



Ricerca di Sistema elettrico

# Indagini radioecologiche relative alla localizzazione in sicurezza del deposito nazionale – PAR 2016

B. Ferrucci, A. Rizzo, C. Telloli

## INDAGINI RADIOECOLOGICHE RELATIVE ALLA LOCALIZZAZIONE IN SICUREZZA DEL DEPOSITO NAZIONALE

B. Ferrucci, A. Rizzo, C. Telloli (ENEA)

Settembre 2017

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione

Obiettivo: Progettazione di sistema e analisi di sicurezza

Responsabile del Progetto: Federico Rocchi, ENEA

**Titolo**

**Caratterizzazione geologica del sito per la localizzazione del deposito nazionale dei rifiuti radioattivi: individuazione delle faglie attive**

**Ente emittente**
**Descrittori**

Tipologia del documento:

Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione

Argomenti trattati: Ciclo del Combustibile


**Sommario**

Il presente rapporto è stato redatto nell'ambito dell'accordo di programma ENEA-MSE. L'ambito di studio riguarda le problematiche inerenti l'individuazione e la caratterizzazione del sito destinato ad ospitare il deposito nazionale per lo smaltimento delle scorie radioattive di bassa e media attività. Ai fini dell'attuazione del processo di localizzazione del sito, nell'ambito della Guida Tecnica 29, sono stati definiti i "Criteri di Esclusione" (CE), formulati in base alle raccomandazioni degli organismi internazionali e in particolare della IAEA. Tra i criteri di esclusione, il grado di sismicità ammesso associato al sito e l'esclusione delle zone interessate da fenomeni di fagliazione rappresentano quelli più critici. Infatti la GT29 esclude le aree a sismicità elevata, contrassegnate da un valore previsto di picco di accelerazione (PGA) al substrato rigido, per un tempo di ritorno di 2475 anni, pari o superiore a 0,25 g e prevede che siano escluse le zone interessate da fenomeni di fagliazione. In considerazione di quest'ultimo criterio, la localizzazione del sito, dovrà essere supportata da indagini mirate a verificare l'esistenza di fenomeni di fagliazione non segnalati nei cataloghi attuali, e di sintomi di attività di eventuali faglie nelle aree limitrofe. Lo studio preliminare effettuato con il presente lavoro mira a esaminare il metodo della valutazione delle emanazioni gassose dal sottosuolo per la verifica dell'attività delle faglie. Viene fatta una ricerca bibliografica sulla base della quale si vuole stabilire un percorso per arrivare ad un monitoraggio dell'area di riferimento basato su questa metodologia.

**Note**


**Autori: B. Ferrucci, A. Rizzo, C. Telloli**

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE		NOME	B. Ferrucci	P. Bartolomei	F. Rocchi
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	15/11/2017	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP1 – 097	0	L	2	15

## Sommario

<b>Sommario .....</b>	<b>2</b>
<b>Premessa.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Ricerca bibliografica scientifica e individuazione dei casi di studio più aderenti all’argomento della ricerca .....</b>	<b>5</b>
1.1. Analisi del contesto geologico / idrogeologico / geomorfologico.....	5
1.2. Strumentazione in situ e analisi di laboratorio .....	10
1.3. Metodi e tecniche di acquisizione.....	10
1.4. Metodi e tecniche di elaborazione dati .....	11
<b>2. Definizione degli approcci sperimentali.....</b>	<b>12</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>14</b>

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP1 – 097	0	L	3	15

## Premessa


Per la gestione in sicurezza dei rifiuti radioattivi è necessario innanzitutto individuare il sito nel quale localizzare l'impianto di smaltimento. ISPRA, nell'ambito delle sue funzioni di autorità di regolamentazione competente per la sicurezza nucleare e la radioprotezione, ha predisposto la Guida Tecnica n. 29, "Criteri per la localizzazione di un impianto di smaltimento superficiale di rifiuti radioattivi a bassa e media attività". I criteri riportati nella Guida Tecnica n. 29 sono stati definiti per la loro applicazione nel processo stabilito, dal Titolo III del D.lgs. n. 31/2010 e successive modifiche, per la localizzazione del Deposito nazionale incluso in un Parco Tecnologico. Essi rappresentano un insieme di requisiti fondamentali e di elementi di valutazione che devono essere tenuti in conto da parte della S.O.G.I.N. S.p.A., quale soggetto attuatore, nel processo di localizzazione del Deposito nazionale, dalla definizione della proposta di Carta nazionale delle aree potenzialmente idonee sino alla individuazione del sito idoneo (ISPRA, 2014).

Ai fini dell'attuazione del processo di localizzazione del sito, nell'ambito della Guida Tecnica 29, sono stati definiti i "Criteri di Esclusione" (CE), che sono stati formulati in base alle raccomandazioni degli organismi internazionali e in particolare della IAEA. I criteri di esclusione rappresentano un insieme di requisiti fondamentali che devono caratterizzare il sito e sono stati definiti per escludere quelle aree del territorio nazionale che non permettono di garantire i necessari margini di sicurezza per il confinamento e l'isolamento dei rifiuti dal contatto con la biosfera.

Tra i criteri di esclusione, attualmente quello più stringente è rappresentato dal grado di sismicità ammesso, associato al sito. Infatti la guida cita testualmente che: "Sono da escludere le aree a sismicità elevata, cioè quelle aree contrassegnate da un valore previsto di picco di accelerazione PGA) al substrato rigido, per un tempo di ritorno di 2475 anni, pari o superiore a 0,25 g, secondo le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni, in quanto in tali aree le successive analisi sismiche di sito potrebbero evidenziare condizioni in grado di compromettere la sicurezza del deposito nelle fasi di caricamento e, dopo la chiusura, per tutto il periodo di controllo istituzionale", (criterio di esclusione n°2) (ISPRA, 2014). Allo stesso tempo la guida prevede che siano escluse le zone interessate da fenomeni di fagliazione, facendo riferimento ai lineamenti tettonici evidenziati nel catalogo ITHACA (ITaly HAZard from CAPable faults) e nel database DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) (criterio di esclusione n°3).

Questi criteri sono molto conservativi se confrontati con i livelli di riferimento adottati all'estero per la localizzazione di impianti nucleari di potenza, che ammettono una PGA massima di 0.3 g. Tuttavia, la conservatività della GT29 può essere giustificata dall'intensificarsi del numero di fenomeni sismici che hanno interessato varie zone del nostro Paese.


In considerazione del criterio di esclusione n°3, una volta localizzato il sito, sarà necessaria sia la verifica dell'esistenza di fenomeni di fagliazione non segnalati nei

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP1 – 097	0	L	4	15

cataloghi attuali, sia la verifica di sintomi di attività di eventuali faglie nelle aree limitrofe.

Lo studio preliminare effettuato con il presente lavoro mira a esaminare il metodo della valutazione delle emanazioni gassose dal sottosuolo per la verifica dell'attività delle faglie.

Viene fatta una ricerca bibliografica sulla base della quale si vuole stabilire un percorso per arrivare ad un monitoraggio dell'area di riferimento basato su questa metodologia.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP1 – 097	0	L	5	15

# 1. Ricerca bibliografica scientifica e individuazione dei casi di studio più aderenti all'argomento della ricerca

Gli studi sistematici sulle emanazioni di gas dal sottosuolo (radon, anidride carbonica, elio) sono relativamente recenti e applicati in diversi ambiti: dallo studio di fenomeni naturali, alla caratterizzazione delle faglie, allo studio dei precursori sismici, fino alla valutazione delle perdite dei depositi geologici per lo stoccaggio della CO<sub>2</sub> (CCS) e di rifiuti radioattivi.

La maggior parte degli lavori scientifici si basa sulla caratterizzazione delle variazioni di emissioni di radon e CO<sub>2</sub> dal suolo come indicatore di zone fratturate per identificare la presenza di faglie attive e non. Altri invece, cercano di trovare possibili connessioni con terremoti e/o eruzioni vulcaniche, studiando a ritroso se durante tali eventi le emissioni di radon da suoli o pozzi (radon in acqua) hanno subito innalzamenti di concentrazione. Altri ancora, misurano le emissioni di radon semplicemente per identificare la geometria della faglia attiva dell'area monitorata.

Dalla ricerca bibliografica, si evince che la durata delle analisi in situ è molto variabile. Generalmente vengono effettuate campagne di misura che possono durare da un paio di giorni ad una settimana, mentre per campagne intensive, in cui si ha disponibilità di zone sicure dove poter mantenere la strumentazione fissa per periodi di tempi molto lunghi (ad esempio centri di ricerca o università), si arriva anche ad alcuni anni (D.Ghosh, 2007; Y. Yasuoka, 2006).

Le analisi in situ di breve durata (da un giorno ad un paio di mesi massimo) vengono preferibilmente effettuate nei periodi estivi, per evitare repentini cambiamenti delle condizioni climatiche, oppure nelle due stagioni opposte (estate e inverno, o estate e autunno). In quest'ultimo modo è possibile valutare i dati di concentrazione di radon ottenuto anche in base alle condizioni climatiche presenti durante il campionamento (temperatura, umidità relativa, e soprattutto eventi piovosi).

## 1.1. Analisi del contesto geologico / idrogeologico / geomorfologico

È noto che l'emissione di radon è influenzata dalla geologia (Gundersen, 1988; (R.R. Shuman, 1988; M.A.Oliver, 2001) e che l'esalazione di radon di una certa area è il risultato della combinazione delle proprietà delle rocce e dei suoli. Il contenuto di uranio e radio presente in quest'ultimi è il principale responsabile della presenza del radon, essendo quest'ultimo un prodotto del loro decadimento radioattivo.

Le diverse modalità di formazione delle rocce e dei suoli producono concentrazioni variabili di questi elementi.

Le rocce che affiorano sulla superficie terrestre sono raggruppate in tre principali tipologie: sedimentarie, metamorfiche e magmatiche.

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

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

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

La quantità di radon non è però sempre direttamente legata alla quantità di uranio, in quanto il radio da cui discende direttamente ha un diverso comportamento geochimico, in particolare appartenendo al gruppo degli elementi alcalino-terrosi si concentra nei solfati (soprattutto nella barite) e nelle rocce sedimentarie come le argille.

I diversi processi di formazione del suolo, che non è altro che il prodotto del disfacimento del bedrock (basamento roccioso) sottostante, comportano concentrazioni di uranio nel suolo generalmente diverse da quelle della crosta terrestre. In particolare per processi di "chemical weathering", l'uranio può essere rilasciato o rimosso per percolamento (movimento dell'acqua che cola attraverso il suolo) o per un flusso d'acqua, per poi eventualmente riprecipitare in ambiente riducente, ad esempio nei suoli con orizzonti moderatamente ricchi in calcio.

L'uranio nel bedrock si trova spesso sotto forma di piccoli grani di minerale uranifero, ad esempio coffenite  $[U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}]$  e uraninite ( $U_3O_8$ ), oppure assorbito nei grani stessi o racchiuso in minerali quali zirconi ( $ZrSiO_4$ ), apatite ( $Ca_5(F,Cl)(PO_4)_3$ ), titanite ( $CaTiSiO_5$ ) e altri minerali accessori. I grani di minerali uraniferi sono rilasciati durante l'erosione ed il trasporto; i minerali leggeri vengono convertiti in particelle argillose e accompagnano l'acqua che scorre, mentre i grani più duri e pesanti, come

zircono, monazite e titanite sedimentano con la frazione sabbiosa. In Tabella 1 sono riportate le concentrazioni tipiche di  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{222}\text{Rn}$  nei suoli alla profondità di un metro, tenendo presente che 12.3 Bq/Kg di  $^{226}\text{Ra}$  sono equivalenti a 1 ppm di uranio.

<b>Tipo di suolo</b>	<b><math>^{226}\text{Ra}</math> (Bq/Kg)</b>	<b><math>^{222}\text{Rn}</math> (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
Suoli con contenuto normale di radio	15 – 65	5000 – 30000
Suoli con frammenti di granito	130 – 125	10000 – 60000
Suoli con frammenti di granito ricco in uranio	125 – 360	10000 – 200000
Ghiaia	30 – 75	10000 – 150000
Sabbia	5 – 35	2000 – 20000
Limo	10 – 50	5000 – 60000
Argilla	10 – 100	10000 – 100000
Suolo contenente frammenti di alum shale	175 – 2500	50000 - > 10 <sup>6</sup>

**Tabella 1: Concentrazioni medie di  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{222}\text{Rn}$  nei suoli ad un metro di profondità**

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

L'emanazione (cioè la capacità di "uscire fuori" dalla roccia) e la migrazione del radon verso la superficie sono fortemente dipendenti dalle dimensioni dei granuli per le rocce sedimentarie (Tabella 2), e dal grado di fratturazione, per le rocce "litoidi" (magmatiche e/o metamorfiche).

<b>Tipo di suolo</b>	<b>Dimensioni del grano</b>
Ghiaia	2000 – 60000 $\mu\text{m}$
Sabbia	60 – 2000 $\mu\text{m}$
Limo	2 – 60 $\mu\text{m}$
Argilla	0.6 – 2 $\mu\text{m}$
Argilla fine	< 0.6 $\mu\text{m}$ (spesso < 0.06 $\mu\text{m}$ )

**Tabella 2: Dimensioni medie dei grani del suolo**

Si definisce *coefficiente di emanazione* il rapporto tra il numero di atomi di radon che fuoriescono da un solido ed il numero di atomi di radon formati nel solido stesso. I valori tipici di questo coefficiente sono compresi tra circa 0.02 e 0.7, secondo la struttura del materiale e il contenuto d'acqua. Una correlazione tra la quantità di  $^{222}\text{Rn}$  e quelle di  $^{238}\text{U}$  e  $^{226}\text{Ra}$  ha validità certa solo per livelli di concentrazione estremi di questi ultimi, cioè molto alta o molto bassa. Per valori intermedi la concentrazione di radon è dominata da altri fattori responsabili dei processi di trasporto; in particolare il radon arriva più o meno facilmente in superficie, secondo:

- porosità,
- permeabilità,
- grado di fratturazione del terreno.

Le formazioni del substrato roccioso, inoltre, possono rallentare o impedire la risalita del gas radon (confinamento litostatico). Il trasporto di radon nel suolo avviene principalmente per diffusione (Legge di Fick), legata alla permeabilità che dipende dalla distribuzione delle dimensioni dei grani, dal grado di compattamento e dal contenuto d'acqua (Nielson, 1991).

In Tabella 3 sono riportati i coefficienti di diffusione del radon in diversi tipi di suolo. Si può notare che il radon diffonde molto bene attraverso terreni composti da ghiaia grossolana, come in aria, mentre la diffusione è molto bassa attraverso argilla satura d'acqua; inoltre se i pori sono completamente saturi d'acqua, il suolo ha lo stesso coefficiente di diffusione dell'acqua.

<b>Mezzo</b>	<b>Coefficiente di diffusione D (m<sup>2</sup>/s)</b>
Aria	$10^{-5}$
Ciottoli – ghiaia grossolana	$10^{-5} - 5 \cdot 10^{-6}$
Sabbia asciutta	$10^{-5}$
Sabbia umida	$2,5 \cdot 10^{-6}$
Detrito	$5 \cdot 10^{-7} - 2,5 \cdot 10^{-7}$
Detrito argilloso	$8 \cdot 10^{-8}$
Acqua	$10^{-9}$

**Tabella 3: Coefficienti di diffusione D del radon (UNSCEAR, 1982).**

Un elevato grado di fratturazione, aumenterà il potere di emanazione dalla roccia e la velocità di migrazione attraverso la stessa. Per questo motivo le zone di faglia e/o le aree idrotermali costituiscono vie preferenziali di migrazione del radon, a causa della elevata permeabilità indotta dallo stato di fratturazione e della presenza di gas endogeni (nella realtà italiana, principalmente CO<sub>2</sub>) o acque di origine profonda che

risalgono velocemente in superficie e che agiscono come trasportatori (carrier) del radon.

Un ruolo fondamentale svolge la permeabilità della porzione più superficiale del suolo (Wiegand, 2000), ed il contenuto di acqua (H.U. Johner, 2001) che incide sia sulla variabile temporale che spaziale, in funzione della geologia e morfologia dell'area.

Il rilascio dei gas in atmosfera dipende, inoltre, da vari fattori tra cui l'umidità del terreno e le condizioni meteorologiche (temperatura, pressione, presenza di vento); in particolare differenze di pressione dovute a cause meteorologiche possono creare risalite di radon per convezione (Legge di Darcy), secondo il fenomeno definito in letteratura come "barometric pumping". Principalmente il radon entra in atmosfera attraversando l'interfaccia suolo-aria con una certa velocità, detta velocità di esalazione ( $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$ ). Il coefficiente di diffusione  $D$  in aria è pari a  $0.1\ cm^2\ s^{-1}$  (10000 volte più grande rispetto a quello in acqua); di conseguenza la distanza di diffusione  $\sqrt{Dt}$  (dove  $\tau$  è la vita media del radon) è 2.2 m (Tabella 4).


<b>Mezzo</b>	<b>Distanza di diffusione media <math>^{222}Rn</math> (cm)</b>	<b>Costante di diffusione <math>^{222}Rn</math> (<math>cm^2\ s^{-1}</math>)</b>
Aria	220	$10^{-1}$
Suolo poroso	155	$5 \cdot 10^{-2}$
Acqua	2,2	$10^{-5}$
Suolo poroso saturo	1,55	$5 \cdot 10^{-6}$

**Tabella 4: Distanza di diffusione del  $^{222}Rn$  in diversi mezzi (Tanner, 1964)**

Pertanto la concentrazione di radon nel suolo è molto variabile, a causa della grande varietà dei parametri che possono determinarla.

Per tutti questi motivi è fondamentale avere una più che dettagliata conoscenza geologica dell'area di campionamento, sia dal punto di vista litologico (tipi di rocce presenti), ma anche tettonico e geomorfologico.

Oltre al tipo di roccia, vanno considerati anche i parametri meteo-climatici stagionali e giornalieri che, influenzando pressione atmosferica, temperatura e umidità, vincolano a loro volta la diffusione del radon dal suolo verso la superficie. Per tale ragione sarebbe auspicabile programmare campionamenti in diverse stagionalità, almeno una in inverno ed una in estate, per poter valutare l'emissione di radon in diverse condizioni meteo-climatiche (principalmente alta e bassa temperatura). Il campionamento ideale sarebbe quello di poter contare su misure in continuo per un periodo di almeno un anno.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP1 – 097	0	L	10	15

## 1.2. Strumentazione in situ e analisi di laboratorio

Le misure delle emissioni di radon e CO<sub>2</sub> possono essere effettuate in diversi tipi di suoli e rocce, da marne, argille, sabbie o suoli vulcanici a rocce quarzifere, granitiche o basaltiche, con il semplice utilizzo di sonde (ad esempio sonde Barasol o Pylon) ad una profondità variabile da un minimo di 50 cm ad un massimo di 2 metri. Indipendentemente dalla tipologia del suolo, la maggior parte delle misure viene effettuata ad una profondità di 80 cm/1 m. Alcuni studi hanno esaminato diversi orizzonti pedologici facendo campionamenti a diverse profondità nello stesso foro nel terreno per una stessa campagna, in modo da valutare anche l'andamento del radon nel sottosuolo a seconda dei diversi orizzonti pedologici attraversati (Cordoves, 2003) (V.Walia, 2005) (Içhedef, 2013)

Gli strumenti impiegati per tali campagne di monitoraggio sono principalmente radiometri:

- detector attivi: RDA-200 (EDA), scintillometro portatile SPP2, RAD7 (Durrige), HDC-B, camera di ionizzazione e monitor portatili, quali AlphaGUARD PQ 2000 PRO Rn monitor, Pylon AB-5, RTM-2110 (SARAD), TS96-1, LUK-3R;
- con sonde di vario tipo (Barosol MC-450, Pylon 154 o 110, Clipperton II, SRDN-3) e detector passivi, quali detector superficiali CR-39, LR-115 (sia in suolo che in pozzi).


La Braque et al. (2003), hanno campionato una certa quantità di suolo (~ 2 Kg) in contenitori di plastica sterili ed analizzato il radon in laboratorio in spettroscopia  $\gamma$ .

Altri si sono, invece, focalizzati nello studio del radon nelle acque, soprattutto in pozzi ((T. Kuo, 2006); (Yalim, 2012); (Içhedef M, 2014); (M.Tarakçi, 2014); (Tsunomori F, 2017), laghi artificiali (M. Trique, 1999) e nelle acque termali e/o vulcaniche (B.Zmazek, 2001); (OktayBaykara, 2006); (C.Papastefanou, 2010)). Alcuni di essi hanno comparato misure nei pozzi e nei suoli circostanti, per cercare possibili correlazioni fra emissioni di radon dal suolo e quello misurato nelle acque.

Anche in tali casi, gli strumenti utilizzati sono stati radiometri specifici a seconda delle diverse esigenze del progetto: AlphaGUARD PQ 2000 PRO Rn monitor, Alphameter 611, sonda barosol Mc-450, Pylon Ab-5 monitor, RTM 168, oppure prelevati campioni di acqua in vial (da 40 mL a 0.8 L a seconda dei casi studio – ((T. Kuo, 2006); (Pereira AJ, 2010); (Yalim, 2012)), messe in apposite sacche frigo, ed analizzata successivamente in laboratorio in Liquid Scintillation Counting (LSC).

## 1.3. Metodi e tecniche di acquisizione

L'area di monitoraggio varia a seconda del tipo di campionamento scelto. Se si vogliono caratterizzare le faglie attive di un'area, le strumentazioni verranno posizionate lungo la faglia attiva, seguendone l'andamento e creando diversi transetti

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP1 – 097	0	L	11	15

(traverse perpendicolari alla faglia), da 2 a 5 transetti per faglia, addirittura alcuni lavori arrivano anche a 20 transetti (V.Walia, 2005) distanti dalla faglia da 200 m (Li.Font, 2008) a 5 km. Ioannides et al. (2003) hanno effettuato più campionamenti su un unico transetto a diverse distanze dalla faglia.


Oltre a monitoraggi con strumentazioni “mobili”, se se ne ha la possibilità, si può installare una stazione fissa ad una certa distanza dall’area monitorata, per confrontare i dati ottenuti (Salazar et al., 2002; Yang et al., 2005).

Raramente si sceglie di campionare seguendo una disposizione degli strumenti a maglia regolare. I pochi studi che hanno utilizzato questa metodologia di monitoraggio hanno eseguito campionamenti in un’area a maglia regolare di 2500 km<sup>2</sup> (Xin Wang, 2014), 200 km<sup>2</sup> (Lombardi, 1995) oppure (Ching-Chou Fu, 2008) campiono in una maglia regolare di 1.2 x 2.3 km<sup>2</sup> facendo analisi ogni 200/300 m o addirittura Ichedef et al. (2013) e Neri et al. (2011) riducono l’area ad una maglia di 40 e 20 km<sup>2</sup> rispettivamente.

## 1.4. Metodi e tecniche di elaborazione dati

A seconda dello scopo dello studio, i dati vengono rappresentati o sotto forma di distribuzione spaziale o temporale o entrambi, e se analizzati con altri gas correlazioni tra le diverse emanazioni gassose (ad esempio Lombardi, 1995 “Rn e CO<sub>2</sub>”; V.Walia, 2005 “Rn ed He”).

Alcuni propongono modelli che creano mappe di concentrazione del radon ((Lombardi, 1995), (Jean-Claude Baubron, 2002); (K.Ioannidesa, 2003); (Ching-Chou Fu, 2008); (A.González-Díez, 2009); (Pereira AJ, 2010); (Neri M, 2011); (Moreno V, 2016); (Tsunomori F, 2017); (Mojzeš A, 2017); (Darren Huxtable, 2017); (Pereira AJ, 2010); (Jilani Z, 2017)), modelli del sottosuolo ((S.Giammanco, 2009); (K. Koike, 2009)), modelli di previsione “regression model” (B.Zmazek, 2002) o “model trees” (B. Zmazek, 2005) e simulazioni (Matt D.Rowberry, 2016).

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP1 – 097	0	L	12	15

## 2. Definizione degli approcci sperimentali

In base alla bibliografia, l'uso del radon come indizio di attività tettonica o di variazioni nel campo di stress tettonico appare più attendibile in aree con forte e persistente attività tettonica. Anche l'uso della distribuzione del campo di emissioni dei gas per stabilire la geometria delle faglie appare limitata alle zone con faglie attive e/o di sismicità forte o elevata. È molto meno noto l'andamento delle emissioni in zone con faglie "silenti" (a causa dei lunghi tempi di ritorno dei terremoti) o inattive. Inoltre, la variazione delle emissioni di radon dovuta allo stress tettonico non è univoco: a volte le emissioni aumentano, a volte diminuiscono. Ciò avviene perché le emissioni dei gas dal suolo possono essere influenzate, oltre che da fattori meteorologici, anche da stress tettonico in aree lontane dai siti di misura anche centinaia di chilometri.


L'interpretazione delle emissioni misurate appare poi molto più soggettiva in presenza di falde acquifere e con misure eseguite nell'acqua di pozzi.

Sempre secondo bibliografia, le misure di radon che forniscono i risultati meno soggettivi da interpretare sono svolte in aree vulcaniche o peri-vulcaniche e in aree nelle quali il basamento è costituito da rocce intrusive (ad esempio, graniti, ecc.). Ne consegue che se i siti scelti non saranno in vicinanza di faglie attive o zone sismiche o in aree vulcaniche, le misure di emissioni di radon saranno ancora più difficilmente interpretabili, poiché si ha a che fare con fluttuazioni di entità molto più ridotta.

Le misure delle emissioni di radon sono, quindi, utili per l'identificazione di faglie attive, ma hanno dei limiti e non possono essere accettate acriticamente. I risultati, devono essere, infatti, confrontati e integrati con gli studi di sismicità e neotettonica dell'area monitorata.

In ogni caso, la scelta della strategia di monitoraggio va effettuata sulla base della dettagliata conoscenza geologica e tettonica dell'area da indagare, e, se si eseguono misure in acque di falda è indispensabile anche la conoscenza idrogeologica di dettaglio sia sulla presenza di falde d'acqua temporanee (che imbevono i suoli in periodi di precipitazioni) che sulle falde superficiali e profonde. In assenza di studi geologici e idrogeologici di dettaglio, l'interpretazione dei dati sull'emissione di radon sarà estremamente soggettiva.

Per ottenere valutazioni attendibili sull'entità delle emissioni di radon e CO<sub>2</sub>, viste le notevoli variazioni dei valori misurati dovute a fattori stagionali e ad eventuali stress tettonici, è necessario un rilevamento in continuo per un periodo non inferiore ad un anno, per avere continuità di misure in diverse stagioni e soprattutto in diverse condizioni atmosferiche, ed in varie stazioni di misura in modo da poter confrontare i dati ottenuti. Campionamenti in continuo permetteranno di avere una variabilità a breve termine (alcune ore), per poter identificare l'andamento giornaliero delle emissioni ed evidenziare flussi crescenti e decrescenti. Inoltre sarà possibile ricostruire la variabilità giornaliera, settimanale, mensile, anche in funzione di eventi piovosi, tenendo conto dell'intensità e della distribuzione della pluviometria.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP1 – 097	0	L	13	15


Sempre seguendo le criticità riscontrate nei lavori scientifici citati in precedenza, si evince che è indispensabile che le misure dei gas siano accompagnate da registrazioni continue di pressione atmosferica, temperatura e umidità.

Sulla base della ricerca bibliografica scientifica, il sito del Centro di ricerca ENEA del Brasimone (Figura 1) potrebbe essere idoneo per il monitoraggio dei gas radon e CO<sub>2</sub> in suoli, pozzi e sorgenti. Il Centro del Brasimone si trova, infatti, in una zona sismica in vicinanza di faglie attive, all'interno del quale operano infrastrutture impiantistiche e laboratori che potrebbero supportare l'attività di monitoraggio, sia dal punto della sicurezza strumentale che della presenza dell'operatore.

Inoltre, la caratterizzazione geologica, geomorfologica e idrogeologica dell'area del Brasimone è stata ampiamente ed approfonditamente studiata in passato. Ciò potrebbe facilitare la scelta dell'ubicazione della strumentazione per poter sviluppare una rete di monitoraggio continua, tale da discriminare i parametri di misura nelle diverse stagioni dell'anno.




**Figura 1: Centro Ricerche Brasimone ENEA , Località Brasimone - Camugnano (BO) .**

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP1 – 097	0	L	14	15

## Bibliografia

- A.González-Díez, J. J.-A.-D. (2009). Identification of latent faults using a radon test. *Geomorphology*, 11-19.
- B. Zmazek, M. L. (2005). Radon in soil gas: How to identify anomalies caused by earthquakes. *Applied Geochemistry*, 1106-1119.
- B.Zmazek, F. M. (2002). Geochemical monitoring of thermal waters in Slovenia: relationships to seismic activity. *Applied Radiation and Isotopes*, 919-930.
- C.Papastefanou. (2010). Variation of radon flux along active fault zones in association with earthquake occurrence. *Radiation Measurements*, 943-951.
- Ching-Chou Fu, T. F.-G.-K.-H. (2008). Variations of helium and radon concentrations in soil gases from an active fault zone in southern Taiwan. *Radiation Measurements*, S348-S352.
- Cordoves, J. J. (2003). Application of the relative uranium-series disequilibrium in soil to locate and/or confirm precisely active fault traces: A new technique. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 43-48.
- D.Ghosh, A. R. (2007). Pronounced soil-radon anomaly—Precursor of recent earthquakes in India. *Radiation Measurements*.
- Darren Huxtable, D. R. (2017). Measuring radon-222 in soil gas with high spatial and temporal resolution. *Journal of Environmental Radioactivity*, 167: 36-42.
- Gundersen, L. R. (1988). Correlation between geology, radon in soil gas, and indoor radon in the Reading Prong in Marikos M., Proceedings of GEORAD, Geology in Causes of Radionuclide Anomalies, Rolla, MO: Missouri Dept. of Natural Resources. Division of Geology and Land Survey.
- H.U. Johner, H. S. (2001). *Soil gas measurements below foundation depth improve indoor radon prediction*.
- Içhedef M, S. M. (2014). Two year evolution of radon emission and tectonic movements in Tuzla Fault, Seferihisar-İzmir.
- Içhedef, S. M. (2013). Soil gas radon concentrations measurements in terms of great soil groups.
- ISPRA. (2014). *Guida tecnica N.29 - criteri per la localizzazione di un impianto di smaltimento superficiale di rifiuti radioattivi a bassa e media attività*.
- Jean-Claude Baubron, A. R.-P. (2002). Soil gas profiles as a tool to characterise active tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrenees, France). *Earth and Planetary Science Letters*, 69-81.
- Jilani Z, M. T. (2017). Monitoring and descriptive analysis of radon in relation to seismic activity of Northern Pakistan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 172: 43-51.
- K. Koike, T. Y. (2009). Radon concentrations in soil gas, considering radioactive equilibrium conditions with application to estimating fault-zone geometry. *Environmental Geology*, 1533–1549.
- K.Ioannides, C. K. (2003). Soil gas radon: a tool for exploring active fault zones. *Applied Radiation and Isotopes*, 205-213.
- LI.Font, C. V. (2008). Soil radon levels across the Amer fault. *Radiation Measurements*, S319-S323.
- Lombardi, G. E. (1995). Evidence for radon transport by carrier gas through faulted clays in Italy. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 291-300.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP1 – 097	0	L	15	15

- M. Trique, P. R. (1999). Radon emanation and electric potential variations associated with transient deformation near reservoir lakes. *Nature*, 137-141.
- M.A.Oliver, A. K. (2001). *A geostatistical investigation of the spatial variation of radon in soil*.
- M.Tarakçı, C. M. (2014). Investigation of the relationships between seismic activities and radon level in Western Turkey. *Applied Radiation and Isotopes*, 12-17.
- Matt D.Rowberry, X. M. (2016). Calculating flux to predict future cave radon concentrations. *Journal of Environmental Radioactivity*, 16-26.
- Mojzeš A, M. F. (2017). Radon measurements in an area of tectonic zone: A case study in Central Slovakia. *Journal of Environmental Radioactivity*, , 166: 278-288.
- Moreno V, B. J. (2016). Soil radon dynamics in the Amer fault zone: An example of very high seasonal variations. *Journal Environmental Radioactivity*.
- Neri M, G. S. (2011). Spatial distribution of soil radon as a tool to recognize active faulting on an active volcano: the example of Mt. Etna (Italy). *J Environ Radioact*.
- Nielson, R. &. (1991). Multiphase radon generation and transport in porous materials. *Health Phys*.
- OktayBaykara, M. (2006). Measurements of radon and uranium concentration in water and soil samples from East Anatolian Active Fault Systems (Turkey). *Radiation Measurements*, 362-367.
- Pereira AJ, G. M. (2010). On the influence of faulting on small-scale soil-gas radon variability: a case study in the Iberian Uranium Province. *J Environ Radioact*.
- R.R. Shuman, D. O. (1988). *Relationships between geology, equivalent uranium concentration, and radon in soil gas, Fairfax County, Virginia - Open-File Report 88-18*.
- S.Giammanco, G. G. (2009). Comparison between different methodologies for detecting radon in soil along an active fault: The case of the Pernicana fault system, Mt. Etna (Italy). *Applied Radiation and Isotopes*, 178-185.
- T. Kuo, K. f. (2006). Anomalous decrease in groundwater radon before the Taiwan M6.8 Chengkung earthquake. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101-106.
- Tsunomori F, S. T. (2017). Radon concentration distributions in shallow and deep groundwater around the Tachikawa fault zone.
- V.Walia, T. C. (2005). Spatial variations of radon and helium concentrations in soil-gas across the Shan-Chiao fault, Northern Taiwan. *Radiation Measurements*, 513-516.
- Wiegand, J. (2000). A guideline for the evaluation of the soil radon potential based on geogenic and anthropogenic parameters. *Environmental Geology*, 949-963.
- Xin Wang, Y. L. (2014). Correlations between radon in soil gas and the activity of seismogenic faults in the Tangshan area, North China. *Radiation Measurements*, 8-14.
- Y. Yasuoka, G. I. (2006). Evidence of precursor phenomena in the Kobe earthquake obtained from atmospheric radon concentration. . *Applied Geochemistry*, 21: 1064-1072.
- Yalim, A. (2012). Determination of the relationship between radon anomalies and earthquakes in well waters on the Aksehir-Simav Fault System in Afyonkarahisar province, Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity*, 7-12.