

LA CLASSIFICAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ RADON NELLA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE FINALIZZATA ALLA GESTIONE DEL RISCHIO

CLASSIFICATION OF RADON HAZARD IN URBAN PLANNING FOCUSED TO RISK MANAGEMENT

MAURO CASTELLUCCIO^(*), GIANLUIGI GIANNELLA^(**), CARLO LUCCHETTI^(*),
MASSIMO MORONI^(***) & PAOLA TUCCIMEI^(*)

^(*)Università degli Studi "Roma Tre", Dipartimento di Scienze Geologiche - L.go San Leonardo Murialdo, 1 - 00146 Roma, Italy - tuccimei@uniroma3.it

^(**)Geologist - Via Carlo Fadda, 6 - 00173 Roma, Italy - g.giannella@libero.it

^(***)GEOEX s.a.s. Professional Company - Corso Matteotti, 44 - 00041 Albano Laziale, Italy - info@Radon.it

RIASSUNTO

Questo contributo tratta della valutazione della pericolosità radon nella pianificazione territoriale. Sulla base delle esperienze maturate in Europa e negli Stati Uniti, si propone di associare le misure di concentrazione del radon nel suolo, effettuate alla profondità minima di 80 cm, con la determinazione della permeabilità ai gas del terreno, per il calcolo degli indici RP e RI. Il valore di questi parametri consente la classificazione della pericolosità in un sito dove è previsto un futuro sviluppo edilizio e la predisposizione preventiva d'accorgimenti tecnici per controllare i successivi livelli di radon *indoor*. L'applicazione di questo metodo a due siti-pilota (la Valle della Caffarella e il Parco della Resistenza) ubicati in Italia centrale e caratterizzati da diversi assetti geologici, dimostra che l'introduzione del parametro permeabilità aiuta a descrivere meglio il livello di pericolosità, riducendo la variabilità stagionale che interessa le misure. A scopo precauzionale, si suggerisce di moltiplicare per 2 gli indici RP ottenuti per le misure estive (svolte nei mesi di luglio e agosto) e per 1.5 quelli di giugno e settembre, così da evitare di sottostimare le concentrazioni di radon nel suolo e gli indici radon relativi a questi periodi, rispetto alle condizioni medie annue o ai massimi invernali.

TERMINI CHIAVE: radon indoor, pericolosità radon, rischio radon, radon nel suolo, permeabilità intrinseca, pianificazione territoriale

RASSEGNA DEGLI APPROCCI ESISTENTI PER LA VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ RADON

La Pianificazione Territoriale è un processo tecnico-amministrativo che riguarda la gestione degli ambienti naturali, oltre alla programmazione di uno sviluppo organizzato e sicuro degli insediamenti urbani e delle comunità. Comprende attività di ricerca e analisi, approcci strategici mirati, progettazione urbana, confronti pubblici, regolamenti e linee guida, ma anche la gestione del rischio. La valutazione del rischio, attraverso la conoscenza degli elementi di pericolo esistenti nell'area in esame, consente la predisposizione di strumenti urbanistici idonei ad assicurare la tutela della salute pubblica e dell'incolumità delle persone e dei beni presenti. Quest'impostazione, che vale per il rischio idrogeologico, sismico, vulcanico, industriale ecc., è applicata meno frequentemente ad un altro rischio naturale causato

ABSTRACT

This work deals with the evaluation of radon hazard in urban planning. According to the experiences developed in Europe and in the United States, we propose to associate the measurement of soil radon concentration at the minimum depth of 80 cm with the determination of soil gas permeability in order to calculate RP and RI radon indices. The values of these indices allow classifying the radon hazard of a future building site and planning technical actions to reduce and control indoor radon levels. The application of this procedure to two test-sites (Valle della Caffarella and Parco della Resistenza) located in central Italy and characterised by different geological setting and bedrock, demonstrate that the introduction of the intrinsic permeability helps to better describe the hazard level, reducing the seasonal variability that affects measurements. With a precautionary spirit, we suggest that a correction coefficient should be employed to summer measurements in order to minimise the underestimation of soil radon and radon indices that is commonly observed in dry and warm periods. July and August RP indices should be multiplied by 2, whereas June and September values times 1.5. No corrections are needed for winter determinations when highest values are reached.

KEY WORDS: indoor radon, radon hazard, radon risk, soil radon, intrinsic permeability, urban planning

REVIEW OF EXISTING METHODS FOR THE EVALUATION OF RADON HAZARD

Urban planning is a technical and administrative process concerned with the management of natural environments and to the design of an organized and safe development of settlements and communities. It concerns itself with research and analysis, strategic thinking, urban design, public consultation and policy recommendations, but also with risk management. The risk assessment of a given area, allows the preparation of proper instruments to ensure adequate protection of public health and the safety of people. This approach, which applies to the hydrological, seismic, volcanic and industrial risks, is less frequently applied to another natural hazard, which is caused by the accumulation of the radioactive radon gas and its decay products in indoor environments. Epidemiological studies indicate the strong

dall'accumulo negli ambienti confinati del gas Radon e dei suoi prodotti di decadimento. Statistiche di tipo epidemiologico indicano il forte impatto che il Radon ha sulla salute pubblica, stimandolo come seconda causa di tumore al polmone dopo il fumo (WHO, 2009).

Per valutare il potenziale accumulo di questo gas negli ambienti confinati sono stati proposti numerosi approcci. Le aree dove quest'accumulo può verificarsi (*radon-prone areas*) possono essere identificate direttamente attraverso misure delle concentrazioni *indoor* nelle costruzioni esistenti, oppure indirettamente utilizzando le concentrazioni di radon nel terreno (*soil radon*), ammettendo che esista una correlazione provata (detta anche funzione di trasferimento) con le concentrazioni negli ambienti confinati.

Gli Stati Uniti hanno realizzato la mappatura del radon in conformità ad una combinazione di misure *indoor*, osservazioni geologiche, rilievo aereo della radioattività, permeabilità del suolo e tipo di fondazioni (USEPA, 1993). In Germania, la cartografia si basa sulle misure del radon nel suolo. In Austria, la classificazione parte dalle concentrazioni medie di radon riferite ad aree definite (FRIEDMANN, 2005). Un altro approccio è invece seguito nella Repubblica Ceca (NEZNAL *et alii*, 2004) e prevede il controllo dei singoli siti di costruzione, prima che si realizzi l'edificazione, al fine di stabilire un indice radon specifico per quel sito. Altri Paesi, come la Finlandia, l'Irlanda, la Norvegia, la Svezia, la Svizzera e il Regno Unito, prediligono invece l'adozione di pratiche costruttive specifiche sulle fondazioni dei nuovi edifici (WHO, 2007). In Italia, alcune amministrazioni locali hanno introdotto all'interno degli strumenti urbanistici istruzioni mirate circa l'adozione di pratiche costruttive semplici ed economiche per ridurre le concentrazioni di radon nel sottosuolo prima dell'edificazione o altre misure *ad hoc* nei casi di ristrutturazione "pesanti". In alcune aree caratterizzate da forti flussi di gas endogeni, il controllo del *soil radon* è una misura obbligatoria; si veda il caso dei comuni di Marino, Ciampino ed alcuni municipi della città di Roma.

Infine, l'Unione Europea ha finanziato di recente un progetto per la realizzazione della Cartografia Europea del potenziale radon d'origine geogenica (presente, in altre parole, nel suolo), da affiancare alla Mappa Europea del Radon *Indoor* (<https://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb>). Il gruppo di lavoro sta attualmente prendendo in considerazione l'applicabilità di un approccio basato sulla concentrazione d'equilibrio del ^{222}Rn nel suolo e sulla permeabilità intrinseca del terreno e, come seconda opzione, lo schema di classificazione del potenziale radon utilizzato negli Stati Uniti (USEPA, 1993).

Sinora in Italia, il problema dell'inquinamento *indoor* da radon è stato prevalentemente appannaggio di due figure professionali: il medico per l'aspetto sanitario ed il fisico per le misure. Questo stato di cose, escludendo di tenere in considerazione anche gli aspetti connessi alle cause geologiche del fenomeno, sta indirizzando le necessarie azioni di difesa verso soluzioni che risentono fortemente di un approccio al problema limitato e parziale (MORONI, 2002).

Questo lavoro presenta un protocollo originale per la valutazione e la classificazione della pericolosità radon, basato su un approccio ge-

impact of radon on public health, esteeming it as second cause of lung cancer in the general population, after smoking (WHO, 2009).

A number of approaches is used worldwide to assess the potential for elevated indoor radon concentrations across geographic areas of various size. Radon-prone areas can be identified directly by using indoor measurements or indirectly using radon concentration in the soil, provided there is an established correlation (transfer function) with the radon concentrations in homes. The United States of America developed its radon map based on a combination of indoor measurements, geological characteristics, aerial radioactivity, soil permeability and foundation type (USEPA, 1993). In Germany, the map is based on radon concentrations in soil gas. In Austria, the classification is based upon the mean radon concentration within a given area (FRIEDMANN, 2005). Another approach used in some countries, such as the Czech Republic (NEZNAL *et alii*, 2004), involves testing individual building sites prior to construction to establish a radon index for the site. The index is then used to define the degree of radon protection needed for building on that location. However, in countries including Finland, Ireland, Norway, Sweden, Switzerland, the United Kingdom, and the United States of America, the most cost-effective approach appears to be the use of radon control options in all new homes (WHO, 2007). In Italy, some local administrations have introduced in urban planning specific instructions aimed at adopting simple and cheap building practices to reduce soil radon concentration before construction or large restoring. The control of radon activity concentration in the subsoil is mandatory in some districts of Roma and other nearby towns, such as Marino and Ciampino, affected by a strong release of endogenous gases.

Finally, the Joint Research Centre of the European Commission (JRS) is developing the European Geogenic Radon Map within the long-term project of a European Atlas of Natural Radiation (<https://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb>). The working group is now evaluating the "transfer function" approach (based on equilibrium concentration of ^{222}Rn in soil air and soil effective permeability). As alternative option, the US classification scheme (USEPA, 1993) is under consideration.

In Italy local administrations are recommended to introduce in building regulations specific instructions to adopt simple and cheap building rules aimed at reducing radon concentration in the subsoil before construction begins. Similar recommendation should also apply in case of building restoration. So far, the problem of indoor pollution from radon in Italy has been mainly privilege of two professionals: the physician for health issues and the physicist for the measurements. This situation, that has lead to ignore issues related to the geological causes of the phenomenon, is directing the necessary defensive actions to solutions that are strongly influenced by this biased approach to the problem (MORONI, 2002).

This paper reports an innovative protocol for the evaluation and the classification of indoor radon hazard based on a geological approach (KEMSKI *et alii*, 2001). This method, developed from the pio-

ologico (KEMSKI *et alii*, 2001). Il metodo, sviluppato da una procedura pionieristica introdotta nella Repubblica Ceca (NEZNAL *et alii*, 2004) e riproposta in Italia in una precedente nota (CASTELLUCCIO *et alii*, 2011), è stato ulteriormente perfezionato e aggiornato, a seguito di campagne di monitoraggio recenti, come quelle svolte nei “siti di controllo” della Valle della Caffarella (Roma) e del Parco della Resistenza (Civitavecchia), i cui risultati sono riassunti nei paragrafi successivi.

LA GEOLOGIA DEL RADON: DALLE ROCCE AL RISCHIO

Il Radon è un gas nobile, radioattivo e radiogenico, presente nell’ambiente naturale (rocce, sedimenti, suoli, acqua, atmosfera). Esistono tre isotopi principali del Radon, il ^{222}Rn (detto semplicemente Radon), il ^{220}Rn (conosciuto anche come Toron) e il ^{219}Rn (detto Actinon), appartenenti, rispettivamente, alle famiglie radioattive aventi come capostipiti ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U (BOURDON *et alii*, 2003). Il ^{222}Rn (di seguito indicato semplicemente come Radon) è l’isotopo caratterizzato dal tempo di dimezzamento più lungo (3.82 giorni) ed è quindi quello con una maggiore abbondanza e permanenza nell’ambiente. Gli altri due hanno tempi di dimezzamento molto inferiori (dell’ordine di poche decine di secondi) e contribuiscono limitatamente alla concentrazione totale di questo gas in ambiente *indoor*. Le principali sorgenti del Radon *indoor* sono, nell’ordine: il sottosuolo, i materiali da costruzione e l’acqua utilizzata a fini domestici. Il substrato geologico gioca però il ruolo principale nei processi di potenziale apporto del Radon negli edifici. La natura delle rocce, la loro composizione mineralogica, la concentrazione degli elementi precursori (Uranio, Torio e Radio), la porosità, la permeabilità, il contenuto d’acqua, la presenza di fratture e faglie, la presenza di cavità, sono gli elementi che più condizionano la concentrazione del Radon nel sottosuolo e il suo trasporto attraverso le fondazioni. Non tutto il Radon prodotto in un suolo o in una roccia per decadimento del radio è disponibile per il passaggio nell’aria, ma soltanto una parte di esso si libera nei pori (processo d’emanazione), può migrare nel terreno e quindi concentrarsi negli ambienti confinati. La presenza d’acqua nei pori influenza fortemente il movimento del Radon nel suolo, ma il parametro che meglio regola il trasporto e l’esalazione è la permeabilità. Com’è noto, quest’ultima può essere distinta in permeabilità primaria, dovuta alle caratteristiche intrinseche di vacuolarità dei terreni (dipendenti dalla densità, dalla porosità interconnessa e dalla granulometria) oppure secondaria (legata alla presenza di fratture e discontinuità strutturali). La carsificazione di una roccia può, inoltre, aumentare la permeabilità generale dell’ammasso roccioso e influenzare l’accumulo e la migrazione del Radon nel sottosuolo. In presenza di fratture, faglie e discontinuità, il flusso di Radon non ha soltanto una componente diffusiva (legata al gradiente di concentrazione del gas in un breve intorno del punto di misura), ma si esplica soprattutto attraverso un trasporto di tipo advettivo (dovuto ai gradienti della pressione dei fluidi nei pori: H_2O , CO_2 , CH_4 , RICHON *et alii*, 2011); in quest’ultimo caso, il Radon, proveniente da aree più profonde, risale con maggiore velocità verso la superficie insieme con altri fluidi, che agiscono da carrier e cioè da convogli gassosi trasportatori.

neering procedure proposed in the Check Republic (NEZNAL *et alii*, 2004) and presented in Italy in a previous document (CASTELLUCCIO *et alii*, 2011), has been fatherly developed and updated as a result of recent field surveys carried out in Valle della Caffarella (Roma) and Parco della Resistenza (Civitavecchia) test sites, both located in Latium Region (central Italy), whose major findings are summarised in next sections.

THE GEOLOGY OF RADON: FROM ROCK TO RISK

Radon is a noble gas, radioactive and radiogenic, occurring in natural environments (rocks, sediments, soils, water and atmosphere). Three isotopes deserve our attention, ^{222}Rn (simply known as Radon), ^{220}Rn (also indicated as Thoron) and ^{219}Rn (the Actinon), belonging respectively to the radioactive series of ^{238}U , ^{232}Th and ^{235}U (BOURDON *et alii*, 2003). ^{222}Rn (hereafter named just Radon) is the isotope with the longer half-life (3.82 days) and thus the most abundant and long lasting. The other two isotopes are characterised by much shorter half-lives (in the order of few tenths of seconds) and scarcely contribute to the total concentration of this gas in the indoor environment.

Main sources of indoor radon are in order of importance: the subsoil, building materials and water used for domestic supply. Rocks type, their mineralogical composition, precursor elements concentration (uranium, thorium and radium), porosity, permeability, water content, faults and fractures occurrence, underground cavities are the factors that predominantly influence soil radon concentration and transport and its delivery through foundations to indoor spaces.

Radon that is produced in a soil or rock by decay of ^{226}Ra is not completely available to the transport into the air, but only a fraction of it is released into the pore spaces (emanation process), migrates through the terrain and then concentrates in confined environments. Water contained in a soil strongly influence radon transfer, but the parameter that better controls the transport and the exhalation is the permeability. As well known, rocks are characterised by a primary permeability due to their porosity, density and grain size and a secondary permeability dependent on fractures and structural unconformities. Karst phenomena can increase the general permeability of rocks and affect the accumulation and the migration of radon. In presence of faults, fractures and unconformities, radon flux is not only due to diffusion (triggered by radon concentration gradients in the close proximity of the measuring station), but also and mainly by advection (a process related to fluids pressure gradients, see H_2O , CO_2 , CH_4 , RICHON *et alii*, 2011). In this case, deep-seated radon ascends at higher rates with carrier gases, such as CO_2 .

METODI DI MAPPATURA DELLA PERICOLOSITA'

La quasi totalità delle azioni di *screening* sulla radioattività ambientale in Italia è stata eseguita negli ambienti *indoor*. Va rilevato che tale metodologia, ampiamente e correttamente utilizzata per indagini epidemiologiche, risente di numerosi fattori quali, ad esempio, le abitudini di vita dei residenti, la tipologia costruttiva degli edifici (sia nelle strutture in elevazione, che in fondazione), la tenuta degli infissi, la presenza di condizionatori, il periodo d'esposizione (estate/inverno), l'orientamento dei vani, il clima ecc. Si può pertanto affermare che abitazioni costruite con materiali e tecniche diverse e abitate da famiglie con stili di vita diversi, possono presentare valori di radioattività *indoor* fortemente differenziati, anche se ubicate in una stessa area, con costante livello d'esalazione di Radon. Da ciò discende che, per la determinazione del livello di rischio di una specifica area geografica, uno *screening* fatto soltanto sulla base delle misure *indoor* senza alcun riferimento agli altri parametri, debba ritenersi puramente indicativo. Per la corretta definizione del livello di pericolosità presente in un'area è quindi necessario definire, in via preventiva, il livello di pericolosità basato sulla localizzazione delle zone nelle quali, per fattori naturali, sono particolarmente attivi o si concentrano i fenomeni d'esalazione della radioattività da Radon. La mappatura della pericolosità deve basarsi sull'analisi della geologia locale considerando, in particolare, la litologia, la permeabilità dei suoli, la presenza di discontinuità tettoniche (faglie e fratture locali e/o regionali) che possono convogliare notevoli quantità di gas da gran profondità, la presenza di fenomeni carsici, lo spessore e la natura dei terreni di copertura e del suolo. In funzione della scala di rilievo, l'obiettivo potrà essere raggiunto attraverso studi di primo e di secondo livello, finalizzati, rispettivamente, alla zonizzazione del territorio nell'ambito degli strumenti urbanistici comunali e alla definizione dei tassi d'esalazione del gas a scala locale nei piani urbanistici attuativi.

Nell'ambito degli studi di primo livello, in altre parole per la definizione delle aree a potenziale rischio Radon alla scala comunale o intercomunale, ad esempio per la redazione di un nuovo piano urbanistico, si adotterà una procedura volta alla definizione della pericolosità su base geologica. In questo caso, i test nel suolo saranno mirati esclusivamente alla validazione della procedura di classificazione e all'assegnazione di parametri quantitativi alle unità di roccia identificate nello studio. La base di partenza della caratterizzazione geologica in questo studio è la suddivisione secondo le "Unità di Rocca". Tale approccio, mutuato da uno studio avviato dall'ANPA oltre 10 anni fa e denominato PERS (Potenziale di Esalazione di Radon dal Suolo), può essere validamente utilizzato anche per la definizione delle *Radon Prone Areas* ad un livello di maggior dettaglio della scala nazionale (ANPA, 2000). L'Unità di Rocca è un corpo roccioso tridimensionale omogeneo, con una determinata estensione in superficie e in profondità. E' individuata essenzialmente in base alla litologia e alla geometria (superficie e spessore); spesso è delimitata da elementi tettonici importanti (faglie), ma è definita anche da altre caratteristiche petrografiche, strutturali e tessiturali dell'ammasso: contenuto d'elementi radioattivi (in particolare di ^{226}Ra), fratturazione, porosità, permeabilità e caratteristiche idrogeo-

METHODS OF HAZARD MAPPING

Most screening actions on environmental radioactivity developed in Italy takes place in indoor environment. It should be emphasized that these kind of measurements, widely and successfully performed worldwide for epidemiological investigations, are affected by several variables such as life style of residents, types of construction (building and its foundation), window frames sealing, presence of heating, ventilation and air conditioning, the exposure season (summer/winter), rooms orientation, local climate, etc. It can therefore be argued that buildings constructed with different materials and techniques, inhabited by families with different life styles, may be characterised by very different indoor radon levels even if located in the same area. It follows that a preliminary screening aimed at evaluating the general hazard of a given territory cannot be based only on indoor radon surveys, without considering the above-mentioned parameters. In order to correctly define the hazard, it is necessary to examine it in areas where strong degassing or large radon concentrations in soils (radon-prone areas) naturally occur. Radon hazard mapping must rely on the study of local geology and, in particular, on lithology, permeability, karst phenomena, infillings thickness and nature and finally tectonic unconformities occurrence that may favour the transfer of large amounts of deep-seated gases.

The classification of radon hazard should follow two different paths according to the scale of the survey: first and second level studies, respectively focused on general zoning of the territory in the frame of municipal master plans and evaluation of soil radon exhalation and concentration at local-scale executive urban planning.

In the first case, the classification is geologically-based and relies on a subdivision according to "Rock Units" to which specific rates are assigned following a procedure developed more than 10 years ago by ANPA (the former Italian Agency for Environmental Protection, 2000). This scoring approach, known as PERS (Soil Radon Exhalation Potential) was originally developed for studies at national scale, but could be successfully employed in more detailed investigations for the definition of radon-prone areas. The above-mentioned "Rock Unit" is a three-dimensional homogeneous rock body, identified on the basis of its lithology and geometry (areal extension and thickness). It is often bordered by tectonic features (faults), but is also described and rated according to petrographical, structural and textural characteristics: radioactive elements concentrations (see in particular ^{226}Ra), cracks distribution, porosity, permeability and hydrogeological setting. Specific scores are assigned to each indicator and processed to get the PERS value. A complementary monitoring and testing phase is scheduled to check radon concentration and exhalation characterising territories with given PERS. For further information on this radon hazard classification, the reader is referred to ANPA (2000).

**CLASSIFICATION OF RADON HAZARD
IN URBAN PLANNING FOCUSED TO RISK MANAGEMENT**

Tab. 1 - Misura della concentrazione di Soil Radon (RnS, kBq/m³)
- Soil radon concentration measurement (RnS, kBq/m³)

Measurement depth	≥ 80 cm
Measurement density under the building-covered area	<ul style="list-style-type: none"> - 25 x 25 meters regular grid - at least 3 spots in case of only one building - at least 2 spots for each building, in case of more than one building
Measurement density in the building site, where no edifice is planned	<ul style="list-style-type: none"> - 2 spots for area when it is ≤ 100 m² - 3 spots for area when: 100 < area < 10,000 m² - 4 spots / ha for area when its is ≥ 10,000 m²
Probe	Drill holes diameter must be as large as that of the probe, to prevent the entry of atmospheric air and underestimation of soil radon.
Measurement method	Alpha Spectrometry, Lucas cells, ionization chambers ecc.. Periodic validation through intercomparison exercises in a test-site is recommended.

Tab. 2 - Misura della permeabilità intrinseca del suolo (k, m²)
- Soil permeability measurement (k, m²)

Direct	High level of detail
Estimated	Lower level of detail
Measurements depth	≥ 80 cm
Measurements density	Measurements performed in the same spots of soil radon
Direct Method	Measuring the time required for aspiration of a known air volume, under the action of a known difference pressure

logiche. A ciascuno di questi parametri è assegnato un punteggio che è poi utilizzato per la determinazione del PERS. Per ulteriori informazioni su questo calcolo, si rimanda alla pubblicazione dell'ANPA (2000).

MAPPATURA DEL SOIL RADON E DELLA PERMEABILITÀ INTRINSECA: GLI INDICI PR E IR

Gli studi di secondo livello si rendono necessari per le trasformazioni urbanistiche nelle aree classificate a rischio potenziale dagli studi di primo livello. Cambia quindi la scala dello studio, ma anche le finalità per cui le indagini e la mappatura sono condotte (CASTELLUCCIO, 2010; CASTELLUCCIO *et alii*, 2010). Gli studi di secondo livello consentono di ricavare l'Indice Radon (IR), parametro che definisce il livello di rischio locale connesso alle emanazioni di Radon. Esso si ottiene da misure strumentali della concentrazione del Radon nel suolo e della permeabilità intrinseca del terreno, effettuate ad almeno 80 cm di profondità (Tab. 1).

Utilizzando il valore della permeabilità intrinseca (Tab. 2), si determina il potenziale Radon (PR) con la formula indicata nella Tab. 3.

La Tabella 3 indica la corrispondenza tra potenziale Radon (PR) e indice Radon (IR). Alternativamente la permeabilità intrinseca può

Direct measurement of permeability (k)	$RP = (Rn_s - 1) / (-\log k - 10)$
Correspondence between risk classes	$RP < 10 \rightarrow$ RI: low $10 \leq RP \leq 35 \rightarrow$ RI: medium $RP > 35 \rightarrow$ RI: high

Tab. 3 - Procedura per la determinazione degli indici RI e RP (after NEZNAL *et alii*, 2004)
- Radon index (RI) and radon potential (RP) calculation procedure (after NEZNAL *et alii*, 2004)

SOIL RADON AND INTRINSIC PERMEABILITY MAPPING: PR AND IR INDICES

Second level studies apply to urban planning in areas classified as potentially at risk according to first level investigations (CASTELLUCCIO, 2010; CASTELLUCCIO *et alii*, 2010). They allow estimating the radon index (IR), a parameter that defines the level of local risk linked to radon emission. It depends on soil radon concentration and intrinsic permeability, measured at a depth of 80 cm (Tab. 1).

Using the value of intrinsic permeability (Tab. 2), it is possible to calculate the radon potential (PR) according to the equation reported

RI	Soil Radon concentration (kBq/m ³)			Building protection (Jiránek, 2010)	Other infrastructure works
Low	²²² Rn < 30	²²² Rn < 20	²²² Rn < 10	None	No special precautions
Medium	30 ≤ ²²² Rn ≤ 100	20 ≤ ²²² Rn ≤ 70	10 ≤ ²²² Rn ≤ 30	Membrane impervious to Radon	Avoid sealing the soil around the building, preferring permeable covers
High	²²² Rn > 100	²²² Rn > 70	²²² Rn > 30	Membrane + depressurization or ventilation of the crawl space (*)	Ensure the presence of fan. No cover around the building.
	< 4 · 10 ⁻¹³	4 · 10 ⁻¹³ ≤ k ≤ 4 · 10 ⁻¹²	> 4 · 10 ⁻¹²	(*) In the case of high RI, annual monitoring of indoor radon concentration. is recommended.	
	Low	Medium	High		
	Permeability (k, m ²)				

Tab. 4 - Determinazione dell'indice RI in funzione del soil Radon e della permeabilità intrinseca (quando si dispone di un valore stimato e non di una misura diretta). Sono indicate anche le precauzioni per la protezione dell'edificio ed altre opere d'urbanizzazione
- *Determination of radon index (RI), as a function of soil radon concentration and intrinsic permeability (when only an estimated value is available). Building protection practices and other infrastructure works are also indicated*

essere stimata:

- nel caso di suolo o terreno incoerente, tramite curva granulometrica, considerando ad esempio la percentuale in peso della frazione fine, $f (< 0.063 \text{ mm})$, secondo il seguente schema di corrispondenza (BARNET *et alii*, 2008):
 - $f < 15\% \rightarrow$ permeabilità alta
 - $15\% \leq f \leq 65\% \rightarrow$ permeabilità media
 - $f > 65\% \rightarrow$ permeabilità bassa
- nel caso di substrato roccioso, tramite fonti bibliografiche che riportano gli intervalli di variazione della permeabilità intrinseca dei principali complessi rocciosi, in funzione delle caratteristiche litologiche e granulometriche e dello stato di fratturazione e/o carsificazione. In questo caso l'indice Radon (IR) è ricavato utilizzando la Tabella 4, attraverso la comparazione del valore della permeabilità intrinseca stimata (classe bassa, media o alta corrispondente) con il valore della misura di *Soil Radon*.

Le Tabelle 3 e 4 riassumono quindi la procedura proposta per la determinazione del potenziale Radon (PR) e dell'indice Radon (IR) di un lotto di terreno su cui è prevista l'edificazione, in funzione dei quali sono indicati gli accorgimenti tecnici da adottare a protezione dell'edificio (JIRANEK, 2010) ed altre opere d'urbanizzazione nelle aree limitrofe. Per comprendere meglio il significato degli indici PR e IR si riporta il seguente esempio. Con un valore di *Soil Radon* di 25 kBq/m³ (ottenuto in corrispondenza del 75^{esimo} percentile della distribuzione cumulativa di tutti i dati della mappatura) e una permeabilità intrinseca di $6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ (ottenuta seguendo lo stesso approccio statistico), applicando la formula riportata nella Tabella 3, si ottiene un valore di PR uguale a 20, pari ad una classe di rischio (IR) medio. Se avessimo avuto a disposizione solo una stima della permeabilità, avremmo dedotto il valore di IR dalla Tabella 4, scegliendo tra i valori corrispondenti alla

in Tab. 3.

Tab. 3 also indicates the correspondence of PR and IR.

Alternatively, the intrinsic permeability of the geological bedrock can be estimated:

- if the substratum is a loose terrain using the grain size curve and, in particular, the weigh percent of the finest fractions, $f (< 0.063 \text{ mm})$, following this scheme (BARNET *et alii*, 2008):
 - $f < 15\% \rightarrow$ high permeability
 - $15\% \leq f \leq 65\% \rightarrow$ medium permeability
 - $f > 65\% \rightarrow$ low permeability
- in case of lithoid bedrocks, referring to published data of permeability ranges of main rock complexes, taking into account also lithological, granulometric, cracking and karst features. The radon index (IR) is deduced from Tab. 4 comparing the estimated intrinsic permeability value (low, medium or high permeability class) with the measured soil radon concentration.

The full procedure for determination of radon potential (PR) and radon index (IR) of a building site, is summarised in Tab. 3 and 4, where technical practices for edifices protection (JIRANEK, 2010) and other infrastructure works are also listed. A straightforward example is presented here to better show the meaning of PR and IR. With a soil radon value of 25 kBq/m³ (obtained as the 75th percentile of the cumulative distribution of the whole mapping dataset) and an intrinsic permeability of $6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ (derived from the same statistical treatment), if we apply the equation reported in Tab.3, a PR value of 20, correspondent to a class of medium risk (IR), is found. If only an esteem of permeability had been available, we would have inferred IR from Tab. 4, choosing among radon values associated with a class of high permeability ($> 4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$), the box containing the measured soil radon value; in this case the middle box, identi-

colonna della permeabilità alta ($>4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$), la casella con il valore di *Soil Radon* misurato (in questo caso quella intermedia, con valori di *Soil Radon* tra 10 e 30 kBq/m³), alla quale corrisponde la classe di IR medio. Per questo livello di rischio è consigliato isolare l'edificio dal terreno sottostante mediante membrane impermeabili al Radon e di lasciare nell'immediato intorno dell'edificio suoli permeabili ed areati.

E' bene specificare che i valori di *Soil Radon* e della permeabilità intrinseca sono influenzati dalla fluttuazione stagionale dei parametri meteo-climatici, vale a dire dalla variazione del contenuto d'acqua e della temperatura del suolo. Quest'aspetto sarà approfondito nei prossimi paragrafi.

APPLICAZIONI DEGLI INDICI RADON A DUE CASI STUDIO

Il metodo di valutazione della pericolosità radon, basato sull'utilizzo degli indici PR e IR (NEZNAL *et alii*, 2004), è stato applicato in aree con caratteristiche geologiche differenti, nei territori dei comuni di Roma (CASTELLUCCIO, 2010) e Civitavecchia. In tali siti non è previsto un intervento di pianificazione territoriale a scopo edilizio, ma essi sono stati utilizzati come esempio di applicazione della metodica e per evidenziarne pregi, limiti e potenzialità. Non essendo presente un'area di sedime (porzione di suolo su cui insiste un manufatto edilizio), la densità e la distribuzione dei punti di misura non hanno seguito le indicazioni del protocollo proposto, ma si è scelto di operare con una maglia regolare di 30 x 30 metri. I risultati di una campagna invernale e di un'altra estiva (2010), eseguite nella Valle della Caffarella (Roma) e di un monitoraggio effettuato in primavera (aprile 2010) nel Parco della Resistenza (Civitavecchia, Roma) sono riportati nelle Tabelle 5 e 6.

Brevemente, la valle della Caffarella costituisce un'area rurale nel territorio comunale di Roma (settore SE della città) appartenente al Parco Regionale dell'Appia Antica. Il sito d'indagine è rappresentato da un'area rettangolare d'estensione di circa 5400 m², coperta da 12 punti di misura. Il substrato geologico è costituito da prodotti piroclastici dell'attività dei Colli Albani, unità delle "Pozzolane Rosse", e da terreni di riporto a matrice prevalentemente vulcanica (GIORDANO *et alii*, 2010). Il Parco della Resistenza è una piccola area verde all'interno dell'abitato di Civitavecchia. L'area, grossomodo rettangolare, ha un'estensione di circa 11200 m², ed è stata coperta da 20 punti di misura. Il substrato geologico è di natura flyschoidale, costituito da alternanze argilloso-calcareo-arenacee, estesamente presenti in tutto il territorio di Civitavecchia.

Nelle Tabelle 5 e 6 sono riportati i valori di concentrazione di radon nel suolo, la permeabilità intrinseca del terreno (k) e gli indici RP e RI, come detto in precedenza. Utilizzando il metodo del terzo quartile (NEZNAL *et alii*, 2004), che restituisce un valore unico di RP per ogni campagna, sono stati ottenuti i valori di 154 e 66, per il monitoraggio invernale ed estivo nella Valle della Caffarella (in entrambi i casi con corrispondente RI alto) e 27 per il Parco della Resistenza (con RI medio).

Allo scopo di valutare l'efficacia degli indici RP e RI per lo studio del territorio in termini di pericolosità da radon, si utilizza come confronto la classificazione proposta dalla Swedish Radiation

protected by a soil radon range between 10 and 30 kBq/m³. A medium IR corresponds to these conditions, which suggest the adoption of radon impervious membranes and recommend avoiding soil sealing in the close surroundings of the building, preferring permeable covers. It should be emphasised that soil radon and permeability are strongly influenced by seasonal fluctuations of climate, that is soil water content and temperature, but this item will be developed in next sections.

APPLICATION OF RADON INDICES TO SELECTED CASE-STUDIES

The radon hazard valuation method based on RP and RI indices (NEZNAL *et alii*, 2004) was recently applied to several sites in Rome (CASTELLUCCIO, 2010) and Civitavecchia towns, characterised by different geological settings. These areas are not future buildings sites, but represent good examples for the application of this methodological approach, because they permit to show its main advantages and drawbacks. In the absence of a building project indicating the surface covered by the edifice, the density and distribution of measurement stations do not follow the indication of the proposed protocol, but measurement points fall onto 30 x 30 meters regular grid. Here, results of winter and summer (2010) mapping in Valle della Caffarella (Roma) and spring field survey (April 2010) in Parco della Resistenza (Civitavecchia) are reported in Tabs. 5 and 6, respectively.

Briefly, Valle della Caffarella is a rural site in the SE of Roma within the Appia Antica Regional Park where a squared area of 5,400 m², covered by 12 measurement stations was chosen; the outcropping products are mainly Quaternary ignimbrites referred to the activity of Colli Albani district (GIORDANO *et alii*, 2010). Parco della Resistenza is a little garden in Civitavecchia town; the survey was performed in a squared area of 11,200 m², covered by 20 measurement points, with a sedimentary geological background consisting of sequences of shales rhythmically interbedded with thin, hard sandstones (flysch).

As previously anticipated, soil radon concentration and permeability (k), RP and RI indices obtained for the winter and summer campaigns in Valle della Caffarella and the spring campaign in Parco della Resistenza are shown in Tabs. 5 and 6. Following the third quartile method (NEZNAL *et alii*, 2004), single reference RP values were calculated for Valle della Caffarella and Parco della Resistenza sites. Resulting values are 154 and 66 for the winter and summer surveys at Valle della Caffarella, with a correspondent RI class of high risk in both cases; Parco della Resistenza during the spring campaign was ranked with a RP of 27 (medium RI).

In order to evaluate the strength of RP and RI indices to classify the potential radon risk of a given territory, another evaluation approach proposed by the Swedish Radiation Protection Authority

Spot	Winter 2010						Summer 2010					
	Rn ± Error (kBq/m ³)		Hazard level (SSI)	k (m ²)	RP	RI	Rn ± Error (kBq/m ³)		Hazard level (SSI)	k (m ²)	RP	RI
C1	184.21	8.11	high	1.4E-11	211	high	77.60	1.86	high	8.3E-12	71	high
C2	165.79	3.81	high	8.7E-12	156	high	73.76	2.36	high	6.7E-12	62	high
C3	143.00	3.86	high	6.3E-12	118	high	53.65	2.58	high	5.6E-12	42	high
C4	129.50	2.59	high	5.2E-14	39	high	52.50	2.10	high	6.2E-14	16	medium
C5	270.00	4.05	high	6.2E-13	122	high	78.18	2.89	high	4.1E-13	32	medium
C6	256.32	7.69	high	5.7E-13	114	high	115.39	2.88	high	2.0E-12	67	high
C7	179.00	5.19	high	1.9E-13	65	high	65.57	4.33	high	7.4E-12	57	high
C8	120.00	2.40	high	5.2E-14	36	high	55.20	2.32	high	7.8E-14	17	medium
C9	134.74	6.47	high	5.2E-12	104	high	14.65	0.98	normal	1.8E-11	18	medium
C10	132.89	6.25	high	8.7E-13	64	high	7.42	1.32	low	1.5E-13	2	low
C11	130.00	4.81	high	4.8E-13	56	high	26.53	2.60	normal	5.2E-14	8	low
C12	59.05	1.89	high	1.4E-11	69	high	37.95	2.01	normal	1.8E-11	50	high

Tab. 5 - Monitoraggio stagionale nel sito-pilota della Valle della Caffarella (Roma) e classificazione della pericolosità radon, applicando sia gli indici RP e RI proposti in questo lavoro, che il metodo SSI (Swedish Radiation Protection Authority, DUBOIS, 2005). L'approccio della SSI definisce il livello di radon nel suolo come livello di rischio di una data area; noi abbiamo scelto di mantenere il termine originale nel senso però di rischio potenziale
- *Seasonal field-work at Valle della Caffarella test-site (Roma, Italy) and classification of radon hazard according to RP and RI indices (this work) and SSI (Swedish Radiation Protection Authority) approach (DUBOIS, 2005). SSI defines the level of soil radon concentration as risk level of a given area; we keep here the original term with the meaning of potential risk*

Protection Authority (SSI), che si basa esclusivamente sulla concentrazione di radon nel suolo, secondo le seguenti corrispondenze: < 10 kBq/m³, *low risk areas*; 10-50 kBq/m³, *normal risk areas*; > 50 kBq/m³, *high risk areas* (DUBOIS, 2005).

Il valore medio del *soil radon* risulta circa 180 kBq/m³ per la campagna invernale e circa 75 kBq/m³ per quella estiva nel sito della Valle della Caffarella (in entrambi i casi, *high risk level* secondo la classificazione SSI), circa 44 kBq/m³ nel sito del Parco della Resistenza (*normal risk level*). I due metodi forniscono pertanto risultati concordanti per quanto riguarda la classificazione complessiva di ciascun sito. Analizzando singolarmente i risultati, si ottiene generalmente una concordanza tra i due metodi; tuttavia, in alcuni casi l'introduzione della permeabilità intrinseca del suolo permette di collocare un punto in una diversa classe di pericolosità, e questo accade soprattutto quando il valore di *soil radon* è vicino al limite di classe secondo la classificazione SSI (si vedano come esempio i valori della campagna estiva in Valle della Caffarella nei punti C4 e C8, Tab. 5, e i valori dei punti R1, R3, R13, R17, R19, R20 nel Parco della Resistenza, Tab. 6).

L'utilizzo degli indici RP e RI permette di definire più efficacemente il livello di pericolosità da radon di una porzione di territorio poiché è presa in considerazione la quantità di gas presente nel suolo in relazione alla sua capacità di movimento, descritta dal parametro permeabilità intrinseca del suolo (NEZNAL & NEZNAL, 2005). Inoltre,

(SSI) was applied to the three campaigns. Referring to the above, it is worth specifying that the SSI method is based only on soil radon concentration values and makes use of three ranking classes: low risk areas: < 10 kBq/m³; normal risk areas: 10-50 kBq/m³; high risk areas: > 50 kBq/m³ (DUBOIS, 2005).

The third quartile of each soil radon dataset was then calculated, providing values of 180 and 75 kBq/m³ for the winter and summer campaigns at Valle della Caffarella, corresponding in both cases to high risk level according to SSI classification and giving the result of 44 kBq/m³ (normal risk level) for Parco della Resistenza. In view of this, the two classification methods produced consistent results for the risk evaluation of each site and also for most of single measurement stations. However, the introduction of soil permeability data affects the final classification in some cases. These differences especially occur when soil radon values in single measurements approach the limits between classes in the SSI method. See for example, summer measurements in Valle della Caffarella at C4 and C8 stations (Tab. 5) and Parco della Resistenza spring survey at R1, R3, R13, R17, R19, R20 (Tab. 6).

In conclusion, RP and RI indices allow to better define the radon hazard of a given area because they take into account not only soil radon abundance, but also its ability to move and be transferred through the terrain as quantified by the soil intrinsic permeability (NEZNAL &

Tab. 6 - Monitoraggio primaverile e classificazione della pericolosità radon nel sito-pilota del Parco della Resistenza (Civitavecchia, Roma), applicando gli indici RP e RI proposti in questo lavoro e secondo il metodo SSI (Swedish Radiation Protection Authority, DUBOIS, 2005). L'approccio della SSI definisce il livello di radon nel suolo come livello di rischio di una data area; noi abbiamo scelto di mantenere il termine originale nel senso però di rischio potenziale
- *Spring field-work and classification of radon hazard at Parco della Resistenza test-site (Civitavecchia, Roma) according to RP and RI indices (this work) and SSI (Swedish Radiation Protection Authority) approach (DUBOIS, 2005). SSI defines the level of soil radon concentration as risk level of a given area; we keep here the original term with the meaning of potential risk*

Spot	April 2010					
	Rn ± Error (kBq/m ³)		Hazard level (SSI)	k (m ²)	RP	RI
R1	58.05	2.13	high	1.7E-12	32	medium
R2	34.05	1.89	normal	2.1E-11	49	high
R3	17.75	0.98	normal	5.2E-14	5	low
R4	4.95	0.89	low	5.2E-14	1	low
R5	31.50	1.26	normal	1.6E-12	17	medium
R6	31.50	2.04	normal	5.2E-14	9	low
R7	34.65	6.53	normal	5.2E-14	10	medium
R8	28.50	2.01	normal	5.2E-14	8	low
R9	40.40	2.02	normal	5.2E-14	12	medium
R10	47.35	1.49	normal	3.1E-13	18	medium
R11	37.20	1.26	normal	3.6E-13	15	medium
R12	29.60	1.33	normal	2.6E-11	49	high
R13	55.75	1.80	high	4.6E-13	23	medium
R14	34.90	1.26	normal	1.9E-12	20	medium
R15	43.35	1.39	normal	1.1E-13	14	medium
R16	17.75	0.88	normal	4.1E-12	12	medium
R17	45.30	1.36	normal	2.2E-11	68	high
R18	31.60	1.35	normal	1.8E-12	18	medium
R19	6.47	0.61	low	2.9E-11	10	medium
R20	51.40	1.57	high	5.3E-13	22	medium

come risulta dal caso studio della Valle della Caffarella e come sostenuto da NEZNAL *et alii* (2004), l'utilizzo degli indici RP e RI fornisce un risultato nel quale il peso della variabilità stagionale è inferiore rispetto all'utilizzo del solo parametro *soil radon* (metodo SSI).

L'IMPORTANZA DEL MONITORAGGIO PER CORREGGERE L'EFFETTO STAGIONALE

La variabilità temporale nei valori di concentrazione di *soil radon* è legata ai parametri atmosferici e di conseguenza alle condizioni del suolo, quali contenuti d'acqua e temperatura, che incidono a loro volta sul grado di compattazione e quindi sulla permeabilità (CASTELLUCCIO, 2010). E' pertanto evidente che l'entità della variazione nel tempo della concentrazione di Radon è funzione della velocità e del grado con cui variano i parametri d'influenza. La variabilità del *soil radon* può essere significativa su un intervallo di pochi giorni (SCHUBERT & SCHULZ, 2002), ma è generalmente considerevole a scala stagionale (CASTELLUCCIO, 2010; WINKLER *et alii*, 2001). In questo senso acquista un'importanza rilevante l'entità e la distribuzione delle precipitazioni, che hanno un effetto diretto sul contenuto d'acqua nel suolo. Questo parametro diviene il principale fattore di controllo della variabilità stagionale del *soil Radon*, in particolare quando prevale un meccanismo

NEZNAL, 2005). Furthermore, using RP and RI indices, the weight of seasonal variability on the radon hazard classification is lowered if compared with the SSI approach (NEZNAL *et alii*, 2004).

CORRECTION FOR SEASONAL EFFECTS BY MONITORING

Temporal variability of soil radon concentration depends on meteorological parameters and, more directly, on soil water content and temperature, which in turn influence soil compaction and permeability (CASTELLUCCIO, 2010).

Soil radon changes may be detected on short time scale of a few days (SCHUBERT & SCHULZ, 2002), but most relevant variability is at seasonal scale (CASTELLUCCIO, 2010; WINKLER *et alii*, 2001) and is controlled by the amount and distribution of rainfall, influencing soil water contents. When the process of diffusion mainly governs radon transport and the radon source is located in the close proximity of the gas sampling spot, soil water content is the main control factor (CASTELLUCCIO, 2010; RICHON *et alii*, 2011). Essentially, soil water content is directly correlated with radon emanation (MENETREZ & MOSLEY, 1996) and affects topsoil permeability (JOHNER &

di trasporto del gas di tipo diffusivo, quando il Radon rilevato ha origine nell'immediato intorno del punto di misura (CASTELLUCCIO, 2010; RICHON *et alii*, 2011). Il contenuto d'acqua nel suolo influenza il *soil Radon* agendo a scala microscopica sul coefficiente d'emanazione del Radon (correlazione diretta, MENETREZ & MOSLEY, 1996) e a scala macroscopica sulle condizioni di permeabilità intrinseca del suolo superficiale (JOHNER & SURBECK, 2001). La presenza di uno strato superficiale con contenuto d'acqua prossimo al livello di saturazione riduce il flusso di Radon all'interfaccia suolo-atmosfera, favorendo l'accumulo del gas all'interno del sistema (WIEGAND, 2001).

Da queste considerazioni è evidente l'utilità di eseguire monitoraggi di *soil Radon*, permeabilità intrinseca del suolo e variabili d'influenza, in punti di misura fissi, ripetendo i rilievi a cadenza regolare. Come esempio sono riportati i risultati del monitoraggio mensile effettuato nella Valle della Caffarella (CASTELLUCCIO, 2010), a partire dal 2008 (Fig. 1).

È stato riscontrato un caratteristico andamento stagionale del *soil Radon*, con i valori più alti nei mesi invernali, quando le precipitazioni sono più abbondanti, le basse temperature riducono l'evaporazione e il terreno resta umido per lunghi periodi (Fig. 1); condizioni opposte si stabiliscono durante la stagione estiva, con conseguenti basse concentrazioni di *soil Radon*.

In ambito applicativo è difficile realizzare un monitoraggio annuale del *soil Radon*, per evidenti motivi legati a costi e tempi di realizzazione. Diventa quindi importante "integrare" opportunamente il protocollo proposto, per ottenere indici di rischio idonei, non influenzati troppo dalla variabilità stagionale. L'utilizzo dell'indice RP riduce la variabilità stagionale del *soil Radon* perché la riduzione delle concentrazioni estive è parzialmente controbilanciata da un aumento della permeabilità intrinseca e quindi da una migliore attitudine del terreno a trasmettere il radon e a favorire il suo trasferimento in ambiente *indoor* (NEZNAL *et alii*, 2004); pur tuttavia le misure estive tendono ancora a sottostimare i valori di RP (CASTELLUCCIO, 2010). Basandoci sui dati acquisiti nel monitoraggio a lungo-termine alla valle della Caffarella (Roma) e nel territorio di Civitavecchia è stato quindi introdotto un fattore di correzione, dedotto su basi empiriche dal rapporto tra il valore medio di RP calcolato per i mesi invernali e quelli ottenuti nelle altre stagioni (vedi ad esempio Tab. 5 e 6). Si suggerisce di moltiplicare per un fattore 2 i valori di RP ottenuti per le misure effettuate nei mesi di luglio e agosto e per un fattore 1.5, i valori di RP associati ai mesi di giugno e settembre. Nessuna correzione è indicata per gli alti valori invernali di RP. Lo spirito di quest'approccio è, infatti, principalmente cautelativo e mira principalmente ad evitare la sottostima del livello di pericolosità.

CONCLUSIONI

L'accumulo del radon negli ambienti *indoor* è fortemente condizionato dal substrato geologico e, in particolare, dalle concentrazioni di questo gas nel suolo e dalla permeabilità intrinseca del terreno di fondazione. Il valore di tali parametri permette di quantificare l'intensità della sorgente del radon e descrivere la facilità con cui quest'ultimo si può muovere nel terreno e quindi concentrare negli spazi

(SURBECK, 2001). When topsoil is nearly saturated, radon flux at the terrain/atmosphere interface is reduced and soil gas accumulation is favored (WIEGAND, 2001). Therefore basic research often involves periodic and regular monitoring of soil radon, soil permeability and related control parameters on permanent stations. Here, the results of a soil radon monitoring performed monthly in Valle della Caffarella test site since the year 2008 (CASTELLUCCIO, 2010) are shown along with corresponding monthly rainfall totals (Fig. 1).

Typical periodic fluctuations of soil radon were found, with higher values during the winter, when precipitations are more abundant, low temperatures reduce evaporation and soil stays wet for longer periods of time (Fig. 1); opposite conditions take place during summer leading to the lowest radon concentrations in the soil.

When applying soil radon measurements to radon hazard classification of a building site, it is not possible to perform long-term soil radon monitoring, due to high cost and execution time. Therefore, the proposed protocol needs to be adjusted in order to get suitable radon indices, not biased too much by seasonal variability. The employment of soil permeability in the calculation of RP index reduces seasonal changes because, for example, summer soil radon drops are, to a certain extent, counterbalanced by an increase of soil permeability and thus an enhanced attitude of the soil to transmit and deliver radon to indoor environments (NEZNAL *et alii*, 2004); nevertheless summer measurements still tend to underestimate RP values (CASTELLUCCIO, 2010). Therefore, according to our long-term monitoring in Valle della Caffarella and Civitavecchia areas, an empirical correction factor is introduced; it describes the ratio between average RP values calculated in the winter and average ratios obtained in the other seasons (see Tabs. 5 and 6). We suggest multiplying RP values from July and August surveys by 2 and indices related to June and September measurements by 1.5. No correction for high winter indices is recommended. The spirit of this approach is as a matter of fact precautionary and its main purpose is avoiding the underestimation of radon hazard.

CONCLUSIONS

Radon accumulation in indoor environments is strongly dependent on the geological bedrock and, in particular, on soil radon concentrations and intrinsic permeability under the building foundations. The value of these parameters allow quantifying the strength of the radon source and describing the gas ability to flow in the subsoil and build up in closed spaces. According to this, a protocol for radon haz-

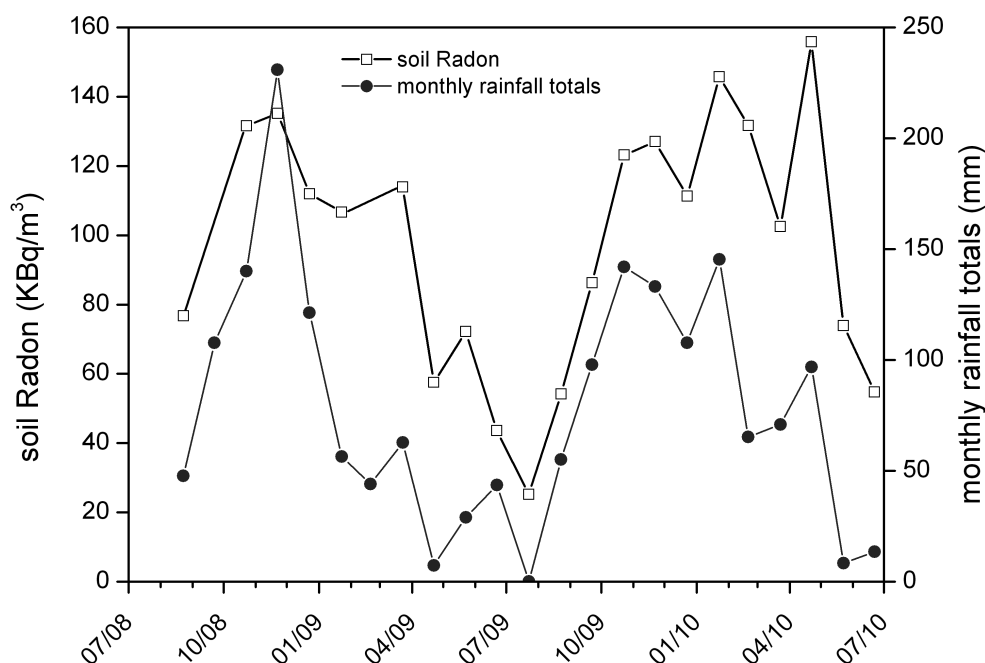


Fig. 1 - Fluttuazioni delle concentrazioni di radon nel suolo, in relazione alle precipitazioni totali mensili dal settembre 2008 al luglio 2010 nella Valle della Caffarella (Roma)
- Soil radon fluctuations and monthly precipitation totals from September 2008 to July 2010 at Valle della Caffarella test-site, Roma, Italy)

confinati. Su questa base, è stato proposto un protocollo per la classificazione della pericolosità radon, da applicarsi nei siti che ricadono all'interno delle aree potenzialmente a rischio (vedi studi di primo livello), dove è prevista la costruzione di nuovi edifici.

Inoltre, a seguito dell'esperienza acquisita nella Valle della Caffarella (Roma) e nell'area di Civitavecchia, dove si è riscontrata una fluttuazione sistematica della concentrazione del *soil Radon*, della permeabilità intrinseca e del valore di RP nel corso dell'anno, si propone l'utilizzo di fattori di correzione stagionale da apportare al valore del potenziale radon ottenuto nella stagione primaverile/autunnale e soprattutto estiva. Lo spirito di quest'approccio è principalmente cautelativo e mira principalmente ad evitare la sottostima del livello di pericolosità.

Si rileva infine l'importanza del controllo preventivo del gas radon nel suolo per predisporre, già in fase di progettazione, soluzioni tecniche adatte all'abbattimento delle concentrazioni di questo gas nelle sottofondazioni degli edifici. Tale approccio si è dimostrato vantaggioso (NEZNAL *et alii*, 2004) rispetto agli interventi *a posteriori*, sia in termini di costi che d'efficacia tecnica.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano Matej Neznal e Martin Neznal per la disponibilità al confronto e le stimolanti discussioni sulle modalità esecutive delle misure di *soil Radon* e della permeabilità intrinseca del suolo. La loro esperienza nella classificazione del rischio radon è stata fondamentale per la nostra proposta. La Fondazione Ca.Ri.Civ. (Cassa di Risparmio di Civi-

ard classification has been proposed, to apply to sites falling within radon-prone areas (see first-level studies), where the construction of new edifices is planned.

According to the experience gathered at Valle della Caffarella and Civitavecchia areas, where systematic fluctuations of soil radon, intrinsic permeability and RP values have been recorded over 12-month periods, we recommend the use of seasonal correction factors to adjust RP values obtained during spring, fall and summer. The spirit of this approach is precautionary and its main purpose is avoiding the underestimation of radon risk levels.

In conclusion, it is worth stressing the relevance of preventive soil radon checks in order to plan proper technical solutions for the abatement of the concentration of this gas at the foundations of future buildings. This approach provides advantages over a posteriori actions (NEZNAL *et alii*, 2004), either in terms of costs or in terms of technical efficiency.

ACKNOWLEDGEMENTS

Matej Neznal and Martin Neznal are acknowledged for nice and stimulating discussion on soil Radon and intrinsic permeability measurements. Their experience in the classification of radon hazard has been fundamental for our proposal. Ca.Ri.Civ. (Cassa di Risparmio di Civitavecchia) Foundation funded field-surveys at Parco della Re-

tavecchia) ha finanziato le campagne di misura al Parco della Resistenza (progetti finanziati: 1929/5416 e 1929/5683). Angela Vita Petruccio e Valerio Tufoni hanno partecipato con entusiasmo e competenza al monitoraggio del radon nel territorio di Civitavecchia (Regione Lazio-Italia).

sistenza (Civitavecchia, Roma) (projects: 1929/5416 and 1929/5683). Angela Vita Petruccio and Valerio Tufoni enthusiastically and skilfully helped in the monitoring of radon at Civitavecchia (Regione Lazio-Italy) and are warmly thanked.

OPERE CITATE / REFERENCES

- ANPA (AGENZIA NAZIONALE PER L'AMBIENTE) (2000) - *Il sistema informativo territoriale per la valutazione del potenziale di esalazione di radon dal suolo*. Rapporto ANPA, serie Stato dell'Ambiente 9/2000.
- BARNET I., PACHEROVA P., NEZNAL M. & NEZNAL M. (2008) - *Radon in geological environment - Czech experience*. Czech Geological Survey Special Papers, **19**: 1-70.
- BOURDON B., TURNER S., HENDERSON G.M. & LUNDSTROM C.C. (2003) - *Introduction to U-series geochemistry*. In: *Uranium-series geochemistry*. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, **52**: 1-21.
- CASTELLUCCIO M. (2010) - *Soil radon concentration survey in Caffarella Valley test site (Rome)* Ph.D. Thesis in Geodynamics at the "Roma Tre" University.
- CASTELLUCCIO M., MORONI M., TUCCIMEI P., NEZNAL M. & NEZNAL M. (2010) - *Soil Gas Radon Concentration and Permeability at "Valle della Caffarella" Test Site (Roma, Italy). Evaluation of Gas Sampling Techniques and Radon Measurements Using Different Approaches*. Proceedings of 10th International Workshop On The Geological Aspects Of Radon Risk Mapping, Ivan Barnet and Matej Neznal Eds, Czech Geological Survey, Prague (CZ), September 22nd - 25th, 2010: 61-71.
- CASTELLUCCIO M., GIANNELLA G., LUCCHETTI C., MORONI M. & TUCCIMEI P. (2011) - *Il rischio radon in edilizia. Proposta di codifica di un protocollo per la classificazione del rischio*. Professione Geologo, Notiziario dell'Ordine dei Geologi del Lazio, **27**: 8-13.
- DUBOIS G. (2005) - *An overview of radon surveys in Europe*. Radioactivity Environmental Monitoring - Emissions and Health Unit - Institute for Environment and Sustainability - Joint Research Center - European Commission - EUR 21892 EN.
- FRIEDMANN H. (2005) - *Final results of the austrian radon project*. Health Phys, **89** (4): 339-348.
- GIORDANO G. & THE CARG TEAM (2010) - *Stratigraphy and volcano-tectonic structures of the Colli Albani volcanic field*. In: FUNICIELLO R. & GIORDANO G. (eds) *The Colli Albani Volcano*. Geological Society of London, special volume: 43-98.
- JIRANEK M. (2010) - *Radon protective and remedial measures in the Czech Republic*. Proceedings of 10th International Workshop on The Geological Aspects of Radon Risk Mapping, BARNET I. & NEZNAL M. (Eds.), Czech Geological Survey, Prague (CZ), September 22nd - 25th, 2010: 142- 147.
- JOHNER H.U. & SURBECK H. (2001) - *Soil gas measurements below foundation depth improve indoor radon prediction*. The Science of the Total Environment, **272**: 337-341.
- KEMSKI J., SIEHL A., STEGEMANN R. & VALDIVIA-MANCHEGO M. (2012) - *Mapping the geogenic radon potential in Germany*. The Science of the Total Environment, **272**: 217-230.
- MENETREZ M.Y. & MOSLEY R.B. (1996) - *Evaluation of radon emanation from soil with varying moisture content in a soil chamber*. Environment International, **22** (1): 447-453.
- MORONI M. (2002) - *Il Radon: manuale tecnico di rilevamento e bonifica*. Il Sole 24 Ore Editrice, Milano.
- NEZNAL M., NEZNAL M., MATOLIN M., BARNET I. & MIKSOVA J. (2004) - *The new method for assessing the radon risk of building sites* Czech Geological Survey Special Papers, CGS Prague.
- NEZNAL M. & NEZNAL M. (2005) - *Permeability as an important parameter for radon risk classification of foundation soils*. Annals of Geophysics, **48**: 175-180.
- RICHON P., PERRIER F., KOIRALA B.P., GIRAULT F., BHATTARAI M. & SARKOTA S.N. (2011) - *Temporal signatures of advective versus diffusive radon transport at a geothermal zone in Central Nepal*. J. Environmental Radioactivity, **102**: 88-102.
- SCHUBERT M. & SCHULZ H. (2002) - *Diurnal radon variations in the upper soil layers and at the soil-air interface related to meteorological parameters*. Health Physics, **83** (1): 91-96.
- USEPA, UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1993) - *Protocols for Radon and Radon Decay Product Measurement in Homes*. USEPA Publication 402-R-92-003. Washington, D.C.
- WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION) (2007) - *International Radon Project Survey on Radon Guidelines, Programmes and Activities*. WHO, Geneva.
- WHO (WORLD HEALTH ORGANISATION) (2009) - *WHO Handbook on Indoor Radon: a public health perspective*; ZEEB H. & SHANNOUN F. (Eds.), France: 1-95.
- WIEGAND J. (2001) - *A guideline for the evaluation of the soil radon potential based on geogenic and anthropogenic parameters*. Environmental Geology, **40**: 949-963.
- WINKLER R., RUCKERBAUER F. & BUNZL K. (2001) - *Radon concentration in soil gas: a comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations*. The Science of the Total Environment, **272** (1-3): 273-282.

Received September 2012 - Accepted November 2012