STEFANO	RM	9	9	167	83	51	17	65	2
ROCCA SINIBALDA	RI	16	27	348	112	80	20	93	2
ROCCAGIOVINE	RM	9	84	323	134	74	25	122	2
ROCCAGORGA	LT	18	34	298	90	71	17	74	2
ROCCANTICA	RI	17	21	248	89	56	14	74	2
ROCCASECCA DEI VOLSCI	LT	10	57	364	134	93	29	114	2
ROIATE	RM	15	40	174	82	38	10	75	2
ROMA	RM	188	5	365	62	58	4	45	2
RONCIGLIONE	VT	13	44	1806	419	483	134	259	3
ROVIANO	RM	8	44	286	97	79	28	81	2
S. GREGORIO DA SASSOLA	RM	11	24	315	98	78	23	80	2
S. LORENZO NUOVO	VT	9	35	437	222	138	46	176	2
S. MARINELLA	RM	15	18	404	95	98	25	65	2
S. ORESTE	RM	12	28	400	109	105	30	81	2
S. POLO DEI CAVALIERI	RM	6	44	159	95	42	17	86	2
S. VITO ROMANO	RM	12	16	159	65	47	14	52	2
SABAUDIA	LT	22	26	434	113	96	21	85	2
SALISANO	RI	9	26	374	145	134	45	95	3

COMUNE	PROV	N	Min	Max	Media	Dev.St.	St.Err.	Media Geom. (xi)	Dev. St.Geom. (xi)
SAMBUCI	RM	9	33	88	67	17	6	65	1
SAN BIAGIO SARACINISCO	FR	13	37	92	60	17	5	57	1
SAN CESAREO	RM	5	38	67	58	11	5	57	1
SAN DONATO VAL DI COMINO	FR	15	33	665	193	187	48	130	2
SAN GIORGIO A LIRI	FR	13	4	231	124	77	21	91	3
SAN GIOVANNI INCARICO	FR	11	44	886	190	240	72	129	2
SAN VITTORE DEL LAZIO	FR	21	25	246	87	51	11	76	2
SANT'AMBROGIO SUL GARIGLIANO	FR	19	31	344	83	71	16	69	2
SANT'ANDREA DEL GARIGLIANO	FR	18	30	280	87	60	14	75	2
SANT'APOLLINARE	FR	10	25	154	83	44	14	72	2
SANT'ELIA FIUMERAPIDO	FR	16	6	239	74	61	15	53	2
SANTI COSMA E DAMIANO	LT	16	5	220	86	70	17	57	3
SANTOPADRE	FR	12	29	357	107	90	26	84	2
SCANDRIGLIA	RI	14	30	383	167	113	30	129	2
SEGNI	RM	9	43	1098	290	367	122	145	3
SELCI	RI	9	29	215	104	52	17	92	2
SERMONETA	LT	23	11	589	206	159	33	145	3
SERRONE	FR	14	47	363	117	80	21	100	2
SETTEFRATI	FR	8	58	276	110	74	26	95	2
SEZZE	LT	32	53	842	274	223	39	210	2
SONNINO	LT	14	48	225	107	44	12	99	1
SORA	FR	21	14	302	101	76	17	76	2
SORIANO NEL CIMINO	VT	26	41	411	141	84	17	121	2
SPERLONGA	LT	12	20	227	92	69	20	68	2
SPIGNO SATURNIA	LT	12	16	328	101	101	29	70	2
STRANGOLAGALLI	FR	5	79	358	176	108	48	154	2
SUBIACO	RM	21	27	146	82	34	7	75	2
SUPINO	FR	13	59	987	298	290	80	196	3
SUTRI	VT	17	42	1544	271	366	89	162	3
TARANO	RI	8	41	180	86	48	17	76	2
TARQUINIA	VT	26	8	415	125	94	18	88	3
TERELLE	FR	12	73	1284	237	335	97	158	2
TERRACINA	LT	44	28	1129	123	173	26	86	2
TESSENNANO	VT	9	63	232	132	53	18	122	2
TIVOLI	RM	16	14	158	60	44	11	45	2
TOFFIA	RI	12	6	189	89	61	18	66	3
TORRE CAJETANI	FR	8	161	262	201	37	13	198	1
TORRI IN SABINA	RI	10	21	212	80	55	17	66	2
TORRICE	FR	10	43	304	154	83	26	132	2
TORRICELLA IN SABINA	RI	10	27	250	107	73	23	84	2
TORRITA TIBERINA	RM	12	20	167	61	46	13	48	2
TREVI NEL LAZIO	FR	14	92	563	196	122	33	173	2
TREVIGNANO ROMANO	RM	10	56	1097	207	317	100	124	2

COMUNE	PROV	N	Min	Max	Media	Dev.St.	St.Err.	Media Geom. (xi)	Dev. St.Geom. (xi)
TURANIA	RI	17	20	105	56	24	6	52	2
TUSCANIA	VT	16	24	446	148	123	31	110	2
VACONE	RI	11	71	246	145	52	16	136	1
VALENTANO	VT	9	27	294	107	92	31	80	2
VALLECORSA	FR	17	17	863	209	199	48	146	2
VALLEMAIO	FR	12	9	173	68	50	14	51	2
VALLEPIETRA	RM	13	31	219	65	49	14	55	2
VALLERANO	VT	9	50	367	206	122	41	167	2
VALLEROTONDA	FR	16	31	607	101	141	35	66	2
VARCO SABINO	RI	13	39	245	85	56	15	74	2
VASANELLO	VT	13	19	368	136	108	30	103	2
VEJANO	VT	7	59	171	115	39	15	109	1
VELLETRI	RM	26	12	444	104	84	16	81	2
VENTOTENE	LT	15	44	204	102	40	10	95	1
VEROLI	FR	25	68	651	332	178	36	282	2
VETRALLA	VT	21	64	501	197	139	30	160	2
VICALVI	FR	7	70	211	108	50	19	100	1
VICO NEL LAZIO	FR	9	71	599	213	176	59	163	2
VICOVARO	RM	7	48	166	96	49	18	87	2
VIGNANELLO	VT	9	65	212	137	52	17	128	2
VILLA LATINA	FR	11	46	172	91	44	13	82	2
VILLA S. GIOVANNI IN TUSCIA	VT	13	65	360	159	81	23	143	2
VILLA SANTA LUCIA	FR	14	36	716	211	218	58	140	3
VILLA SANTO STEFANO	FR	9	159	1953	513	578	193	352	2
VITERBO	VT	91	21	869	143	135	14	105	2
VITICUSO	FR	14	34	1000	230	268	72	141	3
VITORCHIANO	VT	8	53	248	102	66	23	88	2
ZAGAROLO	RM	5	59	311	168	95	42	145	2

---

## METADATI

<b>Titolo</b>	IL MONITORAGGIO DEL GAS RADON NEL LAZIO
<b>Autore</b>	ARPA Lazio ; ISPRA
<b>Soggetto</b>	Radon – Rapporti tecnici
<b>Descrizione</b>	Il report illustra le campagne di monitoraggio del radon svolte nella regione Lazio dall'ISPRA e dall'ARPA Lazio nel periodo 2003-2011
<b>Editore</b>	ARPA Lazio
<b>Autore di contributo subordinato</b>	Di Giosa, Alessandro Domenico ; Salvi, Francesco ; Torri, Giancarlo
<b>Data</b>	12/09/2013
<b>Tipo</b>	Report
<b>Formato</b>	Cartaceo, elettronico
<b>Identificatore</b>	Report_2013_DT0.DAI_02
<b>Lingua</b>	IT
<b>Copertura</b>	Italia
<b>Gestione dei diritti</b>	©ARPA Lazio – Rieti 2013

IMPAGINAZIONE E STAMPA

**TIBURTINI**   
CARATTERE TIPOGRAFICO  
[tiburtini.it](http://tiburtini.it)