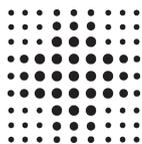


PREVENZIONE NEI LUOGHI DI VITA E DI LAVORO



SERVIZIO SANITARIO REGIONALE
EMILIA-ROMAGNA

Il radon ambientale in Emilia-Romagna

contributi

51



Regione Emilia-Romagna

Redazione e impaginazione a cura di:

Laura Gaidolfi – Sezione Provinciale di Piacenza – ARPA Emilia-Romagna

Paola Angelini, Rossana Mignani - Direzione Generale Sanità e politiche sociali, Regione Emilia-Romagna

Stampa Litografia Pignacca - Piacenza ottobre 2007

Eliofototecnica Barbieri – Bologna ottobre 2007

Copia del volume può essere richiesta a:

Rossana Mignani - Regione Emilia-Romagna

Viale Aldo Moro, 21 – 40127 Bologna

e-mail: rmignani@regione.emilia-romagna.it

oppure può essere scaricata dal sito

http://www.saluter.it/wcm/saluter/pubblicazioni/tutte_le_pubblicazioni/altre_collane/contributi.htm

Il presente volume, che riassume lo stato attuale delle conoscenze sul radon ambientale in Emilia-Romagna, è stato realizzato grazie alla collaborazione e alle esperienze condotte nell'ambito del gruppo di lavoro multidisciplinare attivato dalla Regione.

Si ringraziano in particolare i componenti del gruppo di lavoro:

Paola Angelini, *Regione Emilia-Romagna – Servizio Sanità pubblica*

Giovanni Bettelli, *Università di Modena e Reggio Emilia – Dipartimento di Scienze della terra*

Roberto Bruno, *Università di Bologna – Dipartimento di Ingegneria chimica, mineraria e delle tecnologie ambientali*

Laura Gaidolfi, *ARPA – Sezione provinciale di Piacenza*

Carlo Gorgoni, *Università di Modena e Reggio Emilia – Dipartimento di Scienze della terra*

Luca Martelli, *Regione Emilia-Romagna – Servizio Geologico, sismico e dei suoli*

Giovanni Martinelli, *ARPA – Sezione provinciale di Reggio Emilia*

Roberto Sogni, *ARPA – Sezione provinciale di Piacenza*

Laura Tositti, *Università degli studi di Bologna – Dipartimento di chimica “G.Ciamician”*

Silvia Vaccari, *Università degli studi di Parma – Servizio di Fisica sanitaria*

Paolo Tori, *Regione Emilia-Romagna – Servizio Sanità pubblica*

La natura nasconde i propri segreti perché è sublime, non perché imbroglia.

Albert Einstein

INTRODUZIONE	7
1 VALUTAZIONI PRELIMINARI SUL MATERIALE BIBLIOGRAFICO UTILE PER UNA CARTOGRAFIA DEL POTENZIALE RADON DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA	11
2 MISURE DI RADON INDOOR NELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA	15
3 INDAGINI GEOLOGICHE PER LA CONOSCENZA E LA PREVENZIONE DEL RISCHIO “RADON”	35
4 LA RADIOATTIVITÀ NELLE ROCCE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA	41
5 IL RADON NELLE ACQUE SOTTERRANEE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA	51
6 ATTIVITA’ DEGASSANTI NELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA	57
7 ANALISI GEOSTATISTICA DELLA DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLE CONCENTRAZIONI DI RADON	63
CONCLUSIONI	93

INTRODUZIONE

Paola Angelini, Servizio Sanità Pubblica Regione Emilia-Romagna

Il radon è un gas radioattivo presente in natura, chimicamente inerte, inodore, incolore e privo di sapore. E' prodotto dal radio nella catena di decadimento dell'uranio, elemento presente in quantità variabili in tutte le rocce e nel suolo.

Quando il gas radon si libera dal sottosuolo passando nell'aria, i suoi prodotti di decadimento, che emettono radiazioni alfa, possono aderire agli aerosol, alla polvere e ad altre particelle presenti nell'aria che respiriamo così da riuscire a depositarsi nelle cellule di rivestimento delle vie aeree dove le particelle alfa possono esplicare la loro azione dannosa. In particolare, se inalato, il gas radon può indurre nelle cellule polmonari danni al DNA. Studi di mutagenesi cellulare, ricerche sperimentali su animali in vivo e studi epidemiologici su coorti occupazionali e residenziali, hanno stabilito che l'esposizione a radon può indurre tumore polmonare. Sin dal 1988 l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ha classificato il radon tra i cancerogeni accertati del gruppo I, per i quali vi è la massima evidenza di cancerogenicità ⁽¹⁾.

Per questo motivo in molti paesi, soprattutto in Europa e nel nord-America sono state attivate politiche sanitarie finalizzate alla riduzione di questo rischio.

Per quanto riguarda le abitazioni, il documento di riferimento risulta la Raccomandazione 90/143/EURATOM ⁽²⁾ rivolta alla tutela della popolazione; per la tutela dal rischio radon indoor nelle abitazioni la Raccomandazione stabilisce due livelli di azione distinti: uno per gli edifici da costruire, pari a 200 Bq/m³, ed uno per quelli esistenti, corrispondente a 400 Bq/m³.

L'Unione Europea (UE) ha successivamente emanato la direttiva 96/29/EURATOM ⁽³⁾ che al Titolo VII si occupa dell'esposizione a radiazioni ionizzanti da sorgenti naturali nei luoghi di lavoro.

In Italia la Direttiva 96/29/EURATOM è stata recepita con il D. Lgs. 241/00 ⁽⁴⁾ che ha modificato il D.Lgs. 230/95 introducendo per l'appunto un Capo dedicato alla tutela dal rischio radioattività naturale nei luoghi di lavoro. In particolare è stato introdotto l'obbligo per le Regioni di individuare le aree del territorio in cui ci sia un'elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon. Una volta individuate, in queste aree, tutti i luoghi di lavoro sarebbero soggetti a misurazioni della concentrazione di attività di radon media annua per la verifica del rispetto del livello di azione fissato in 500 Bq/m³.

Per quanto riguarda il rischio radon indoor nelle abitazioni invece la normativa italiana non prevede alcun obbligo.

Considerato il già citato rischio sanitario associato al radon e tenuto conto che in Italia i casi di tumore polmonare correlati a questa esposizione sono stimati in un numero compreso tra 1500 e 6000 all'anno, il Ministero della Salute, tramite il Centro Nazionale per la Prevenzione e il Controllo delle Malattie (CCM), ha attivato nel 2005 una collaborazione con l'Istituto Superiore di Sanità (ISS), per dare avvio ad un Piano Nazionale Radon.

In questo contesto si colloca la scelta della Regione Emilia-Romagna di attivare uno specifico gruppo di lavoro, finalizzato ad una lettura integrata delle informazioni già disponibili in regione rispetto al rischio radon e alla eventuale progettazione delle azioni da mettere in atto per arrivare all'identificazione delle aree del territorio ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon, ai sensi dell'art. 10-sexies del D. Lgs. 230/95 come modificato dal D. Lgs. 241/00.

La disponibilità di mappe che identifichino aree a maggiore presenza di radon, comunemente indicate con il termine inglese "*radon prone areas*", è essenziale per sviluppare strategie di contenimento di questo rischio. Queste mappe sono utili per facilitare l'individuazione di aree in cui è probabile che gli edifici accumulino radon in concentrazioni superiori alla media, ovvero in cui la percentuale di edifici con elevate concentrazioni di radon indoor supera un determinato livello

soglia. La disponibilità di queste informazioni rende più facile l'identificazione delle zone su cui attivare future campagne di monitoraggio, ottimizzando così l'uso delle risorse.

Per quanto riguarda l'individuazione delle aree a maggior rischio radon esistono essenzialmente due approcci: ci si può basare esclusivamente su misure di radon indoor (vedi ICRP ⁽⁵⁾), oppure si può fare riferimento a dati geologici come il contenuto di uranio e radio nelle rocce, la presenza di radon nelle acque e nei gas naturali, oppure di fattori che facilitano l'emanazione del gas quali permeabilità del suolo o altro.

La Commissione Europea ha promosso un'indagine nei paesi E.U. per acquisire informazioni sui progetti, realizzati o in corso, di mappatura del rischio radon, nonché sulle modalità di individuazione delle aree, finanziando un apposito progetto, ERRICCA 2 ⁽⁶⁾. Dal rapporto del marzo 2005 risulta che molti paesi europei hanno svolto indagini basandosi in alcuni casi solo su misure di radon indoor (ad es. il Regno Unito) e in altri solo su dati geologici (ad es. Repubblica Ceca e Germania).

Mettendo a confronto i due metodi si possono evidenziare in entrambi vantaggi e limiti. Le mappe che si basano solo su dati geologici non sono indicatori affidabili della concentrazione indoor di radon, che può dipendere da molti fattori di natura non geologica, legati più alle modalità costruttive. L'approccio basato solo su misure indoor può essere invece non efficiente rispetto alle informazioni necessarie, perché richiede un numero molto elevato di misure negli edifici, molte delle quali possono risultare a posteriori eseguite in zone a bassissimo rischio radon.

Per i motivi sopra esposti il gruppo di lavoro attivato dalla Regione Emilia-Romagna ha deciso di procedere *in primis* ad una lettura integrata di tutte le informazioni disponibili sulla geologia del territorio rispetto al rischio radon e sulle concentrazioni del gas indoor misurate in precedenti campagne svoltesi nel corso degli anni '90.

L'obiettivo di questa lettura integrata era quello di valutare lo stato delle conoscenze ai fini dell'identificazione di parti del territorio regionale da considerare a maggior rischio e su cui eventualmente attivare delle indagini specifiche di approfondimento.

Il presente documento, che descrive per esteso il lavoro del gruppo, si struttura in 7 capitoli.

Dopo l'introduzione un capitolo è dedicato alla valutazione del materiale bibliografico disponibile; seguono capitoli che riportano dati di misura delle concentrazioni di radon in diverse matrici (indoor edifici, acque, rocce, gas) e la descrizione della geologia del territorio regionale, con una proposta di classificazione dell'Appennino emiliano-romagnolo sulla base delle caratteristiche litologiche che possono influenzare il contenuto di precursori del radon nei suoli.

Infine viene illustrata l'analisi geostatistica svolta, che rappresenta il momento di integrazione dei vari dati.

A questi materiali si aggiungono le conclusioni, condivise dagli autori del presente volume, a sintesi del lavoro compiuto e per delineare le prospettive future di approfondimento.

Il testo è corredato da 4 mappe cartografiche riferite ad alcune delle analisi descritte nei capitoli e da un CD contenente, oltre a copia del documento, il data base dei dati ambientali associati alle varie matrici, usate dal gruppo di lavoro per le elaborazioni statistiche.

BIBLIOGRAFIA

⁽¹⁾ WHO-IARC (World Health Organization – International Agency for Research on Cancer) (1988) “IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Man-made mineral fibres and Radon” IARC Monograph, Vol. 43, Lyon France

- (2) CEC (Commissione della Comunità Europea) (1990) “*Raccomandazione della Commissione del 21-02-90 sulla tutela della popolazione contro l’esposizione al Radon in ambienti chiusi*” (90/143/Euratom), G.U. della C.E. L80, 26-28
- (3) Direttiva 96/29/EURATOM del Consiglio, del 13 maggio 1996 che stabilisce le *norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti* G.U. della C.E. L159 del 26 giugno 1996
- (4) Decreto Legislativo 26 maggio 2000 n. 241 “*Attuazione della Direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti*” Supplemento ordinario alla G.U. della R.I. n. 203 del 31 agosto 2000, Serie generale
- (5) ICRP (International Commission on Radiological Protection) (1993), “*Protection against Radon-222 at home and at work*”, ICRP Publication 65, Annals of the ICRP 23 (2), Pergamon Press, Oxford
- (6) FIFTH FRAMEWORK PROGRAMME ERRICCA 2 European Radon Research and Industry Collaboration Concerted Action CONTRACT NO: FIRI-CT-2001-20142
Sito web <http://european.radon.ntua.gr/index.html>

1. VALUTAZIONI PRELIMINARI SUL MATERIALE BIBLIOGRAFICO UTILE PER UNA CARTOGRAFIA DEL POTENZIALE RADON DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Giovanni Martinelli, ARPA – Sezione provinciale di Reggio Emilia

1.1 Introduzione

Ad oggi non esiste ancora uno standard definito a livello internazionale per la mappatura del “Potenziale Radon”.

La letteratura scientifica internazionale riporta due metodologie fondamentali di rilevamento e di rappresentazione; la prima fa riferimento alla mappatura del radon indoor, cioè al radon misurato nelle abitazioni.

Si tratta del metodo più utilizzato e che, anche per la relativa semplicità di rilevamento, ha permesso di descrivere nei tratti fondamentali vaste aree di territorio negli U.S.A, in U.K. ecc., della regione Veneto ⁽¹⁾, della provincia di Bolzano ⁽²⁾, ecc.

La seconda fa riferimento al radon (e ai radionuclidi radon generatori) misurato nei suoli o nelle rocce delle aree geografiche oggetto di interesse.

Esiste un generale consenso sulla correlazione che lega la concentrazione di radon nei suoli e quella rilevata negli edifici.

La correlazione osservata permette di stabilire che il radon misurato nelle abitazioni è soprattutto generato dalla situazione geologica locale, mentre non è sempre confermabile la relazione opposta e ciò è dovuto ai materiali utilizzati nelle costruzioni.

Nella regione Emilia-Romagna, da oltre 50 anni il materiale utilizzato nelle costruzioni non deriva direttamente da formazioni geologiche locali; ad es., le cave di marne cementizie sono praticamente esaurite da oltre trenta anni ed il cemento utilizzato localmente viene quindi fabbricato con argille e calcari opportunamente trattati e leganti di provenienza estera, a volte caratterizzati da concentrazioni relativamente elevate in Bario e Ra226, quest’ultimo vicariante del Bario.

La metodologia che fa riferimento alla mappatura del radon indoor non ha quindi sufficiente “capacità predittiva” sui nuovi insediamenti sia che avvengano in territori abitati o non abitati in precedenza.

Le rocce e le strutture geologiche presenti nel territorio della regione Emilia-Romagna ⁽³⁾ indicano che la concentrazione in U totale può essere compresa nel range 0.1 - 3.7 ppm ⁽⁴⁾, mentre il Ra226 può essere presente in concentrazioni comprese nel range 25-75 Bq/kg ⁽⁵⁾. Tali valori sono congruenti con alcune misurazioni di U e Ra nelle rocce locali effettuate da Martinelli e Ferrari ⁽⁶⁾ e con quelli derivati da una campagna di misure organizzata all’interno del gruppo di lavoro e descritta nel capitolo 4.

Le condizioni geologiche della regione Emilia-Romagna sono state descritte da numerosi Autori e descritte in dettaglio nelle varie edizioni della Cartografia Regionale. Le conoscenze attuali indicano una forte preponderanza e relativa uniformità composizionale di rocce sedimentarie di vario genere come argille, arenarie, calcari ecc., tuttavia, tramite misurazioni di radon indoor, sono state evidenziate ⁽⁷⁾ aree relativamente anomale, non completamente giustificate dalla situazione litologica. Una parte delle anomalie riscontrate è stata confermata utilizzando metodologie di ricerca promosse anche da ANPA ⁽⁸⁾ su aree campione del territorio nazionale che tengono in considerazione anche la situazione geologica locale e le eventuali emanazioni gassose.

Gli adempimenti delle Regioni in materia di Programmazione Territoriale prevedono l’impiego di basi informative di vario genere e una cura particolare è dedicata al loro aggiornamento e al loro dettaglio descrittivo. Le specificità di governo delle attuali competenze di carattere regionale suggeriscono l’integrazione delle indagini effettuate con ulteriori basi informative che possono

essere approntate tramite la metodologia che fa riferimento alla situazione geologica dell'area oggetto dello studio.

1.2 Studi di carattere cartografico a livello internazionale

E' stata verificata la produzione scientifica degli ultimi 20 anni tramite le banche dati disponibili in rete ai siti specializzati "www.ingenta.com" e "www.scirus.com" relativamente alla mappatura del "Potenziale Radon" con metodi di carattere geologico.

Sono stati compiuti approfondimenti bibliografici verificando materiali cartacei relativi alle fondamentali sedi di confronto di carattere internazionale sull'argomento; nell'ambito di questa attività di studio bibliografico sono state verificate ed escluse sia le produzioni derivanti esclusivamente da ambienti di ricerca, in quanto prive di concreta applicazione territoriale, sia le produzioni relative a contesti ambientali di carattere non E.U. in quanto prive delle necessaria omogeneità in materia di Programmazione del Territorio.

Una buona descrizione delle metodologie di possibili utilizzazione è controllabile presso i siti Web:

"<http://www.asn.fr/sections/rubriquesprincipales/publications/dossiers-controle/liste-numeros-controle>"

"http://nts2.cgu.cz/servlet/page?_pageid=350,366,358&_dad=portal30&_schema=PORTAL30"
relativi ad applicazioni effettuate rispettivamente in Francia e nella Repubblica Ceca.

I riscontri effettuati indicano che le istituzioni governative di carattere locale o nazionale hanno finanziato e adottato metodologie con i requisiti di quelle ricercate in Belgio (Vallonia), Germania, Repubblica Ceca, Francia (Bretagna).

Nella produzione verificata esistono diversificazioni dovute alle diverse scale di rappresentazione e alle diversità geologiche locali; esistono tuttavia alcune caratteristiche comuni che indicano i parametri su cui esiste generale consenso.

In tutti i casi verificati sono state effettuate misurazioni di radon nei gas del suolo alla profondità di 50-80 cm e sono state compiute analisi dei radionuclidi radon-generatori nelle rocce e nei suoli con densità campionaria adeguata a quella adottata per il radon; inoltre, sono state effettuate valutazioni relative alla permeabilità dei suoli.

In tutti i casi vengono trattate con opportuno raffittimento campionario e adeguate metodologie di indagine le faglie, le sorgenti di acqua ecc.

Le densità statistiche di campionamento sono:

- Repubblica Ceca – Scala di rappresentazione 1: 200.000
1 misura ogni 7 km² circa ⁽⁹⁾
- Belgio- Scala di rappresentazione 1: 25.000
1 misura ogni 1 km² ⁽¹⁰⁾
- Germania- Scala di rappresentazione 1: 800.000
1 misura ogni 12 km² ^{(11), (12)}
- Francia- Scala di rappresentazione 1: 50.000
1 misura ogni 1 km² ⁽¹³⁾

1.3 Conclusioni

La produzione cartografica sul radon indica che scale di rappresentazione di elevato dettaglio sono state adottate solo in casi di accertata presenza di elevate concentrazioni di radionuclidi precursori nelle strutture geologiche investigate.

Cartografie di dettaglio intermedio (scala 1:250.000) possono quindi essere considerate adatte al territorio della regione Emilia-Romagna, visti i valori in uranio, radio e radon evidenziati in varie matrici e che saranno illustrati nei successivi capitoli.

Gli standard correnti per cartografie sul radon alla scala 1:250.000 prevedono maglie di campionamento variabili tra i 10 km², adatte ad ambienti geologicamente complessi di montagna e i 40 km² adatte ad ambienti geologicamente uniformi e omogenei di pianura.

Gli standard correnti prevedono inoltre misurazioni di radon nei suoli alla profondità di 50-80 cm, misurazioni dei valori di permeabilità nei suoli e analisi dei radionuclidi precursori del radon nei suoli e nelle formazioni geologiche considerate.

Il Gruppo di Lavoro ha esaminato le caratteristiche geologiche e ambientali della regione Emilia-Romagna e, sulla scorta delle conoscenze dedotte dall'esame degli standard cartografici correnti, ha formulato nel capitolo "Conclusioni" ulteriori specifiche tecniche orientate alla produzione di una cartografia utile per descrivere e valutare i fattori di rischio derivanti dalla presenza del radon nelle strutture geologiche e nell'ambiente.

Bibliografia

(1) "Indagine Regionale per l'individuazione delle Aree ad Alto Potenziale di Radon nel Territorio Veneto" Regione del Veneto - Direzione regionale per la Prevenzione, ARPAV – Area tecnico-Scientifica, Novembre 2000

(2) <http://www.provincia.bz.it/agenzia-ambiente/2908/radon>

(3) Cerrina Feroni A., Martelli L., Martinelli P., Ottria G. (2002) – *Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo in scala 1:250.000*. Regione Emilia-Romagna-Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – C.N.R.-I.G.G., sezione di Pisa. S.EL.CA., Firenze

(4) Turekian K.K., Wedehol K.H. (1961) "Distribution of the elements in some major units of the earth's crust" *Bull.Geol.Soc.Amer.*, 72, 175-191

(5) Bella F., Pettinelli E. (1990) "Radon monitoring aimed to study seismic precursors" In: Tommasino L., Furlan G., Khan H.A., Monnin M.(Eds), *Radon Monitoring in Radioprotection, Environmental Radioactivity and Earth Sciences*, ICTP, Trieste, World Scientific Publishing, 275-294

(6) Martinelli G., Ferrari G. (1991) "Earthquake forerunners in a selected area of Northern Italy: recent developments in automatic geochemical monitoring" *Tectonophysics*, 193, 397-410

(7) Sogni R., Bruno R., Bonduà S. (2001) "Mapping of radon and geologic characterization of the Emilia-Romagna Region-Italy" *Proc. 5th. Int. Conference on Rare Gas Geochemistry, Debrecen*, 211-219

(8) ANPA (2000) *Il sistema informativo territoriale per la valutazione del potenziale di esalazione di Radon dal suolo*

(9) Barnet I., Miksova J. (2001) "The GIS approach to radon risk mapping in the Czech Republic" *Proc. 5th. Int. Conference on Rare Gas Geochemistry, Debrecen*, 189 - 196

(10) Doremus P.,Quinif Y., Charlet J.M. (1995) "Relation of radon-regional geology application to radon emanation mapping:example of geological map n°127 Lens-Soignies (Hainaut, Belgium)" *Environmental Geochemistry and Health*, Suppl.Vol.16, 415-426

⁽¹¹⁾ Kemski J., Siehl A., Valdivia-Manchego M. (1999) “*Mapping and prediction of geogenic radon potential in Germany*” 22C, 295-300

⁽¹²⁾ Kemski J., Siehl A., Stegemann R., Valdivia-Manchego M. (2001) “*Mapping the geogenic radon potential in Germany*” The Science of the Total Environment, 272, 217-230

⁽¹³⁾ Ielsch G., Robé M.C., Baubron J.C., Curmi P., Noyon C., Tymen G. (2000) “*Predictive mapping of Radon exhalation potential from the surface of the soil in France: application to a zone in Brittany*” in IPSN’s Report 2000, 171-177, Sito Web <http://opera.irsn.org/nucleaire/htm>

2. MISURE DI RADON INDOOR NELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Laura Gaidolfi, Roberto Sogni, ARPA – Sezione provinciale di Piacenza

2.1 Introduzione

Nel 1988 l'ENEA-DISP (ora APAT) e l'Istituto Superiore di Sanità (I.S.S.) promossero e coordinarono un'indagine nazionale a campione allo scopo di valutare l'esposizione media della popolazione alla radioattività naturale nelle abitazioni, considerato che generalmente nell'ambiente domestico si trascorre la maggior parte del tempo.

I criteri statistici di base adottati per la scelta del campione, che permisero di ottenere risultati statisticamente significativi anche a livello regionale, furono:

- campione di 5000 famiglie (= abitazioni) sul totale di 20 milioni censite nel 1981;
- suddivisione delle famiglie da campionare su 200 comuni sul totale di circa 8000;
- stratificazione dei comuni secondo la regione di appartenenza e due livelli di ampiezza demografica: il primo contiene i comuni con un numero di abitanti residenti superiore a 100 mila, il secondo con numero inferiore;
- inserimento dei 50 comuni con più di 100 mila abitanti nel campione; i restanti 150 estratti casualmente, proporzionalmente al rimanente numero di comuni appartenenti alla regione;
- proporzione di campionamento delle famiglie costante per tutti i comuni appartenenti allo stesso strato.

In Emilia-Romagna, il campione estratto ha comportato il coinvolgimento di 371 famiglie suddivise in 15 comuni, 9 dei quali con un numero di abitanti superiore a 100 mila (gli attuali 9 comuni capoluogo della regione).

Nel 1993, la Regione Emilia-Romagna organizzò un'indagine nelle scuole materne ed asili nido quale prosieguo dell'iniziativa sul radon indoor nelle abitazioni allo scopo di ottenere una visione più esaustiva dell'esposizione della popolazione alla radioattività naturale.

Ci si orientò verso questa tipologia di scuole in quanto generalmente ubicate in edifici costituiti al massimo da due piani posti a diretto contatto col terreno, frequentate da soggetti "a maggior rischio" e per tempi mediamente maggiori rispetto ad altri tipi di scuole.

L'indagine si proponeva i seguenti obiettivi:

- valutare l'esposizione al radon della popolazione in età prescolare in Emilia-Romagna;
- identificare i parametri principali che influiscono sulla concentrazione di radon indoor nelle scuole materne ed asili nido;
- valutare la distribuzione geografica dei livelli di radon indoor; l'indagine regionale sul radon indoor nelle abitazioni dell'Emilia-Romagna aveva visto infatti coinvolti solo 15 dei 343 Comuni della regione (quindi il 4%), per lo più distribuiti nella zona di pianura, ad alta densità di popolazione, quindi non esaustiva per disegnare una mappa regionale delle concentrazioni di radon nelle abitazioni della regione.

2.2 Misure in abitazioni

2.2.1 Metodologia operativa

Questa indagine, condotta dal marzo 1989 al marzo 1990, è stata realizzata con la collaborazione di strutture del Servizio Sanitario, quali i Servizi di Igiene Pubblica delle USL territorialmente interessate ai campionamenti (attuali Unità Operative di Sanità Pubblica dei Dipartimenti di Prevenzione delle AUSL), i cui operatori hanno mantenuto i contatti con le famiglie, ed il Settore Fisico Ambientale del PMP della USL n.2 di Piacenza (attualmente Area Isotopia e Radioattività Ambientale dell'ARPA, Sezione di Piacenza) che ha coordinato l'indagine a livello locale, preparato i dosimetri, proceduto alla lettura dei rivelatori esposti e partecipato alle prove di interconfronti organizzati dagli Istituti Centrali con i laboratori di riferimento.

Per la realizzazione di tutte le fasi operative sono state seguite le indicazioni riportate nei protocolli operativi predisposti dagli Istituti Centrali.

Per le misure di radon, il periodo totale di esposizione (1 anno) è stato suddiviso in due semestri per tenere conto della variazione stagionale di alcuni parametri che possono influenzarne la concentrazione; per ogni semestre e per ogni abitazione sono stati utilizzati 2 dosimetri di tipo "passivo" a tracce nucleari.

Per valutare, inoltre, il contributo alla dose efficace dovuta alla radiazione gamma e cosmica, in ogni abitazione sono stati posizionati 4 rivelatori termoluminescenti al fluoruro di Litio (LiF 100) per un solo semestre di esposizione, in quanto questo tipo di radiazione non risulta legata a variazioni stagionali.

Nella tabella 2.1 è riportato il numero delle abitazioni suddivise per i comuni estratti nelle quali sono state effettuate le misure di radon e di radiazione gamma nei due semestri.

Tabella 2.1 – N. di abitazioni e di misure eseguite nell'indagine sulla radioattività naturale

<i>COMUNI</i>	<i>n. ab. estratte</i>	<i>n. misure radon I semestre</i>	<i>n. misure radon II semestre</i>	<i>n. misure radon annuale</i>	<i>n. misure gamma</i>
Castelsangiovanni (Pc)	74	73	72	72	72
Piacenza	11	11	11	11	11
Parma	16	16	16	16	16
Albinea (Re)	35	35	34	34	34
Reggio Emilia	13	13	13	13	13
Campogalliano (Mo)	32	32	32	32	32
Modena	18	17	17	17	17
Montecreto (Mo)	7	7	7	7	7
Bazzano (Bo)	31	31	31	31	31
Bologna	47	47	46	46	46
Ferrara	14	14	13	13	13
Ravenna	13	12	13	12	12
Forlì	11	11	11	11	11
S. Mauro Pascoli (Rn)	38	38	37	37	37
Rimini	11	11	11	11	10
TOTALE	371	368	364	363	362

Gli operatori addetti alla consegna e sostituzione dei dosimetri hanno avuto anche il compito di compilare una scheda di raccolta dati, predisposta in collaborazione con gli Istituti Centrali, che conteneva informazioni relativamente alla tipologia costruttiva degli edifici e dei locali campionati.

Un'analisi statistica delle informazioni rilevate da queste schede permette di definire alcune caratteristiche del campione estratto, illustrate in figura 2.1:

- il 75 % degli edifici è di tipo plurifamiliare (es. condominio), mentre il rimanente 25 % è di tipo monofamiliare, comprensivo sia di villette a schiera che di abitazioni isolate;
- il 46 % è costruito direttamente sul terreno, mentre il 36 % ed il 17 % possiede rispettivamente o seminterrato o sotterraneo;
- il 61 % è di recente costruzione (dopo il 1960) ed il 51.5 % è stato costruito con materiale diverso dal cemento;
- il 40 % circa dei rivelatori è stato posizionato in locali posti al 1° piano.

Figura 2.1 (1) – Caratteristiche costruttive degli edifici campionati

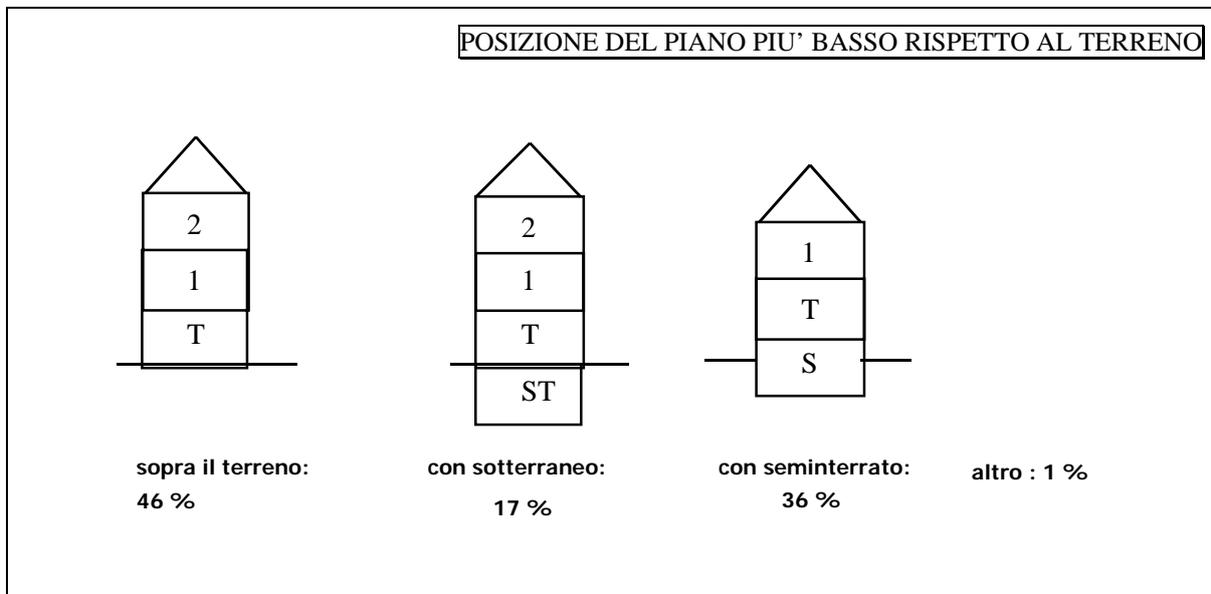
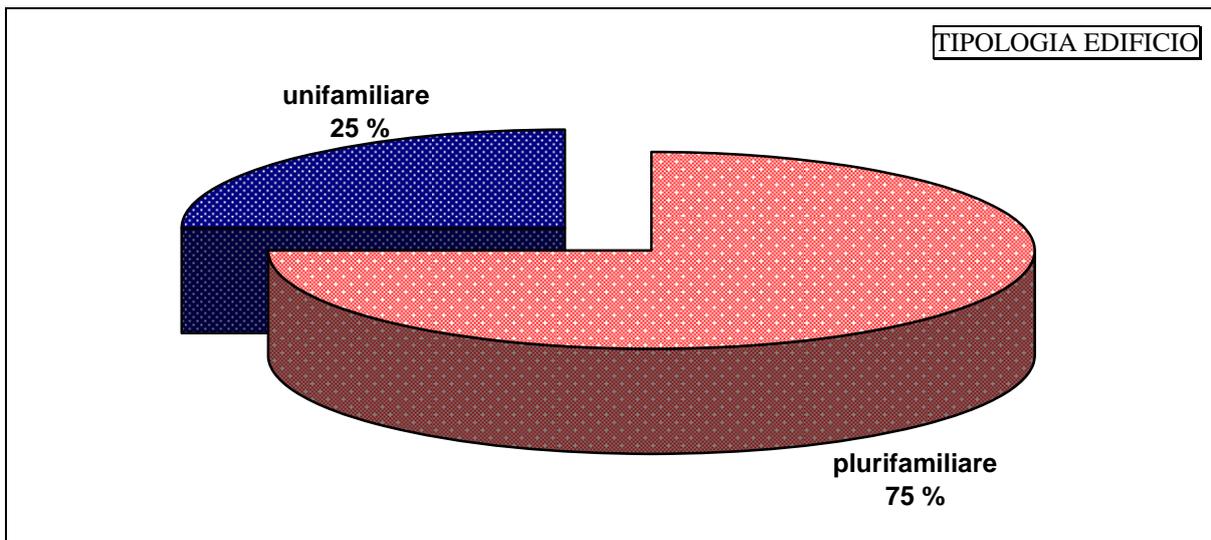
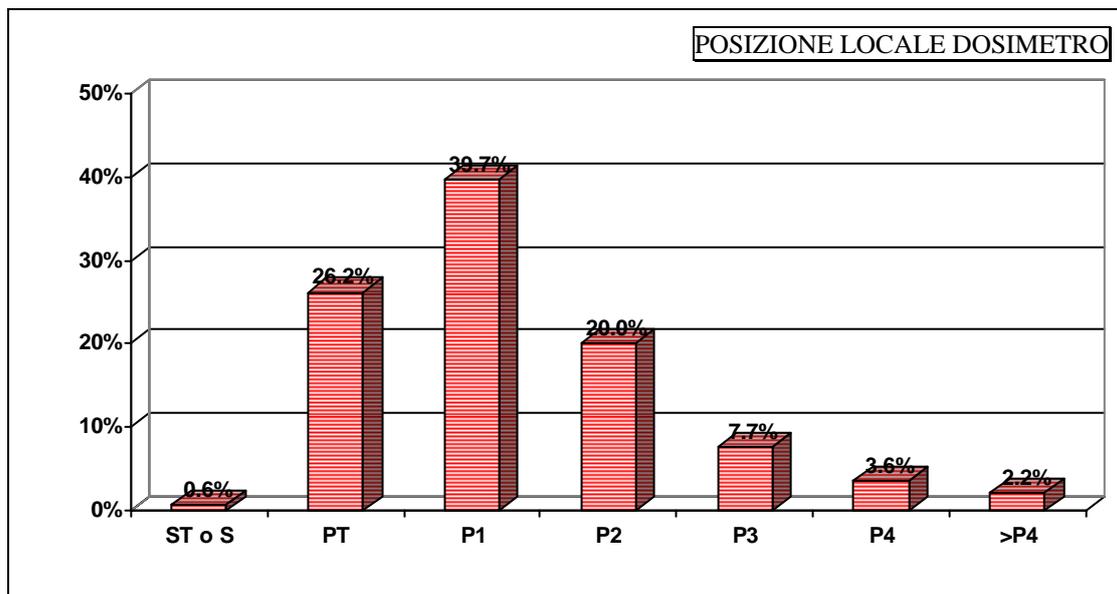
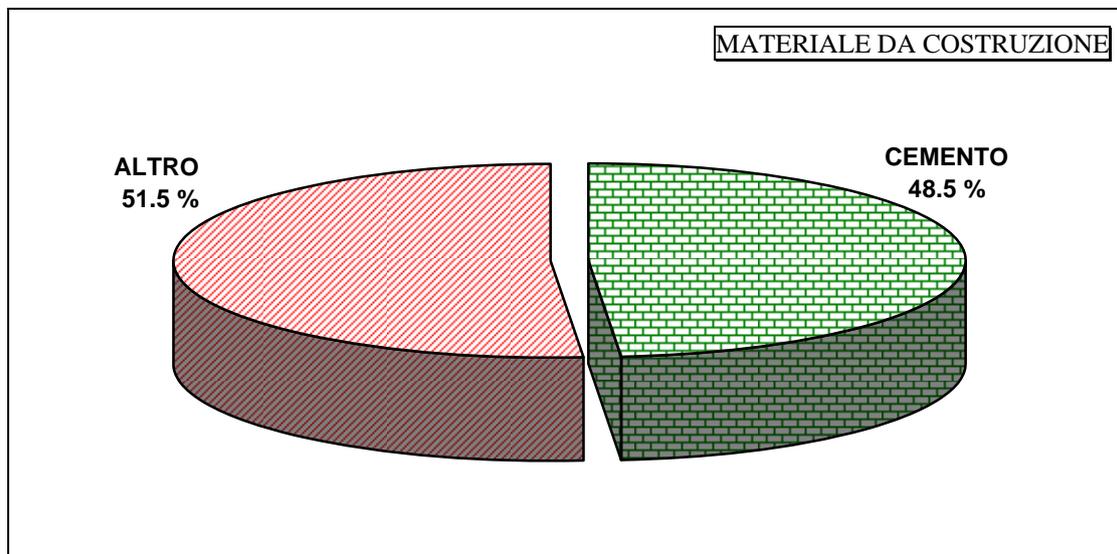
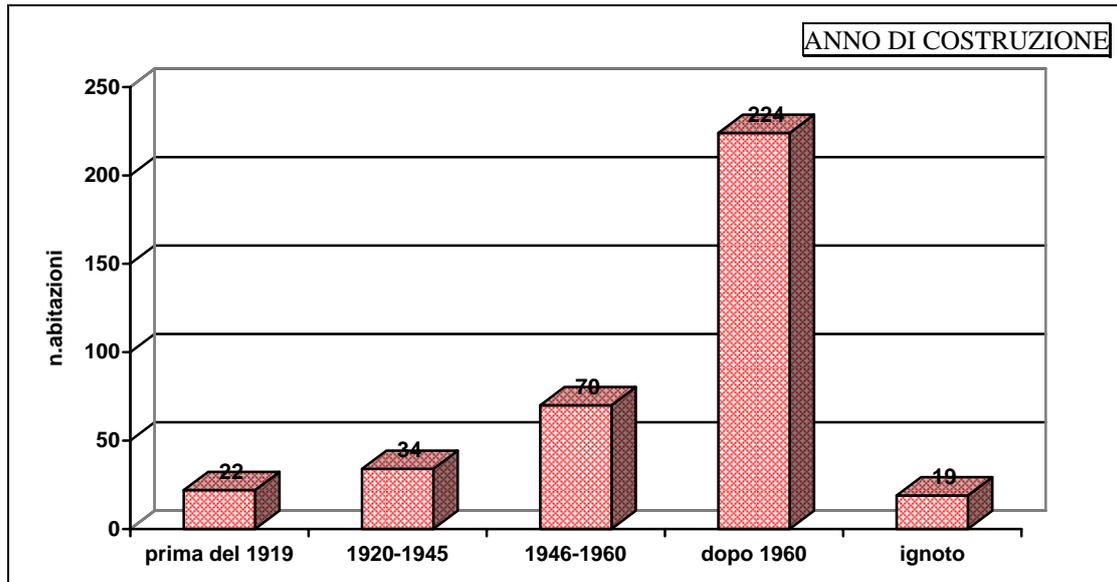


Figura 2.1 (2) – Caratteristiche costruttive degli edifici campionati

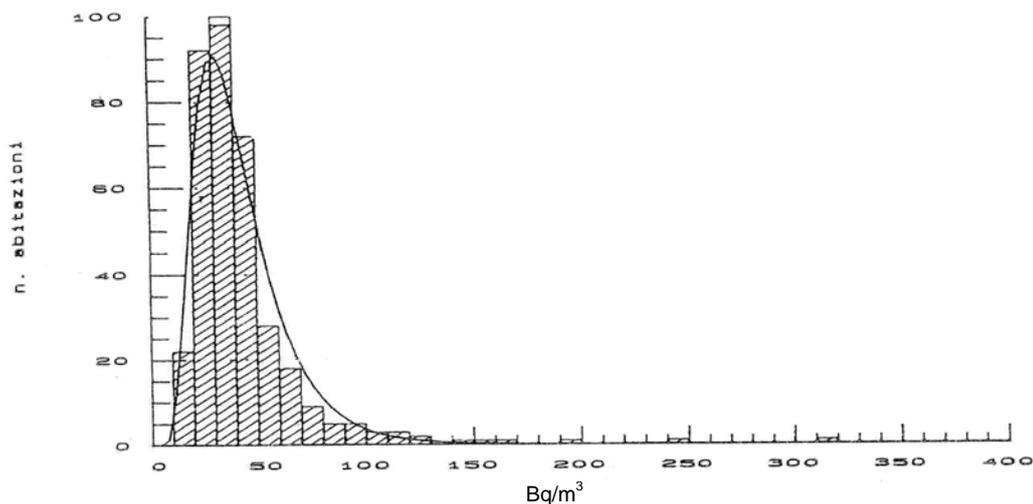


2.2.2 Risultati

I valori medi annuali di concentrazione di radon, rilevati su un totale di 363 abitazioni, risultano compresi nell'intervallo 15 – 314 Bq/m³, con un valore della media aritmetica pari a 43 Bq/m³.

In figura 2.2 è riportata la distribuzione dei valori di concentrazione media annuale, insieme alla curva teorica di distribuzione log-normale derivata dai valori rilevati.

Figura 2.2 - Concentrazione media annua di radon rilevata nelle abitazioni della regione

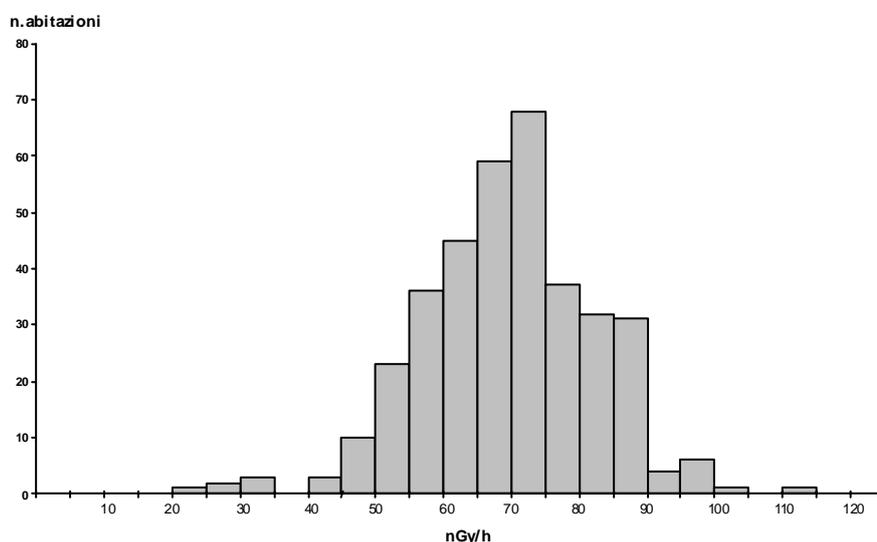


Si evidenziano alcuni aspetti importanti:

- non sono stati osservati situazioni comportanti il superamento del livello di riferimento (400 Bq/m³) indicato dalla Comunità Europea ⁽¹⁾;
- nel 78% delle abitazioni i livelli di concentrazione risultano inferiori a 50 Bq/m³, nel 96% inferiori a 100 Bq/m³ e nel 99.5% inferiori a 200 Bq/m³;
- è stato stimato un aumento del 68.8% della concentrazione media nel semestre "invernale" (54 Bq/m³) rispetto a quello "estivo" (32 Bq/m³).

Per quanto concerne la misura di intensità di dose assorbita in aria, i valori rilevati risultano compresi nell'intervallo 20-115 nGy/h, con un valore medio regionale pari a 80 nGy/h; in figura 2.3 viene riportata la distribuzione dei valori rilevati in 362 abitazioni.

Figura 2.3 – Intensità di dose assorbita in aria rilevata nelle abitazioni dell'Emilia-Romagna



2.2.3 Valutazioni statistiche

La correlazione esistente fra i valori medi di concentrazione di radon nelle abitazioni nei diversi periodi di esposizione è stata stimata a livello $P < 0.001$.

Tra i risultati di ciascun semestre con l'intero anno di misura si può osservare una relazione lineare del tipo:

$$Y = a + b \cdot X$$

dove i parametri di correlazione risultano così determinati:

var. Y	var. X	a	b	coeff. corr.	R ²
annuale	prim-est	1.4	1.3	0.89	79 %
annuale	aut-inv	6.0	0.7	0.98	95 %

Inoltre, i valori annuali sono stati correlati ad alcuni parametri relativi, in particolare, alle caratteristiche costruttive; il test statistico di riferimento è l'analisi della varianza, utilizzata in particolare con il metodo non parametrico di Kruskal-Wallis⁽²⁾; sono risultate differenze statisticamente significative ($P < 0.001$) con i seguenti parametri:

- ampiezza demografica del comune
- tipologia dell'edificio
- posizione del locale dosimetro rispetto al terreno

Risultano infatti valori di concentrazione di radon mediamente più alti

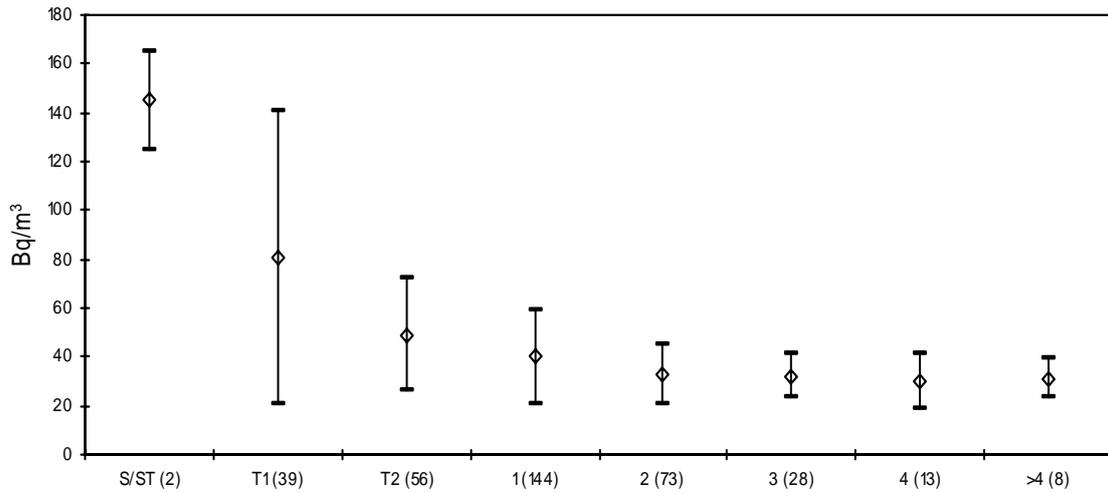
- nei comuni più “piccoli” (con numero di abitanti inferiore a 100 mila)
- negli edifici monofamiliari
- nei locali situati al piano terra dove risulta un contatto diretto fra suolo e pavimento (o pareti)

Si può ipotizzare che questi 3 parametri a loro volta siano strettamente collegati, in quanto si può osservare una diversa tipologia costruttiva nei comuni a diversa densità abitativa; inoltre, gli edifici monofamiliari difficilmente si sviluppano in altezza, individuando il piano terra o il primo piano il locale dove è stato posizionato il dosimetro.

Infine, un ulteriore approfondimento dei risultati sperimentali è stato effettuato in relazione alla localizzazione del piano “dosimetro” rispetto al terreno; inoltre il piano terra è stato suddiviso a seconda della presenza o meno di locali sotterranei, seminterrati o semplice vespaio.

I risultati sono riportati in figura 2.4.

Figura 2.4 – Andamento della concentrazione di radon in relazione alla posizione del locale dosimetro (tra parentesi viene indicato il numero di abitazioni)



S/ST Seminterrato o Sotterraneo
 PT1 Piano terra con pavimenti (o pareti) a contatto del terreno
 PT2 Piano terra senza pavimenti (o pareti) a contatto del terreno

2.2.4 Valutazione dose assorbita

Le informazioni raccolte sulle apposite schede dagli operatori al momento del posizionamento dei dosimetri, relativamente alle ore trascorse in media dai componenti della famiglia, sia in casa che in altri luoghi chiusi, ha permesso di stimare l'equivalente di dose efficace media annua regionale; in particolare per la regione Emilia - Romagna sono risultati fattori di occupazione del 61.3% per le abitazioni e del 18.4% per altri luoghi chiusi.

Il metodo di calcolo utilizzato per stimare l'equivalente di dose efficace annua, standardizzato dagli Istituti Centrali, è stato attualmente aggiornato introducendo i nuovi fattori dosimetrici proposti dalla ICRP 65 ⁽³⁾, diversi rispetto alla raccomandazione europea del 1990, e cioè una concentrazione media annuale di radon pari a 200 Bq/m³, con un fattore di occupazione dell'80% (7000 ore annue), corrisponde a 3 mSv.

Per stimare il contributo alla dose efficace media derivante dalla radiazione gamma e cosmica ci si avvale del fattore di conversione proposto dall'UNSCEAR ⁽⁴⁾.

I risultati finali relativi alla nostra regione sono riportati in tabella 2.2.

Tabella 2.2 - Stima dell'equivalente di dose efficace media annua regionale (mSv/anno)

	<i>nelle abitazioni</i>	<i>in altri luoghi chiusi</i>	<i>totale</i>
radon e prodotti decadimento	0.5	0.2	0.7
radiazione gamma e cosmica	0.3	0.1	0.4
Totale	0.8	0.3	1.1

2.3 *Misure nelle scuole materne ed asili nido*

2.3.1 **Metodologia operativa**

All'organizzazione dell'indagine hanno contribuito diversi Enti, cui sono stati attribuiti compiti specifici:

- l'Assessorato alla Sanità della Regione Emilia-Romagna e ARPA, Sezione di Piacenza, con funzioni di promozione e coordinamento a livello regionale;
- le nove Sezioni provinciali di ARPA, con compiti di coordinamento ed organizzazione a livello provinciale, di informazione agli insegnanti e alla popolazione in collaborazione con i Dipartimenti di Prevenzione (SIP) delle Aziende USL ed i Servizi Materno Infantile delle Aziende USL;
- i Dipartimenti Prevenzione (SIP) Aziende USL, cui è stata demandata l'organizzazione a livello locale, il posizionamento e la raccolta dei dosimetri, la raccolta delle informazioni (compilazione schede informative);
- i Provveditorati agli Studi ed i Comuni, che hanno aderito e divulgato l'iniziativa a livello locale, informando le scuole partecipanti all'indagine.

L'indagine è stata effettuata seguendo le indicazioni riportate nei protocolli operativi realizzati da APAT e ISS per l'esecuzione dell' "Indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni".

Come nella campagna nazionale per le misure di radon si è pertanto fatto ricorso alla tecnica passiva, utilizzando, cioè, rivelatori "a tracce" nucleari.

Si è inoltre definito un protocollo per le misure, che prevedeva di seguire le indicazioni seguenti:

- non eseguire l'indagine se la scuola doveva subire interventi di ristrutturazione significativi durante l'indagine stessa;
- sostituire la scuola materna se nel campione estratto è presente anche l'asilo nido;
- se le stanze campionate (da monitorare) sono dislocate ai piani superiori, aggiungere anche un locale al piano terra (o seminterrato se normalmente utilizzato);
- utilizzare solo un dosimetro per ogni stanza, a meno di stanze molto ampie (superfici > 180 m²);
- non posizionare il dosimetro vicino a correnti d'aria dovute a ventilazioni, finestre, porte, caloriferi e non vicino a pareti esterne delle classi.

Analogamente all'indagine nelle abitazioni, gli operatori dei SIP sono stati incaricati di compilare una scheda di raccolta dati, al momento del posizionamento dei dosimetri, che prevedeva numerose informazioni, relative alla tipologia e caratteristiche dell'edificio scolastico e del "locale dosimetro".

La numerosità del campione doveva essere tale da garantire un valore rappresentativo per la stima delle concentrazioni di radon in scuole materne e asili nido, quindi si è stabilito il 30% degli edifici e per ciascun edificio il 50% dei locali utilizzati dai bambini (aule, mensa, etc.); inoltre, i dosimetri dovevano essere esposti per il solo semestre invernale, periodo di massima esposizione al radon: per ogni locale individuato è stato posizionato un solo dosimetro, formato da 2 rivelatori.

Inoltre, poiché la distribuzione geografica delle scuole riflette la densità di popolazione, il campione è ritenuto rappresentativo anche dell'esposizione al radon dell'intera popolazione in età prescolare.

Dai dati del censimento è emersa la necessità del coinvolgimento delle strutture non pubbliche: nella nostra regione infatti il 30% scuole materne ha gestione di tipo religioso o privato-laico.

Il campione regionale è stato estratto con criteri casuali.

In tabella 2.3 è riportato il numero delle strutture coinvolte suddivise per provincia nelle quali sono state effettuate le misure di radon, nonché il tipo di gestione delle stesse.

Tabella 2.3 – Caratteristiche del campione estratto nell’indagine negli asili nido e scuole materne

numero di strutture coinvolte			
PROVINCIA	COMUNI	n° ASILI NIDO	n° SCUOLE MATERNE
PIACENZA	24 (50%)	5	32
PARMA	26 (54%)	8	41
REGGIO EMILIA	37 (82%)	15	60
MODENA	36 (77%)	22	73
BOLOGNA	46 (77%)	34	105
RAVENNA	14 (78%)	9	50
FERRARA	19 (73%)	11	43
FORLÌ	24 (77%)	8	48
RIMINI	13 (65%)	4	39
TOTALE	239 (79%)	116	491

tipo di gestione			
TIPO STRUTTURA	COMUNALE	STATALE	PRIVATA
ASILI NIDO	111 (96%)	-	5 (4%)
SCUOLE MATERNE	109 (22%)	195 (40%)	184 (38%)

Il campione vede quindi coinvolte 607 scuole materne e asili nido ubicate in 239 comuni diversi, per un totale di circa 32000 bambini, 3200 educatori e 1700 personale di altro genere.

La tipologia degli edifici campionati è rappresentato nel 71% da costruzioni isolate, nel 68% da edifici ad 1 piano, nel 27% a due piani; i locali monitorati sono nel 35% aule e nel 60% “altro”; un’analisi statistica delle informazioni rilevate da schede compilate dagli operatori addetti alla consegna dei dosimetri permette di definire altre caratteristiche del campione estratto, illustrate in figura 2.5.

Figura 2.5 (1) – Caratteristiche costruttive degli edifici campionati

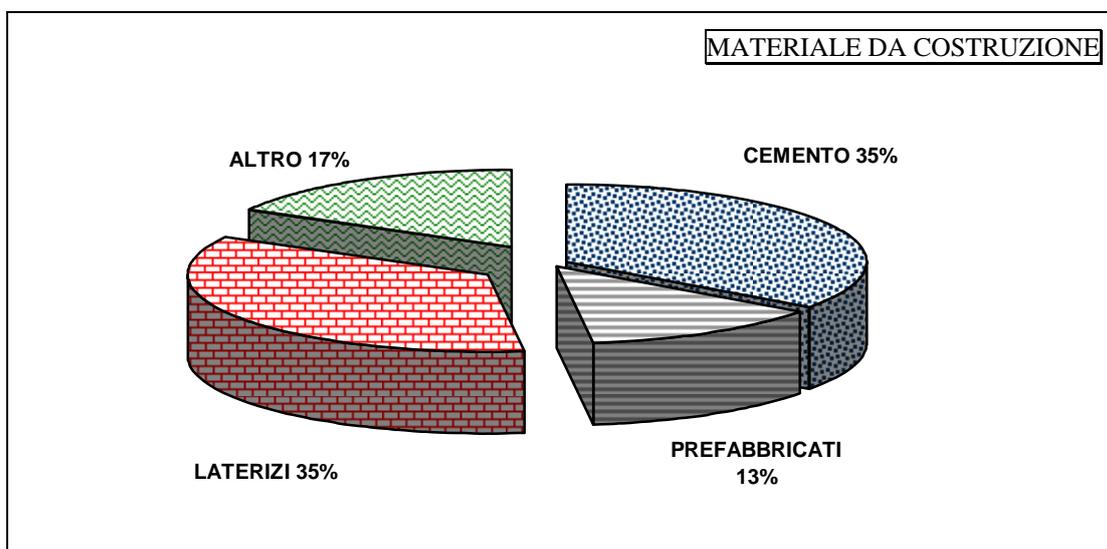
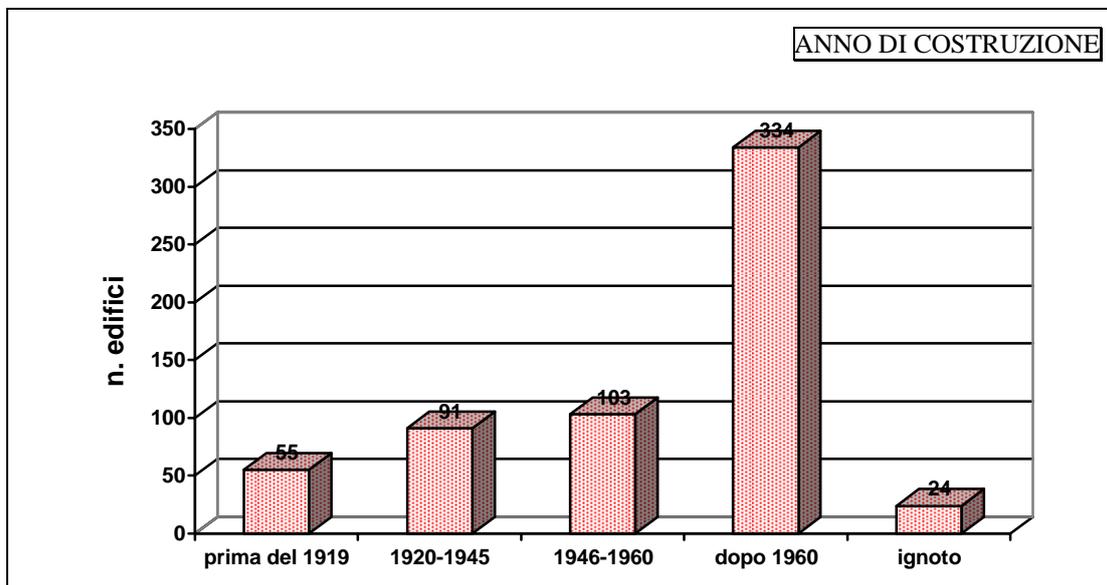
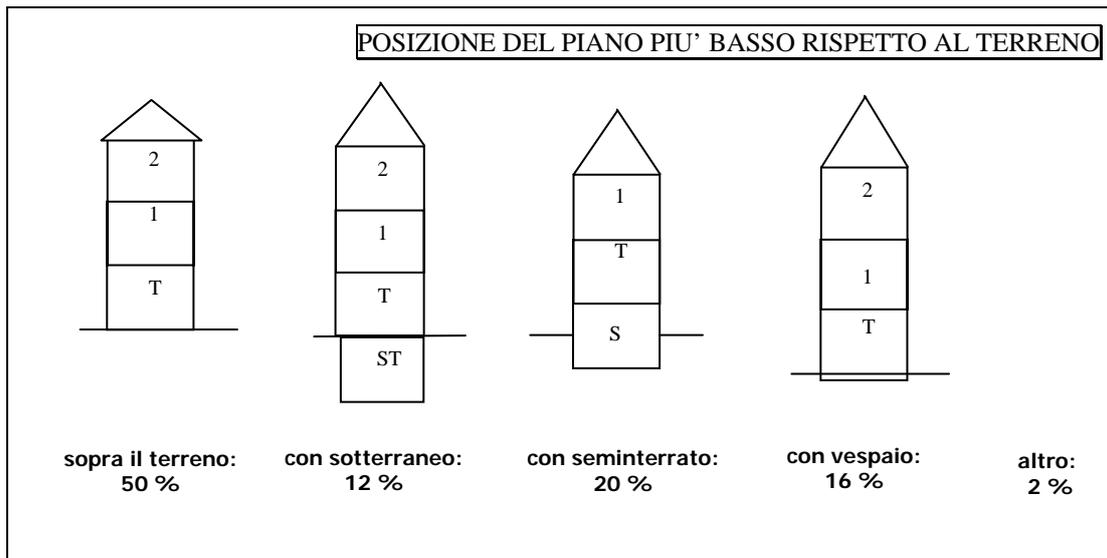
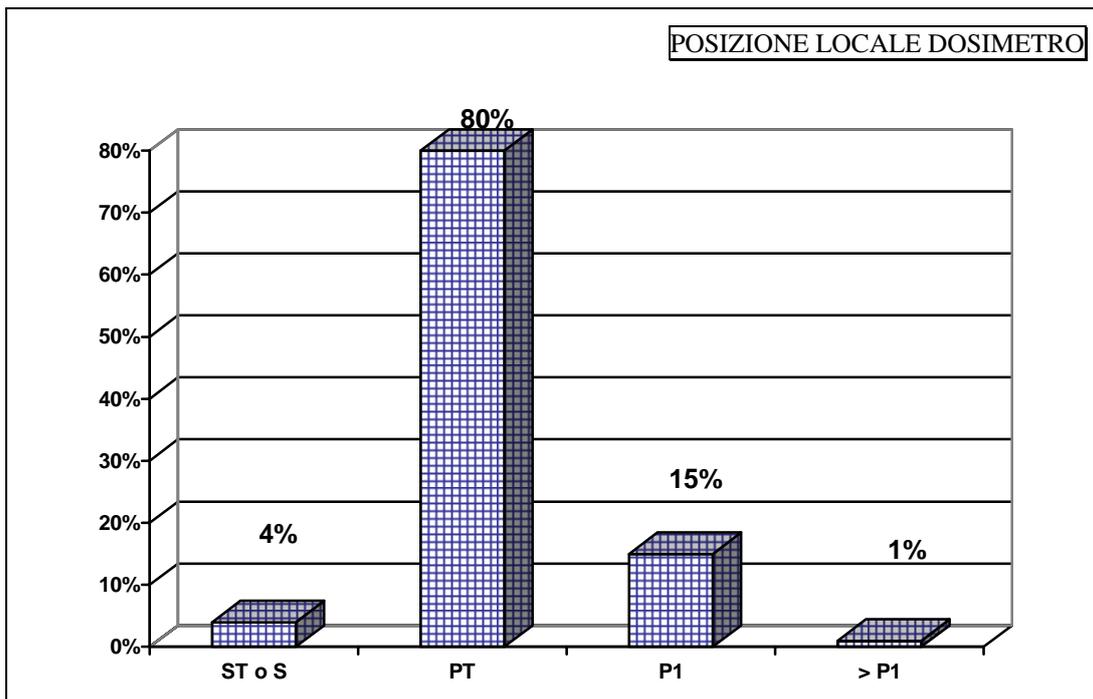


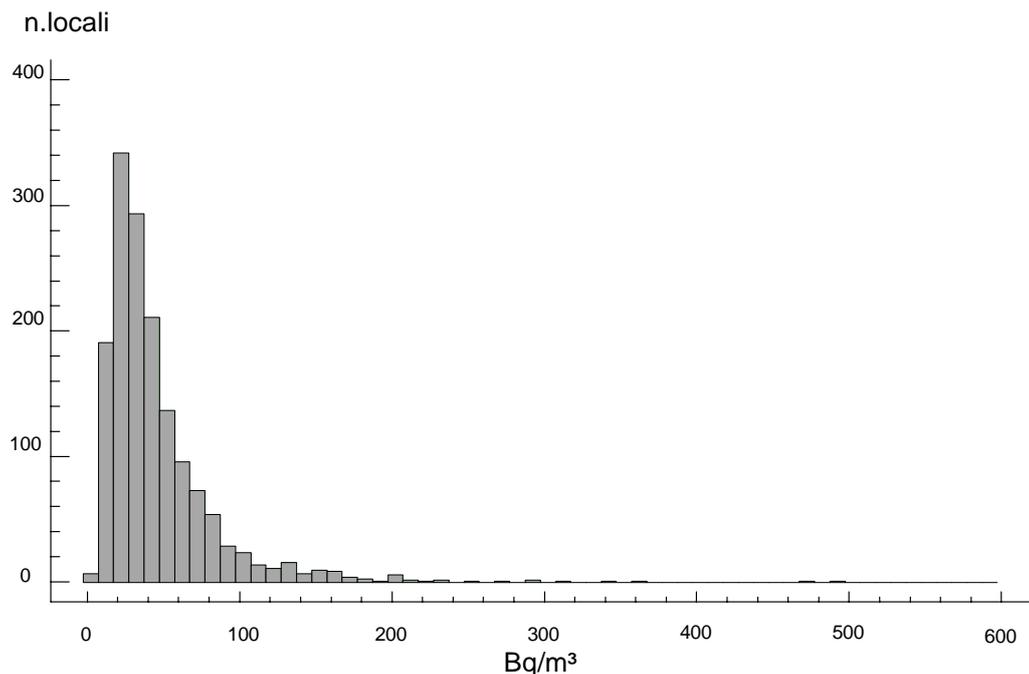
Figura 2.5 (2) – Caratteristiche costruttive degli edifici campionati



2.3.2 Risultati

I valori di concentrazione rilevati dai singoli dosimetri esposti nei singoli locali degli edifici scolastici campionati sono rappresentati dall'istogramma riportato in figura 2.6: da questa figura si può osservare che la maggior parte dei valori (92.3 %) risulta inferiore a 100 Bq/m³, l' 1% risulta compreso fra 200 e 400 Bq/m³ e 2 soli dosimetri (sul totale di 1553) hanno riportato valori superiori a 400 Bq/m³. Infine, non si sono rilevate concentrazioni superiori a 500 Bq/m³.

Figura 2.6 - Concentrazione media rilevata nei locali delle scuole materne e asili nido



2.3.3 Valutazioni statistiche

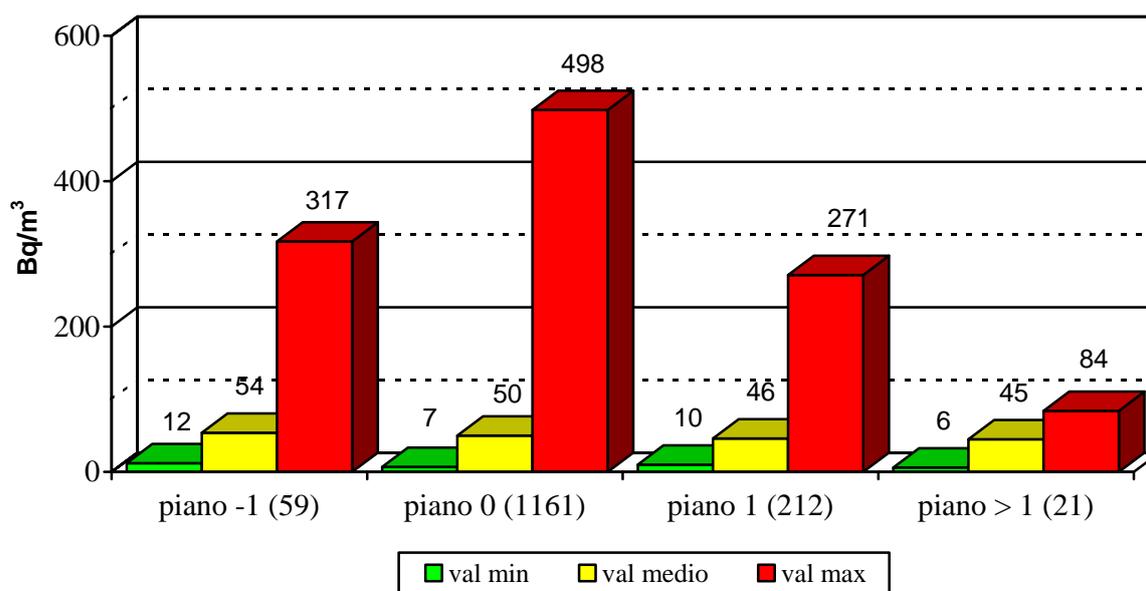
2.3.3.1 Singoli locali

Un confronto con quanto rilevato nelle abitazioni può essere svolto osservando l'andamento delle concentrazioni di radon in funzione del piano (rispetto al terreno) del locale dove è stato posizionato il dosimetro, anche se fra le due tipologie di edificio esistono differenze di tipo strutturale-architettonico e logistico relativamente alle indagini condotte:

- gli edifici scolastici raramente sono dislocati su più piani o su piani superiori al piano terra; negli edifici più moderni, i piani sono in realtà dei dislivelli collegati fra loro con ampi scaloni ben aperti
- rispetto ad un edificio ad uso abitativo, l'edificio scolastico presenta una maggiore superficie di aree comuni: corridoi, scale e locali di gioco comune sono normalmente ampi e aperti; questo produce un maggiore mescolamento di aria fra i vari piani
- a differenza della campagna nelle abitazioni, sono stati indagati parecchi locali (59) posti nei piani seminterrati o interrati (piano -1), in quanto usati normalmente dai bambini, in particolare come mensa; si ricorda che nelle abitazioni campionate si è indagato un unico locale, generalmente la camera da letto in quanto risulta il locale dell'abitazione dove si vive per maggior tempo nell'arco delle 24 ore; per questo motivo nell'indagine nelle abitazioni sono risultati 2 soli dosimetri posizionati nei piani seminterrati o interrati.

I risultati delle misure relativamente al piano del locale rispetto al terreno sono riportati nella figura 2.7: anche se i test statistici impiegati hanno indicato che mediamente non esistono differenze significative fra i livelli di concentrazione di radon relativamente ai piani rispetto al terreno, tuttavia si può osservare che i valori più elevati si sono riscontrati nei locali posti sui piani più a contatto con il terreno.

Figura 2.7 - Livelli di concentrazione di radon in relazione al piano rispetto al terreno (tra parentesi il numero di locali indagati)



Questi risultati possono essere interpretati come conferma di quanto già osservato dall'indagine nelle abitazioni, pertanto nella nostra regione si può individuare il contenuto di radionuclidi naturali presenti nel suolo quale fonte principale di radon indoor.

In tabella 2.4 sono riportati i parametri più significativi delle distribuzioni dei valori di concentrazione di radon suddivisi per le singole province.

Tabella 2.4 – Distribuzione dei valori di concentrazione di radon rilevati negli edifici scolastici

<i>PROVINCIA</i>	<i>n.rivelatori esposti</i>	<i>min (Bq/m³)</i>	<i>max (Bq/m³)</i>	<i>mediana (Bq/m³)</i>	<i>n.rivelatori 200 - 400 Bq/m³</i>	<i>n.rivelatori 400 - 600 Bq/m³</i>
PIACENZA	102	12	209	35	2	-
PARMA	114	10	108	23	-	-
REGGIO EMILIA	217	12	341	39	6	-
MODENA	239	11	498	53	1	2
BOLOGNA	376	8	194	30	-	-
FERRARA	142	11	204	46	1	-
RAVENNA	156	17	369	45	1	-
FORLÌ	108	6	292	57	5	-
RIMINI	99	15	210	41	2	-
TOTALE	1553	6	498	38	18	2

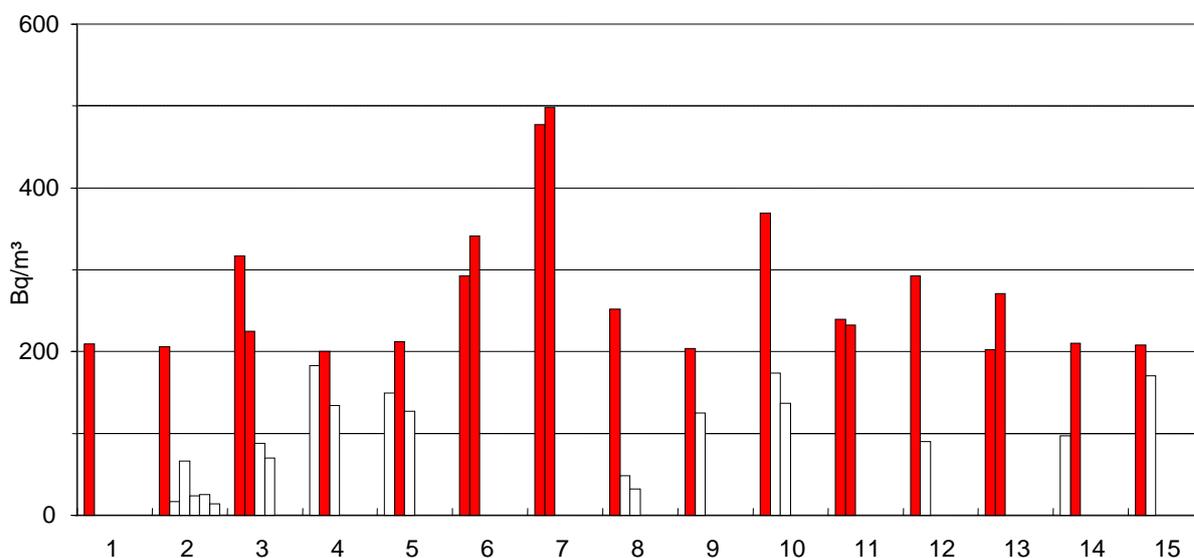
Il numero dei dosimetri esposti va da un minimo di 99 nella provincia di Rimini ad un massimo di 376 nella provincia di Bologna, il valore minimo rilevato risulta nell'intervallo 6 - 17 Bq/m³, il valore massimo nell'intervallo 108 - 498 Bq/m³ ed il valore della mediana nell'intervallo 23 - 57 Bq/m³.

Dei 20 dosimetri che hanno superato la concentrazione di 200 Bq/m³, 18 sono compresi nell'intervallo 200 - 400 Bq/m³ e 2 soli superano 400 Bq/m³.

Considerando questi 20 dosimetri, è interessante poter confrontare questi singoli dati con le ulteriori misure effettuate in altri locali dello stesso edificio scolastico; in particolare sono 15 (2.5%) gli edifici scolastici in cui almeno un locale ha presentato concentrazioni superiori a 200 Bq/m³.

I risultati sono rappresentati in fig. 2.8.

Figura 2.8 - Livelli di concentrazione di radon rilevati dai dosimetri posti in locali diversi di uno stesso edificio scolastico (in rosso vengono evidenziati i valori rilevati di concentrazione > 200 Bq/m³)



In questo grafico si può osservare che generalmente, accanto ai rivelatori con concentrazioni superiori a 200 Bq/m³, in altri locali della stessa struttura si riscontrano concentrazioni più basse. I valori più elevati si sono trovati generalmente nei piani -1 e 0, a conferma dell'andamento già commentato in termini generali sull'insieme dei dati.

Tuttavia, a parità di piano indagato, nello stesso edificio si possono comunque osservare differenze notevoli di concentrazione fra dosimetri esposti in locali diversi, che possono essere imputate alle caratteristiche costruttive e di utilizzo dei locali: ad esempio, nella scuola indicata con il numero 2, insieme al valore di 206 Bq/m³ rilevato in un locale di dimensioni normali (20 m²), con due aperture verso l'esterno, utilizzato come mensa e posto al piano seminterrato, è stata misurata una concentrazione di 17 Bq/m³ in un altro locale sempre al piano seminterrato, utilizzato come dormitorio, di superficie notevolmente più ampia (180 m²) e con 18 aperture verso l'esterno.

In letteratura, differenze significative fra i livelli di radon in diversi locali posti sullo stesso piano sono già stati rilevati e le differenze attribuite a variazioni del suolo al di sotto dei locali, differenze costruttive fra le stanze, variazioni del numero e dimensioni delle fessure nei pavimenti o pareti dei diversi locali, variazioni nelle condizioni di ventilazione dei locali, intesi sia come numero di finestre e/o porte verso l'esterno che come frequenza di apertura delle stesse.

Pertanto, nel caso si voglia mettere in atto azioni di rimedio negli edifici con alti livelli di radon, occorre misurare tutti i locali posti a livello del terreno o seminterrati; inoltre, se verranno introdotti nella normativa italiana livelli di riferimento o limiti per la concentrazione di radon nelle scuole o nelle abitazioni, così come è avvenuto per i luoghi di lavoro, dovrebbe essere specificato anche un preciso protocollo sulle modalità operative per il rilevamento di tali concentrazioni, in termini di strumentazione, tempi e luoghi di esposizione.

Nel grafico di figura 2.8 particolare è, inoltre, la situazione della scuola indicata con il numero 7: entrambi i dosimetri posti in locali diversi (situati al piano terra) hanno rilevato concentrazioni superiori a 400 Bq/m³.

La località cui appartiene questa scuola, in provincia di Modena, è situata sull'appennino emiliano in una fascia geologica particolare, che si estende dalla provincia di Parma a quella di Bologna, in cui è presente una faglia che permette a rocce, diverse da quelle normalmente presenti sull'appennino emiliano, di emergere dal sottosuolo.

La maggiore concentrazione di radon può essere imputata ad una maggiore fratturazione degli strati di rocce oppure ad un contenuto più elevato di radioattività naturale di queste rocce.

2.3.3.2 Singoli edifici scolastici

Riconsiderando tutti i valori ottenuti ed analizzandoli rispetto all'intero edificio scolastico (e non i singoli locali analizzati), è stata calcolata la media aritmetica delle concentrazioni rilevate per ogni singola scuola.

Le analisi statistiche dei valori così calcolati hanno evidenziato alcuni parametri maggiormente significativi relativamente ai livelli medi di concentrazione, e cioè:

- materiale da costruzione
- fascia geografica
- età dell'edificio

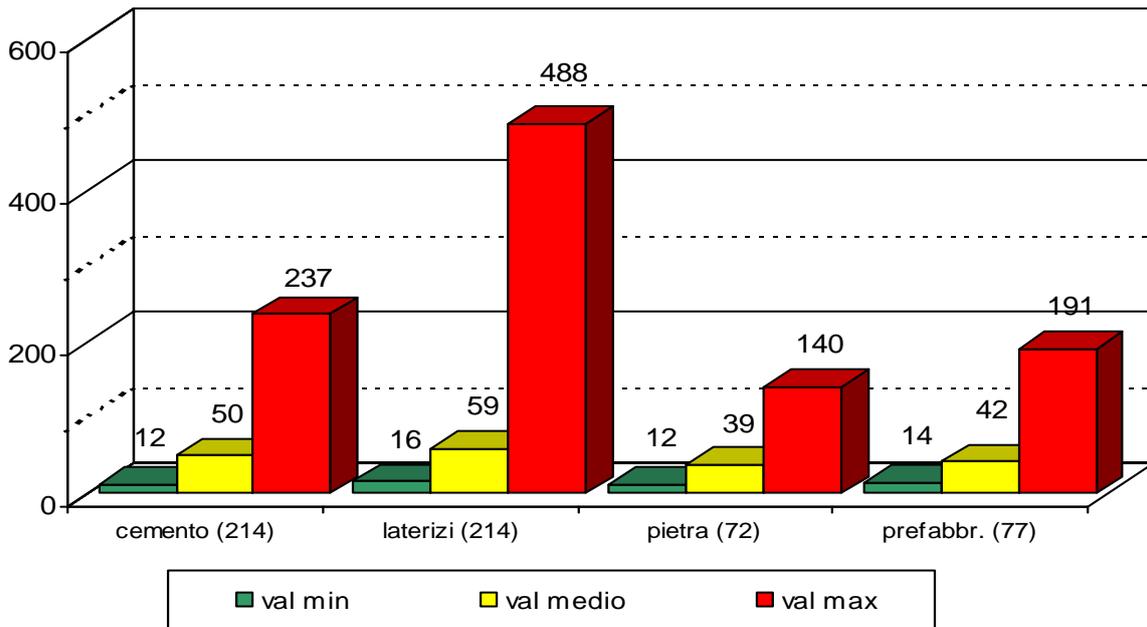
Materiali da costruzione

Dal grafico riportato in figura 2.9, si può osservare che negli edifici costruiti con cemento e laterizi mediamente si riscontrano valori più elevati rispetto a quelli con pietra e prefabbricati; ciò tuttavia non va inteso come indicativo del fatto che cemento e laterizi siano materiali da costruzione con un particolare contenuto di radioattività naturale: è noto infatti che il contenuto di

radioattività naturale è maggiore in alcuni materiali da costruzione quali tufo, graniti, materiali di origine vulcanica.

Il risultato ottenuto potrebbe invece essere attribuibile al fatto che cemento e laterizi sono i materiali da costruzione di gran lunga più utilizzati (70 %) negli edifici scolastici campionati.

Figura 2.9 - Livelli di concentrazione di radon in relazione al materiale da costruzione (tra parentesi il numero di locali indagati)

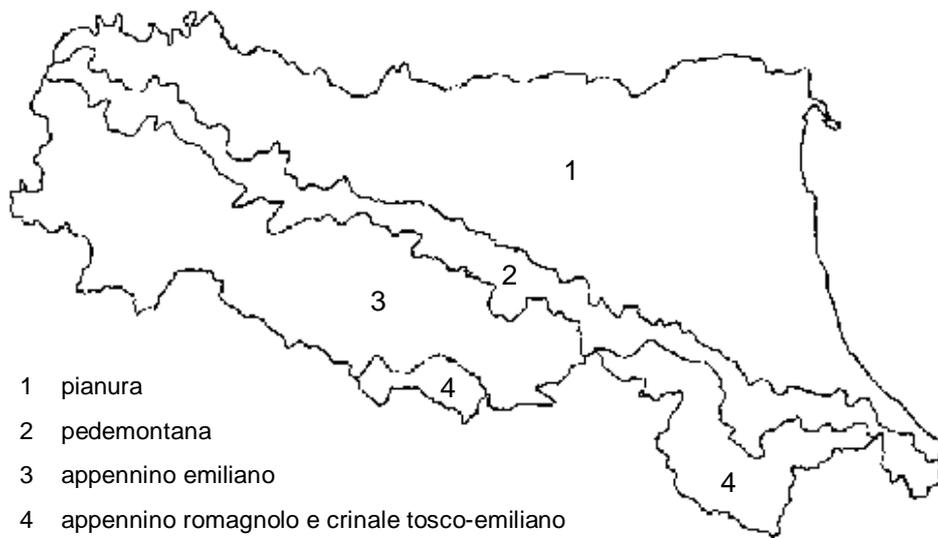


Fascia geografica

La regione Emilia-Romagna è stata suddivisa in 4 macroaree geomorfologiche (figura 2.10) (vedi anche capitolo 3 e Tav.1) :

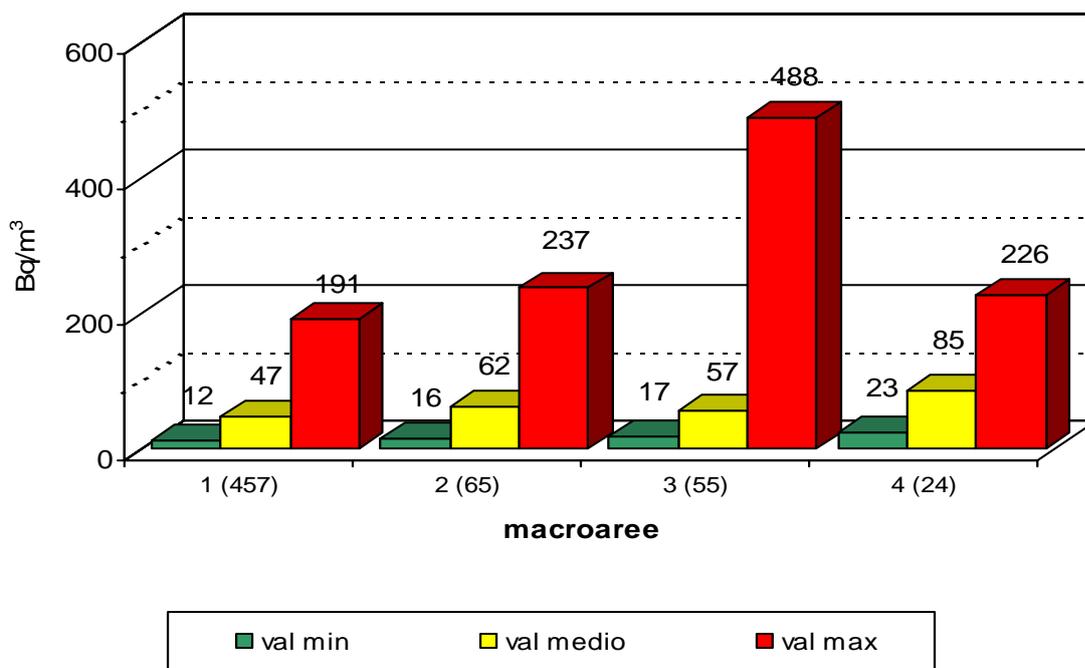
- 1) la pianura, caratterizzata da formazioni di argille, limi, sabbie e ghiaie fluviali depositate su un substrato di argille e sabbie di origine marina;
- 2) la zona pedemontana e del margine appenninico-padano, con formazioni di prevalenti argille con sabbie ed arenarie, a vari gradi di cementazione, e gessi;
- 3) la zona dell'appennino emiliano con formazioni di argille, marne e rocce litoidi (arenarie, calcari, ofioliti) che si presentano molto fratturate;
- 4) la zona dell'appennino romagnolo e del crinale toско-emiliano, caratterizzata da formazioni costituite da alternanze di marne ed arenarie e da formazioni prevalentemente argilloso-marnose.

Figura 2.10 - Macroaree geomorfologiche della regione Emilia-Romagna



In questo caso, le differenze statisticamente significative fra i 4 gruppi di dati sono facilmente giustificabili (figura 2.11); infatti, pur avendo in pianura il maggior numero di edifici scolastici campionati (76%), mediamente nella fascia appenninica si riscontrano valori di concentrazione più elevati rispetto alla pianura, a conferma, da una parte, del fatto che i depositi alluvionali di cui è costituita la pianura presentano bassi livelli di radioattività naturale, ed inoltre costituiscono un ostacolo alla fuoriuscita di radon eventualmente presente negli strati più profondi del sottosuolo, e, secondariamente, dell'importanza che possono assumere le fratture e le faglie, maggiormente esposte nelle zone pedemontane e appenniniche, per la risalita in superficie del gas.

Figura 2.11 - Livelli di concentrazione di radon in relazione alle macroaree geomorfologiche (tra parentesi il numero di locali indagati)



Età dell'edificio

Rispetto al periodo di costruzione dell'edificio, l'analisi statistica permette di evidenziare che mediamente si riscontrano i valori più alti negli edifici costruiti prima del 1919, mentre i più bassi in quelli costruiti dopo il 1960, a possibile indicazione di come le nuove tecniche edilizie adottate, seppure non ideate per affrontare il problema radon, possono comunque essere efficaci anche per esso: si pensi in particolare alle tecniche di impermeabilizzazione di pareti e pavimenti a contatto con il terreno durante la posa delle fondamenta, per diminuire la dispersione dell'umidità all'interno della costruzione.

2.3.4 Valutazione della dose assorbita

La valutazione della dose associata alla concentrazione di radon non era tra gli scopi di questa indagine, in particolare per l'incertezza sui fattori dosimetrici relativi alla popolazione dei bambini in età prescolare; tuttavia sono state raccolte le informazioni necessarie a tale valutazione, in particolare il tempo trascorso all'interno dell'edificio scolastico.

Inoltre, la già citata pubblicazione n.65 dell'ICRP, oltre a proporre nuovi fattori dosimetrici rispetto alla raccomandazione europea del 1990, dice che "... per quanto riguarda l'esposizione al radon, la Commissione non ritiene di dover adottare per i bambini un coefficiente di rischio diverso da quello degli adulti..."; per questo motivo possono essere così utilizzati i fattori di conversione proposti dall'ICRP 65 e cioè che una concentrazione media annuale di 200 Bq/m³, con un fattore di occupazione dell'80 % (7000 ore annue), corrisponde a 3 mSv.

E' stato dunque calcolato un intervallo di variabilità della dose annuale da esposizione al radon a cui è soggetta la popolazione in età prescolare della regione Emilia-Romagna, adottando le seguenti ipotesi cautelative:

- il valore minimo risulta dal valore minimo di concentrazione rilevato fra tutti i dosimetri esposti e dal valore minimo del tempo di apertura ai bambini dell'edificio scolastico
- il valore massimo risulta invece dal valore massimo rilevato fra tutti i dosimetri esposti e dal valore massimo del tempo di apertura ai bambini
- tutte le scuole ed asili nido hanno un'apertura su 5 giorni settimanali
- la chiusura estiva e nei periodi festivi comporta un'apertura dell'edificio scolastico di 38 settimane all'anno.

Con queste ipotesi, in tabella 2.5 è riportato l'intervallo di variabilità della dose annua da esposizione al radon.

Tabella 2.5 - Stima dell'equivalente di dose efficace media annua regionale (mSv/anno)

	<i>tempo di residenza</i>		<i>fatt.occup.</i>	<i>concentr.</i>	<i>dose annua</i>
	<i>h/sett.</i>	<i>sett./anno</i>	<i>(%)</i>	<i>(Bq/m³)</i>	<i>(mSv)</i>
<i>minimo</i>	37.5	38	16	6	0.02
<i>medio</i>	42.5	38	18	49	0.17
<i>massimo</i>	55	38	23	498	2.16

Occorre tuttavia osservare che nel calcolo del valore di dose annua devono essere impiegati i valori di concentrazione medi annui, mentre in questo caso i valori rilevati nel semestre di misura sono stati considerati come rappresentativi della concentrazione annua.

In realtà, dall'indagine nelle abitazioni era emerso che la concentrazione media "invernale" (settembre-marzo) aumentava del 68.8% rispetto a quella media "estiva" (marzo-settembre); per

questo motivo, è ragionevole supporre che i valori di dose annua riportati in tabella sovrastimino i valori effettivi di dose.

Si ricorda, infine, che nell'ICRP 65, la Commissione raccomanda che la scelta dei livelli di azione che le autorità preposte dovranno stabilire cada nell'intervallo di dose annua di 3 - 10 mSv; tali livelli di azione dovranno essere associati ad interventi atti a produrre sostanziali riduzioni dell'esposizione al radon.

Nel corso degli anni, altre regioni hanno effettuato indagini negli edifici scolastici (Friuli Venezia-Giulia, Toscana, Trentino, Alto Adige) e l'analisi dei valori rilevati confermano che nella regione Emilia-Romagna la concentrazione di radon indoor risultano generalmente medio-bassi ^(5,6).

2.4 Conclusioni

La tabella 2.6 riporta i dati ottenuti dalle due indagini; quelli dell'indagine regionale nelle abitazioni sono relativi al secondo semestre di esposizione, cioè quello "invernale", affinché il confronto avvenga fra dati omogenei rispetto al periodo di esposizione dei dosimetri.

Tabella 2.6 - Statistiche di base derivanti dalle indagini regionali

<i>DATI STATISTICI</i>	<i>INDAGINE SCUOLE</i>	<i>INDAGINE ABITAZIONI</i>
n. rivelatori	1553	364
valore minimo (Bq/m ³)	6	15
valore massimo (Bq/m ³)	498	473
media aritm. (Bq/m ³)	49	54
mediana (Bq/m ³)	38	45
% < 50 Bq/m ³	67.3	59.9
% < 100 Bq/m ³	92.3	93.4
% < 200 Bq/m ³	98.7	98.4

In entrambe le campagne di misure, il valore massimo rilevato risulta inferiore a 500 Bq/m³ e le due medie aritmetiche sono comparabili; inoltre, la probabilità di trovare valori superiori a 200 Bq/m³ risulta inferiore al 2%.

In Tav. 2 vengono riportate le località nelle quali sono state effettuate misure di radon indoor: sono rappresentate le concentrazioni medie relative al semestre "invernale" di misura nelle abitazioni e quelle rilevate nelle scuole, nei locali posti esclusivamente al piano terra.

Viene inoltre rappresentata una prima cartografia delle curve di isolivello delle concentrazioni di radon indoor derivata dall'elaborazione di questi dati; si rimanda al capitolo 7 per analisi più approfondite dei valori di radon indoor nella loro completezza.

La tabella 2.7 riporta i dati delle stime del valore medio di dose calcolato nelle indagini svolte nelle scuole e nelle abitazioni.

Tabella 2.7 – Confronto fra i valori stimati di equivalente di dose efficace media annua regionale

	<i>fattore occupazione (%)</i>	<i>concentrazione media (Bq/m³)</i>	<i>esposizione media annua (10⁵Bq-h/m³)</i>	<i>dose media annua (mSv)</i>
<i>abitazioni</i>	61	43	2.3	0.49
<i>scuole</i>	18	49	0.8	0.17

Dall'analisi dei risultati rilevati nel corso delle indagini, si può concludere che:

- nelle abitazioni dell'Emilia-Romagna, i valori di concentrazioni di radon risultano paragonabili ai valori medi riscontrati nei Paesi "industrializzati" ⁽⁷⁾; il valore medio regionale è inferiore a quello ottenuto in altre regioni ^(5,6) e alla media nazionale (70 Bq/m³) ⁽⁸⁾. L'Emilia-Romagna risulta un territorio a basso contenuto di radioattività naturale; dall'indagine nelle scuole, pur aumentando decisamente il numero di locali indagati rispetto a quella nelle abitazioni, è mantenuta praticamente invariata la probabilità di trovare locali con concentrazioni "alte" (> 200 Bq/m³), mentre è incrementata la percentuale di locali con concentrazione "bassa" (< 50 Bq/m³);
- dalla curva log-normale derivata teoricamente dai dati sperimentali, riportata in figura 2.2, si può stimare che in nessuna abitazione della regione si superano livelli di concentrazione media annua di radon pari a 380 Bq/m³;
- il radon presente negli ambienti chiusi proviene prevalentemente dal suolo sottostante gli edifici;
- negli edifici scolastici della regione l'equivalente di dose media annua derivata da esposizione al Radon risulta pari a circa 1/3 rispetto a quella nelle abitazioni, in quanto, pur rilevando valori di concentrazione media annua paragonabili fra le due tipologie di strutture, il fattore di occupazione degli edifici scolastici risulta circa 1/3 rispetto alle abitazioni.

Bibliografia

- ⁽¹⁾ CEC (Commissione della Comunità Europea) (1990) *Raccomandazione della Commissione del 21-02-90 sulla tutela della popolazione contro l'esposizione al Radon in ambienti chiusi* (90/143/Euratom), Gazz.Uff.Com.europee. L80, 26-28
- ⁽²⁾ STATGRAPHICS Plus for Windows – Version 1 (1994)
- ⁽³⁾ ICRP (International Commission on Radiological Protection) (1993), *Protection against Radon-222 at home and at work*, ICRP Publication 65, Annals of the ICRP 23 (2), Pergamon Press, Oxford
- ⁽⁴⁾ UNSCEAR (UNited Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (1993), *Sources and effects of ionizing radiation*, United Nations ed., New York, E.94.IX.2.
- ⁽⁵⁾ M.R. Malisan, R. Padovani (1994) "Assessment of Radon exposure in kindergartens in North-East Italy", *Radiation Protection Dosimetry*, 56 (1-4); 293-297
- ⁽⁶⁾ L.Gaidolfi, M.R. Malisan, S.Bucci, M.Cappai, M.Bonomi, L.Verdi, F.Bochicchio (1998) "Radon measurements in kindergartens and schools of six italian regions", *Radiation Protection Dosimetry*, 78 (1); 73-76
- ⁽⁷⁾ UNSCEAR (UNited Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (2000), *Sources and effects of ionizing radiation*, United Nations ed., New York
- ⁽⁸⁾ Bochicchio F., Campos venuti G., Nuccetelli C., Piermattei S., Risica S., Tommasino L., Torri G. (1996) "Results of the representative italian natural survey on Radon indoors", *Health Phys.* 71 (5); 741-748

3. INDAGINI GEOLOGICHE PER LA CONOSCENZA E LA PREVENZIONE DEL RISCHIO “RADON”

Luca Martelli – Regione Emilia Romagna - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli

3.1 Introduzione

Un aspetto fondamentale per la conoscenza e prevenzione del rischio “Radon” è la definizione delle condizioni geologiche locali; gli aspetti geologici che principalmente influiscono sulle emissioni di radon sono la composizione geochemica delle rocce (presenza di elementi capaci di generare radon) e le vie di connessione tra le rocce “madri” e i serbatoi naturali di radon e la superficie.

La trasmissione di gas tra sottosuolo e superficie avviene grazie alla porosità delle rocce (permeabilità primaria) e attraverso le faglie e i sistemi di fratturazione (permeabilità secondaria).

Per la caratterizzazione delle litologie e dei principali sistemi di faglie è stata predisposta una carta di riferimento, alla scala 1:250.000, appositamente derivata dalla Carta Geologico-Strutturale dell’Appennino Emiliano-Romagnolo alla scala 1:250.000 ⁽¹⁾ e dalla cartografia geologica regionale alla scala 1:10.000 e 1:25.000 ⁽²⁾. Tale cartografia, qui non riprodotta per la sua complessità, è consultabile presso il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Sulla base di precedenti analoghe indagini ⁽³⁾ e di dati di letteratura specialistica, nella carta geologica di riferimento predisposta per l’Emilia-Romagna, le rocce affioranti sono state raggruppate in base a litologia prevalente, stima della permeabilità ed età (MA = Milioni di Anni).

3.2 Classificazione litologica

Per la pianura padana e la costa i depositi affioranti sono state raggruppati nelle seguenti classi:

- argille e limi di piana alluvionale e di laguna; permeabilità primaria generalmente bassa; spessore variabile da qualche decina ad alcune centinaia di metri; età: Pleistocene medio (0.8 MA – Presente);
- sabbie di canale e di argine fluviale e sabbie costiere; permeabilità primaria medio-alta; spessore variabile da qualche metro a poche decine di metri; età: Pleistocene medio (0.8 MA – Presente);
- ghiaie e sabbie di conoide; permeabilità primaria alta; spessore variabile da diverse decine a pochi metri andando dal margine verso la pianura e la costa; età: Pleistocene medio (0.8 MA – Presente).

Per la zona appenninica, cioè la montagna e la zona collinare fino al limite morfologico che segna il passaggio alla pianura, i depositi e le rocce affioranti sono stati raggruppati nelle seguenti classi:

- depositi alluvionali di fondovalle e terrazzati e depositi fluvio-lacustri intramontani, costituiti da ghiaie, sabbie e limi con buona permeabilità primaria; spessore variabile da pochi metri ad alcune decine di metri; età: Pliocene superiore terminale (2 MA – Presente);
- prevalenti arenarie, generalmente poco cementate, sabbie e alternanze sabbioso-pelitiche con livelli ghiaiosi e rari intervalli pelitici; buona permeabilità primaria e secondaria; spessore variabile da poche a diverse decine di metri; età: Messiniano superiore - Pleistocene medio (6 – 0.65 MA);
- argille e argille marnose, con intercalazioni di sabbie e arenarie e livelli di slump; bassa permeabilità; spessore variabile da alcune decine a oltre mille metri; età: Messiniano superiore – Pleistocene inferiore (6 - 1 MA);
- gessi e calcari evaporitici con intervalli argillosi e gessoareniti; permeabilità per fratturazione e carsismo; spessore di alcune decine di metri, talora raddoppiato da ripetizioni tettoniche; età: Messiniano inferiore - medio (6.5 - 6 MA);

- prevalenti arenarie e calcareniti, alternanze di areniti e peliti, intercalazioni di conglomerati; areniti generalmente fini e medie, ben cementate; bassa permeabilità primaria, buona permeabilità per fratturazione; spessore variabile da poche decine ad alcune migliaia di metri; età: Eocene medio - Miocene superiore (45 - 7 MA);
- marne e argille prevalenti con intercalazioni di arenarie, mélanges, argille varico-lori, talora caotiche e intensamente deformate; permeabilità generalmente bassa, talora maggiore per fratturazione; spessore variabile da poche decine a varie centinaia di metri; età: Cretaceo inferiore - Miocene superiore (145 – 6.5 MA);
- alternanze marnoso-calcaree e arenaceo-pelitiche; bassa permeabilità primaria, buona permeabilità per fratturazione; spessore variabile da poche decine ad alcune migliaia di metri; età: Cretaceo superiore - Eocene medio (80 - 42 MA);
- carbonati, calcari silicei, diaspri, marne calcaree; bassa permeabilità, talora più alta per fratturazione; spessore di qualche decina di metri; età: Triassico superiore - Oligocene inferiore (210 - 30 MA);
- ofioliti, breccie ofiolitiche e granitoidi in lenti e olistoliti, arenarie ofiolitiche; bassa permeabilità, talora più alta per fratturazione; spessore variabile da alcune decine a diverse centinaia di metri; età: Giurassico - Cretaceo (205 - 115 MA);
- gessi, anidriti, quarziti, calcari dolomitici nodulari e vacuolari, micascisti e anfiboliti; bassa permeabilità, talora più alta per fratturazione e carsismo; spessore da alcune decine a qualche centinaio di metri; età: Triassico inferiore - superiore (235 - 210 MA);
- zone cataclastiche e intensamente fratturate, breccie tettoniche.

Su questa base cartografica, è stata pianificata ed eseguita una campagna di raccolta di campioni dei principali litotipi affioranti a scala regionale per le successive analisi di laboratorio, allo scopo di stimare la concentrazione degli elementi capaci di generare radon; i risultati sono riportati nel cap.4. La scelta degli affioramenti da campionare e la localizzazione dei campioni è stata effettuata sulla base di una carta litologica appositamente derivata dalla Carta Geologica dell'Appennino Emiliano-Romagnolo alla scala 1:10.000 ⁽²⁾ (Tav. 1).

In tabella 3.1 si riporta una scheda con l'ubicazione e la litologia dei campioni raccolti nell'ambito del bacino idrografico di pertinenza emiliano-romagnolo.

Dato che le vie preferenziali di risalita di gas dal sottosuolo sono le fratture e le faglie, nella carta di riferimento regionale sono state riportate, compatibilmente con la scala di rappresentazione, anche le principali zone di faglie, sia in Appennino che nel sottosuolo padano.

Poiché in corrispondenza di risalite di metano sono state misurati valori anomali di radon (vedi cap. 6), sono state mappate anche le manifestazioni superficiali naturali di idrocarburi in Emilia-Romagna (cortesia ENI S.p.A. e riferimenti bibliografici 4 e 5) (figura 3.1)

Informazioni su potenziali vie di risalita di gas dal sottosuolo possono derivare anche dalla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna alla scala 1:250.000 ⁽⁶⁾.

Le carte sopra citate costituiranno la base di riferimento per la pianificazione di una eventuale nuova campagna di misurazioni in sito di emissioni radon dal sottosuolo.

Figura 3.1 – Vie potenziali di risalita di gas dal sottosuolo

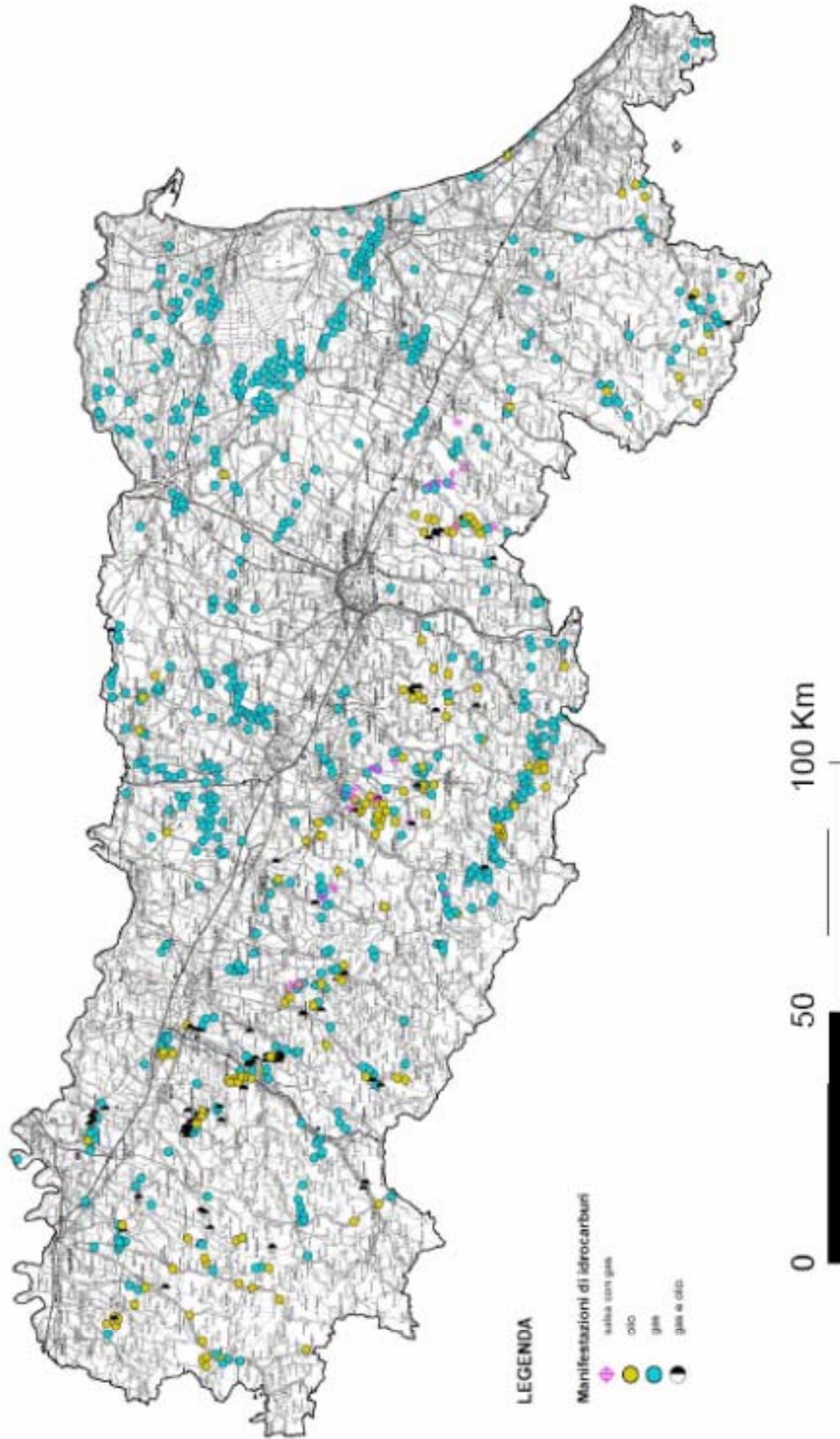


Tabella 3.1 (1) – Scheda campioni

n.	località	formazione	litologia	età
1	Coniale (in sn Santerno) sez. 253020 (limite con sez. 253060)	Marnoso - Arenacea membro di Premilcuore, intorno strato Contessa	1A – arenaria 1B – pelite	Langhiano superiore (Miocene medio)
2	SS610 a nord di Coniale, in prossimità del thrust a monte dell'olistostroma di Visignano, sez. 253020	Marnoso - Arenacea, membro di Bassana, sopra olistostroma di Casaglia	2A – arenaria 2B – pelite (cataclasite) 2C – vena di calcite	Serravalliano superiore (Miocene medio)
3	SS610 tra Moraduccio e Castel del Rio sez. 253020 (NE)	Marnoso - Arenacea, membro di Civitella, orizzonte arenaceo	3A – arenaria fine (tettoarenite strato 1) 3B – pelite (strato 1) 3C – arenaria media (base strato 2 molto spesso)	Tortoniano inferiore (Miocene superiore)
4	Fontanelice, sn Santerno, sez. 238110	Marnoso-Arenacea, membro di Fontanelice	4A – arenaria ben cementata 4B – arenaria mal cementata	Tortoniano inferiore (Miocene superiore)
5	Borgo Tossignano, in alveo Santerno dx, sez. 238120 (limite con 238110)	Ghioli di Letto	marna	Messiniano inferiore (Miocene superiore)
6	Borgo Tossignano, in alveo Santerno dx, sez. 238120 (limite con 238110)	Gessoso - Solfifera	gesso	Messiniano medio (Miocene superiore)
7	Borgo Tossignano, in alveo Santerno dx, sez. 238120 (limite con 238110)	Gessoso - Solfifera	argilla	Messiniano medio (Miocene superiore)
8	dx Santerno, Strada vicinale Rio Gambellara, tra Casone vecchio e Il Castello (rudere), sez. 238120	Argille Azzurre	marna	Pliocene inferiore
9	via Idice, tra Idice e Castel de' Britti, sez. 221140, cava abbandonata davanti a campo nomadi e oltre campi sportivi e pista go-kart	Sabbie di Imola	sabbia	Pleistocene medio
10	a sud-est di Fiumana, sopra il Fosso di Calanova, affioramento tra q. 145 e q. 126, sez. 254080	Arenarie di Lardiano	sabbie e arenarie mal cementate	Pliocene medio - superiore
11	loc. Massera, lungo la strada comunale e della Lucchina, tra Fiumana e Rocca delle Camate, sez. 254080	Spungone	calcareniti e calciruditi bioclastiche	Pliocene medio
12	loc. Zerbosa (a est di Predappio), sez. 254120	Arenarie di Borello	alternanza di: 12A - prevalenti arenarie cementate 12B - subordinate marne	Pliocene inferiore (zona a G. Punctulata)

Tabella 3.1 (2) – Scheda campioni

n.	località	formazione	litologia	età
13	Lungo la SP58BO tra Battedizzo e casa dei Giorgi, dalla Val di Setta a Badolo, sez. 237040	Formazione di Monterumici	arenaria mal cementata	Pliocene inferiore
14	Lungo la SP58BO, al km 11; 1 km dopo Badolo verso Pian di Macina, sez. 237040	Formazione di Monte Adone	arenaria mal cementata	Pliocene medio-superiore
15	Lungo la SP59BO, al km 3; tra Vado e il bivio per Monterumici e Brento, sez. 237080	Arenarie di Loiano	arenaria poco cementata	Eocene medio
16	Lungo la strada da Castiglione dei Pepoli al lago di Brasimone, in dx Fosso di Brasimone, sez. 252060	Arenarie di Castiglione dei Pepoli	arenaria ben cementata	Miocene inferiore – medio
17	Lungo la strada da Castiglione dei Pepoli al lago di Brasimone, in dx Fosso di Brasimone, sez. 252060	Arenarie di Castiglione dei Pepoli	alternanza di: 17A - prevalenti arenarie ben cementate 17B - subordinate marne	Miocene inferiore – medio
18	Busana, lungo la strada per il Passo del Cerreto, sez. 234040	Gessi e calcari di Sassalbo e della Val Secchia	calcare	Triassico superiore
19	Nismozza, lungo la strada per il Passo del Cerreto, sez. 234040	Gessi e calcari di Sassalbo e della Val Secchia	calcare	Triassico superiore
20	Vologno, sez. 235020	Formazione di Monte Venere	arenaria	Campaniano medio – Maastrichtiano (Cretacico sup.)
21	Canossa, sez. 218020	Mélange della Val Tiepido-Canossa	argilla caotiche e breccia argillosa	Aquitano (Miocene inferiore)
22	Lungo la strada di fondovalle Taro, tra Ostia e Borgo Val di Taro, sez. 216100	Formazione di Ranzano	arenaria	Eocene superiore - Oligocene inferiore
23	Gorro, sez. 216070	Ofioliti	serpentinite	Giurassico
24	Ca' Bianca, sez. 220090	Argille Azzurre	argilla marnosa	Pliocene inferiore – Pleistocene inferiore
25	Monte Cimone, sez. 251010	Arenarie di Monte Modino	25A - arenaria 25B - arenaria	Miocene inferiore
26	Montecreto, SS 324, sez. 236130	Arenarie del Monte Cervarola	arenaria con vene di calcite	Miocene inferiore
27	Travo, subito dopo il paese lungo la strada per Bobbiano, sez. 179110	Formazione della Val Luretta	arenaria	Paleocene-Eocene medio
28	Genepreto, sez. 179050	Flysch di Monte Sporno	arenaria	Paleocene superiore – Eocene medio

Bibliografia

- ⁽¹⁾ Cerrina Feroni A., Martelli L., Martinelli P., Ottria G. (2002) – *Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo in scala 1:250.000*. Regione Emilia-Romagna-Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – C.N.R.-I.G.G., sezione di Pisa. S.EL.CA., Firenze
- ⁽²⁾ *Carta Geologica dell'Appennino Emiliano-Romagnolo alla scala 1:10.000 e alla scala 1:25.000*. Disponibile presso l'Archivio cartografico della Regione Emilia-Romagna, via dello Scalo 3/2, Bologna, o presso il Servizio geologico, sismico e dei suoli, Regione Emilia-Romagna, viale A. Silvani, 4/3, Bologna
- ⁽³⁾ *Il sistema informativo territoriale per la valutazione del Potenziale di Esalazione di Radon dal Suolo* - ANPA (2000)
- ⁽⁴⁾ Scicli A. (1972) *L'attività estrattiva e le risorse minerarie della Regione Emilia-Romagna* Poligrafico Artioli, Modena
- ⁽⁵⁾ Martinelli G., Judd A. (2004) “*Mud volcanoes of Italy*” *Geological Journal*, 39, 49-61
- ⁽⁶⁾ Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Tanini C., Vannucci G. (2004) – *Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna in scala 1:250.000*. Regione Emilia-Romagna-Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – C.N.R.-I.G.G., sezione di Firenze. S.EL.CA., Firenze

4. LA RADIOATTIVITÀ NELLE ROCCE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Laura Tositti - Università degli Studi di Bologna – Dipartimento di Chimica “G. Ciamician”
Roberto Sogni, ARPA – Sezione provinciale di Piacenza

4.1 Introduzione

Una corretta valutazione della situazione “Radon” richiede il supporto integrato di informazioni radiometriche, geologiche e pedologiche, pertanto si è ritenuto opportuno verificare sperimentalmente gli effettivi livelli di radioattività naturale, ossia dei radionuclidi precursori del radon presenti nelle rocce in Emilia-Romagna.

Si è perciò proceduto ad analizzare, mediante la tecnica della spettrometria γ ad alta risoluzione, una serie rappresentativa di rocce campionate sul territorio regionale; fino ad oggi questo tipo di informazione risultava, infatti, alquanto limitato, disperso e comunque non associato ad indagini sistematiche relative alla problematica “Radon” in ambito regionale.

Naturalmente l’attività qui descritta non ha la presunzione di considerarsi esaustiva, dato il numero limitato di campioni di roccia; va sottolineato in ogni caso come i campioni siano stati prelevati in modo rappresentativo sulla base delle informazioni geochimiche già disponibili per il territorio emiliano-romagnolo.

L’indagine, inoltre, non ha incluso campioni di suolo, di detriti di versante, di depositi alluvionali e di sabbie costiere; tuttavia, sottolineando il carattere preliminare di questa indagine, è opportuno motivare la strategia scelta sulla base di quanto segue.

Al di là di quello che voleva essere un intervento necessariamente pragmatico, le informazioni di tipo geo-litologico indicavano già *a priori* l’assenza di affioramenti rocciosi potenzialmente ricchi in radioattività naturale.

Per quanto riguarda i suoli, le coperture detritiche, i depositi alluvionali e quelli costieri, si è ritenuto che, derivando in larga parte da processi disgregativi legati al *weathering* delle rocce e quindi alla tipologia litologica, climatica e idrologica di questa regione, essi mantengano in larga parte le caratteristiche minerali della roccia madre, presentando quindi una limitata differenziazione geochimica da essa, almeno in prima approssimazione.

Gli autori di questo rapporto sono ovviamente consapevoli che, pur essendo i livelli di concentrazione di precursori di radon nelle rocce madri (e nei relativi suoli) un dato essenziale per la valutazione oggettiva della situazione radon in una data area, l’accumulo di radon indoor è in effetti prodotto da un sinergismo di fattori.

Sebbene elevate concentrazioni di precursori siano generalmente associate ad un’alta probabilità di produrre livelli elevati di radon indoor, è ben noto come si tratti di una condizione necessaria ma non sufficiente a produrli.

Al di là delle considerazioni relative alle caratteristiche costruttive degli edifici, esiste infatti un generale consenso in merito al ruolo determinante della permeabilità dei materiali cristallini, sia su scala microscopica (nanopori) sia su scala intermedia (porosità in relazione alla granulometria) o addirittura macroscopica (grado di fratturazione delle formazioni rocciose – faglie – *reservoir* di fluidi geofisici - vulcanismo) nel controllare ingresso ed accumulo di radon in un ambiente chiuso attraverso processi di trasporto avvertivo (controllati da gradienti di pressione) e diffusivo (controllati da gradienti di concentrazione).

La documentazione scientifica in tal senso è ormai consolidata e internazionalmente condivisa e vasta, a partire da quello che è stato ed è tuttora un testo di riferimento ⁽¹⁾, fino ad arrivare alla letteratura tecnica e scientifica più recente.

Inoltre, anche le condizioni meteo-climatiche influenzano significativamente i processi di trasferimento del radon dai materiali cristallini all'atmosfera sia *outdoor*, dove il radon viene largamente impiegato come tracciante di masse d'aria ^{(2), (3)}, che *indoor*.

E' ben noto come la pressione atmosferica condizioni sia le fluttuazioni giornaliere che quelle stagionali di radon tanto nella libera atmosfera quanto in ambienti chiusi, influenzandone sia il flusso (n° atomi di radon emessi nell'unità di tempo attraverso una superficie unitaria) sia i processi di redistribuzione e conseguente diluizione che ne determinano la concentrazione ⁽⁴⁾.

Oltre alla temperatura e alla pressione, l'esalazione di radon è molto influenzata anche dall'umidità presente nei pori/fratture dei materiali cristallini in cui il gas si forma: un'elevata quantità di "soil moist", che dipende in larga parte dal regime pluviometrico locale, inibisce l'esalazione di radon, che risulta invece favorita in climi secchi e aridi.

I dati qui presentati si riferiscono ad una serie di campioni scelti in base al criterio dell'"Unità di Roccia"¹ indicato nel rapporto ANPA del 2000 come uno dei parametri di riferimento per la programmazione di un'indagine PERS (Potenziale di Esalazione di Radon dal Suolo) in Italia ⁽⁵⁾.

4.2 La geologia ed il radon

Com'è noto, il radon si produce nelle rocce e nei suoli a seguito del decadimento dei radionuclidi precursori, ossia uranio e radio, presenti in tutti i solidi cristallini, con livelli di concentrazione legati alla genesi e ai processi di trasformazione delle rocce nel corso del tempo ^{(5), (6), (7), (8)}.

Di conseguenza la valutazione della "situazione Radon" in una certa zona si deve impostare a partire dalla determinazione dei livelli di radionuclidi precursori nelle rocce/suoli della regione studiata.

Va ricordato, naturalmente, che nelle rocce e nei suoli che da esse derivano a seguito dei processi di *weathering* attivi sulla superficie del nostro pianeta², non è presente solo la famiglia del ²³⁸U che, attraverso il ²²⁶Ra, è strettamente associato all'isotopo ²²²Rn, ossia quello principalmente responsabile dei rischi radiologici alla popolazione, ma anche altri radionuclidi naturali come ²³²Th, ²³⁵U e ⁴⁰K.

Questi radionuclidi sono considerati "primordiali" in relazione al loro elevato tempo di emivita; tra questi, soltanto il ⁴⁰K non dà luogo ad una famiglia radioattiva.

Il contenuto di radionuclidi naturali nelle rocce e nei suoli è piuttosto variabile, in ragione dei differenti processi di formazione da cui derivano; poiché sull'argomento esistono ormai ampie trattazioni, si rimanda ai testi precedentemente citati per ulteriori approfondimenti.

L'associazione e la distribuzione di questi radionuclidi e dei loro discendenti in caratteristici livelli di concentrazione, costituiscono da tempo uno strumento ampiamente utilizzato per classificare e caratterizzare da un punto di vista geochimico rocce e suoli. Questi elementi, inoltre, costituiscono di per sé una delle principali sorgenti di radiazioni ionizzanti cui la popolazione è esposta in relazione alla loro presenza pressoché ubiquitaria in tutti i materiali cristallini ^{(7), (8)}.

¹ L'"Unità di Roccia", rappresentata cartograficamente come un'area, è un corpo roccioso tridimensionale omogeneo, con una determinata estensione superficiale ed in profondità; è individuata essenzialmente in base alla litologia ed alla geometria (spessore) e spesso è delimitata da elementi tettonici importanti (faglie), ma è definita anche da tutte le altre caratteristiche dell'ammasso roccioso: contenuto di elementi radioattivi (in particolare ²²⁶Ra), fratturazione, porosità, permeabilità e caratteristiche idrogeologiche

² Com'è noto, i suoli si formano attraverso processi di disaggregazione e di alterazione delle rocce attraverso il sinergismo tra effetti meteorologici, biologici ed antropogenici. La componente minerale dei suoli, seppure in forma inconsolidata, caratterizzata da granulometrie più o meno sottili, spesso fortemente alterata da un punto di vista chimico, mantiene tuttavia uno stretto legame con la matrice rocciosa di derivazione. Il grado di frammentazione di rocce e suoli è naturalmente in collegamento con lo stadio raggiunto nel corso del processo di trasformazione nella sua complessità ed è un fattore determinante per quanto concerne il cosiddetto "Radon potential" di un'area.

La presenza di quello che viene definito “disequilibrio radioattivo” tra i membri delle famiglie radioattive viene utilizzato sia per delucidare i meccanismi di formazione e di alterazione delle rocce a seguito delle interazioni con l’ambiente (agenti atmosferici, acque, pH e condizioni ossido-riduttive, all’origine dei processi di *weathering* fisico e chimico), sia per stimare l’età delle rocce stesse ⁽⁹⁾.

Questa fenomenologia può essere determinante in quei casi per i quali, a seguito dei processi di genesi e/o di alterazione geochimica delle rocce, si producono arricchimenti di ²²⁶Ra, ossia il più diretto precursore del ²²²Rn rispetto al progenitore ²³⁸U, con esiti non trascurabili sui livelli di radon indoor ad essi associati.

Sulla base di queste ormai ampie e consolidate conoscenze, sono attualmente disponibili sia dati presenti in letteratura riportanti il contenuto medio dei radionuclidi primordiali nei suoli a livello mondiale (Rapporto UNSCEAR 2000 ⁽⁷⁾ riassunto nella tabella 4.1 sotto riportata), sia relativi a materiali da costruzione italiani ⁽¹⁰⁾, nonché dati bibliografici in cui le diverse tipologie di roccia presenti in Italia sono classificate in base a caratteristici intervalli di concentrazione dei radionuclidi in esse contenute ^{(5), (11), (12)}. A titolo di esempio si riporta la tabella 4.2.

Tabella 4.1 – Concentrazione (Bq/kg) a livello mondiale di radionuclidi naturali nei principali tipi di materiali cristallini (rocce)

Radionuclidi naturali	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Media	35	35	30	400
Intervallo variabilità	16-110	17-60	11-64	140-850

Tabella 4.2 (1) – Concentrazione media (Bq/kg) di radionuclidi naturali nei principali tipi di materiali cristallini (rocce) – dati nazionali (tra parentesi sono riportati il valore minimo e massimo)

Materiali cristallini	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Coni di deiezione *	n.d.	35	45	854
Antropizzato *	n.d.	40	51	868
Terrosa nera *	n.d.	26	36	302
Dioriti *	n.d.	36	47	351
Micascisti e Biotite *	n.d.	25	45	471
Paleosuolo *	n.d.	16	23	239
Flysc **	43 (3-118)	24 (2-84)	38 (2-139)	526 (165-743)
Travertino **	< MDA	5 (2-9)	14 (3-28)	66 (20-112)
Lave **	134 (59-270)	124 (72-216)	234 (132-361)	2175 (1699-2560)
Alluvioni, Detriti di falda e Depositi morenici ***	77	11	12	n.d.
Alluvioni, Detriti ciottolosi e alluvionali *	n.d.	31 (17-41)	41 (14-67)	759 (384-1533)
Successioni Dolomitiche ***	48	27 (3-78)	2 (1-9)	n.d.
Calcari e Dolomie **	31 (8-96)	13 (2-43)	6 (1-88)	14 (2-29)
Successioni Calcaree ***	52 (n.r.-77)	17 (5-28)	n.r. (0-1)	n.d.

Tabella 4.2 (2) – Concentrazione media (Bq/kg) di radionuclidi naturali nei principali tipi di materiali cristalli (rocce) – dati nazionali (tra parentesi sono riportati il valore minimo e massimo)

Materiali cristalli	²³⁸U	²²⁶Ra	²³²Th	⁴⁰K
Successioni Calcareao-silico-marnose ***	22 (n.r.-43)	10 (3-16)	6 (2-10)	n.d.
Calcari marnose e Marne **	35 (11-65)	23 (4-70)	7 (1-22)	100 (2-415)
Marne argillose e di S.Agata *	n.d.	26 (25-27)	30 (27-34)	527 (470-624)
Alternanze ritmiche di Arenarie, Peliti e Argille ***	39	35	37	n.d.
Arenarie *	n.d.	27 (23-31)	33 (26-40)	566 (501-631)
Alternanze di Calcari, Marne e Argille ***	18	23	17	n.d.
Depositi clastici, ghiaie e sabbie ***	57 (n.r.-90)	26 (15-38)	27 (1-47)	n.d.
Sabbie e conglomerati **	49 (12-219)	23 (1-54)	28 (2-92)	458 (10-675)
Rioliti e Porfidi ***	121 (28-610)	55 (29-203)	76 (37-233)	n.d.
Porfidi *	n.d.	29 (24-35)	63 (52-73)	1482 (1271-1693)
Basalti ***	50 (25-82)	18 (13-22)	21 (12-28)	n.d.
Tufi ***	71 (66-81)	17 (12-20)	18 (16-20)	n.d.
Tufi **	160 (26-417)	147 (54-362)	311 (4-621)	967 (160-2471)
Paragneiss e micascisti ***	75 (33-156)	60 (31-136)	44 (18-64)	n.d.
Scisti e filladi ***	64 (40-112)	37 (28-48)	58 (26-75)	n.d.
Ortogneiss ***	68 (27-135)	62 (12-127)	36 (18-59)	n.d.
Miloniti ***	42	34	59	n.d.
Marmi ***	24 (n.r.-41)	24 (1-55)	9 (0-24)	n.d.
Anfiboliti ed eclogiti ***	19	12	16	n.d.
Graniti e Granodioriti ***	49 (33-79)	55 (34-87)	54 (21-68)	n.d.
Graniti *	n.d.	50 (21-98)	64 (36-116)	926 (855-986)
Gabbri ***	17	16	21	n.d.

* rif. 12 (per il ²²⁶Ra i valori sono stati stimati dalla media “pesata” dei fotopicchi di emissione dei suoi prodotti di decadimento ²¹⁴Pb e ²¹⁴Bi)

** rif. 11

*** rif. 5 (Per il ²³²Th si fa riferimento al nuclide figlio ²²⁸Ra)

Nonostante i livelli di radon indoor dipendano in modo significativo dalla concentrazione di radionuclidi precursori nelle rocce/suoli, è il processo di trasferimento dai materiali cristallini (rocce e suoli) agli ambienti indoor nella sua complessità che più spesso risulta determinante al fine dell'accumulo del radon stesso ⁽⁴⁾.

4.3 Criteri di campionamento

I campioni sono stati prelevati, sulla base dei criteri precedentemente menzionati, dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione e dalla Sezione Provinciale di Reggio Emilia di ARPA, e sottoposti ad analisi γ dai Laboratori di Radiochimica Ambientale del Dipartimento di Chimica "G. Ciamician" dell'Università degli Studi di Bologna e dell'Area Eccellenza Isotopia e Radioattività Ambientale della Sezione Provinciale di Piacenza di ARPA, secondo un protocollo comunemente convenuto.

Va osservato che in precedenti ricerche di tipo analogo sono state adottate densità statistiche di campionamento pari a circa 1 campione ogni 50 km² ⁽⁵⁾. Nella presente prospezione è stata adottata una densità minore considerato il carattere preliminare del lavoro.

I campioni di roccia sono stati sottoposti ad un preliminare trattamento, consistito nella macinatura, pesatura (aliquote variabili tra 80-120 g) ed inserimento in contenitori di materiale polimerico adeguato in modo da ottenere una geometria cilindrica di spessore pari ad 1 cm per 6 cm di diametro. Al termine i contenitori sono stati opportunamente sigillati mediante resine epossidiche, allo scopo di garantire la tenuta del gas radon.

4.4 Analisi radiometriche: spettrometria γ ad alta risoluzione

La determinazione dei livelli di radioattività in materiali cristallini viene effettuata mediante la misura non distruttiva dell'emissione γ degli isotopi radioattivi in essi presenti; per questo tipo di misura vengono normalmente impiegati sistemi di rivelazione al germanio intrinseco (HPGe)³.

La scelta di sistemi di rivelazione al germanio intrinseco è sicuramente molto vantaggiosa nel caso della determinazione di radioattività nei materiali cristallini, che contenendo praticamente tutti i membri delle tre famiglie radioattive naturali, presentano spettri γ in genere piuttosto complessi.

Con l'eccezione del radionuclide primordiale ⁴⁰K che presenta un'unica emissione a 1461 keV, ²³⁸U, ²³⁵U e ²³²Th presentano una serie di emissioni γ associate ai discendenti che costituiscono le famiglie radioattive naturali di cui sono capostipiti.

La difficoltà interpretativa non dipende solo dal numero di γ -emettitori simultaneamente presenti, ma anche dalla complessità dei loro schemi di decadimento e dalle numerose interferenze spettrali dovute ad energie di emissione γ a volte molto prossime o addirittura sovrapposte.

È possibile perciò sfruttare l'elevata capacità risolvibile dei rivelatori a semiconduttore di tipo HPGe per analizzare in modo ottimale questa tipologia di campioni ⁽¹³⁾. La corretta e definitiva interpretazione degli spettri di rocce e suoli, tuttavia, non è mai un'operazione banale, come ampiamente documentato in letteratura ⁽¹⁴⁾.⁽⁶⁾

Un altro ben noto problema nella spettrometria γ per la ricerca di radioattività naturale nei campioni da analizzare deriva dalla possibile assenza di equilibrio secolare tra i membri delle catene radioattive.

In condizioni di equilibrio secolare, condizioni che si possono instaurare quando un nuclide padre genera discendenti radioattivi caratterizzati da un tempo di semivita di diversi ordini di

³ Nel caso delle misure in laboratorio i dati di spettrometria γ risultano notevolmente accurati in relazione ai tempi di conteggio che possono essere gestiti dall'operatore in funzione e alla possibilità di effettuare le misure in condizioni di equilibrio radioattivo, condizione spesso molto importante al fine di valutare correttamente i livelli di attività dei membri delle famiglie radioattive naturali

grandezza inferiori al nuclide padre, determinando in tal modo una condizione di stazionarietà tra processi di formazione e processi di decadimento, l'attività di tutti i membri della catena presentano la stessa attività.

In genere, se il sistema è isolato, ossia se non consente scambio di materia con l'ambiente esterno, rocce e suoli si trovano in condizioni di equilibrio secolare.

Dato che però tutte e tre le famiglie radioattive includono un isotopo del gas nobile radon ad un livello intermedio delle rispettive catene di decadimento, è estremamente probabile che, a causa del suo allontanamento irreversibile dal punto di formazione, in relazione alle sue proprietà chimico-fisiche, esso emani nello spazio libero, così perturbando le condizioni di equilibrio.

Questa situazione si riflette perciò non solo sull'attività del radon stesso, ma anche su quella dei suoi discendenti, a discapito dei risultati spettrometrici, che possono portare ad una sottostima dei loro valori di concentrazione/attività specifica.

Com'è ovvio, sperimentalmente le condizioni di equilibrio vengono inevitabilmente violate durante la fase di prelievo e preparazione del campione, ma possono essere ripristinate, una volta preparati i campioni per l'analisi, sigillando adeguatamente i contenitori dei campioni utilizzati per la spettrometria γ , per prevenire il rilascio del radon e consentirne l'accumulo fino a stazionarietà.

Ovviamente, l'isotopo del radon per cui normalmente vengono applicate queste precauzioni è l'isotopo 222 che con il suo $t_{1/2} = 3.83$ giorni richiede la decorrenza di almeno 5-6 semivite (~ 1 mese) per il raggiungimento dell'equilibrio secolare, prima di poterne effettuare l'analisi in spettrometria γ .

L'acquisizione degli spettri γ è stata pertanto effettuata dopo circa un mese dalla preparazione dei campioni per il raggiungimento dell'equilibrio secolare, utilizzando rivelatori HPGe di tipo coassiale dell'Università BO: p-type Ortec, efficienza relativa = 30% e di Arpa PC: p-type e n-type Ortec, efficienza nominale relativa = 25% - 80%.

Il tempo di conteggio per singolo campione è stato di 12-48 ore con errori medi di misura percentuali ($k = 2$) pari al 14 - 20 %, ottenuti propagando l'incertezza sull'area dei picchi e quella relativa alla curva di fitting per la calibrazione in efficienza.

I rivelatori utilizzati da Arpa Piacenza sono stati calibrati con soluzioni standard multipicco (QCY44 Amersham) opportunamente diluite e preparate nella stessa geometria di conteggio dei campioni.

Nel laboratorio di Radiochimica Ambientale, la procedura di analisi γ è stata verificata utilizzando lo standard di riferimento UTS-3 (uranium tailings) di CANMET, anch'esso nella stessa geometria di conteggio.

La concentrazione di attività dei radionuclidi di interesse è stata determinata nel modo seguente:

- per il ^{40}K si è fatto riferimento al fotopicco di emissione di energia 1460 keV;
- per il ^{238}U si è fatto riferimento al fotopicco di emissione di energia 1001 keV del nuclide figlio $^{234\text{m}}\text{Pa}$;
- per il ^{226}Ra ci si è riferiti alla media "pesata" dei fotopicchi di emissione principali dei suoi prodotti di decadimento ^{214}Pb (352 keV) e ^{214}Bi (609 keV);
- per il ^{232}Th si è fatto riferimento al fotopicco di emissione di energia 911 keV del nuclide figlio ^{228}Ac .

Tali fotopicchi di emissione sono scelti in base all'assenza di interferenze con le emissioni di energia di altri radionuclidi.

4.5 Risultati delle misure effettuate

In tabella 4.3 sono riportati i risultati delle misure effettuate; in tabella, i campioni sono identificati con il codice della litologia riportato in tabella 3.1.

I valori sono espressi in Bq/kg, approssimati all'unità.

L'errore associato alle misure è definito ad un livello di confidenza del 95%.

Tabella 4.3 (1) - Radioattività naturale (Bq/kg) in diverse tipologie di rocce dell'Emilia - Romagna

(Codice) n. camp.	Litologia (materiale crostale)	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
1A	arenaria	33 ± 11	18 ± 1	25 ± 1	608 ± 34
2A	arenaria	61 ± 18	40 ± 2	51 ± 3	327 ± 19
20	arenaria	< 192	13 ± 3	22 ± 5	508 ± 67
22	arenaria	< 118	< 3	< 6	< 48
25A	arenaria	< 146	45 ± 4	46 ± 8	679 ± 52
25B	arenaria	< 120	32 ± 3	49 ± 12	495 ± 43
27	arenaria	< 107	3 ± 1	< 6	88 ± 28
28	arenaria	< 56	15 ± 1	13 ± 1	222 ± 9
3C	arenaria media	< 128	23 ± 2	30 ± 3	546 ± 41
3A	arenaria fine	< 120	32 ± 2	32 ± 3	427 ± 37
10	arenaria mal cementata	< 88	9 ± 1	12 ± 1	346 ± 11
4B	arenaria mal cementata	< 73	5 ± 1	6 ± 1	95 ± 23
13	arenaria mal cementata	< 33	7 ± 1	18 ± 2	390 ± 24
14	arenaria mal cementata	< 42	8 ± 1	12 ± 1	391 ± 9
15	arenaria poco cementata	< 28	11 ± 1	14 ± 1	1238 ± 68
4A	arenaria ben cementata	< 108	17 ± 1	20 ± 2	430 ± 34
16	arenaria ben cementata	< 93	< 3	8 ± 2	84 ± 31
17A	arenaria ben cementata	31 ± 17	15 ± 1	29 ± 2	623 ± 35
12A	arenaria cementata	< 119	< 4	< 7	< 65
26	arenaria con vene di calcite	< 118	4 ± 1	11 ± 2	137 ± 32
2C	vena di calcite	< 49	< 1	< 2	< 15
1B	pelite	272 ± 174	24 ± 3	32 ± 8	435 ± 40
3B	pelite	50 ± 18	39 ± 2	70 ± 4	763 ± 43
2B	pelite (cataclasite)	52 ± 16	30 ± 1	61 ± 4	703 ± 39
5	marna	< 77	26 ± 1	32 ± 1	651 ± 16
8	marna	< 124	19 ± 2	30 ± 3	554 ± 40
12B	marna	< 76	27 ± 2	36 ± 3	648 ± 34
17B	marna	139 ± 114	39 ± 3	38 ± 4	699 ± 37
6	gesso	< 22	7 ± 1	3 ± 1	90 ± 6
7	gesso	< 76	28 ± 1	39 ± 1	726 ± 18
9	sabbia	444 ± 191	31 ± 4	47 ± 8	462 ± 44

Tabella 4.3 (2) - Radioattività naturale (Bq/kg) in diverse tipologie di rocce dell'Emilia - Romagna

(Codice) n. camp.	Litologia (materiale crostale)	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
11	calcarenite bioclastica	< 82	35 ± 1	5 ± 1	95 ± 9
18	calcare	< 26	11 ± 1	6 ± 1	259 ± 15
19	calcare	< 67	8 ± 1	6 ± 1	169 ± 10
21	argilla caotica e breccia argillosa	41 ± 18	19 ± 1	40 ± 2	911 ± 51
24	argilla marnosa	< 326	20 ± 4	24 ± 8	750 ± 101
23	serpentinite	< 108	< 3	< 5	< 45

4.6 Conclusioni

I valori di concentrazione dei radionuclidi di origine naturale rilevati nei campioni analizzati sono risultati non particolarmente elevati e confrontabili con quanto evidenziato da altri studi; specificatamente per il ²²⁶Ra (diretto precursore del radon), i valori sono compresi in un ordine di grandezza, tra circa < 1 e 45 Bq/kg.

Pertanto si possono confermare i bassi livelli di radioattività naturale in generale ed in modo particolare di radionuclidi precursori del radon, come atteso in relazione alla prevalenza di formazioni sedimentarie nella regione Emilia-Romagna.

Ulteriore risultato di questa indagine è stata l'associazione di un dato radiometrico di valenza geochemica e descrittiva alle tipologie di roccia presenti sul territorio emiliano-romagnolo.

Bibliografia

- (1) Nazaroff, W.W., and Nero, A.V., Jr., Eds (1988) *Radon and its decay products in indoor air*, New York, John Wiley and Sons, Inc.
- (2) L. Tositti, E. B. Pereira, S. Sandrini, D. Capra, O. Tubertini, M. G. Bettoli (2002) "Assessment of Radon isotopes in the coastal Antarctic troposphere: preliminary results", *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 82 (5), 259 – 274
- (3) I. DANIEL Tesi di laurea in Chimica, A.A. 2001-2002, Univ. Bologna e Antwerp (progetto Erasmus) rel. L. Tositti
- (4) Porstendörfer J. (1994) "Properties and behaviour of Radon and thoron and their decay products in the air", *Journal of Aerosol Science*, 25 (2), 219-263
- (5) ANPA (2000) *Il sistema informativo territoriale per la valutazione del potenziale di esalazione di Radon dal suolo*
- (6) ISPESL (2001) *Il rischio Radon nei luoghi di lavoro: ruolo degli operatori del SSN*
- (7) UNSCEAR, ANNEX B (2000) *Exposures from natural radiation sources*, 84-156
- (8) Eisenbud, Merril-Gesell, Thomas F. (1997) *Environmental Radioactivity. From Natural, Industrial, and Military Sources*, Academic Press, San Diego
- (9) *Uranium Series Disequilibrium-Application to Environmental Problems: Applications to Earth, Marine, and Environmental Sciences*, (1992), 2nd Edition, Ivanovich, M.; Harmon, R., eds., Oxford University Press

- ⁽¹⁰⁾ Risica S., Bolzan C., Nuccetelli C. (1999) “*Radioactivity in building materials: experimental methods, calculations and an overview of the italian situation*”, International Workshop Radon in the Living Environment , Athens, 19-23 April 1999
- ⁽¹¹⁾ Trevisi R., Bruno M., Orlando C., Ocone R., Paoletti C., Amici M., Altieri A., Antonelli B. (2005) “*Radiometric characterisation of more representative natural building in the province of Rome*” Radiation Protection Dosimetry , 113 (2), 168 – 172
- ⁽¹²⁾ Arpa Piemonte, (2006) La radioattività ambientale in Piemonte – Rapporto anno 2005, Centro regionale radiazioni ionizzanti e non ionizzanti
- ⁽¹³⁾ L’Annunziata M. (1997) *Radiochemical tracers: their detection and measurement*, Academic Press
- ⁽¹⁴⁾ Murray A.S., Marten R., Johnston A., Martin P. (1987) “*Analysis for naturally occurring radionuclides at environmental concentrations by gamma spectrometry*”, J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles, 115 (2), 263-288

5. IL RADON NELLE ACQUE SOTTERRANEE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Giovanni Martinelli - Arpa sezione provinciale di Reggio Emilia

Silvia Vaccari - Servizio Fisica Sanitaria - Università degli Studi di Parma

5.1 Introduzione

Lo studio della presenza del radon nei sistemi idrologici costituisce una parte importante della geofisica e geochemica del radon.

Le variazioni nelle concentrazioni di radon riflettono possibili differenze nelle caratteristiche chimico-fisiche degli acquiferi; eventuali distribuzioni anomale del radon negli acquiferi possono dipendere da processi di accumulo di radio e uranio, dalla presenza di esalazioni gassose, da significative variazioni di velocità delle acque sotterranee, ecc.

Elevate attività di radon in acqua possono rappresentare un rischio per la salute ed in alcuni Paesi, come Danimarca, Finlandia, Norvegia, Svezia, USA, è stata presa in considerazione la necessità di definire livelli di riferimento delle concentrazioni massime di radon in acqua per usi domestici ⁽¹⁾.

La recente raccomandazione europea per la tutela della salute pubblica in riferimento al contenuto di radon nell'acqua potabile ⁽²⁾ indica un valore di concentrazione pari a 1000 Bq/l, oltre il quale "si ritiene che un'azione correttiva sia giustificata in base a criteri di protezione dalle radiazioni"; per concentrazioni comprese fra 100 e 1000 Bq/l "gli Stati membri devono definire un livello di riferimento per il radon, da utilizzare per stabilire se occorrono azioni correttive per tutelare la salute umana".

Il radon esiste in acqua come gas disciolto a livelli di concentrazione assai variabili (da poche decine a centinaia e più di Bq/l), che dipendono da diversi fattori di natura geochemica e geofisica riveduti recentemente da Martinelli ⁽³⁾ e da Etiope e Martinelli ⁽⁴⁾.

L'elevata concentrazione di radon nell'acqua di alcuni serbatoi rocciosi costituiti da rocce ricche di uranio è dovuta al fatto che l'uranio, per le sue caratteristiche chimico-fisiche, si dissolve facilmente e passa dalle rocce all'acqua sotterranea; inoltre il radio prodotto dall'uranio si accumula sulle superfici delle fratture e delle porosità dalle quali il radon emana direttamente nell'acqua ⁽⁵⁾.

I fattori che influenzano il contenuto di radio nelle acque sotterranee sono:

- la presenza di una sorgente di uranio
- il tempo di permanenza dell'acqua nel sistema acquifero: infatti le acque che si muovono più lentamente hanno un tempo di contatto maggiore con le sorgenti di radio. In questi casi il valore di concentrazione di radon rilevato è quello dell'equilibrio secolare raggiunto con il radio. Se l'acqua circola velocemente nell'acquifero possono verificarsi condizioni di accumulo del radon rispetto al radon effettivamente prodotto dalle rocce ("Radon excess").

Le caratteristiche di fratturazione e di alterazione della roccia condizionano il passaggio del radon dai granuli al liquido circostante. Le condizioni di flusso dell'acqua condizionano il percorso fino alla sorgente o al pozzo.

Nelle acque superficiali il radon è presente a bassissimi livelli di concentrazione e ciò è dovuto principalmente al suo breve tempo di dimezzamento.

E' stato stimato che il coefficiente di trasferimento del radon dall'acqua all'aria indoor è circa 10^{-4} ; il contributo all'aria indoor derivante dal radon presente nell'acqua potabile varia dall'1 al 7 % del livello totale in aria indoor di radon ⁽⁶⁾.

5.2 *Prospezioni Radon nelle acque sotterranee dell'Emilia-Romagna*

Al fine di meglio comprendere i processi chimico-fisici responsabili della distribuzione del radon negli ambienti naturali, nel corso degli anni sono state condotte alcune prospezioni radon nelle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna.

Nel corso degli anni 1985-1990 sono state effettuate misure della concentrazione di radon in pozzi e sorgenti; in particolare, per quanto riguarda le zone di pianura, sono stati considerati i valori riscontrati nelle acque provenienti dai pozzi della rete regionale di controllo dell'Emilia-Romagna (gestita da Idroser nel periodo 1985-1990 e da ARPA dopo il 1996), mentre per la zona di montagna sono stati considerati i valori di radon registrati nelle acque di sorgenti localizzate in varie province del territorio regionale e in particolare a Pavullo, Serramazzoni, Bobbio, Montese, Vergato, Bagno di Romagna, Porretta Terme, Rocca di Roffeno ecc.

Nel periodo 1999 - 2000 è stato intrapreso uno studio sui livelli di radon nelle acque di pozzi e sorgenti ritenuti più significativi, dal punto di vista delle caratteristiche geologiche degli acquiferi, dell'Appennino Reggiano-Parmense ⁽⁷⁾.

Nella tabella 5.1 sono stati riportati i dati raccolti aggregati a livello provinciale suddivisi in funzione del territorio di pianura o di montagna.

La relativa omogeneità dei dati rilevati ha consentito di indicare valori che possono essere ritenuti rappresentativi dei settori di territorio studiati.

Tabella 5.1 – Concentrazione radon (Bq/l) nelle acque sotterranee delle province della regione Emilia-Romagna

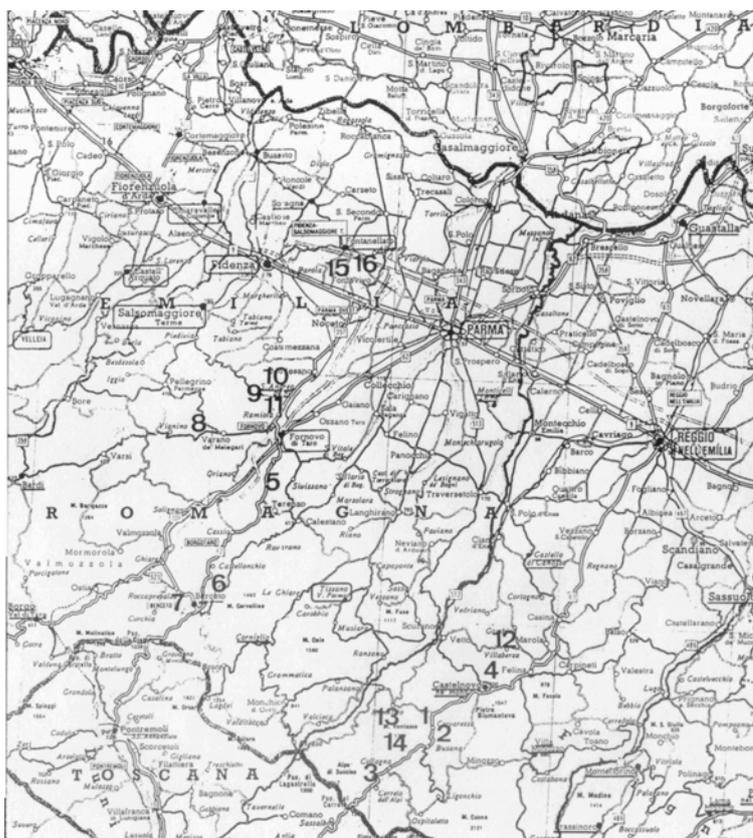
	PC	PR	RE	MO	BO	RA	FC	FE
Rn Pianura	15.71	15.73	8.05	6.48	5.22	3.48	3.50	3.68
Rn Montagna	12.00	9.40	9.01	12.00	12.00	/	10.00	/

5.3 *Il radon in acque di sorgenti e pozzi dell'Appennino Reggiano-Parmense*

Il radon contenuto nelle acque di alcune sorgenti e pozzi nelle province di Parma e Reggio Emilia è stato monitorato dal marzo 1999 al novembre 2000 (figura 5.1).

Nella provincia di Reggio Emilia sono state analizzate le sorgenti [1] S. Lucia - Terme di Cervarezza, [2] Cervarezza Paese, [3] I Porali (Collagna), [4] Vezzolo (Castelnovo Monti), [12] Maiola (ENE Vetto), [13] Lagumi Est (Monte Ventasso), [14] Calamone Est; in provincia di Parma le sorgenti [5] Prinzera - Case Tarà (Fornovo), [6] Fugazzolo - Val Baganza, [7] Berceto, [8] Case Mazzini (Varano de Melegari), i pozzi [9] Villa Vignali (profondità circa 180 m) - S.Andrea Bagni, [10] Rio Fabbro presso le Terme S.Andrea Bagni, [11] l'acqua del Lavatoio pubblico di S.Andrea Bagni e infine i due pozzi [15, 16] in località Fontevivo.

Figura 5.1 - Mappa delle località dei campionamenti effettuati nell'Appennino Reggiano-Parmense



Sono inoltre stati rilevati altri parametri chimico-fisici come la portata, la temperatura dell'acqua, la conducibilità elettrica, l'Eh (potenziale di ossido-riduzione) ed il pH^{(8), (9)}.

Le variazioni di temperatura e di portata osservate indicano tempi di permanenza delle acque nel sottosuolo variabili da 1 mese a qualche anno.

Le misure di concentrazione di radon sono state effettuate utilizzando varie tecniche di misura: camera a ionizzazione (Alpha GUARD), camera a scintillazione (celle di Lucas) e scintillazione liquida; i valori ottenuti sono risultati confrontabili.

In tabella 5.2 sono riportati i risultati delle misure effettuate; le incertezze associate ai valori rilevati sono stimate nel range del 10-15%.

Tabella 5.2 – Concentrazioni di radon nei campioni di acqua prelevati nell'Appennino Reggiano-Parmense

Sorgente	Concentrazione di radon (Bq/l)	Pozzo	Concentrazione di radon (Bq/l)
1	8.7	9	17.3
2	27.8	10	11.7
3	10.1	11	12.5
4	4.5	15	8.1
5	2.5	16	4.4
6	1.7		
7	1.0		
8	1.6		
12	3.9		
13	4.8		
14	3.3		

Valori relativamente elevati di radon sono riscontrati in sorgenti (campioni 1,2,3), in particolare in acque ospitate in acquiferi di carattere ofiolitico (campione 2); gli acquiferi ofiolitici sono caratterizzati da una maggiore disponibilità di uranio nelle rocce serbatoio.

Valori particolarmente bassi sono rilevati in sorgenti rappresentative di acquiferi superficiali (campioni 4,5,6,7,8,12,13,14).

Valori relativamente bassi sono rilevati in pozzi che captano acque di strato (campioni 15 e 16).

Valori intermedi sono rilevati in acque campionate in pozzi che captano acque di strato diluite con acque meteoriche (campioni 9,10,11).

In alcune sorgenti la concentrazione di radon è variata significativamente nel tempo insieme a temperatura, conducibilità, pH e portata confermando l'importanza della dinamica dei fluidi sotterranei nella generazione di elevate concentrazioni di radon nelle acque ⁽¹⁰⁾.

La maggiore presenza di gas disciolti di origine atmosferica negli acquiferi caratterizzati da elevate velocità di circolazione può avere inoltre influenzato la concentrazione di radon rilevata nel fluido totale; il radon può infatti essere soggetto a fenomeni di arricchimento in acque caratterizzate da microbolle di origine atmosferica ⁽¹¹⁾.

Valori analoghi a quelli ottenuti nel Parmense e nel Reggiano sono stati ottenuti in prospezioni con carattere meno sistematico in altre aree Appenniniche delle Province di Piacenza, Modena, Bologna, Forlì-Cesena e Rimini. Le basi dati disponibili non consentono trattazioni più dettagliate sulla concentrazione del radon nelle acque sotterranee degli ambienti di montagna.

5.4 Il radon nelle acque dei pozzi della pianura

I pozzi utilizzati per il rilevamento radon in ambiente di pianura appartengono a un sottoinsieme della rete Idroser ⁽¹²⁾.

La profondità media dei pozzi considerati è di circa 100 metri.

Nelle acque dei medesimi pozzi sono state effettuate anche analisi di Na, K, Ca, Mg, Cl, HCO₃, SO₄ e pH.

I coefficienti di permeabilità risultano variabili da 10⁻³ cm/sec nelle aree di alta pianura a 10⁻⁵ cm/sec nelle aree di bassa pianura.

I valori di radon rilevati con il metodo delle celle di Lucas risultano compresi tra 3 e 15 Bq/l circa (vedi tabella 5.1).

Nelle province di Piacenza e Parma sono stati riscontrati i valori relativamente più elevati, mentre i valori più bassi sono stati rilevati nelle province di Ravenna e Ferrara.

La concentrazione in radio risulta molto bassa e costante in tutte le rocce della catena Appenninica da cui hanno avuto origine gran parte degli acquiferi della pianura Emiliano-Romagnola (vedi capitolo 4). I coefficienti di permeabilità misurati e i gradienti idraulici della zona investigata indicano velocità di circolazione molto basse e comprese tra 0.01 m/giorno (10⁻⁵ cm/sec) (bassa e media pianura) e 10 m/giorno (10⁻² cm/sec) (alcune zone di alta pianura). I valori di radon riscontrati nelle acque di pozzo riflettono quindi in larga maggioranza il valore di equilibrio secolare raggiunto tra radon e radio delle rocce serbatoio.

I valori di radon riscontrati in ambiente di media e bassa pianura risultano sistematicamente più bassi dei valori riscontrati in ambiente di montagna, mentre i valori di radon riscontrati in ambiente di alta pianura sono comparabili con quelli in ambiente di montagna.

I valori relativamente più alti di radon riscontrati nelle province di Piacenza e Parma possono derivare dalla presenza nella zona di acquiferi costituiti da rocce di origine alpina o da rocce ofiolitiche, più ricche in uranio e radio. La velocità di circolazione delle acque campionate è inoltre maggiore rispetto a quella rilevabile nelle altre province. Velocità di circolazione relativamente alte e maggiore presenza di gas atmosferici disciolti possono produrre le anomalie riscontrate ^{(10), (11)}.

Per meglio comprendere i valori di radon riscontrati nel corso della prospezione effettuata in ambiente di pianura, sono state compiute valutazioni di carattere statistico con vari parametri; questo argomento verrà trattato più in dettaglio nel capitolo 7.

5.5 Conclusioni

La revisione dei dati di concentrazione radon disponibili nelle acque del territorio della regione Emilia-Romagna ha permesso di evidenziare che le acque sotterranee di pianura e di montagna sono caratterizzate da valori di concentrazione di radon molto bassi e in equilibrio con i valori di concentrazione di radio della zona.

Lievi anomalie di carattere locale possono essere generate dalla dinamica dei fluidi sotterranei e dalla presenza di rocce di carattere alpino (Tav. 3). Nelle zone caratterizzate da tali lievi anomalie non sono ubicati edifici caratterizzati da concentrazioni anomale di radon indoor.

Le acque sotterranee caratterizzate da valori relativamente anomali non risultano comunque in grado di generare fenomeni di cessione di radon alle fasi gassose atmosferiche a causa dei bassi valori assoluti rilevati e della assenza di gas carrier locali (CH₄, N, CO₂) in grado di influenzare i valori rilevati nel corso delle prospezioni effettuate.

Bibliografia

- (1) Bodansky D., Robkin M.A., Stadler D.R. (1987) *Indoor Radon and its hazards* - University of Washington Press
- (2) *Raccomandazione della Commissione delle Comunità Europee del 20 dicembre 2001 sulla tutela della popolazione contro l'esposizione al Radon nell'acqua potabile* (2001/928/Euratom); 2001
- (3) Martinelli G. (1998) "Gas Geochemistry and ²²²Rn Migration Processes", Radiation Protection Dosimetry, 78 (1), 77-82
- (4) Etiope G., Martinelli G. (2002) "Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview", Physics of the Earth and Planetary Interiors, 129, 185-204
- (5) Graves B. (1987) "Radon, Radium and other radioactivity in groundwater" Proceedings of the NWWA Conference, Somerset New Jersey
- (6) Nazaroff, W.W., and Nero, A.V., Jr. (1988) *Radon and its decay products in indoor air* - New York, John Wiley and Sons, Inc.
- (7) Toscani L., Martinelli G., Dalledonne C., Gaidolfi L., Ortalli I., Sogni R., Vaccari S., Venturelli G. (1999) "Radon in underground waters of Northern Apennines as determined by four different analytical methods", Proc. 5th Int. Conf. on Rare Gas Geochemistry, Debrecen, Hungary, 1-8
- (8) Vaccari S., Toscani L., Ortalli I., Dalledonne C., Martinelli G., Venturelli G. (1999) "Misure di Radon in sorgenti e pozzi dell'Appennino Reggiano-Parmense", 3° Convegno Nazionale sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio, Parma, 3, 315-320
- (9) Venturelli G., Toscani L., Mucchino C. (2000) "Study of the water-rock interaction of spring waters in the North-Apennines", Annali di Chimica, 90, 359-367
- (10) Andrews J.N., Wood D.F. (1972) "Mechanism of Radon release in rock matrices and entry in groundwaters", Trans. Int. Min. Metall., 81, 197-209

⁽¹¹⁾ Varhegy A., Haki J., Monnin M., Marin K.P., Seidel J.L. (1992) “*Experimental study of Radon transport in water as a test for a transportation microbubble model*”, J. Appl. Geophys., 29, 37-46

⁽¹²⁾ Martinelli G., Patrizi G., Venturini L., Vicari L., Zavatti A. (1991) “*Occorrenze di Radon 222 e Arsenico in fluidi di origine profonda nel quadro geodinamico del fronte Appenninico Padano*”, C.N.R.- G.N.V., Poster Session.

6. ATTIVITA' DEGASSANTI NELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Giovanni Martinelli - Arpa sezione provinciale di Reggio Emilia

6.1 Introduzione

Il gas naturale ha mostrato caratteristiche di significativa efficacia nella generazione di anomalie radon di carattere locale. Gas naturali come l'anidride carbonica sono stati ritenuti responsabili di significative anomalie in radon indoor riscontrate nell'Italia centro-meridionale. L'anidride carbonica è praticamente assente nel territorio regionale ⁽¹⁾, mentre il metano risulta particolarmente frequente in circa un centinaio di località caratterizzate da accertata attività degassante ⁽²⁾ (vedi cap. 3, figura 3.1)

Una parte significativa di esse appare in condizione di generare anomalie di radon negli edifici. Infatti il metano fuoriesce dalla crosta terrestre da volumi rocciosi resi porosi da processi di fratturazione e non ricoperti da formazioni geologiche impermeabili.

Nell'Appennino della regione Emilia-Romagna tali condizioni sono particolarmente frequenti in aree soggette a fenomeni di fagliazione (figura 6.1). Altre emissioni analoghe ma caratterizzate da gorgoglio in acque sotterranee sono frequenti in vaste aree di pianura.

Significative emissioni di metano nell'Appennino tosco-emiliano sono state riscontrate in galleria durante la costruzione di tunnel per autostrade e ferrovie.

Il metano delle aree degassanti del territorio della regione Emilia-Romagna risulta particolarmente ricco in radon e caratterizzato da notevole efficienza nei processi di trasferimento del radon verso la superficie.

6.2 Misure di radon in emissioni di gas metano

Al fine di permettere una migliore comprensione dei fenomeni osservati, sono stati considerati valori di radon misurato in gas naturale (principalmente metano) campionato in emissioni naturali della dorsale appenninica e in alcuni pozzi ubicati nella alta pianura e nella catena appenninica.

I valori misurati sono caratterizzati da una forte variabilità spaziale e temporale. In alcuni casi sono stati riscontrati valori particolarmente elevati, fino a 10-30 volte più "ricchi" in radon dei campioni di acque sotterranee analizzati ^{(3),(4)}.

Misurazioni in continuo effettuate con apparecchiature in automatico hanno inoltre permesso di evidenziare che nelle emissioni naturali l'attività radon non è costante ed è modulata da variazioni di pressione del serbatoio, fattori atmosferici e acque di percolazione.

6.3 Origine e localizzazione delle emissioni gassose

L'analisi chimica e isotopica del gas metano campionato nelle manifestazioni di idrocarburi dell'Appennino settentrionale permette di identificare gas caratterizzati da una prevalente origine biogenica nelle province di Forlì, Ravenna e Rimini ⁽⁵⁾.

Nelle province di Bologna, Modena, Reggio Emilia, Parma e Piacenza è invece identificabile una prevalente origine termogenica del metano ^{(5),(1)}.

In entrambi i casi le emissioni gassose sono prevalentemente localizzate in aree non ricoperte da coltri argillose e caratterizzate da valori relativamente elevati di permeabilità crostale dovuta a processi di fagliazione.

Altre attività degassanti associate alla presenza di acque di strato sono rintracciabili nei vulcani di fango presenti lungo la dorsale appenninica, caratterizzati da processi genetici analoghi a quelli riscontrati nelle emissioni di gas secco ^{(6),(7)}.

Nella figura 6.1 sono state cartografate le località caratterizzate da attività degassante descritte da Scicli ⁽²⁾, da AGIP e da indagini più recenti ⁽⁶⁾.

Per identificare le aree caratterizzate da attività più intensa sono state scelte le aree in cui, dalla descrizione o da riscontri sul campo, l'attività è risultata di tipo continuo e non provocato dalla perforazione di pozzi anche a debole profondità.

6.4 *Elenco delle località caratterizzate da elevato flusso di metano*

L'elenco è riferito ad una parte delle emissioni cartografate in figura 6.1.

Sono state elencate solo le aree soggette ad attività di degassamento spontaneo in condizioni secche, senza acque o fanghi; tali condizioni sono le più indiziate per generare fenomeni di risalita e accumulo del radon indotto da flussi di metano attraverso faglie.

Per dare una idea del numero elevato di località indiziate, in tabella 6.1 sono state riportate tutte le località segnalate da Scicli ⁽²⁾ o da rilevamenti recenti in cui il metano degasa naturalmente, senza l'intervento di pozzi.

Tabella 6.1 (1) - Località caratterizzate da emissioni spontanee di metano nella regione Emilia-Romagna

Provincia	Comune	Località
Piacenza	Bobbio	Piancasale
		Canneto o Case Canneto
		San Martino o Ponte San Martino
	Agazzano	San Salvatore
		Casa Boriona
	Gazzola	Cà Ragaiona
		Mirabello o Casa Mirabello
	Travo	Campo dei Re o Statto
	Vigolzone	Carmiano
	Podenzano	Cà dei Gatti
	Farini d'Olmo	Troncamorso
		Case Tornara
		Case Chiappetti
Velleia		
Lugagnano Val d'Arda	Castell'Arquato	
	Villa San Lorenzo	
	Cortemaggiore	
Parma	Bardi	Ormei
		Volpi
		Tosca
	Berceto	Scorza o borgata Scorza
		Costa d'Asino
		Molinari
		Borgallo
		Castellonchio
		Macchie
		Lagodignano
	Collecchio	Cà Ginestra
		Centopozzi
	Salsomaggiore	Miano
	Medesano	Casa Goletta
		Casa Brozzi
Sant'Andrea Bagni		

Tabella 6.1 (2) - Località caratterizzate da emissioni spontanee di metano nella regione Emilia-Romagna

Provincia	Comune	Località
Parma	Fornovo Taro	Riccò
		Ozzano
	Corniglio	Case Folli
		Vallezza
		Miano
Neviano degli Arduini	Prella	
	Rividulano	
	Case Cavandola	
		Villa
Reggio Emilia	Reggio Emilia	San Bartolomeo
	Correggio	
	Vezzano sul Crostolo	La Vecchia
	Villa Minozzo	Casola Canossa
		Casa Salata
	Toano	Cà dell' Onestà
Viano	Quara	
		Lupo o Fattoria del Lupo
Modena	Montefiorino	Macognano
		Farneta
		Il Fuoco
		Cà Medole
	Palagano	Casa Bottega
		Lama Mocogno
	Sestola	Barigazzo
		Lagadelle
		Case di Sotto
		Roncoscaglia
		Bandita
		Cà Boldrini
		Fontanine
	Trignano	
	Montese	Ca Boschi
		Serramazzoni
	Marano sul Panaro	Pozzi dell'Olio
Sassuolo		
Campodolio		
Maranello	Prediera	
	Gozzano o Gorzano	
	Casa Salsa di Sotto	
Castelvetro	Salvarola	
	San Possidonio	
	Torre Maina	
	La Govana	
		San Luigi
		Fondo Bordina o Bordina
Bologna	Lizzano in Belvedere	Grecchia
		Rovine di Tommasi
	Gaggio Montano	Saldine
		Cà Masera
		Molinazzo
		Cà di Riccio
		Cà Salgastrì
	Porretta Terme	Sasso Cardo
		Cà Bellavista
	Grizzana	Monte Falò
	Savignano	Fiume Reno
	Sasso Marconi	Crede
	Castiglione dei Pepoli	Castel dell'Alpi
	San Benedetto Val di Sambro	Casa Domenicali
	Monterenzio	Molinaccio
	Castel del Rio	Cà Bordona
	Casalfiumanese	

Tabella 6.1 (3) - Località caratterizzate da emissioni spontanee di metano nella regione Emilia-Romagna

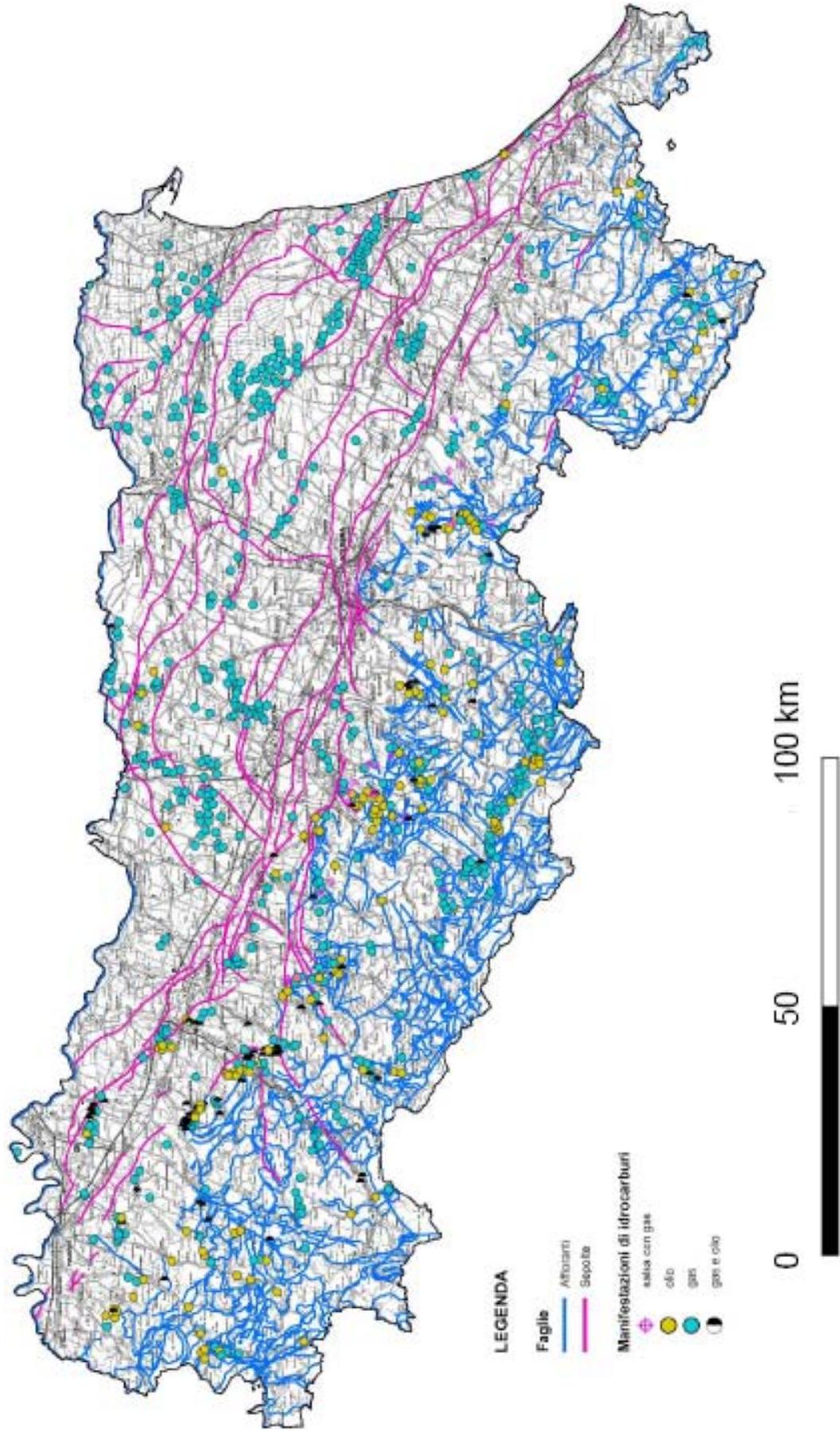
Provincia	Comune	Località
Forlì-Cesena	Castrocaro Terme	Bollirone
		Rocca San Casciano
	Galeata	Case Tolice
		Rio Suasia
	Bagno di Romagna	Acque Termali
		Cimitero
		San Martino di Larciano
	Sogliano al Rubicone	Torrente Torchio
		Bertinoro
	Ravenna	Riolo Terme
Brisighella		Cà Domenico
		Cà Poriva
		Monticello
Rimini	Viserba	/ (Emissione marina)
Ferrara	Cento	Casa "Il Gas"

In tabella 6.2 sono state elencate le principali località caratterizzate da elevato flusso di metano. Queste località possono essere ritenute prioritarie per eventuali ricerche future orientate a meglio definire i valori del rapporto metano/radon.

Tabella 6.2 - Località caratterizzate da emissioni spontanee di gas metano più significative in Emilia-Romagna

Provincia	Comune	Località
Piacenza	Castell'Arquato	Lungo il Rio Acqua Puzza a 1.5 Km a SE di Villa San Lorenzo e a 1.8 Km a NE di Bacedasco per circa 400 m
Parma	Berceto	Zona di Castellonchio a NE e a NW di Monte Marino in Località Macchia. Lat 44° 33' 03'' Long 2° 27' 53''.
	Fornovo Val di Taro	Alveo Taro riva destra alla confluenza con il Rio Bella Foglia
Reggio Emilia	Viano	Fattoria del Lupo
	Villa Minozzo	Casa Salata
Modena	Montefiorino	A 1300 m a NE di Sassatella presso Ca' Medole. Denominata come "Il Fuoco" nel Foglio IGM in Scala 1:25000.
		Sestola
Bologna	Fanano	Chiesa di Trignano, località Sassaia
	Lizzano in Belvedere	400 m. a S della Chiesa di Grecchio sulla sponda SX del Rio Burgone
Forlì-Cesena	Gaggio Montano	Saldine presso Casa Gasometro
	Porretta Terme	Sasso Cardo
	Rocca San Casciano	Case Budrio e Casalecchi , 1 Km. A NE della Parrocchia di S.Stefano
Ravenna	Tredozio	Busca (è visibile una fiamma accesa alta 50 cm.)
	Brisighella	Località Casa Domenico alla confluenza tra il Rio Merli e il Torrente Marzeno
Ferrara	Cento	Corpo Reno presso la Casa "Il Gas"

Figura 6.1 – Manifestazioni superficiali naturali di idrocarburi e principali faglie in Emilia-Romagna



6.5 Conclusioni

Prospezioni compiute in epoca storica e recente hanno permesso di individuare numerose località nel territorio della regione Emilia-Romagna caratterizzate da emissioni spontanee di gas metano.

In tali aree il gas è stato spesso captato ed estratto, tuttavia l'attività degassante risulta ancora oggi elevata in molte località, perché il metano migra costantemente verso la superficie da livelli rocciosi della crosta terrestre profondi 1-10 km.

Il gas metano è un "carrier" naturale del radon generato costantemente dal decadimento del radio contenuto nelle rocce serbatoio. La presenza di radon in concentrazioni anomale nei gas dei suoli è spesso dovuta a processi di trasporto tramite gas carrier come il metano. Questi fenomeni sono particolarmente intensi in volumi rocciosi caratterizzati da valori particolarmente elevati di permeabilità o soggetti a fenomeni di fratturazione e fagliazione. In queste aree sono quindi possibili fenomeni di accumulo di gas radon nelle cavità sotterranee naturali (grotte), artificiali (gallerie) e negli edifici costruiti senza adeguati dispositivi di protezione.

Ulteriori censimenti delle aree degassanti possono contribuire a una migliore conoscenza delle zone soggette a possibili anomalie nella concentrazione di gas radon nei suoli. Nelle aree soggette ad attività degassante possono essere adottati dispositivi di protezione attiva e passiva orientati alla mitigazione dei possibili fenomeni di migrazione e accumulo del gas radon.

Gli strumenti di governo del territorio (P.S.C., P.T.C.C. ecc.) potranno utilizzare gli esiti delle ricerche sulle attività degassanti per le attività di programmazione territoriale, di salvaguardia ambientale e di tutela della salute.

Bibliografia

- (1) Minissale A., Magro G., Martinelli G., Vaselli O., Tassi G.F. (2000) "*Fluid geochemical transect in the Northern Apennines (central-northern Italy): fluid genesis and migration and tectonic implications*" Tectonophysics, 319, 199-222
- (2) Scicli A. (1972) *L'attività estrattiva e le risorse minerarie della Regione Emilia-Romagna* Poligrafico Artioli, Modena
- (3) Martinelli G., Ferrari G. (1991) "*Earthquake forerunners in a selected area of Northern Italy: recent developments in automatic geochemical monitoring*" Tectonophysics, 193, 397-410
- (4) Albarello D., Lapenna V., Martinelli G., Telesca L. (2003) "*Extracting quantitative dynamics from ^{222}Rn gaseous emissions of mud volcanoes*" Environmetrics, 14, 63-71
- (5) Borgia G.C., Elmi C., Ricchiuto T. (1988) "*Correlation by genetic properties of the shallow gas seepages in the Emilian Apennine (Northern Italy)*" Organic Geochemistry, 13, 319-324
- (6) Martinelli G., Judd A. (2004) "*Mud volcanoes of Italy*" Geological Journal, 39, 49-61
- (7) Martinelli G., Panahi B. (2005) "*Mud volcanoes, Geodynamics and Seismicity*" NATO Science Series, Earth and Environmental Sciences, Vol. 51, Dordrecht

7. ANALISI GEOSTATISTICA DELLA DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLE CONCENTRAZIONI DI RADON SUL TERRITORIO DELL'EMILIA-ROMAGNA

Roberto Bruno, Serena Sgallari - Università di Bologna - Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali

7.1 Introduzione

In questo capitolo si analizzano in termini geostatistici i dati di concentrazione del radon nelle varie matrici sul territorio della regione Emilia-Romagna, derivanti dalle indagini illustrate nei capitoli precedenti.

L'elaborazione geostatistica ⁽¹⁾ ha lo scopo di contribuire a mettere in evidenza elementi utili alla comprensione della distribuzione spaziale del radon sul territorio regionale.

Nei capitoli precedenti, materiali da costruzione, acque e strutture geologiche sono state considerate come possibili "fonti di provenienza" del gas.

Nella presente analisi si focalizza l'attenzione sulla regionalizzazione dei valori di radon e su eventuali correlazioni fra concentrazioni ed altri elementi associati al campione in esame; infatti l'esistenza, l'intensità e l'estensione di correlazioni spaziali forniscono elementi essenziali per identificare aree a maggiore rischio potenziale.

Occorre tuttavia un approfondimento critico sul significato delle elaborazioni statistiche e geostatistiche proposte, nonché sulla regionalizzazione dei dati disponibili. In effetti, è naturale considerare che le diverse misure di radon effettuate dipendono direttamente dalle coordinate spaziali, per effetto del tipo di terreno, della quota e della presenza di fattori geologici vari. Peraltro, la concentrazione di radon indoor è una variabile discreta, perché non è definita in ogni punto dello spazio geografico, ma solo dove esistono delle costruzioni.

Non è questa la sede per dimostrare la correttezza dell'approccio adottato, diciamo semplicemente che le concentrazioni rilevate sono funzionalmente correlate ad una variabile regionalizzata continua, definita in ogni punto del territorio.

Occorre ricordare che i rilevamenti effettuati sono sempre affetti da un margine di incertezza, legato in primo luogo alla precisione dello strumento di misura (ogni misura sperimentale è caratterizzata da un'indeterminazione propria della tecnica usata). Un'ulteriore fonte di approssimazione è la non perfetta raffrontabilità delle misure, derivante da fattori quali la non contemporaneità delle misure, le diverse dimensioni dei locali dove sono state prese, il volume di riferimento, ecc, che le rendono non equivalenti.

Dal punto di vista della geostatistica tali incertezze ed imprecisioni concorrono all'insorgere del cosiddetto "effetto pepita", caratteristica che rileva la presenza e l'importanza della variabilità spaziale.

Un'analisi critica dei dati disponibili ha consentito di stabilirne l'utilizzabilità previo un adattamento rispetto all'elaborazione specifica.

7.2 *Analisi dei dati “indoor”*

I dati disponibili sono quelli delle campagne di misurazione indoor effettuate in Emilia-Romagna in 371 case di civile abitazione ed in 606 tra asili nido e scuole materne, distribuiti in 241 comuni (vedi cap.2).

L'analisi geostatistica richiede la conoscenza delle coordinate del dato compreso nel dominio di definizione; in questo caso, il dominio è lo spazio-tempo, ove lo spazio è quello tridimensionale.

Sono state peraltro adottate delle esemplificazioni che hanno consentito di ridurre da 4 a 2 le dimensioni utili:

- si è ridotto lo spazio da 3D a 2D considerando le sole coordinate geografiche x-y (est/ovest), mentre la coordinata z, definita come “altezza dal suolo”, è servita per suddividere la popolazione di dati in sottoinsiemi omogenei; in particolare sono stati elaborati separatamente i dati dei singoli piani dei fabbricati oggetto delle rilevazioni;
- si è trascurata la coordinata temporale; ciò equivale a considerare le misure in ogni edificio:
 - a) con lo stesso supporto temporale, pari dunque a valori medi su uno stesso intervallo di tempo, 6 mesi;
 - b) contemporanee, o meglio, definite come un campione all'interno di uno stesso arco temporale, 1 anno.

Nel caso frequente di un solo punto di misura in una località, l'attribuzione delle coordinate geografiche al dato di radon è stata immediata; nel caso di più punti di misura all'interno della stessa località si è ricorso a cartografie di maggiore precisione, derivando le coordinate geografiche dell'edificio, noto il suo indirizzo.

Nel caso di diverse misure tutte con le stesse coordinate, tipicamente effettuate in piani diversi dello stesso stabile, è stato considerato il solo valore del piano terra.

Dal punto di vista della distribuzione geografica dei dati disponibili, occorre considerare quindi che le distanze fra punti di misura appartengono a due scale distinte ⁽²⁾:

- la piccola scala, con riferimento ad edifici appartenenti allo stesso comune;
- la media-grande scala, con riferimento ad edifici di comuni diversi, che ricoprono tutto il territorio regionale.

Nel caso delle elaborazioni principali a grande scala, le misure ravvicinate a piccola scala sono state mediate per sfruttare l'informazione media sul territorio. Tuttavia ciò apre delle problematiche di regolarizzazione e di confrontabilità fra variabili a differente supporto spaziale.

7.2.1 **Statistiche elementari e prime considerazioni**

Un primo test utile è quello di verificare la presenza di eventuali correlazioni con la distanza dal suolo.

Un ragionamento esemplificato potrebbe considerare che, se esistesse un gradiente verticale positivo, cioè se la concentrazione di radon aumentasse con la quota, si potrebbe desumere una provenienza del gas dall'alto, mentre se il gradiente verticale fosse negativo, la provenienza desumibile sarebbe dal basso; un gradiente nullo potrebbe avvalorare l'ipotesi di un legame con i materiali da costruzione, la cui posa in opera è indipendente dal piano di un edificio.

I sondaggi sono stati eseguiti su più piani, in base alle caratteristiche dell'edificio, sino al 6°.

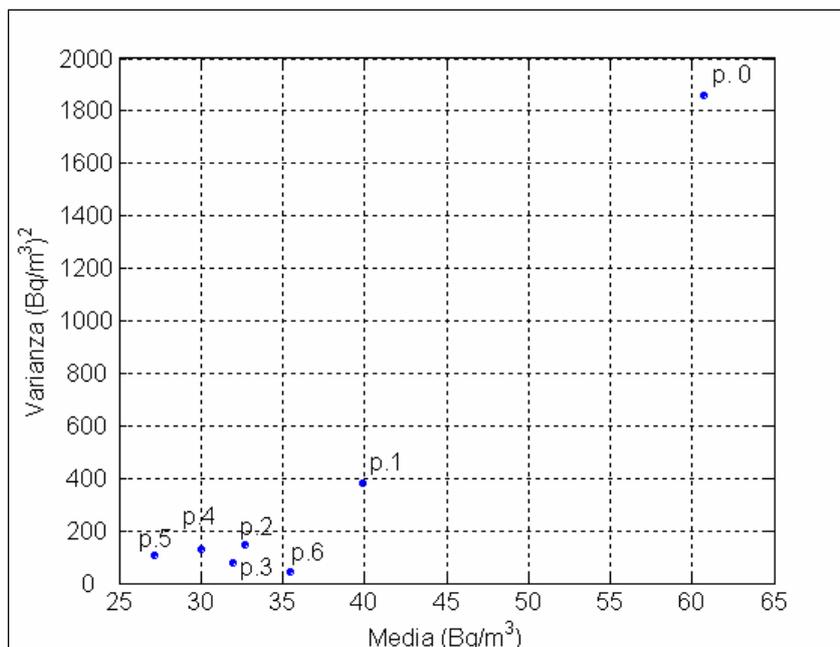
Le relative statistiche elementari sono riportate in tabella 7.1.

Tabella 7.1 – Radon nelle abitazioni: statistiche elementari dei vari piani

N. dati	Piano	Media annuale (Bq/m ³)	Varianza (Bq/m ³) ²
95	0	61	1857
144	1	40	380
73	2	33	144
28	3	32	76
13	4	30	129
3	5	27	104
4	6	35	41

In figura 7.1 è messa in relazione la concentrazione di radon media di ogni piano con la rispettiva varianza.

Figura 7.1 – Radon nelle abitazioni: correlazione media/varianza delle misure per ciascun piano



Come si può notare la concentrazione di radon cala drasticamente passando dal piano terra (piano 0) ai piani successivi, evidenziando un gradiente verticale negativo. Anche la dispersione dei valori, benché riferita a campioni di numerosità diversa, evidenzia un "effetto proporzionale" che conferma la significatività del gradiente negativo.

Ciò induce ad escludere i materiali da costruzione come possibile fonte di radon indoor.

Da questo momento saranno ricercate delle conferme circa le correlazioni spaziali con elementi a carattere geologico-strutturale.

7.2.2 La variabilità spaziale a scala regionale

Lo studio della variabilità di una grandezza definita in uno spazio è effettuato mediante delle funzioni di autocorrelazione, che misurano il grado di correlazione di una variabile definita in due punti, in funzione della loro distanza. Intuitivamente, più i punti di misura sono vicini, più i loro valori sono simili, mentre all'aumentare della loro distanza, anche la "dissomiglianza" media cresce.

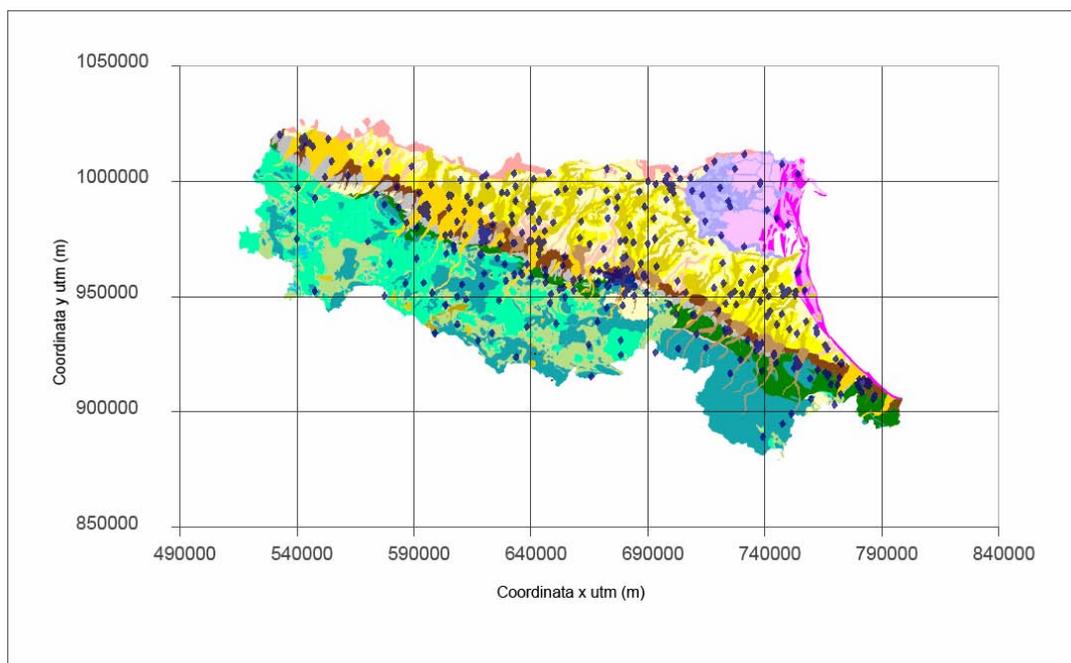
Tipicamente la funzione di *dissomiglianza* più utilizzata è il "variogramma":

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x+h) - Z(x)]^2$$

L'analisi della variabilità spaziale a piccola scala (0-1 Km) non è interessante, perché limitata ai dati provenienti dalle città, ossia un ambiente in cui sono preponderanti le cause di variabilità non spaziali.

Tutto ciò si manifesta in una prevalenza dell'"effetto pepita" nel variogramma, cioè un'indipendenza fra campioni anche vicini, a riprova di un'assenza di correlazione spaziale. Inoltre, ai fini dello studio spaziale a scala provinciale e regionale, i dati concentrati in aree piccole, dispersi a piccola scala, danno un'informazione equivalente a quella del loro valore medio (figura 7.2).

Figura 7.2 – Mappa dei dati utilizzati sul territorio dell'Emilia-Romagna



Lo studio della correlazione spaziale, ai fini degli obiettivi prefissati, ha dunque senso a scala delle decine di chilometri, da cui occorre impedire che i risultati siano falsati dalla maggior densità di campionatura nelle città; infatti, in questo caso, una media statistica non è rappresentativa di una media spaziale.

Se confrontiamo istogrammi (figura 7.3) e statistiche (tabella 7.2) dei dati di città e di paese, vediamo che quelli di paese sono più dispersi, in quanto rappresentativi dell'intero territorio regionale, al contrario di quelli delle 9 città, che pur ammontano a circa 1/3 del totale dei dati.

Figura 7.3 – Istogramma della concentrazione di radon nei paesi (a) e nelle città (b)

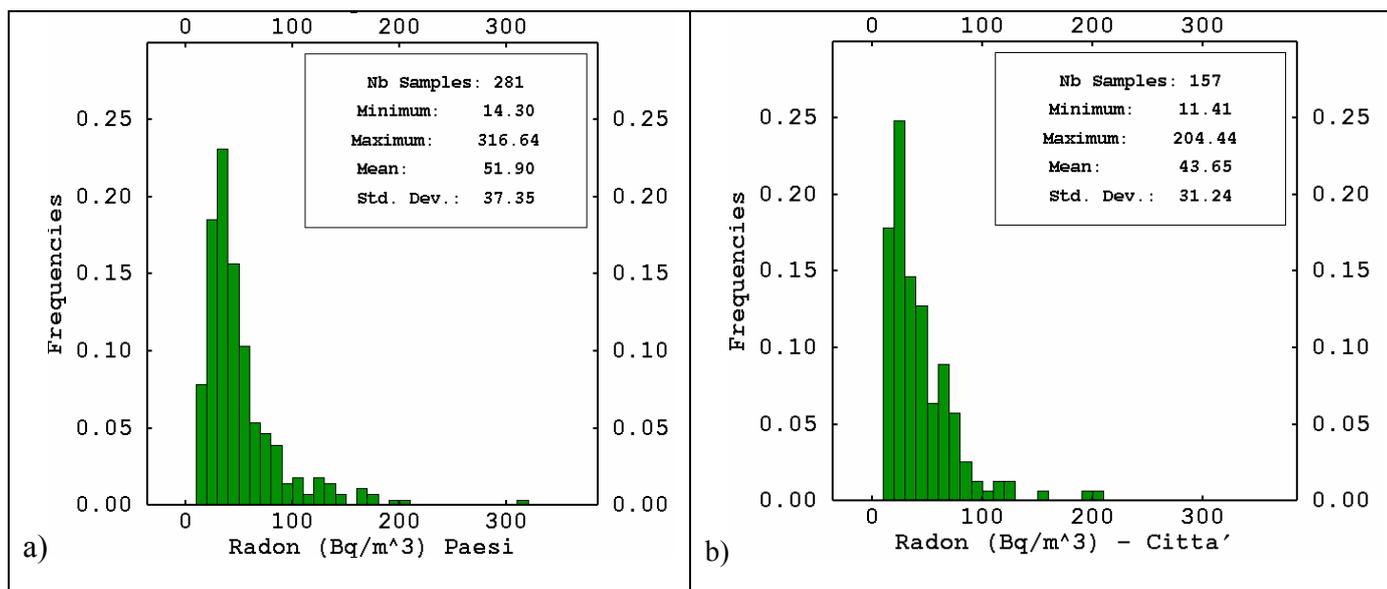


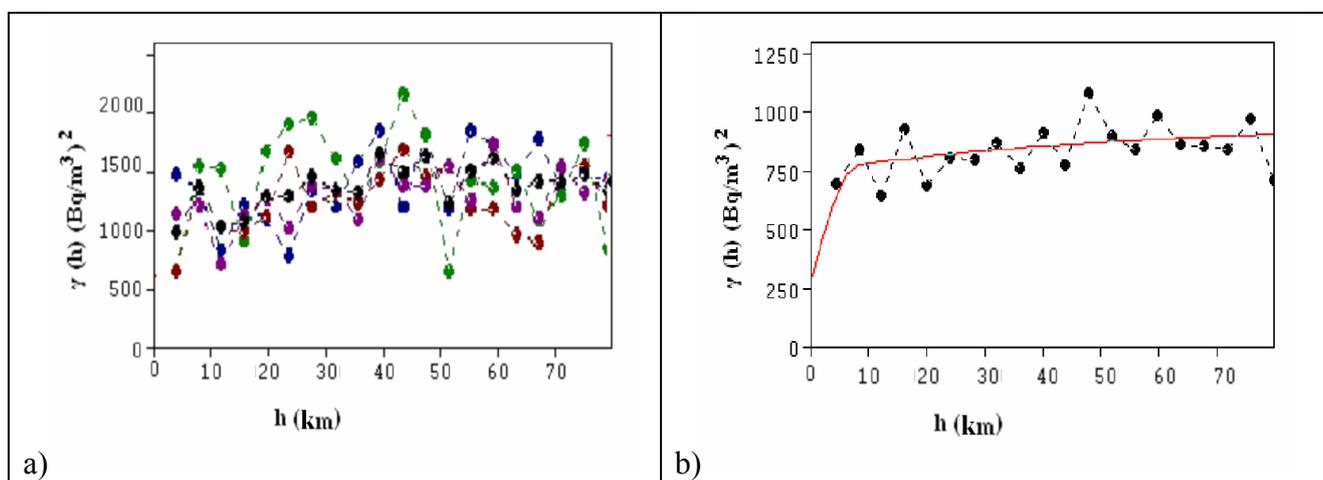
Tabella 7.2 – Statistiche elementari dei valori rilevati

	N.punti	Concentrazione min (Bq/m³)	Concentrazione max (Bq/m³)	Concentrazione media (Bq/m³)	Varianza (Bq/m³)²
Paesi	281	14	317	52	1395
Città	157	11	204	44	976
Tutti	438	11	317	49	1260

Per questa ragione la popolazione di misure utilizzata per lo studio di regionalizzazione del radon sul territorio dell’Emilia-Romagna è quella costituita dai 281 valori di paese e da 9 valori di città, ottenuti come media dei campioni raccolti in ciascun capoluogo.

Dall’analisi della funzione “variogramma” si osserva che le derivate sono insignificanti e che l’andamento è simile nelle diverse direzioni da cui si deduce il comportamento globale isotropo (figura 7.4 a)); il passo successivo è la modellizzazione del variogramma medio (figura 7.4 b)).

Figura 7.4 – Sovrapposizione dei variogrammi direzionali a) e modellizzazione del variogramma medio b)



Il modello di variabilità generale alla scala dei 5 Km (figura 7.4 b)) potrebbe derivare dalla somma di tre modelli elementari, una componente pepitica, una componente a piccola scala (8 Km) ed una componente a grande scala (50 Km) (tabella 7.3).

Tabella 7.3 – Modello del variogramma isotropo su tutto il territorio regionale

Modello	Range (km)	Soglia (Bq/m ³) ²
Pepitico	-	300
Sferico	8	500
Esponenziale	50	1000

Il rapporto fra la variabilità della piccola scala e dell'effetto pepita, cioè l'importanza relativa delle due cause di variabilità, può variare (per es. passando da 3/5 a 5/3) senza che venga meno il risultato fondamentale, cioè la presenza di due strutture: una a piccola scala e una a media scala di cui si vuole approfondire il significato fisico.

Il modello di variogramma scelto può essere considerato attendibile sulla base dei risultati dei test di cross-validazione ⁽¹⁾.

7.2.3 Differenziazione fra montagna e pianura

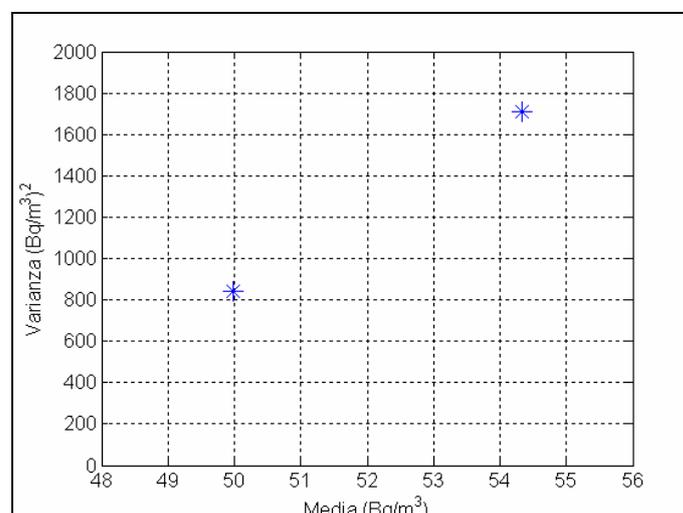
Un approfondimento dei risultati deve verificare se la correlazione spaziale è la stessa in pianura come in Appennino.

Un semplice confronto delle statistiche elementari evidenzia la grande dispersione dei dati in montagna, a fronte comunque di un piccolo, ma significativo, incremento del valor medio (tabella 7.4 e figura 7.5).

Tabella 7.4 – Statistiche elementari dei valori misurati divisi fra montagna e pianura

	N. Punti	Media (Bq/m ³)	Varianza (Bq/m ³) ²
Montagna	116	54	1707
Pianura	174	50	839
Dati totali	290	52	1358

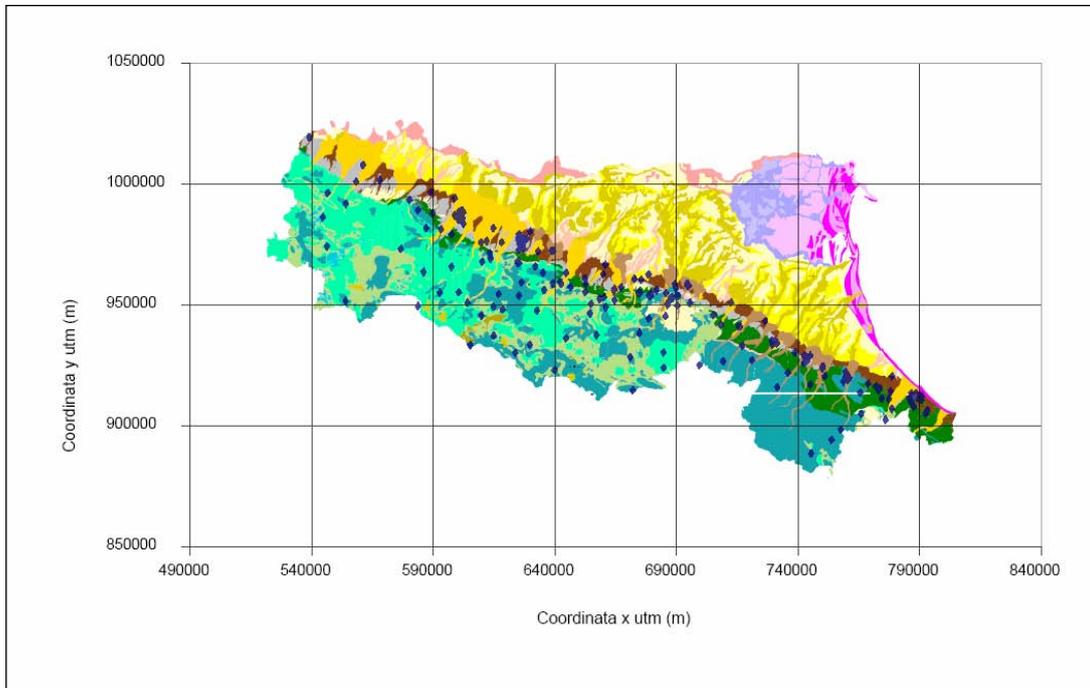
Figura 7.5 – Scatter media/varianza dei dati radon suddivisi fra montagna e pianura



In seguito a quanto osservato si è proceduto considerando separatamente le due sub-popolazioni di dati.

In figura 7.6 è rappresentata l'ubicazione dei punti di misura delle zone appenniniche.

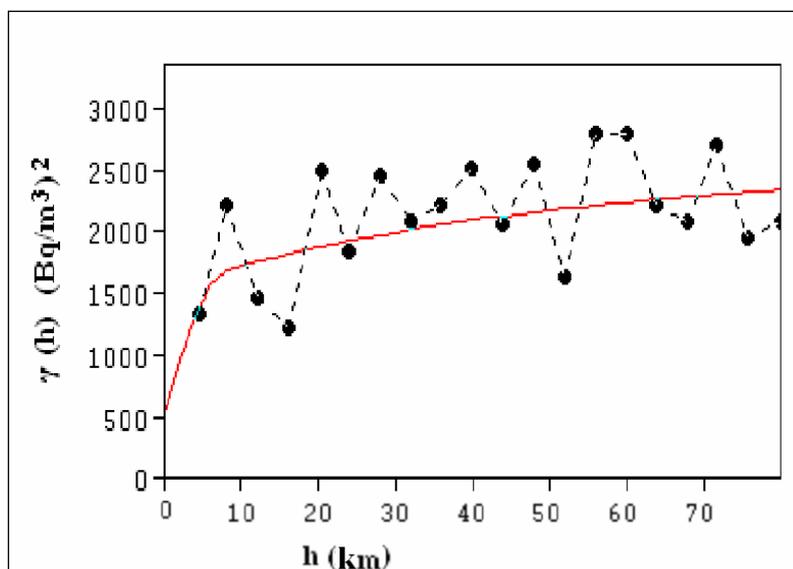
Figura 7.6 – Ubicazione dei punti di misura di montagna



Dalla sovrapposizione dei variogrammi direzionali (0, 45, 90 e 135°), si può notare l'assenza di anisotropia spaziale, cioè il comportamento della variabile è simile nelle quattro direzioni; inoltre si nota anche che non esistono significativi aumenti sistematici delle concentrazioni nelle varie direzioni.

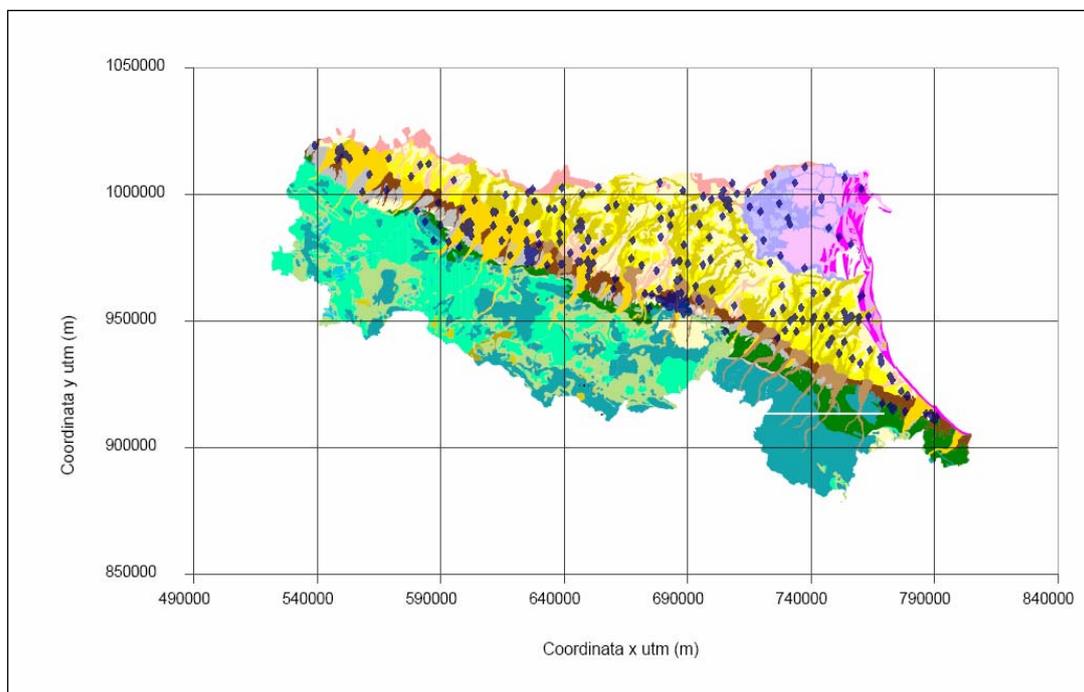
La modellizzazione del variogramma medio (figura 7.7) fa riferimento ancora alle tre strutture elementari di Tabella 7.3.

Figura 7.7 – Dati appenninici: variogramma medio sperimentale e relativo modello



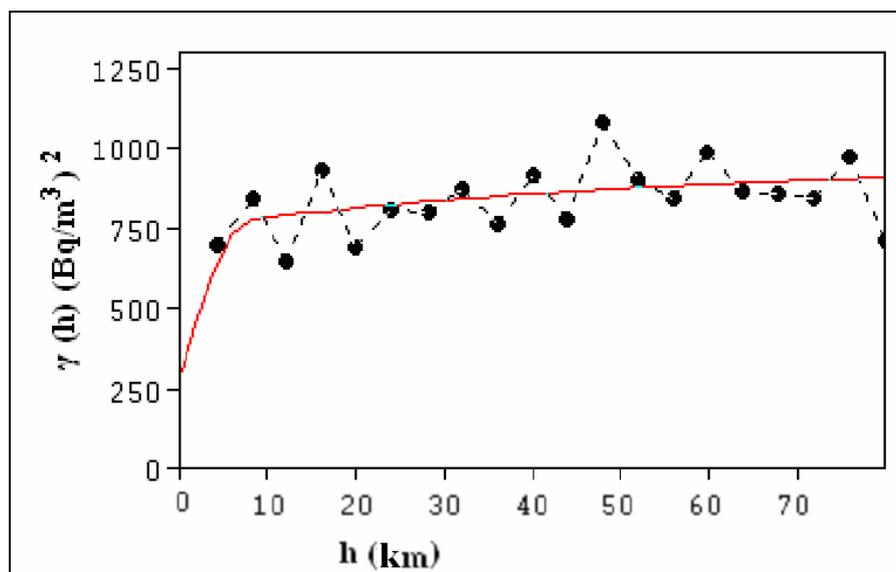
In figura 7.8 si riporta l'ubicazione dei punti di misura in pianura.

Figura 7.8 – Ubicazione dei punti di misura di pianura



I rapporti fra le soglie delle strutture elementari cambiano leggermente rispetto ai dati di montagna, l'andamento generale della variabilità spaziale resta invariato (figura 7.9).

Figura 7.9 – Dati di pianura: variogramma medio sperimentale e modello

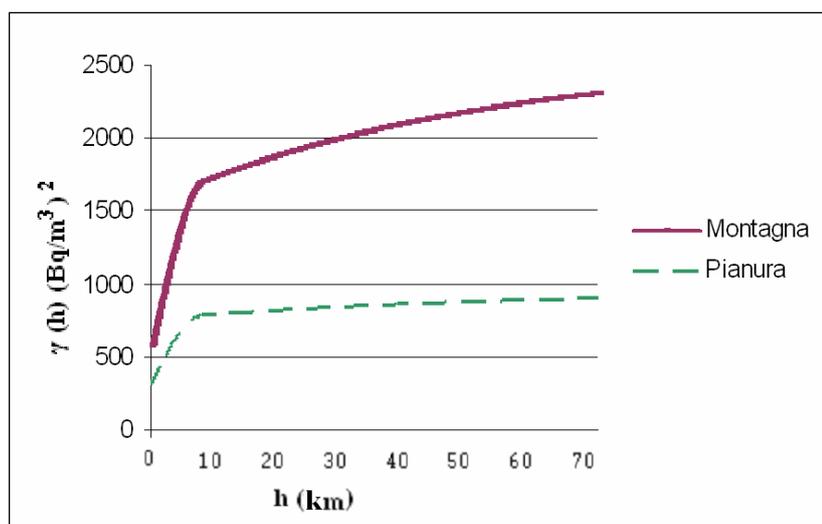


I test di cross-validazione dei due modelli utilizzati, rispettivamente per le aree di pianura e montagna, forniscono dei risultati migliori, sia in assoluto (errore quadratico medio) che in relativo (errore quadratico medio standard) rispetto all'utilizzo di un modello unico su tutto il territorio ⁽³⁾.

Riassumendo, dal punto vista geostatistico i dati di radon indoor mostrano la stessa struttura della variabilità spaziale, sia in pianura sia in montagna (figura 7.10); essa è composta di tre strutture isotrope:

- una parte della variabilità è priva di correlazione spaziale (effetto pepita);
- una parte della variabilità è legata a distanze caratteristiche di 8 km (modello sferico portata 8.000 m);
- una parte della variabilità è legata a distanze caratteristiche di oltre 50 Km (modello esponenziale portata equivalente di 50.000 m).

Figura 7.10 – Confronto tra i variogrammi di montagna e di pianura



I risultati, benché elementari, sono interessanti perché suscitano delle domande le cui risposte dovrebbero contribuire a chiarire le caratteristiche della distribuzione spaziale del radon in regione. Una conclusione appare ovvia: la correlazione spaziale, netta ed estesa a tutta la regione, esclude un legame significativo fra concentrazioni di radon osservate e materiali edilizi, a meno di un contributo, tutto da quantificare, sull'effetto pepita.

La presenza delle stesse tre strutture evidenzia, senza possibilità di equivoco, una medesima "logica" (origine, causalità, propagazione) di distribuzione spaziale del radon, logica di cui occorre interpretarne il significato. Relativamente all'effetto proporzionale, ipotizzando la provenienza del gas dal basso, la coltre sedimentaria in pianura potrebbe avere funzionato da filtro/tappo, riducendo un poco il valore medio del radon in superficie ed omogeneizzandone la distribuzione spaziale (dispersioni minori).

La presenza di variabilità non correlata spazialmente (almeno 30% della variabilità totale in pianura ed almeno 20% in montagna) ha molte possibili cause, alcune naturali (distribuzione effettivamente random), altre artificiali (errori di misura), altre ancora legate alla scala di lavoro (assenza di coppie di campioni a piccola distanza, escludendo quelle relative alle città).

Appare utile, comunque, proseguire nell'analisi delle possibili origini del radon sperimentando altri approcci.

Le principali variabili di tipo geologico correlabili ai livelli di radon sono:

- i diversi litotipi su cui gli stessi sondaggi sono stati effettuati;
- le particolari strutture geologiche, come può essere il sollevamento tettonico cui lo stesso appennino emiliano-romagnolo (quindi il limite tra montagna e pianura) è soggetto;
- le faglie, possibili vie di risalita e diffusione del gas.

7.2.4 Differenziazione per litotipo

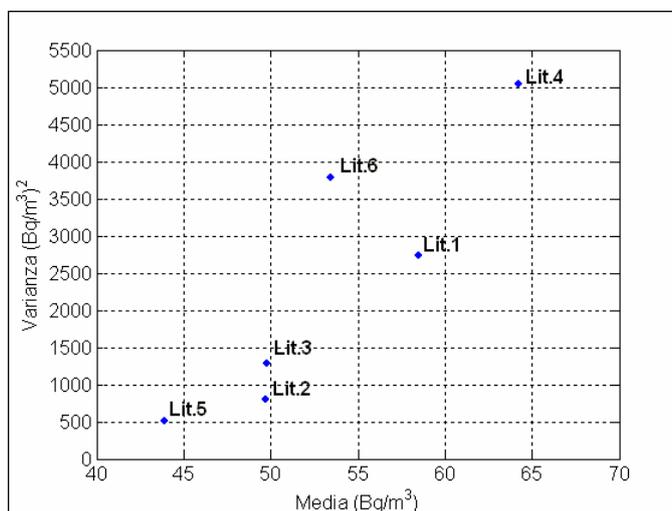
Sulla base della carta geologica, si è riscontrato che le misure di radon indoor sono state eseguite in edifici posti prevalentemente su 6 tipi di terreni ⁽⁴⁾: tre tipici della zona di pianura (limo, sabbia e ghiaia) e tre tipici dell'Appennino (calcari marnosi e arenarie pelitiche; marne e argille con intercalazione di arenarie, melanges e argille varicolori; arenarie, alternanza arenaceo-pelitiche, intercalazione di conglomerati).

In tabella 7.5 si riportano le statistiche elementari dei dati relativi a ciascun litotipo, rappresentate anche in figura 7.11.

Tabella 7.5 – Statistiche elementari dei valori misurati di radon indoor, in relazione al litotipo e divisi fra montagna e pianura

Zona	Litotipo	Nome	Media Bq/m ³	Varianza (Bq/m ³) ²
Pianura	Lit.1	Limo	59	2735
Pianura	Lit.2	Sabbia	50	803
Pianura	Lit.3	Ghiaia	50	1290
Montagna	Lit.4	Calcari marnosi e arenaria pelitiche	64	5041
Montagna	Lit.5	Marne e argille con intercalazione di arenarie, melanges e argille varicolori	44	512
Montagna	Lit.6	Arenarie, alternanza arenaceo – pelitiche, intercalazione di conglomerati	53	3787

Figura 7.11 – Scatter media/varianza dei dati radon indoor suddivisi per litotipo



Da elementari analisi statistiche risulta che la concentrazione di radon indoor presenta una media del più alta per gli edifici posti in suoli composti da calcari marnosi ed arenarie pelitiche, anche se il numero dei sondaggi è nettamente inferiore.

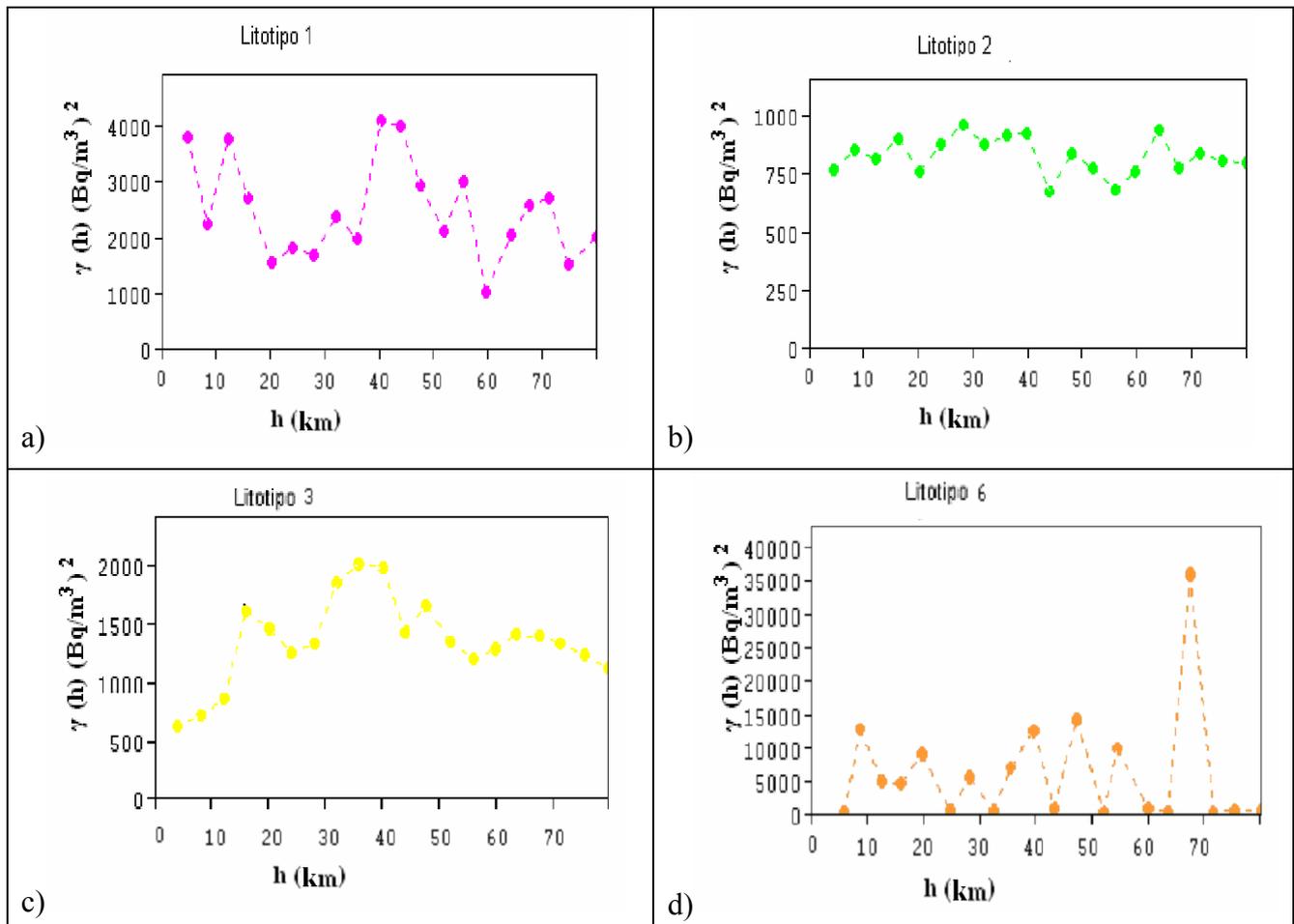
Si può comunque rilevare che il valore medio delle concentrazioni di radon indoor, rispetto ai vari litotipi, ha una variazione molto modesta: oscilla tra 44 Bq/m³ per marne ed argille con intercalazione di arenarie, melanges e argille varicolori (litotipo 5), e 64 Bq/m³ dei calcari marnosi e arenarie pelitiche (litotipo 4), entrambi suoli di montagna, mentre la distribuzione del radon indoor in pianura è praticamente omogenea.

Nei suoli di pianura si può notare che la concentrazione media di radon indoor in relazione a sabbia e ghiaia sono simili (50 Bq/m^3), mentre ha un valore più elevato in relazione al limo.

I punti di misura di radon indoor in relazione ai litotipi 4 e 5 sono in numero insufficiente per effettuare un'analisi di variabilità spaziale, quindi saranno momentaneamente trascurati.

A seguito sono riportati i variogrammi di ciascun litotipo, analizzati al fine di verificare l'esistenza di eventuali correlazione spaziale differenziate (figura 7.12).

Figura 7.12 – Variogramma dei litotipi 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 6 (d)



Dall'analisi dei quattro variogrammi si nota che il litotipo 2 e il litotipo 3, pur avendo media e varianza molto simili, presentano un andamento spaziale molto differente, in quanto il litotipo 2 ha un andamento pepitico, mentre il litotipo 3 presenta una marcata correlazione spaziale (70% della variabilità totale).

I litotipi 1 e 6, con medie e varianze nettamente superiori, non sembrano rilevare una significativa correlazione spaziale. In altre parole, alcuni valori particolarmente alti, la cui presenza è dovuta probabilmente a fattori locali non regionalizzati, fanno aumentare media e varianza, mascherando eventuali correlazioni spaziali.

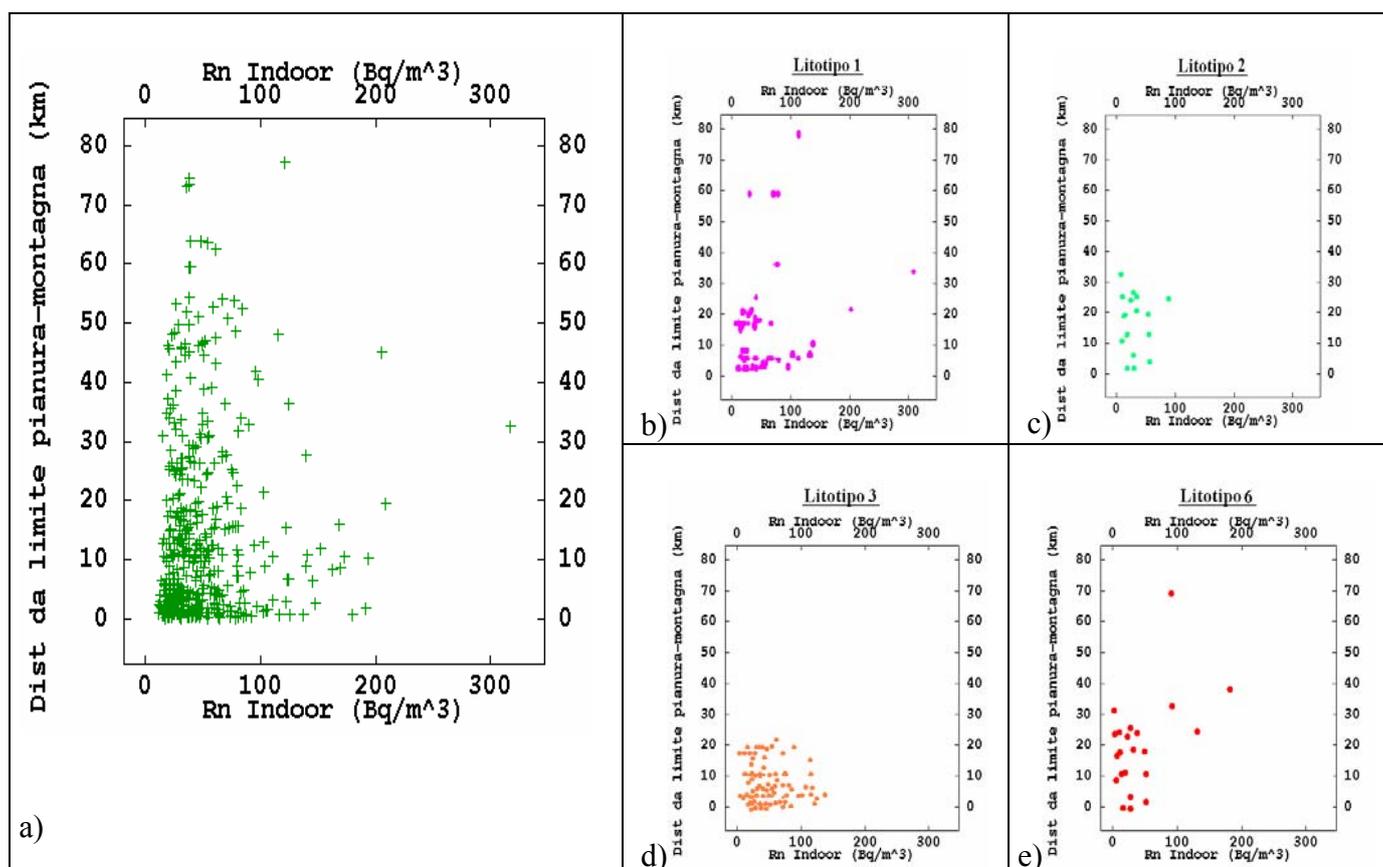
7.2.5 Correlazione con altri elementi strutturali

E' stata indagata l'esistenza di legami fra la concentrazione del radon indoor ed i seguenti elementi strutturali:

- Zone di faglia quali il limite pianura-montagna (figura 7.13) e la dorsale ferrarese;
- Punti di emissione di idrocarburi (vedi cap. 6).

Ad ogni campione è stata attribuita una distanza dall'elemento strutturale più vicino ed è stato realizzato lo scatter (nuvola di correlazione) fra i livelli di radon e la distanza dall'elemento strutturale in esame ⁽⁴⁾.

Figura 7.13 – Correlazione tra i livelli di radon rilevati e la distanza dal limite montagna-pianura totale a), differenziata per litotipo rispettivamente 1 (b), 2 (c), 3 (d) e 6 (e)



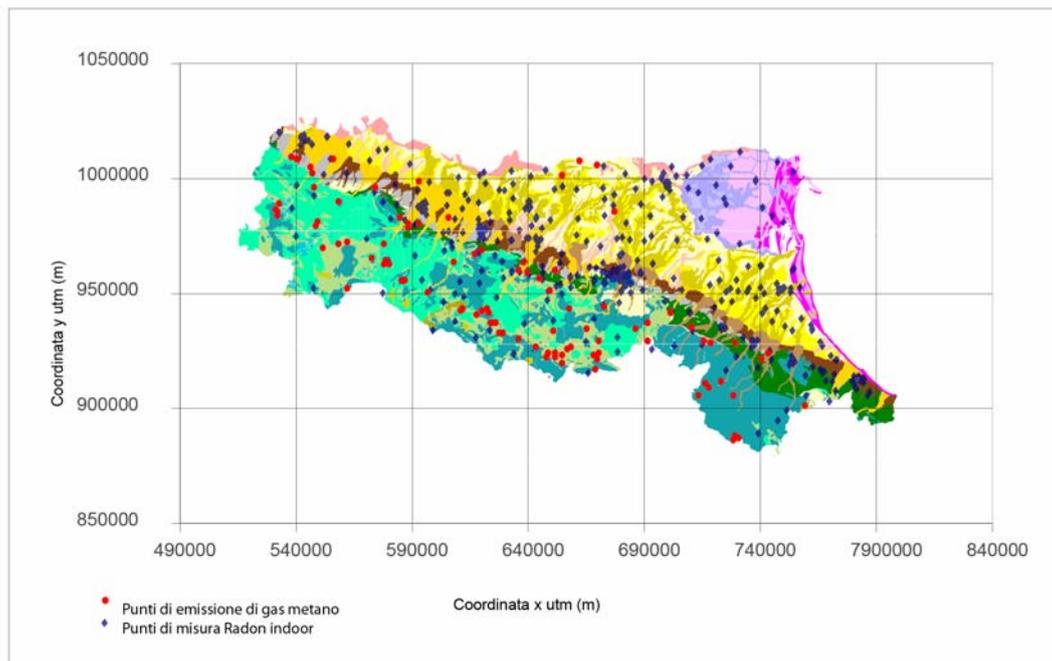
Relativamente al limite fra pianura ed appennino, la concentrazione di radon indoor non risulta correlata con la distanza del punto dal limite stesso, sebbene i valori alti di radon si concentrino in una zona limitata del grafico (figura 7.13 a)).

Suddividendo per litotipo i dati, rimane confermata l'assenza di correlazione con il limite geografico fra pianura e montagna (figura 7.13 b), c), d), e)).

Neanche nel caso della dorsale ferrarese si può affermare che esista una correlazione spaziale con il tenore di radon.

Lo studio si completa analizzando la correlazione fra la variabile radon e la distanza dai punti di emissione di gas naturale; in figura 7.14 si riporta la sovrapposizione spaziale dei dati delle due variabili.

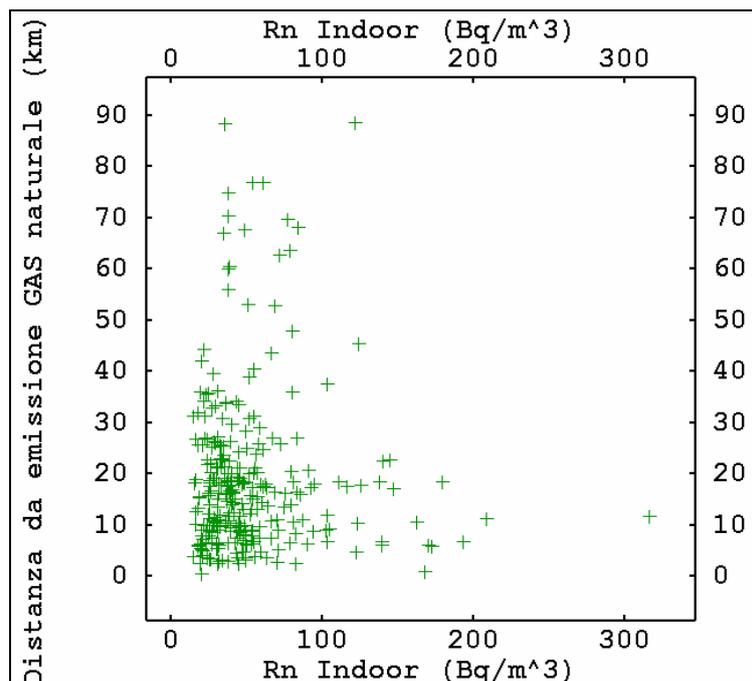
Figura 7.14 – Ubicazione dei punti di misura di radon indoor ed emissioni naturali di gas metano



Lo *scatter diagram* (figura 7.15) mostra una nuvola di correlazione raccolta attorno all'origine, senza, però, evidenziare una retta di correlazione lineare.

Sono di particolare interesse i punti che associano valori alti di radon ad una piccola distanza dal punto di emanazione di gas naturale. Ciò può essere giustificato tramite il meccanismo di cessione del radon dal metano all'atmosfera; infatti, la cessione è diretta ed istantanea, pertanto è possibile che siano stati rilevati valori elevati di radon indoor in zone con giacimenti di metano e con terreni e rocce caratterizzati da valori relativamente elevati di porosità ⁽⁵⁾, tipici della dorsale appenninica.

Figura 7.15 – Correlazione tra i livelli di radon rilevati e distanza dal punto più prossimo di emissione idrocarburi



7.3 *Analisi dei dati nelle acque di pozzo*

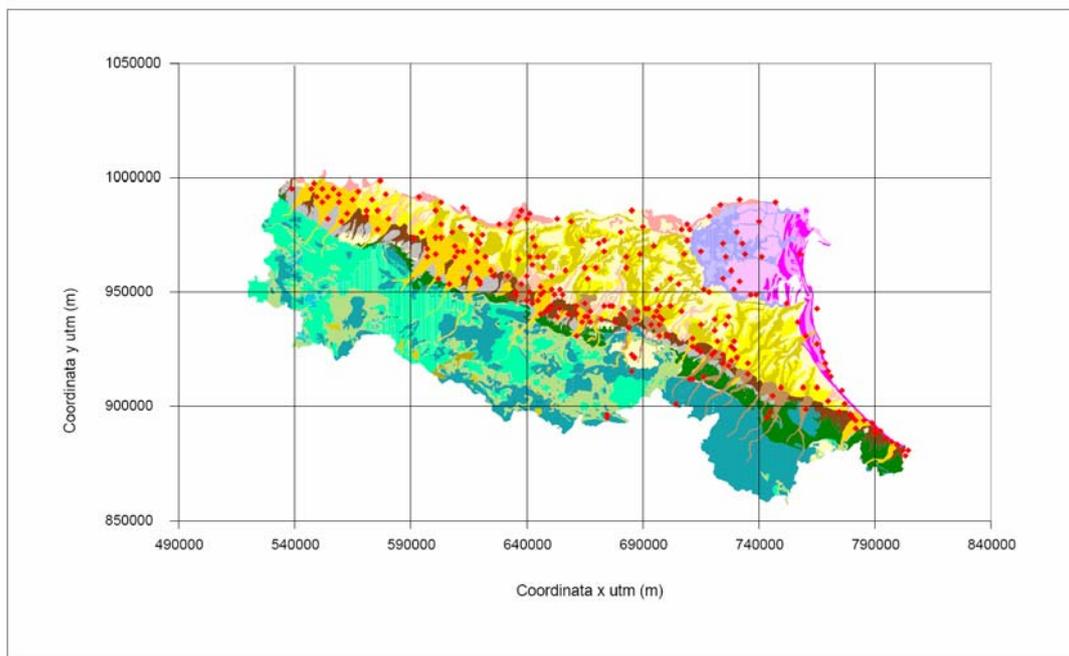
I dati utilizzati derivano dalle campagne di misurazione in 233 pozzi, effettuate in Emilia-Romagna durante i mesi di aprile, marzo e maggio 1990, distribuiti principalmente in pianura nelle 9 province della regione.

Anche nel caso delle concentrazioni di radon in acqua si sono adottate delle semplificazioni che hanno consentito di ridurre a 2 le dimensioni utili della variabile nel dominio di definizione dell'analisi geostatistica:

- si è ridotto lo spazio da 3D a 2D considerando solo le coordinate geografiche x-y, mentre la quota del piano campagna e la profondità dei pozzi sono state trattate come variabili georeferenziate con cui elaborare delle correlazioni spaziali.
- si è trascurata la coordinata temporale; tale scelta implicitamente equivale a considerando le misure in ogni pozzo contemporanee o, più correttamente, come misure istantanee riferite allo stesso intervallo di tempo.

In figura 7.16 è rappresentata la mappa dei punti di misura.

Figura 7. 16 – Mappatura dei punti di misura del radon in acqua.

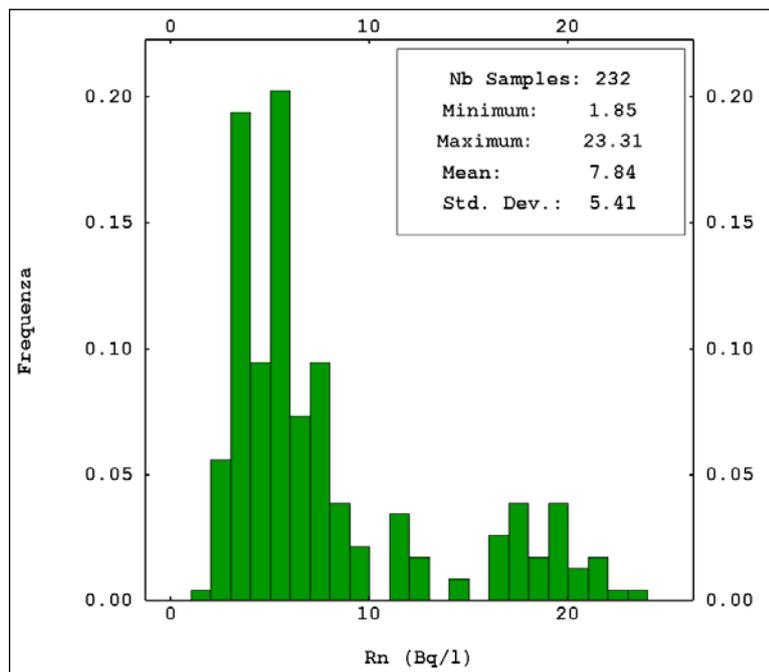


7.3.1 **La variabilità spaziale a scala regionale**

Ai fini dello studio spaziale a scala provinciale/regionale i dati concentrati in aree piccole forniscono un'informazione equivalente a quella del loro valore medio, inoltre l'analisi della variabilità spaziale a piccola scala (0-1 km) è poco significativa in fase di studio di una variabilità regionale. Per tali motivi i dati ravvicinati (distanza inferiore o uguale a 1 km) sono stati mediati su un unico punto rappresentativo del sottodominio.

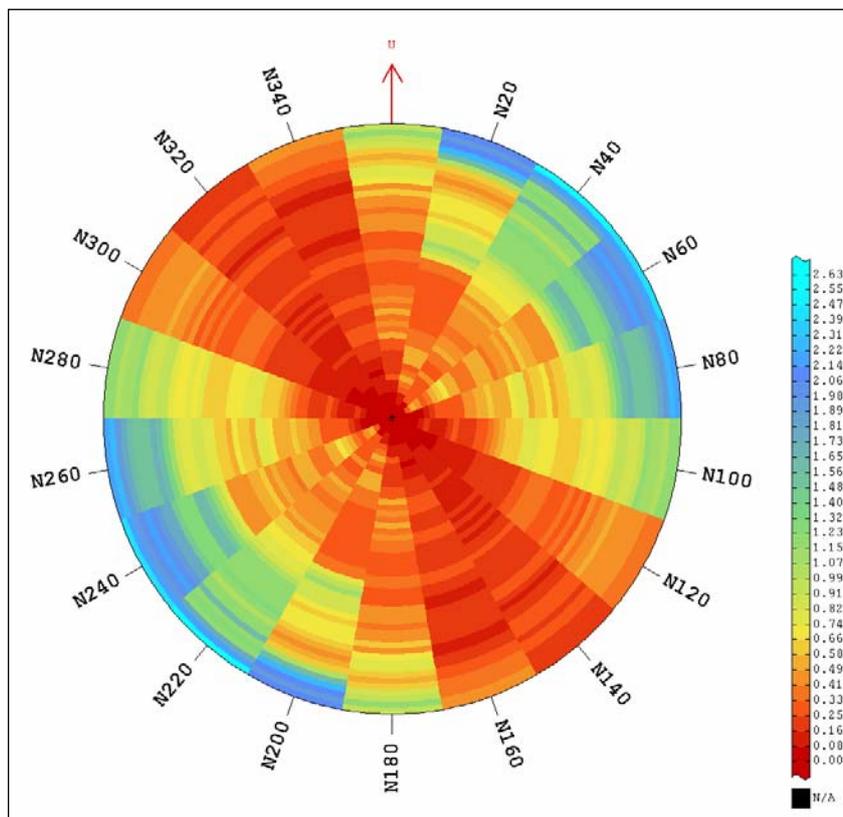
Un primo test utile è quello di verificare la presenza di più popolazioni di dati; l'istogramma di figura 7.17 presenta due "campane" di valori, la prima è più elevata ma meno estesa mentre la seconda è più estesa e meno elevata, ciò suggerisce la suddivisione dei dati in due popolazioni.

Figura 7.17 – Istogramma della distribuzione di frequenza del radon in acqua



La mappa variografica, riportata in figura 7.18, mostra l'andamento del variogramma nelle diverse direzioni. L'asimmetria cromatica indica la presenza di un'anisotropia, in altre parole un comportamento diverso nella direzione sud-est/nord-ovest rispetto alla direzione ad essa perpendicolare⁽³⁾.

Figura 7.18 – Variogramma del radon nelle acque di pozzo (Bq/l).



La maggiore correlazione è osservata nella direzione sud-est/nord-ovest, così come la “deriva”, che quantifica la variazione sistematica in una data direzione, è abbastanza pronunciata lungo l’asse regionale.

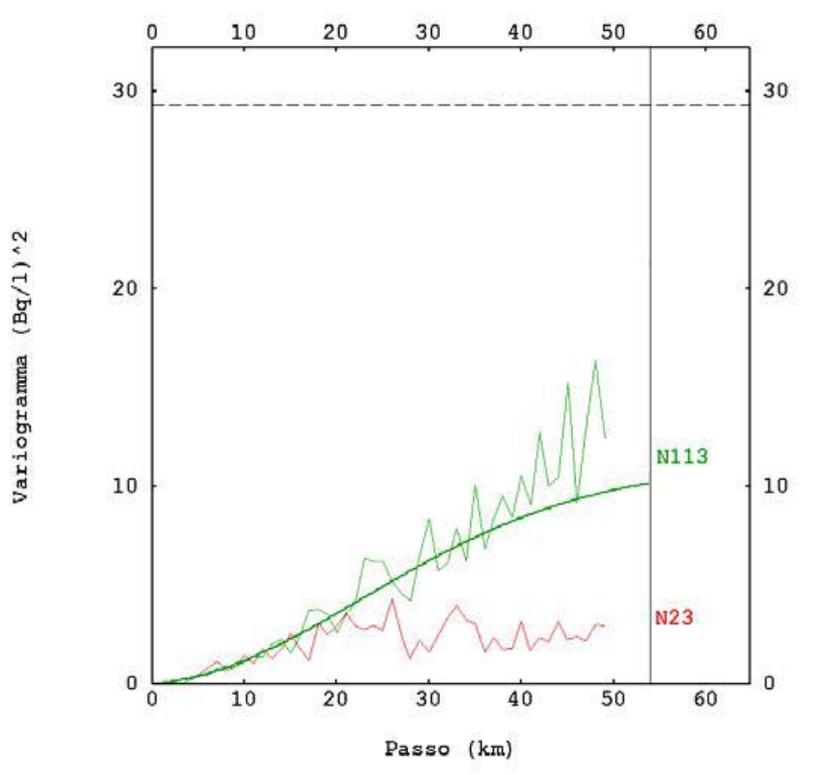
La mappa variografica rappresentata in figura 7.18 è stato calcolata a passo 1 km con un raggio d’influenza di 50 km, in 18 direzioni.

Vista la chiara anisotropia, si sono scelte due direzioni principali lungo le quali calcolare i variogrammi direzionali:

- -23° (N113) (direzione 1)
- 67° (N23) (direzione 2)

La modellizzazione del variogramma tiene conto dell’andamento isotropo a piccola scala e anisotropo nella direzione sud-est/nord-ovest (N113) a grande scala; in questa direzione il modello scelto è un gaussiano con range di 50 km e un sill di 11 $(\text{Bq/l})^2$ (figura 7.19).

Figura 7.19 – Variogramma sperimentale lungo le due direzioni individuate e variogramma modello nella direzione 1.



Per la direzione sud-ovest/nord-est (N23) la variabilità della concentrazione di radon in acqua, passando dalla pianura alla montagna, è poco netta, cioè si osserva che oltre i 10 km la correlazione spaziale rimane costante, con una variabilità inferiore a quello della direzione sud-est/nord-ovest (N113).

Occorre però evidenziare il ridotto numero di dati anche nelle zone appenniniche che realisticamente riduce in modo significativo la variabilità spaziale nella direzione nord-est/sud-ovest.

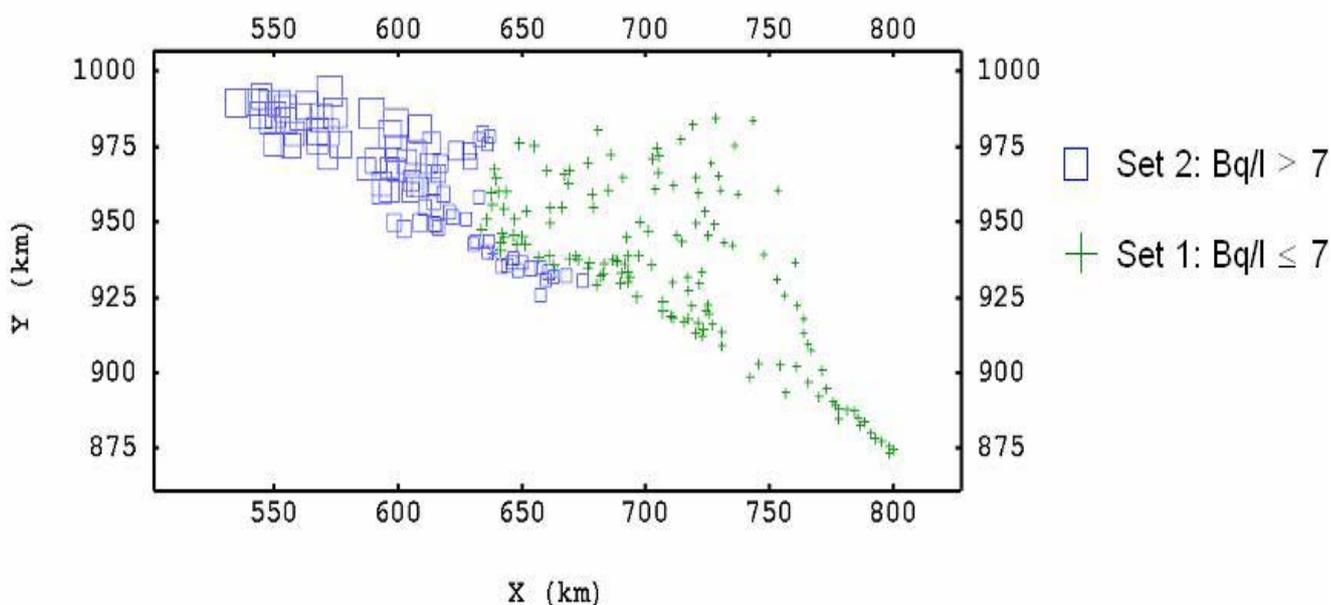
7.3.2 Differenziazione fra le due popolazioni

Dall'analisi dell'istogramma (figura 7.17), si erano individuate due sottopopolazioni all'interno del set di dati.

L'approfondimento di questo aspetto ha portato a scegliere di suddividere la popolazione sulla base di un valore di cut-off. Si è così individuato un valore di cut-off significativo pari a 7 Bq/l, che divide l'intera popolazione dei dati in due sottoinsiemi confrontabili con le due popolazioni definite dalle statistiche elementari.

La distribuzione spaziale dei dati dei sottoinsiemi equivale approssimativamente ad una suddivisione geografica, con una piccola porzione di dati di transizione che presenta valori di concentrazione prossimi a 7 Bq/l, condivisa dai due nuovi set di dati, ma che presenta una numerosità assolutamente trascurabile rispetto al numero totale di pozzi (figura 7.20 e Tav.3).

Figura 7.20 – Distribuzione spaziale dei valori di concentrazione di radon nelle acque di pozzo - Popolazione in verde (croci) = punti con concentrazione radon ≤ 7 Bq/l (set 1), popolazione in blu (quadrati) = punti con concentrazione radon > 7 Bq/l (set 2)



Le statistiche elementari (tabella 7.6) e la relazione media/varianza sono equivalenti a quelle già esaminate.

Tabella 7.6 – Radon in acqua - statistiche elementari delle due popolazioni

popolazione	n.misure	Media Bq/l	Varianza (Bq/l) ²
1	114	4.2	1.2
2	119	15.6	30.2

L'approfondimento sull'andamento dei variogrammi dei due set di dati evidenzia un comportamento differente fra di loro (figure 7.21 e 7.22). I variogrammi del set 2 (figura 7.22) mostrano una certa rassomiglianza con quelli ottenuti utilizzando tutti i dati (figura 7.19).

Figura 7.21 – Variogramma radon set 1

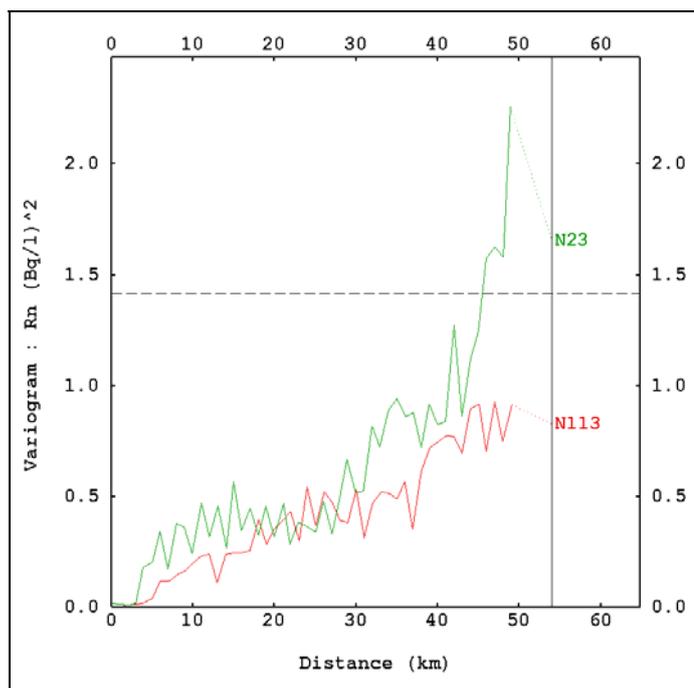
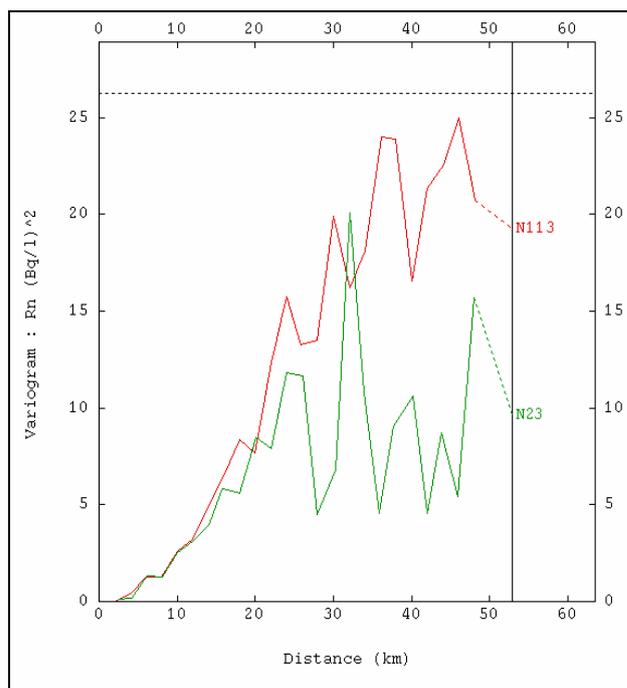


Figura 7.22 – Variogramma radon set 2



Per entrambi i set di dati si ha un'anisotropia a grande scala: il set 1 è isotropo fino a 30 km (figura 7.21), il set 2 (figura 7.22) è isotropo fino a 15-20 km.

L'ordine di grandezza della variabilità è però molto diverso: nel set 1 è di circa 1 Bq/l per entrambe le direzioni, mentre nel set 2 è di circa 10 Bq/l per la direzione N23 e circa 20 Bq/l per la direzione N113.

Ciò suggerisce una distribuzione isotropa del radon quando presente in bassa concentrazione (set 1), mentre, quando si analizzano valori di concentrazioni alti (set 2), l'isotropia si attenua e prevale la maggiore variabilità nella direzione sud-est/nord-ovest⁽³⁾.

E' evidente che adoperando una suddivisione in sottoinsiemi si caratterizzano aspetti locali che sfuggono in parte all'analisi regionale; tali aspetti aiutano a comprendere meglio quanto la mancanza dei dati in una certa direzione influisce sulla vera variabilità spaziale.

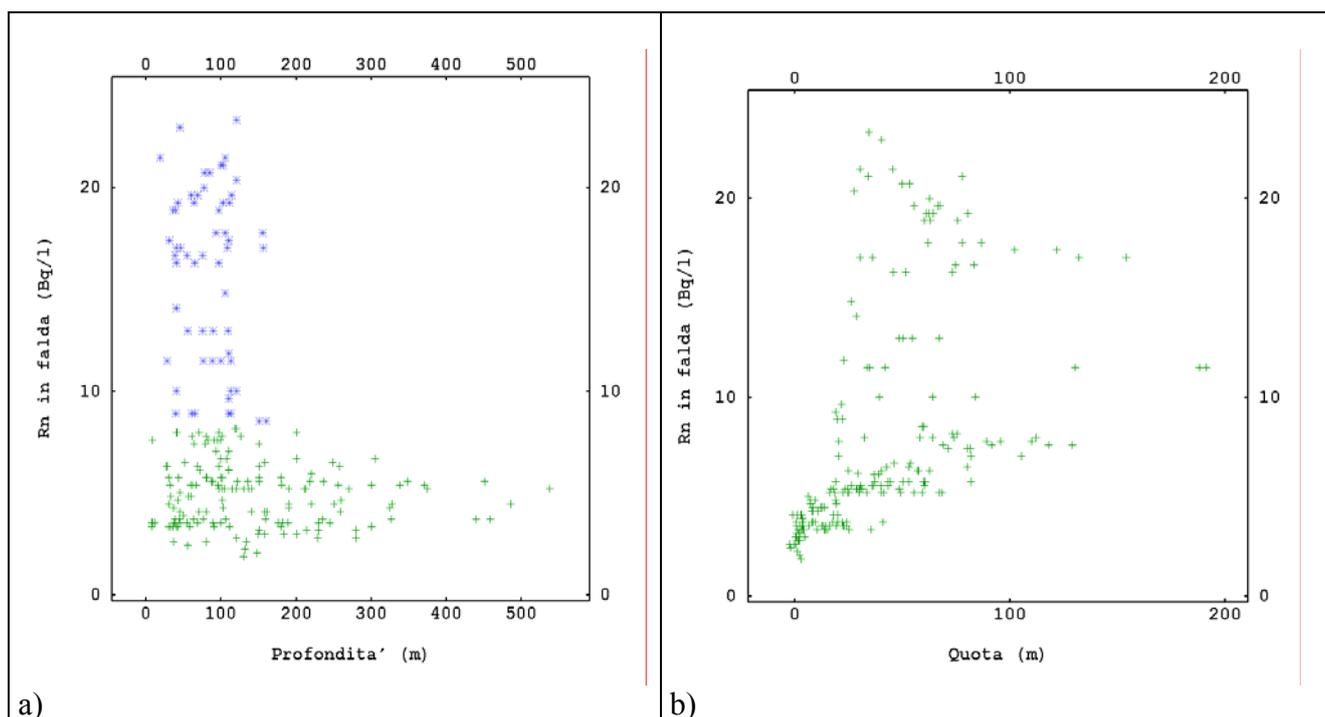
7.3.3 Correlazioni con altri elementi strutturali

E' stata indagata l'esistenza di una correlazione tra la concentrazione di radon in falda ed i seguenti elementi strutturali:

- profondità dei pozzi di misura
- quota piano campagna dei pozzi di misura
- distanza dall'emissione di gas naturale più vicina; l'analisi è stata possibile grazie ad un accurato lavoro di georeferenziazione in coordinate UTM 32 RER dei punti in cui sono state rilevate le manifestazioni di gas⁽⁶⁾

Analizziamo di seguito i singoli diagrammi di correlazione diretti, che forniscono le informazioni più interessanti (figure 7.23 – 7.25).

Figura 7.23 – Scatter di correlazione tra radon in falda e profondità (a) e tra radon in falda e quota (b)



La nuvola di correlazione rappresentata in figura 7.23 a) non mostra una correlazione diretta fra concentrazione di radon e profondità del pozzo. Tuttavia si rileva la presenza di due popolazioni (evidenziato dai due colori di figura 7.23 a)), infatti i pozzi più superficiali (110 m) hanno una maggiore concentrazione di radon, mentre i pozzi a profondità più elevate (500 m) non superano i 6.5 Bq/l.

Relativamente alla correlazione fra concentrazione di radon e quota del pozzo (figura 7.23 b)), si può notare ancora la presenza di due popolazioni, una correlata linearmente sino ai 7-8 Bq/l, l'altra molto più dispersa e con valori di radon maggiori di questa soglia.

Un'attenzione particolare è rivolta alla correlazione fra concentrazione di radon, caratteristiche del pozzo e distanza dall'emissione di metano più vicina.

Lo studio supporta una ricerca condotta sulle origini del radon in falda da Martinelli e Ferrari ⁽⁵⁾ (vedi cap. 6).

Nella ricerca, sono stati effettuati esperimenti di gorgogliamento di metano, ricco in radon, in acqua; circa il 10% del radon presente nel metano è ceduto all'acqua.

Il processo avviene in tempi molto brevi (bastano 10 secondi d'interazione), ma è stato osservato che si raggiunge sempre un valore stazionario, dopodiché la concentrazione non aumenta più; pertanto, per avere acque così ricche (in termini relativi) in radon come quelle del data set analizzato, sarebbe necessaria l'interazione con un metano 10 volte più ricco in radon di quello analizzato da Martinelli e Ferrari. Un metano di tale genere non esiste in Italia ed è molto raro nel mondo, se non introvabile.

Analizzando la figura 7.24 a) e b), si può osservare che non vi sono particolari caratteristiche dei pozzi associabili alla localizzazione di queste emissioni.

Figura 7.24 – Scatter di correlazione tra distanza dai punti di emissione del gas naturale e quota della falda (a) e tra distanza dai punti di emissione del gas naturale e profondità della falda (b)

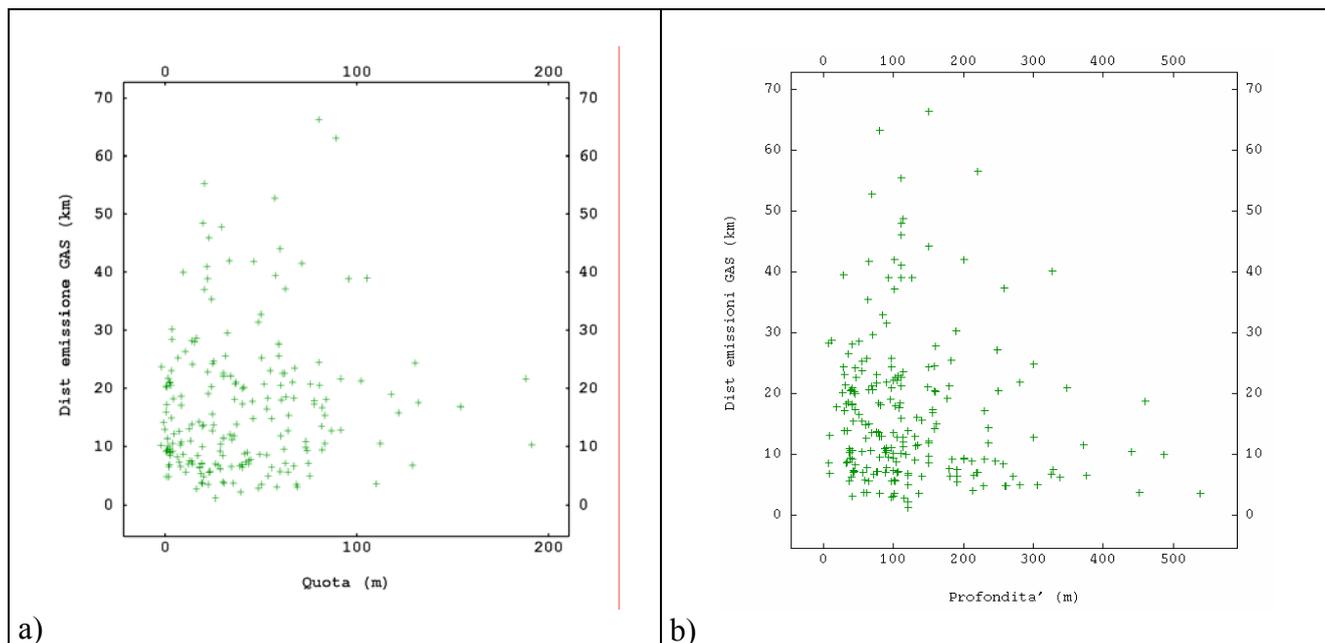
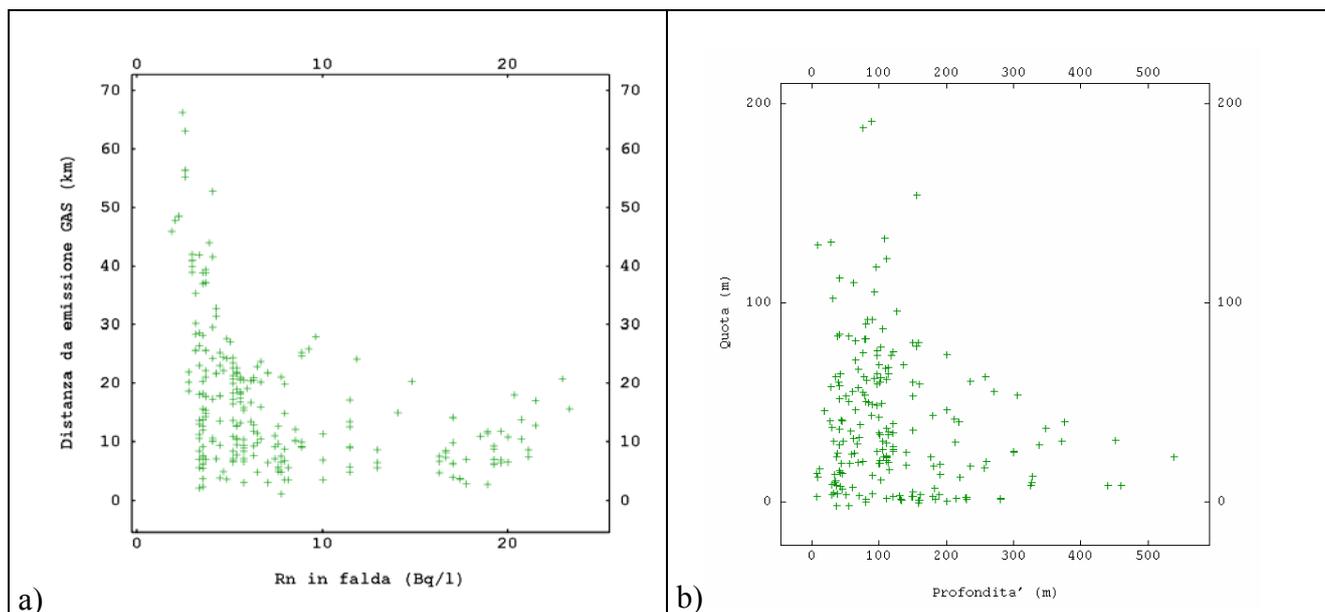


Figura 7.25 – Scatter di correlazione tra distanza dai punti di emissione del gas naturale e radon in falda (a) e tra quota e profondità del pozzo (b)



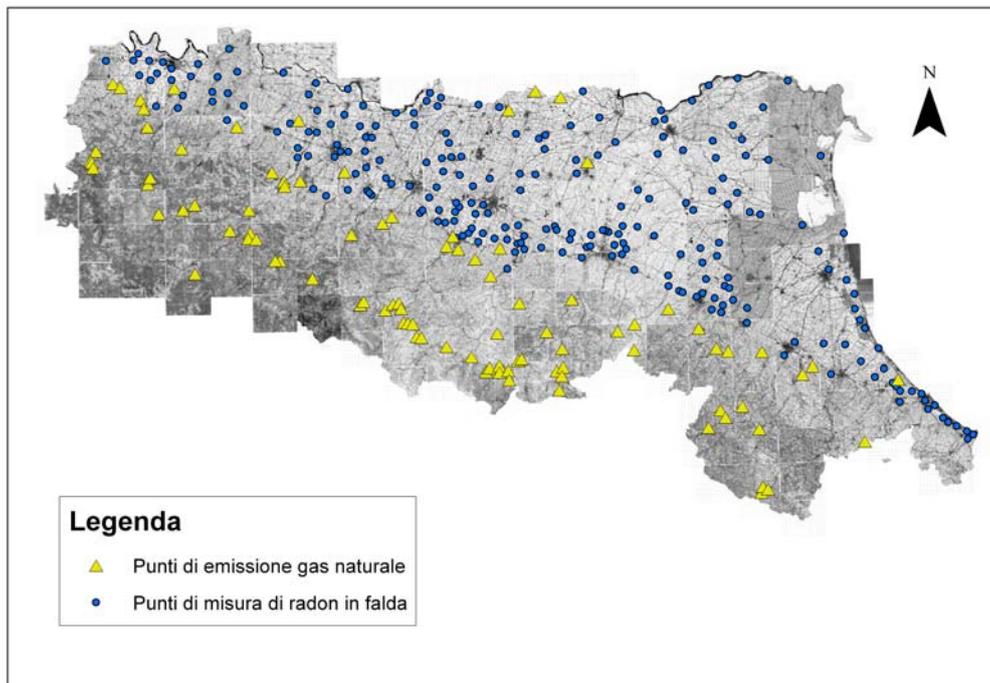
Inoltre, mediamente il contenuto di radon nella falda non è correlabile con la distanza dai punti di emissione gassosa (figura 7.25 a).

Tuttavia si nota una piccola tendenza dei pozzi, con alte concentrazioni di radon, a rimanere raggruppati in una nuvola, avente mediamente una distanza minima dal punto di emissione del gas, relativamente contenuta (15 km).

Come per lo scatter di correlazione fra radon e profondità (figura 7.23 a), questa distribuzione si può interpretare come somma di due popolazioni distinte.

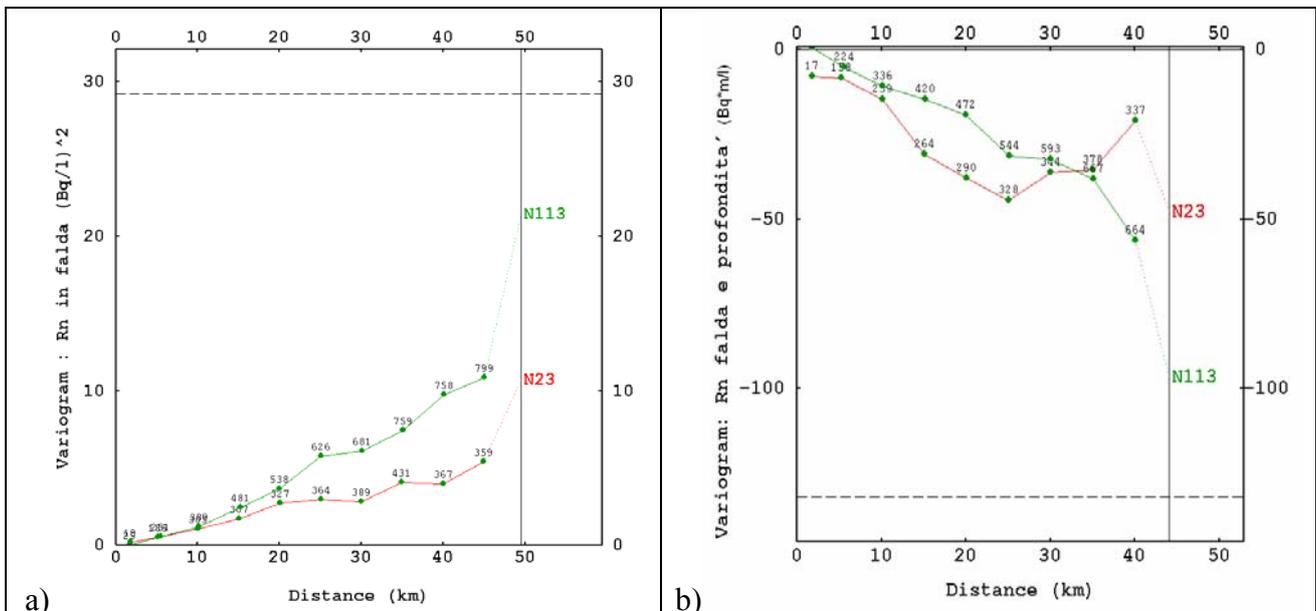
Va considerato, però, che mancano i dati di radon in pozzi dell'Appennino e quindi non si osserva una buona sovrapposizione spaziale con i punti di emissione di gas, come si può anche evidenziare dalla figura 7.26⁽⁴⁾.

Figura 7.26 – Ubicazione dei pozzi di falda con i punti di emissione gas



Lo studio delle correlazioni fra le variabili è ultimato con il calcolo dei variogrammi incrociati e con la costruzione di un modello di coregionalizzazione, costruito a partire dai dati sperimentali, che esprime in una forma matematica coerente ed ammissibile la variabilità spaziale del fenomeno in studio, descritta dal set dei variogrammi diretti ed incrociati provenienti dal calcolo sperimentale (figura 7.27).

Figura 7.27 (1) – Variogramma radon in falda (a) e variogramma incrociato con profondità (b)

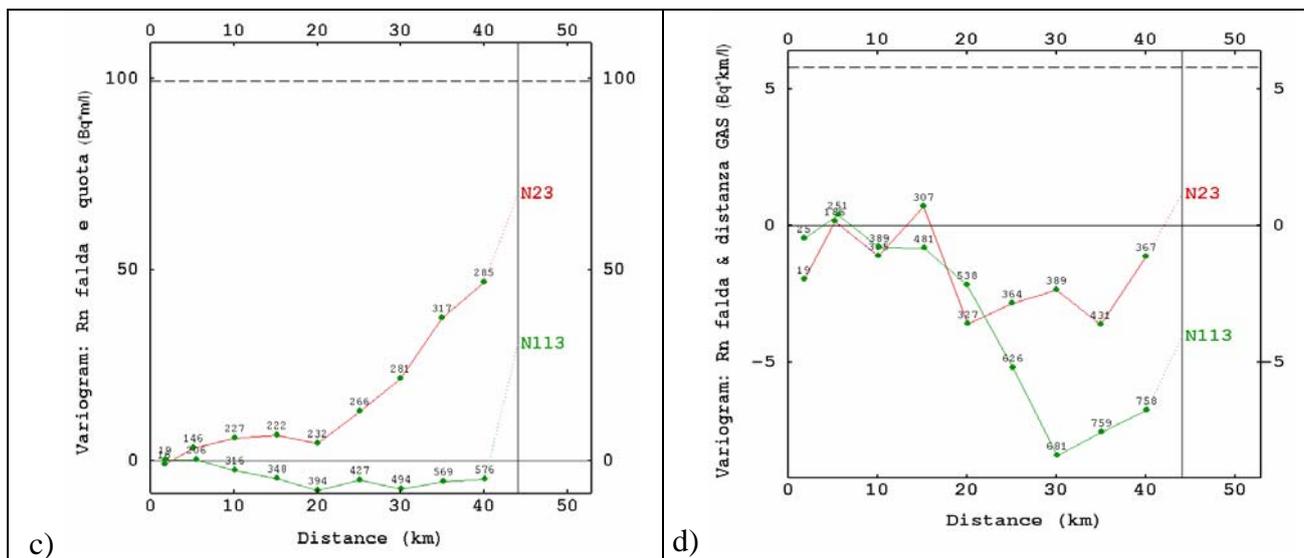


In questo caso valgono tutte le considerazioni fatte sul variogramma del radon disciolto in falda (primo dei grafici) ed i comportamenti che ha nelle due direzioni già definite.

Il modello di coregionalizzazione costruito è il medesimo: gaussiano con range di 50 km ed un sill di 110000 valore di $\gamma(h)$.

A proposito del grafico in figura 7.27 b), si può notare che l'andamento della profondità è negativo fino ad una distanza di 30 km, ciò significa che i livelli di radon aumentano se la profondità dei pozzi diminuisce, tendenza che era già stata messa in luce dalle correlazioni preliminari. Inoltre si nota che la direzione sud-est /nord-ovest (N113) sviluppa maggiormente questa tendenza rispetto alla direzione perpendicolare (N23), in cui dapprima si ha un andamento negativo, poi c'è un'inversione di segno che fa scomparire del tutto questa variabilità.

Figura 7.27 (2) – Variogrammi incrociati con quota (c) e distanza da emissioni di gas naturale (d)



Il terzo grafico (figura 7.27 c)) mostra un andamento positivo del radon in direzione N23 e leggermente positivo in direzione N113, con l'incremento di quota; tale fenomeno era già evidenziato a piccola scala in fase preliminare di correlazione.

La mancanza d'informazioni inerenti a pozzi in quota non permette in questa sede di affermare che ci sia una netta correlazione lineare con l'altimetria.

Il quarto ed ultimo grafico (figura 7.27 d)) è inerente alla coregionalizzazione del radon con la distanza minima dal punto gas metano.

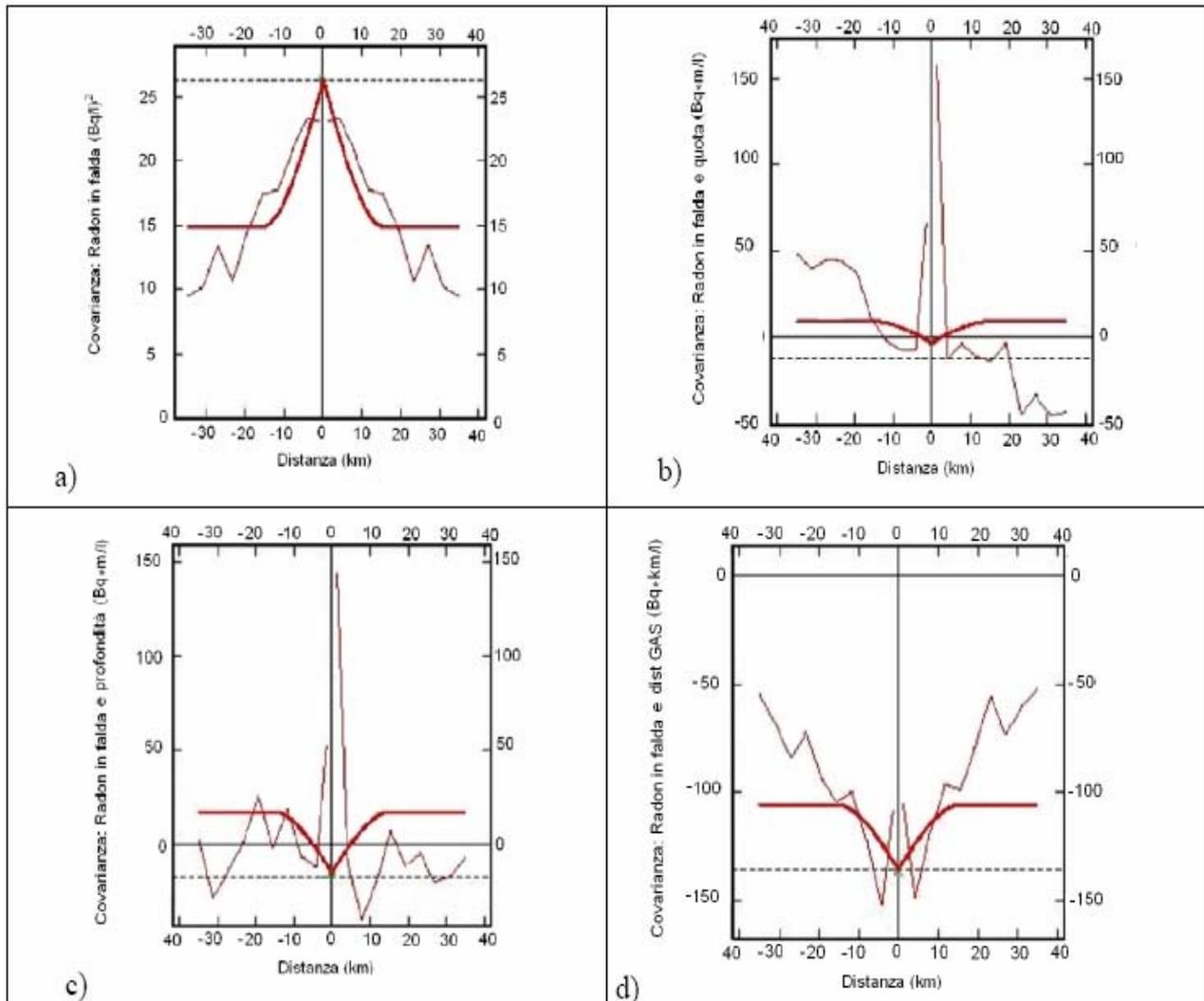
L'andamento è diversificato per le due direzioni: lungo la direzione sud-est/nord-ovest (N113) si nota la presenza di livelli alti a distanze abbastanza contenute, risultato non molto significativo dato che non esiste una vera correlazione, come già visto negli scatter in precedenza.

Nella direzione sud-ovest/nord-est (N23), l'incremento di valore di variogramma è del tutto trascurabile rispetto alla prima, però è confermato che il gradiente del radon è negativo, ma ciò potrebbe anche essere causato dall'insufficiente numero di dati.

A questo punto è interessante valutare l'andamento delle covarianze incrociate; nel nostro caso le variabili sono definite contemporaneamente e quindi non hanno uno sviluppo temporale, pertanto non ci si aspetta uno sfasamento o ritardo fra le due variabili ¹.

¹ La correlazione massima tra due variabili i e j non ha luogo necessariamente per $h = 0$, ma può aversi ad una distanza $h = r$ dall'origine. Tale distanza assume il significato di un ritardo tra le due variabili. Questo comportamento della funzione covarianza incrociata lo si osserva frequentemente in fenomeni a sviluppo temporale. La covarianza incrociata, in funzione del tipo di correlazione, può assumere anche valori negativi, mentre la covarianza diretta assume solo valori positivi

Figura 7.28 – Covarianza del radon (a) e covarianze incrociate con quota (b), profondità (c) e distanza da sorgenti di gas naturale (d)



Come si può osservare dalla figura 7.28, le covarianze incrociate non presentano nessun ritardo e mostrano un andamento abbastanza simmetrico.

La covarianza incrociata calcolata fra livelli di radon e quota presenta un andamento che è positivo da una parte e negativo dall'altra (figura 7.28 b)).

Il valore riportato è quello medio delle 4 direzioni, quindi è possibile che la correlazione del radon con la quota aumenti in una certa direzione e diminuisca lungo l'opposta; purtroppo questa ipotesi non può essere ulteriormente indagata a causa della mancanza di un numero sufficiente di dati in appennino, necessari per determinare un'anisotropia effettiva nella correlazione fra radon e quota. Peraltro subentrano le influenze di fenomeni di tipo localizzato, come ad esempio situazioni geologiche particolari, la vicinanza di variazioni litologiche significative oppure manifestazioni di gas naturale, che non permettono un approfondimento di tale analisi.

7.4 Cartografie

7.4.1 Cartografia del radon indoor

In assenza di particolari elementi strutturali che oggettivamente influiscono sulla distribuzione spaziale delle concentrazioni di radon indoor, è lecito procedere ad una semplice cartografia sulla base di tutti i dati distribuiti sul territorio (figura 7.29).

Tutte le cartografie, tipicamente quelle ad isovalori, richiedono una fase di stima del valore della variabile d'interesse ai nodi di una maglia regolare.

Nel nostro caso abbiamo adottato come stimatore il "krigaggio ordinario", lo stimatore della geostatistica lineare.

Tale scelta è giustificata dalla presenza delle due strutture spaziali di variabilità a piccola (8 Km) e grande scala (50 Km); inoltre il krigaggio garantisce che la curva ad isovalori rispetta i dati veri (condizione di correttezza) e che la precisione sia massima (condizione d'ottimalità).

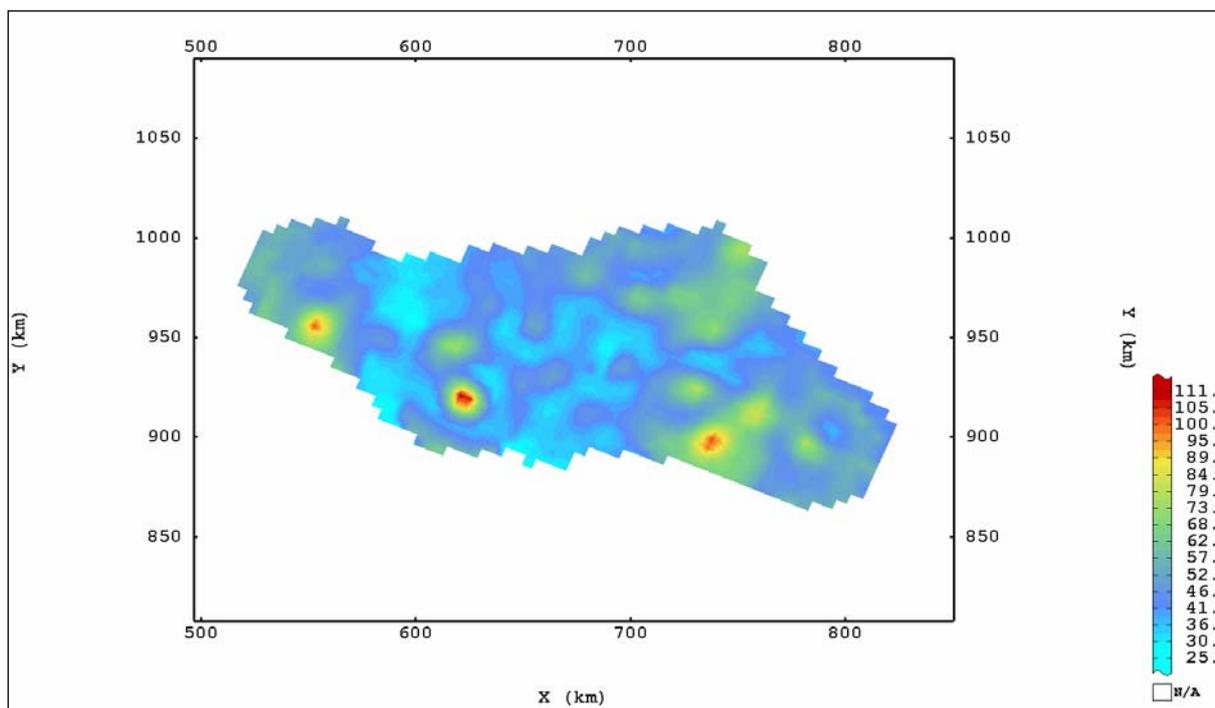
Il krigaggio restituisce il valore vero là dove c'è un dato, cosa che contribuisce a rendere soddisfacenti le rappresentazioni ottenute mediante stime geostatistiche.

In relazione al tipo di variabile, la cartografia dei livelli di radon indoor risultante ha un valore puramente indicativo.

Data la presenza delle due stesse strutture spaziali, la stima è stata effettuata sia considerando solo i dati della pianura, sia solo quelli appenninici, sia a partire da tutti i dati contemporaneamente.

I risultati ottenuti risultano confrontabili.

Figura 7.29 - Mappa ad isovalori dei livelli di radon (Bq/m^3)



La mappa di figura 7.29, mette in evidenza le tre distinte aree dove si concentrano i più alti valori di radon indoor, tutte in zona appenninica (un'area nella provincia di Piacenza, una nelle province di Reggio Emilia e Modena e l'ultima nell'Appennino romagnolo, provincia di Forlì-Cesena).

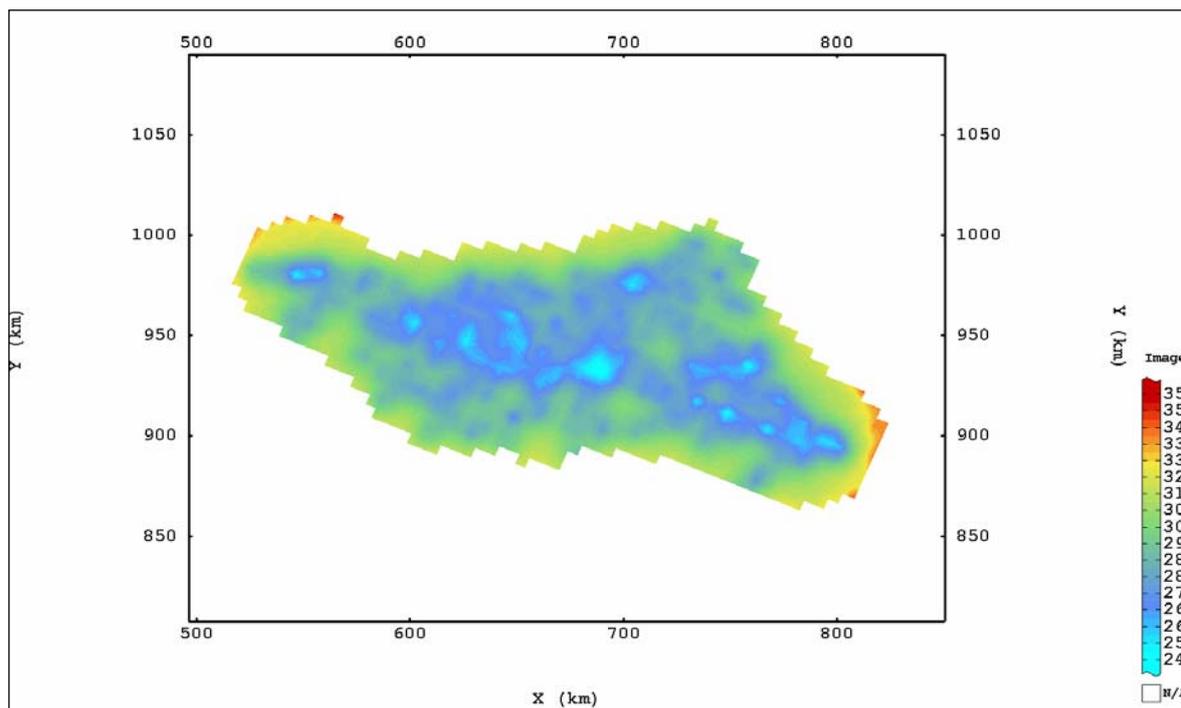
Inoltre, è confermata la correlazione spaziale e continuità della variabile, come anche l'isotropia e la "stazionarietà".

Nella figura 7.30 si riporta la cartografia della precisione della precedente mappa, basata su valori stimati.

Da questa si evince che l'affidabilità della ricostruzione 2D della distribuzione dei valori di radon indoor è praticamente la stessa su tutto il territorio regionale.

L'errore di stima è compreso, al 70% di probabilità, nell'intervallo ± 30 Bq/m³, sia che si considerino aree molto vicine ad un dato, sia aree più distanti; ciò dipende dalla forte componente pepitica presente nel modello di variogramma.

Figura 7.30 - Mappa ad isovalori della varianza di stima dei livelli di radon indoor ((Bq/m³)²)



7.4.2 Cartografia del radon nelle falde

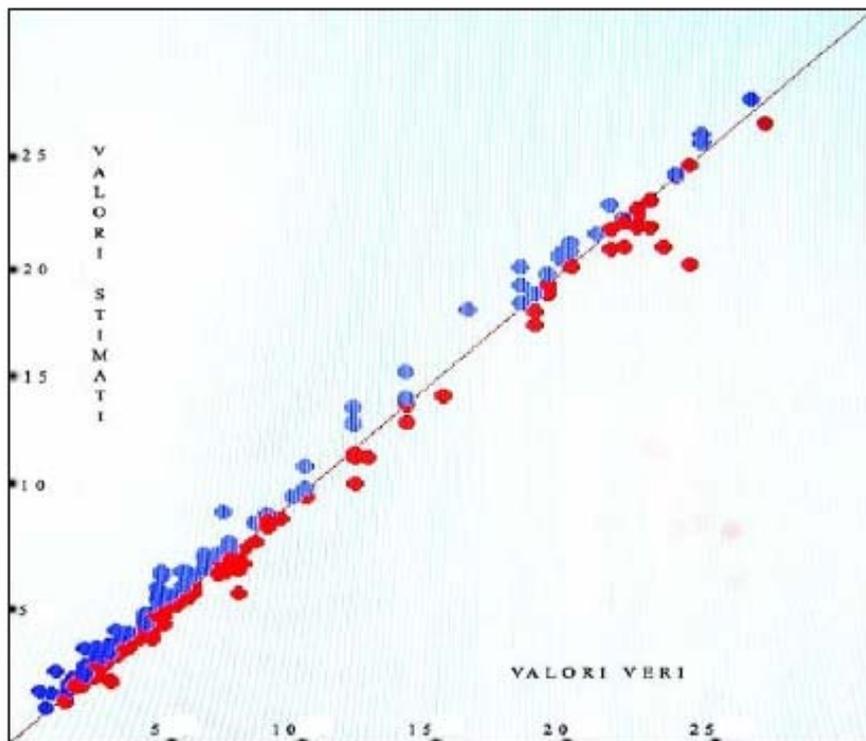
Come già premesso al paragrafo precedente, tutte le cartografie, tipicamente quelle ad isovalori, richiedono una fase di stima del valore della variabile d'interesse ai nodi di una maglia regolare. Anche in questo caso è stato adottato come stimatore il "krigaggio ordinario", scelta giustificata dalla presenza delle due strutture spaziali di variabilità a piccola (20 km) e a grande scala (150 km).

Per testare il modello si è proceduto con il test di crossvalidazione, metodo che verifica la qualità della stima e quindi del modello scelto.

I risultati del test sono riportati in figura 7.31, dove sono evidenziati in rosso ed in blu rispettivamente le sottostime e le sovrastime rispetto al modello.

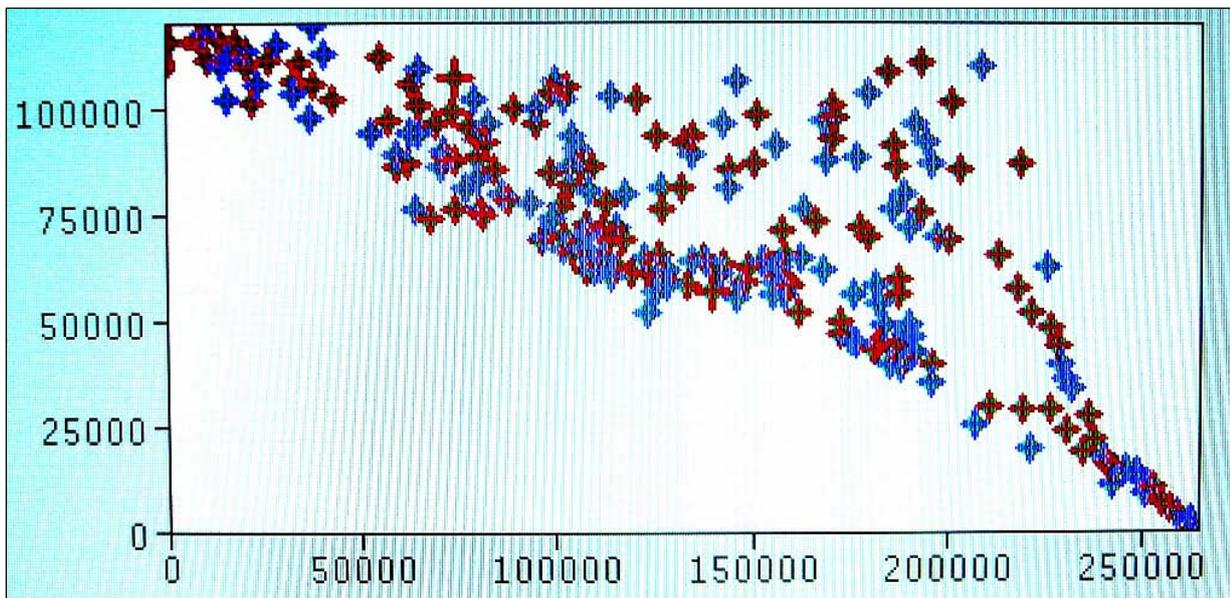
L'allineamento dei valori lungo la bisettrice evidenzia una stima soddisfacente.

Figura 7.31 – radon in acqua – test di crossvalidazione



Inoltre (figura 7.32) la stima si rivela efficace in quanto sovrastime e sottostime si distribuiscono uniformemente nell'area, senza quindi zone con errori sistematici.

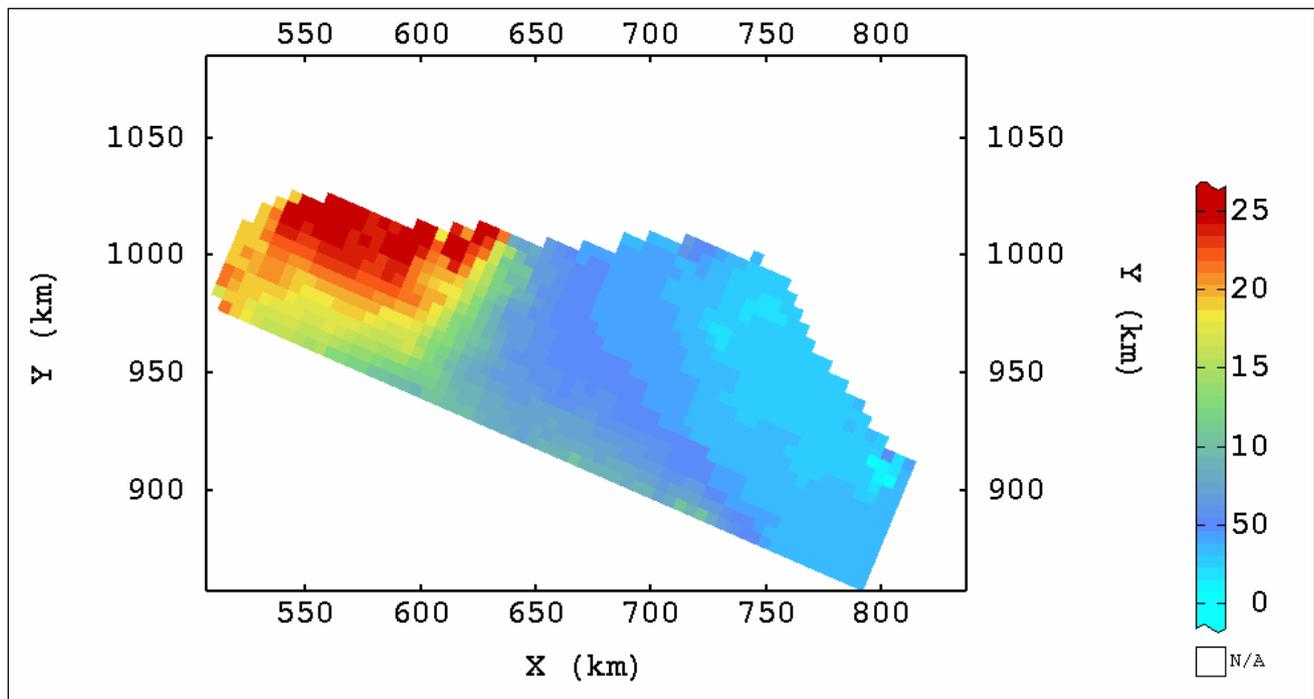
Figura 7.32 – Distribuzione spaziale dei risultati di crossvalidazione (rossi: sottostimati, blu: sovrastimati)



La ricostruzione cartografica delle concentrazioni di radon in falda è riportata nella figura 7.33, che si riferisce geograficamente all'intera regione.

Le cartografie sono ottenute a partire da una stima mediante krigaggio utilizzando una maglia quadrata di 10 km di lato ed un vicinaggio di 40 km di diametro.

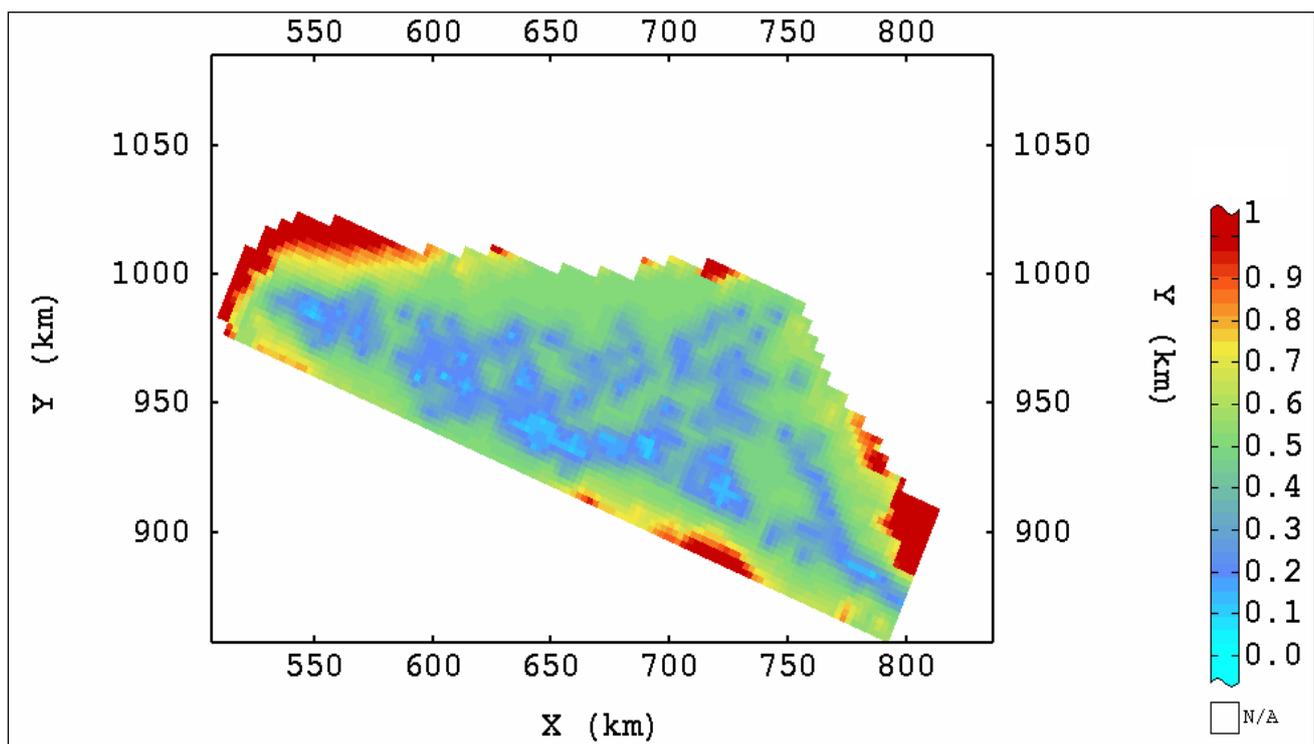
Figura 7.33 – Carta stimata della concentrazione del radon nella falda (Bq/l)



Dal punto di vista cartografico è sempre importante associare le mappe ad isovalori della variabile stimata con la mappa ad isovalori della varianza di stima, che quantifica la precisione prevista della stima stessa.

In figura 7.34 si può notare che la distribuzione della varianza di stima sul territorio ha un valore medio abbastanza basso rispetto alla varianza a priori calcolata nelle statistiche elementari.

Figura 7.34 – Carta della varianza di stima della concentrazione del radon nella falda (Bq/l)²



7.4.3 Analisi comparata della distribuzione spaziale del radon “indoor” ed in falda

E' indubbiamente interessante sviluppare un confronto analitico fra i due set di dati disponibili, quelli “indoor” e quelli in falda. Un lavoro specifico è stato sviluppato nel 2006⁽³⁾.

Occorre premettere che le concentrazioni a cui si riferiscono i due insiemi di dati sono diversi per natura dei campioni, supporto volumetrico, tecniche di analisi, unità di misura, data di campionamento, etc; si tratta comunque di grandezze che possono essere esaminate in un quadro di analisi multivariata.

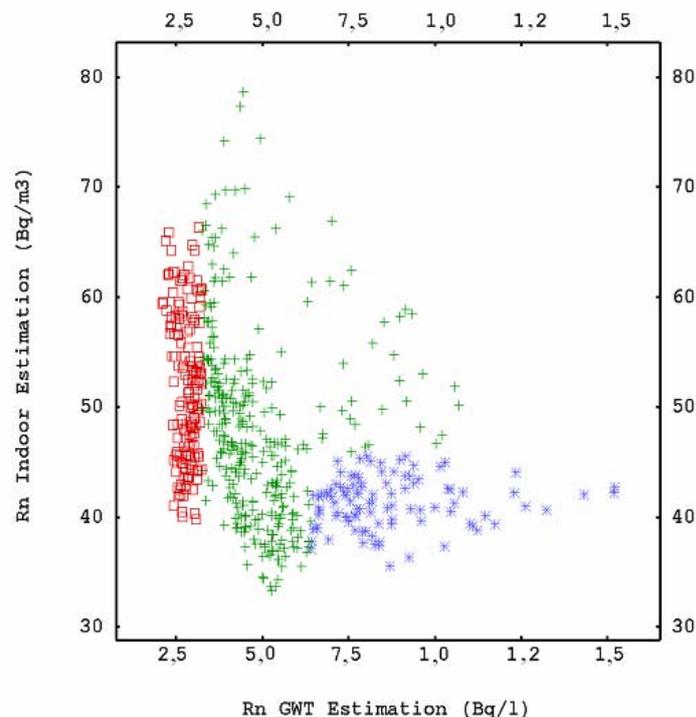
Il problema principale però risiede nella eterotopia delle campionature; in altre parole i due tipi di dati non sono ovviamente disponibili negli stessi punti di misura, il che impedisce delle elaborazioni elementari dei dati originali.

La soluzione adottata è stata quella di procedere alle analisi sui valori stimati, questi sì disponibili negli stessi punti, appunto nei nodi della maglia regolare di stima.

La prima analisi è costituita dal raffronto visivo fra le cartografie dei valori stimati del radon “indoor” (figura 7.29) e del radon in falda (figura 7.33); risulta chiaramente una significativa differenza fra le distribuzioni spaziali; i valori massimi sono distribuiti lungo tutto l'appennino nel caso del radon indoor, mentre per il radon in falda si concentrano nella pianura del N-W.

Inoltre, una analisi della nuvola di correlazione fra i valori stimati delle due variabili evidenzia una correlazione nulla o negativa, con un coefficiente $\rho_{ind/wt} = -0.2$. (figura 7.35)

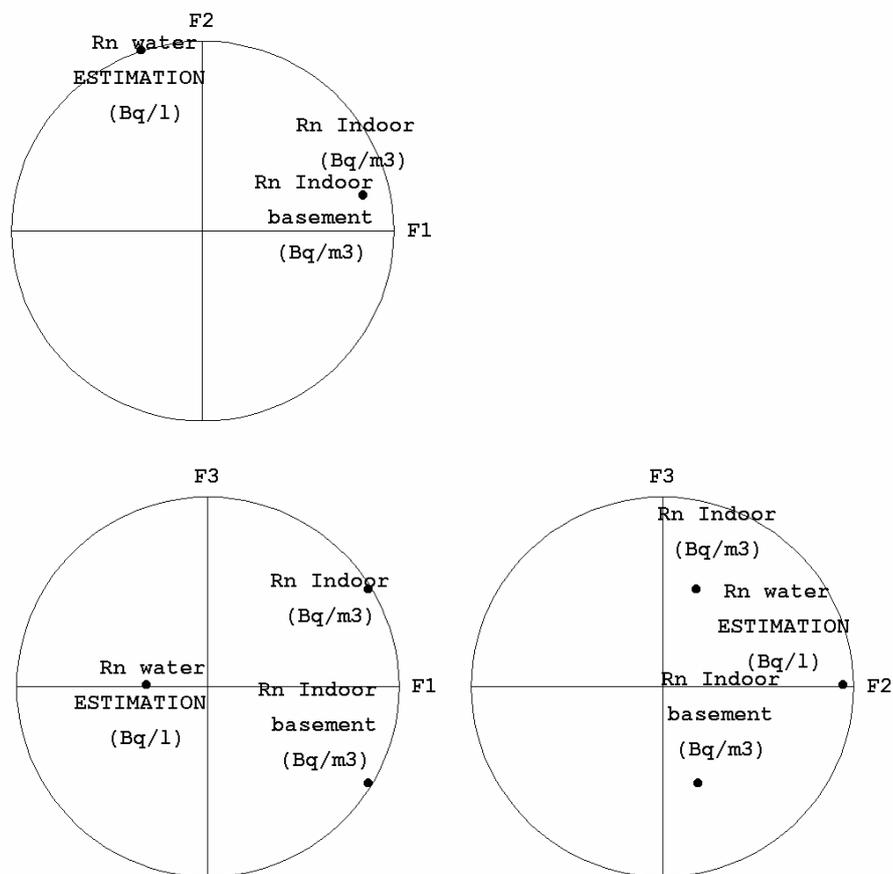
Figura 7. 35 – Nuvola di correlazione fra i valori stimati di radon “indoor” e radon in falda. Il diverso colore, corrispondente a sub-popolazioni, serve a rendere più immediatamente leggibile il grafico.



A questo punto è stata eseguita una analisi delle componenti principali; sono stati considerati due set di dati di analisi “indoor”, quelle al piano terra e quelle nel seminterrato, e tutti quelli riferiti alla falda.

La proiezione delle variabili sui primi tre assi fattoriali (figura 7.36) conferma la totale assenza di correlazione fra i valori di concentrazione dei due set di radon indoor, indipendentemente dal piano, e di radon in falda.

Figura 7. 36 – Analisi in componenti principali delle variabili stimate di radon indoor (seminterrato e piano terra) ed in falda: proiezione delle variabili sugli assi dei primi tre fattori.



Infatti, il fattore F1 spiega il radon indoor e F2 il radon in falda, mentre il fattore F3 discrimina fra i due set di dati indoor.

Si può concludere sulla sostanziale indipendenza della distribuzione spaziale del radon indoor ed in falda.

7.5 Conclusioni

Le conclusioni sulla distribuzione spaziale del radon indoor, tratte dai risultati del presente rapporto, possono essere così riassunte:

- esiste un gradiente verticale negativo con la quota, che supporta la tesi dell'esalazione del gas dai terreni;
- esiste una correlazione spaziale netta a grande scala (50 Km) ed una a piccola scala (8 Km) su tutto il territorio;
- esiste una parte importante di variabilità (> 30%) che non è regionalizzata, che deriva da tutte le altre cause che hanno effetto sul valore indoor misurabile;
- la zona appenninica ha maggiori concentrazioni e maggiore dispersione di valori rispetto alla pianura;
- i litotipi influenzano valori e variabilità del radon; quelli più permeabili, come sabbie e ghiaie, presentano più bassi valori, ma ben correlati spazialmente solo nel caso delle ghiaie;
- la distribuzione dei valori di radon mediamente non è correlata ai seguenti macro fattori: il limite pianura/appennino, la dorsale ferrarese, i punti di emissione naturale di idrocarburi;

- la cartografia ottenibile mette in evidenza tre aree disgiunte con valori medi di radon indoor maggiori di 70 Bq/m³, tutte lungo il versante appenninico;
- valori anomali delle singole misure risultano correlate a fattori specifici locali e, quindi, circoscritti nello spazio.

Relativamente alla distribuzione spaziale del radon in falda, i risultati del presente rapporto evidenziano quanto segue, limitatamente alla area di pianura della regione:

- la popolazione dei dati può essere riferita a due diverse sub-popolazioni corrispondenti al NO - centro e SE della regione;
- sono presenti due strutture di variabilità spaziali, una a piccola (20 km) e a grande scala (150 km);
- esiste una anisotropia accentuata della variabilità spaziale nel NO della regione, sia in termini di deriva, sia di variogramma;
- la concentrazione in radon è indipendente dalla profondità e dalla quota del pozzo da cui sono stati prelevati i campioni;
- una piccola distanza dai punti emissioni gassose è una condizione necessaria, ma non sufficiente per incontrare valori elevati di radon in falda; mediamente la correlazione è nulla;
- la ricostruzione cartografica dei valori stimati è molto migliore rispetto a quella del radon indoor;
- la concentrazione più alta a NO della regione si attenua nettamente procedendo verso ESE;

Infine, il raffronto fra le distribuzioni spaziali del radon “indoor” ed in pozzo mostra una totale assenza di correlazione. La variabilità dei due tipi di radon è spazialmente strutturata, ma piuttosto limitatamente in quelli indoor, mentre è elevata in quelli in pozzo.

Tali conclusioni supportano l’ipotesi di origini diverse per radon indoor ed in falda, ma soprattutto di meccanismi di diffusione e trasporto assolutamente differenziati.

Bibliografia

- (1) Chiles J-P., Delfiner P. (1999) *Geostatistics, modeling spatial uncertainty*, John Wiley & sons, inc.
- (2) Ricciardi O. (2003) “*Contributo della Geostatistica alla caratterizzazione spaziale della presenza di Radon sul territorio della Regione Emilia-Romagna*”, Tesi di Laurea in Ingegneria per l’Ambiente ed il Territorio, DICMA, Univ. Bologna
- (3) Sgallari S., de Fouquet Ch., Bruno R., Angelini P. (2006) “*Radon indoor, in rocks and in ground water: data integration for mapping in Emilia-Romagna*”, IAMG conference, Liege, Belgium
- (4) Gritti F. (2004) “*Identificazione delle zone a rischio Radon in falda mediante analisi multivariata delle informazioni dirette ed indirette*” Tesi di Laurea in Ingegneria per l’Ambiente ed il Territorio, DICMA, Univ. Bologna
- (5) Martinelli G., Ferrari G. (1991) “*Earthquake forerunners in a selected area of Northern Italy: recent developments in automatic geochemical monitoring*” *Tectonophysics*, 193, 397-410
- (6) Scicli A. (1972) - Mappa manifestazioni di gas naturale – in “*L’attività estrattiva e le risorse minerarie della regione Emilia-Romagna*”

CONCLUSIONI

Il gruppo di lavoro - finalizzato ad individuare le zone del territorio regionale ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di Radon (art. 10-sexies del D. Lgs. 230/95 e succ. mod. e int.) - ha considerato i dati, sia già pubblicati che inediti, relativi alle attività di radon e suoi progenitori misurate in varie matrici in Emilia-Romagna negli ultimi trenta anni. Nel lavoro di revisione sono stati considerati dati relativi alle attività di radon misurate in edifici, in acque sotterranee e in gas naturali. Sono stati inoltre considerati dati relativi alla attività del Ra226 in rocce campionate nel territorio regionale, rappresentative delle situazioni geologiche prevalenti in Emilia-Romagna.

L'analisi dei dati risultanti dalle indagini sul radon nelle scuole e nelle abitazioni, condotte tra il 1989 e il 1993, ha indicato che l'Emilia-Romagna è caratterizzata da livelli relativamente bassi di radioattività naturale, nella maggior parte dei casi inferiori a 400 Bq/m³, livello d'azione adottato nella Raccomandazione 90/143/EURATOM. Tale analisi ha però permesso di identificare valori "anomali" (concentrazioni superiori a 200 Bq/m³).

Le ubicazioni di tutti gli edifici oggetto della indagine sono state georeferenziate e cartografate. Un'accurata indagine statistica ha permesso di escludere che le rocce e le acque presenti nel territorio dell'Emilia-Romagna possano essere responsabili delle anomalie riscontrate.

Non sono state, inoltre, riscontrate relazioni significative tra i valori misurati indoor e l'attività di Ra226 riscontrata nelle rocce della zona. L'analisi del Ra226 in campioni di rocce ha permesso di stabilire che l'attività di questo radionuclide è molto bassa nelle zone campionate ed indipendente dalla litologia. Ciò è in accordo con quanto noto sul comportamento geochimico del Ra226.

Lo studio geostatistico ha consentito di stimare e cartografare un "potenziale" della distribuzione del radon indoor sul territorio. Inoltre ha consentito di quantificare preliminarmente il livello di affidabilità funzionale a qualunque decisione basata su dei valori stimati; tale incertezza è inevitabile e deriva in parte dalla notevole variabilità spatio-temporale dei dati misurati, ma soprattutto dalla aleatorietà intrinseca a qualunque stima. Ciò conferma la assoluta opportunità, in termini normativi ed operativi, di affrontare la caratterizzazione radon sul territorio esclusivamente in termini probabilistici. Un incremento della campionatura può ridurre l'aleatorietà della conoscenza della distribuzione del radon sul territorio, ma non può eliminarla. L'incremento della densità di campionatura va progettata, quindi, commisurandola al rischio di superamento delle soglie di concentrazione stabilite.

Per spiegare i processi generativi delle anomalie di radon "indoor", sono stati esaminati dati di attività in radon misurata in acque sotterranee della regione. I dati considerati sono relativi ad acque di pozzi della rete di monitoraggio ex IDROSER (ora ARPA) e ad acque di sorgente ubicate nella dorsale appenninica. I valori di radon misurati nelle acque sono relativamente bassi e in accordo con la situazione geologica e litologica. La mappatura dei dati radon relativi alle acque sotterranee della pianura ha permesso di evidenziare alcune aree caratterizzate da valori di massimo relativo. Le aree caratterizzate da valori relativamente più alti sono localizzate nella pianura parmense-piacentina e nelle aree di conoide fluviale.

I valori relativamente bassi di attività radon riscontrati in acque di pozzo in vaste aree di pianura risultano in accordo con la situazione geolitologica e con le basse velocità di circolazione delle acque sotterranee. Le acque di sorgente della dorsale appenninica sono risultate caratterizzate da valori in radon maggiori rispetto alle acque di pianura. La situazione geolitologica tuttavia non è in grado di generare valori particolarmente elevati in radon. La velocità di circolazione delle acque sotterranee che emergono nelle sorgenti appenniniche è comunemente ritenuta responsabile di alcuni valori relativamente alti riscontrati.

Al fine di permettere una migliore comprensione dei fenomeni osservati sono stati considerati valori di radon misurato in gas naturale (principalmente metano) campionato in emissioni naturali della dorsale appenninica e in alcuni pozzi ubicati nella alta pianura e nella catena appenninica. I valori misurati sono caratterizzati da una forte variabilità spaziale e temporale.

Le anomalie riscontrate in alcuni edifici oggetto di indagine sul radon indoor potrebbero trovare giustificazione nella continua attività degassante che interessa alcune zone del territorio regionale (Tav. 4). La mappatura dei fenomeni di degassamento e il loro monitoraggio nel tempo possono contribuire a incrementare in modo significativo lo stato delle conoscenze sulla situazione geologica e ambientale dell'Emilia-Romagna e permettere l'identificazione di aree ad alto potenziale di rischio radon.

Ipotesi di approfondimento a livello regionale

Lo studio illustrato in questo testo ha evidenziato che possono essere individuati alcuni spunti di ricerca per approfondire lo stato delle conoscenze sul problema "radon", sia per restituire una cartografia del "potenziale radon" con metodi di carattere geologico, sia per identificare eventuali "hot spot" a maggiore concentrazione di radon, nei quali realizzare anche misure di radon indoor.

Questo approfondimento richiede ulteriori misure di radon nelle varie matrici già indagate.

Lo stato delle conoscenze permette di indicare che una scala di rappresentazione 1:250.000 sia adatta per le finalità di programmazione territoriale connesse al radon, suddividendo il territorio regionale (22125 km²) in maglie, di adeguate dimensioni, all'interno delle quali effettuare misure di radon nei gas del suolo, uranio e radio nelle rocce e nei suoli.

Lo studio geologico ha mostrato una relativa uniformità litologica delle unità geologiche affioranti in Emilia-Romagna. Per le aree di pianura, maglie di 30-40 km² possono essere ritenute sufficienti per le finalità oggetto della prospezione; maglie di 10-30 km² possono descrivere in maniera sufficientemente esaustiva le aree di collina e montagna: occorre infatti tenere presente che molti corpi geologici hanno dimensioni spesso minori di 20 km².

Non appare necessario effettuare contemporaneamente misurazioni di uranio e radio nelle rocce e nei suoli in tutti i siti in cui viene misurato il radon: gli elaborati verificati indicano, infatti, che possono essere indicativamente considerati sufficienti misurazioni di uranio e radio effettuate nel 10-30% dei siti di misura radon.

Questa prima valutazione indica quindi in circa 700 punti sperimentali la densità statistica sufficiente per una descrizione della concentrazione del radon nei suoli secondo gli standard descritti alla scala 1:250.000 e in circa 100-200 punti sperimentali la densità statistica di campionamento per i radionuclidi radon-generatori nelle rocce e nei suoli.

Occorre precisare che questa ipotesi di densità statistica viene considerata sufficiente in un'ottica complessiva che tiene conto anche delle risorse necessarie: aumentando la densità statistica di campionamento la precisione media migliora ma aumentano anche i costi.

La complessa situazione tettonica dell'Emilia-Romagna è caratterizzata da strutture geologiche che determinano variazioni significative della permeabilità superficiale, parametro già descritto in elaborati precedenti prodotti dalla Regione Emilia-Romagna e da altri Enti (es. Carta Pedologica, P.T.A.).

Lo studio geostatistico ha mostrato che esistono diverse scale di variabilità spaziale (50 km, 8 km, 0 km); l'analisi sulle origini e la diffusione del radon è quindi complessa, comunque non univoca. Dato che l'attività degassante del metano da emissioni naturali potrebbe essere alla base delle "anomalie" radon osservate in edifici dell'Emilia-Romagna, sarebbe opportuno procedere ad aggiornare, georeferenziare e cartografare le emissioni dei gas naturali in grado di funzionare da carrier di radon nel territorio regionale. Tale attività può essere svolta tramite l'impiego di

opportuni rivelatori di gas da utilizzare nelle aree indiziate; alcune decine di misurazioni per ogni area indiziata possono essere ritenute sufficienti per una descrizione esaustiva del fenomeno oggetto di indagine.

Allo scopo di meglio descrivere il processo di generazione delle anomalie di radon, si ritiene opportuno procedere ad analisi dei radionuclidi progenitori del radon in campioni rappresentativi delle rocce che costituiscono i serbatoi di gas naturale.

A completamento degli studi, vengono suggeriti interessanti argomenti di approfondimento:

- misure di radon indoor in un campione di abitazioni scelte all'interno del territorio dove già si effettuano le misurazioni in continuo delle attività degassanti, allo scopo di valutare le possibili sinergie del parametro "emissioni gassose" con il livello del radon indoor;
- radon nelle acque; le sorgenti d'acqua principali (portata > 5 l/sec.) dovrebbero essere soggette a misurazioni con cadenza mensile o stagionale;
- campagne di misurazione in continuo del gas radon e di flusso del gas totale in aree ritenute geologicamente significative, per quantificare la variabilità nel tempo della attività del radon in rapporto ai principali parametri meteorologici e alle possibili variazioni di pressione dei serbatoi dovute a cause artificiali o naturali.

Il gruppo di lavoro, infine, valuta importante un ripensamento delle varie normative in campo ambientale, alla luce della possibilità di definirne gli eventuali valori limite in chiave probabilistica, cioè in funzione della percentuale di rischio accettata come ammissibile.

Pubblicazioni a cura della Regione Emilia-Romagna nel settore
della prevenzione nei luoghi di vita e di lavoro

Collana "CONTRIBUTI" - I volumi disponibili sono contrassegnati con (*)

Fondata da Alessandro Martignani

1. *I nuovi insediamenti produttivi. Prevenzione e controllo nella progettazione e ristrutturazione degli ambienti di lavoro*, Parma, 1982.
2. *La prevenzione dei danni da rumore. Indicazioni metodologiche ed organizzative*, Reggio Emilia, 1983.
3. *Il sistema informativo regionale per la prevenzione dei danni da lavoro. Orientamenti per la formazione e l'aggiornamento degli operatori*, Ravenna, 1983.
4. *La prevenzione nel settore delle calzature*, Lugo, 1983.
5. *Le lavorazioni ceramiche di decoro a mano e terzo fuoco. Indagine conoscitiva nelle province di Modena e Reggio Emilia*, Vignola, 1983.
6. *La prevenzione nel settore delle calzature. II*, Lugo, 1984.
7. *Indagini sanitarie per la prevenzione nei luoghi di lavoro. Una proposta operativa*, Bologna, 1984.
8. *Tossicologia industriale. Indicazioni metodologiche ed organizzative per i Servizi di prevenzione*, Montecchio Emilia, 1984.
9. *Presidi multizonali di prevenzione. Orientamenti per l'organizzazione dei Settori impiantistico e fisico-ambientale*, Modena, 1985.
10. *I rischi professionali in agricoltura. Contributi per l'attuazione di un "piano mirato" di prevenzione*, San Giorgio di Piano, 1985.
11. *I rischi da lavoro in gravidanza*, Scandiano, 1985.
12. *Esposizione professionale a Stirene. Esperienze di prevenzione e ricerche in Emilia-Romagna*, Correggio, 1985.
13. *Radiazioni non ionizzanti. Rischi da radiofrequenze e microonde*, Rimini, 1985.
14. *Comparto ospedaliero: Prevenzione dei rischi elettrici e da anestetici nelle sale operatorie*, Ferrara, 1985.
15. *Rischi da radiazioni ionizzanti. L'esposizione del paziente in radiodiagnostica*, Piacenza, 1986.
16. *Prevenzione degli infortuni in ceramica*, Scandiano, 1986.
17. *La soglia uditiva di soggetti non esposti a rumore professionale*, Imola, 1987.
18. *Il lavoro, la sua organizzazione, la sua qualità oggi*, Lugo (RA), 1987.
19. *Le attività sanitarie nei Servizi medicina preventiva igiene del lavoro*, Ferrara, 1987.
20. *Il monitoraggio biologico nei Presidi multizonali di prevenzione*, Bologna, 1988.
21. *Introduzione all'analisi organizzativa dei Servizi di prevenzione*, Bologna, 1989.
22. *Educazione sanitaria: esperienze - metodologia - organizzazione in Emilia-Romagna*, Modena, 1989.
23. *Produzione, lavoro, ambiente. Seminario nazionale SNOP, Parma giugno 1989*, Langhirano, 1990.
24. *Promozione della qualità dei dati nel monitoraggio biologico*, Bologna, 1990.
25. *Impieghi medici delle radiazioni non ionizzanti*, Modena, 1990.
26. *I Servizi di Igiene pubblica. Da un corso di formazione per i nuovi operatori*, Forlì, 1991.

27. *Il comparto delle resine poliestere rinforzate con fibre di vetro. Manuale di prevenzione*, Correggio, 1992.
28. *Infortuni in edilizia. Immagini di danno e di prevenzione*, Bologna, 1992.
29. *Dalle soluzioni verso le soluzioni*, Modena, 1992.
30. *Monitoraggio aerobiologico in Emilia-Romagna*, Ferrara, 1993.
31. *Salute e sicurezza nella scuola*, San Lazzaro di Savena (BO), 1993.
32. *L'educazione alla salute nelle USL. Problemi e prospettive*, San Lazzaro di Savena (BO), 1993.
33. *Il dipartimento di prevenzione*, San Lazzaro di Savena (BO), 1993.
34. *Valori di riferimento per il calcolo della soglia uditiva attesa di maschi e femmine per anno di età*, Carpi (MO), 1993.
35. *Metodi di valutazione del rischio chimico. Il piano dipartimentale galvaniche a Bologna*, Bologna, 1993.
36. *Salute e ambiente*, San Lazzaro di Savena (BO), 1993.
37. *Dalle soluzioni verso le soluzioni 2*, Bologna, 1994.
38. *Obiettivo qualità in sanità pubblica. Una esperienza regionale*, Fidenza, 1994.
39. *La prevenzione AIDS in ambito scolastico nella regione Emilia-Romagna*, Rimini, 1994.
40. *Il Dipartimento di Prevenzione. Ipotesi e proposte operative*, Ravenna, 1994.
41. *La formazione degli alimentaristi. Progettazione interventi educativi*, Parma, 1995.
42. *I tumori in Emilia-Romagna*, Modena, 1997.
43. *I tumori in Emilia-Romagna - 2*, Ferrara, 2002
44. *Piano regionale della prevenzione dell'Emilia-Romagna– Intesa Stato-Regioni e Province Autonome - 23 marzo 2005*, Bologna 2006
45. *PASSI – Progressi delle aziende Sanitarie per la Salute in Italia – Emilia-Romagna, Indagine 2005*, Bologna 2006
46. *I tumori in Emilia-Romagna - 3*, Ferrara 2006
47. *Valutazione dell'efficacia della formazione alla sicurezza nei lavoratori della Variante Autostradale di Valico (VAV)*. Bologna 2006
48. *I programmi di screening oncologici – Emilia-Romagna. Report al 2005*, Ravenna 2006
49. *Sorveglianza nutrizionale – Determinanti e indicatori di rischio obesità nella popolazione infantile*, Bologna 2006
50. *Verso una strategia di lotta integrata alla Zanzara Tigre – Atti del convegno*, Bologna 2007