

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA CALABRIA

DIPARTIMENTO DI PIANIFICAZIONE TERRITORIALE

*Dottorato di ricerca in*

TECNOLOGIE E PIANIFICAZIONE AMBIENTALE

–XIX CICLO–

SETTORE SCIENTIFICO DISCIPLINARE ING-IND/22

---

***RADIOATTIVITÀ AMBIENTALE: STUDIO E MONITORAGGIO DI  
RADIAZIONI IONIZZANTI DERIVANTI DAL RADON IN  
PARTICOLARI AREE CALABRESI***

Supervisore

Dr. Pierantonio DE LUCA

Dottoranda

**Dott.ssa Valentina NASTRO**

Prof. Giovanni FALCONE

Coordinatore

*Prof. ing. Sergio d'Elia*

*Ai miei cari*

*“La natura nasconde i propri segreti perché  
è sublime, non perché imbroglia”*

*Albert Einstein*

## INDICE

<b>INTRODUZIONE</b>	pag. I
 <b>CAPITOLO I – RADIAZIONI IONIZZANTI</b>	
1.1 Cenni storici	pag 1
1.2 La struttura della materia: atomi e isotopi	“ 2
1.3 Decadimento radioattivo e radiazioni ionizzanti	“ 3
1.4 Legge di decadimento	“ 4
1.5 Parametri caratteristici di un radionuclide	“ 5
1.6 Processi di decadimento	“ 6
1.6.1 Decadimento alfa	“ 7
1.6.2 Decadimento beta	“ 8
1.6.3 Decadimento gamma	“ 8
1.7 La radioattività naturale	“ 9
1.8 Grandezze dosimetriche	“ 10
1.8.1 Working Level	“ 13
1.9 I Possibili danni delle Radiazioni Ionizzanti	“ 14
1.10 La radioprotezione in Italia	“ 15
1.11 I principi della radioprotezione	“ 16
1.12 La normativa nazionale di radioprotezione	“ 18
1.13 La situazione in Italia	“ 21
1.13.1 Risultati prospezioni regionali	“ 22
 <b>CAPITOLO II – IL RADON</b>	
2.1 Caratteristiche Chimico-Fisiche	pag 24
2.2 Decadimento Radioattivo	“ 25
2.3 Geochimica dei radioelementi	“ 27
2.3.1 Geochimica dell’uranio	“ 27

---

2.3.2 Geochimica del torio	“ 28
2.3.3 Geochimica del potassio	“ 28
2.4 Minerali abbondanti nelle rocce cristalline	“ 29
2.5 Modalità di emissione del Radon nell’atmosfera	“ 31
2.5.1 Emanazione	“ 33
2.5.2 Trasporto	“ 36
2.5.3 Esalazione	“ 39
2.6 Sorgenti di radon e fenomeni di trasporto	“ 40
2.6.1 Suolo	“ 40
2.6.2 Materiali da costruzione	“ 41
2.6.3 Acqua	“ 42
2.6.3.1 Le acque potabili	“ 43
2.6.4 Aria	“ 46
2.7 Meccanismo di trasporto del Radon in ambienti indoor	“ 46
2.8 Effetti sulla salute	“ 50
2.8.1 Effetti dell’inalazione	“ 51
 <b>CAPITOLO III – TECNICHE E STRUMENTI DI MISURA DEL RADON</b>	
3.1 Caratteristiche generali	“ 55
3.2 Principali tecniche di misura del Radon in aria	“ 56
3.2.1 Rivelatori attivi	“ 56
3.2.2 Rivelatori passivi	“ 57
3.2.2.1 Rivelatori ad elettrodi	“ 58
3.2.2.2 Canestri a carboni attivi	“ 59
3.2.2.3 Rivelatori a tracce nucleari	“ 60
3.3 Tecnica di misura utilizzata: rivelatori CR-39	“ 61
3.3.1 Processo di formazione delle tracce latenti	“ 63
3.3.2 Processo di sviluppo	“ 65
3.3.2.1 Preparazione dei rivelatori	“ 66
3.3.2.2 Attacco chimico	“ 66
3.3.2.2.1 Geometria delle tracce	“ 69

3.3.2.2.2 Angolo limite. Efficienza di attacco	“ 71
3.3.2.3 Conteggio automatico delle tracce	“ 72
3.4 Principali tecniche di misura del Radon in acqua	“ 74
3.4.1 Celle di lucas	“ 75
3.4.2 Procedure di misurazione del Radon in acqua	“ 76
3.5 Principali tecniche di misura del Radon nei materiali	“ 78
 <b>CAPITOLO IV – ORGANIZZAZIONE DELLA CAMPAGNA DI MONITORAGGIO</b>	
4.1 Criteri per la scelta delle aree da Monitorare	pag. 80
4.1.1 Descrizione delle aree monitorate	“ 82
4.1.1.1 Inquadramento geologico dell’ Arco Calabro Peloritano	“ 82
4.1.1.2 Castrovillari	“ 82
4.1.1.3 Mormanno	“ 83
4.1.1.4 Lungro	“ 85
4.1.1.5 San Marco Argentano	“ 86
4.1.1.6 Cosenza	“ 88
4.1.1.7 Rogliano	“ 89
4.1.1.8 San Giovanni in Fiore	“ 90
4.1.1.9 Caccuri e Cerenzia	“ 91
4.1.1.10 Castelsilano	“ 92
4.2 Criteri di identificazione degli edifici da monitorare	“ 93
4.3 Criteri di scelta dei locali da monitorare	“ 93
4.4 Cicli di monitoraggio: installazione e ritiro dosimetri	“ 95
4.5 Campionamento attivo indoor e nel suolo	“ 97
4-6 Campionamento di acqua, materiali di rivestimento e rocce	“ 98
4.6.1 Modalità di campionamento in acqua	“ 98
4.6.1 Preparazione dei campioni di pavimento e del campione di roccia	“ 101
 <b>CAPITOLO V – RISULTATI DELLE CAMPAGNE DI MONITORAGGIO DI GAS RADON</b>	
5.1 Risultati dell’area di Castrovillari	pag. 102
5.2 Risultati dell’area di Mormanno Calabro	“ 105

5.3 Risultati dell'area di Lungro	“ 106
5.4 Risultati dell'area di San Marco Argentano	“ 108
5.5 Risultati dell'area di Cosenza	“ 109
5.6 Risultati dell'area di Rogliano	“ 112
5.7 Risultati dell'area di San Giovanni In Fiore	“ 114
5.8 Risultati dell'area di Castelsilano, Caccuri e Cerenzia	“ 120
5.9 Risultati delle concentrazioni di radon in acqua	“ 122

## **CAPITOLO VI – ANALISI E DISCUSSIONI DEI RISULTATI DEL MONITORAGGIO DI GAS RADON**

6.1 Analisi del contributo del contesto geologico	pag. 125
6.2 Analisi stagionale	“ 130
6.3 Analisi di correlazione con le tipologie ed uso dei locali	“ 132
6.3.1 Area di Castrovillari	“ 132
6.3.2 Area di Mormanno Calabro	“ 138
6.3.3 Area di Lungro	“ 142
6.3.4 Area di San Marco Argentano	“ 144
6.3.5 Area di Cosenza	“ 147
6.3.6 Area di Rogliano	“ 151
6.3.2 Area di San Giovanni in Fiore, Caccuri, Cerenzia e Castelsilano	“ 154
6.4 Analisi sui materiali da costruzione	“ 158
6.4.1 Casi particolari di studio: le tre chiese di San Giovanni in Fiore	“ 162
6.5 Stima della dose equivalente	“ 165

## **CAPITOLO VII – CARATTERIZZAZIONE CHIMICA-MINERALOGICA DEI CAMPIONI DI PAVIMENTO E DI ROCCIA**

7.1 Campione CAS1	“ 171
7.2 Campioni LU1-LU2	“ 172
7.3 Campione MR1	“ 174
7.4 Campione SM1	“ 176
7.5 Campioni SGF1, SGF2 e SGF3	“ 178

7.6 Campione SGF4 e SGF8	“ 178
7.7 Campione CSTS1	“ 179
7.8 Campione CSTS2	“ 181
7.9 Campione SGF9, SGF10, SGF11 e SGF12	“ 181
<b>CONCLUSIONI</b>	pag. 183
<b>APPENDICE A</b>	
<b>APPENDICE B</b>	
<b>APPENDICE C</b>	
<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b>	

## INTRODUZIONE

*“La Pianificazione Territoriale, attraverso la conoscenza degli elementi a rischio di un territorio, consente la predisposizione di strumenti urbanistici adeguati.*

*Se ciò vale per il rischio idrogeologico, sismico, industriale ecc., deve valere anche per il RADON e i suoi prodotti di decadimento a causa dell'elevato impatto sulla salute pubblica.”*  
[Moroni M., 2001].

L'analisi della qualità dell'aria all'interno degli edifici, in un contesto di valutazione delle performance ambientali di insediamenti, rappresenta oggi un problema di sanità pubblica di notevole rilevanza, cui numerosi organismi internazionali stanno dedicando una crescente attenzione.

La popolazione dei Paesi industrializzati trascorre infatti circa l'80% del suo tempo in ambienti chiusi, siano essi abitazioni, edifici pubblici o luoghi di lavoro e viene esposta ad una miriade di contaminanti, per alcuni dei quali la concentrazione è spesso maggiore nell'aria interna rispetto a quella esterna.

Com'è ben noto, si sta delineando, in modo sempre più evidente, il rischio per la salute pubblica derivante dall'esposizione a radiazioni ionizzanti di origine naturale, ed in particolare quello legato alla presenza di gas radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) negli ambienti domestici e di lavoro (“Inquinamento indoor”). Il Radon, emanato dal terreno, dalle rocce, dai materiali da costruzione, e perfino dall'aria e dall'acqua, è una delle maggiori cause di decesso per cancro ai polmoni. Il Radon essendo un gas inerte, non reagisce chimicamente con l'ambiente esterno e, muovendosi attraverso la porosità del terreno, può entrare negli edifici attraverso le fessure dei pavimenti, i passaggi degli impianti idraulici, termici del gas etc, accumulandosi. All'esterno, invece, si disperde rapidamente non raggiungendo quasi mai concentrazioni pericolose.

Conoscere la distribuzione geografica degli inquinanti radioattivi naturali rappresenta un elemento di notevole interesse per un'adeguata programmazione e pianificazione urbanistica dell'uso del territorio, indispensabili per evitare in futuro eventuali opere di bonifica di edifici pubblici e/o privati.

Quindi poiché la geologia del territorio “controlla” la distribuzione e la migrazione del Radon ne risulta che una prima selezione delle zone ricche di questo gas si può effettuare in base a considerazioni sulla natura geologica delle aree.

In Italia, a seguito della crisi delle risorse energetiche mondiali, si sono imposti nuovi criteri tecnico-progettuali per gli edifici ad uso civile. La necessità di contenere i consumi per il riscaldamento e per la ventilazione ha imposto un migliore isolamento degli edifici, con conseguente spinta a sigillare gli ambienti interni.

In Calabria l'origine di anomalie radioattive è legata alla presenza, non solo, di consistenti accumuli di minerali thorio-uraniferi legati sia a caratteri geologici locali che alla conformazione sostanzialmente granitico/metamorfica del basamento cristallino dell'Arco Calabro Peloritano, ma anche alla considerevole presenza di acque termali ( $T > 20$  °C). In Calabria, le sorgenti acque termali, sono legate a processi di normali gradienti geotermici a grandi profondità (la temperatura aumenta di 1 °C ogni 30 mt.), con una rapida risalita lungo le grandi superfici tettoniche.

Nonostante il D.Lgs.241/00 responsabilizzi regioni e province ad individuare entro l'agosto 2005 zone e luoghi di lavoro ad elevata concentrazione di attività di Radon, gli enti pubblici della Regione Calabria sono ad oggi sprovvisti di adeguata certificazione....

L'obiettivo del seguente lavoro di tesi è quello di determinare, mediante l'impiego di rilevatori a tracce nucleari del tipo CR-39, le concentrazioni di gas radon in ambienti di lavoro, sotterranei, seminterrati e pianoterra, selezionati in base ai parametri indicati dalle Linee Guida Operative del 2003, e fornire elementi di conoscenza sulla radioattività naturale e sui rischi legati all'esposizione della stessa, con particolare riferimento ai piani più bassi degli edifici poiché, essendo tali locali a contatto diretto col terreno, di conseguenza il Radon (essendo un gas pesante) tende a concentrarsi nei piani più bassi.

Sono state così effettuate delle campagne di monitoraggio di Radon indoor programmate, sulla base della potenziale attitudine del territorio al Radon, in relazione ai differenti contesti geologici-strutturali e geomorfologici delle aree monitorate, al fine di avere un'immagine del territorio anche dal punto di vista del rischio Radon, e per una predisposizione di adeguati strumenti urbanistici e non. Tale monitoraggio ha permesso di acquisire una banca dati utile alla successiva analisi dei risultati.

A tal fine si ci propone di approfondire le conoscenze ed in particolare di studiare e analizzare i diversi fattori che contribuiscono all'accumulo indoor di tale gas, quali contesto geologico-strutturale, tendenze stagionali delle singole aree d'indagine, la tipologia strutturale di ogni singolo locale, la sua esposizione e i materiali da costruzione. Infine sono stati considerati come casi di studio a sé alcuni edifici più significativi.

In prima analisi si è suddiviso il territorio calabrese in zone di alta, media e bassa concentrazione (carta della potenziale attitudine del Radon) sulla base dei principali complessi litologici della Calabria. Da qui la scelta delle aree in modo da indagare tutte e tre le tipologie di attitudine.

Le aree che sono state oggetto d'indagine sono state scelte in funzione di criteri ben precisi e sono: Castrovillari, Mormanno, Lungro, San Marco Argentano, Cosenza, Rogliano, San Giovanni in Fiore, Castelsilano, Caccuri e Cerenza.

Il monitoraggio è stato effettuato a maglia più stretta, nell'area del Massiccio della Sila, in particolare nel Comune di San Giovanni in Fiore, vista la natura granita (batolite della Sila) che caratterizza la litologia affiorante, e la sua densità abitativa.

A tale scopo si è pensato di considerare oltre al ciclo annuale (come dettato dal D.Lgs. 241/00) altri due cicli di monitoraggio: tre mesi e sei mesi. La necessità di effettuare tre cicli di monitoraggio è da ricondursi, non solo alla necessità di avere dati indicativi più rapidi e quindi facilmente utilizzabili, ma soprattutto disporre di un set di misure da utilizzare nella fase di analisi successiva dei diversi parametri descritti precedentemente.

Successivamente sulla base di alcune ipotesi relative ai fattori fisiologici e ai modelli dosimetrici, e sulla base dei tempi di permanenza dichiarati dal personale, è stata effettuata a livello qualitativo una stima della dose minima annua potenziale assorbita dai lavoratori, non esistendo alcuna prova di una soglia al di sotto della quale non sia associato un rischio di danno.

Nell'ultima parte del lavoro segue una terza fase di analisi di alcuni possibili contributi che possono concorrere alle concentrazioni di radon stimate.

A tale scopo è stata misurata la concentrazione di attività di radon nei campioni d'acqua, prelevati sia dai rubinetti interni di alcuni edifici monitorati, che dalle sorgenti, mediante celle di Lucas (camere a scintillazione).

Inoltre è stata condotta una caratterizzazione chimico- mineralogica tramite osservazione al microscopio elettronico ad elettroni retrodiffusi, preceduta da analisi diffrattometrica ai raggi X, dei campioni di pavimento prelevati all'interno dei locali oggetto d'indagine di ciascun presidio ospedaliero e, dove possibile, dei campioni appartenenti ad affioramenti rocciosi adiacenti.

Per un campione rappresentativo dell'area di San Giovanni in Fiore, oltre a tale caratterizzazione è stato possibile effettuare misure radiometriche attraverso un rivelatore gamma al germanio iperpuro.

# CAPITOLO I

## RADIAZIONI IONIZZANTI

In questo primo capitolo di tesi di dottorato si sono volute riportare informazioni inerenti le radiazioni ionizzanti, le sorgenti, nonché i possibili danni derivanti dall'esposizione e le principali misure di tutela.

La normativa definisce “*radiazioni ionizzanti o radiazioni: trasferimento di energia in forma di particelle o onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda non superiore a 100 nm o con frequenza di  $3 \cdot 10^{15}$  Hz in grado di produrre ioni direttamente o indirettamente*” [D.Lgs. 230/95].

### 1.1 CENNI STORICI

Nel 1896 il fisico naturale francese Henri Becquerel si accorse casualmente che i sali d'uranio, posti in vicinanza di una lastra fotografica, la impressionavano, anche se racchiusa in un involucro opaco, mostrando così di emettere radiazioni capaci di attraversare anche corpi che non sono attraversati dalla luce. Tale osservazione aprì nell'ambito della fisica, un nuovo capitolo: *la Radioattività* [Persico E.].

Le ricerche iniziate da Becquerel vennero riprese dagli scienziati francesi Marie e Pierre Curie i quali, nel 1898, scoprirono che la proprietà di emettere radiazioni penetranti era comune all'uranio e a molti dei suoi composti. Analizzando l'intensità della radiazione emessa per mezzo di una camera di ionizzazione, essi riconobbero che i minerali dell'uranio, in modo particolare la *pechblenda*, avevano un'attività radioattiva maggiore rispetto ai sali usati da Becquerel. Poiché non esistevano elementi noti sufficientemente radioattivi da giustificare le radiazioni osservate, essi dedussero che i minerali analizzati fossero composti da sostanze ignote estremamente instabili. Dopo una serie di esperimenti chimici sulla pechblenda, i coniugi Curie riuscirono ad estrarre la sostanza radioattiva responsabile dello strano fenomeno a cui venne dato il nome di “Radio”.

Si comprese subito che la radioattività era la sorgente di energia più concentrata fino ad allora conosciuta. I Curie misurarono il calore associato al decadimento del radio e stabilirono che 1g di radio produce circa 420J di energia all'ora e che questo effetto termico continua ora dopo ora e anno dopo anno. A seguito di questi risultati la radioattività attirò

l'attenzione degli scienziati di tutto il mondo e nei decenni successivi furono ampiamente studiati molti aspetti del fenomeno.

Nel 1900 il fisico F. Dorn scoprì che i sali di radio producevano un gas radioattivo: il Radon.

Successivamente Ernest Rutheford identificò le radiazioni emesse dalle sostanze radioattive in emissioni alfa e beta, mentre Paul Villard individuò i raggi gamma.

Lo stesso Rutheford osservò che gli atomi instabili, dunque radioattivi, si trasformano in atomi di un altro elemento, ovvero con proprietà chimiche diverse dagli atomi di origine, che a loro volta possono essere radioattivi oppure stabili (decadimento o disintegrazione radioattiva). Gli esperimenti sulla deflessione dei raggi alfa in un campo elettrico, permisero di stimare il valore del rapporto tra carica e massa delle particelle alfa che risultò circa la metà di quello dello ione idrogeno. Da ciò si dedusse che queste particelle sono composte da atomi di elio ionizzati (privati di due elettroni). Lo ione elio, infatti, ha massa quadrupla rispetto allo ione idrogeno e, quindi, il rapporto carica/massa è circa metà di quello dello ione idrogeno.

La validità di questa ipotesi fu confermata da Rutherford. Egli fece decadere una sorgente alfa vicino a un vaso di vetro sottile in cui era stato praticato il vuoto; le particelle alfa potevano attraversare il vetro e, quindi, rimanevano intrappolate nel vaso, nel quale dopo pochi giorni si rivelava la presenza di elio.

In seguito, si dimostrò che le particelle beta sono costituite da elettroni (o dalle loro antiparticelle, i positroni) e che i raggi gamma sono radiazioni elettromagnetiche (quindi composti da fotoni) ad alta energia.

Nel 1934 Irene Curie (figlia dei Curie) e il marito Frederic Joliot scoprirono il fenomeno della *radioattività artificiale*, cioè la possibilità di produrre artificialmente elementi radioattivi non presenti in natura e aprirono la strada alla scoperta di un grande numero di isotopi radioattivi artificiali (oggi sono centinaia gli isotopi radioattivi producibili artificialmente).

Proprio lo stesso Becquerel, pochi anni dopo la scoperta della radioattività naturale, doveva accorgersi che le radiazioni scoperte da lui e da Roentgen producono effetti sugli organismi viventi: nasceva quindi da una parte la radioterapia, una nuova disciplina della medicina basata sullo sfruttamento terapeutico degli effetti biologici delle radiazioni, dall'altra la radioprotezione, cioè la disciplina che tratta della protezione dalle radiazioni.

## 1.2 LA STRUTTURA DELLA MATERIA: ATOMI E ISOTOPI

La scoperta della radioattività segnò l'inizio di una complessa attività di ricerca sui costituenti della materia. Nel 1911, a seguito degli esperimenti di diffusione di particelle alfa da parte di lamine metalliche, Rutherford ipotizzò che l'atomo fosse composto da un

nucleo centrale contenente protoni e neutroni e da un determinato numero di elettroni che orbitavano nello spazio pressoché vuoto intorno al nucleo stesso. In condizioni normali ogni atomo è elettricamente neutro, e la carica positiva (il numero) dei protoni è esattamente bilanciata dalla carica negativa (dal numero) degli elettroni.

Il numero degli elettroni - uguale al numero di protoni presenti nel nucleo - determina la specie chimica. L'atomo più semplice (e più leggero) è quello dell'idrogeno, il cui nucleo è formato da un solo protone, e la cui nube elettronica contiene quindi un solo elettrone; l'atomo più complesso (e più pesante) esistente in natura è quello dell'uranio, che conta nel nucleo 92 protoni (e quindi 92 elettroni nella nube esterna) e 146 neutroni.

Un elemento chimico, oltre al numero fisso di protoni che lo caratterizza, può avere un numero variabile di neutroni.

La presenza di un diverso numero di neutroni non ha alcuna influenza sulle proprietà chimiche dell'atomo, ma ha effetto di appesantirlo (più neutroni) o di alleggerirlo (meno neutroni) e, quindi, ne influenza le proprietà fisiche. Gli atomi di uno stesso elemento chimico che differiscono solo per il numero di neutroni contenuti nel nucleo si chiamano *isotopi* di quell'elemento e si indicano associando al nome dell'elemento il numero complessivo delle particelle (protoni e neutroni) presenti nel nucleo (chiamato anche numero di massa) [Bonner N. A. et al., 1951].

### 1.3 DECADIMENTO RADIOATTIVO E RADIAZIONI IONIZZANTI

Alla base delle emissioni radioattive vi è la tendenza di alcuni nuclei a portarsi verso configurazioni sempre più stabili. Così un nucleo che si trova in uno stato eccitato, avente in pratica energia superiore a quella dello stato fondamentale, si libera dell'energia in eccesso emettendo particelle elementari (alfa, beta o neutroni) generalmente accompagnate da radiazioni elettromagnetiche (raggi X, fotoni gamma) [Moroni M., 2001].

Il processo di emissione radioattiva da parte di un atomo è chiamato *disintegrazione* o *decadimento radioattivo* e gli isotopi instabili sono detti *radioisotopi*. A seguito di reazioni nucleari possono essere prodotti isotopi non presenti in natura (almeno in quantità apprezzabili). Questi isotopi, tutti radioattivi, sono indicati come *radionuclidi artificiali*. Gli atomi soggetti a disintegrazione radioattiva generalmente perdono le caratteristiche iniziali, trasformandosi in atomi di altri elementi, che possono essere ancora instabili e decadere a loro volta, fino al raggiungimento di un nucleo stabile: da qui le cosiddette *famiglie radioattive* [Bonner N. A. et al., 1951].

Le radiazioni hanno luogo in tutti quei processi nei quali si verificano emissioni da una sorgente e trasferimento netto nell'ambiente di materia, energia e quantità di moto.

Le radiazioni possono essere distinte in radiazioni corpuscolari, costituite da fasci di particelle elementari, e radiazioni, alle quali è associata la propagazione di una certa quantità di moto, costituite in particolare da onde elettromagnetiche.

In particolare sono dette *ionizzanti* le radiazioni elettromagnetiche ad alta energia (raggi X, raggi  $\gamma$ ) e le radiazioni corpuscolari (raggi cosmici, raggi  $\alpha$  e  $\beta$ ) capaci di interagire con la materia, producendo ionizzazione.

Infatti, una volta emesse, le radiazioni (particelle elementari e onde elettromagnetiche) si muovono attraverso la materia circostante con diverse modalità di interazione con essa e diversa capacità di penetrazione.

Attraversando la materia le radiazioni possono trasferire parte della loro energia (tutta se vengono interamente assorbite) agli atomi o alle molecole, eccitandone gli elettroni, provocando, in tal modo, diversi effetti fisici [Woods J. et al., 1964]. L'effetto più caratteristico che contraddistingue e definisce questa categoria di radiazioni - che sono perciò dette *radiazioni ionizzanti* - è appunto la *ionizzazione*. Infatti, gli atomi di una molecola sono mantenuti uniti dalle forze risultanti dal fatto di cedere o di avere in comune elettroni periferici; se, quindi, l'energia è tale da provocare l'espulsione di uno o più elettroni dall'atomo o dalla molecola di appartenenza, ne deriva uno sconvolgimento della configurazione elettronica esterna, per cui si otterrà un atomo o una molecola ionizzata, cui può far seguito la rottura (*radiolisi*) di legami chimici fra atomi e molecole della materia stessa [Enea, 1999].

L'energia delle radiazioni ionizzanti si esprime in elettronvolt (eV), dove 1eV definisce l'energia cinetica acquistata da un elettrone che si muove in un campo elettrico uniforme sotto la differenza di potenziale di 1 volt.

#### 1.4 LEGGE DI DECADIMENTO

L'attività radioattiva di una sostanza, che si disintegra spontaneamente con emissione di particelle  $\alpha$  o  $\beta$ , risulta sperimentalmente decrescere con andamento esponenziale, caratterizzato dal valore di una costante  $\lambda$ , propria di ciascun nuclide radioattivo, detta *costante di disintegrazione*.

Pertanto, indicando con  $N_0$  il numero di atomi iniziali, con  $N(t)$  il numero di atomi al tempo  $t$ , risulta:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

il numero di disintegrazioni per unità di tempo è direttamente proporzionale al numero di nuclei presenti.

Pertanto, si può scrivere la legge di decadimento, differenziando la prima, come:

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t)$$

dove:

$dN$  = numero di nuclei che decade nel tempo  $dt$ ;

$\lambda$  = costante di decadimento caratteristica di ciascun radionuclide.

Si osservi che il decadimento spontaneo dei nuclei radioattivi segue una cinetica del primo ordine: la diminuzione per unità di tempo del numero di atomi di un elemento radioattivo per disintegrazione spontanea è proporzionale al numero di atomi non ancora disintegrati secondo un fattore di proporzionalità caratteristico  $\lambda$  [Romer A., 2003].

La radioattività è un processo di emissione naturale a carattere stocastico: la legge esponenziale di decadimento radioattivo è stata, infatti, dedotta tenendo solo conto del calcolo della probabilità che ciascun nucleo decada entro un certo tempo.

Inoltre, la forma esponenziale della legge di decadimento indica che ciascun atomo radioattivo di un elemento emettitore ha la stessa probabilità di disintegrazione di tutti gli altri atomi, indipendentemente dalla sua età.

La radioattività va, dunque, intesa come una proprietà intrinseca di ciascun nucleo, non essendo essa influenzata dalla presenza di altri nuclei [M. Moroni, 2001].

## 1.5 PARAMETRI CARATTERISTICI DI UN RADIONUCLIDE

Un nuclide radioattivo può essere caratterizzato dalla velocità con cui si disintegra, dipendente dai seguenti parametri:

- costante caratteristica  $\lambda$  di decadimento, determinabile sperimentalmente;
- vita media, comunemente indicata con  $\tau$ , data dalla somma dei tempi di esistenza di tutti gli atomi divisa per il loro numero iniziale  $N_0$ . Matematicamente, essendo:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

il numero degli atomi esistenti al tempo  $t$  e, visto che ogni singolo atomo può avere statisticamente vita da 0 a  $\infty$ , si avrà:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} N_0 \lambda t e^{-\lambda t} dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

reciproco della costante di decadimento;

- periodo di dimezzamento o emivita:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda} = 0.693\tau$$

rappresenta il tempo necessario affinché la metà degli atomi di un isotopo radioattivo subisca il processo di disintegrazione [Fossati F., 1959].

L'emivita è un parametro indicativo della stabilità che possiede un nucleo; essa fornisce, quindi, un'indicazione numerica sulla durata nel tempo della radioattività di una sostanza, potendo variare dal millesimo di miliardesimo di anno ai cento milioni di miliardi di anni.

Bassi valori del tempo di dimezzamento indicano instabilità, ovvero attitudine del nucleo al decadimento radioattivo; alti valori indicano, di contro, stabilità;

- attività di un radionuclide, ossia il numero di disintegrazioni che il nucleo subisce nell'unità di tempo:

$$A = \lambda N$$

L'unità di misura dell'attività è il Becquerel (Bq) che equivale ad una disintegrazione al secondo. L'attività fornisce un'indicazione sulla frequenza media con la quale una determinata sostanza emette radiazioni. Attraverso il decadimento le sostanze radioattive perdono gradualmente la loro attività. A seconda della sostanza questo processo può essere molto breve (alcuni secondi) oppure molto lungo (milioni di anni).

- Quando l'attività è valutata in rapporto al volume si usa il concetto di concentrazione di attività; per un gas nell'aria viene espressa come Bq/m<sup>3</sup>, in un liquido in Bq/l, in un materiale solido in Bq/Kg.
- potere penetrante che è la capacità di attraversare spessori più o meno rilevanti di materia [Galli G. et al., 1996; [http:// www.radonitalia.it](http://www.radonitalia.it)].

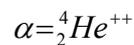
## 1.6 PROCESSI DI DECADIMENTO

Di particolare interesse in ambito radioprotezionistico, sono le sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , costituite da nuclidi di numero atomico  $Z$  maggiore di 82 (piombo) e minore o uguale a 92 (uranio), che sono spontaneamente radioattivi; infatti tali elementi contengono un numero così elevato di nucleoni da compromettere la stabilità nucleare, originando una probabilità non trascurabile che si realizzi spontaneamente una transizione verso strutture sempre più stabili con emissione di particelle  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . [Fossati F., 1959].

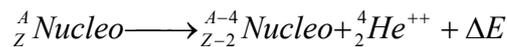
I processi nucleari vengono descritti tramite equazioni bilanciate.

### 1.6.1 DECADIMENTO ALFA

Come già accennato, la radiazione alfa avviene mediante l'emissione di una particella, detta appunto *particella alfa*, costituita da atomi di elio privati di due elettroni ovvero da nuclei di elio di massa 4 e carica 2:



Possiamo descrivere tale tipo di decadimento, per mezzo della seguente equazione di bilancio nucleare:



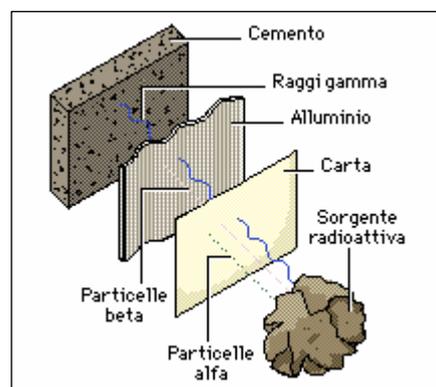
dove la somma dei numeri atomici (pedici), così come quella dei numeri di massa (apici), deve essere uguale al primo e al secondo membro dell'equazione [Romer A., 2003].

Generalmente sono atomi nei cui nuclei sono contenute quantità eccessive di protoni e neutroni ad emettere una radiazione alfa, costituita da un nucleo di elio (due protoni + due neutroni), e avente due cariche positive. Inoltre tale disintegrazione porta alla formazione di un isotopo di un altro elemento chimico, con numero atomico diminuito di due unità e numero di massa diminuito di quattro unità.

Le radiazioni alfa esauriscono la loro energia cinetica in un mezzo solido nello spazio di pochi micrometri; sono prodotte da nuclidi radioattivi e hanno energia raramente inferiore ai 4 MeV e velocità da 15000 a 20000 km/s. Sono dotate di basso potere penetrante (100 volte minore dei raggi beta), potendo essere completamente bloccate da un foglio di carta (Figura 1.1), una lamina dello spessore di 50  $\mu\text{m}$  o dallo strato basale dell'epidermide; con un'energia di almeno 7,5 MeV possono penetrare negli strati esterni dell'epidermide.

I raggi alfa hanno potere ionizzante molto elevato (1000 volte maggiore dei raggi beta), basti pensare che con un'energia di 3 MeV sono capaci di dar luogo a 4000 coppie di ioni per millimetro.

E' proprio la combinazione alto potere ionizzante-debole potere penetrante a



**Figura 1.1** - Potere penetrante delle radiazioni ionizzanti

determinare la pericolosità di tali radiazioni se emesse da una sorgente interna al corpo umano [Moroni M., 2001].

### 1.6.2 DECADIMENTO BETA

Atomi nei cui nuclei sono contenute quantità eccessive di neutroni emettono di solito una radiazione beta, costituita da un elettrone. In particolare, uno dei neutroni del nucleo si disintegra in un protone e in un elettrone, che viene emesso:

$$\beta^- = {}^0_{-1}e$$

L'equazione di bilancio risulta essere:



Si osservi che tale disintegrazione porta alla formazione di un isotopo di altro elemento chimico, avente numero atomico aumentato di una unità (il protone in più) e numero di massa invariato (il protone si è sostituito al neutrone) [Romer A., 2003].<sup>1</sup>

Le radiazioni beta hanno potere penetrante debole (100 volte minore di quello dei raggi gamma e 100 volte più grande di quello delle radiazioni alfa), non superano una barriera dello spessore di 5 mm d'alluminio o 2,5 cm di legno ed inoltre non penetrano per oltre un centimetro lo strato epidermico (figura 1.1). L'energia di tali radiazioni non supera generalmente i 4 MeV.

Sono, inoltre, caratterizzati da un potere ionizzante molto basso ovvero pari a 4 coppie di ioni per millimetro con energia di 3MeV e un livello di pericolosità elevato solo se emesse da una sorgente interna al corpo umano.

### 1.6.3 DECADIMENTO GAMMA

La radiazione gamma ha origine elettromagnetica ed è legata ai campi elettrici dovuti ai protoni nucleari. Essa risulta essere della stessa natura dei raggi X (radiazioni elettromagnetiche ionizzanti), con la differenza che la radiazione X è originata da fenomeni di riassetamento di elettroni orbitali, mentre la radiazione gamma coinvolge fenomeni nucleari.

I raggi  $\gamma$  rappresentano le componenti più penetranti della radiazione. Per queste componenti non è possibile indicare una massima profondità di penetrazione, dal momento

<sup>1</sup> Se le particelle beta sono costituite dai positroni, antiparticelle degli elettroni, si parlerà di decadimento  $\beta^+ = {}^0_{+1}e$ , equazione di bilancio nucleare  ${}^A_Z \text{Nucleo} \longrightarrow {}^A_{Z-1} \text{Nucleo} + \beta^+ + \bar{\nu} + \Delta E$

che esibiscono un assorbimento di tipo essenzialmente esponenziale, ma è possibile indicare solo lunghezze caratteristiche delle curve di attenuazione nei vari materiali. Per attenuare fino a livelli sicuri raggi X e  $\gamma$  di alta energia possono essere richiesti, anche per sorgenti di media attività, consistenti spessori di calcestruzzo (alcuni decimetri) o piombo (alcuni centimetri), destinati ad aumentare anche di un ordine di grandezza per le sorgenti più significative (Figura 1.1). L'energia che contraddistingue tale tipo di radiazione varia generalmente da qualche decina di keV fino a qualche MeV.

Il potere ionizzante che caratterizza le radiazioni gamma è dovuto a ionizzazione indiretta dell'aria per mezzo di elettroni.

Per tali motivi, le suddette radiazioni sono da considerarsi pericolose se emesse da una sorgente interna al corpo umano [Moroni M., 2001].

### 1.7 LA RADIOATTIVITÀ NATURALE

Le radiazioni ionizzanti hanno da sempre accompagnato lo sviluppo dell'ecosistema terrestre, per cui l'uomo è stato esposto sin dalle sue origini a radiazioni naturali che, nonostante il largo impiego di sorgenti radioattive artificiali, rimangono la fonte di maggior contributo alla dose totale ricevuta da un individuo.

Il fondo naturale di radiazione incide significativamente sulle dosi assorbite della popolazione; infatti insieme a quelle derivanti dai trattamenti medici, costituisce la fonte primaria di esposizione della popolazione italiana (Tabella 1.1).

**Tabella 1.1** – Dosi assorbite dalla popolazione per esposizione a sorgenti naturali e miche

FONTE O ORIGINE	DOSE EFFICACE [MSV/ANNO]	
	ITALIANA	MONDIALE
Gamma ambiente nei luoghi chiusi	0.5	0.4
Altre sorgenti naturali	1.0	1.0
Radon indoor e prodotti di decadimento	1.9	1.0
Totale delle esposizioni al fondo naturale	3.4	2.4
Esposizioni mediche	1.8	0.6

In Tabella 1.2 sono mostrati i contributi all'esposizione di un individuo della popolazione a causa del fondo naturale di radiazioni.

**Tabella 1.2 - Esposizione media di un individuo dovuta a fonti di irradiazione naturali presenti nell'ambiente [ANPEQ 2002]**

Fonte	(mSv/anno)
raggi cosmici	0.355
radionuclidi presenti in natura prodotti dalla radiazione cosmica	0.015
<b>radionuclidi primordiali</b>	
Irradiazione esterna	0.41
<sup>40</sup> K	0.18
Famiglie radioattive ( <sup>238</sup> U e <sup>232</sup> Th )	1.42 (*)
<b>Totale</b>	<b>2.38</b>

(\*) estremamente variabile (dipende dal contributo dovuto alla inalazione di radon, gas radioattivo naturale emesso sia dal terreno sia dai materiali di costruzione degli edifici)

## 1.8 GRANDEZZE DOSIMETRICHE

Nel momento in cui un tessuto biologico viene esposto ad un campo di radiazioni ionizzanti s'innescano una serie di processi, originati dal trasferimento di energia delle particelle al mezzo, provocando un determinato effetto.

Il problema principale è quello di mettere in relazione l'effetto prodotto con le caratteristiche fisiche del campo di radiazioni. Dato che tutti gli effetti (biologici, fisici e chimici) indotti dalle radiazioni si manifestano solo quando si ha il trasferimento di energia alla materia, si è introdotta la grandezza fisica della *dose assorbita*: in mezzo (D) è l'energia assorbita per unità di massa del mezzo. In tal caso l'unità di misura intesa come Joule/Kg è il Gray (Gy).

Il grado di rischio derivante dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti non è però solo proporzionale alla dose assorbita, ma è anche strettamente legato al tipo di radiazione incidente e alla radiosensibilità dei vari organi e tessuti irradiati.

La rapidità con cui in un determinato materiale si accumula la dose assorbita si chiama *intensità (o rateo) di dose assorbita*. Si misura in *gray/ora* (Gy/h).

Gli effetti biologici delle radiazioni non dipendono solo dalla dose assorbita dai tessuti, ma anche dalla qualità della radiazione, in rapporto al tempo di esposizione, e dalle condizioni di irraggiamento, in particolare dalla sensibilità specifica degli organi colpiti e dalla rapidità con cui la dose è accumulata.

La radiosensibilità delle cellule, che compongono la materia vivente, dipende dalla loro attività proliferativa, dalla temperatura, dalla composizione del mezzo, dal contenuto di ossigeno nei tessuti (i tessuti privati di ossigeno risentono molto meno gli effetti delle radiazioni ionizzanti); si è inoltre osservato che nelle cellule sono presenti "bersagli", cioè

punti particolarmente sensibili alle radiazioni, e che il numero dei bersagli colpiti dipende da fattori di probabilità e aumenta proporzionalmente alla dose di radiazioni che colpiscono l'aggregato cellulare.<sup>2</sup>

Da tutto ciò, appare evidente che il concetto di dose assorbita non è esaustivo al fine della valutazione dei rischi legati all'esposizione dell'individuo e dei suoi organi alle radiazioni ionizzanti; è per tale motivo che particolare attenzione negli ultimi anni è stata rivolta alla dosimetria radioprotezionistica, il cui scopo è quello di quantificare *indicatori di rischio*, capaci di mettere in relazione la misura della dose assorbita nei tessuti con la diversa sensibilità con cui questi e gli organi critici rispondono alle radiazioni.

- L'indice di valutazione degli effetti biologici delle radiazioni su un singolo organo o tessuto è la **dose equivalente** (H), che tiene conto della qualità della radiazione; il valore di tale grandezza radioprotezionistica si ottiene moltiplicando la dose assorbita dal tessuto biologico (D) per un fattore correttivo che dipende dal tipo di radiazione, detto *fattore di peso della radiazione* o *fattore di qualità* (Q) (in Tabella 1.3):

$$H = D * Q$$

**Tabella 1.3** - *Fattore di peso delle radiazioni per il calcolo della dose equivalente [ICRP,1993]*

<b>TIPO DI RADIAZIONE</b>	<b>FATTORE DI PESO</b>
fotoni in genere	1
raggi X	1
raggi $\gamma$	1
elettroni (particelle $\beta$ ) di tutte le energie	1
neutroni di energia < 10 keV	1
neutroni di energia compresa fra 10 e 100 keV	10
neutroni di energia compresa fra 100 keV e 2 MeV	20
neutroni di energia compresa fra 2 e 20 MeV	10
neutroni di energia maggiore di 20 MeV	5
neutroni di cui non si conosca l'energia	10
protoni di energia superiore a 2 MeV	5
particelle di carica unitaria e massa superiore a 1 amu	10
particelle $\alpha$ , particelle di carica multipla o non conosciuta	20
frammenti di fissione, nuclei pesanti	20

<sup>2</sup> Poiché i tessuti degli organismi viventi sono formati per lo più da acqua, la molecola dell'acqua è quella più comunemente colpita; le radiazioni scindono l'acqua in due radicali liberi, determinando poi il trasferimento di un elettrone da ciascuno dei due radicali ossidrilici all'ossigeno, con formazione di ossigeno ionizzato e di acqua ossigenata; l'ossigeno ionizzato a sua volta può reagire con ioni idrogeno, portando all'ulteriore formazione di acqua ossigenata, potente veleno cellulare a cui si può attribuire la gran parte delle lesioni prodotte dalla radioattività sui tessuti animali.

La dose equivalente si misura in *sievert* (Sv). Una dose equivalente di 1Sv ad un determinato organo comporta, per definizione, lo stesso rischio di effetti stocastici dell'irradiazione dello stesso organo con una dose assorbita di 1Gy di radiazione X o  $\gamma$ .

- Il rischio complessivo cui è soggetto un individuo irradiato, si misura per mezzo della **dose efficace** (E). Tale indice tiene conto della diversa sensibilità ( $F_p$ ) dei vari organi o tessuti del corpo umano alle radiazioni e si ottiene sommando i contributi dovuti a ciascun organo irradiato. Il contributo di un particolare organo è pari alla dose equivalente all'organo (H) moltiplicato per il fattore di peso. In tal modo la dose assorbita viene corretta sia per l'efficacia biologica relativa alla radiazione che per il fattore di rischio dell'organo; di conseguenza, si riesce a quantizzare il danno biologico complessivo.

I fattori di peso sono determinati dalla ICRP (Commissione Internazionale per le Protezioni Radiologiche) in relazione alla sensibilità biologica dei vari organi o tessuti. La dose efficace si misura in *sievert*. Una dose efficace di 1Sv è per definizione equivalente, sotto il profilo del rischio di effetti stocastici, ad un'irradiazione uniforme dell'intero organismo con una dose equivalente di 1Sv a ciascun organo.

- **dose collettiva**: è una grandezza radioprotezionistica che indica l'esposizione della popolazione nel suo complesso; si ottiene sommando le dosi assunte dai singoli individui.

La dose collettiva si esprime in sievert-uomo. Così come la dose efficace quantifica il rischio per il singolo individuo irradiato, e cioè la probabilità che questi sia colpito da un danno biologico, la dose collettiva esprime il corrispondente rischio per la popolazione considerata, cioè la probabilità di effetti biologici attesi su base statistica a seguito dell'irradiazione dell'intera popolazione, o comunque di un consistente numero di individui facenti parte di essa [*Enea, 1999*].

In Tabella 1.4 vengono schematizzate brevemente le principali unità di misura d'interesse radioprotezionistico.

**Tabella 1.4 - Riepilogo delle principali grandezze di interesse radioprotezionistico**

GRANDEZZA	UNITÀ DI MISURA (SI)	VECCHIA UNITÀ DI MISURA	EQUIVALENZA FRA LE UNITÀ
<i>Attività</i>	bequerel (Bq)	curie (Ci)	1 Bq = 2,7x10 <sup>-11</sup> Ci
<i>Tempo di dimezzamento</i>	unità di tempo	unità di tempo	-
<i>Esposizione</i>	coulomb/chilogrammo (C/kg)	röntgen (R)	1 R = 2,58x10 <sup>-4</sup> C/kg
<i>Intensità di esposizione</i>	röntgen/ora (R/h)	röntgen/ora (R/h)	-
<i>Intensità di esposizione</i>	röntgen/ora (R/h)	röntgen/ora (R/h)	-
<i>Dose assorbita</i>	gray (Gy)	rad (rad)	1 Gy = 100 rad
<i>Intensità di dose assorbita</i>	gray/ora (Gy/h)	rad/ora (rad/h)	1 Gy/ora = 100 rad/ora
<i>Dose equivalente</i>	sievert (Sv)	rem (rem)	1 Sv = 100 rem
<i>Intensità di dose equivalente</i>	sievert/ora (Sv/h)	rem/ora (rem/h)	1 Sv/ora = 100 rem/ora
<i>Dose efficace</i>	sievert (Sv)	rem (rem)	1 Sv = 100 rem
<i>Intensità di dose efficace</i>	sievert/ora (Sv/h)	rem/ora (rem/h)	1 Sv/ora = 100 rem/ora
<i>Dose collettiva</i>	sievert-uomo	rem-uomo	1 Sv-uomo = 100 rem-uomo

### 1.8.1 WORKING LEVEL

Andando a considerare un semplice ambiente nella cui atmosfera il Radon entra per emanazione dalle superfici interne e per ventilazione con l'esterno e si suppone un perfetto mescolamento dell'aria ed un'equivalenza di tutte le superfici, il valore d'equilibrio della concentrazione di attività di Radon è dato dall'equazione:

$$C = A + E / (v \cdot V)$$

dove  $A$  è la concentrazione di attività esterna del Radon,  $E$  il rateo di emanazione da tutte le superfici,  $v$  la velocità di ricambio dell'aria nell'ambiente e  $V$  il volume dell'ambiente.

Da tale equazione si può notare come la concentrazione di attività di Radon è quasi inversamente proporzionale alla ventilazione. Se la ventilazione viene bloccata il Radon tende ad accumularsi nell'ambiente e la concentrazione può salire di un fattore pari a qualche unità.

Come già detto la pericolosità del Radon è legata al suo decadimento  $\alpha$  ed ai suoi discendenti, la cui concentrazione in un ambiente è difficile da determinare, non essendo quest'ultimi in equilibrio radioattivo col Radon, a causa delle interazioni con molecole, aerosol e pareti.

Visto che il decadimento  $\alpha$  è il più significativo meccanismo di irradiazione interna, una misura utile della pericolosità di una miscela di discendenti è la totale potenziale energia  $\alpha$  che essa possiede, ossia tutta l'energia che può essere liberata per decadimento  $\alpha$  da quella miscela. L'unità convenzionale di concentrazione di potenziale energia  $\alpha$  è il working level (WL), definito come una qualsiasi combinazione di discendenti del Radon per litro d'aria che corrisponde alla liberazione di  $1.3 \cdot 10^5$  MeV di energia di disintegrazione  $\alpha$ , ciò equivale ad una concentrazione di Radon di  $3700 \text{ Bq/m}^3$  in equilibrio con i suoi discendenti.

Negli ambienti di lavoro l'unità di misura utilizzata è il working level month (WLM) definita come l'esposizione accumulata in un mese lavorativo (170 ore) in un'atmosfera equivalente ad 1 WL.

Un valore tipico di esposizione annua negli edifici è 0.1-0.2 WLM; per confronto l'attuale limite occupazionale per i lavoratori delle miniere, dove le esposizioni sono decisamente più elevate, è di 4 WLM l'anno.

## 1.9 I POSSIBILI DANNI DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

I possibili effetti nocivi delle radiazioni ionizzanti sull'uomo sono la diretta conseguenza della loro capacità di rompere i legami molecolari. Le radiazioni interagendo con un organismo, cedono la loro energia alle cellule che lo compongono e producono, in una prima fase, alterazioni fisiche, poi chimico-fisiche e chimiche e, infine, l'eventuale danno biologico a livello cellulare (vedi Capitolo II). Gli effetti negativi delle radiazioni ionizzanti sull'uomo si distinguono in due categorie:

- *Danni deterministici*: sono di tipo somatico (riguardano l'individuo esposto), insorgono rapidamente dopo l'esposizione e, frequenza e gravità variano con la dose. Generalmente è individuabile una dose soglia al di sotto della quale l'effetto non si manifesta. Inoltre la gravità del danno subito dipende dal tipo di radiazione, dal frazionamento della dose e non ultimo, dalla sensibilità del tessuto e dell'individuo [Vergine A. L. et al, 2003].
- *Danni stocastici* si suddividono a loro volta in:
  - stocastici somatici: insorgono nell'individuo esposto e sono costituite da leucemie, cancro, e tumori solidi; l'Agenzia internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) classifica le radiazioni ionizzanti come agenti cancerogeni di categoria 1;
  - genetici sulla progenie: mutazioni genetiche e aberrazioni cromosomiche, malattie ereditarie sulla prima generazione e quelle successive.

Gli effetti stocastici sono quelli per i quali soltanto la probabilità di accadimento, e non la gravità, è funzione della dose assorbita dall'individuo. Questi effetti hanno in comune le seguenti caratteristiche:

1. non richiedono il superamento di un valore soglia di dose per la loro comparsa;
2. sono aspecifici e a carattere probabilistico: la frequenza di comparsa è proporzionale alla dose assorbita;
3. sono distribuiti casualmente tra individui esposti alla medesima dose;
4. sono dimostrati dalla sperimentazione radiobiologica e, in parte e debolmente, dall'evidenza epidemiologica;
5. l'entità del danno è indipendente dalla dose;
6. sono indistinguibili da effetti simili, comunque riscontrati nella popolazione ed indotti da altri agenti cancerogeni, mutagenie ecc..

### 1.10 LA RADIOPROTEZIONE IN ITALIA

Il sistema della radioprotezione è costituito da diversi organismi tecnico-scientifici e di sorveglianza deputati all'attività di ricerca, di controllo, alle attività amministrative, centrali e periferiche, tutte sinergicamente concentrate a minimizzare il rischio radiologico nel rispetto dei principi fondamentali e della normativa vigente in materia di tutela dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente.

In particolare in Italia, in cui esiste un *regime giuridico dell'impiego pacifico dell'energia nucleare*, nonostante la chiusura delle centrali nucleari e delle installazioni del ciclo di combustibile, rimane forte l'esigenza di un sistema di radioprotezione efficiente, capace di gestire l'eredità del nucleare pregresso (impianti dismessi, rifiuti radioattivi per i quali rimane ancora il problema del traffico illecito), e di fronteggiare l'estensivo utilizzo di sorgenti radioattive artificiali a scopi industriali, di ricerca, sanitario, nonché di rispondere alle esigenze di protezione contro i rischi derivanti dall'esposizione da radiazioni naturali, in particolare al *Radon*.

In tutti i paesi il sistema di radioprotezione si esplica per mezzo di:

- un organismo (*Nuclear regulatory body* o Autorità nazionale per la sicurezza nucleare) cui è affidato il compito di vigilanza, licensing (autorizzazioni), ispezione ed emanazione di norme tecniche;
- istituzioni a carattere tecnico-scientifico cui competono le attività di ricerca e di qualificazione, quest'ultima necessaria per le attività di dosimetria (interna ed esterna) e di taratura della strumentazione.

In particolare in Italia:

- la funzione del Nuclear Regulatory Body è esercitata, ai sensi del decreto legislativo n. 230/95, dall'ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente), che svolge attività di vigilanza su tutti gli aspetti della radioprotezione, e cioè sulla sorveglianza fisica e medica dei lavoratori, sulla radioprotezione della popolazione e sulla sorveglianza e monitoraggio ambientale;

Ricordiamo che funzioni di vigilanza in materia di radioprotezione sono attribuite anche agli organi del Servizio Sanitario Nazionale (SSN) competenti per territorio ed agli Ispettorati del lavoro;

- gli organismi che svolgono attività di ricerca sono diversi, tra i più importanti ricordiamo l'Istituto per la Radioprotezione (IRP) dell'ENEA, l'Istituto Superiore di Sanità (ISS), il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e le strutture universitarie;
  - le attività di qualificazione dei servizi di radioprotezione, in particolare dosimetrie e taratura sono principalmente svolte dall' ENEA-IRP;
  - le attività operative di sorveglianza sono affidate, sotto il controllo dell'ANPA e delle restanti autorità di controllo, agli esercenti che svolgono le attività, tra cui si segnalano, per quanto riguarda le installazioni o applicazioni tipicamente nucleari, l'ENEA e l'ENEL [*World Health Organization, 2005; Enea, 1999*].

### 1.11 I PRINCIPI DELLA RADIOPROTEZIONE

La radioprotezione, intesa come protezione dell'ambiente e della popolazione (individui in generale, lavoratori, soggetti sottoposti a pratiche mediche di diagnosi) dagli effetti dannosi delle radiazioni ionizzanti, si esplica per mezzo di criteri e principi cardine, continuamente aggiornati in funzione ai nuovi risultati della ricerca scientifica e al progresso tecnologico.

Durante il II Congresso Internazionale di Radiologia, tenutosi nel 1928, venne formata la prima commissione internazionale scientifica in materia di radioprotezione che vanta i massimi esperti nel settore, nota inizialmente come *Commissione Internazionale per la protezione dai raggi X e dal Radio*, in seguito denominata *Commissione Internazionale per le Protezioni Radiologiche* (ICRP), il cui scopo è quello di emanare procedure e criteri per la tutela degli individui dalle radiazioni, sulla base, non solo dei risultati della ricerca scientifica, ma soprattutto considerando i principi sociali su cui poter fondare i provvedimenti di protezione radiologica, demandando il compito di redigere le norme tecniche e le disposizioni di legge ai vari organismi nazionali di protezione.

Dagli studi statistici si evince che non esiste prova dell'esistenza di una soglia al di sotto della quale non sia associato un rischio di danno: è questo il primo fondamento dal

quale si è partiti per edificare il complesso sistema della radioprotezione i cui principi cardine, dettati dall'ICRP, sono i seguenti:

- **principio di giustificazione:** *nessuna attività umana che esponga l'individuo o la collettività a dosi aggiuntive di radiazioni deve essere accolta o proseguita a meno che non si dimostri che i benefici prodotti da essa non siano superiori agli effetti negativi statisticamente prevedibili;*
- **principio di ottimizzazione (ALARA= as low as reasonably achievable):** *l'esposizione della popolazione deve essere mantenuta la più bassa ragionevolmente possibile tenendo conto di fattori sanitari, economici e sociali;*
- **principio di limitazione del rischio individuale:** *le dosi individuali, anche se ammissibili sulla base dei principi di giustificazione e di ottimizzazione, non devono comunque eccedere specifici limiti determinati in modo tale da garantire che i rischi per la salute del singolo individuo non raggiungano livelli giudicati inaccettabili. Il principio di limitazione del rischio individuale si estrinseca con la definizione di limiti di dose che, date le premesse di partenza e in particolare l'ipotesi di linearità senza soglia, comportano necessariamente un bilancio comparato fra il rischio radiologico e i rischi di diversa origine comunemente accettati dalla comunità nella vita sociale e nelle attività lavorative.*

L'ICRP, inoltre, ha il compito di emanare i limiti di dose attraverso un'attenta analisi tra il rischio di danno delle cellule viventi, conseguente all'assunzione di una determinata dose, e il rischio cui è sottoposto l'individuo nel corso della propria vita sociale e lavorativa.

L'elaborazione del rapporto dose-rischio è dovuta principalmente ad osservazioni epidemiologiche che riguardano principalmente le esposizioni alle alte dosi. Ma, il campo di interesse prevalente della radioprotezione è quello delle piccole dosi, i cui effetti vengono valutati mediante l'ipotesi di linearità tra dose ed effetto, ipotesi che ha carattere cautelativo, poiché porta a sovrastimare gli effetti delle basse dosi.

Il criterio attraverso cui vengono determinati i limiti di dose dall'ICRP (Tabella 1.5) è, dunque, quello di considerare ammissibile una dose di radiazione cui è associato un rischio statistico potenziale di malattia o di decesso analogo agli altri fattori di rischio cui è comunemente esposto l'individuo; in tal modo i valori di dose considerati accettabili per gli individui facenti parte della popolazione (non lavoratori) sono stati valutati nella misura di 1/10 di quelle ammissibili per lavoratori esposti a radiazione, poiché le attività lavorative sottopongono l'individuo a rischi di danno superiori a quelli cui un individuo è comunemente assoggettato nella propria vita quotidiana. L'ulteriore restrizione di dose è, inoltre, giustificata dal fatto che l'individuo comune non è soggetto a continui rilievi dosimetrici richiesti per i lavoratori con riconosciuto rischio radiologico.

**Tabella 1.5 - Limiti di dose in aggiunta al fondo naturale e alle pratiche mediche. (Fonte: ICRP, D.Lgs. 230/95)**

<b>Categoria di Persone</b>	<b>Limiti di Dose</b>
<b>Individui della popolazione in generale</b>	
- dose efficace	1 mSv/anno
- dose equivalente al cristallino	15 mSv/anno
- dose equivalente alla pelle	50 mSv/anno
- dose equivalente a mani, avambracci, piedi, caviglie	50 mSv/anno
<b>Lavoratori esposti</b>	
- dose efficace	100 mSv in 5 anni, con massimo di 50 mSv/anno nel periodo
- dose equivalente al cristallino	150 mSv/anno
- dose equivalente alla pelle	500 mSv/anno
- dose equivalente a mani, avambracci, piedi, caviglie	500 mSv/anno

## 1.12 LA NORMATIVA NAZIONALE DI RADIOPROTEZIONE

Intensa è l'attività normativa in materia di radioprotezione a livello europeo e a livello nazionale: l'Unione Europea promuove un consistente programma di studio e pubblica frequenti Guide e Rapporti tecnici di riferimento sulle tematiche emergenti di radioprotezione, preparati da gruppi di esperti formati ai sensi dell'art. 31 del trattato Euratom, il Consiglio dei Ministri dell'Unione Europea emana regolamenti e Direttive rivolte ai governi il cui recepimento è obbligatorio per gli Stati membri; la Commissione Europea pubblica Raccomandazioni basilari per le applicazioni operative.

La Direttiva 96/29 Euratom stabilisce le norme più aggiornate.

L'ANPA, col consenso degli altri enti ed organismi interessati, emana Guide Tecniche a livello nazionale, contenenti norme di buona tecnica in materia di sicurezza nucleare e protezione sanitaria.

La legge di riferimento in materia di protezione sanitaria dei lavoratori e della popolazione contro i rischi legati alle radiazioni ionizzanti è rappresentata dal *Decreto Legislativo 17 marzo 1995, n. 230* che delinea i principi generali della radioprotezione.

Successivamente, a seguito della delega contenuta nella legge comunitaria n. 25/99 è stato emanato il Decreto Legislativo del 26 maggio 2000, n.241 "*Attuazione della direttiva 96/29/Euratom in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti*", pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 203 del 31 agosto del 2000 sul supplemento ordinario n.104, che apporta significative modifiche al predetto D.Lgs. 230/95 ampliando e regolamentando le relative disposizioni

sulla radioprotezione *a tutte le attività lavorative*, sono escluse le abitazioni civili, *che implicano la presenza di sorgenti naturali di radiazioni*.

In particolare le attività lavorative considerate (art. 10-bis, comma 1) sono quelle che:

- a) espongono i lavoratori e, in genere, gli individui ai prodotti di decadimento del radon, del toron o delle radiazioni  $\gamma$  in particolari ambienti lavorativi quali tunnel, sottovie, catacombe, grotte e, *comunque, in tutti i luoghi sotterranei* (interrato, metropolitane, fogne, etc.);
- b) ricadono in zone a rischio di esposizione a radon, toron e radiazioni  $\gamma$  che dovranno essere mappate dalle regioni e province autonome, in tal caso sono inclusi seminterrati e piano terra degli ambienti di lavoro;
- c) implicano l'uso o lo stoccaggio dei cosiddetti *NORM* e che, quindi, comportano la produzione di residui, che sono *materiali abitualmente non considerati radioattivi, ma che contengono radionuclidi naturali* in quantità tali da provocare *un aumento significativo dell'esposizione dei lavoratori e, eventualmente, di persone del pubblico*; come ad esempio:
  - industria dei fertilizzanti, che utilizza minerali fosfatici;
  - lavorazioni di minerali da estrazione: stagno, ferro-niobio da pirocloro e alluminio da bauxite;
  - lavorazione di sabbie zirconifere e produzione di materiale refrattario (smalti e piastrelle);
  - lavorazione di terre rare;
  - lavorazione ed utilizzo di composti del torio, produzione di lenti e di vetri nell'industria ottica, reticelle per lampade a gas;
  - produzione di pigmento di biossido di titanio;
  - estrazione e raffinazione del petrolio ed estrazione di gas (presenza e rimozione di fanghi e incrostazioni in tubazioni e contenitori);
- d) stabilimenti termali e attività estrattive *non disciplinate dal capo IV*;
- e) settore aeronautico, per quanto riguarda il personale navigante.

Come si può notare le *pratiche a) e b)* si riferiscono all'esposizione a radiazioni ionizzanti in ambiente interno (*indoor*).

Il decreto, inoltre, prevede, per tutte le attività sopradette, una serie di obblighi di monitoraggio per gli esercenti che, entro ventiquattro mesi dall'inizio dell'attività, devono provvedere, a seconda dei casi, a misurazioni delle concentrazioni di attività medie-annue del gas radon in aria, come indicato nell'Allegato 1-bis, al fine di valutarne i livelli di azione nei luoghi di lavoro.

In particolare per i lavoratori nelle attività indoor, il livello di azione, come riportato nell'Allegato 1-bis, è riconosciuto essere pari a  $500 \text{ Bq/m}^3$  medi annui (che corrispondono a  $3 \text{ mSv/anno}$  per  $2.000$  ore lavorative).

Il superamento di tale valore comporta l'obbligo per il datore di lavoro di adottare azioni di rimedio al fine di riportare la dose al di sotto del predetto livello.

In particolare, le azioni di intervento possono essere così sintetizzate, se la misura della concentrazione del radon indoor è:

- minore di  $400 \text{ Bq/m}^3$ : nessun obbligo, l'esercente eseguirà un controllo radiometrico, solo nell'ipotesi in cui variano le condizioni di lavoro;
- compresa tra  $400\text{-}500 \text{ Bq/m}^3$ : l'obbligo si assolve effettuando la misura entro 1 anno;
- maggiore di  $500 \text{ Bq/m}^3$ : l'esercente è tenuto a darne comunicazione all'Azienda Sanitaria Locale competente per il territorio (ASL), all'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente (ARPA) e alla Direzione provinciale del lavoro; avvalersi di un Esperto qualificato per porre azioni di rimedio e di bonifica entro tre anni e ripetizione della misura per verificare l'efficacia di intervento. Qualora la nuova misura non sia minore del livello d'azione, si applicano gli adempimenti, descritti al Capo VIII: sorveglianza fisica e sanitaria effettuata rispettivamente dall'esperto qualificato e dal medico autorizzato, fino a quando nuovi interventi di bonifica non risultino efficaci.

Si vuole ancora una volta sottolineare che i limiti di dose indicati nella normativa hanno soprattutto un significato di livelli operativi da rispettare come ulteriore garanzia personale, nel senso che l'esposizione occasionale a dosi superiori ai limiti di legge, non comporta necessariamente un rischio di danno biologico, ma soprattutto indica una non efficienza delle misure di prevenzione. Tale osservazione è tanto più giustificata se si pensa che per i danni stocastici associati all'esposizione da radiazioni ionizzanti, in particolare ci riferiamo a malattie degenerative (tumori e leucemie) viene, come più volte sottolineato, adottata dagli esperti l'ipotesi di linearità senza soglia.

Non si deve sottovalutare il fatto che i livelli di riferimento citati nel D. Lgs. sono livelli normativi e non soglie di pericolo in quanto il rischio di tumore polmonare associato all'esposizione al Radon è, allo stato attuale delle conoscenze, un effetto senza soglia.

Il decreto legge, inoltre, responsabilizza regioni e province che, sulla base delle linee guida e dei criteri emanati dalla Commissione tecnica per le esposizioni a sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti (articolo 10-septies), sono chiamate ad individuare, entro il 31 agosto 2005, zone o luoghi di lavoro con caratteristiche determinate ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon.

Inoltre, per quanto riguarda la protezione sanitaria dei lavoratori, le modifiche più importanti riguardano:

- art. 64 che prevede l'inclusione tra i lavoratori tutelati dei lavoratori autonomi anche quando lavorano presso strutture autonome;
- art.69 che interessa la protezione delle lavoratrici gestanti, la modifica oltre che introdurre un limite di dose per il nascituro, vieta l'attività di tali lavoratrici in zone controllate o sorvegliate (Enea, 1999; D.Lgs. 26 maggio 2000, n.241).

Come accennato precedentemente, la normativa vigente in materia di protezione dalle radiazioni ionizzanti (D.Lgs. 230/95 e sue successive modificazioni) disciplina anche le attività lavorative svolte in luoghi sotterranei al fine della tutela dei lavoratori dai rischi dovuti all'esposizione da radioattività naturale.

Per adibire tali luoghi al lavoro, devono essere tenute presenti le limitazioni ed i divieti posti dai regolamenti comunali edilizi e dalle norme generali per l'igiene del lavoro.

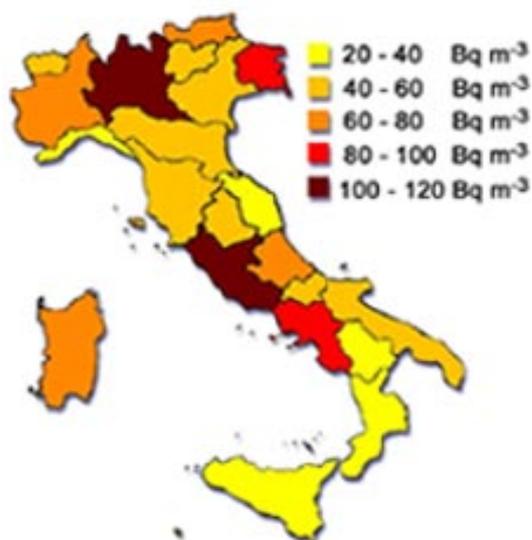
In particolare, in materia di igiene del lavoro, l'art. 8 del DPR 303/56 vieta di adibire al lavoro i locali chiusi sotterranei (locali interrati) e semisotterranei (locali seminterrati) e prevede la possibilità di deroga a tale divieto solo nei seguenti casi:

- quando sussistano particolari esigenze tecniche ed in questi casi si deve provvedere con mezzi idonei all'aerazione, all'illuminazione e alla protezione contro l'umidità;
- quando vi sia espresso consenso dell'organo di vigilanza (Servizio di Prevenzione e Sicurezza negli Ambienti di Lavoro delle ASL), purchè le lavorazioni non diano luogo a emanazioni nocive, non esponano a temperature eccessive e siano rispettate le norme di sicurezza e di igiene.

Luoghi di lavoro sotterranei si possono riscontrare frequentemente nel caso di esercizi pubblici, musei, ospedali, mense, banche e più di rado in altri tipi di attività quali uffici, ambulatori, lavoratori artigianali e attività industriali [Conferenza dei Presidenti delle Regioni e delle Province Autonome di Trento e Bolzano, 2003].

### 1.13 LA SITUAZIONE IN ITALIA

Il Comitato Scientifico delle Nazioni Unite sugli Effetti della Radiazione Atomica (UNSCEAR) ha stimato che la concentrazione media mondiale di radon indoor è di 40 Bq/m<sup>3</sup>: un'indagine svolta in Italia tra la fine degli anni '80 e gli anni '90 del secolo scorso, sotto il coordinamento dell'Istituto Superiore di Sanità e dell'Agenzia Nazionale per la Protezione Ambientale (ANPA ora APAT) ha stimato che la concentrazione media di radon indoor nelle abitazioni italiane è di **77 Bq/m<sup>3</sup>**, e in particolare per la regione Calabria rientrante in un range di **20-40 Bq/m<sup>3</sup>**.



**Figura 1.2** – Concentrazione media di Radon in Italia

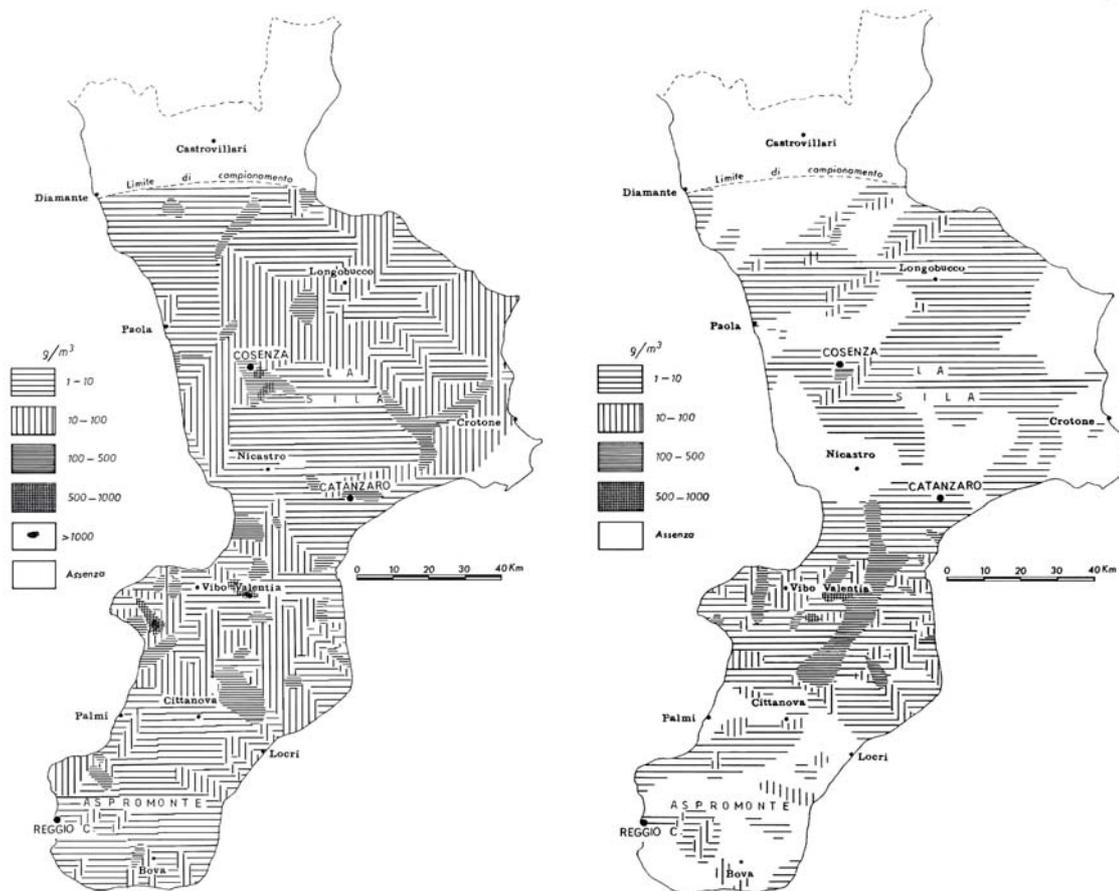
L'Italia, pertanto, è caratterizzata da una concentrazione di radon indoor circa doppia rispetto a quella media mondiale.

Inoltre va sottolineato che in Calabria l'origine di anomalie radioattive è legata alla presenza di consistenti accumuli di minerali thorio-uraniferi legati sia caratteri geologici locali che alla conformazione sostanzialmente granitico/metamorfica del basamento cristallino dell'Arco Calabro Peloritano.

### 1.13.1 RISULTATI PROSPEZIONI REGIONALI

I risultati delle indagine sulla distribuzione dello zirconio e della monazite, sono stati raggruppati in Figura 1.3, in zone di isoconcentrazione alluvionale [Brondi A. et al., 1972].

Facendo una correlazione tra le due carte della Calabria si nota che la monazite è distribuita in modo meno uniforme rispetto allo zirconio. Nella maggior parte della Calabria (Sila, Catena Costiera e Aspromonte) si hanno basse (o nulle) concentrazioni di zirconio. Valori maggiori si rilevano, invece, nell'alta valle del Crati e nelle zone del massiccio delle Serre e di Monte Poro. Valori bassi si rilevano nell'Aspromonte. La monazite, invece, presenta valori medio-alti solo in alcune zone limitate della Calabria.



**Figura 1.3** – Distribuzione areale dello zircone (a sinistra) e della monazite (a destra) in Calabria

In particolare nell’Aspromonte i valori sono bassi, mentre nelle Serre e a Monte Poro continuano ad essere elevati anche i tenori di monazite (Tabella 1.6).

Da qui si può notare che l’area di Monte Poro, rispetto alle altre prese in considerazione, è maggiormente capace di alimentare in zircone e monazite, liberati nei processi di erosione, eventuali depositi detritici secondari.

**Tabella 1.6** – Fondo medio alluvionale di zircone e monazite.

	<b>g/m<sup>3</sup> di zircone</b>	<b>g/m<sup>3</sup> di monazite</b>
Sila e Catena Costiera	50	15
Monte Poro	180	70
Serre	40	50
Aspromonte	10	2

## CAPITOLO II

### IL RADON

Il radon ed i suoi prodotti di decadimento sono uno degli argomenti di maggiore attualità nell'ambito dei fattori fisici di rischio ambientale. Nell'uso comune il termine Radon è riferito al solo  $^{222}\text{Rn}$ , l'isotopo più abbondante in natura.

#### 2.1 CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE

Il Radon è un gas nobile, pertanto chimicamente inerte, cioè non crea legami di nessun tipo con atomi o molecole dell'ambiente circostante. Inoltre è un gas radioattivo incolore estremamente volatile prodotto dal decadimento di tre nuclidi capostipiti che danno luogo a tre diverse famiglie radioattive; essi sono l'Uranio-238 il Torio-232 e l'Uranio-235.

A tal fine può diffondersi liberamente da un materiale all'altro o essere trasportato in qualsiasi mezzo ad esso accessibile senza cambiare le proprie caratteristiche fisiche (Tabella 2.1) [Tommasino L., 1995].

*Tabella 2.1- Caratteristiche chimico-fisiche del Radon.*

Numero atomico	86
Densità alla pressione di 1 atm a 0 °C	9.96 Kg/m <sup>3</sup>
Punto di ebollizione	- 61.8 °C
Densità del liquido al punto di ebollizione	4.4 g/cm <sup>3</sup>
Coefficiente di diffusione in aria	0.1 cm <sup>2</sup> /s
Coefficiente di diffusione in acqua	10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s
Viscosità alla pressione di 1 atm a 20 °C	0.220 poise
<i>Coefficiente di solubilità in acqua in funzione della temperatura</i>	
0 °C	570 cm <sup>3</sup> /Kg
20 °C	250 cm <sup>3</sup> /Kg
37 °C	167 cm <sup>3</sup> /Kg
100 °C	106 cm <sup>3</sup> /Kg
<i>Coefficiente di solubilità a 18° C in:</i>	
Glicerina	0.20 cm <sup>3</sup> /Kg
Alcool etilico	7.40 cm <sup>3</sup> /Kg
Petrolio	9.20 cm <sup>3</sup> /Kg
Toluene	13.24 cm <sup>3</sup> /Kg
Esano	16.56 cm <sup>3</sup> /Kg
Olio d'oliva	29.00 cm <sup>3</sup> /Kg

Il Radon è quindi moderatamente solubile in acqua, pertanto può essere presente nelle acque di percolazione. La sua solubilità dipende dalla temperatura dell'acqua ed aumenta col diminuire del valore della stessa temperatura.

Inoltre oltre ad essere solubile nei solventi organici, ha una spiccata tendenza ad essere adsorbito su matrici attive quali carbone attivo e gel di silice.

Rispetto agli altri gas nobili, esso risulta il più pesante (8 volte più denso dell'aria), con il più alto punto di fusione, con la maggior temperatura critica e con la più elevata pressione critica.

## 2.2 DECADIMENTO RADIOATTIVO

In natura esistono 4 famiglie radioattive com'è elencato in Tabella 2.2.

*Tabella 2.2 – Le serie radioattive presenti in natura*

Nome della serie	Capostipite	Tempo di dimezzamento (anni)	Nuclide stabile
Torio	$^{232}\text{Th}$	$1.41 \times 10^{10}$	$^{208}\text{Pb}$
Nettunio*	$^{237}\text{Np}$	$2.14 \times 10^6$	$^{209}\text{Bi}$
Uranio	$^{238}\text{U}$	$4.47 \times 10^9$	$^{206}\text{Pb}$
Attinio	$^{235}\text{U}$	$7.04 \times 10^8$	$^{207}\text{Pb}$

\*artificiale

I capostipiti hanno emi-vite medie comparabili con l'età della terra ( $4.5 \times 10^9$  anni) [Eisenbud M. et al., 1989], fatta eccezione per il Nettunio, scoperto recentemente tra i radionuclidi artificiali, che non è presente in natura in quanto ha, insieme ai nuclidi figli, tempi di dimezzamento inferiori rispetto alla vita della terra: risulta perciò presente solo l'isotopo stabile del  $^{209}\text{Bi}$ .

L'irradiazione del corpo umano da sorgenti esterne è dovuta principalmente dalla radiazione gamma, da radionuclidi che provengono dalle serie radioattive dell' $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  (Figura 2.1).

Per l'elevata abbondanza del capostipite ( $^{238}\text{U}$ ) e per l'elevato tempo di dimezzamento del  $^{222}\text{Rn}$ , la catena di decadimento dell' $^{238}\text{U}$  è considerata la più importante in termini di attività alfa ambientali.

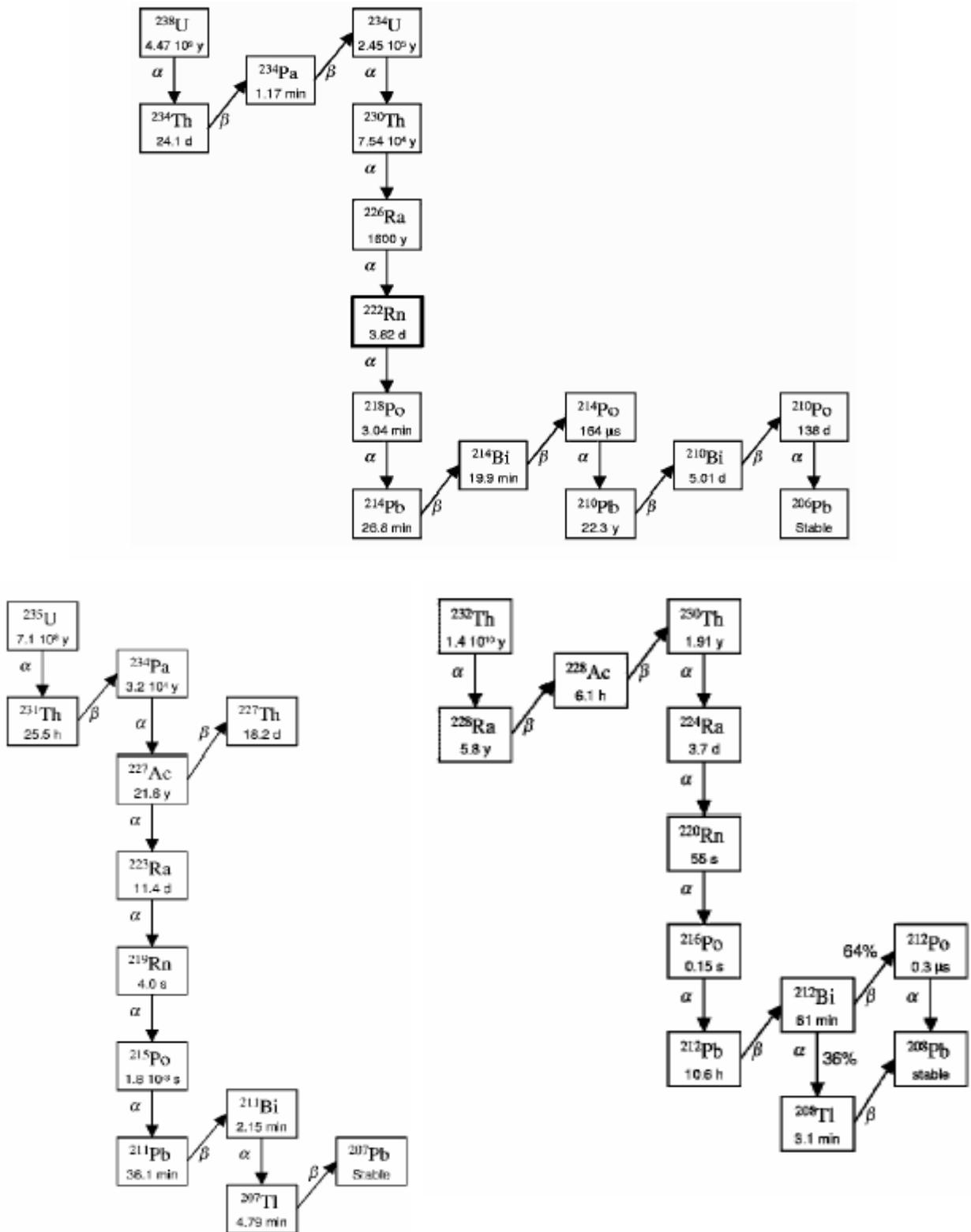


Figura 2.1 – Serie radioattiva dell'Uranio-235 e del Torio-232

L'irradiazione, interna ed esterna, del corpo umano è causata in massima parte dai radioisotopi delle famiglie dell'uranio e del torio. Ai fini dell'esposizione (esterna) umana i radioisotopi naturali più importanti sono il  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ , il  $^{232}\text{Th}$  e i discendenti di questi ultimi

due (specie il  $^{226}\text{Ra}$ , il  $^{220}\text{Rn}$ , il  $^{222}\text{Rn}$ , il  $^{210}\text{Po}$  e il  $^{210}\text{Pb}$ ), tutti presenti nelle principali matrici ambientali e nei materiali impiegati nella costruzione degli edifici ed importanti ai fini della valutazione della dose. In realtà il contributo maggiore alla dose deriva dai figli del Radon piuttosto che dal gas stesso e principalmente dalla loro inalazione in ambienti indoor.

La concentrazione di attività del  $^{40}\text{K}$  nel suolo è dell'ordine di grandezza più alto rispetto ai nuclidi appartenenti alle catene di Uranio e Torio. I valori medio di concentrazione dei principali radionuclidi d'interesse ai fini dell'esposizione esterna sono 400, 35 e 30 Bq/Kg rispettivamente per  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ .

Per quanto riguarda i tre isotopi del radon ( $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ), questi si diffondono negli ambienti interni mescolandosi con l'aria e dando luogo a fenomeni di accumulo [Enea, 1999].

Il più rilevante è il  $^{222}\text{Rn}$  appartenente alla famiglia dell' $^{238}\text{U}$ , che costituisce l'isotopo più significativo dal punto di vista radioprotezionistico, in quanto:

- il suo capostipite ( $^{238}\text{U}$ ) è ancor oggi molto abbondante in natura;
- si accumula più facilmente nell'ambiente, avendo un tempo di dimezzamento più lungo ( $T = 3,823$  giorni) e decade emettendo radiazioni  $\alpha$ ;
- progenitore di due altri elementi radioattivi ( $^{218}\text{Po}$  e il  $^{214}\text{Po}$ ) a breve vita (dell'ordine dei minuti e dei millisecondi rispettivamente) a loro volta  $\alpha$  emettitori, definiti "prodotti di decadimento" o "figli" del radon, che vengono a trovarsi sospesi e quindi inalati, causando conseguenze radiobiologiche sui tessuti dell'apparato respiratorio.

Meno rilevante è l'emanazione del  $^{220}\text{Rn}$  (Toron), appartenente alla famiglia del  $^{232}\text{Th}$ , che, in virtù del suo tempo di dimezzamento molto più breve ( $T = 55$  s), può decadere con maggiore probabilità nei prodotti solidi suoi discendenti prima di raggiungere l'atmosfera.

Trascurabile ai fini radioprotezionistici è l'emanazione di  $^{219}\text{Rn}$  (Attinon), sia per il brevissimo tempo di dimezzamento ( $T = 4,0$  s) sia per la bassa frazione del capostipite della famiglia cui appartiene, l' $^{235}\text{U}$ , nell'uranio naturale (0,725%) [ANPEQ 2001].

## 2.3 GEOCHIMICA DEI RADIOELEMENTI

Ci sono importanti similarità ed importanti differenze nel comportamento geochimico dei radioelementi che ne controllano la distribuzione nell'ambiente naturale (rocce, minerali, suolo e acqua della crosta terrestre) e che dovrebbero essere comprese prima di condurre ogni genere di prospezione radiometrica.

### 2.3.1 GEOCHIMICA DELL'URANIO

L'uranio presenta due stadi di ossidazione: uno esavalente e uno quadrivalente. In condizioni quadrivalenti uranio e torio hanno un comportamento simile, andando a formare

diverse serie di minerali isomorfi. Nello stato esavalente, invece, l'uranio può formare lo ione uranile  $UO_2^{++}$ , che, essendo solubile e quindi molto mobile, in condizioni favorevoli può concentrarsi, così da subire in condizioni idrotermali un trasporto, separandosi dal torio e dal potassio. La concentrazione relativa di uranio rispetto al torio e al potassio è un importante fattore diagnostico attraverso la misura dei raggi gamma per il riconoscimento di possibili depositi di uranio. Mentre la concentrazione assoluta dei radioelementi, misurata in un'indagine specifica, può essere molto variabile e dipendere da fattori quali la grandezza dell'affioramento, la distanza tra l'esposizione e l'orizzontale ecc., i rapporti tra la concentrazione dei radioelementi osservati sono più o meno affetti da questi fattori incontrollabili e possono fornire un primo indizio di un arricchimento di uranio in un'area.

Il diverso comportamento dei due ioni è di fondamentale importanza per comprendere la distribuzione geologica del Radon :

- lo ione tetravalente, fortemente insolubile, può combinarsi con l'acqua in forma di idrossido di uranio,  $U(OH)_4$ , che si fissa immediatamente;
- lo ione esavalente, estremamente solubile, forma diversi ioni complessi con l'ossigeno  $O^{2+}$  e con il carbonato  $CaCO_3CO^{2+}$ .

Poiché il carbonato è presente nella maggior parte dell'acqua di superficie, il complesso carbonato di Uranio diventa il più comune veicolo di trasporto dell'Uranio in natura.

### 2.3.2 GEOCHIMICA DEL TORIO

Le somiglianze del comportamento geochimico tra uranio e torio in condizioni ipogeniche sono note da tempo. Il torio non è soggetto a lisciviazione nella maggior parte delle condizioni supergeniche e si trova soprattutto nei minerali pesanti refrattari che nelle suddette condizioni possono concentrarsi come resti residuali in cappellacci lateritici, o nei cosiddetti placer costieri (depositi sabbiosi ad alta concentrazione di minerali).

In rocce ignee primarie alcuni carbonati sono fortemente arricchiti in torio, che è indicativo della presenza di altre terre rare.

### 2.3.3 GEOCHIMICA DEL POTASSIO

La geochimica del potassio è ben conosciuta. Alcuni tipi di mineralizzazioni d'uranio sono accompagnati da metasomatismo sodico, in queste condizioni il sodio inizialmente sostituisce il potassio nei minerali che formano le rocce e in seguito aumenta il rapporto U/K, in particolare dove ci sono significative mineralizzazioni d'uranio.

## 2.4 MINERALI ABBONDANTI NELLE ROCCE CROSTALI

L'Uranio e il Torio sono quindi i capostipiti di tutto il Radon presente sulla Terra. La genesi del substrato roccioso gioca, quindi, un ruolo fondamentale in quanto la concentrazione di  $^{238}\text{U}$  e di  $^{232}\text{Th}$  varia a seconda del tipo di roccia presente, come si può osservare in Tabella 2.3.

**Tabella 2.3** - Contenuto in Bq/Kg di Uranio e Torio in diversi tipi di rocce

Rocce	$^{238}\text{U}$ (Bq/Kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/Kg)
<i>Calcari</i>	27	7
<i>Rocce carbonatiche</i>	26	8
<i>Arenarie</i>	18	11
<i>Granito</i>	59	81
<i>Basalto</i>	11	11
<i>Sieniti-nefeline</i>	100	69

Normalmente la relativa abbondanza dell'uranio, del torio e del potassio resta abbastanza costante durante i vari intervalli di cristallizzazione. Inoltre questi tre elementi hanno affinità con l'ossigeno e presentano un largo raggio ionico, fattori questi che controllano la cristallochimica. Le differenze nel comportamento geochimico diventano ovvie in condizioni fortemente ossidanti che possono esistere dopo la formazione delle pegmatiti, o in condizioni supergeniche.

Questa situazione si presenta perché i minerali isomorfi dell'uranio e del torio (vedi paragrafo precedente) possono trovarsi come minerali accessori nei granitoidi o concentrarsi nelle pegmatiti. Evidentemente non ci sono grandi differenze di mobilità tra l'uranio quadrivalente, il torio e il potassio durante la formazione delle rocce ignee. I carbonati, invece rappresentano l'eccezione. Come si può ben vedere il contenuto di U + Th nelle rocce aumenta con l'aumentare del contenuto in silice: per questo motivo questi elementi sono molto abbondanti nelle rocce granitiche (acide), piuttosto che nelle rocce basaltiche (basiche).

Infatti in rocce come la diorite, la quarzodiorite, la granodiorite e il granito presentano una concentrazione di uranio compreso tra 2 a 5 ppm, mentre nei basalti vi è una concentrazione di 1 ppm. L'uranio, è particolarmente soggetto a subire l'effetto del dilavamento dell'acqua percolante nel terreno, e dell'acqua di falda, vista la sua collocazione sulla superficie dei granuli, nelle fenditure e nei difetti dei cristalli. Nelle rocce alterate l'uranio, nella sua serie di decadimento, lo si trova facilmente come radon.

Nella Tabella 2.4 sono indicate le concentrazioni dei tre radioelementi (potassio, uranio, torio) nei tipi di roccia più comuni. Nel complesso nelle rocce ignee, nelle quali rientrano anche le pegmatiti, entrambi i tre radioelementi sono più abbondanti, subordinatamente all'aumento del contenuto in silice.

**Tabella 2.4 - Concentrazioni dei radioelementi nelle rocce cristalline [Adattata da Clarke et al., 1996]**

Tipi di rocce	K (%)	U (ppm)		Th (ppm)		Th:U		
	media	media	range	media	range	Media	range	
Crosta media	2.1	3		12		4		
Ignee mafiche	0.5	1	0.2-3	3	0.5-10	3	3-5	
Ignee inter.	1-2.5	2.3	0.5-7	9	2-20	4	2-6	
Ignee acide	4	4.5	1-12	18	5-20	4	2-10	
Sedimenti arenacei	1.4	1	0.5-2	3	2-6	3		
Sedimenti argillosi calcari	2.7	4	1-13	16	2-47	4	1-12	
Argillite nera	0.3	2	1-10	2	-	1		
lateriti	2.7	8	3-250	16	-	2	elevato	
metamorfiche	basso	10	3-40	50	8-132	5	elevato	
			Dipende dalla roccia originaria					

Nella Tabella 2.5 vengono elencati alcuni minerali accessori con le corrispettive concentrazioni di uranio confrontate con quelle dei minerali maggiori costituenti le rocce.

**Tabella 2.5 - Minerali ignei e concentrazione di uranio**

Minerali Maggiori	U ppm	Minerali accessori	U ppm
<i>biotite</i>	1-60	<i>allanite</i>	30-1000
<i>orneblenda</i>	0,2-60	<i>apatite</i>	55-150
<i>pirosseni</i>	0.01-50	<i>epidotite</i>	20-200
		<i>monazite</i>	500-3000
		<i>zircono</i>	100-6000

Quest'ultimi, di solito contengono quantità minori di uranio. Infatti, come spesso accade, sono proprio i piccoli cristalli di minerali, come lo zircono, a fornire locali valori elevati. Inoltre si ha che il Radio è soggetto agli stessi processi geochimici del Calcio e del Bario, appartenendo al gruppo degli alcalino-terrosi, e quindi si concentra nei solfati (soprattutto nella barite) e nelle rocce sedimentarie come le argille. L'Uranio, invece, si concentra in minerali come la Titanite, l'Allanite e lo Zircono; la sua presenza, come già specificato, è importante nelle rocce eruttive [Schuman et al., 1988].

In generale nelle rocce e nel suolo, il  $^{226}\text{Ra}$ , genitore del  $^{222}\text{Rn}$ , può essere considerato in equilibrio secolare con l'Uranio, si ha così che la quantità di Radon che si forma in tali materiali risulta essere proporzionale al contenuto di Uranio dei materiali stessi.

Per definire la reale pericolosità radioattiva di un sito bisogna considerare la concentrazione complessiva di radon, ovvero alla concentrazione residente deve essere aggiunta quella trasportata nell'aria del suolo dai lontani siti di origine.

Oltre alla natura geologica ci sono altri fattori che vanno ad influenzare le concentrazioni di Radon nel suolo [Jelsch G. et al., 2001]. Tali fattori oltre ad interessare la distribuzione delle possibili sorgenti che determinano la quantità di Radon prodotto nel sottosuolo, riguardano anche la modalità di migrazione di questo, regolando quanto del quantitativo di Radon formatosi dal minerale riesce a raggiungere la superficie, attraverso le formazioni geologiche del substrato roccioso e dei terreni di copertura. Questi ultimi possono facilitare, rallentare o bloccare il flusso di Radon che proviene dal sottosuolo a seconda della loro permeabilità, composizione e spessore; pertanto possono determinare situazioni di aumento di concentrazione nelle rocce sottostanti: detto “confinamento litostatico” per il limitato scambio d’aria con l’atmosfera. È da ricercarsi in tale fenomeno la causa del fatto che la concentrazione di radon tende a diminuire con l’altitudine.

## 2.5 MODALITÀ DI EMISSIONE DEL RADON NELL’ATMOSFERA

Le modalità di emissione del radon in atmosfera indicano quanto del radon formatosi nel reticolo cristallino del minerale riesce a raggiungere la superficie per mezzo delle formazioni geologiche del substrato roccioso e dei terreni di copertura. Il coefficiente di emanazione, cioè la frazione di attività che fuoriesce dal minerale, è stimata essere  $10^{20}$  Bq su scala mondiale [UNSCEAR, 1982].

Prima di esaminare in dettaglio i meccanismi di rilascio del gas radon dalla materia è necessario spiegare quali sono i fattori che influenzano la distribuzione di tale gas nel sottosuolo.

Il trasporto e la distribuzione del radon sono influenzati da caratteristiche idromeccaniche dei terreni quali *porosità, permeabilità e contenuto d’acqua*.

La porosità esprime il rapporto tra il volume occupato dai vuoti rispetto al volume totale; se i vuoti sono intercomunicanti si parla di porosità effettiva. Ed è proprio quest’ultima ad influenzare il grado di esalazione del radon, poiché essa determina la frazione di volume occupato dai pori liberi, attraverso i quali avviene il trasporto e la diffusione di tale gas.

La permeabilità è definita come la proprietà di un terreno o di una roccia a lasciarsi attraversare dal fluido. In particolare, la permeabilità cosiddetta secondaria, determinata dalla presenza di faglie e fratture, può facilitarne la fuoriuscita, rappresentando vie preferenziali di trasporto del  $^{222}\text{Rn}$  verso la superficie [Tommasino L. 1998]. Inoltre la presenza di discontinuità tettoniche, come faglie o fenomeni di carsismo, determina la possibilità di alte emissioni di radon anche in aree a basso rischio, come quelle caratterizzate, ad esempio da rocce sedimentarie. Infatti le acque, penetrando attraverso cavità e fessure nel sottosuolo trasportano il radon, che in esse si dissolve, anche per lunghissime distanze.

Il contenuto d’acqua che caratterizza il terreno influenza, non solo il meccanismo di rilascio del radon dalla materia, come verrà chiarito in seguito, ma anche la concentrazione di

radon all'interno del suolo: quando negli strati più superficiali del terreno l'acqua riempie gli spazi interstiziali (pori saturi) o quando l'acqua all'interno di essi si congela, il rilascio di radon in atmosfera viene ostacolato, rimanendo tale gas intrappolato in profondità.

In sintesi, i principali fattori che influenzano l'esalazione e la distribuzione di questo gas nel suolo possono essere così riassunti:

- dominio geologico che condiziona la litologia;
- permeabilità e contenuto d'acqua dei suoli;
- presenza di faglie e fratture locali o regionali;
- presenza di cavità sotterranee;
- spessore e natura della coltre di copertura;
- stratificazione delle formazioni litologiche [Kemski J. et al., 1996].

Quindi, dato un certo contenuto di radon nel suolo, la quantità di gas radon rilasciata varia in dipendenza della permeabilità del suolo (densità, porosità, granulometria), del suo stato (secco, umido, saturo, gelato) nonché delle condizioni meteorologiche (temperatura del suolo e dell'aria, pressione atmosferica) [Moroni M., 2001].

Il radon, essendo un gas inerte, al contrario degli altri elementi della catena radioattiva che sono metalli, appena formatosi può diffondere, dai granuli del terreno in cui esso si forma, nell'aria o nell'acqua circostante ed essere trasportato lontano dal luogo di origine quindi, attraverso l'interfaccia suolo-aria, entra in atmosfera; mentre il radon presente nella parte più interna degli stessi granuli, può rimanere intrappolato nei solidi contenenti il suo progenitore [Tanner A. B., 1980] (Figura 2.2).

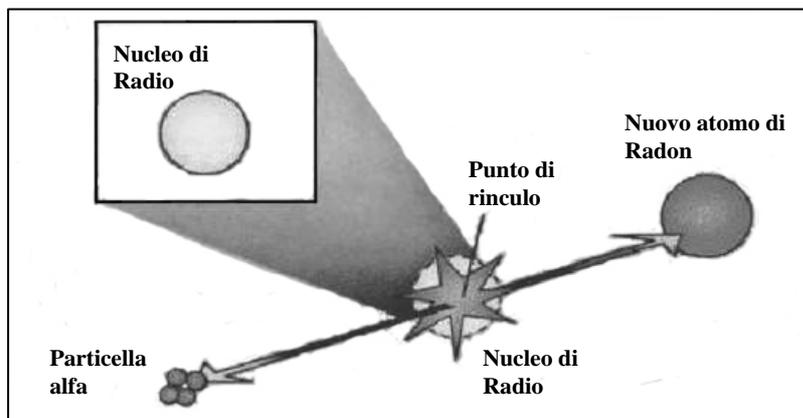
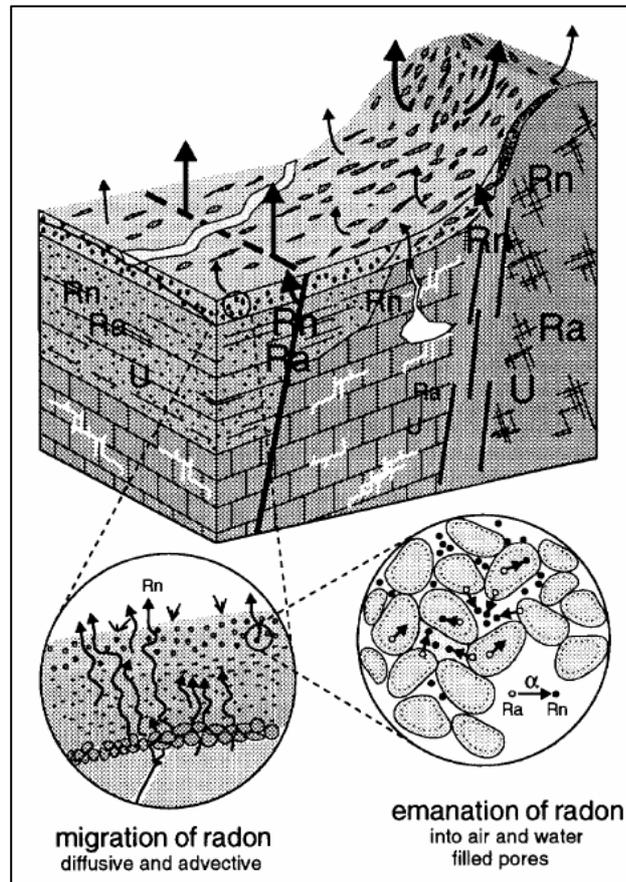


Figura 2.2 - Decadimento radioattivo del Radio

Il Radon è generato dal decadimento  $\alpha$  del Radio all'interno dei grani dei minerali e sulle loro superfici: nella maggior parte dei minerali, durante il processo di emanazione, il radon raggiunge gli spazi interparticellari, riempiti di aria e acqua, tramite il rinculo del radio, quando questo decade, e per successiva diffusione all'interno del fluido nei pori del mezzo, come mostrato in Figura 2.3.



**Figura 2.3** - Processi di emanazione e migrazione del Radon nel sottosuolo

### 2.5.1 EMANAZIONE

Quando il  $^{226}\text{Rn}$  decade all'interno della roccia, gli atomi di Radon derivanti possono essere emanati dai granuli verso i pori interstiziali pieni di aria. La frazione di atomi di Radon formati per decadimento nella roccia che riescono a fuggire nei pori, è denominata “*potere di emanazione*” ( $\epsilon$ ) [Shweikani R., et al., 1995] (Figura 2.3). L'emanazione tipica dalle rocce va da 0.05 a 0.7 [Nazaroff W. et al., 1988]. Ciò è dovuto principalmente a due fenomeni: diffusione di gas in solidi e processo di rinculo (diretto e indiretto).

Mentre la diffusione è generalmente bassa e trascurabile quando si tratta di gas che si muovono all'interno di materiali rocciosi la frazione più consistente del potere di emanazione è fornita dal rinculo degli atomi di Radon, dovuto all'emissione della particella  $\alpha$  nel decadimento:



In seguito all'emissione di una particella  $\alpha$  per decadimento del  $^{226}\text{Ra}$ , gli atomi di  $^{222}\text{Rn}$  presentano un'energia cinetica di 86 KeV, che consente l'attraversamento di parte del materiale che li contiene. Il range medio del  $^{222}\text{Rn}$  di rinculo all'interno dei più comuni materiali è:

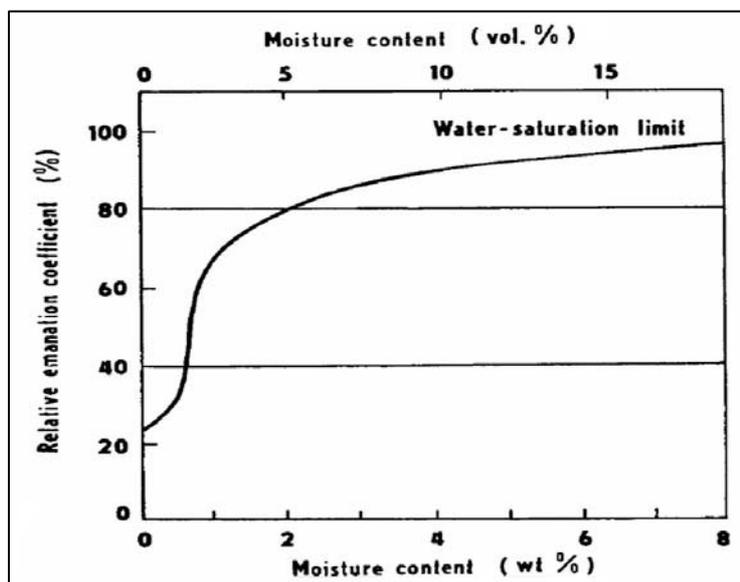
SiO <sub>2</sub>	Rocce più comuni	H <sub>2</sub> O	aria
26 nm	20-70 nm	100 nm	63µm

Pertanto gli atomi di <sup>226</sup>Ra posizionati ad una distanza dal bordo del granulo di minerale, minore rispetto al percorso di rinculo, producono atomi di Radon che possono sfuggire costituendo la frazione di *rinculo diretta*. Tali atomi restano così nei pori, cioè negli interstizi o nelle fenditure delle rocce.

Un'altra possibilità di fuga del Radon dai granuli originari è la diffusione attraverso lo stesso granulo danneggiato dalla radiazione dovuta ad altri decadimenti. Pertanto a seconda della natura del materiale e delle sue proprietà chimico-fisiche, le dimensioni del granulo di roccia giocano un ruolo importante [Joannides G. et al., 1996].

Inoltre mentre la temperatura è un fattore che influenza poco il potere di emanazione, questo risulta invece sensibile alle variazioni di umidità. Infatti gli atomi di Radon emessi possiedono in acqua un range decisamente minore che in aria, quindi il percorso medio nell'aria dei pori, almeno parzialmente riempiti d'acqua, è inferiore rispetto al percorso medio nell'aria secca.

Pertanto, un atomo di Radon che sfugge da un granulo e penetra in un poro interstiziale, interamente o parzialmente pieno d'acqua, ha una probabilità notevole di essere bloccato dall'acqua nel volume del poro. Inoltre il suo potere di emanazione sarà tanto elevato quanto maggiore sarà il suo contenuto d'acqua. (Figura 2.4)



**Figura 2.4** – Coefficiente di emanazione in funzione del contenuto d'acqua percentuale in un materiale [Sabol J. et al., 1995]

Se lo spazio interstiziale, invece, è secco e sufficientemente sottile, il <sup>222</sup>Rn penetra nel granulo adiacente lasciando una traccia (danneggiamento radioattivo) che sarà detersa dall'acqua interstiziale, rilasciando così l'atomo di <sup>222</sup>Rn [De Martino S., et al., 1997]. La

percentuale di atomi che riesce ad uscire dal secondo grano e tornare nel poro attraversato è detta *frazione di rinculo indiretto del potere di emanazione*. Quando l'acqua raggiunge tali zone danneggiate, libera l'atomo di radon lungo la traccia lasciata dal rinculo [Fleischer R., L. et al., 1980].

In Figura 2.5 vengono illustrati i vari processi.

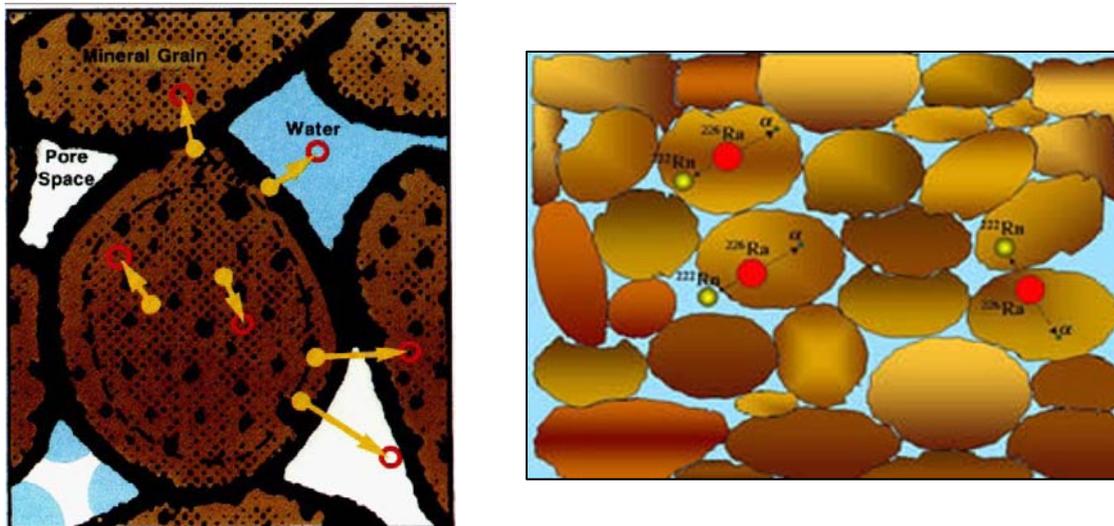


Figura 2.5 - Emanazione e rinculo degli atomi di Radon attraverso i granuli di una roccia

Per una data concentrazione di Radon in vari complessi di roccia, la quantità di Radon che riesce a sfuggire è differente, e dipende dalla dimensione dei grani, dal precedente riscaldamento, dal contenuto di Uranio e di Radio, dalla microstruttura della roccia e dalle alterazioni della superficie dei grani.

La migrazione del radon ha luogo negli spazi dei pori comunicanti ed è generalmente diretta verso la superficie del suolo o verso domini a più bassa concentrazione, seguendo il gradiente locale [J. Kemski et al., 1996; R. P Chauhan et al., 2002].

In particolare la concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$ , in un poro saturo di fluido, può essere espressa tramite la seguente relazione:

$$C_{Rn} = C_U \cdot R_S \cdot \varepsilon \cdot S$$

dove  $C_U$  è la concentrazione di Uranio nella roccia che lo ospita,  $R_S$  è la lunghezza del percorso di rinculo del  $^{222}\text{Rn}$ ,  $\varepsilon$  è il coefficiente di emanazione del Radon dalla fase solida a quella fluida ed  $S$  è l'area specifica relativa alla geometria della frattura e delle microfessure nella roccia satura di fluido [Singh A.K. et al., 1999].

La concentrazione massima di Radon nei pori è data dalla seguente espressione:

$$C_{Max} = A \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot (1 - p) / p$$

dove  $A$  è l'attività specifica del  $^{226}\text{Rn}$  (Bq/Kg),  $\varepsilon$  è il coefficiente di emanazione,  $\rho$  è la densità della roccia ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ),  $p$  è la porosità (data dal rapporto tra il volume di poro e quello totale  $V_{\text{poro}} / V_{\text{tot}}$ ),  $C_{\text{Max}}$  è la concentrazione di attività ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ).

Data la dipendenza del potere di emanazione dal contenuto di acqua nei pori, la relazione precedente viene corretta nel seguente modo:

$$C_{\text{Max}} = A \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot [(1 - p) / p] [F(K_T - 1) + 1]$$

dove  $F$  e  $K_T$  sono, rispettivamente, la percentuale d'acqua ed il coefficiente di partizione di  $^{222}\text{Rn}$  in aria e in acqua [Gomez Escobar V., et al., 1999] [Przylibski T., 2000]. Nel caso di terreno secco  $K_T = 0$  sicchè l'ultimo termine scompare.

### 2.5.2 TRASPORTO

Quando il Radon viene emanato da un granulo roccioso, viene trasportato attraverso gli spazi interstiziali tramite *diffusione* all'interno del poro fluido (liquido o gas) e *convezione* o trasporto forzato, quando è il fluido a trasportare il Radon.

La *diffusione* dipende da fattori quali la porosità, in particolare quella effettiva, che influenza il grado di esalazione del Radon, determinando la frazione di volume occupato da pori aperti e liberi, disponibili per il trasporto e la diffusione del Radon; la permeabilità, il contenuto d'acqua, in virtù dell'elevato potere frenante di quest'ultima, influenza fortemente il coefficiente di diffusione  $D$  del  $^{222}\text{Rn}$ .

Alcuni studiosi [Rogers et al., 1984] hanno misurato il coefficiente di diffusione di un terreno in funzione della porosità e del grado di saturazione (ossia la frazione di volume dell'acqua nel suolo confrontata con quella presente in condizioni di saturazione). In letteratura i modelli maggiormente utilizzati per descrivere il processo di diffusione considerano una lastra piana sottile; in tal modo la diffusione molecolare avviene in una sola direzione e, per ogni elemento stabile, essa è descritta dalla seconda legge di Fick (diffusione molecolare) secondo cui *due volumi di aria, aventi concentrazioni diverse d'inquinante, tendono a diluirsi, portandosi a concentrazioni omogenee*:

$$dC / dt = D \cdot (d^2C / dz^2)$$

dove  $C$  è la concentrazione del componente e  $D$  il coefficiente di diffusione.

Nel caso particolare di diffusione del Radon si deve tener presente la radioattività dell'elemento, quindi alla relazione precedente va aggiunta un termine di produzione del Radon, a causa del decadimento del  $^{226}\text{Ra}$  [Eisenbud M. et al., 1989], ed un termine di decadimento del Radon stesso:

$$dC_{\text{Rn}}/dt = \lambda_{\text{Ra}} \cdot C_{\text{Ra}} - \lambda_{\text{Rn}} \cdot C_{\text{Rn}} + (D \cdot d^2C_{\text{Rn}}/dz^2)$$

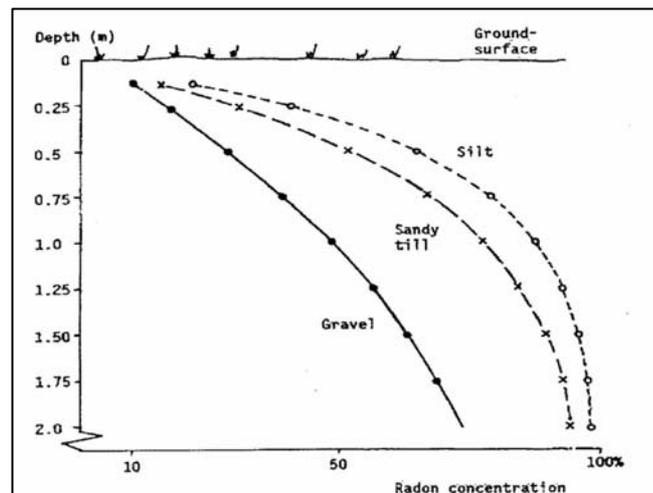
dove  $C_{Ra}$  e  $C_{Rn}$  sono le concentrazioni e  $\lambda_{Ra}$   $\lambda_{Rn}$  sono le costanti di decadimento del Radio e del Radon rispettivamente.

Considerando una diffusione di tipo regolare ed un terreno omogeneo radioattivo, la concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  emanato nei pori del suolo,  $C(z)$  è data da:

$$C(z) = C_{\infty} [1 - \exp(-z\sqrt{\lambda/D})]$$

dove  $C_{\infty}$  è la concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  a grande profondità,  $D$  è il coefficiente di diffusione del  $^{222}\text{Rn}$  nei pori del suolo,  $\lambda$  la costante di decadimento del  $^{222}\text{Rn}$  ( $2.1 \cdot 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$ ) e  $z$  la profondità [Jonsson G., 2001].

Dunque, la concentrazione del radon decresce esponenzialmente all'aumentare della profondità (Figura 2.6) e, poiché elevate sono le concentrazioni di radon che si misurano alla fonte (terreno e come vedremo anche nei materiali da costruzione) il gas tende a propagarsi dai centri di decadimento verso l'aria atmosferica o verso l'aria interna di un edificio; pertanto, anche in assenza di una significativa differenza di pressione tra il volume di aria indoor e il suolo, il radon riesce a portarsi all'interno di un ambiente confinato.



**Figura 2.6** - Andamento della concentrazione di Radon in funzione della profondità per diversi materiali (ghiaia, sabbia, fango)

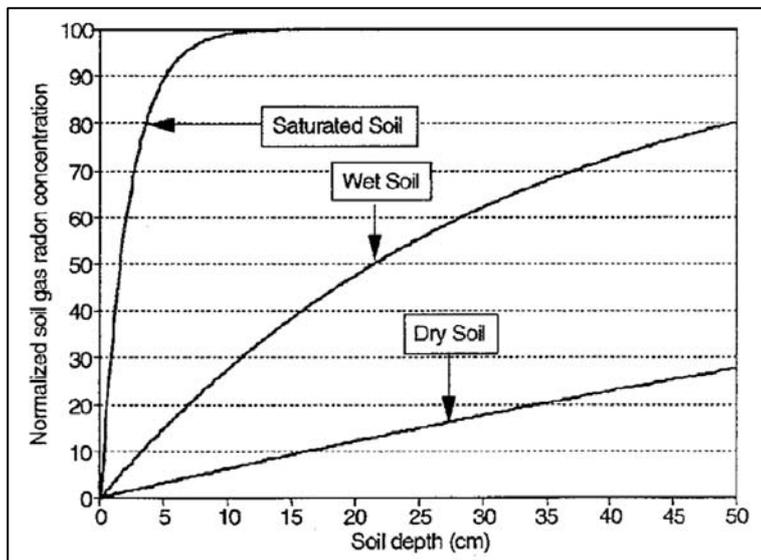
Generalmente, il meccanismo di diffusione contribuisce solo in parte al processo di migrazione, perché la distanza di migrazione per diffusione generalmente è molto bassa: nei terreni sabbiosi può raggiungere al massimo 4÷6m; nei limi e nelle argille non più di 1,5m [J. Kemski et al., 1996]. La concentrazione del gas in funzione della profondità viene calcolata per un terreno sotto tre diverse condizioni di umidità del suolo: dry, wet e saturated.

In Figura 2.7 è rappresentato l'andamento della concentrazione di gas Radon in funzione delle condizioni di umidità.

I coefficienti di diffusione sono dati da valori misurati [Rogers V.G. et al., 1984]:  $0.05 \text{ cm}^2/\text{s}$  (dry),  $0.002 \text{ cm}^2/\text{s}$  (wet),  $0.00001 \text{ cm}^2/\text{s}$  (saturated).

La Figura 2.7 mostra che c'è una differenza nella distribuzione del  $^{222}\text{Rn}$  nel suolo per le tre condizioni differenti di umidità. In condizioni di saturazione, la concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  arriva al suo valore massimo ad una profondità di circa 10 cm.

Comunque, per lo stesso terreno, in condizioni dry, quasi tutto il  $^{222}\text{Rn}$  è disperso dal



**Figura 2.7** – Andamento della concentrazione di Radon in funzione della profondità in relazione alle condizioni di umidità del suolo

terreno al di sotto di una profondità di 10 cm. Il coefficiente di diffusione  $D$  del  $^{222}\text{Rn}$  dipende fortemente dal contenuto di umidità del suolo. Rogers ed altri autori (1984) hanno misurato il coefficiente di diffusione di un terreno in funzione della porosità e del grado di saturazione; quest'ultimo è la frazione di volume dell'acqua nel suolo confrontata con quella in condizioni di saturazione. Tali autori hanno trovato che il coefficiente di diffusione  $D$  può essere legato alla porosità  $p$  ed al grado di saturazione  $m$  del suolo dalla relazione [Robinson A. L., 1995]:

$$D = 0.07 \exp[-4(m - mp^2 + m^5)]$$

La **convezione**, dovuta a diversi processi: emissione di gas generati da regioni calde, come i vulcani, stress generato dall'insorgenza di costrizioni che in genere precedono i terremoti e le eruzioni vulcaniche, convezione fluida, che produce un flusso di Radon per permeabilità dei materiali sufficientemente alte e flusso indotto da variazioni di pressione nelle vicinanze della superficie terrestre, legate alla meteorologia.

La convezione, governata dalla legge di Darcy, dipende dal gradiente di pressione e dalla permeabilità:

$$K = \eta \cdot (dV / S \cdot dt) \cdot (dP/dz)$$

dove  $\eta$  è la viscosità,  $(dV / S \cdot dt)$  è il volume mosso per unità di massa nell'unità di tempo,  $S$  è la sezione del poro e  $(dP/dz)$  è il gradiente di pressione.

### 2.5.3 ESALAZIONE

Rappresenta il processo con cui il Radon passa dal suolo all'atmosfera. Anche in questo caso sono due i meccanismi che concorrono alla fuoriuscita del gas: la diffusione ed il trasporto convettivo.

La *diffusione*, descritta dalla *legge di Fick*, produce un flusso in direzione  $z$  (perpendicolare alla superficie terrestre), proporzionale al gradiente di concentrazione ed al coefficiente di diffusione effettiva  $D$ , mentre i moti convettivi, indotti dalle variazioni di pressione, legate quindi alle condizioni meteorologiche, sono molto variabili nel tempo e non può esserne data facilmente una descrizione quantitativa.

Nell'approssimazione per cui la diffusione prevale sulla convezione, si ha che il rateo di esalazione è descritto dalla seguente relazione:

$$\Phi_0 = D \cdot (dC/dz)_{z=0} = \varepsilon \cdot A \cdot \rho \cdot \lambda \cdot R$$

dove  $\varepsilon$  è il potere di emanazione,  $A$  la concentrazione di  $^{226}\text{Ra}$  per unità di massa del suolo (Bq/Kg),  $\rho$  la densità del suolo,  $\lambda$  la costante di decadimento del  $^{222}\text{Rn}$  ed  $R$  la lunghezza di diffusione del Radon nel suolo.

Numerosissimi sono i fattori esterni che possono portare una variazione nella diffusione e nei flussi convettivi e di conseguenza nell'esalazione: precipitazioni piovose o nevose di grande intensità; inoltre gelo ed aumenti di pressione atmosferica causano la diminuzione del flusso di esalazione, mentre aumenti di temperatura e di intensità del vento possono determinare sia un aumento della diffusività che del flusso convettivo nei pori del suolo, il che si traduce in una crescita complessiva del flusso di esalazione [Denagbe S. J., 2000].

Il  $^{222}\text{Rn}$  esalato dal suolo può seguire due strade: entrare a contatto con l'atmosfera o infiltrarsi all'interno delle abitazioni. Nel primo caso essendo il tempo di dimezzamento del Radon relativamente breve (3.82 giorni), esso ha buone possibilità di decadere nei propri figli, dando quindi luogo a  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ .

Dopo la formazione dei prodotti di decadimento, i radionuclidi generati reagiscono molto velocemente, in tempi inferiori al secondo, con vapori e gas che sono presenti nell'atmosfera, diventando così piccole particelle aventi diametro variabile tra 0.5 e 10nm, denominate *clusters*. Una volta formatesi, queste particelle possono attaccarsi, in tempi tipicamente inferiori ai 100 secondi, alle particelle di aerosol presenti in atmosfera, le cui dimensioni vanno da 50 a 500nm.

Alcuni autori [Sabol J. et al., 2002] hanno mostrato che il fenomeno dell'attaccamento dei radionuclidi al particolato presenta un'evidente dipendenza dalle dimensioni del particolato atmosferico stesso ed, in particolare, dalle sue dimensioni lineari (diametro). I figli del Radon si attaccano prevalentemente al particolato atmosferico di dimensione lineare medio-piccola (dell'ordine di 1  $\mu\text{m}$ ), che è in ogni caso la frazione preponderante del particolato totale sospeso.

I prodotti di decadimento del Radon vengono rimossi dall'atmosfera, oltre che per decadimento, anche per processi di deposizione umida o secca del particolato a cui sono attaccati: la deposizione secca è governata principalmente dalla sedimentazione gravitazionale, da urti dovuti a forze inerziali e dalla diffusione browniana. Le deposizioni umide dipendono ovviamente dalle condizioni meteorologiche, in particolare dall'intensità e dalla persistenza delle piogge, dalla durata di fenomeni di nebbia, dal verificarsi di precipitazione a carattere nevoso, etc.

## **2.6 SORGENTI DI RADON E FENOMENI DI TRASPORTO**

Come già detto precedentemente il radon è presente ovunque in livelli di concentrazioni diversi relativamente al contesto geologico locale.

Il radon presente in un edificio è il risultato del contributo di diverse fonti: il suolo o le rocce sottostanti all'abitazione, i materiali da costruzione, l'acqua, l'aria esterna. Andiamo ora a vederle in dettaglio.

### **2.6.1 SUOLO**

Il terreno sul quale è costruito un edificio rappresenta la fonte primaria del Radon presente all'interno dell'edificio: solo dagli anni '80 è stato identificato il suolo come sorgente importante, specialmente per le case monofamiliari ed i luoghi di lavoro a livello di superficie.

Infatti i locali interrati seminterrati o comunque ai pianoterra presentano concentrazioni maggiori rispetto ai piani elevati. In particolare il contributo alla concentrazione di Radon in un'abitazione dipende dalla concentrazione di  $^{226}\text{Ra}$  nel suolo, dalle caratteristiche del materiale usato per le fondamenta e dalla tipologia della costruzione.

Come già visto quando un atomo di  $^{226}\text{Ra}$  contenuto nel suolo decade, il  $^{222}\text{Rn}$  prodotto può raggiungere per rinculo lo spazio libero delle porosità del terreno e così raggiungere l'ambiente esterno tramite moti diffusivi e convettivi.

I moti convettivi nel sottosuolo sono indotti principalmente dalle differenze di pressione e di temperatura che si vengono a creare in conseguenza alle condizioni meteorologiche e sono difficilmente quantificabili.

Per valutare i processi diffusivi è necessario definire un coefficiente di diffusione  $L_{Rn}$  (m) che consideri le tortuosità del percorso. Si ha così:

$$R_S = \lambda_{Rn} \cdot F_R \cdot C_{soil,Ra} \cdot \rho_{soil} \cdot L_{Rn}$$

dove  $R_s$  rappresenta il flusso di attività del Radon nell'interfaccia suolo-ambiente esterno ( $\text{Bq/m}^2 \text{ s}$ ),  $\lambda_{Rn}$  la costante di decadimento del Radon ( $2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ),  $F_R$  indica il potere di emanazione del suolo,  $C_{soil,Ra}$  la concentrazione massima del  $^{226}\text{Ra}$  ( $\text{Bq/Kg}$ ), e  $\rho_{soil}$  la densità del suolo ( $\text{Kg/m}^3$ ).

Da tale espressione si può capire come il Radon generato nel suolo si diffonde attraverso le fessure delle fondamenta di un edificio penetrando nell'ambiente interno.

Tale processo può essere espresso tramite la grandezza  $R_T$  proporzionale ad  $R_s$ , che va a considerare la distanza di diffusione del Radon nelle fondamenta e nel suolo, lo spessore delle fondamenta e il potere di emanazione. Possiamo ora esprimere l'attività  $U_T$  ( $\text{Bq/m}^3 \text{ h}$ ) di Radon proveniente dal suolo, che entra in un edificio per unità di tempo e di volume:

$$U_T = R_T \cdot S_F / V$$

dove  $S_F$  ( $\text{m}^2$ ) indica la superficie delle fondamenta a contatto con il suolo e  $V$  ( $\text{m}^3$ ) il volume dell'edificio. Si può, per maggior precisione, distinguere in  $U_T$  il contributo dovuto ai processi passivi di diffusione molecolare, da quello dovuto ai processi attivi e cioè dipendenti dai gradienti di pressione.

Se il fabbricato non è opportunamente isolato dal terreno, i flussi d'aria attraverso le imperfezioni del fabbricato, dovuti alle differenze di pressione tra l'atmosfera interna ed esterna sono spesso la via preferenziale d'ingresso del Radon nelle abitazioni. Le differenze di pressione sono dovute alle differenze di temperatura tra interno ed esterno, alla presenza di sistemi di condizionamento e all'azione del vento.

## **2.6.2 MATERIALI DA COSTRUZIONE**

Come abbiamo precedentemente detto anche i materiali da costruzione rappresentano un contributo significativo alla concentrazione di Radon indoor. L'emissione di Radon da parte di tali materiali dipende sia dalla concentrazione di  $^{226}\text{Ra}$  presente in essi, sia dalle loro caratteristiche di impermeabilità ai gas che determinano la diversa quantità di emissione di Radon.

In Tabella 2.6 è riportata la concentrazione massima di  $^{226}\text{Ra}$  nei materiali da costruzione comunemente usati.

**Tabella 2.6 - Concentrazione massima di  $^{226}\text{Ra}$  nei materiali da costruzione.**

MATERIALE	CONCENTRAZIONE DI $^{226}\text{Ra}$ [Bq/Kg]
Calcestruzzo	10-80
Mattone	20-200
Cemento	10-50
Granito	100-200
Tufo	100-600
Gesso	5-20

Per quanto riguarda il contributo dei materiali da costruzione questi hanno una permeabilità al radon piuttosto bassa, e in questo caso il contributo diffusivo predomina sul convettivo; in questo caso è possibile definire il flusso di attività nel seguente modo:

$$(1.3) \quad R_{\text{BM}} = \lambda_{\text{Rn}} \rho_{\text{build}} C_{\text{build,Ra}} F_{\text{R}} L_{\text{Rn}} \tanh (L_{\text{h}}/L_{\text{Rn}})$$

L'espressione è analoga a quella ricavata per il suolo, ad eccezione del termine iperbolico che qui serve per considerare le dimensioni finite  $L_{\text{h}}$  del materiale sorgente.

L'attività di radon  $I_{\text{BM}}$  ( $\text{Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), che entra in un locale, per unità di tempo e di volume, proveniente dai materiali da costruzione può essere espressa dalla seguente legge:

$$I_{\text{BM}} = (\text{SR}_c \text{S}_{\text{FA}} + \text{R}_b \text{S}_{\text{WF}})$$

In questa equazione è stato separato il contributo  $\text{R}_b$  proveniente dalla superficie  $\text{S}_{\text{WF}}$  ( $\text{m}^2$ ) dalle pareti esterne dei mattoni da quello proveniente dalla superficie  $\text{S}_{\text{F}}$  ( $\text{m}^2$ ) delle pareti di calcestruzzo.

### 2.6.3 ACQUA

Il Radon è facilmente solubile in acqua e quindi può in parte trasferirsi dal terreno alle acque sotterranee e da questa può passare all'aria aperta per diffusione molecolare.

Dal momento che le acque di superficie o di falda sono in stretto contatto con rocce e suoli contenenti piccole quantità di radio, non è sorprendente il fatto che il Radon possa trovarsi anche nell'acqua potabile. I dati pubblicati da UNSCEAR (1982) forniscono le seguenti tipiche concentrazioni di  $^{222}\text{Rn}$ :

- nelle acque di superficie: meno di  $40 \text{ Bq/m}^3$ ;
- nelle acque di falda: da  $40 \text{ Bq/m}^3$  a  $40\text{K} \text{ Bq/m}^3$ .

L'acqua dalle sorgenti e dai pozzi può trasportare  $^{226}\text{Rn}$  disciolto fino agli oceani dove l'equilibrio con il  $^{222}\text{Rn}$  è raggiunto con buona approssimazione. Entrambi i radionuclidi possono essere presenti nell'acqua di mare fino ad un limite di circa  $4 \text{ Bq/m}^3$ . Gli atomi di

$^{222}\text{Rn}$  disciolti nell'acqua di mare non riescono a diffondere velocemente in atmosfera, così la percentuale di Radon sopra gli oceani è circa dell'1% di quella sopra i continenti.

Il contributo medio alla concentrazione di Radon negli ambienti chiusi da parte dell'acque può essere espresso come:

$$C_A = f C_W$$

dove  $C_W$  ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) indica la concentrazione di attività di radon nell'acqua, ed  $f$  è un coefficiente che dipende dal volume di acqua consumato al giorno all'interno dell'abitazione, dalla percentuale di Radon che viene trasferita dall'acqua all'ambiente esterno e dalla costante di ventilazione. I valori di  $f$  misurati sperimentalmente risultano dell'ordine di  $10^{-4}$ .

Solo se la concentrazione di Radon in acqua è superiore ai  $10 \text{ KBq m}^{-3}$ , allora l'acqua può diventare una sorgente significativa di ingresso di radon in una abitazione.

Nazaroff ci fornisce utili indicazioni sulle quantità radon rilasciate da diversi utilizzatori domestici che divengono costanti di emissione:

- lavastoviglie 0.95;
- lavatrice 0.92;
- doccia 0.66;
- vasca da bagno 0.42;
- wc 0.3.

È per questo motivo che in un'abitazione le concentrazioni massime si riscontrano in bagno ed in cucina.

### 2.6.3.1 Le Acque Potabili

L'acqua potabile erogata dagli acquedotti, o da singoli pozzi e sorgenti, può contenere sostanze radioattive di origine artificiale e contiene normalmente, in misura variabile, sostanze radioattive di origine naturale.

La presenza di radionuclidi di origine artificiale nelle acque destinate al consumo umano è dovuta all'utilizzo di tecnologie nucleari (produzione energetica, ricerca, industria militare) o alle normali pratiche ospedaliere.

La presenza di radionuclidi di origine naturale è un fenomeno comune a tutte le acque e presenta una notevole variabilità sia a livello territoriale che temporale dovuta a:

- fattori idrogeologici e geologici
- caratteristiche chimiche e fisiche degli acquiferi
- fenomeni meteorologici
- miscelamento delle acque di falda

Le principali sorgenti della radioattività naturale nelle acque sono i radionuclidi appartenenti alle serie di decadimento radioattivo ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{235}\text{U}$ ), il  $^{40}\text{K}$  di origine primordiale sopravvissuto fino ai giorni nostri grazie al suo lungo tempo di dimezzamento. Lo

studio della distribuzione e della variabilità delle concentrazioni di tali radionuclidi può fornire utili informazioni riguardanti le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche del territorio posto sotto indagine.

Per quanto riguarda le sostanze radioattive artificiali, scopo dei controlli è quello di individuare eventuali situazioni di contaminazione di origine antropica.

Il *D.L. 230/95* (attuazione delle direttive Euratom in materia di radiazioni ionizzanti) regola in modo molto rigido la possibilità di immettere sostanze radioattive nell'ambiente. Questo riduce la probabilità di contaminazione delle acque destinate al consumo umano, comunque già molto bassa in quanto le falde acquifere sono generalmente profonde e quindi poco vulnerabili. La verifica della normativa viene comunque effettuata accertando l'assenza nelle acque di tali sostanze radioattive.

Per quanto riguarda le sostanze radioattive naturali, scopo dei controlli è quello di ricostruire la distribuzione della concentrazione dei radionuclidi nelle acque e stimare la dose alla popolazione.

Infatti, il *D.Lgs 31/01* (Attuazione delle direttive comunitarie in materia di qualità delle acque destinate al consumo umano) prevede l'obbligo di verificare il rispetto dei valori di due parametri relativi alla radioattività nelle acque e prescrive l'adozione di contromisure per ridurre eventualmente tali valori entro limiti ritenuti più accettabili.

I due parametri sotto controllo sono il trizio e la dose totale indicativa, con i seguenti valori da rispettare riportati in Tabella 2.7:

*Tabella 2.7 - Parametri e valori limite previsti dal D.L. 31/01*

<b>Categoria di radionuclidi</b>	<b>Valore di parametro</b>
Trizio	100 Bq/l
Dose totale indicativa	0.1 mSv/y

Il trizio di origine naturale viene prodotto dall'interazione tra la radiazione cosmica e gli alti strati dell'atmosfera, entra nel ciclo dell'acqua e si trova normalmente nelle acque di falda con concentrazioni di pochi Bq/l.

Una sorgente antropica di trizio è legata all'esercizio di particolari tipi di reattore nucleare che possono immettere in ambiente reflui contaminati. Il *D.L. 31/01* considera la possibilità di inquinamento da trizio in quanto tale problema è realmente esistente in alcuni paesi della Comunità Europea dotati di reattori nucleari. Tuttavia in Italia si può ritenere che tale problema sia limitato solo a particolari contingenze in cui il trizio viene utilizzato per scopi di ricerca.

Per questo motivo la verifica dei valori di tale parametro risulta del tutto secondaria a quella del valore di dose totale indicativa. Poiché il radon presente nelle acque destinate al consumo umano causa un'esposizione per ingestione o per inalazione, tale dose è una misura della quantità di radiazione assorbita dal corpo umano per ingestione di sostanze radioattive

contenute nell'acqua. Essa non può essere misurata direttamente, ma viene stimata a partire dai valori di concentrazione dei radionuclidi misurati tramite opportuni coefficienti di conversione che tengono conto sia del tipo di sostanza radioattiva presente, sia delle diverse categorie di persone che costituiscono la popolazione. La valutazione della dose richiede quindi la misura del contenuto di radioattività delle acque, che viene effettuato attraverso la determinazione delle concentrazioni di attività  $\alpha$  totale e attività  $\beta$  totale [ARPA, 2003].

*La Raccomandazione della Comunità Europea 2001/928/Euratom sulla tutela della popolazione contro l'esposizione al radon nell'acqua potabile*, notificata il 28 dicembre 2001, prende in considerazione il problema dell'esposizione della popolazione causato dalla presenza di  $^{222}\text{Rn}$  e di alcuni suoi prodotti di decadimento. Inoltre, nella stessa direttiva si legge che *l'esposizione dei lavoratori al radon inalato negli stabilimenti in cui notevoli quantitativi di radon possono essere emessi dall'acqua in locali chiusi, in particolare nelle aziende di erogazione dell'acqua, nelle terme e nelle piscine, dovrebbe essere oggetto di controllo conformemente al titolo VII della direttiva 96/29/Euratom e conformemente alle raccomandazioni <<Protezione dalle radiazioni 88>> del 1997...da parte del gruppo di esperti costituito ai sensi dell'articolo 31 del trattato Euratom.*

*Per quanto riguarda la fornitura d'acqua della rete idrica pubblica o commerciale, si ritiene che, per le concentrazioni di Radon superiori a 1000 Bq/l, un'azione correttiva sia giustificata in base a criteri di protezione dalle radiazioni.*

*Oltre una concentrazione di 100 Bq/l, gli Stati membri devono comunque definire un livello di riferimento per il radon, da utilizzare per stabilire se occorrono azioni correttive per tutelare la salute umana.*

Generalmente nelle acque di fiumi e ruscelli non è presente una grossa quantità di Radon, visto che esso diffonde in gran parte nell'aria circostante; pertanto nelle abitazioni che vengono rifornite da corsi superficiali i livelli di tale gas nell'acqua sono generalmente bassi.

Lo stesso fenomeno diffusivo caratterizza il rifornimento idrico delle grandi città in cui, il passaggio dell'acqua in grossi sistemi aperti, permette ancora l'aerazione della stessa e quindi la perdita di concentrazioni radioattive; inoltre la maggior parte del Radon rimanente decade in genere durante i lunghi tempi necessario al trasporto per raggiungere le abitazioni.

In molte aree di campagna, al contrario, l'acqua di pozzo è usata come principale risorsa idrica. I piccoli impianti realizzati a tale scopo sono spesso costituiti da sistemi chiusi e non areati e poiché sono generalmente posti nelle vicinanze del luogo di utilizzo, il breve tempo di transito nelle condutture fa sì che solo una piccola percentuale di Radon decada e che la maggior parte rimanga disciolta nell'acqua [A. Lugg, 1997]. Se quest'ultima viene utilizzata per bere, quindi, viene ingerita anche una quantità di Radon non trascurabile; se viene utilizzata in altro modo, ad esempio per fare la doccia, lavare vestiti o piatti, può costituire comunque una fonte di pericolo perché contribuisce all'aumento della concentrazione di Radon nell'aria che viene respirata [B. Dumbleton 1995].

### 2.6.4 ARIA

Quando gli atomi di Radon fuoriescono dal suolo, sono miscelati nella bassa atmosfera dalla diffusione turbolenta dei venti. L'emanazione di Radon dal suolo varia da punto a punto e dipende, oltre alle caratteristiche del terreno anche da quelle atmosferiche. La concentrazione di Radon a 1 mt sopra a superficie può aumentare anche di un fattore 10 se il Radon, come altri inquinanti generati nei pressi della superficie, è intrappolato da un'inversione termica.

Molti sono i fattori che contribuiscono con al trasporto e alla dispersione del Radon in atmosfera: il gradiente verticale di temperatura, la velocità e la direzione del vento, la turbolenza dell'aria, le precipitazioni. La distribuzione verticale del Radon in atmosfera può essere descritta dalla seguente equazione:

$$d/dz (K(z) \cdot dC_{Rn}/dz) - \lambda C_{Rn} = 0$$

dove  $K(z)$  è il coefficiente di diffusione turbolenta all'altezza  $z$ . Tale coefficiente cresce con l'altitudine ed è influenzato dai cambiamenti verticali della velocità del vento e dalla stabilità atmosferica. Le variazioni diurne e stagionali rientrano in tale modello.

### 2.7 MECCANISMO DI TRASPORTO DEL RADON IN AMBIENTI INDOOR

La concentrazione del Radon è maggiore negli ambienti chiusi che all'esterno principalmente per tre motivi: il movimento dell'aria limitato, l'emanazione del Radon dalle pareti è circa la stessa che dal suolo (o dal pavimento), la depressione interna causata dal riscaldamento e dagli effetti del vento aumenta il quantitativo di tale gas.

L'ingresso in una abitazione del radon presente nell'aria esterna si realizza tramite il ricambio d'aria tra l'ambiente interno ed esterno che avviene con la normale ventilazione attraverso porte e finestre, con l'utilizzo di impianti di condizionamento, e anche attraverso le crepe nella struttura dell'edificio.

Siccome l'ingresso di Radon dall'esterno è direttamente proporzionale al ricambio d'aria, e la concentrazione di radon all'esterno varia tra 3 e 10 Bq/m<sup>3</sup> risulta chiaro come il contributo dell'aria esterna possa essere considerato poco importante.

Il radon è anche presente nel gas naturale di uso domestico, ma il normale trattamento industriale e l'immagazzinamento ne eliminano la gran parte prima che venga utilizzato dal consumatore; e poiché i prodotti di combustione vengono aspirati verso l'esterno questa fonte di Radon è da considerarsi trascurabile.

Nella tabella 2.8 sono riassunti i vari contributi alla attività di radon che penetra in una abitazione.

**Tabella 2.8** – Contributi da parte delle varie sorgenti all'attività totale di Radon che penetra in un ambiente chiuso.

SORGENTE	MECCANISMO DI ENTRATA	ATTIVITÀ DI RADON ENTRANTE (Bq/m <sup>3</sup> h)	CONTRIBUTO PERCENTUALE (%)
<i>Materiali da costruzione</i>	diffusione	10	21
<i>Sottosuolo</i>	diffusione	7.5	15
	convezione	20	41
<i>Aria esterna</i>	infiltrazione	10	20
<i>Acqua</i>	degassamento	1	2
<i>Gas naturale</i>	consumo	0.3	1
<b>Totale</b>		49	100

La concentrazione di Radon negli ambienti chiusi dipende dal tasso d'ingresso di questo dalle varie sorgenti e dai due possibili modi di rimozione: il decadimento fisico e soprattutto la ventilazione.

La variazione di concentrazione di Radon in uno spazio chiuso può essere descritta dall'equazione:

$$dC_{Rn}(t) / dt = U_T - C_{Rn}(t) \cdot (\lambda_{Rn} + \lambda_V)$$

dove  $dC_{Rn}(t)$  è la concentrazione di attività di Radon al tempo  $t$  (atomi m<sup>-3</sup>),  $U_T$  è il tasso d'ingresso del Radon al tempo  $t$  (atomi m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>),  $\lambda_{Rn}$  è la costante di decadimento del Radon:  $7.6 \cdot 10^{-3}$  h<sup>-1</sup>,  $\lambda_V$  è il tasso di ventilazione (h<sup>-1</sup>).

Andando a considerare  $U_T$  e  $\lambda_V$  costanti, si ha che la concentrazione di Radon all'equilibrio, in uno spazio chiuso è

$$C_{Rn} = U_T / (\lambda_{Rn} + \lambda_V)$$

All'interno delle abitazioni, di solito i valori di  $\lambda_V$  variano tra 0.1 e 3 h<sup>-1</sup>. Visto che la costante di decadimento del Radon è inferiore di tre ordini di grandezza rispetto a tali valori [UNSCEAR 1988], allora se la concentrazione di attività di Radon nell'aria esterna è trascurabile, si ha che la concentrazione all'equilibrio può, in prima approssimazione, essere considerata inversamente proporzionale al tasso di ventilazione. Tale equazione può a tal fine essere usata solo come una prima approssimazione della concentrazione media di Radon in ambienti chiusi; è basata infatti, su assunzioni che non sono rigorosamente valide.

Il ricambio d'aria è assunto costante al variare del tempo: è soggetto invece a molte variazioni che dipendono dalle condizioni meteorologiche, dall'attività umana e dalla tipologia dell'edificio.

Un altro importante fattore è la distribuzione non-omogenea del radon a seconda del piano dell'abitazione: è realtà provata sperimentalmente che le concentrazioni nei piani superiori degli edifici sono inferiori rispetto a quelle del piano terreno.

La quantità di Radon che entra in un edificio viene considerata costante a variare del tempo: varia invece durante la giornata e dipende dalle condizioni meteorologiche.

Il radon penetra all'interno dell'edificio attraverso le fessure dei rivestimenti a contatto con il terreno, seguendo principalmente due importanti meccanismi di trasporto: passaggio per diffusione e per convezione, già illustrati in dettaglio precedentemente.

Il meccanismo del trasporto prevede vari modelli:

- la grandezza dei pori nel sottosuolo è sensibile alla deformazione per compressione del mezzo e questo comporta flussi di fluido provenienti dalle aree più compresse. Le compressioni sono determinate dalle deformazioni periodiche dovute alle maree terrestri e a quelle intermittenti provocate da movimenti sismici [*King C. Y., 1980*]. Un altro meccanismo ipotizzato è il moto dei fluidi dovuto al gradiente geotermico, che determina risalita di acqua o di aria e genera quindi delle celle convettive; si calcola che, in media, il Radon impieghi circa 20 giorni per percorrere una distanza di 100 metri e quindi, tenendo conto del tempo di decadimento, circa il 3% del Radon potrebbe arrivare alla superficie partendo da una tale profondità [*Mogro-Campero A. et al., 1977*];
- nella litosfera, si ipotizza un flusso di gas libero che agisce da mezzo di trasporto gassoso. Negli acquiferi, presenti nella crosta terrestre, l'acqua è soprassatura di gas (CO<sub>2</sub>, ecc.) e il decadimento forma microscopiche bolle le quali vengono spinte verso l'alto in quanto più leggere [*Kristianssom K. et al., 1982*];
- il Radon potrebbe essere trasportato verso la superficie da altri gas presenti nelle acque (gas carrier), tesi avallata dal fatto che in zone fratturate si rilevano grandi quantità di metano in soluzione nelle acque [*Fleischer R.L. et al., 1980*].

Il moto convettivo del radon nel sottosuolo è indotto principalmente dalla differenza di pressione esistente tra il suolo e l'interno dell'abitazione e comporta un movimento d'aria dalle zone a maggior contenuto energetico (suolo) verso le zone a minor contenuto energetico (edificio).

Il fenomeno del flusso convettivo del radon dal suolo all'interno di un edificio viene aumentato in inverno da un "effetto stack", simile a quello incontrato nel camino. Tale "effetto camino" è creato dalla continua risalita di aria calda, per cui il radon si infila dal sottosuolo nell'ambiente indoor a causa della differenza di temperatura come mostrato in Figura 2.8 [*Tommasino L., 1998*]: l'aria calda che sale nella casa provoca negli scantinati e nei piani inferiori una depressione appena percettibile, determinando un'aspirazione che può essere amplificata da ventilatori o caminetti.

Nella stagione fredda, l'effetto aspirante negli scantinati è intensificato dai riscaldamenti accesi. Anche la differenza del movimento dell'aria tra esterno ed interno

favorisce l'ingresso di tale gas (effetto vento).

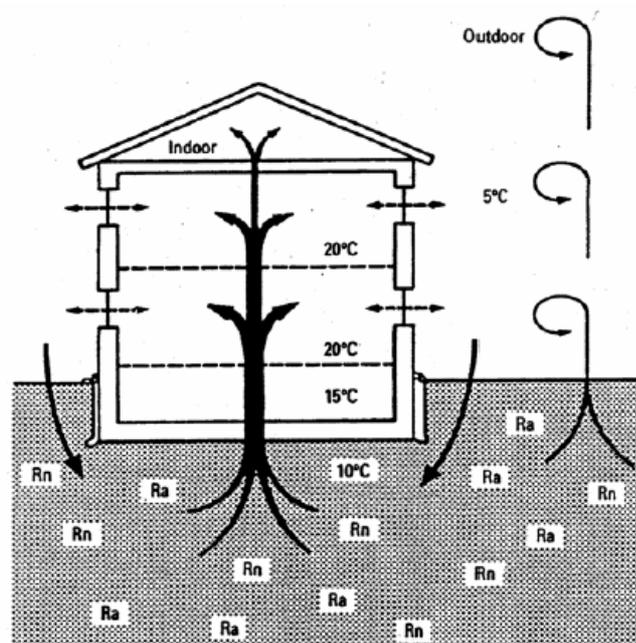


Figura 2.8- Effetto camino

Un recente studio [Iskandar D. et al. 2004] ha permesso di calcolare il potere di emanazione del radon in funzione della temperatura nei suoli saturi e umidi per mezzo della seguente formula:

$$\varepsilon_c = \varepsilon + 0.21 * (T_c - T)$$

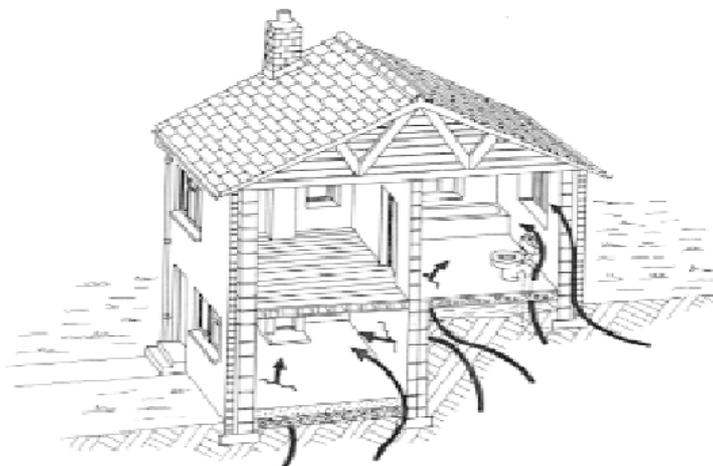
valida per un range di temperatura compreso tra  $-20$  e  $45^{\circ}\text{C}$ , dove  $\varepsilon$  rappresenta il potere di emanazione misurato (%),  $T$  è la temperatura del suolo ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\varepsilon_c$  è il potere di emanazione calcolato (%) alla temperatura di interesse ( $T_c$ ).

Il radon presente nell'aria del terreno, a causa del gradiente di pressione e di temperatura viene "aspirato" nell'edificio dove vi rimarrà in funzione del livello di ricambio d'aria che caratterizza quest'ultimo.

Le cause della messa in depressione dell'edificio sono molteplici:

- la ventilazione naturale (estrazione termica), dovuta ai difetti di tenuta del rivestimento, è sempre presente in un edificio;
- la ventilazione meccanica controllata (WMC) corrisponde ad una ventilazione a flusso semplice per estrazione; in tal caso la depressione nell'edificio è più forte della ventilazione naturale;
- il funzionamento di apparecchi collegati che generano ricircoli d'aria (caldaia a gas, acqua calda sanitaria) o di caminetti, contribuiscono ad accentuare l'aspirazione di gas dal suolo.

Alcune case poggiano su un basamento e, in genere, prima che questo venga messo a dimora, si riempie lo scavo con ghiaia e roccia, materiali possibili emettitori di radon; se il basamento ha un pavimento di terra battuta, il radon può penetrare più facilmente; se il pavimento è di cemento, il radon penetra attraverso le microfessure che si formano col tempo, lungo le tubazioni, e attraverso le giunture tra i muri [Moroni M., 2001] (Figura 2.9). Schematizzando, possiamo evidenziare oltre al suolo e sottosuolo, la cui importanza è già stata sottolineata, altre importanti vie di immissione del radon indoor: materiali edilizi e acque potabili.



**Figura 2.9** - Le vie di ingresso del radon in un'abitazione

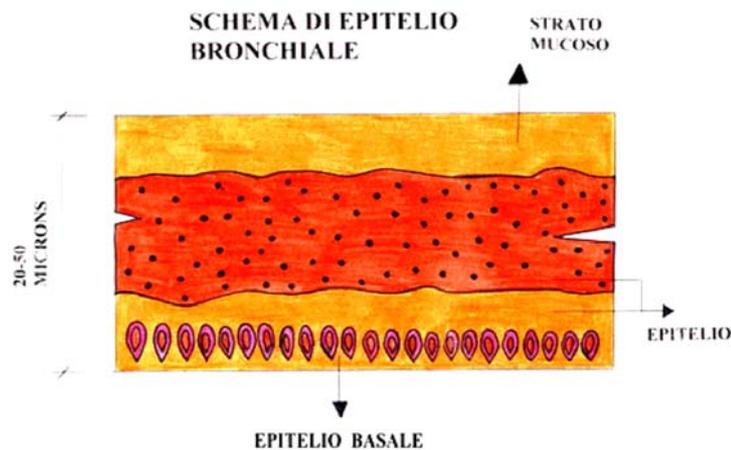
## 2.8 EFFETTI SULLA SALUTE

L'osservazione degli effetti dannosi del Radon sulla salute risale al XV secolo quando iniziò lo sfruttamento intensivo delle miniere. Le prime segnalazioni risalgono al XVI secolo da parte di Paracelsus, il quale svolse studi sui minatori delle miniere di Sassonia e Boemia.

Nel 1977 il Radon è stato classificato, in un rapporto del Comitato Scientifico delle Nazioni Unite sugli effetti della radiazione atomica (UNSCEAR), come la principale sorgente di radiazioni ionizzanti a cui la popolazione mondiale è esposta.

Il  $^{222}\text{Rn}$  con i suoi prodotti di decadimento, quali il  $^{214}\text{Po}$ ,  $^{218}\text{Po}$  entrambi ad elevato impatto sulla salute pubblica, sono tra degli argomenti di maggiore attualità nell'ambito dei fattori fisici di rischio ambientale. Essi vengono considerati tra i principali inquinanti dell'aria indoor, classificati come agenti cancerogeni di gruppo 1 (agenti di accertata cancerogenicità per l'uomo) dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC/OMS) [WHO-IARC, 1988].

L'esposizione umana alle radiazioni può essere di natura esterna, prodotta da sorgenti poste nell'ambiente o interna a sorgenti introdotte nell'organismo per inalazione o ingestione. L'inalazione del Radon attraverso le vie respiratorie è causa di un'esposizione di tipo interno. La membrana che riveste i polmoni, l'epitelio, è costituito da due strati: lo strato basale, dove è accentuato il processo di mitosi, e quello esterno connettivo. Lo strato mucoso e quello epiteliale esterno, di solito di spessore di ~60 micron, proteggono le cellule basali. Queste sono però raggiunte dalle particelle alfa, se lo spessore dell'abbinamento muco-epitelio esterno arriva ai 20-30 micron (Figura 2.10).



**Figura 2.10** – Struttura dell'epitelio polmonare

Le particelle alfa, inoltre, possono penetrare l'epitelio quando nelle vie bronchiali periferiche, in prossimità degli alveoli polmonari, lo spessore dell'epitelio diminuisce sino a 15 micron. Le vie di introduzione dei radioisotopi nell'organismo umano sono l'inalazione, l'ingestione e l'assorbimento cutaneo. Si suppone che le particelle  $\alpha$ , a causa della loro grande massa, andando in contatto con il DNA, all'interno dell'epitelio basale, rompano in più punti la doppia elica, provocando un serio danneggiamento al nucleo della cellula. Ciò può dar luogo a mutazioni permanenti delle cellule colpite, aumentando così la probabilità di contrarre tumori polmonari. Le cellule, naturalmente, con sistemi enzimatici, riescono a riparare la catena spezzata, solo quando le rotture sono minime, ma non riescono quando i danni provocati sono di notevole entità.

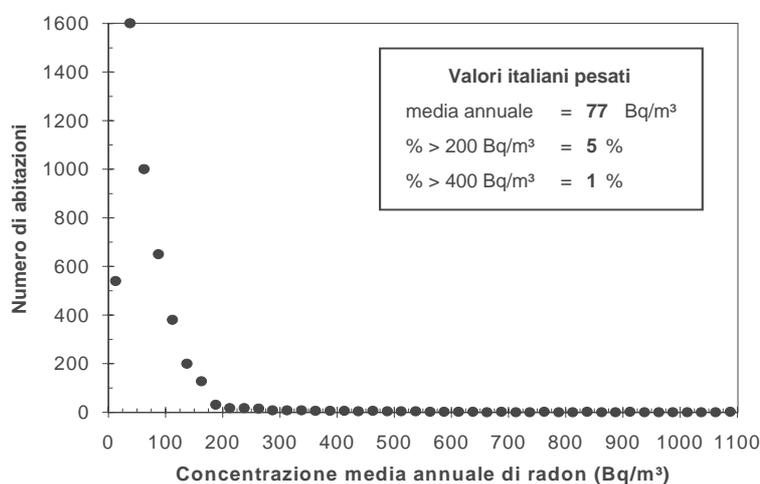
Soprattutto negli ambienti polverosi le particelle, formatesi in seguito al decadimento del Radon, si fISSANO al pulviscolo dell'aria prima dell'inalazione e così sono veicolate fino agli alveoli polmonari.

## 2.8. 1 EFFETTI DELL'INALAZIONE

Come già detto, la dose da particelle alfa rilasciata nelle cellule bersaglio dell'epitelio bronchiale è dovuta principalmente ai prodotti di decadimento a vita breve del Radon. Tali

prodotti, infatti, si depositano sulla superficie delle vie bronchiali e pertanto hanno una probabilità più alta di colpire i nuclei delle cellule rispetto al Radon, che decade durante il percorso nelle vie respiratorie.

L'inalazione dei radioisotopi, è responsabile in Italia di una dose efficace media di circa 2 mSv/anno, con variazioni molto sensibili a seconda delle caratteristiche geologiche della località considerata, della tipologia dei fabbricati e dei materiali impiegati nella costruzione. Vi sono ad esempio valutate dosi di 0,3 mSv/anno nelle abitazioni di Torino, 1 mSv/anno a Milano, 1,5 mSv/anno a Roma e 2,5 mSv/anno a Viterbo. I risultati ottenuti nella campagna nazionale di misura della concentrazione di radon *indoor* (*Indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni*) condotta da ISS e ANPA sono illustrati in Figura 2.11, ed evidenziano una concentrazione media annuale di radon di 77 Bq/m<sup>3</sup>, che può essere assunta come rappresentativa del valore medio nazionale della concentrazione di radon nelle



**Figura 2.11** - Presenza di radon nelle abitazioni italiane e percentuali di case con concentrazioni maggiori rispettivamente di 200 e 400 Bq/m<sup>3</sup>

abitazioni e negli altri luoghi chiusi. Per l'aperto si può assumere come indicativo il valore di 6 Bq/m<sup>3</sup> fornito dalla ICRP. Le valutazioni UNSCEAR quantificano in 1.2 mSv/anno e 0.07 mSv/anno i valori medi mondiali della dose efficace dovuta al Rn .

I dati epidemiologici disponibili di studi su minatori esposti ai figli del radon forniscono una stima diretta della mortalità per cancro al polmone. Un importante aspetto di questo approccio è che i livelli di esposizione non sono molto maggiori di quelli trovati nelle case, anche per valori medi di esposizione nelle case. L'analogia tra gli uomini in età di lavoro che lavorano nelle miniere con le famiglie che dormono nelle loro camere da letto può non essere perfetta. Comunque, anche se i rischi dell'esposizione al radon ed ai suoi figli negli edifici non sono ben caratterizzati, i loro rischi potenziali di cancro al polmone devono essere presi seriamente in considerazione sia nelle case che negli ambienti di lavoro. Il rischio di morte da un'esposizione per tutta la vita alla concentrazione media di radon indoor è stimato essere nell'intervallo tra 0.1 e 1%, indipendentemente dal paese e dalle abitudini di fumo. La

combinazione tra fumo e radon non ha un effetto lineare, cioè la pericolosità dei due fattori considerati contemporaneamente non è la semplice somma, in realtà tendono ad ampliare la loro pericolosità.

Allo stato attuale si hanno i mezzi, sia tecnici che pratici per contrastare il rischio radon. Le autorità locali possono e devono ricoprire un ruolo essenziale. In particolare si possono indicare tre approcci fondamentali al problema radon:

- 1) approfondire la comprensione della situazione locale riguardo i rischi legati alla presenza di radon attraverso la redazione di mappe di rischio;
- 2) informare la popolazione sui rischi per la salute posti dal radon e sulle tecniche per diminuire l'incidenza del rischio stesso;
- 3) sostenere economicamente le soluzioni al problema del radon non appena esso sia stato identificato attraverso contributi per la realizzazione delle opere di mitigazione [ICRP, 1997; Enea, 1999; [www.unscear.org](http://www.unscear.org)].

## CAPITOLO III

### TECNICHE E STRUMENTI DI MISURA DEL RADON

Il  $^{222}\text{Rn}$  rappresenta la maggior sorgente di radioattività ambientale e da qui l'interesse scientifico e sanitario ha portato allo sviluppo di moltissimi metodi di misura del Radon. D'altra parte il crescere delle attività di ricerca e di monitoraggio, tese a migliorare le conoscenze sul Radon, ha portato al perfezionamento di nuove tecnologie per la misura di questo gas, allo scopo di superare le difficoltà sperimentali legate essenzialmente al suo basso tempo di dimezzamento [Nuccetelli C. et al., 1997].

Diverse sono le tecniche di misura della concentrazione di radon e dei suoi prodotti di decadimento. La scelta del metodo dipende principalmente dal tipo di informazione che si vuole ottenere e dal grado di precisione e di accuratezza con cui si ritiene accettabile il dato.

L'approccio maggiormente utilizzato è quello di valutare il rischio sulla base della misura dell'esposizione al radon o ai suoi prodotti di decadimento.

Sebbene la maggior parte delle misure determina solo la concentrazione del Radon, i modelli per la valutazione del rischio connesso al tumore polmonare prevedono la misura sia del Radon che della sua progenie al fine di ricavare la Potenziale Concentrazione di Energia Alfa in aria (PAEC: l'energia totale  $\alpha$  emessa da tutti gli atomi di una qualsiasi miscela di figli a breve vita del radon per unità di volume [ $\text{J}/\text{m}^3$ ]) [Moroni M., 2001]. Tuttavia, la misura diretta del PAEC richiederebbe l'uso di apparecchiature complesse o comunque la conoscenza della concentrazione di attività in aria della miscela di radon e dei suoi discendenti in condizioni di equilibrio, condizione questa che, a causa dei fenomeni di ventilazione e di plate-out (vedi Capitolo II), non si realizza praticamente mai, né in ambiente chiuso né all'aperto.

E' stata quindi introdotta la concentrazione di equilibrio equivalente di radon (EEC [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]) che rappresenta quella concentrazione di attività del radon in equilibrio con i suoi figli a breve vita che ha la stessa concentrazione di energia potenziale  $\alpha$  nella miscela non in equilibrio. Pertanto, il problema viene risolto sfruttando il fatto che il rapporto tra la concentrazione di equilibrio equivalente e la concentrazione di attività del radon in aria è, per le abitazioni e per i normali ambienti di lavoro, relativamente costante. In questo modo è possibile riferire le valutazioni di rischio a partire dalla misura della concentrazione del solo radon.

In tale capitolo si procederà alla descrizione delle tecniche di misura del gas Radon rivolgendo una maggiore attenzione a quelle che sono le tecniche di campionamento passivo, visto che il monitoraggio è stato effettuato attraverso rivelatori passivi tipo CR-39.

### 3.1 CARATTERISTICHE GENERALI

La maggior parte dei metodi di misura del Radon e dei suoi figli si basa sulla rivelazione delle particelle alfa emesse dai radionuclidi durante i decadimenti, altri, invece sfruttano l'emissione gamma o beta dei figli.

Per la rilevazione vengono generalmente usati tre differenti approcci di campionamento:

- *istantaneo*: la misura viene eseguita in brevi intervalli temporali rispetto alle variazioni di concentrazione, prelevando dall'ambiente un quantitativo d'aria che viene introdotto in speciali camere a diversa geometria e diametro che vengono poi portati ed analizzati in laboratori specializzati, normalmente al massimo dopo alcuni giorni. Tali strumenti sono particolarmente utili in campagne di monitoraggio in ambienti dove si suppongono livelli critici di concentrazione. In particolare il campionamento istantaneo utilizzato al fine della radioprotezione negli ambienti di lavoro e domestici e per l'individuazione di miniere sotterranea d'Uranio.
- *continuo*: si misurano le fluttuazioni di concentrazione in tempi dell'ordine di alcune ore, rendendo così possibile lo studio dei parametri che danno luogo a tali variazioni. La strumentazione in questo caso è complessa e consente cicli di misura in automatico. Il grande vantaggio di alcuni di questi sistemi è che possono registrare contemporaneamente alla concentrazione del radon altri parametri importanti quali la temperatura interna ed esterna della casa, la pressione atmosferica, l'umidità relativa, ecc.. Inoltre permettono di analizzare l'andamento temporale dei parametri registrati e di correlarli tra di loro. In tal modo si possono trarre importanti informazioni circa gli specifici meccanismi d'ingresso del radon in un edificio o anche riconoscere eventuali fattori casuali. Avendo un riscontro in tempo quasi reale, si possono anche sperimentare diverse condizioni di misura (sistema di riscaldamento spento ed acceso, ventilazione in depressione o meno, ecc.) andando a creare condizioni favorevoli all'ingresso del radon, oppure anche verificare subito l'efficacia di eventuali provvedimenti (sigillare una crepa, creare un'apertura di ventilazione in cantina, ecc.) [APAT, 2004].
- *integrato*: si basa sulla misura integrata nel tempo dell'attività presente nell'ambiente di misura. E' possibile effettuare le misure integrate. È possibile eseguire le misure integrate o per un breve periodo di tempo (alcuni giorni), ma è preferibile eseguirla sull'anno (o eventualmente su alcuni mesi nel caso in cui

siano applicabili condizioni di riferibilità ad un valore medio annuo), è particolarmente indicata per determinare in maniera rappresentativa la concentrazione del gas **radon indoor (G)**, in quanto media i fattori di variabilità del radon in un ambiente confinato (per es. le tipiche fluttuazioni giornaliere e stagionali).

### 3.2 PRINCIPALI TECNICHE DI MISURA DEL RADON IN ARIA

La misurazione del radon e della sua progenie avviene tramite la rivelazione di particelle  $\alpha$ . Come tutte le particelle cariche, si va a sfruttare la proprietà di ionizzazione degli atomi o molecole del materiale attraversato. Il percorso delle particelle  $\alpha$  dipende dalla densità del mezzo che attraversano. In aria sono in grado di percorrere alcuni centimetri, in materiali più densi, come plastica o tessuti umani, il loro cammino è di alcuni micron.

I diversi sistemi di misura del  $^{222}\text{Rn}$  possono essere, inoltre, classificati a seconda del tipo di campionamento utilizzato:

- campionamento attivo: il Radon e i suoi prodotti di decadimento sono indotti in prossimità del rivelatore o sul dispositivo di raccolta attraverso un'aspirazione forzata con un sistema di pompaggio meccanico. Tali rivelatori, visti i tempi di risposta, sono generalmente rivelatori real-time [Tommasino L., 1997].
- campionamento passivo: il Radon e i suoi prodotti di decadimento sono raccolti seguendo principalmente la naturale diffusione del gas, ma anche le proprietà di adsorbimento, solubilità e permeabilità. In questo caso le misure sono disponibili solo dopo successiva analisi in laboratorio. Tali rivelatori sono, per tale motivo, generalmente non real-time [Tommasino L., 1997].

#### 3.2.1 Rilevatori attivi

I rivelatori attivi consentono di effettuare un campionamento istantaneo, in brevi intervalli di tempo, o continuo della concentrazione del Radon in campioni di aria.

Si distinguono principalmente le seguenti categorie di strumenti attivi:

- *camere a ionizzazione*: il radon si diffonde all'interno di una determinata camera, a volume noto, attraverso una membrana permeabile e decadendo ionizza l'aria. Gli ioni prodotti vengono quindi attratti da un catodo, collegato ad un sistema elettronico che registra le variazioni di carica e le traduce nel valore di concentrazione di radon in aria. Il campionamento può essere effettuato in flusso continuo o con prelievi istantanei. La sensibilità di tale strumento è dell'ordine di  $10^{-14}$  A Bq: la minima concentrazione rilevabile dipende dal tempo di misura e dal

volume della camera. In commercio la camera a ionizzazione più diffusa per la misura continua del Radon è l'Alpha-guard (Figura 3.1).



**Figura 3.1** – Alpha-guard

- *dispositivi a barriera di superficie (metodo dei due filtri)*: l'aria dell'ambiente di misura viene campionata su di un apposito filtro, posizionato all'interno dello strumento di misura. Di fronte al filtro è posto un rivelatore a barriera di superficie che dopo un determinato tempo registra le particelle alfa emesse dal radon e con un algoritmo di calcolo ricava la concentrazione di attività di radon in aria. I fattori che influenzano tale tecnica di misura sono essenzialmente la sensibilità al fondo gamma ambiente, l'umidità e la polvere.
- *camere a scintillazione*: la misura avviene grazie ad un apposito contenitore (più comunemente celle di Lucas), in cui è raccolta l'aria da esaminare. Le pareti interne di tali celle sono ricoperte da solfuro di zinco (ZnS), particolarmente idoneo al processo di scintillazione, detto appunto scintillante perché, se colpito dalle particelle alfa del radon, emette dei fotoni. Il volume interno della cella, riempito con l'aria da analizzare (modalità attiva), è posto in contatto con un tubo fotomoltiplicatore attraverso la finestra trasparente. In tal modo i fotoni sono trasformati in un segnale elettrico, proporzionale all'energia trasportata dalla radiazione. Da tale segnale si ricava l'informazione sulla concentrazione di attività di radon. Anche per le camere a scintillazione il campionamento può essere effettuato a flusso continuo o con prelievi istantanei.

La sensibilità di questi sistemi è in genere molto elevata ed indicata per misurare anche concentrazioni di radon di pochi Bq/m<sup>3</sup>.

### 3.2.2 Rilevatori passivi

Normalmente la strumentazione viene definita passiva quando non necessita di essere alimentata da corrente elettrica. Essa consente di realizzare un campionamento integrato nel tempo, utilizzato per monitoraggi che richiedono un lungo periodo di osservazione e si basa

sul fatto che le particelle alfa, attraversando determinati materiali, lasciano una traccia nel loro passaggio che viene misurata successivamente in laboratorio.

Il documento “Linee Guida per le misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei” individua in tali tecniche di misura quelle in grado di adempiere alle richieste avanzate dalla normativa, fatta salva l’adozione di quelle configurazioni più comunemente impiegate e conosciute, sottoposte negli ultimi anni a diversi interconfronti svolti presso il laboratorio inglese National Radiological Protection Board (UK) o presso i laboratori dell’ENEA - Casaccia .

Infatti va precisato che, poichè nell’Allegato I –bis del D.Lgs. 230/95 il livello di azione per la concentrazione di radon è fissato in termini di concentrazione di attività media annua, le misure devono ricoprire un intervallo di anno solare attraverso una o più esposizioni. Pertanto la misura integrata con strumentazione passiva, eseguita sull’anno (o eventualmente su alcuni mesi nel caso in cui siano applicabili condizioni di riferibilità ad un valore medio annuo), è particolarmente indicata per determinare in maniera rappresentativa la concentrazione del gas radon indoor, in quanto media i fattori di variabilità del radon in un ambiente confinato (per es. le tipiche fluttuazioni giornaliere e stagionali).

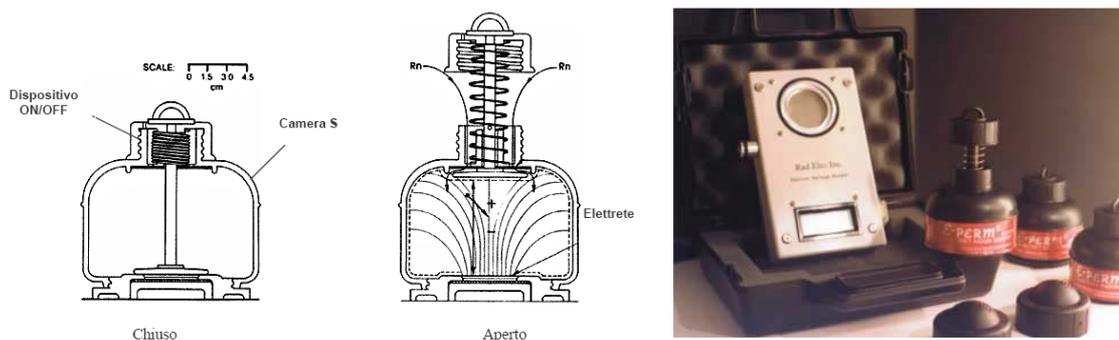
La durata del periodo d’esposizione va valutata preventivamente, in quanto nel caso di esposizioni molto lunghe ed in presenza di concentrazioni molto elevate del gas radon, il dosimetro può andare in saturazione, cioè può perdere la capacità di registrare la reale concentrazione di radon. In questo caso bisogna ripetere la misura per periodi consecutivi più brevi. Dato che i costi della misura sono relativamente bassi, questi sistemi sono particolarmente indicati per l’esecuzione di campagne di misura.

Le tecniche di tipo passivo utilizzano diversi tipi di rilevatori adatti allo scopo:

- rilevatori ad elettrete;
- canestri a carboni attivi;
- rilevatori a tracce nucleari.

### **3.2.2.1 Rilevatori ad elettrete**

E’ un sistema passivo ad integrazione e si basa sull’utilizzo di una camera a ionizzazione di materiale plastico conduttore e da un disco di teflon (elettrete) che mantiene un potenziale elettrostatico stabile (Figura 3.2). Il solo gas radon si diffonde all’interno della camera a ionizzazione attraverso appropriate fessure filtrate. Per effetto del campo elettrostatico prodotto dall’elettrete all’interno della camera a ionizzazione gli ioni negativi, generati dal decadimento del radon e raccolti dall’elettrete, provocano una diminuzione della carica elettrostatica mentre gli ioni positivi vengono raccolti e neutralizzati dalle pareti della camera. Misurando attraverso un voltmetro la differenza di potenziale dell’elettrete, misurata prima e dopo il posizionamento del dosimetro, proporzionale alla concentrazione di radon nell’ambiente di misura e al tempo di esposizione, si determina, usando opportuni fattori di



**Figura 3.2** – Elettrete visto in sezione chiuso e aperto (con foto di elettrete con associato voltmetro digitale).

calibrazione, la concentrazione media di radon nella camera e quindi nell'ambiente [Moroni M., 2000].

La sensibilità dell'elettrete è in genere molto elevata ed indicata per misurare anche concentrazioni di radon di poche decine di  $\text{Bq/m}^3$ . Il sistema è indicato per brevi (alcuni giorni) e lunghi tempi (mesi) di esposizione. I principali limiti dell'elettrete sono da che il potenziale elettrostatico del disco risente dei campi elettromagnetici locali e che dosimetro ad elettrete è sensibile al fondo gamma dell'ambiente da misurare, per cui la discriminazione della radiazione  $\alpha$  da quella  $\gamma$  richiede una particolare procedura. Inoltre lo strumento di lettura del potenziale superficiale degli elettreti (voltmetro) va tenuto in ambienti a bassa umidità e normali condizioni di temperatura.

### 3.2.2.2 Canestri a carboni attivi

Il canestro a carbone attivo è generalmente una scatola metallica cilindrica contenente i carboni attivi che adsorbono il radon presente nell'aria (Figura 3.3). Dopo un tempo di esposizione, dell'ordine di qualche giorno i canestri vengono analizzati in laboratorio o per mezzo di tecniche di scintillazione liquida o con spettrometria gamma, tipicamente si usa uno scintillatore allo ioduro di sodio.



**Figura 3.3** – Canestri a carboni attivi.

Dai risultati dell'analisi spettrale, dalla conoscenza del tempo di esposizione e del fattore di calibrazione si ricava la concentrazione relativa al periodo di esposizione. La tecnica dei

carboni attivi è adatta a misure di concentrazioni anche inferiori ai 20 Bq/m<sup>3</sup> e richiede pochi giorni per la sua realizzazione, ma può essere applicata anche per determinare la concentrazione media annuale eseguendo una misura ogni 3 mesi. Il limite principale consiste nella forte dipendenza dalle condizioni ambientali di temperatura e umidità [L. Tommasino, 1988; APAT, 2004].

### 3.2.2.3 Rilevatori a tracce nucleari

Tale sistema di misura (dosimetri) sono composti da un contenitore e da un rivelatore a tracce nucleari (elemento sensibile). I rivelatori nucleari a tracce o SSNTD (Solid State Nuclear Track Detector) sono dei polimeri, realizzati in sottili lastre, largamente utilizzati per monitorare l'esposizione al radon della popolazione.

In commercio i tipi più diffusi sono:

- LR-115 e CN-85 (nitrato di cellulosa) prodotti dalla Kodak-Pathè (Francia);
- CR-39 (poliallildietilene glicoldicarbonato) prodotto dalla Page Mouldings-Pershore (UK), dalla American Acrylics and Plastic (USA) e dalla Intercast Europe S.p.A (Italia);
- Makrofol (policarbonato) prodotto dalla Bayer AG tedesca (R. Adriamanatena, 1997).

I rivelatori CR-39 sono dei polimeri realizzati in sottili lastre, sensibili alle radiazioni alfa ed insensibili alle altre radiazioni.

Rilevatori e dosimetri prima dell'esposizione subiscono un trattamento antistatico al fine di evitare accumuli di cariche elettrostatiche sulle loro superfici [Tommasino L., 1988].

Anche in questo caso è sfruttato il potere ionizzante delle particelle cariche: i dosimetri hanno la funzione di veri e propri filtri e camere di diffusione; essi infatti sono opportunamente progettati per consentire il passaggio per diffusione o per permeazione delle molecole del solo <sup>222</sup>Rn (5.48 Mev) e dei suoi prodotti di decadimento sviluppati all'interno del dosimetro stesso radon che producono, per effetto del suo decadimento, una serie di radiazioni alfa sui rivelatori. Tali particelle alfa hanno una certa massa e una certa velocità e nella loro interazione con la materia, l'energia che possiedono viene rilasciata durante gli urti con gli atomi o le molecole del mezzo attraversato. A causa della loro massa relativamente grande, sono in grado di ionizzare il mezzo che attraversano, ossia di romperne i legami molecolari e atomici producendo ioni.

Mentre in molti materiali gli ioni si ricombinano e non rimane alcun segno del passaggio della radiazione, nel caso dei materiali dielettrici le particelle pesanti (nuclei di fissione, particelle  $\alpha$ ) passando attraverso essi, trasferiscono un'elevata frazione di energia per unità di percorso, provocando delle fratture ai legami polimerici del sensore lungo la traiettoria della particella.

Le particelle alfa che interagiscono con il materiale causano un danno ai legami chimici (traccia latente) , il quale viene evidenziato mediante un trattamento chimico e/o elettrochimico. Tali processi amplificano la traccia sino a renderla misurabile con tecniche basate sulla lettura ottica.

Il danno, o “traccia latente”, generato a seguito della rottura dei legami molecolari, essendo dell’ordine di alcune decine di nanometri, può essere solo osservato con microscopi elettronici; tuttavia se il materiale è sottoposto alla tecnica dell’ ”attacco chimico” (trattamento con soluzioni acide o alcaline a temperature di alcune decine di gradi) queste tracce si sviluppano fino a diventare visibili ai normali microscopi ottici o addirittura, in alcuni casi, ad occhio nudo.

Dal conteggio del numero di tracce che si sviluppano, proporzionale alla concentrazione di radon presente nell’ambiente in cui il materiale è stato esposto e al tempo di esposizione, non è possibile valutare le variazioni tipiche della concentrazione del radon che avvengono in brevi intervalli di tempo (giorno-notte, mutamenti dei parametri atmosferici), ma essa consente di ricavare la concentrazione di attività media (RAC) di tale gas specifica di un determinato ambiente, caratteristica questa fondamentale perché fornisce precise informazioni sull’esposizione a cui sono sottoposte le persone che vivono e lavorano nel locale monitorato durante il periodo di misura.

La stabilità della traccia latente, l’elevato grado di affidabilità della tecnica (la sensibilità dei rivelatori a tracce è in genere molto elevata ed indicata per misurare anche concentrazioni di radon di poche decine di Bq/m<sup>3</sup>) ed il basso costo rendono tali rilevatori particolarmente attraenti per campagne di misura di radon su larga scala, integrate su lungo periodo (il sistema è particolarmente indicato per tempi di esposizione superiori al mese fino ad un massimo, indicativamente, di un anno).

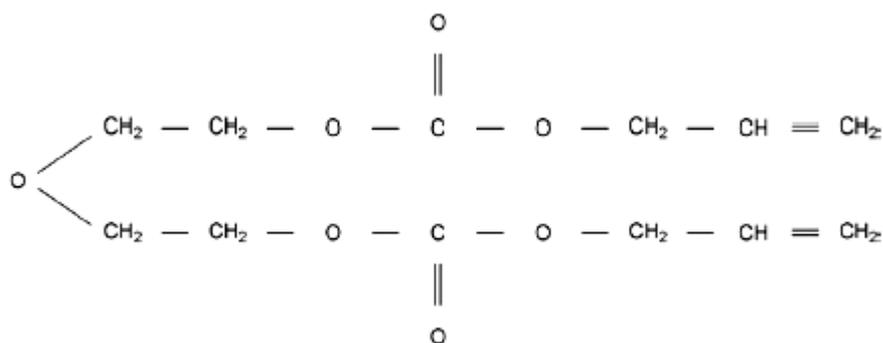
In commercio ve ne sono di forme e dimensioni diverse, sempre comunque con un volume di ingombro piuttosto contenuto (dell’ordine di pochi centimetri cubi), estremamente maneggevoli e leggeri.

Paragonati ai materiali termoluminescenti ed agli elettretti, i rivelatori a traccia registrano le particelle  $\alpha$  con alta sensibilità e selettività, essendo, tra l’altro, insensibile alla radiazione debolmente ionizzante ( $\gamma$  e  $\beta$ ) [APAT, 2004; Durrani S. A., 1997].

### **3.3 TECNICA DI MISURA UTILIZZATA: RIVELATORI CR 39**

Nel presente lavoro di ricerca, la misura integrata nel tempo della concentrazione media del gas radon nell’aria interna delle strutture monitorate è stata determinata attraverso l’utilizzo di rilevatori del tipo CR39.

Il CR39 (PADC), acronimo di Columbia Resin 1939, è una resina termoindurente con formula chimica  $(C_{12}H_{18}O_7)_n$  ottenuta mediante un processo di polimerizzazione; il monomero allildiglicolcarbonato (ADC) è un estero, che si forma mediante un processo di transesterificazione del diallil carbonato col glicoldietilene, la cui formula di struttura è riportata in Figura 3.4 [Eren San S., 2005].



**Figura 3.4** - Formula di struttura del CR-39

Tra i diversi tipi di rilevatori a tracce, la scelta di adottare il CR39 è stata ponderata considerando i numerosi vantaggi che essa comporta:

- la tecnologia che utilizza tali rilevatori implementa la possibilità di condurre misure simultanee in diversi siti e fornisce il valore dell'integrale del RAC fondamentale per risalire alla dose di esposizione delle persone che lavorano nell'ambiente sorvegliato;
- la dimensione dei rivelatori è un importante parametro da prendere in considerazione in qualsiasi misura con sistemi passivi. Tanto più piccole sono le dimensioni dei rivelatori e dei loro contenitori, tanto più grandi sono i vantaggi verso gli utilizzatori dei sistemi. I CR39 offrono il vantaggio di poter esser utilizzati in grandi quantità con piccole dimensioni. Da ciò scaturisce una notevole praticità nell'uso e nella catalogazione;
- la possibilità di archiviare i rivelatori già sviluppati nei loro contenitori in ambienti chiusi in modo da poter effettuare di nuovo la misura dopo un intervallo di tempo dallo sviluppo piuttosto lungo;
- l'indipendenza della misura dalle condizioni ambientali; non vi è alcuna influenza nei CR-39 per temperature fino a 110 °C e per intervalli di umidità compresi tra il 5% ed il 95%. Ne consegue una grande affidabilità del metodo [Radosys, 2000].
- buone caratteristiche dosimetriche [Stejny J. et al., 2000]:
  - elevata qualità della superficie di post- attacco anche dopo attacchi chimici prolungati.
  - risposta su di un ampio intervallo di energia (200 keV – 14 MeV) ed una bassa soglia di rivelazione (< 0,1 mSv).

**Tabella 3.1- Parametri fisici del CR 39**

<i>Peso specifico a 25° C</i>	1,32 g/cm <sup>3</sup>
<i>Indice di rifrazione a 20° C</i>	1,501
<i>Calore specifico</i>	0,55 cal/g ° C
<i>Resistenza alle contrazioni</i>	3,5 - 4,2 kg/mm <sup>2</sup>
<i>Resistenza alle compressioni</i>	15,8 kg/mm <sup>2</sup>

In particolare i dosimetri utilizzati sono del tipo Radoset Extra (RSFS) (Figura 3.5) e si presentano già completamente assemblati: i rilevatori PADC sono posizionati sotto il tappo di chiusura del dosimetro di dimensione di Ø 60mm × 30mm dotato dello stesso codice di identificazione del PADC assemblato.

**Figura 3.5 – Dosimetro utilizzato**

Il contenitore funziona sia da filtro che camera da diffusione: tra il tappo e il dispositivo stesso esiste infatti un'apertura (ovegap), dell'ordine dei 20-30 µm, che consente l'ingresso delle sole particelle α del gas radon (Rn<sup>222</sup>) all'interno del contenitore, entro cui esso può diffondere e decadere portando alla formazione dei suoi discendenti, che si sviluppano all'interno dello stesso.

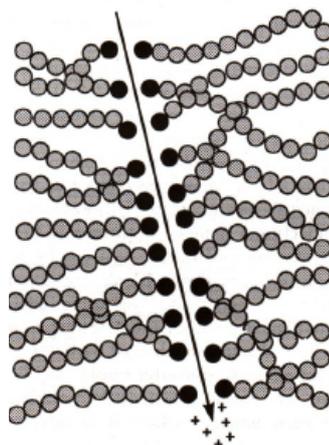
Una volta terminata la fase di esposizione all'interno dei locali da monitorare, i dosimetri sono stati portati in laboratorio e sottoposti al processo di sviluppo mediante il Sistema Radosys 2000 [Radosys, 2000].

### 3.3.1 PROCESSO DI FORMAZIONE DELLA TRACCE LATENTI

I processi fisici di base che concorrono alla formazione delle tracce sono la ionizzazione e l'eccitazione delle molecole del materiale attraversato. La formazione della traccia latente dipende dal tipo di interazione con cui la particella α perde energia all'interno del materiale isolante. Durante il moto attraverso il mezzo uno ione, di numero atomico  $Z$ , acquista una carica efficace  $Z_{eff}$  che può essere calcolata attraverso la formula empirica [Durrani S. A. et al., 1987; Hafez A. F., et al., 1991] seguente:

$$Z_{eff} = Z \left( 1 - \exp \left[ -130 \beta Z^{-2/3} \right] \right)$$

Nella maggior parte dei casi si trova che  $Z = Z_{\text{eff}}$ ; ciò vuol dire che per elevate velocità (ovvero nel caso di collisioni definite hard per differenziarle dalle soft capaci di provocare solo un'eccitazione dell'atomo), gli ioni interagiscono con gli elettroni atomici del solido ionizzando gli atomi. Gli elettroni di rinculo di alta energia, chiamati raggi  $\delta$  o elettroni di knock-on, possono dare origine a processi di ionizzazione secondarie capaci di estendersi a grandi distanze radiali dalla direzione dello ione [Hafez A. F., 1998]. In Figura 3.6 è schematizzato il modello di formazione della traccia latente in polimeri organici.



**Figura 3.6** - Rottura della catena polimerica lungo il percorso delle particelle  $\alpha$

Diversi modelli matematici sono stati proposti per il calcolo dell'intensità del danno prodotto in termini di energia rilasciata per unità di percorso. Va sottolineato che ogni singola collisione atomica è un processo statistico che può avvenire, cioè, con una certa probabilità. Poiché il numero di collisioni lungo un percorso finito è comunque grande, le fluttuazioni dell'energia totale persa sono piccole e si può ragionevolmente considerare la perdita di energia media per unità di lunghezza del mezzo, quantità, detta *stopping power* (potere frenante).

Seguendo il modello proposto da Bethe-Block con le opportune correzioni, la perdita di energia totale dello ione per unità di percorso è data dalla seguente espressione:

$$\frac{dE}{dx} = K\rho \left(\frac{Z}{\beta}\right)^2 \left(\frac{Z_t}{A_t}\right) \left[ \frac{1}{2} \ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I^2}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C_s}{Z_t} \right]$$

dove:

$x$  = spessore del materiale attraversato;

$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$  ( $N_A$  è il numero di Avogadro,  $r_e$  e  $m_e$  sono il raggio e la massa dell'elettrone, rispettivamente);

$\rho$  = densità del mezzo;

$Z$  = carica dello ione incidente;

$Z_t$  = numero atomico del mezzo;

$A_t$  = la massa atomica del mezzo;

$\beta = v/c$  della particella incidente;

$T_{max}$  = massima energia cinetica trasferita in una singola collisione ad un elettrone (Knochen);

$I$  = potenziale di ionizzazione medio del mezzo, calcolabile mediante formule empiriche;

$\delta$  = termine correttivo che tiene conto dell'effetto densità, legato alla polarizzazione del mezzo da parte del campo elettrico della particella;

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$C_s(I, \beta\gamma)$  = correzione di shell importante quando la velocità della particella incidente è confrontabile o minore della velocità orbitale degli elettroni legati del mezzo: a tali energie, infatti, l'assunzione che l'elettrone sia fermo rispetto alla particella incidente non è più valida e la formula di Bethe-Block necessita della presente correzione [Leo, W.R. 1987].

Tuttavia (<http://www.bo.infn.it/slim/ntd.htm>), nel caso del rivelatore CR39, la grandezza fisica rilevante per la formazione della traccia non è la perdita di energia totale ma la cosiddetta perdita di energia ristretta (REL), introdotta da Benton (1967), in quanto per la formazione della traccia si considerano significativi solamente i rilasci di energia che danno luogo a raggi  $\delta$  con energia cinetica  $E_\delta < E_{max}$ , dove  $E_{max} = 200$  eV rappresenta il valore limite di energia dei raggi  $\delta$  per il CR39. Pertanto la perdita di energia ristretta è fornita dalla seguente relazione:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{REL} = K \left(\frac{Z}{\beta}\right)^2 \left(\frac{Z_t}{A_t}\right) \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{upper}}{I^2}\right) - \frac{\beta^2}{2} \left(1 + \frac{T_{upper}}{T_{max}}\right) - \frac{\delta}{2} - \frac{C_s}{Z_t} \right]$$

dove  $T_{upper} = \min(T_{max}, E_\delta)$

In particolare, la formazione della traccia è legata alla perdita di energia localizzata entro 10 nm circa di diametro dal percorso della particella che, durante il passaggio attraverso il sensore, produce la rottura delle lunghe catene polimeriche, provocando quindi delle vacanze che, a temperature ambiente, si conservano per un determinato tempo [Mazur D., 1999].

### 3.3.2 PROCESSO DI SVILUPPO

Il processo di sviluppo si articola secondo tre fasi principali:

1. Preparazione dei rivelatori;

2. Attacco chimico;
3. Riconoscimento delle tracce, attraverso il software di gestione del microscopio ottico a luce trasmessa, e analisi delle stesse per mezzo del software di analisi quantitativa.

### 3.3.2.1 Preparazione dei rivelatori

Innanzitutto si è proceduto alla preparazione dei rivelatori e al processo di sviluppo: ciascun chip di PADC è rimosso dal rispettivo dosimetro e posizionato celermente e accuratamente nell'apposito alloggiamento della slide con il lato attivo rivolto verso l'alto (Figura 3.7) usando guanti di cotone e apposite pinzette per evitare di poter rigare e manomettere le pellicole [Radosys, 2000].



*Figura 3.7 – Rivelatori CR-39 nelle apposite slide*

Va infatti osservato che il CR-39 presenta una diversa densità di tracce di fondo fra una superficie e l'altra. Si ritiene che questa differenza tra i due lati della lastra possa essere causata da microimpurezze presenti nella miscela iniziale, non trattenute dal filtro, in fase di stampo, che per effetto della gravità tendono a depositarsi sul lato inferiore della lastra, influenzando sulla distribuzione dei legami chimici delle molecole del monomero che si generano durante la polimerizzazione.

Dopo il riempimento delle slides, queste sono state inserite nel tamburo di posizionamento per lo sviluppo facendole scorrere lungo apposite slitte; l'orientazione corretta della slide nella slitta assicura che le forze meccaniche dovute al processo di sviluppo spingeranno il rivelatore plastico contro la slide (e quindi la ancorerà all'alloggiamento) e in direzione opposta, in modo da favorirne l'uscita alla fine del processo.

### 3.3.2.2 Attacco chimico

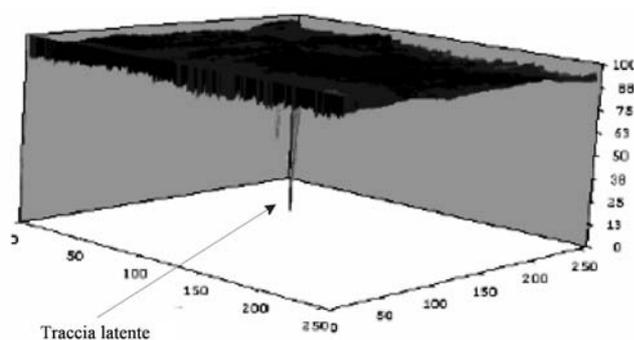
Le tracce generate dalle particelle  $\alpha$  sul CR-39 hanno dimensioni dell'ordine dei nanometri per cui per rendere possibile la loro lettura, i rivelatori sono sottoposti ad un attacco chimico con un acido forte o una soluzione basica che, corrodendo amplifica le tracce

latenti (Figura 3.8), fino a qualche decina di micrometri, rendendole così visibili al microscopio ottico.



**Figura 3.9** – Ingrandimento delle tracce dopo l'attacco chimico

La Figura 3.9 mostra le dimensioni delle tracce prima dell'attacco chimico [Aranzulla M., 2005].



**Figura 3.9** – Foto di una traccia latente su un rivelatore plastico realizzata con un microscopio a trasmissione elettronica (le scale sono espresse in  $\mu\text{m}$ )

Nel nostro caso l'attacco chimico è stato effettuato con una soluzione di NaOH al 25%, ad una temperatura di 90°C per un tempo di sviluppo di 4 ore circa nell'apposita unità di sviluppo Radobath (Figura 3.10) [Radosys 2000].



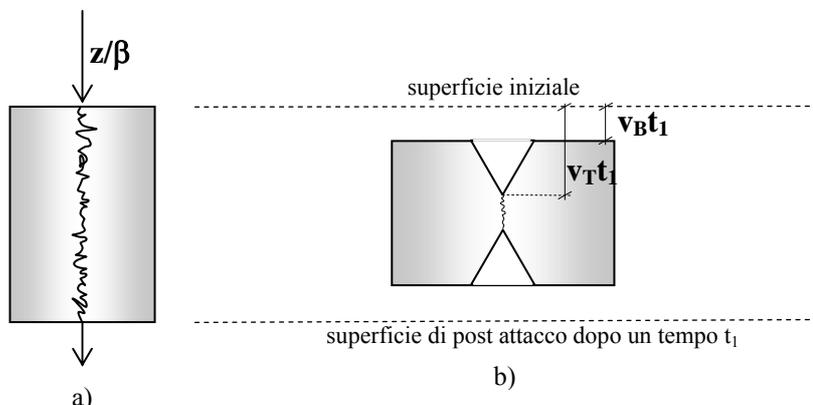
**Figura 3.10** - Radobath

La soluzione, fortemente basica di concentrazione N e temperatura T, rimuove il materiale con cui viene a contatto:

- con velocità di attacco uniforme sulla superficie non danneggiata  $v_B = v_B(N, T)$ ;

- con velocità maggiore  $v_T = v_T(N, T, REL)$  nella zona in corrispondenza alla traiettoria della particella.

Da ciò ne consegue la formazione di un cono di post- attacco (due se la particella attraversa il mezzo) con asse lungo la direzione della traccia latente:

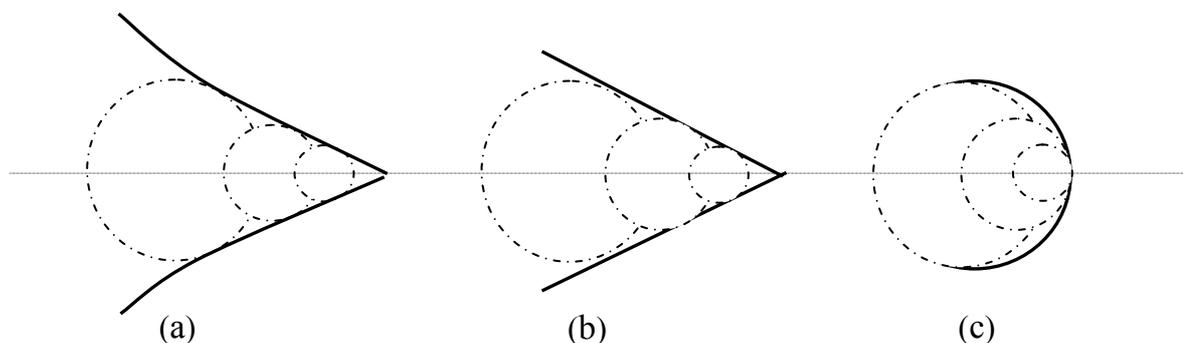


**Figura 3.11** - a) Formazione della traccia latente per un nucleo di carica  $Z$  e velocità  $Z/\beta$ ; b) Formazione di due coni alle estremità della lastrina

In un materiale omogeneo ed isotropo, l'attacco procede con velocità costante  $v_B$  in tutte le direzioni e dopo un tempo  $t$  viene rimosso uno spessore di materiale pari a  $v_B t$ . Lungo la traccia latente il materiale viene rimosso con velocità  $v_T > v_B$ . Poiché la velocità  $v_B$  dipende dalle condizioni di attacco chimico, il parametro che permette di dedurre maggiori informazioni sulla particella incidente, e quindi sulla REL, è il rapporto  $p$  definito come:

$$p = v_T/v_B$$

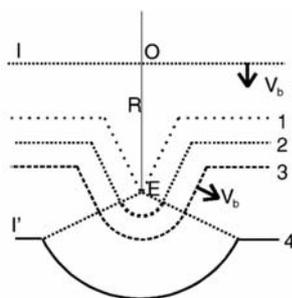
In genere, il valore dell'energia ristretta della particella non è costante lungo la traccia latente. Se la velocità della particella incidente ( $\beta c$ ) diminuisce, la REL aumenta determinando un aumento della velocità di attacco preferenziale  $v_T$ ; di conseguenza l'angolo di semi-apertura del cono si restringe; l'involuppo delle sfere elementari di raggio  $v_B t$  è mostrato in Figura 3.12(a). Nel caso in cui la REL sia costante, l'involuppo delle sfere è dato da un cono con angolo di semi-apertura costante, Figura 3.12 (b). Mentre in Figura 3.12 (c) è schematizzato il caso in cui l'attacco chimico procede lungo la traccia con REL decrescente.



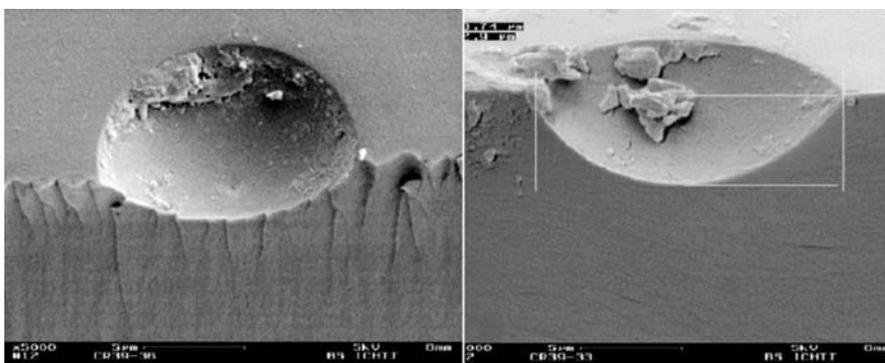
**Figura 3.12** - Sviluppo del cono di post-attacco: (a) REL crescente lungo la traccia; (b)REL costante; (c) REL decrescente lungo la traccia.

Le fasi dello sviluppo possono essere riassunte nel seguente modo: al tempo  $t_0$  la soda raggiunge il punto E (punto finale della traiettoria della particella) (Figura 3.11), durante questo primo intervallo di tempo la soluzione aggressiva procede lungo la traiettoria della particella e la traccia è totalmente conica (la superficie del rivelatore al tempo  $t_0$  è relativa al punto I in Figura 3.13).

Lo sviluppo da questo momento in poi procede in tutte le direzioni con lo stesso rate  $v_B$  e le tracce diventano sovravviluppate. Attorno al punto E si verrà a formare una sfera, la forma della traccia cambierà da conica a conica e parzialmente sferica, in prossimità del vertice (le superfici 1 e 2 in Figura 3.11) con uno sviluppo prolungato, la forma si trasformerà sempre di più fino a diventare completamente sferica (superficie 4 in Figura 3.13) (microfotografia in Figura 3.14). In tal caso si ha che il contrasto della traccia si perde rendendone difficile il riconoscimento.



**Figura 3.13** – Fasi successive dello sviluppo di una traccia



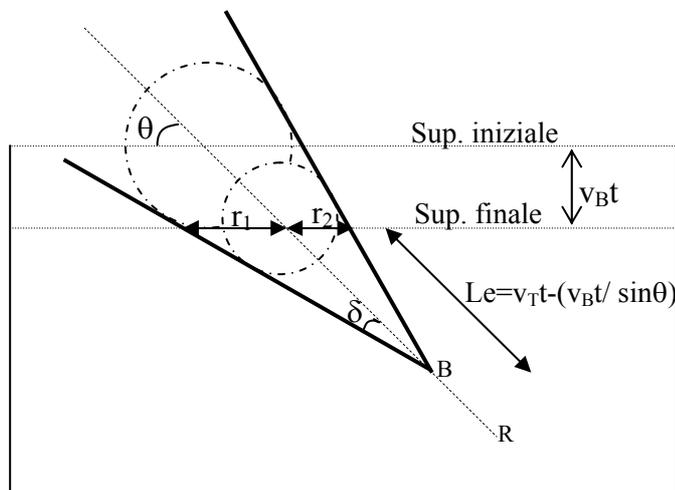
**Figura 3.14** - Foto di tracce sovravviluppate attraverso un microscopio a trasmissione elettronica [Aranzulla M., 2005]

### 3.3.2.2.1 Geometria delle tracce

In applicazioni più realistiche, la particella incide sul rivelatore con un angolo d'incidenza  $\theta$  (Figura 3.15). L'intersezione del cono con la superficie è rappresentata da un'ellisse con le posizioni dei fuochi  $r_1$  e  $r_2$ ; dalla misura diretta dell'altezza del cono e degli assi dell'ellisse è possibile calcolare il parametro di attacco  $p$  e l'angolo di incidenza della particella  $\theta$ :

$$p = \left[ 1 + \frac{4A^2}{(1-B^2)} \right]^{1/2} \quad \theta = \arcsin \left( \frac{1}{p} \cdot \frac{1+B^2}{1-B^2} \right)$$

dove  $A = a/(2v_{Bt})$  e  $B = b/(2v_{Bt})$ , con  $a$  e  $b$  asse maggiore e minore dell'ellisse.

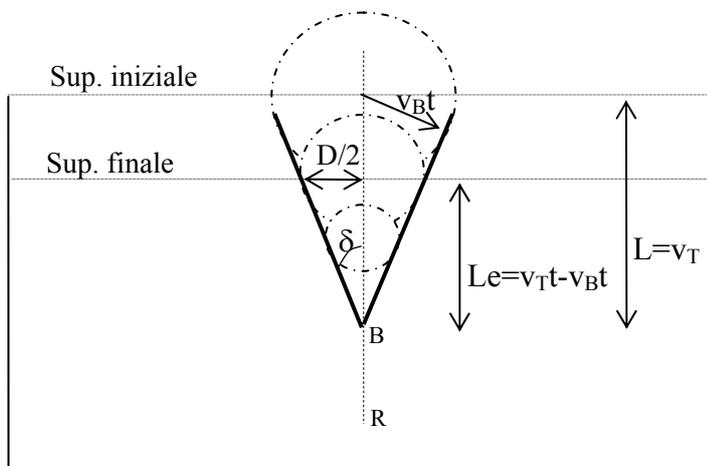


**Figura 3.15** - Traccia di post-attacco nel caso in cui la particella forma un angolo  $\theta$  con la superficie del CR39

Nel caso in cui la particella incide normalmente alla superficie del rivelatore ( $\theta = 90^\circ$ ), l'area di base del cono è una circonferenza di diametro  $D$ ; di conseguenza il parametro di attacco si semplifica in tal modo:

$$p = \frac{1 + D^2 / (4v_{Bt}^2 t)}{1 - D^2 / (4v_{Bt}^2 t)}$$

In Figura 3.16 è schematizzato un cono di post-attacco per una particella che incide perpendicolarmente alla superficie del mezzo e che si arresta ad una profondità  $R$  (range)



**Figura 3.16** - Traccia formata da una particella incidente normalmente ( $\theta=90^\circ$ ) alla superficie del CR39

dalla superficie; in tal caso i parametri geometrici della traccia sono espressi dalle seguenti relazioni:

$$D = 2v_B t \left( \frac{p-1}{p+1} \right)^{1/2} \qquad L_e = (v_T - v_B) t$$

Ipotizzando che il cono abbia angolo di apertura costante  $\delta$ , esso può ottenersi da considerazioni puramente geometriche:

$$\sin \delta = \frac{v_B t}{v_T t} = \frac{1}{p}$$

### 3.3.2.2 Angolo limite. Efficienza di attacco\*•

Non tutte le particelle che attraversano il CR39 sono rese osservabili dall'attacco chimico, essendo tale fenomeno dipendente dall'energia, dalla carica  $Z$  e dall'angolo di incidenza della particella. Per ogni materiale esiste, infatti, un valore minimo di energia persa dalle particelle necessario affinché l'attacco chimico possa evidenziare le tracce. Il livello di soglia è sempre superiore all'energia che può rilasciare un elettrone, rendendo così insensibili tali materiali alla rilevazione di elettroni veloci e di raggi  $\gamma$ . Pertanto si definisce:

- *soglia di rilevazione* il rapporto  $Z/\beta$ : una particella con velocità  $\beta c$  e carica  $Z$  è rilevata se si mantiene il rapporto  $Z/\beta > (Z/\beta)_{\min}$ . E' stato sperimentalmente dimostrato che il CR39 è il rivelatore a tracce caratterizzato dalla più bassa soglia di rilevazione potendo esso rilevare particelle con  $REL > 26$  MeV, ovvero nuclei con  $Z/\beta \geq 5$ , essendo  $(Z/\beta)_{\min, CR39} \sim 5$ ; mentre, ad esempio, per il LR115  $Z/\beta \geq 30$ ; per il Lexan  $Z/\beta \geq 55$ ;
- *efficienza di attacco  $\eta$*  la frazione di tracce incidenti la superficie del rivelatore che vengono sviluppate dall'attacco chimico.

$$\eta = 1 - \sin \theta_{cr} = 1 - \frac{1}{p}$$

In particolare, l'attacco chimico non riesce ad evidenziare tracce latenti di particelle che incidono sul rivelatore con un angolo  $\theta$  inferiore al cosiddetto angolo critico di attacco  $\theta_{cr}$ , definito dalla seguente relazione:

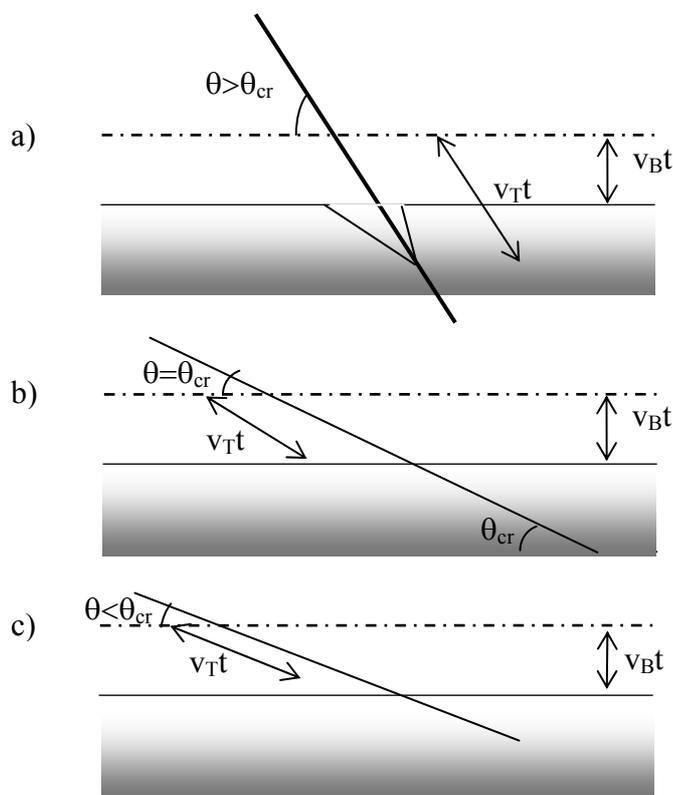
$$\sin \theta_{cr} = \frac{v_B}{v_T} = \frac{1}{p}$$

---

\*www.infn.it

Distinguiamo tre possibili condizioni di incidenza a parità di velocità di attacco, come mostrato in Figura 3.17:

- a) se la particella incide con un angolo  $\theta > \theta_{cr}$ , si ha la formazione del cono di post-attacco;
- b) se l'angolo che la direzione della particella incidente forma con la superficie del rivelatore è tale per cui  $\theta = \theta_{cr}$  (condizione limite) la componente normale alla superficie uguaglia la componente di attacco globale ( $v_T \sin \theta = v_B$ ), in tal caso non si ha formazione della traccia;
- c) se  $\theta < \theta_{cr}$  allora l'attacco globale procede rapidamente nascondendo la componente preferenziale ( $v_T \sin \theta < v_B$ ) impedendo la formazione del cono di post-attacco



**Figura 3.17** - Formazione della traccia per differenti angoli di incidenza a parità d'attacco; a)  $\theta > \theta_{cr}$  formazione del cono di post-attacco; b) caso limite in cui  $\theta = \theta_{cr}$ ; c) se  $\theta \leq \theta_{cr}$  il cono di post-attacco non si forma.

### 3.3.2.3 Conteggio automatico delle tracce

I sistemi di lettura delle tracce possono essere di due tipi: manuale, in cui si effettua la lettura delle tracce direttamente dall'oculare del microscopio, con discriminazione e conteggio delle tracce; o automatico, in cui il microscopio è accoppiato ad una videocamera connessa ad

una scheda di acquisizione, i dati vengono elaborati dal pc attraverso un software che gestisce i parametri relativi a forma dimensione e toni di grigio delle tracce.

Nel nostro caso le tracce amplificate, lasciate dalle particelle  $\alpha$  del radon, sono state lette con un microscopio ottico a lettura automatica, attraverso un sistema informatizzato di analisi d'immagine (Figura 3.18).



**Figura 3.18** – Microscopio ottico a lettura automatica, e foto di particelle  $\alpha$  rilasciate dal Radon

Infine, usando un apposito fattore di calibrazione, dal conteggio del numero di tracce per unità di area della pellicola, si è ricavata la concentrazione di esposizione al radon in  $\text{Bq/m}^3$ . In particolare si ha:

$$RAC = (\gamma_v / \text{mm}^2) \cdot (fc) / \Delta t$$

dove:

$\gamma_v / \text{mm}^2$  = densità di tracce;

$fc$  = fattore di calibrazione;

$\Delta t$  = tempo espresso in giorni.

Si hanno così precise informazioni sull'esposizione a cui sono sottoposte le persone che stazionano nei locali monitorati durante il periodo di misura. In questo caso si ha una concentrazione dell'attività di radon integrata nel tempo (RAC). Ecco perché effetti dovuti a tipiche variazioni in brevi intervalli di tempo (giorno-notte, mutamenti dei parametri atmosferici etc. ), non vanno ad influenzare il valore di RAC globale, sia esso riferito ad un tempo minimo di esposizione di 3 mesi che ad un tempo massimo di 1 anno.

L'area che viene osservata corrisponde alla zona centrale del rivelatore in quanto le lastrine di CR39 sono inserite all'interno delle slides e questo consente di ottenere un'assoluta riproducibilità delle relative posizioni rispetto al piano del microscopio.

Il software di analisi del sistema Radosys 2000, è basato sull'utilizzo del sistema operativo LINUX.

Il software identifica principalmente tracce di forma circolare, ciò consente:

- l'identificazione mediante un algoritmo molto veloce e semplice;

- una maggiore accuratezza metrologica e migliore precisione nel calcolo della RAC;
- l'identificazione di tracce multiple sovrapposte;
- l'introduzione di un fattore di non linearità nel caso di alte densità.

### 3.4 PRINCIPALI TECNICHE DI MISURA DEL RADON IN ACQUA

La concentrazione di radon in acqua viene determinata attraverso la misura delle emissioni alfa mediante scintillazione in fase liquida. Qui di seguito andremo a descrivere in dettaglio la tecnica di misura utilizzata e le celle di Lucas, già descritte precedentemente, che fanno parte del set-up sperimentale con il quale si esegue la misura di scintillazione.

In particolare è stato utilizzato l'apparecchiatura Pylon, con sistema di degasaggio WG-1001 usato per trasferire l'aria dall'acqua alla cella di Lucas (Figura 3.19).

La strumentazione è composta dall'unità principale AB-5 ( Portable Radiation Monitor) e dall'unità accessoria costituita da Celle di Lucas.



*Figura 3.19- Apparecchiatura Pylon con sistema di degasaggio WG-1001 e con celle di Lucas*

L'unità AB-5 è un sistema di acquisizione dati contenuto in una scatola portatile che fornisce misurazioni di diversi tipi di decadimenti grazie ad una serie di accessori opzionali.

La parte frontale del pannello dell'AB-5 è costituita da un'unità di connessione per gli accessori (Celle di Lucas nel nostro caso), un display e alcuni interruttori e pulsanti di controllo. In Figura 3.20 sono riportati diverse celle di Lucas relative a misure indoor o in aria/acqua.

All'interno della scatola si trova una batteria, che può essere caricata mediante un trasformatore elettrico (PYLON MODEL RM-122) rendendo lo strumento portatile, un fotomoltiplicatore (PMT) e una componente elettronica con un software di gestione dati.

Il sistema di rilevazione utilizzato è rappresentato dalle Celle di Lucas.



**Figura 3.20** - Celle di Lucas: a) modello 110A per misure esterne; b) modello 300A per misure indoor (Continuous Passive Radon Detector); c) cella di pulizia; d) adattatore ABA

### 3.4.1 CELLE DI LUCAS

La cella di Lucas è uno dei più semplici e utilizzati strumenti di misura della concentrazione del Radon. La tecnica di misura è stata sviluppata da Lucas nel 1957.

Ogni cella è composta da una camera di scintillazione (vedi par. 3.2.1) le cui pareti sono ricoperte di un sottile spessore ( $20 \text{ mg/cm}^2$ ) di solfuro di zinco attivato in argento [ $\text{ZnS}(\text{Ag})$ ], che è uno scintillatore inorganico le cui proprietà sono riportate nella Tabella 3.2 seguente:

**Tabella 3.2** - Proprietà del  $\text{ZnS}(\text{Ag})$

Densità ( $\text{g/cm}^3$ )	4,09
Struttura	Policristallina
Lunghezza d'onda di emissione (nm)	450
Indice di rifrazione alla massima emissione	2,36
Efficienza di scintillazione (% di $\text{NaI}(\text{Tl})$ )	130
Costante di decadimento (ns)	110

Va notata la grande efficienza di scintillazione, cioè la frazione dell'energia della particella incidente che è convertita in luce visibile, pari al 130% rispetto a quella dello ioduro di sodio attivato con tallio [ $\text{NaI}(\text{Tl})$ ], cristallo alogenuro alcalino, che rappresenta uno dei primi ed ancora più utilizzati cristalli scintillanti. Il solfuro di zinco attivato in argento è disponibile unicamente in forma policristallina e di conseguenza si può usare esclusivamente in sottili strati, sensibili solo a particelle  $\alpha$  e a ioni pesanti. Spessori maggiori di  $25 \text{ mg/cm}^2$  diventano inutilizzabili a causa della sua opacità alla propria radiazione di luminescenza [Knoll G. F., 1979].

Il contenitore è inoltre dotato di una finestra in plexiglass trasparente ai fotoni di luminescenza prodotti dallo scintillatore che viene accoppiato otticamente con il fotomoltiplicatore PMT dell'AB-5 e che, in condizioni di non utilizzo, è normalmente coperta da un tappo in plastica. Quando la cella viene adoperata, il tappo viene asportato e tale estremità collegata all'adattatore ABA, il quale contiene una guarnizione allo scopo di evitare il contatto con la luce, che altererebbe il conteggio successivo. Le particelle  $\alpha$  per essere rilevate devono raggiungere la parete della cella, la cui energia rilasciata deve essere convertita in impulsi luminosi e quindi trasformata, per mezzo del fotomoltiplicatore, in impulsi elettrici che verranno inviati ad un circuito stampato all'interno dell'AB-5. In esso, un microprocessore conta e registra gli impulsi su intervalli scelti dall'operatore.

L'efficienza di rivelazione di questo tipo di celle, cioè il rapporto tra il numero di impulsi elettrici che fuoriescono dal fotomoltiplicatore e il numero di decadimenti all'interno della cella, è tipicamente del 70-80%.

All'estremità opposta, rispetto a quella in cui è presente la finestra in plexiglass, si trovano due valvole che vengono utilizzate per immettere aria nella cella e per le operazioni di svuotamento e pulizia.

Si osservi che la quantità di energia rilasciata sulle pareti interne dipende dalla lunghezza del tratto che una particella  $\alpha$  deve compiere tra il luogo in cui avviene la disintegrazione e la parete interna della cella e, poiché i nuclei si disintegrano in posizioni arbitrarie all'interno del volume della stessa, lo scintillatore non è in grado di distinguere le emissioni di energia dovute al radon rispetto a quelle dei suoi prodotti di decadimento. Pertanto, affinché il sistema (contatore AB-5 e la cella) misuri solo le concentrazioni del radon, si effettua un'operazione di calibrazione mediante una sorgente di radon nota, in cui tutti i radionuclidi sono in equilibrio secolare.

### **3.4.2 PROCEDURA DI MISURAZIONE DEL RADON IN ACQUA**

Durante il prelievo del campione è necessario porre particolare attenzione nell'evitare il contatto tra aria e acqua e la possibile dispersione del Radon a causa della particolare volatilità di quest'ultimo.

La procedura standard per la misurazione del radon nell'acqua contenuta all'interno dei campioni, si esplica per mezzo dei seguenti passi:

#### **1) *Lavaggio delle celle***

L'operazione di lavaggio è indispensabile a causa della deposizione dei prodotti di decadimento del radon sulle pareti interne della cella e per rimuovere le particelle  $\alpha$  contenute nell'aria della stessa. Tuttavia i radionuclidi a breve vita ( $^{214}\text{Po}$ ,  $^{218}\text{Po}$  e  $^{214}\text{Bi}$ ) rimangono nella cella anche dopo tale operazione di pulizia; pertanto, dopo aver effettuato la misura, è

importante lasciare la cella a riposo per circa 24 ore, in modo da consentire il decadimento della maggior parte di essi. Il lavaggio avviene connettendo l'AB-5 e la cella ad una pompa. L'operazione viene ripetuta più volte

### 2) *Misura del background delle celle*

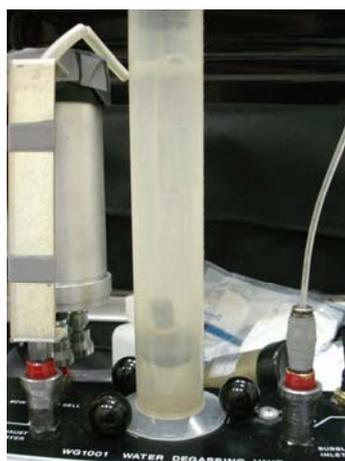
Il valore del background è il rumore di fondo generato dagli accessori, dal fotomoltiplicatore e dall'AB-5. Una parte di esso può essere eliminata, mentre quella rilevata dalla strumentazione (cella e AB-5) viene convertita in conteggi/min (CPM), successivamente sottratti in fase di analisi dati. L'operazione consiste nel montare la cella sull'AB-5 andando ad effettuare di tre intervalli di 5 min. Infine si calcola il valore background in CPM (BK) come media dei conteggi per unità di intervallo selezionato (5 min).

### 3) *Estrazione del gas*

Nel corso di questa procedura il radon viene trasferito dall'acqua alla cella di Lucas, mediante l'unità di degasaggio WG1001.

Il campione di acqua viene versato in un cilindro graduato di 250 ml, con l'accortezza di eseguire l'operazione in modo rapido e accurato, in modo da minimizzare il contatto con l'aria e da evitare il gorgoglio; il cilindro è quindi chiuso con un tappo, dotato di un diffusore microporoso pendente. La cella di Lucas, evacuata per mezzo di una pompa a vuoto, è quindi connessa al sistema tramite una valvola on/off.

Un flusso regolare di aria estrae il radon dall'acqua per mezzo di un gorgoglio nell'acqua (*bubbling*) tramite il diffusore microporoso, che permette la produzione di bolle piccole e regolari in modo da aumentare il rapporto superficie/volume del gas (Figura 3.21).



*Figura 3.21 - Fenomeno del bubbling*

Le caratteristiche di solubilità del radon rendono possibile il passaggio dall'acqua all'aria fino al raggiungimento di un rapido equilibrio. In questa fase un sensore di portata controlla la quantità di aria flussata, in modo da terminare il gorgogliamento quando è stata

utilizzata una quantità di gas predefinita. Dopo l'estrazione la miscela ottenuta viene fatta passare in un deumidificatore. Infatti il raffreddamento del gas al di sotto della temperatura di condensazione (temperatura di rugiada o *dew point*) consente di ridurre il contenuto di acqua. La parte di vapore acqueo che condensa viene raccolta sul fondo del deumidificatore e, alla fine del processo di gorgogliamento, è scaricata attraverso una valvola. Il tempo di estrazione è generalmente intorno ai 5 minuti, in modo che sia garantita una degasazione ottimale.

Il radon estratto viene fatto passare, attraverso una valvola, nella cella di Lucas. Alla fine della misura la cella di Lucas viene disconnessa ed è pronta per il conteggio solo dopo un intervallo di circa 4 ore necessario affinché venga raggiunto l'equilibrio tra il radon e la sua progenie. Si provvede quindi a pompare dell'aria all'interno del sistema, in modo da rimuovere i prodotti di decadimento [Belloni P. et al, 1995].

#### 4) Conteggio

La cella di Lucas è nuovamente connessa al fotomoltiplicatore dell'AB-5; in questa fase essa ha la funzione di camera da conteggio vero e proprio. Il tempo di conteggio considerato è di 10 min per n intervalli di conteggio, (segnando data e ora di inizio conteggio), impostato in modalità CONT. Successivamente si calcola la media aritmetica dei conteggi, ottenuti negli n intervalli, e la si divide per la lunghezza dell'intervallo temporale fissato (10 min), ottenendo così il valore di CPM.

Con il valore di background calcolato in precedenza (BK), si calcola il NCPM=CPM-BK.

Infine si passa al calcolo della concentrazione del radon come:

$$C_{Rn} = \frac{NCPM * C}{3 * 2,22 * A * E * V}$$

### 3.5 PRINCIPALI TECNICHE DI MISURA DEL RADON NEI MATERIALI

Per la determinazione della concentrazione di radionuclidi nei campioni di rocce è solitamente utilizzata l'analisi spettroscopica  $\gamma$ , rivelando ed identificando le radiazioni emesse nei decadimenti radioattivi degli elementi presenti nei campioni.

La rivelazione della radiazione  $\gamma$  viene effettuata attraverso rivelatori allo stato solido, in particolare a semiconduttore, sfruttandone le elevate caratteristiche di risoluzione. Per questo tipo di rivelatore, sono necessari cristalli di elevata purezza affinché elettroni e lacune possano muoversi liberamente, senza essere catturati da imperfezioni del reticolo cristallino o da atomi d'impurezza. Attualmente si utilizzano cristalli semiconduttori di silicio o di germanio, in quanto possono essere prodotti con elevata purezza e di dimensioni ragionevoli.

La scelta nel rivelatore HPGe per determinare la concentrazione di radionuclidi nei campioni di roccia scaturisce dall'ottima risoluzione energetica di questo tipo di rivelatore, che permette una buona separazione dei picchi relativi ai  $\gamma$  di decadimento dei radionuclidi presenti nel campione ed inoltre agevola l'identificazione di questi rispetto al umore di fondo. In un sistema al germanio iperpuro, l'elemento rivelatore semiconduttore è costituito da un singolo cristallo di germanio capace di opporsi ad alte tensioni inverse, alla temperatura dell'azoto liquido (Figura 3.22). Sotto queste condizioni, le coppie elettrone-lacuna, prodotte dall'assorbimento di un fotone, sono raccolte verso elettrodi opposti.

Lo strumento, dotato di un'elevata precisione, ha una risoluzione di 13 bit, per un'equivalente di 8192 canali, distribuiti su un range energetico di 0-2190 keV.

L'elevata precisione delle misure ha richiesto tempi di accumulazione dell'ordine di un giorno per ciascun campione analizzato. La testata della sonda ha richiesto che si utilizzassero contenitori di raccolta dei campioni con geometria di Marinelli (cilindrica con cavità centrale ove inserire la sonda) [manuale Ortec EG & G, 2000].

I campioni di 1kg di sostanza sono stati finemente polverizzati prima di essere inseriti nel becker di prova [Cazzoli S., 2003; Nuccetelli C. et al.]. La procedura di rivelazione ha richiesto, oltre alla polverizzazione del campione, l'attesa di un tempo pari a circa un mese perché nel campione si stabilisse l'equilibrio secolare tra i suoi componenti, per mantenere una costanza di rapporti tra  $^{226}\text{Ra}/^{222}\text{Rn}$  (serie dell'Uranio) e  $^{232}\text{Th}/^{228}\text{Ac}$  (serie del torio), consentendo delle importanti assunzioni tra le attività dei componenti le serie [Nuccetelli C. et al., 2001; Risica S. et al., 2001].

Dai dati spettrometrici è stato possibile isolare attraverso una Peak analysis, i valori relativi alla concentrazione rilevata nel campione standardizzato di materiale per  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ , e una stima del valore del  $^{232}\text{Th}$ , dedotta attraverso una valutazione dei fattori d'equilibrio degli equilibri secolari in gioco. Tali valori sono stati utilizzati per successivi studi e valutazioni degli indici di riferimento citati.



Figura 3.22 – Sistema spettrometrico gamma

## CAPITOLO IV

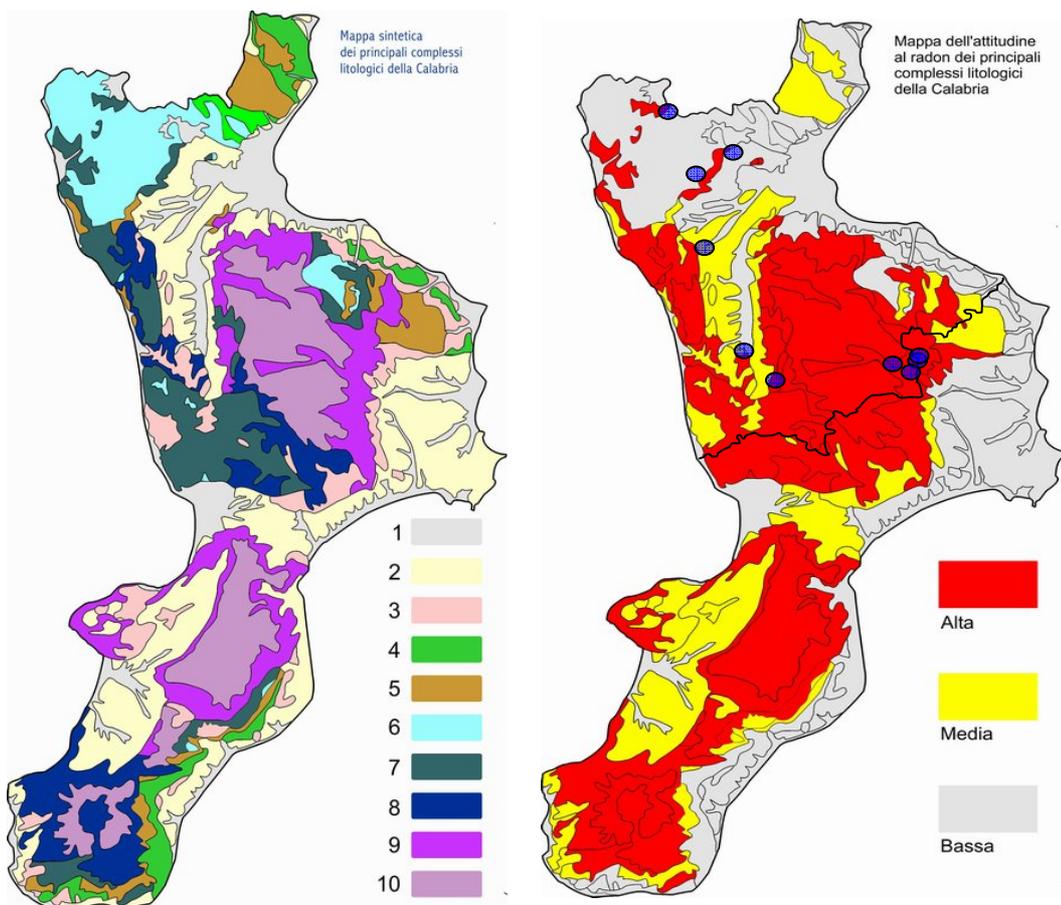
### ORGANIZZAZIONE DELLE CAMPAGNE DI MONITORAGGIO

In tale capitolo verranno descritti i criteri di scelta relativi alle aree, ai diversi edifici e ai singoli locali individuati per effettuare le diverse campagne di monitoraggio a campione.

#### 4.1 CRITERI PER LA SCELTA DELLE AREE DA MONITORARE

La scelta delle aree da monitorare non è stata casuale ma dettata da un'attenta individuazione di siti del territorio calabrese con contesti geologici-strutturali e morfologici differenti e caratteristiche peculiari importanti al fine della campagna di monitoraggio, ottenendo diverse tipologie di dati per poter studiare le correlazioni dovute ai diversi contesti territoriali locali.

In particolare si è partiti da una mappa sintetica dei principali complessi litologici della Calabria, ricostruendo una possibile mappa dell'attitudine al radon classificando schematicamente zone di alta, media e bassa concentrazione (Figura 4.1) [Durrani S. A., 1997, Bourbon B. et. al., 2003]. In base a questa schematizzazione sono state scelte zone ricadenti in diversi campi. In particolare sono stati considerati contesti geologici differenti quali di natura granitica, metamorfica, carbonatica, e sedimentaria. La seguente Tabella 4.1 riporta le aree selezionate di monitoraggio in base al potenziale rischio Radon e al diverso contesto geologico locale.



**Figura 4.1** – Mappa sintetica dei principali complessi litologici dell’Arco calabro Peloritano (1 = depositi prevalentemente clastici; 2 = calcareniti, sabbie, argille e conglomerati; 3 = argille e marne biancastre; 4 = argille varicolori; 5 = arenarie e argille siltose; 6 = dolomie; 7 = filladi e granodioriti con alternanze di argilliti leggermente metamorfosate; 8 = gneiss e filladi; 9 = gneiss tonalitici e quarzo-dioritici; 10 = granodioriti).

**Tabella 4.1** – Zone monitorate in base al potenziale rischio radon e al diverso contesto geologico

ZONA MONITORATA	RISCHIO POTENZIALE RADON	CONTESTO GEOLOGICO LOCALE
San Giovanni in Fiore	alto	Granodioriti, e quarzodioriti
Caccuri, Cerenzia Castelsilano	alto	Gneiss tonalitici e quarzo dioriti
Rogliano	alto	Filladi e Scisti
Mormanno	alta-bassa	Scisti e dolomie
San Marco Argentano	media	Calcareniti, sabbie, argille e conglomerati
Cosenza	media-bassa	Depositi clastici/sabbie
Castrovillari, Lungro	bassa	Calcareniti, sabbie e argille e conglomerati

#### 4.1.1 DESCRIZIONE DELLE AREE MONITORATE

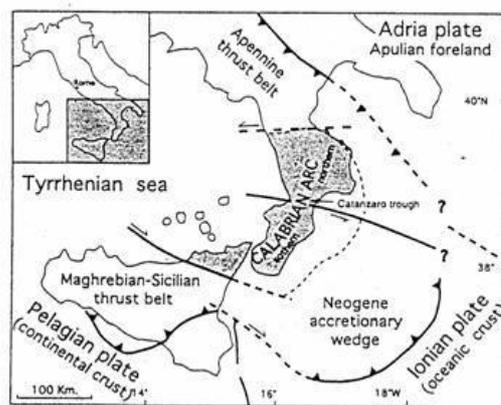
Di seguito viene riportato un breve inquadramento geologico dell'Arco Calabro Peloritano passando alla descrizione geologica-strutturale dettagliata delle diverse aree selezionate

##### 4.1.1.1 Inquadramento geologico dell'Arco Calabro Peloritano

L' Arco Calabro Peloritano (A.C.P.) rappresenta il tratto di catena che raccorda l'Appennino Meridionale, ad andamento NW-SE, con le Megrebidici Siciliane ad andamento E-W.

Esso è costituito da una serie di falde cristalline derivanti dalla deformazione di litosfera oceanica e continentale.

Secondo Tortorici (1982) l'Arco Calabro Peloritano è delimitato, a nord, dalla linea di Sanginetto interpretata da alcuni autori come faglia trascorrente sinistra, e a sud, dalla linea di Taormina, interpretata come faglia trascorrente destra (Figura 4.2).



*Figura 4.2 – Schema geologico dei rapporti tra A.C.P. ed elementi circostanti (Parzialmente modificata da Platt e Compagnoni, 1990)*

L'A.C.P. con i suoi terreni cristallini, presenta delle nette differenze rispetto ai terreni sedimentari appenninici e siciliani, e proprio per le sue particolarità ha sempre rappresentato uno dei problemi più affascinanti della geologia del Mediterraneo centrale.

Secondo Tortorici, (1982), l'Arco Calabro-Peloritano, rappresenta un frammento della catena Eo-Alpina Europa vergente, sovrascorso, durante il Miocene inferiore, sulle unità più interne dell'Appennino. Esso è costituito da una serie di coltri cristalline derivanti dalla deformazione di crosta oceanica e continentale.

##### 4.1.1.2 Castrovillari

Per meglio comprendere e descrivere la stratigrafia geologica delle aree esaminate, ci si è avvalsi della Carta Geologica della Calabria in scala 1:25000, pubblicata dalla Cassa del Mezzogiorno (in Allegato A-2).

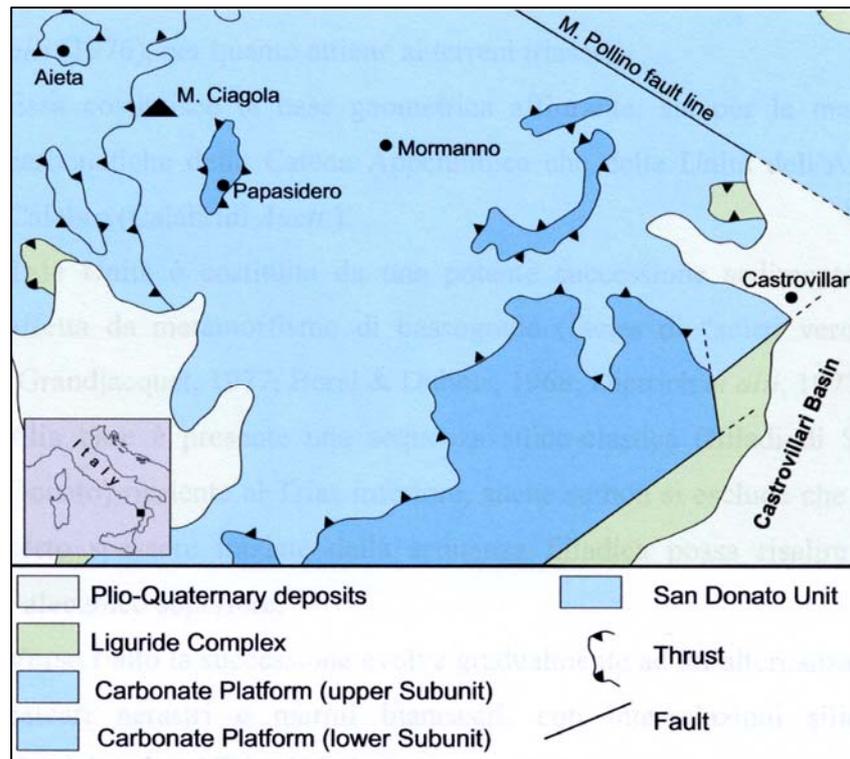
In Figura 4.4 e sono evidenziati i contesti tettonici di alcuni siti di misura.

Dall'analisi dei fogli 221 II-NO "Castrovillari", e 221 III-N.E "Saracena" il contesto geologico nel quale si colloca l'area che comprende Castrovillari risulta essere caratterizzato dall'alto verso il basso da:

- prodotti di dilavamento misti a materiale alluvionale e a detriti di frana;
- un'alternanza di sabbie gialle o gialle-rossastre, e conglomerati con piccoli e grossi ciottoli. Sono presenti localmente bande di conglomerati associati a sabbie grossolane o lenti di sabbie, a grana fine e media, poco cementate, mal stratificate e talvolta a stratificazione incrociata. Risulta caratterizzato da una moderata resistenza all'erosione, comunque variabile in funzione del diverso grado di cementazione, e una permeabilità generalmente elevata;
- argille mal stratificate con locali intercalazioni di arenarie, da fini a grossolane, di sabbie e conglomerati a carattere lenticolare. La permeabilità si presenta piuttosto bassa; la resistenza all'erosione è generalmente scarsa e le argille, quando sature di acqua, tendono a dar luogo a movimenti franosi;
- dolomie e calcari dolomitici da grigi a nerastri, con occasionali breccie intraformazionali ed intercalazioni di argilliti fogliettate ed arenarie. Le rocce presentano elevata permeabilità e sono spesso ben stratificate, ma localmente presentano un'intensa fratturazione. Nella parte NO di Castrovillari alle dolomie sono associate rocce basiche vulcaniche. La resistenza all'erosione è generalmente elevata, eccetto quando esse non siano intensamente tettonizzate;
- scisti filladici con sottili e frequenti intercalazioni di quarzo in cui si trovano sparsi numerosi e piccoli ammassi di rocce basiche. Il complesso si presenta a bassa permeabilità, intensamente deformato e intersecato da diverse superfici di discontinuità che ne riducono la resistenza e che localmente tendono a dar luogo a movimenti franosi.

#### 4.1.1.3 Mormanno

L'area di Mormanno ricade nel complesso settore dell'Appennino Meridionale, dove vengono a contatto tettonico le unità stratigrafico-strutturali dell'Appennino calcareo (a nord) e le unità Calabridi (a sud). In tale area si evidenzia [Ietto A. et al., 1992] (Figura 4.3) la sovrapposizione di tre unità tettoniche che, procedendo geometriche dal basso verso l'alto, si identificano in: Unità di San Donato (prevalentemente metamorfiti di basso grado del Trias inferiore: facies di "scisti verdi" [Borsi S. et al., 1968; Dietrich D. et al., 1976]), unità di Piattaforma Carbonatica, Unità interne o complesso Calabride. L'area in esame, fa parte dell'"Unità di Piattaforma Carbonatica" e nello specifico della "subunità inferiore" o "subunità" Mormanno-Ciagola" costituita da rocce carbonatiche: in particolare dolomie. Tali rocce risultano essere intensamente fratturate, come testimoniato dall'assenza di una stratificazione evidente, da qui la grande quantità di materiale farinoso presente.



**Figura 4.3** - Carta degli affioramenti per unità tettoniche da Ietto (1992)

Osservando la morfologia dell'area si nota come le principali forme del paesaggio siano da ricondursi sostanzialmente a due processi di modellamento: rimozione gravitativa di detrito, testimoniato dalle frequenti nicchie di distacco localizzate sulle pareti, ruscellamento superficiale, come testimoniano i diversi sistemi di incisioni vallive. Dallo studio del foglio 221 IV-SO "Mormanno", (in Allegato A-3) l'inquadramento geologico dell'area che comprende l'ospedale di Mormanno è caratterizzato dall'alto verso il basso da:

- prodotti di dilavamento misti a materiale alluvionale a detriti di falda;
- depositi sabbiosi e conglomeratici con ciottoli calcarei e dolomitici, di origine fluviale ad elevata permeabilità. I sedimenti più grossolani sono spesso cementati e resistenti all'erosione, mentre quelli più fini sono generalmente facilmente disaggregabili;
- complesso fliscioide basale composto da argille a scagliette, prevalentemente, in alternanza con calcari e quarziti. Scarsa è la resistenza all'erosione e bassa è la permeabilità;
- calcari generalmente ben stratificati, spesso associati a lave basiche, con intercalazioni talvolta di argille; la permeabilità la resistenza meccanica sono generalmente elevate;
- dolomie prevalentemente scure con locali lenti di calcari e calcari dolomitici; localmente si osservano breccie intraformazionali di argilliti fogliettate. Le rocce sono ben stratificate ma in varie località, compresa quella su cui ricade l'edificio esaminato, la stratificazione è stata distrutta da un'intensa

fratturazione. Le rocce presentano un'elevata permeabilità e, quando non fratturate e ridotti ad un aggregato semi-incoerente di frammenti clastici, sono molto resistenti all'erosione;

- lave basiche o spiritiche con caratteristiche geotecniche inferiori a quelle dei calcari e delle dolomie circostanti;
- scisti argillitici con intercalazioni di quarziti a grana fine e talora di calcari cristallini. Le rocce sono generalmente deformate ed attraversate da numerose superfici di discontinuità. Le aree a maggior tettonizzazione tendono a dar luogo a movimenti franosi. Permeabilità bassa.

#### 4.1.1.4 Lungro

La zona di *Lungro* è situata A Nord-Est della Catena Costiera, a sud dal Massiccio del Pollino e a Nord-Ovest del Massiccio Silano, sul margine occidentale del bacino del Crati. Comprende i bacini idrografici dei torrenti Tiro e Fiumicello che ricadono nei comuni di Lungro, Firmo, Acquaformosa, Saracena ed Altomonte. Da un punto di vista strutturale Lungro si trova in una zona di confine tra la parte meridionale della Catena Appenninica e la parte settentrionale dell'Arco Calabro, in prossimità della linea del Pollino, posta poco più a nord dell'area di studio: al confine tra le litologie carbonatiche appenniniche e quelle cristalline dei Peloritani. Inoltre si trova all'estremo margine nord-occidentale del graben del Crati ad Ovest della depressione di Sibari, quindi complessivamente in un contesto strutturale abbastanza complesso.

Da un punto di vista morfologico l'area può essere suddivisa in due settori: un settore montuoso ad Ovest ed un settore collinare ad est, che degrada verso le forme pianeggianti della Piana di Sibari e dall'alta Valle del Crati. Questi settori sono caratterizzati da morfologie molto differenti a causa della differente natura delle litologie affioranti e del loro grado di compattezza. Infatti il settore montuoso è caratterizzato dalla presenza di carbonati e metamorfici di basso grado (filladi) dell'Unità di San Donato e si presenta con una morfologia molto aspra caratterizzata da versanti ripidi e valli strette e profonde con la caratteristica forma a "V" e con pareti sub-verticali. La morfologia di tale settore è, inoltre, influenzata dalla presenza di fenomeni di crollo di materiale roccioso; quindi sovente si osservano accumuli di materiale roccioso e, sulle pareti, di nicchie di distacco.

Una prima parte del settore collinare è, invece, caratterizzata dalla presenza di terreni costituiti da materiale eterogeneo e caotico di natura argillosa con spessori variabili ed una scarsa resistenza all'erosione.

Di conseguenza questa prima parte del settore collinare si presenta con una morfologia più dolce e l'elemento morfologico che la caratterizza (in particolar modo nei pressi del Comune di Lungro in corrispondenza dello spartiacque tra i due bacini) è un dissesto diffuso in cui si osservano vari fenomeni di instabilità dei versanti (frane, smottamenti, soliflussi), accentuati dall'azione erosiva al piede dei versanti operata dai torrenti Tiro e Fiumicello. La

morfologia di questa prima parte del settore collinare è, inoltre caratterizzata dalla presenza di valli che si allargano con un andamento più dolce, la dove affiorano litologie più facilmente erodibili. Il passaggio dal settore montuoso a quello collinare non avviene gradualmente, ma si ha un passaggio netto in corrispondenza del principale elemento tettonico dell'area: la linea di Sanginetto. Questa, ad andamento NE-SW è segmentata in più punti da una serie di lineamenti tettonici lungo i quali si sviluppa il reticolo idrografico principale (Torrenti Tiro e Fiumicello).

Lungro rientra nel foglio 221 III-SE "Lungro" (in Allegato A-4), il contesto geologico nel quale si colloca l'area che comprende l'ospedale di Lungro risulta essere caratterizzato dall'alto verso il basso da:

- detriti di frana, di falda e depositi alluvionali sabbiosi e ciottolosi dei letti fluviali;
- sabbie con ciottoli calcarei, arenacei e cristallini mal stratificate e talora a stratificazione incrociata; frequente è la presenza di lenti argillose-siltose. La resistenza meccanica è funzione del locale grado di cementazione, la permeabilità è generalmente elevata.
- argille con lenti di sabbie, arenarie, grossolane e talvolta gessose, conglomerati poligenici a grossi ciottoli calcarei, con grande sviluppo locale nell'area ad est di Lungro. Limitata permeabilità e resistenza all'erosione mentre elevata è la franosità, specie in corrispondenza delle intercalazioni sabbiose;
- dolomie e calcari dolomitici da grigi a grigi-scuri. Le rocce si presentano frequentemente fratturate o brecciate andando a nascondere spesso le superfici di stratificazione originarie. La resistenza all'erosione di questo complesso varia, da moderata ad elevata in funzione del locale grado di fratturazione. Le rocce sono localmente ridotte ad un aggregato semi-incoerente di granuli clastici; la permeabilità è in genere elevata.
- complesso metamorfico costituito da calcari cristallini, localmente dolomitici, da grigio-scuri a biancastri, occasionalmente conglomeratici, di elevata resistenza all'erosione e permeabilità da media ad elevata;
- scisti filladici con intercalazioni di calcari cristallini e lenticelle di quarzo parallele alla scistosità. Le caratteristiche geotecniche sono analoghe a quelle dell'ultimo banco dell'area I.

#### **4.1.1.5 San Marco Argentano**

Il territorio di San Marco Argentano comprende un tratto dell'horst sulla sinistra orografica del Fiume Crati. I sistemi di faglie ricorrenti hanno orientamenti disposti con direzioni N-S, NW-SE E NE-SW. Le dislocazioni più vistose sono quelle prodotte dalle faglie con direzione N-S. Queste hanno determinato il sollevamento della Catena Costiera, mettendo a contatto i sedimenti postorogenici con i termini cristallino-metamorfici del substrato. Gli elementi strutturali principali sono rappresentati dalla linea S.Marco - S.Fili e dalla linea

Torano Castello - Marano Marchesato [Lanzafame G. et al., 1976]. Esse determinano una fascia in cui affiorano, in modo predominante, i sedimenti postorogeni più antichi e limitate porzioni del substrato [Lanzafame G. et al., 1981]. La struttura tettonica S. Marco - S. Fili borda il versante orientale della Catena Costiera mantenendosi a monte degli abitati di Cerreto, Cavallerizzo, Mongrassano e San Marco Argentano (procedendo da sud verso nord). Tale dislocazione è resa evidente da tratti di versanti sub-rettilinei ma soprattutto da uno stacco litologico netto. Le faglie appartenenti al sistema NW-SE abbassano verso nord la Catena Costiera determinando un ampliamento verso est del bacino di sedimentazione. Nel settore settentrionale del territorio, dislocazioni appartenenti a tale sistema mettono in contatto il substrato cristallino con i termini più bassi dei depositi sedimentari. Tra gli elementi morfologici creati da queste strutture vanno ricordate in particolare due faccette triangolari che bordano, rispettivamente, il versante orientale di M. Bucita (nei pressi del centro abitato) e di M. Pizzo. I rigetti del sistema di faglie aumentano progressivamente da sud verso nord [Lanzafame G. et al., 1981]. L'ultimo sistema è quello orientato NE-SW, che anche se meno evidente è ritenuto il più importante, in quanto si identifica con la linea di Sanginetto, già descritta precedentemente. [Lanzafame G. et al., 1981].

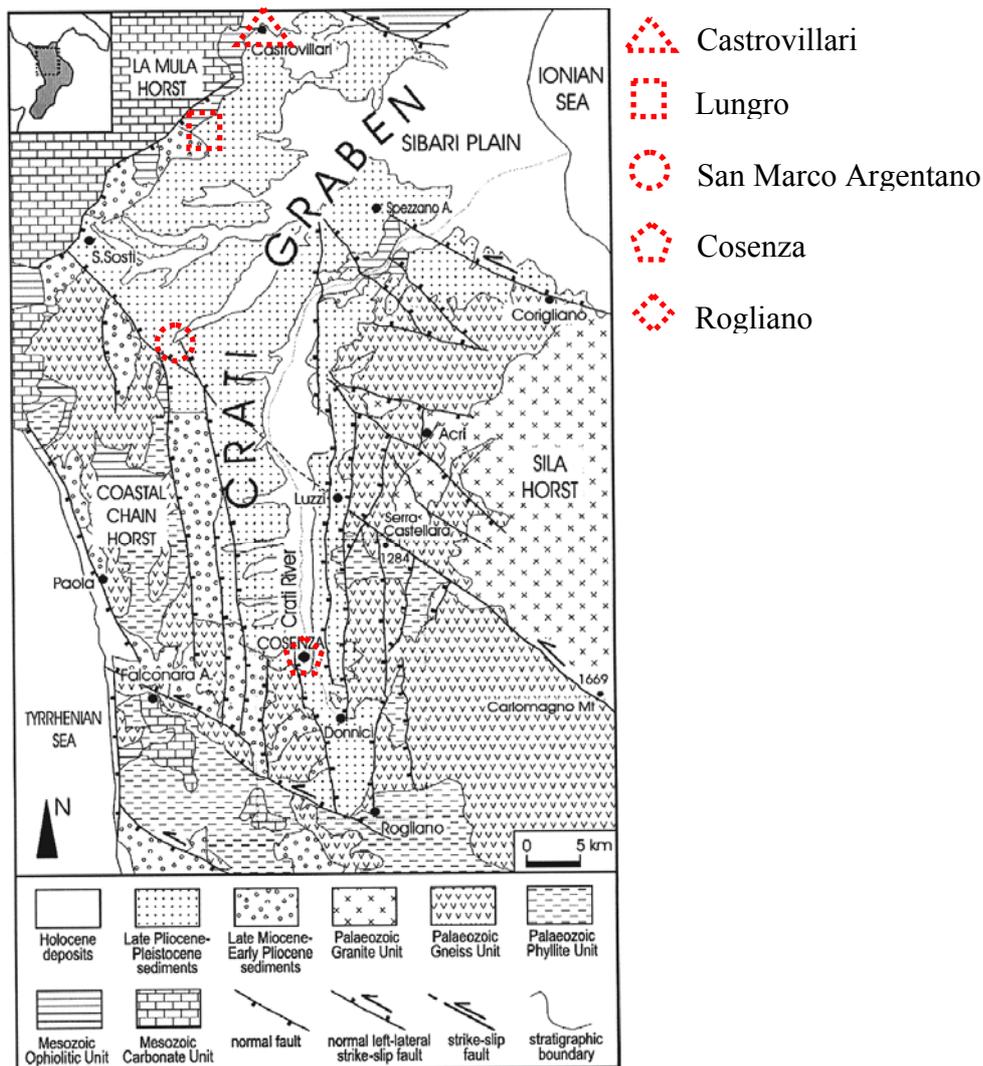
Dallo studio della Carta Geologica (foglio 229 IV SE-D "San Marco Argentano") (in Allegato A-5) il territorio di San Marco Argentano è costituito, dall'alto verso il basso, dalle seguenti litologie:

- detriti di frana, di falda e depositi alluvionali sabbiosi e ciottolosi dei letti fluviali;
- sabbie e depositi conglomerati per lo più poco consolidati e facilmente disgregabili ad alta permeabilità;
- conglomerati in genere ben cementati, composti da ciottoli di calcare, subordinatamente di granito, anfiboli e gneiss. Buona resistenza all'erosione e permeabilità da media ad elevata;
- argille siltose e marnose a bassa permeabilità, con scarsa resistenza all'erosione e tendenza a dar luogo a piccole frane rotazionali sui pendii più ripidi;
- calcari cristallini in strati sottili, calcari arenaci e conglomeratici, argille marnose fogliettate; spesso intensamente fratturati e contorti con permeabilità moderata e buona resistenza all'erosione;
- Gneiss e scisti biotitici-granatiferi; le rocce spesso profondamente degradate presentano una resistenza all'erosione da media ad elevata e permeabilità bassa, con aumento della stessa nelle zone degradate;
- Serpentine massicce ed orneblenditi, probabilmente derivate per metamorfismo da rocce ultrabasiche intrusive; spesso si presentano alterate e /o degradate con una moderata resistenza all'erosione e permeabilità da bassa a media.

#### 4.1.1.6 Cosenza

Cosenza si colloca all'interno del bacino del Fiume Crati, fossa tettonica formata in seguito a sollevamenti differenziali tra il substrato cristallino ed è delimitata ad est dai rilievi metamorfici facenti parte del massiccio Silano e ad ovest dalla catena costiera (Figura 4.4).

E' un' importante struttura a graben propria della Calabria nord-orientale delimitata, come la maggior parte dei bacini sedimentari recenti dal Bacino Crotonese, la Stretta di Catanzaro, il Bacino di Reggio, caratterizzate da importanti faglie distensive probabilmente legate a strutture trascorrenti di grandi dimensioni.



**Figura 4.4** – Stralcio neotettonico del settore settentrionale Calabria [Tansi et al., 2005]. In rosso sono segnate le aree indagate

Le dislocazioni che interessano la Valle del Crati si identificano in due sistemi principali: faglie normali sia parallele (NNW-SE, NE-SSW) che perpendicolari (WNW-ESE, E-W) alla direzione generale dell' Arco Calabro Peloritano.

Dall'analisi del foglio 236 I-NO "Cosenza" (in Allegato A-6), il contesto geologico nel quale si colloca l'area che comprende i tre edifici monitorati di Cosenza risulta essere caratterizzato dall'alto verso il basso da:

- Depositi alluvionali con prodotti di dilavamento;
- depositi conglomeratici, a matrice sabbiosa, localmente limosa, di età Plestocenica;
- sabbie bruno-chiare Cenozoiche, generalmente a grana da fine a media. Tale complesso in genere si presenta discretamente costipato, con moderata resistenza all'erosione, con elevata permeabilità;
- argille siltose grigio-chiare, con scarsa resistenza all'erosione e bassa permeabilità e argille marnose e silt grigi biancastri, localmente con intercalazioni di silt sabbiosi e marne violacei. Tale complesso presenta una scarsa resistenza all'erosione e una bassa permeabilità;
- Complesso igneo metamorfico costituito da paragneiss e scisti biotitici, spesso con grossi cristalli di granato, associati a gneiss granitoidi e vene o ammassi di rocce granitiche, privi di granati. Tali rocce, presentano generalmente una bassa permeabilità.

#### 4.1.1.7 Rogliano

L'area di Rogliano rientra nella Sila piccola, che all'interno dell'Arco Calabro Peloritano, occupa la terminazione meridionale del settore settentrionale: a nord è delimitata dal parallelo passante per il lago Arvo, a sud dalla stretta di Catanzaro. Essa è costituita da un edificio a falde di ricoprimento, in cui è possibile riconoscere il complesso delle Unità Appenniniche, Liguride e Calabride [Amodio Morelli *et al.*, 1976; Lorenzoni and Zanettin Lorenzoni, 1983]. Su tale edificio a falde trasgrediscono in discordanza sequenze sedimentarie Neogeniche-Quaternarie. Il complesso Calabride, in sila piccola, in accordo con lo schema strutturale proposto da Amodio Morelli e al. (1976), può essere suddiviso dal basso verso l'alto nelle seguenti Unità tettoniche principali: Unità di Bagni, Unità di Castagna, Unità di Monte Gariglione, Unità di Stilo. L'area di Rogliano rientra nell'Unità di Castagna, formata principalmente da gneiss di medio-alto grado metamorfico, gneiss occhialini, anfiboliti e marmi. Dall'analisi del foglio 236 I-SO "Rogliano" (in Allegato A-7), il contesto geologico nel quale si colloca l'area che comprende l'ospedale di Cosenza risulta essere caratterizzato dall'alto verso il basso da:

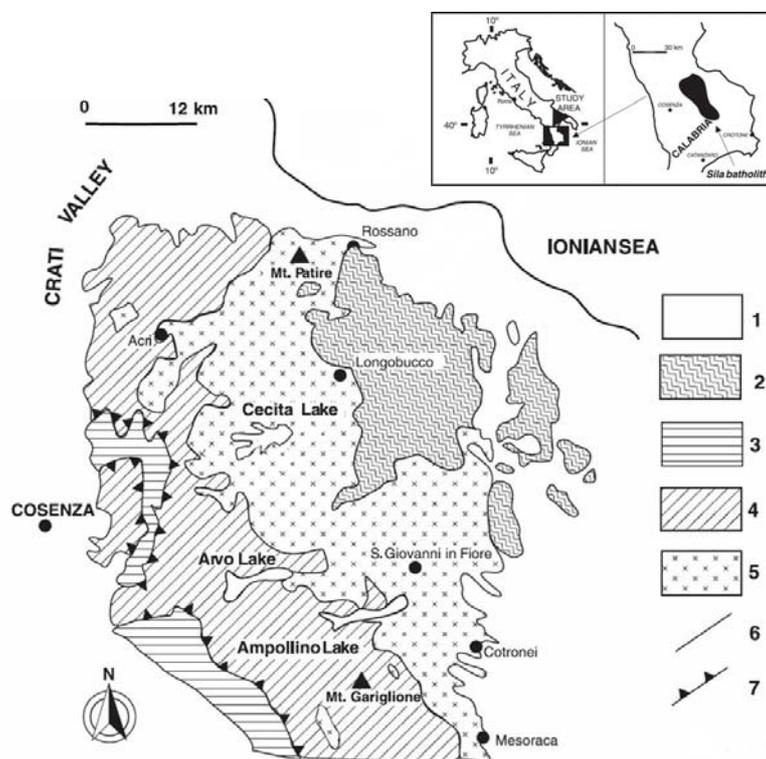
- Depositi alluvionali con prodotti di dilavamento;
- conglomerati Pliocenici da bruno a bruno-rossastri e conglomerati Miocenici poligenici, con ciottoli ben arrotondati di rocce cristalline in una matrice sabbiosa grossolana, con locali intercalazioni o lenti sabbiose e ghiaiose. Tale complesso litologico, si presenta ben costipato e con buona resistenza all'erosione e con elevata permeabilità;
- scisti quarzosi, a scistosità laminare regolare, occasionalmente gneissici ed occhialini. Presentano una buona resistenza all'erosione, fatta eccezione per alcune zone più fratturate, e una bassa permeabilità. Il limite con gli scisti filladici quarzosi-

- sericitici-cloritici localmente è graduale. Quest'ultimi presentano locali intercalazioni lenticolari di calcari cristallini;
- scisti quarzoso-feldspatici del Fiume Savuto, occasionalmente con biotite. Tali rocce, ben declassate e a scistosità regolare, tendono a fratturarsi secondo regolari blocchi squadrati, con discreta resistenza all'erosione con permeabilità da bassa a media;
  - complesso igneo-metamorfico costituito da para-gneiss e scisti biotitici, associati a gneiss granitoidi e vene, o ammassi di rocce granitiche senza granati. Sporadicamente si hanno zone di gneiss basici, anfibolitici. Presentano permeabilità bassa e resistenza all'erosione.

#### 4.1.1.8 San Giovanni in Fiore

Il Massiccio della Sila appartiene al settore nord dell'Arco Calabro Peloritano, una sezione della catena orogenica Alpina dell'Europa occidentale, dove rocce cristalline alloctone sono ora esposte nella più alta Unità tettonica della catena montuosa Appenninica [Amodio Morelli L. et al., 1976].

L'Unità della Sila consta di un basamento Varisico formato da un grosso complesso plutonico, il batolite della Sila del Tardo-Ercinico, dai tre distinti complessi metamorfici di medio-alto grado di M.te Gariglione, di medio-basso di Mandatoriccio e di basso grado di Bocchigliero e dalla copertura sedimentaria mesozoica di Longobucco. [Messina A., et al.,



**Figura 4.5**– Stralcio della carta geologica dell'area oggetto di monitoraggio.(1) clasti (Recente - Tortoriano); (2) rocce sedimentarie e metamorfiche (Oligocene – Devoniano); (3) filladi-scisti e rocce ofiolitiche (Cretaceo-Paleozoico);(4) gneiss (Paleozoico); (5) Batolite della Sila (Paleozoico); (6) contatto stratigrafico; (7) faglie.

1991]. Il batolite della Sila affiora ininterrottamente (~ 900 km<sup>2</sup>) da Rossano a Propani in direzione NW-SE (Figura 4.5).

Il batolite risulta essere formato da numerosi ed intersecati corpi intrusivi, da sin- a post-tettonici diversi per estensione, tessitura e mineralogia. Essi sono per lo più massivi o caratterizzati da una foliazione tettonica primaria (corpi sintettonici), o da una foliazione di flusso. Tutto il batolite presenta un range composizionale da gabbro a leucomonzogranito con prevalenza dei termini intermedi tonalitico-granodioritici.

Dall'analisi del foglio 237 I-SO "San Giovanni in Fiore" e 237 I-NO "Savelli" (in Allegato A-8), il contesto geologico nel quale si colloca l'area che comprende l'area di San Giovanni in Fiore risulta essere caratterizzato dall'alto verso il basso da:

- Prodotti di dilavamento, talora misti a materiale alluvionale;
- conglomerati e breccie ben consolidati, costituiti da ciottoli, da angolari a ben arrotondati, di rocce granitiche in una matrice sabbiosa, con moderata resistenza all'erosione ed elevata permeabilità
- granito a grana da fine a media, per lo più biotitici, ma anche muscovitici. Tale complesso si presenta generalmente consistente, con elevata resistenza all'erosione, a bassa permeabilità;
- Filoni e piccole intrusioni di rocce acide: felsiti, porfidi quarziferi;
- complesso di rocce acide, grossolane, a composizione variabile tra la quarzodiorite al granito. Per lo più di natura biotitica, e/o muscovitica. Localmente sono presenti delle vene pegmatitiche, e piccoli xenoliti basici. Si presenta sia come roccia alterata che fresca, con relativa permeabilità alta o bassa.

#### 4.1.1.9 Caccuri e Cerenzia

Dall'analisi del foglio 237 I-SO "Caccuri" (in Allegato A-8 e A-9), il contesto geologico nel quale si colloca l'area che comprende le strutture monitorate risulta essere caratterizzato dall'alto verso il basso da:

- arenarie e siltiti ad elevata resistenza all'erosione ed una permeabilità medio-alta;
- argille, silts argillose e silts Mioceniche, con scarsa resistenza all'erosione e, quando impregnate d'acqua, tendono a dar luogo a movimenti franosi lungo i pendii più ripidi. Hanno una bassa permeabilità;
- sedimenti clastici varianti da arenarie a cemento calcareo, grossolane, a siltiti arenacee, a diverso grado di cementazione. Tale complesso presenta una discreta resistenza all'erosione ed un'elevata permeabilità;
- conglomerati e sabbie con ciottoli prevalentemente di rocce granitiche. Risultano essere ben cementate con elevata resistenza all'erosione, e permeabilità moderata, con aumento della stessa nelle zone di fatturazione;
- granito o granodiorite a grana fine, con biotite occasionalmente consistente con elevata resistenza all'erosione. La permeabilità è bassa.

- complesso di rocce acide a grana da media a grossolana, talora porfiroide a composizione variabile tra la sienite ed il granito. Come minerale femico prevale la biotite, accompagnata da muscovite e occasionalmente da orneblenda. Si varia da roccia resistente all'erosione a roccia degradata e alterata, da cui dipende anche la permeabilità;
- scisti quarzoso-biotitici, localmente occhialini. Generalmente con un certo grado di alterazione in prossimità del granito, consistente in ricristallizzazioni, formazione di muscovitee locale migmatizzazione. Presenta bassa permeabilità e aumento della stessa nelle zone di fratturazione.

#### 4.1.1. 10 Castelsilano

Dall'analisi del foglio 237 I – NO “Savelli” (in Allegato A-9), il contesto geologico nel quale si colloca il comune di Castelsilano che comprende gli edifici monitorati risulta essere caratterizzato dall'alto verso il basso da:

- prodotti di solifluzione e dilavamento talora misti a materiale alluvionale e detriti di frana;
- gesso a grana fine, ben stratificato, variante da gesso sabbioso o conglomeratici, a gesso puro. Ad alta permeabilità e resistente all'erosione a causa della sua elevata solubilità, con la conseguente formazione di canali sotterranei;
- argille siltose grigio-chiare; localmente conglomeratiche, con elevata resistenza all'erosione e permeabilità moderata, con l'aumento della stessa nelle zone di fratturazione;
- arenarie grossolane grigio-chiare localmente conglomeratiche ad elevata resistenza e permeabilità moderata;
- conglomerati e brecce ben consolidati, costituiti da ciottoli, da angolari a ben arrotondati, di rocce granitiche in una matrice sabbiosa. Hanno una moderata resistenza all'erosione ed un'elevata permeabilità;
- filoni e piccole intrusioni di rocce acide: granito biotitico con muscovite a grana fine;
- granito biotitico grossolano, localmente intersecato da vene di basalto porfiroide. Inoltre piccoli xenoliti basici ricorrono sporadicamente in tutta la massa. Come consistenza si passa da roccia fresca e resistente all'erosione a roccia alterata e degradata, facilmente disgregabile. La permeabilità è generalmente bassa, con aumenti nelle zone di fratturazione e degradazione;
- scisti a grana da media a grossolana, occasionalmente gneiss quarzoso-biotitici-muscovitici, spesso occhialini, a volte cloritici. Sono presenti sia l'ortoclasio che l'albite. Nelle zone di contatto con il granito risultano essere di tipo andalusitico, con presenza di tormalina. Risultano generalmente resistenti all'erosione e a bassa permeabilità, con aumento della stessa nelle zone di fratturazione.

## 4.2 CRITERI di IDENTIFICAZIONE DEGLI EDIFICI DA MONITORARE

Gli edifici da monitorare sono stati scelti sulla base di due principali criteri :

- *strutture pubbliche* con cospicue attività sociali, quali ospedali, scuole ed in alcuni casi chiese, per essere in linea con le indicazioni normative [*D.Lgs.241/00, Linee guida, 2003*] e per valutare il rischio di esposizione dei lavoratori.
- *Tipologia strutturale e natura dei materiali dell'edificio*. Quest'ultimo criterio non è stato sempre possibile seguire, vista la scarsa disponibilità numerica degli edifici pubblici con caratteristiche differenti per tipologia edilizia.

Va comunque sottolineata la scarsa disponibilità, in alcuni casi, da parte dei singoli enti pubblici, al compimento della campagna di misure, portando all'esclusione forzata di alcuni edifici che erano stati precedentemente individuati come significativi per il monitoraggio.

In Tabella 4.2 sono riassunte le sedi monitorate in ogni località considerata, con i diversi tempi di esposizione. Inoltre ogni edificio, è riportato nei rispettivi Allegati in Appendice A.

## 4.3 CRITERI DI SCELTA DEI LOCALI DA MONITORARE

La scelta dei locali è stata effettuata studiando, inizialmente le planimetrie dei piani più bassi dei singoli edifici e procedendo ad un primo sopralluogo dei vari locali scelti sempre in accordo alle direttive delle Linee Guida operative del 2003, andando a coprire in maniera omogenea l'intera superficie (tutto riportato in Appendice B). Sono stati considerati in tale studio solo i piani più bassi in quanto più a diretto contatto con il terreno e quindi predisposti ad un maggior accumulo di concentrazione di gas Radon.

Inoltre locali attigui, caratterizzati da analoghe caratteristiche di costruzione, di destinazione d'uso, di ventilazione, di rivestimento interno, sono stati considerati come a pari concentrazione, per cui la misurazione è stata effettuata solo per un locale.

Inoltre, l'indagine è stata pianificata in modo da essere rappresentativa dell'esposizione del personale. Occorre, a tal riguardo, sottolineare che i luoghi di lavoro seminterrati/interrati non sempre sono occupati con continuità dai lavoratori, trattandosi in assoluta prevalenza di locali di servizio, ambienti di passaggio, archivi, depositi, locali tecnologici. Si è tenuto in considerazione il fatto che, da un punto di vista radioprotezionistico, ciò che è importante è l'esposizione del personale. A tal fine si è ritenuto opportuno effettuare le misure in locali che comportino lo stazionamento di almeno 10 ore mensili.

Inoltre, per meglio localizzare ciascun locale all'interno del proprio contesto planimetrico, sono state raccolte le planimetrie degli edifici monitorati, riportate nell'Allegato B. Per alcuni edifici la planimetria è mancante, in taluni casi perché ritenuta poco significativa vista l'estensione, in altri casi per la mancanza di disponibilità delle stesse.

Al fine di individuare i luoghi di lavoro sotterranei nei quali eseguire l'installazione dei rilevatori, indipendentemente dalle definizioni di sotterraneo contenute nei Regolamenti Edilizi (art. 30 del D.Lgs 626/94) si è ritenuto di adottare per i locali sotterranei la seguente definizione: *locale con almeno tre pareti interamente sotto il piano di campagna, indipendentemente dal fatto che queste siano a diretto contatto con il terreno circostante o meno.*

Tale definizione include anche quelli con un'apertura verso l'esterno (ad esempio con un ingresso sulla strada) e circondati da una intercapedine aerata [Conferenza dei Presidenti delle Regioni Autonome di Trento e Bolzano, 2003].

Per ogni singolo ambiente monitorato (opportunamente siglato in base al comune di appartenenza, al ciclo ultimo di esposizione, al numero di edificio monitorato, al numero di locale monitorato, nonché alla diversa destinazione d'uso pubblica dell'edificio), tipologia di uso è stata compilata una scheda tecnica (Figura 4.6) al fine di ricavare informazioni fondamentali sulle caratteristiche del luogo di lavoro, finalizzate alla maggiore correlazione dei dati ottenuti. Si propone di seguito il modello di scheda utilizzato [Conferenza dei Presidenti delle Regioni Autonome di Trento e Bolzano, 2003].

*SCHEDA INFORMATIVA SULLE CARATTERISTICHE DEI LOCALI/AMBIENTI NEI QUALI EFFETTUARE LE MISURE*

<b><u>Dati anagrafici</u></b>	
Ragione sociale richiedente : _____	
Via: _____	n°: _____
Località: _____	CAP: _____
Comune: _____	Provincia: _____
Telefono: _____	Fax: _____
Nominativo referente interno: _____	

<b><u>Per ogni locale/ambiente nel quale verranno effettuate le misure:</u></b>
<b>Denominazione univoca del locale/ambiente:</b> _____
<b>Posizione del locale/ambiente di misura rispetto al piano di campagna:</b> 1: 1ST    2: 2ST    3: 3ST
<b>Presenza di accesso diretto dall'esterno:</b> 1: si    2: no
<b>Presenza di ulteriori aperture verso l'esterno:</b> 1: si    2: no
<b>Presenza di impianto di climatizzazione attivo:</b>
1. solo riscaldamento <input type="checkbox"/>
2. riscaldamento/raffrescamento <input type="checkbox"/>
3. solo raffrescamento <input type="checkbox"/>
4. nessuno
<b>Le pareti sotterranee del locale/ambiente:</b>
1. sono totalmente affacciate a cavedio aerato <input type="checkbox"/>
2. sono solo parzialmente affacciate a cavedio aerato <input type="checkbox"/>
3. sono completamente a contatto con il terreno <input type="checkbox"/>
4. sono completamente (o anche parzialmente) costituite da roccia <input type="checkbox"/>
<b>Il pavimento:</b>
1. Confina con un altro piano <input type="checkbox"/>
2. E' a contatto diretto con il terreno <input type="checkbox"/>
3. E' a contatto con un vespaio aerato <input type="checkbox"/>
<b>Presenza di condensa/tracce di umidità:</b> 1: si    2: no
<b>Individuazione univoca del punto/dei punti di misura all'interno del locale/ambiente:</b> _____ _____
N.B. Per ambienti di dimensioni superiori a 100 m <sup>2</sup> può essere in alternativa allegata una planimetria con l'individuazione dei punti di misura

**Figura 4.6 - Modello tipo della scheda tecnica utilizzata**

#### 4.4 CICLI DI MONITORAGGIO: INSTALLAZIONE E RITIRO DOSIMETRI

La pianificazione dell'attività di campionamento e di misurazione è stata redatta tenendo conto di quanto previsto dalla normativa vigente (nell'Allegato I-bis del D. Lgs. 230/95): il livello di attività del radon è fissato in termini di concentrazione media annua, in modo da ricoprire interamente l'arco di un anno solare.

Inoltre, oltre al ciclo annuale, si è pensato di proporre ulteriori tempi di esposizione (3 mesi e 6 mesi) non solo per avere dati indicativi più rapidi e quindi facilmente utilizzabili, ma soprattutto per poter studiare le influenze delle variazioni stagionali locali. Cicli di esposizione inferiori ai tre mesi sono stati esclusi vista la troppa affezione di errore propri del dosimetro.

E' stato a riguardo compilato un modello (Appendice C) contenente il tempo di permanenza del personale nello specifico locale, i dati relativi ad ogni singolo dosimetro esposto, in particolare codice identificativo, data e ora di inizio e fine esposizione, tipologia di pavimentazione presente, ecc..

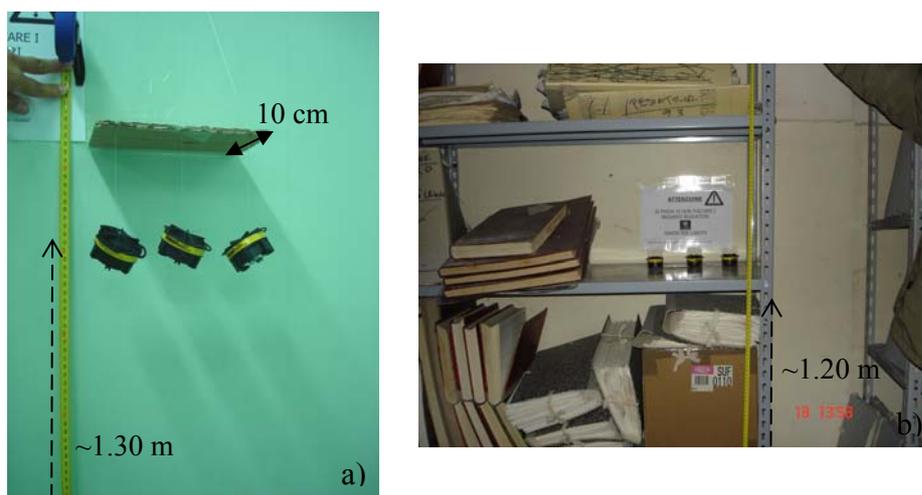
A scopo di ricerca sono state eseguite misure anche in locali a basso rateo di ventilazione, come alcuni archivi o spogliatoi, corridoi non areati, che rappresentano i locali a maggior rischio di contaminazione, essendo il terreno la principale fonte inquinante, ma bassissimo fattore di occupazione.

Per identificare il punto di misura ottimale per l'installazione dei dosimetri, si è proceduto all'osservazione degli ambienti precedentemente scelti al fine di localizzare le aperture ivi presenti (porte e finestre), la possibile esistenza di impianti di climatizzazione e di eventuali prese di aerazione, la presenza di condensa e tracce di umidità,. Non risultano essere adeguati alla misura locali con elevata ventilazione o con ridotta permanenza come per esempio cantine (anche nel caso di valori elevati, il risultato non è significativo , in quanto non rappresentativo dell'esposizione).

Pertanto i dosimetri con il rivelatore CR-39, sono stati posizionati secondo quanto suggerito dalle Linee Guida di riferimento, ad un'altezza di circa 1,20-1,30 m e a 10 cm dalle pareti in una zona sicura (per evitare rischi di colpi e manomissioni) lontana da eventuali sorgenti di calore (stufe, termosifoni, dall'irradiazione diretta dei raggi solari, per esempio dietro a vetrate) e di ricambio d'aria; là dove è stato possibile. Al fine di garantire l'integrità dei rilevatori, questi sono stati fissati nel punto di misura con l'ausilio di un comune nastro adesivo, come mostrato in Figura 4.7.

Al termine di ogni ciclo di esposizione, i dispositivi sono stati ritirati, sigillati col del nastro isolante (ben aderente all'over-gap) riposti in buste di materiale non permeabile al radon e portati in laboratorio. Tra il prelievo e lo sviluppo i rivelatori sono stati conservati in frigorifero. Tali accortezze servono per evitare eventuali contaminazioni che altererebbero i risultati finali.

Va sottolineato che durante tutto il periodo di misura i locali vanno mantenuti nelle normali condizioni d'uso e d'abitudini.



**Figura 4.7** - Installazione dei dosimetri a) su parete b) su ripiano

In Tabella 4.2 è schematizzata l'intera campagna di monitoraggio effettuata: località, edifici e cicli di esposizione.

**Tabella 4.2**– Sedi e località monitorate

LOCALITÀ	SEDI	PERIODO INSTALLAZIONE RIVELATORI	TEMPO DI ESPOSIZIONE		
			3 mesi	6 mesi	1 anno
<i>Castrovillari</i>	A.S.L. N.2,	Mar/05	Giu/05	Sett./05	Mar/06
	liceo scientifico, ist.tec. comm., ist. industriale	Mar/06	Giu/06	Sett/06	Mar/07
<i>Mormanno</i>	A.S.L. N.2	Mar/05	Giu/05	Sett./05	Mar/06
<i>Lungro</i>	A.S.L. N.2	Apr/05	Lug/05	Ott./05	Apr./06
<i>S. Marco Argentano</i>	A.S.L. N.2	Apr/05	Lug/05	Ott./05	Apr./06
<i>Cosenza</i>	A.S.L. N.4;	Sett/05	Gen/06	Apr/06	Sett/06
	A.S.L. N.4 (Mariano Santo)	Ott/05	Feb/06	Magg/06-	Ott/06
	liceo scientifico Scorza	Giu/05	Sett/05	Dic/05	Giu/06
<i>Rogliano</i>	A.S.L. N.4	Ott/05	Feb/06	Magg/06-	Ott/06
<i>S. Giovanni in Fiore</i>	A.S.L. N.5; scuola: media (x3), elementare (x2); scuola elementare (x3); materna (x3), IPSIA; ist.stat.d'arte; I.T.C.G.; liceo: pedag., scient., chiesa madre Comune; Abbazia Florense; Convento frati cappuccini;	Dic/05	Mar/06	Giu/06-	Dic/06
<i>Caccuri</i>	Scuola media	Dic/05	Mar/06	Giu/06	Dic/06
<i>Cerenzia</i>	Comune; Scuola: materna, media, eleme. (x2)	Gen/06	Apr/05	Lug/06	Gen/07
<i>Castelsilano</i>	Comune, scuola: media, elementare	Gen/06	Apr/05	Lug/06	Gen/07

Come si può notare il monitoraggio è stato effettuato ad una maglia più stretta nei paesi Silani. Ciò è avvenuto vista la natura geologica di tipo cristallino che lo caratterizza: è la geologia locale che regola la distribuzione e la migrazione del gas radon []. Inoltre, la scelta è ricaduta sul comune di San Giovanni in Fiore, visto che questo rappresenta il più grande comune del massiccio granitico Silano, sito ad un'altitudine di circa 1000 mt..

#### 4.5 CAMPIONAMENTO ATTIVO INDOOR E NEL SUOLO

Allo fine di avere uno studio più dettagliato si sono scelti campione delle aree da analizzare con monitoraggio attivo. Sono stati effettuati dei campionamenti sia indoor che aoutdoor.

Per tale monitoraggio è stato utilizzato un sistema di rivelazione  $\alpha$ , Alphaguard PQ2000PRO della Genitron Instruments, costituito da una camera a ionizzazione di forma cilindrica, con un volume attivo di 0.56 litri [*Manuale d'uso, 2005*].

Le misure indoor sono state effettuate in continuo in modalità diffusione, effettuando per ogni ambiente considerato 5 cicli di misura con tempo di integrazione pari a 10 minuti.

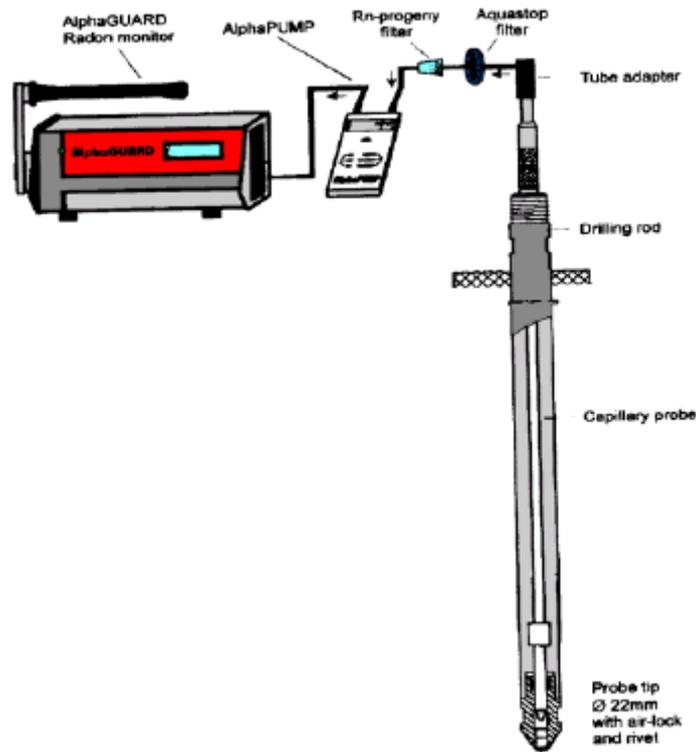
Durante l'acquisizione, e 10 minuti prima, si è provveduto a chiudere qualsiasi tipo di apertura che potesse consentire un'aerazione tale da far disperdere il gas Radon, non permettendone, quindi, l'accumulo.

Per le misure nel suolo è stata collegata all'alphaguard una sonda, utilizzata per prelevare il gas dal sottosuolo, costituita essenzialmente da un tubo d'acciaio, dotato, ad una estremità, di un adattatore per poterlo fissare nel terreno e, dall'altra, di una punta con air-lock e chiusa da un particolare rivetto; all'interno è inserito un tubo capillare attraverso il quale viene aspirato il gas. In questo caso si è utilizzata la modalità flusso, andando ad aspirare in modo forzato il gas, in modo diretto e in continuo, con un tempo di integrazione pari a 10 min ed un rate di aspirazione di 0.05 l/min.

La sonda è piazzata nel terreno alla profondità di 1 m. Dopo che il tubo è stato fissato nel suolo, al suo interno viene inserito il capillare, fino a penetrare l'airlock ed espellere quindi il rivetto. In Figura 4.8 è riportato lo schema dell'alphaguard e dei componenti associati.

Dopo aver collegato in serie il filtro *aquastop* ed il *Radon progeny filters*, il gas può essere aspirato dal sottosuolo, tramite l'*alphapump*, attraverso il tubo capillare fino a raggiungere il rivelatore dell'*alphaguard*.

Un opportuno software (*alphaview*) ha permesso il trasferimento dei dati e successivamente di visualizzazione in funzione del tempo di diversi parametri, tra cui temperatura, pressione atmosferica ed umidità, insieme con la concentrazione di Radon.



*Figura 4.8 – Schema del sistema di monitoraggio attivo (alphaguard), per effettuare le misurazioni nel suolo*

#### 4.6 CAMPIONAMENTO DI ACQUA, MATERIALE DI RIVESTIMENTO E ROCCE

Per avere un quadro conoscitivo dei possibili contributi alla concentrazione del radon all'interno degli ambienti esaminati [2001/928/Euratom], oltre alle immissioni dovute al sottosuolo che rimangono le più significative, si è ritenuto utile procedere, dove possibile, ad un campionamento, anche se occasionale e non sistematico, delle acque di servizio (di acquedotto) e di sorgente, nonché al prelievo di campioni di pavimento e di rocce, ove possibile e significativo, appartenenti ad affioramenti adiacenti gli edifici monitorati.

Ciò può consentire, tra l'altro, di ottenere importanti informazioni e indicazioni preliminari riguardanti le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche dei territori oggetti d'indagine.

##### 4.6.1 MODALITÀ DI CAMPIONAMENTO IN ACQUA

Concentrazioni di radon elevate nelle acque sorgive possono essere un utile indicatore di una maggiore presenza di radon in una certa zona.

I campioni sono stati prelevati dai rubinetti interni agli edifici, dalle sorgenti limitrofe, da pozzi, da acquedotti, (Tabella 4.3 e Appendice A) (Figura 4.8) con molta cura senza far gorgogliare l'acqua, facendola così fluire lungo la parete della bottiglia da 50 cl in plastica,

minimizzando, inoltre, il contatto del flusso di acqua con l'aria al fine di evitare la possibile dispersione del radon, visto che è un gas.

**Tabella 4.3 - Campioni d'acqua prelevati**

<i>Sigla Campione</i>	<i>Località</i>	<i>Punto di prelievo</i>	<i>Data di inizio prelievo</i>
AS2-S-A	San Marco	rubinetto interno ospedale	
AS2-S-B	San Marco	fontana in paese	
AS2-S-C	San Marco	fontana in paese	
AS2-L-D	Lungro	rubinetto interno ospedale	24/10/2005
AS2-M-E	Mormanno	fontana in paese	
AS2-M-F	Mormanno	rubinetto interno ospedale	
AS2-M-G	Mormanno	sorgente S. Domenica	
AS2-M-H	Mormanno	sorgente località Pantano	
AS2-C-I	Castrovillari	fontana in paese	
AS2-C-L	Castrovillari	sorgente S.Nicola	24/10/2005
AS2-C-M	Castrovillari	rubinetto ospedale	
<b>S. Giovanni in Fiore (zona Silana)</b>			
SGF-S1	fragulo	Sorgente	
SGF-S3	frischini	Sorgente	
SGF-S5	romundo	Sorgente	
SGF-S6	mangiatoie	Sorgente	
SGF-S4	frischini	Sorgente	
SGF-S2	fragulo	Sorgente	
SGF-S7	valletta	Sorgente	
SGF-SE1	trepidò	Sorgente	
SGF-S8	s bennardo	Sorgente	
SGF-S9	Garga	Sorgente	
SGF-S10	volpe in testa	Sorgente	
SGF-SE2	valletta + mangiatoie	Sorgente	
SGF-SE3	garga+fragulo+frischini+S.Bennardo	Sorgente	
SGF-P1	Olivaro1	Pozzo	
SGF-S11	Olivaro2	Sorgente	05/06/2006
SGF-P2	Valle piccola	Pozzo	
SGF-F1	Capuccini	Potabile	
SGF-F2	Variante	Potabile	
SGF-P3	Meterire	Pozzo	
SGF-S12	Germano	Sorgente - fontana	
SGF-F3	Via xxv aprile	Potabile - fontana	
SGF-S13	Ponte olivaro	Sorgente - fontana	
SGF-F4	Bivio comune	Potabile - fontana	
SGF-S14	Montagna grande	Sorgente- fontana	
SGF-S15	Meterire	Sorgente - fontana	
SGF-S16	Frà Giuseppe	Sorgente - fontana	
SGF-S17	Via castelsilano	Sorgente - fontana	
SGF-S18	Via Trepidò	Sorgente - fontana	
SGF-R2	Ospedale	Potabile da rubinetto	
SGF-R3	Scuola materna S.Francesco Bacile	Potabile da rubinetto	20/11/2006
SGF-R4	Scuola elem Dante Alighieri	Potabile da rubinetto	

SGF-R5	Scuola elem fratelli bandiera	Potabile da rubinetto
SGF-R6	Istituti statale d'arte	Potabile da rubinetto
SGF-R7	Ragioneria	Potabile da rubinetto
SGF-R8	Liceo scientifico	Potabile da rubinetto
SGF-R9	Scuola media Gioacch. da Fiore	Potabile da rubinetto
SGF-R10	Istituto professionale (I.P.S.I.A.)	Potabile da rubinetto
SGF-R11	Scuola San Francesco	Potabile da rubinetto
SGF-R12	Scuola elementare Olivaro	Potabile da rubinetto
SGF-R13	Scuola elementare Corrado Alvaro	Potabile da rubinetto
CSI-F1	Castelsilano	Potabile da fontana
CER-F1	Cerenzia	Potabile da rubinetto

Le bottiglie sono state riempite fino all'orlo ed immediatamente sigillate con del nastro



**Figura 4.8-** Campioni d'acqua prelevati in: a) sorgente in località San Nicola (Castrovillari); b) fontana in località Fragulo (San Giovanni in Fiore - Sila); c) serbatoio in San Giovanni in Fiore – Sila); d) sorgente acqua potabile in Località Fragulo.

isolante al fine di scongiurare l'eventuale dissoluzione in aria del gas. I campioni di acqua sono stati quindi conservati in frigorifero a testa in giù, per poi essere misurati non prima di quattro ore, al fine di permettere al radon e ai suoi discendenti di raggiungere l'equilibrio secolare, ed entro i giorni di emivita del radon (3,82 giorni).

Inoltre, ad ogni campione di acqua prelevata è stata assegnata una sigla, tenendo conto del Comune di riferimento, della provenienza (es. sorgente = s, fontana = f, rubinetto = r, pozzo = p), e del numero di campione prelevato.

#### **4.6.2 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI DI PAVIMENTO E DEL CAMPIONE DI ROCCIA**

La scelta del tipo di pavimento da analizzare è stata effettuata in maniera non sistematica ma in modo da essere più rappresentativa degli edifici monitorati; mentre è stato possibile prelevare un campione di roccia in prossimità dell'ospedale di Mormanno non essendo presenti affioramenti rocciosi limitrofi negli altri siti., e in prossimità di alcune scuole di San Giovanni in Fiore. Il campione più rappresentativo è stato sottoposto a spettrometria gamma, con rivelatore al germanio iperpuro, al fine di riconoscere la radioemissività dovuta ai radionuclidi presenti.

I campioni sono stati sottoposti a diffrattometria ai raggi X, utilizzando il metodo di Debye-Scherrer delle polveri microcristalline. Dei campioni prelevati è stata macinata, avvalendosi di un mortaio ad agata, la parte interna, fresca, non soggetta quindi (per le rocce) a possibili alterazioni esogene.

Per le analisi SEM, al fine di ottenere una corretta formazione dell'immagine sullo schermo, i campioni sono stati metallizzati superficialmente con uno strato sottilissimo di carbone o di oro in modo che tutti i punti della superficie analizzata presentassero lo stesso potenziale elettronico.

## CAPITOLO V

### RISULTATI DELLE CAMPAGNE DI MONITORAGGIO DI GAS RADON

In questo capitolo sono illustrati i risultati ottenuti dalla campagna di monitoraggio programmata sui territori indagati, prendendo in considerazione presidi ospedalieri, scuole superiori, sedi comunali. In particolare sul territorio di San Giovanni in Fiore, si è effettuato un monitoraggio più fitto, vista la natura geologica del territorio: sono stati presi in considerazione il presidio ospedaliero, tutte le scuole dalle materne alle superiori e alcune chiese.

Tale campagna di monitoraggio com'è già stato riassunto nel Capitolo IV (Tabella 4.1) è stata suddivisa in tre cicli:

- primo ciclo trimestrale;
- secondo ciclo semestrale;
- terzo ciclo annuale, che va a ricoprire l'intero arco solare.

Bisogna infine sottolineare che i dati, sono affetti da un margine di incertezza legato alla misura (com'è noto, qualsiasi misura sperimentale è caratterizzata da un'indeterminazione propria della tecnica utilizzata) e da un margine di incertezza dovuto al fatto che le misure sono state eseguite in un campione di locali appartenente a ciascun edificio monitorato e non sulla totalità dei locali stessi.

#### 5.1 RISULTATI AREA DI CASTROVILLARI

I risultati delle misure effettuate nei locali dell'ospedale di Castrovillari (planimetrie in Appendice B-1 e B-2), e delle tre scuole (planimetrie in Appendice B-3 e B-4) relativi al primo, al secondo e al terzo periodo annuale di monitoraggio sono illustrati rispettivamente nelle Tabelle 5.1, 5.2 e 5.3, in cui vengono riportate le concentrazioni di RAC espresse sia in  $\text{Bq/m}^3$  che in  $\text{KBq/m}^3$ .

In particolare, a fronte di una media nazionale annuale di  $77 \text{ Bq/m}^3$  e regionale di  $20\text{-}40 \text{ Bq/m}^3$  [Bochicchio F. et al, 2005], i valori puntuali riscontrati risultano essere maggiori.

Infatti la concentrazione media nella seconda fase di osservazione è chiaramente inferiore e ciò è dovuto alla maggiore ventilazione durante l'estate quando porte e finestre vengono lasciate aperte.

**Tabella 5.1** – Campagna di misure nell’area di Castrovillari: concentrazione di attività gas radon nel primo ciclo di monitoraggio trimestrale

Sigla Locale		Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
<b>Presidio ospedaliero di Castrovillari</b>				
CAS1A-1o	microbiologia		96.67	2.32
CAS1A-2o	locale fotocop.		150.91	3.62
CAS1A-3o	uff.magaz.econom		81.27	1.95
CAS1A-4o	dispensa emoteca		128.47	3.08
CAS1A-5o	stanza primario		583.79	18.25
CAS1A-6o	archivio2		73.92	1.77
CAS1A-7o	cucina		215.15	5.16
CAS1A-8o	farmacia ufficio		303.21	7.28
CAS1A-9o	deposito farmaci		70.52	1.69
CAS1A-10o	deposito farmaci tempor.		445.76	10.70
CAS1A-11o	spogliatoio uomini		124.83	3.00
CAS1A-12o	spogliatoio donne		139.16	3.34
CAS1A-13o	archivio 1		260.98	6.26
CAS1A-14o	ria		135.51	3.25
CAS1A-15o	archivio (ex-Inam)		345.07	8.28
<b>Istituto tecnico per geometri</b>				
CAS1B-16s	Archivio 1		368.17	8.84
CAS1B-17s	Archivio 2		369.28	8.86
CAS1B-18s	biblioteca (bagno/deposito)		222.95	5.35
CAS1B-19s	biblioteca (sala lettura)		468.35	11.24
<b>Istituto tecnico “E. Fermi”</b>				
CAS1C-20s	biblioteca		83.13	2.00
CAS1C-21s	lab. CAD-meccanica		116.57	2.80
CAS1C-22s	lab. elettrico		104.10	2.50
<b>Liceo scientifico “Enrico Mattei”</b>				
CAS1D-23s	deposito-archivio		300.09	-7.20

**Tabella 5.2** – Campagna di misure nell’area di Castrovillari: concentrazione di attività gas radon nel secondo ciclo di monitoraggio semestrale

Sigla Locale		Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
<b>Presidio ospedaliero di Castrovillari</b>				
CAS1A-1o	microbiologia		112.662	2.70
CAS1A-2o	locale fotocop.		61.877	1.49
CAS1A-3o	uff.magaz.econom		88.794	2.13
CAS1A-4o	dispensa emoteca		46.051	1.11
CAS1A-5o	stanza primario		44.657	1.07
CAS1A-6o	archivio2		59.088	1.42
CAS1A-7o	cucina		70.163	1.68
CAS1A-8o	farmacia ufficio		63.304	1.52
CAS1A-9o	deposito farmaci		89.74	2.15

CAS1A-10o	deposito farmaci tempor.	116.36	2.79
CAS1A-11o	spogliatoio uomini	155.96	3.74
CAS1A-12o	spogliatoio donne	83.281	2.00
CAS1A-13o	archivio 1	352.99	8.47
CAS1A-14o	ria	162.16	3.89
CAS1A-15o	archivio (ex-Inam)	275.07	6.60
<i>Istituto tecnico per geometri</i>			
CAS1B-16s	Archivio 1	326.70	7.84
CAS1B-17s	Archivio 2	349.18	8.38
CAS1B-18s	biblioteca (bagno/deposito)	353.62	8.49
CAS1B-19s	biblioteca (sala lettura)	220.60	5.29
<i>Istituto tecnico "E. Fermi"</i>			
CAS1C-20s	biblioteca	82.35	1.98
CAS1C-21s	lab. CAD-meccanica	124.69	2.99
CAS1C-22s	lab. elettrico	62.16	1.49
<i>Liceo scientifico "Enrico Mattei"</i>			
CAS1D-23s	deposito-archivio	312.42	7.50

Si può notare come in uno stesso edificio, le concentrazioni di gas Radon possano variare da locale a locale, ad esempio si può notare come nel primo ciclo trimestrale si passa da una concentrazione minima di  $\sim 73.92 \text{ Bq/m}^3$  (locale CAS1A-6o), ad un massimo di  $\sim 583.77 \text{ Bq/m}^3$  (locale CAS1A-5o), e nel ciclo annuale per gli stessi si passa da un valore minimo pari a  $\sim 63.01 \text{ Bq/m}^3$  ad un massimo di  $\sim 247.12 \text{ Bq/m}^3$ .

Ciò sta a dimostrare come a parità di geologia per una stessa struttura possano variare le concentrazioni di gas Radon. Da qui la necessità di una fitta rete di monitoraggio.

**Tabella 5.3** – Campagna di misure nell'area di Castrovillari: concentrazione di attività gas radon nel secondo ciclo di monitoraggio annuale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
<i>Presidio ospedaliero di Castrovillari</i>			
CAS1A-1o	microbiologia	131.32	3.15
CAS1A-2o	locale fotocop.	73.40	1.76
CAS1A-3o	uff.magaz.econom	102.69	2.46
CAS1A-4o	dispensa emoteca	34.01	0.82
CAS1A-5o	stanza primario	247.12	5.93
CAS1A-6o	archivio2	63.01	1.51
CAS1A-7o	cucina	190.92	4.58
CAS1A-8o	farmacia ufficio	48.88	1.17
CAS1A-9o	deposito farmaci	64.54	1.55
CAS1A-10o	deposito farmaci tempor.	207.46	4.98
CAS1A-11o	spogliatoio uomini	99.49	2.39
CAS1A-12o	spogliatoio donne	89.67	2.15
CAS1A-13o	archivio 1	262.42	6.30
CAS1A-14o	ria	332.92	7.99

CAS1A-15o	archivio (ex-Inam)	210.07	5.04
<i>Istituto tecnico per geometri</i>			
CAS1B-16s	Archivio 1	292.08	7.01
CAS1B-17s	Archivio 2	240.61	5.77
CAS1B-18s	biblioteca (bagno/deposito)	310.07	7.44
CAS1B-19s	biblioteca (sala lettura)	173.64	4.17
<i>Istituto tecnico "E. Fermi"</i>			
CAS1C-20s	biblioteca	61.39	1.47
CAS1C-21s	lab. CAD-meccanica	156.07	3.75
CAS1C-22s	lab. elettrico	69.21	1.66
<i>Liceo scientifico "Enrico Mattei"</i>			
CAS1D-23s	deposito-archivio	232.40	5.58

## 5.2 RISULTATI DELL'AREA DI MORMANNO CALABRO

I risultati delle misure effettuate nel campione di locali selezionati nell'ospedale di Mormanno (planimetria in Appendice B-5) relativi al primo, al secondo e al terzo periodo di monitoraggio sono illustrati nelle Tabelle 5.4 e 5.5 e 5.6, in cui vengono riportate le concentrazioni di RAC espresse sia in Bq/m<sup>3</sup> che in KBqh/m<sup>3</sup>.

In particolare, a fronte di una media nazionale annuale di 77 Bq/m<sup>3</sup> e regionale di 20-40 Bq/m<sup>3</sup> [Bochicchio F. et al, 2005], i valori puntuali riscontrati risultano nettamente maggiori.

**Tabella 5.4** – Presidio ospedaliero di Mormanno: concentrazione di attività del gas Radon nel primo ciclo di monitoraggio trimestrale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
MR1-1o	archivio 1	474.74	11.39
MR1-2 o	ufficio archivio	143.10	3.43
MR1-3 o	refettorio	217.02	5.21
MR1-4 o	sala convegni	1231.22	29.55
MR1-5 o	archivio 2	231.81	5.56
MR1-6 o	deposito	2249.95	54.00
MR1-7 o	spogl. cucina	2216.25	53.19

Anche nel caso dell'ospedale di Mormanno si osserva nel secondo ciclo di monitoraggio un abbassamento della concentrazione di gas Radon imputabile sia alla maggiore ventilazione degli ambienti stessi nei mesi estivi, sia al maggiore grado di affidabilità delle misure semestrali rispetto a quelle effettuate a tre mesi.

Nel ciclo di misure annuale tali variazioni si annullano, essendo queste rappresentative di un intero anno solare, senza discriminazioni stagionali e/o meteorologiche.

**Tabella 5.5** – Presidio ospedaliero di Mormanno: concentrazione di attività del gas Radon nel secondo ciclo di monitoraggio semestrale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
MR1-1o	archivio 1	371.84	8.92
MR1-2 o	ufficio archivio	188.73	4.53
MR1-3 o	refettorio	131.83	3.16
MR1-4 o	sala convegni	988.37	23.72
MR1-5 o	archivio 2	90.78	2.18
MR1-6 o	deposito	1215.14	29.16
MR1-7 o	spogl. cucina	1184.51	28.43

**Tabella 5.6** – Presidio ospedaliero di Mormanno: concentrazione di attività del gas Radon nel terzo ciclo di monitoraggio annuale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
MR1-1o	archivio 1	308.82	7.41
MR1-2 o	ufficio archivio	363.84	8.73
MR1-3 o	refettorio	123.31	2.96
MR1-4 o	sala convegni	580.43	13.93
MR1-5 o	archivio 2	86.95	2.09
MR1-6 o	deposito	871.46	20.92
MR1-7 o	spogl. cucina	960.57	23.05

### 5.3 RISULTATI DELL'AREA DI LUNGRO

I risultati relativi al presidio ospedaliero di Lungro (planimetria in Appendice B-6) sono riassunti nelle Tabelle 5.7 e 5.8 e 5.9, in cui vengono riportate le concentrazioni di RAC espresse sia in Bq/m<sup>3</sup> che in KBq/m<sup>3</sup>. In particolare, a fronte di una media nazionale annuale di 77 Bq/m<sup>3</sup> e regionale di 20-40 Bq/m<sup>3</sup> [Bochicchio F. et al, 2005], i valori puntuali riscontrati risultano essere confrontabili.

**Tabella 5.7** – Presidio ospedaliero di Lungro: concentrazione di attività del gas Radon nel primo ciclo di monitoraggio trimestrale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
LU1-1o	farmacia	57.99	1.39
LU1-2o	corridoio 1	49.81	1.20
LU1-3o	corridoio 2	44.28	1.06
LU1-4o	archivio	55.65	1.34
LU1-5o	archivio ristrutturato	60.48	1.45
LU1-6o	sala mortuaria	62.78	1.51
LU1-7o	corridoio 3	47.48	1.14
LU1-8o	deposito	35.18	0.79

In particolare si ha che il 100% dei valori di RAC misurati, in tutti e tre i cicli di campionamento, si mantengono al di sotto dei 100 Bq/m<sup>3</sup>, evidenziando una presenza di Radon abbastanza moderata.

L'andamento delle concentrazioni nei primi due periodi di monitoraggio, come mostrano nelle Tabelle 5.7 e 5.8, è piuttosto regolare diminuendo nel periodo più caldo a causa della maggiore aerazione a conferma della dipendenza stagionale delle concentrazioni del gas radon negli ambienti esaminati.

**Tabella 5.8** – Presidio ospedaliero di Lungro: concentrazione di attività del gas Radon nel secondo ciclo di monitoraggio semestrale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
LU1-1o	farmacia	42.45	1.02
LU1-2o	corridoio 1	23.77	0.57
LU1-3o	corridoio 2	20.43	0.49
LU1-4o	archivio	44.32	1.06
LU1-5o	archivio ristrutturato	23.99	0.58
LU1-6o	sala mortuaria	43.99	1.06
LU1-7o	corridoio 3	21.08	0.51
LU1-8o	deposito	20.32	0.49

**Tabella 5.9** – Presidio ospedaliero di Lungro: concentrazione di attività del gas Radon nel terzo ciclo di monitoraggio annuale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
LU1-1o	farmacia	63.41	1.52
LU1-2o	corridoio 1	16.54	0.40
LU1-3o	corridoio 2	24.45	0.59
LU1-4o	archivio	44.75	1.07
LU1-5o	archivio ristrutturato	25.19	0.60
LU1-6o	sala mortuaria	27.77	0.67
LU1-7o	corridoio 3	22.09	0.53
LU1-8o	deposito	12.73	0.31

Andando ad osservare le misure relative all'intero anno solare (terzo ciclo di monitoraggio) (Tabella 5.9), si ha che l'influenza dei parametri meteorologici scompare, ma in questo caso i valori continuano a restare in linea con i precedenti periodi di misura (il primo e il secondo ciclo di monitoraggio).

In particolare, si è scelto in questa sede di effettuare un monitoraggio mirato anche ad ambienti ad uso non lavorativo, ma di passaggio, poiché la struttura presenta ampi corridoi, che occupano gran parte del seminterrato non particolarmente aerati.

In tali ambienti, che presentano analoghe caratteristiche costruttive e di frequentazione, (vedi tabella C-4 riportata in appendice C), il valore di concentrazione di Radon misurato è dello stesso ordine di grandezza e decresce nel secondo ciclo di misurazione di una percentuale che si attesta rispetto al primo intorno al 54%.

#### 5.4 RISULTATI DELL'AREA DI SAN MARCO ARGENTANO

I risultati delle misure effettuate nei locali del presidio ospedaliero di San Marco Argentano (Vedi planimetrie in Allegato B) relativi al primo, al secondo e al terzo periodo di monitoraggio, sono illustrati rispettivamente nelle Tabelle 5.10 e 5.11 e 5.12, in cui vengono riportate le concentrazioni di RAC espresse sia in  $Bq/m^3$  che in  $KBq/m^3$ .

In particolare, a fronte di una media nazionale annuale di  $77 Bq/m^3$  e regionale di 20-40  $Bq/m^3$  [Bochicchio F. et al, 2005], i valori puntuali riscontrati risultano più alti, chi più chi meno.

L'andamento delle concentrazioni di attività di Radon misurate nei primi due periodi di osservazione dosimetrica presso l'ospedale di San Marco Argentano, ancora una volta mira a sottolineare il caratteristico decremento delle stesse nel secondo ciclo di monitoraggio effettuato nel periodo primavera-estate 2005.

Il ciclo annuale, invece, non dipendendo da nessuna variazione stagionale o meteorologica, rappresenta l'effettiva concentrazione, alla quale il personale è sottoposta per ogni singolo locale. In particolare anche in questo edificio si può notare come, a parità di geologia, si misurino valori di concentrazione diversi: la concentrazione annuale minima si registra nel locale SM1-6o pari a  $\sim 36.48 Bq/m^3$  in opposizione al locale SM1-1o pari a  $\sim 170.51 Bq/m^3$ .

**Tabella 5.10** – Presidio ospedaliero di San Marco Argentano: concentrazione di attività del gas Radon nel primo ciclo di monitoraggio trimestrale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [ $Bq/m^3$ ]	RAC [ $KBq/m^3$ ]
SM1-1o	attesa obitorio	165.913	3.98
SM1-2o	spogliatoio uomini	38.397	0.92
SM1-3o	palestra	43.067	1.03
SM1-4o	farmacia	31.392	0.75
SM1-5o	dietista	27.501	0.66
SM1-6o	cucina	33.468	0.80
SM1-7o	deposito cucina	151.124	3.63

**Tabella 5.11** – Presidio ospedaliero di San Marco Argentano: concentrazione di attività del gas Radon nel secondo ciclo di monitoraggio semestrale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
SM1-1o	attesa obitorio	158.324	3.80
SM1-2o	spogliatoio uomini	21.209	0.51
SM1-3o	palestra	18.282	0.44
SM1-4o	farmacia	16.637	0.40
SM1-5o	dietista	7.367	0.18
SM1-6o	cucina	14.334	0.34
SM1-7o	deposito cucina	16.172	0.39

**Tabella 5.12** – Presidio ospedaliero di San Marco Argentano: concentrazione di attività del gas Radon nel terzo ciclo di monitoraggio annuale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
SM1-1o	attesa obitorio	170.51	4.09
SM1-2o	spogliatoio uomini	67.95	1.63
SM1-3o	palestra	60.67	1.46
SM1-4o	farmacia	57.09	1.37
SM1-5o	dietista	57.65	1.38
SM1-6o	cucina	36.48	0.88
SM1-7o	deposito cucina	73.50	1.76

## 5.5 RISULTATI DELL'AREA DI COSENZA

I risultati delle misure effettuate nei locali dell'ospedale di Cosenza "SS.ma Annunziata" (planimetrie in Allegato B-8, B-9), del "Mariano Santo" e del Liceo scientifico statale "G. B. Scorza" (planimetrie in Allegato B-10) relativi al primo, al secondo e al terzo periodo di monitoraggio sono illustrati rispettivamente nelle Tabelle 5.13 e 5.14 e 5.15, in cui vengono riportate le concentrazioni di RAC espresse sia in Bq/m<sup>3</sup> che in KBq/m<sup>3</sup>.

**Tabella 5.13** – Area urbana di Cosenza: concentrazione di attività del gas Radon nel primo ciclo di monitoraggio trimestrale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
<b>Presidio ospedaliero di Cosenza “SS.ma Annunziata”</b>			
CS1A-1o	magazz. (centro trasfus.)	44.36	1.06
CS1A-2o	centro trasf. prelievo (don.)	30.92	0.74
CS1A-3o	spogl.(area lav..)	28.11	0.67
CS1A-4o	magazzino	27.25	0.65
CS1A-5o	spogl. donne (area lav.)	31.93	0.77
CS1A-6o	lavanderia	32.94	0.79
CS1A-7o	magazz. economato	49.13	1.18
CS1A-8o	deposito 1 (ditta pulizia)	76.81	1.84
CS1A-9o	deposito 2 (ditta pulizia)	38.60	0.93
CS1A-10o	falegnameria (spogl.)	46.26	1.11
CS1A-11o	ufficio ticket	97.30	2.34
CS1A-12o	ambulatorio oculistico	124.45	2.99
CS1A-13o	farmacia (deposito)	66.50	1.60
CS1A-14o	bagno spogliat. (farmacia)	50.53	1.21
CS1A-15o	corridoio (sotto pediatr.)	56.19	1.35
CS1A-16o	archivio deposito	240.86	5.78
CS1A-17o	ambulatorio chirurgia	41.08	0.99
CS1A-18o	archivio clinico	76.18	1.83
CS1A-19o	archivio clinico 1	46.67	1.12
CS1A-20o	archivio clinico 2	82.91	1.99
CS1A-21o	archivio clinico 3	156.51	3.76
CS1A-22o	centro sterilizzaz.	28.85	0.69
CS1A-23o	archivio rianimazione	51.26	1.23
<b>Presidio ospedaliero di Cosenza “Mariano Santo”</b>			
CS1B-24o	uff. tecnico	36.20	0.87
CS1B-25o	archivio	47.50	1.14
<b>Liceo scientifico statale “G. B. Scorza”</b>			
CS1C-26s	archivio	39.26	0.94
CS1C-27s	lab. Geofisica	77.67	1.86
CS1C-28s	ripostiglio	30.24	0.73
CS1C-29s	seminterrato	650.29	15.61

In particolare, a fronte di una media nazionale annuale di 77 Bq/m<sup>3</sup> e regionale di 20-40 Bq/m<sup>3</sup> [Bochicchio F. et al, 2005], i valori puntuali riscontrati risultano più o meno in linea.

Va evidenziato che per l’ospedale “Mariano Santo” è stato possibile il posizionamento dei dosimetri solo in due locali, frequentati dalle 3 alle 5 ore al giorno (Tabella C-6<sup>I</sup>, C-6<sup>II</sup>, C-6<sup>III</sup> e C-7, in Appendice C).

**Tabella 5.14** – Area urbana di Cosenza: concentrazione di attività del gas Radon nel secondo ciclo di monitoraggio semestrale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
<i>Presidio ospedaliero di Cosenza “SS.ma Annunziata”</i>			
CS1A-1o	magazz. (centro trasfus.)	34.78	0.83
CS1A-2o	centro transf. prelievo (don.)	17.54	0.42
CS1A-3o	spogl.(area lav..)	28.74	0.69
CS1A-4o	magazzino	23.14	0.56
CS1A-5o	spogl. donne (area lav.)	23.14	0.56
CS1A-6o	lavanderia	89.52	2.15
CS1A-7o	magazz. economato	26.53	0.64
CS1A-8o	deposito 1 (ditta pulizia)	58.42	1.40
CS1A-9o	deposito 2 (ditta pulizia)	24.14	0.58
CS1A-10o	falegnameria (spogl.)	30.24	0.73
CS1A-11o	ufficio ticket	79.88	1.92
CS1A-12o	ambulatorio oculistico	62.27	1.49
CS1A-13o	farmacia (deposito)	42.06	1.01
CS1A-14o	bagno spogliat. (farmacia)	84.55	2.03
CS1A-15o	corridoio (sotto pediatri.)	47.22	1.13
CS1A-16o	archivio deposito	222.10	5.33
CS1A-17o	ambulatorio chirurgia	89.52	2.15
CS1A-18o	archivio clinico	65.98	1.58
CS1A-19o	archivio clinico 1	44.79	1.08
CS1A-20o	archivio clinico 2	61.72	1.48
CS1A-21o	archivio clinico 3	102.28	2.45
CS1A-22o	centro sterilizzaz.	37.70	0.90
CS1A-23o	archivio rianimazione	32.41	0.78
<i>Presidio ospedaliero di Cosenza “Mariano Santo”</i>			
CS1B-24o	uff. tecnico	27.39	0.66
CS1B-25o	archivio	121.32	2.91
<i>Liceo scientifico statale “G. B. Scorza”</i>			
CS1C-26s	archivio	43.09	1.03
CS1C-27s	lab. Geofisica	140.29	3.37
CS1C-28s	ripostiglio	22.43	0.54
CS1C-29s	seminterrato	405.00	9.72

**Tabella 5.15** – Area urbana di Cosenza: concentrazione di attività del gas Radon nel terzo ciclo di monitoraggio annuale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
<b>Presidio ospedaliero di Cosenza “SS.ma Annunziata”</b>			
CS1A-1o	magazz. (centro trasfus.)	22.62	0.54
CS1A-2o	centro trasf. prelievo (don.)	13.10	0.31
CS1A-3o	spogl.(area lav..)	17.27	0.41
CS1A-4o	magazzino	31.12	0.75
CS1A-5o	spogl. donne (area lav.)	22.68	0.54
CS1A-6o	lavanderia	61.49	1.48
CS1A-7o	magazz. economato	25.13	0.60
CS1A-8o	deposito 1 (ditta pulizia)	39.54	0.95
CS1A-9o	deposito 2 (ditta pulizia)	20.07	0.48
CS1A-10o	falegnameria (spogl.)	30.08	0.72
CS1A-11o	ufficio ticket	65.68	1.58
CS1A-12o	ambulatorio oculistico	45.74	1.10
CS1A-13o	farmacia (deposito)	41.96	1.01
CS1A-14o	bagno spogliat. (farmacia)	68.06	1.63
CS1A-15o	corridoio (sotto pediatr.)	40.24	0.97
CS1A-16o	archivio deposito	138.44	3.32
CS1A-17o	ambulatorio chirurgia	28.44	0.68
CS1A-18o	archivio clinico	53.42	1.28
CS1A-19o	archivio clinico 1	29.97	0.72
CS1A-20o	archivio clinico 2	52.45	1.26
CS1A-21o	archivio clinico 3	89.87	2.16
CS1A-22o	centro sterilizzaz.	11.30	0.27
CS1A-23o	archivio rianimazione	29.31	0.70
<b>Presidio ospedaliero di Cosenza “Mariano Santo”</b>			
CS1B-24o	uff. tecnico	17.65	0.42
CS1B-25o	archivio	74.44	1.79
<b>Liceo scientifico statale “G. B. Scorza”</b>			
CS1C-26s	archivio	33.32	0.80
CS1C-27s	lab. Geofisica	111.78	2.68
CS1C-28s	ripostiglio	21.40	0.51
CS1C-29s	seminterrato	299.38	7.19

## 5.6 RISULTATI DELL'AREA DI ROGLIANO

I risultati relativi al presidio ospedaliero di Rogliano “S. Barbara” (vedi planimetria in Allegato B-11) sono riassunti nelle Tabelle 5.16 e 5.17 e 5.18, in cui vengono riportate le concentrazioni di RAC espresse sia in Bq/m<sup>3</sup> che in KBq/m<sup>3</sup>.

In particolare, a fronte di una media nazionale annuale di 77 Bq/m<sup>3</sup> e regionale di 20-40 Bq/m<sup>3</sup> [Bochicchio F. et al, 2005], i valori puntuali riscontrati sono leggermente maggiori.

**Tabella 5.16** – Presidio ospedaliero di Rogliano: concentrazione di attività del gas Radon nel primo ciclo di monitoraggio trimestrale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
RO1-1o	archivio 1	71.11	1.71
RO1-2o	archivio 2 (uff.)	63.66	1.53
RO1-3o	stanza primario (radiologia)	52.24	1.25
RO1-4o	corridoio radiologia	32.43	0.78
RO1-5o	stanza caldeista	20.59	0.49
RO1-6o	stanza primario (analisi)	11.30	0.27
RO1-7o	sala prelievi	30.63	0.74
RO1-8o	spogl. uomini lab. analisi	25.80	0.62
RO1-9o	antibagno dipend. (mensa)	34.52	0.83
RO1-10o	bagno mensa	33.24	0.80

In tale presidio ospedaliero sono stati considerati tutti locali molto frequentati fatta eccezione per i locali RO1-1o, RO1-9o, RO1-10o. Questi presentano, nei primi due cicli di monitoraggio, valori di accumulo più o meno costante, giustificati dal fatto che trattasi dei mesi autunnali e invernali. Gli altri locali frequentati costantemente presentano valori dipendenti dalle abitudini di vita.

**Tabella 5.17** – Presidio ospedaliero di Rogliano: concentrazione di attività del gas Radon nel secondo ciclo di monitoraggio semestrale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
RO1-1o	archivio 1	88.72	2.13
RO1-2o	archivio 2 (uff.)	65.45	1.57
RO1-3o	stanza primario (radiologia)	37.17	0.89
RO1-4o	corridoio radiologia	30.12	0.72
RO1-5o	stanza caldeista	23.56	0.57
RO1-6o	stanza primario (analisi)	16.46	0.39
RO1-7o	sala prelievi	22.87	0.55
RO1-8o	spogl. uomini lab. analisi	12.66	0.30
RO1-9o	antibagno dipend. (mensa)	35.99	0.86
RO1-10o	bagno mensa	32.43	0.78

Prendendo in considerazione le misure di concentrazione relative all'intero arco solare, si osserva come si passa dai locali RO1-7o e RO1-8o, a concentrazione bassa, pari a ~16.55 e ~11.19 Bq/m<sup>3</sup>, a locali, RO1-1o e RO2-8o, a concentrazione più elevata. Ciò è dovuto, come vedremo nel Capitolo successivo, ad un maggior accumulo dovuto alla scarsa aerazione pari a ~88.72 Bq/m<sup>3</sup>.

**Tabella 5.18** – Presidio ospedaliero di Rogliano: concentrazione di attività del gas Radon nel terzo ciclo di monitoraggio annuale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
RO1-1o	archivio 1	81.27	1.95
RO1-2o	archivio 2 (uff.)	55.74	1.34
RO1-3o	stanza primario (radiologia)	26.56	0.64
RO1-4o	corridoio radiologia	19.35	0.46
RO1-5o	stanza caldeista	16.94	0.41
RO1-6o	stanza primario (analisi)	20.10	0.48
RO1-7o	sala prelievi	16.55	0.40
RO1-8o	spogl. uomini lab. analisi	11.19	0.27
RO1-9o	antibagno dipend. (mensa)	25.46	0.61
RO1-10o	bagno mensa	31.25	0.75

## 5.7 RISULTATI DELL' AREA DI SAN GIOVANNI IN FIORE

Nell'area di San Giovanni in Fiore sono stati presi in considerazione edifici a diversa tipologia di destinazioni d'uso: ospedale, scuole, sede comunale, biblioteca, chiese.

Vanno fatte due considerazioni a tal riguardo: 1- anche se in alcune scuole la possibilità di una distribuzione omogenea dei dosimetri non era sempre disponibile, si è proceduto ugualmente all'installazione dei dosimetri; 2- alcuni punti di misura sono stati manomessi.

Si è comunque riusciti ad avere un andamento di Radon indoor in tale territorio.

I risultati relativi alle tre campagne di monitoraggio (vedi planimetrie in Allegato B-12/B16) sono riassunti nelle Tabelle 5.19, 5.20 e 5.21, in cui vengono riportate le concentrazioni di RAC espresse sia in Bq/m<sup>3</sup> che in KBq/m<sup>3</sup>.

In particolare, a fronte di una media nazionale annuale di 77 Bq/m<sup>3</sup> e regionale di 20-40 Bq/m<sup>3</sup> [Bochicchio F. et al, 2005], i valori puntuali riscontrati sono nettamente maggiori.

**Tabella 5.19** – Area urbana di San Giovanni in Fiore: concentrazione di attività del gas Radon nel primo ciclo di monitoraggio trimestrale

<b>Sigla Locale</b>	<b>Ambiente monitorato</b>	<b>RAC [Bq/m<sup>3</sup>]</b>	<b>RAC [KBq/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Presidio ospedaliero di San Giovanni</b>			
SGF1A-1o	cucina reparto dialisi	91.25	2.19
SGF1A-2o	obitorio	271.08	6.51
SGF1A-3o	endoscopia	85.22	2.05
SGF1A-4o	magazzino	256.12	6.15
SGF1A-5o	stanza elettricisti	69.81	1.68
SGF1A-6o	stanza primario (Dott. Perfetti)	166.16	3.99
SGF1A-7o	neferometria	50.11	1.20
SGF1A-8o	capo sala reparto dialisi	125.29	3.01
<b>Istituto Statale d'Arte</b>			
SGF1B-9s	bagno p. sott.	37.09	0.89
SGF1B-10s	bagno p. semint..	41.47	1.00
<b>I.T.C.G. - Ragioneria</b>			
SGF1C-11s	bagno aula magna (deposito)	718.35	17.24
SGF1C-12s	bagno p.t.	1020.48	24.49
<b>Scuola elementare F.lli Bandiera</b>			
SGF1D-13s	bagni palestra	196.18	4.71
SGF1D-14s	accesso cucina	90.73	2.18
<b>Scuola materna Via Difesa</b>			
SGF1E-15s	stanza caffè	409.17	9.82
SGF1E-16s	bagno cuoca	142.80	3.43
<b>Istituto Professionale (I.P.S.I.A.)</b>			
SGF1F-17s	magazzino	94.03	2.26
SGF1F-18s	bagno (deposito)	82.65	1.98
SGF1F-19s	aula magna	111.50	2.68
SGF1F-20s	lab. N.3	89.83	2.16
<b>Scuola media "Giacchino da Fiore"</b>			
SGF1G-21s	sala medica	216.51	5.20
SGF1G-22s	spogliatoio	103.69	2.49
<b>Scuola elementare San Francesco (Vaccarizzello)</b>			
SGF1H-23s	bagno palestra	65.30	1.57
SGF1H-24s	stanza dep. Materiale Elettorale	173.83	4.17
SGF1H-25s	Stanza vicino ascensore	239.54	5.75
SGF1I-26s	liceo psicopedagico	91.45	2.19
SGF1L-27s	Scuola media Marconi	210.00	5.04
SGF1M-28s	liceo scientifico	51.89	1.25
SGF1N-29s	Scuola materna Olivaro	76.28	1.83
SGF1O-30s	scuola elementare Casa Amato	42.33	1.03
SGF1P-31s	scuola elementare C. Alvaro	57.99	1.41
SGF1Q-32s	Scuola elementare Olivaro /Saltante	411.74	9.88
SGF1R-33s	Scuola materna S. Francesco (Bacile)	443.72	10.65
SGF1S-34s	scuola elementare Dante Alighieri	58.84	1.41

<i>Sede Comunale</i>			
SGF1T-35sc	stanza attività produttive	98.26	2.36
SGF1T-36sc	archivio	459.63	11.03
SGF1T-37sc	magazzino operai	84.82	2.04
<i>Biblioteca</i>			
SGF1U-38b	biblioteca	481.59	11.56
SGF1U-39b	biblioteca post mediatica	303.77	7.29
<i>Chiesa</i>			
SGF1V-40c	Abazia Florense	656.16	15.92
SGF1W-41c	chiesa madre	2058.57	49.41
SGF1Z-42c	convento frati capp.	142.64	3.42

**Tabella 5.20** – Area urbana di San Giovanni in Fiore: concentrazione di attività del gas Radon nel secondo ciclo di monitoraggio semestrale

<b>Sigla Locale</b>	<b>Ambiente monitorato</b>	<b>RAC [Bq/m<sup>3</sup>]</b>	<b>RAC [KBq/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Presidio ospedaliero di San Giovanni</b>			
SGF1A-1o	cucina reparto dialisi	85.22	2.05
SGF1A-2o	obitorio	236.64	5.68
SGF1A-3o	endoscopia	191.35	4.59
SGF1A-4o	magazzino	138.71	3.33
SGF1A-5o	stanza elettricisti	42.68	1.02
SGF1A-6o	stanza primario (Dott. Perfetti)	100.23	2.41
SGF1A-7o	neferometria	27.87	0.67
SGF1A-8o	capo sala reparto dialisi	88.84	2.13
<b>Istituto Statale d'Arte</b>			
SGF1B-9s	bagno p. sott.	46.53	1.12
SGF1B-10s	bagno p. semint..	65.52	1.57
<b>I.T.C.G. - Ragioneria</b>			
SGF1C-11s	bagno aula magna (deposito)	417.88	10.03
SGF1C-12s	bagno p.t.	601.25	14.43
<b>Scuola elementare F.lli Bandiera</b>			
SGF1D-13s	bagni palestra	170.85	4.10
SGF1D-14s	accesso cucina	150.70	3.62
<b>Scuola materna Via Difesa</b>			
SGF1E-15s	stanza caffè	284.21	6.82
SGF1E-16s	bagno cuoca	242.47	5.82
<b>Istituto Professionale (I.P.S.I.A.)</b>			
SGF1F-17s	magazzino	87.98	2.11
SGF1F-18s	bagno (deposito)	65.56	1.57
SGF1F-19s	aula magna	123.58	2.97
SGF1F-20s	lab. N.3	73.23	1.76
<b>Scuola media "Giacchino da Fiore"</b>			
SGF1G-21s	sala medica	211.85	5.08
SGF1G-22s	spogliatoio	107.40	2.58
<b>Scuola elementare San Francesco (Vaccarizzello)</b>			
SGF1H-23s	bagno palestra	54.47	1.31
SGF1H-24s	stanza dep. Materiale Elettorale	154.18	3.70
SGF1H-25s	Stanza vicino ascensore	215.43	5.17
SGF1I-26s	liceo psicopedagico	86.94	2.09
SGF1L-27s	Scuola media Marconi	173.53	4.16
SGF1M-28s	liceo scientifico	49.95	1.20
SGF1N-29s	Scuola materna Olivaro	52.33	1.26
SGF1O-30s	scuola elementare Casa Amato	41.58	1.00
SGF1P-31s	scuola elementare C. Alvaro	58.20	1.40
SGF1Q-32s	Scuola elementare Olivaro /Saltante	415.93	9.98
SGF1R-33s	Scuola materna S. Francesco (Bacile)	393.95	9.45
SGF1S-34s	scuola elementare Dante Alighieri	68.88	1.65

<i>Sede Comunale</i>			
SGF1T-35sc	stanza attività produttive	86.50	2.08
SGF1T-36sc	archivio	327.61	7.86
SGF1T-37sc	magazzino operai	122.27	2.93
<i>Biblioteca</i>			
SGF1U-38b	biblioteca	467.54	11.22
SGF1U-39b	biblioteca post mediatica	313.00	7.51
<i>Chiesa</i>			
SGF1V-40c	Abazia Florense	780.34	18.73
SGF1W-41c	chiesa madre	1366.97	32.81
SGF1Z-42c	convento frati capp.	114.82	2.76

**Tabella 5.21** – Area urbana di San Giovanni in Fiore: concentrazione di attività del gas Radon nel terzo ciclo di monitoraggio annuale

<b>Sigla Locale</b>	<b>Ambiente monitorato</b>	<b>RAC [Bq/m<sup>3</sup>]</b>	<b>RAC [KBq/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Presidio ospedaliero di San Giovanni</b>			
SGF1A-1o	cucina reparto dialisi	73.86	1.77
SGF1A-2o	obitorio	198.47	4.76
SGF1A-3o	endoscopia	118.61	2.85
SGF1A-4o	magazzino	89.43	2.15
SGF1A-5o	stanza elettricisti	35.41	0.85
SGF1A-6o	stanza primario (Dott. Perfetti)	101.16	2.43
SGF1A-7o	neferometria	23.55	0.57
SGF1A-8o	capo sala reparto dialisi	79.31	1.90
<b>Istituto Statale d'Arte</b>			
SGF1B-9s	bagno p. sott.	52.98	1.27
SGF1B-10s	bagno p. semint..	59.26	1.42
<b>I.T.C.G. - Ragioneria</b>			
SGF1C-11s	bagno aula magna (deposito)	415.76	9.98
SGF1C-12s	bagno p.t.	481.40	11.55
<b>Scuola elementare F.lli Bandiera</b>			
SGF1D-13s	bagni palestra	159.28	3.82
SGF1D-14s	accesso cucina	87.34	2.10
<b>Scuola materna Via Difesa</b>			
SGF1E-15s	stanza caffè	183.91	4.41
SGF1E-16s	bagno cuoca	138.29	3.32
<b>Istituto Professionale (I.P.S.I.A.)</b>			
SGF1F-17s	magazzino	98.82	2.37
SGF1F-18s	bagno (deposito)	68.42	1.64
SGF1F-19s	aula magna	117.96	2.83
SGF1F-20s	lab. N.3	89.43	2.15
<b>Scuola media "Giacchino da Fiore"</b>			
SGF1G-21s	sala medica	266.32	6.39
SGF1G-22s	spogliatoio	111.01	2.66
<b>Scuola elementare San Francesco (Vaccarizzello)</b>			
SGF1H-23s	bagno palestra	64.17	1.54
SGF1H-24s	stanza dep. Materiale Elettorale	149.77	3.59
SGF1H-25s	Stanza vicino ascensore	188.52	4.52
SGF1I-26s	liceo psicopedagico	83.02	1.99
SGF1L-27s	Scuola media Marconi	190.66	4.58
SGF1M-28s	liceo scientifico	54.22	1.30
SGF1N-29s	Scuola materna Olivaro	54.22	1.30
SGF1O-30s	scuola elementare Casa Amato	42.23	1.01
SGF1P-31s	scuola elementare C. Alvaro	47.81	1.15
SGF1Q-32s	Scuola elementare Olivaro /Saltante	354.79	8.51
SGF1R-33s	Scuola materna S. Francesco (Bacile)	357.59	8.58
SGF1S-34s	scuola elementare Dante Alighieri	52.05	1.25

<i>Sede Comunale</i>			
SGF1T-35sc	stanza attività produttive	88.03	2.11
SGF1T-36sc	archivio	332.67	7.98
SGF1T-37sc	magazzino operai	130.99	3.14
<i>Biblioteca</i>			
SGF1U-38b	biblioteca	397.18	9.53
SGF1U-39b	biblioteca post mediatica	334.94	8.04
<i>Chiesa</i>			
SGF1V-40c	Abazia Florense	780.34	17.75
SGF1W-41c	chiesa madre	1366.97	17.63
SGF1Z-42c	convento frati capp.	114.82	2.77

## 5.8 RISULTATI DELL' AREA DI CASTELSIANO, CACCURI E CERENZIA

Le misure relative alle tre aree limitrofe di Castelsilano, Caccuri e Cerenzia, relativi alle tre campagne di monitoraggio sono riassunti nelle Tabelle 5.22, 5.23 e 5.24, in cui vengono riportate le concentrazioni di RAC espresse sia in Bq/m<sup>3</sup> che in KBq/m<sup>3</sup>.

In particolare, a fronte di una media nazionale annuale di 77 Bq/m<sup>3</sup> e regionale di 20-40 Bq/m<sup>3</sup> [Bochicchio F. et al, 2005], i valori puntuali riscontrati sono nettamente maggiori.

*Tabella 5.22 – Campagna di misure nell'area di Castelsilano, Caccuri e Cerenzia: concentrazione di attività gas Radon nel primo ciclo di monitoraggio trimestrale*

<b>Sigla Locale</b>	<b>Ambiente monitorato</b>	<b>RAC [Bq/m<sup>3</sup>]</b>	<b>RAC [KBq/m<sup>3</sup>]</b>
<i>Area di Castelsilano</i>			
CSIA1-1o	scuola elementare F.lli Pugl.	823.33	19.76
CSIB1-2o	Comune	923.93	22.17
CSIC1-3o	scuola media	107.97	2.59
<i>Area di Caccuri</i>			
CAC1-4s	scuola media	112.59	1.27
<i>Area di Cerenzia</i>			
CER1A-5s	comune	158.92	3.81
CER1B-6s	scuola elementare	169.06	4.06
CER1C-7s	scuola media	432.88	10.39
CER1D-8s	scuola materna	128.80	3.09

I dati che più spiccano in modo rilevante sono quelli relativi alla zona di Castelsilano, in particolare gli edifici CSIA, CSIB, che presentano valori elevati in tutti i tre cicli di

monitoraggio, andando a superare il limite d'attenzione annuo di 400 Bq/m<sup>3</sup>. Per quanto riguarda, invece, le altre due aree di monitoraggio:

- per Caccuri è stato analizzato solo un locale adibito a laboratorio, frequentato comunque in modo sporadico;
- per Cerenzia le tre scuole monitorate presentano simili tipologie di costruzioni e la differenza di accumulo di Radon è legata alla diversa esposizione dei locali e alle aperture presenti.

La geologia locale resta comunque il fattore discriminante il diverso accumulo.

**Tabella 5.23** – Campagna di misure nell'area di Castelsilano, Caccuri e Cerenzia: concentrazione di attività gas radon nel secondo ciclo di monitoraggio semestrale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
<i>Area di Castelsilano</i>			
CSIA1-1o	scuola elementare F.lli Pugl.	652.84	15.67
CSIB1-2o	Comune	840.28	20.17
CSIC1-3o	scuola media	83.93	2.01
<i>Area di Caccuri</i>			
CAC1-4s	scuola media	127.81	3.07
<i>Area di Cerenzia</i>			
CER1A-5s	comune	144.79	3.48
CER1B-6s	scuola elementare	93.42	2.24
CER1C-7s	scuola media	306.71	7.36
CER1D-8s	scuola materna	88.09	2.11

**Tabella 5.24** – Campagna di misure nell'area di Castelsilano, Caccuri e Cerenzia: concentrazione di attività gas radon nel terzo ciclo di monitoraggio annuale

Sigla Locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAC [KBq/m <sup>3</sup> ]
<i>Area di Castelsilano</i>			
CSIA1-1o	scuola elementare F.lli Pugl.	420.22	10.09
CSIB1-2o	Comune	607.31	14.58
CSIC1-3o	scuola media	79.51	1.91
<i>Area di Caccuri</i>			
CAC1-4s	scuola media	111.95	2.69
<i>Area di Cerenzia</i>			
CER1A-5s	comune	141.58	3.40
CER1B-6s	scuola elementare	81.28	1.95
CER1C-7s	scuola media	268.46	6.44
CER1D-8s	scuola materna	102.16	2.45

## 5.9 RISULTATI DELLE CONCENTRAZIONI DI RADON IN ACQUA

Le misure di radon nei campioni di acqua prelevati (Appendice A) sono relativi a campionamenti dal carattere puntuale di un giorno (inizio: 24/10/2005, 05/06/2006, 20/11/2006), e quindi non significativi ai fini della normativa di riferimento (2001/928 Euratom), in cui si prevede un campionamento giornaliero minimo di un anno (Tabella 5.25).

Tuttavia, in questa sede, questo tipo di misurazione ha lo scopo di fornire semplicemente una stima dell'ordine di grandezza della concentrazione di radon nell'acqua prelevata. A tal riguardo si precisa che la variazione stagionale delle misure del radon in acqua è minore del 15% [Rudi S. A., 2003].

**Tabella 5.25 – Concentrazione del Radon nei campioni d'acqua prelevati**

Campione	Località	Concentrazione Rn	
		pCi/l	Bq/l
AS2-S-A	San Marco- rubinetto interno ospedale	22.83	0.85
AS2-S-B	San Marco- fontana in paese	75.80	2.81
AS2-S-C	San Marco- fontana in paese	11.08	0.41
AS2-L-D	Lungro- rubinetto interno ospedale	11.57	0.43
AS2-M-E	Mormanno- fontana in paese	7.97	0.29
AS2-M-F	Mormanno- rubinetto interno ospedale	10.35	0.38
AS2-M-G	Mormanno- sorgente loc. S. Domenica	31.43	1.16
AS2-M-H	Mormanno- sorgente loc. Pantano	25.18	0.93
AS2-C-I	Castrovillari- fontana in paese	10.93	0.40
AS2-C-L	Castrovillari- sorgente S. Nicola	10.69	0.39
AS2-C-M	Castrovillari- rubinetto interno ospedale	18.95	0.70
<b>SAN GIOVANNI IN FIORE</b>			
SGF-S1	fragulo	1010.38	37.42
SGF-S3	frischini	1712.03	63.41
SGF-S5	romundo	202.89	7.51
SGF-S6	mangiatoie	212.52	7.87
SGF-S4	frischini	588.46	21.79
SGF-S2	fragulo	589.51	21.83
SGF-S7	valletta	143.07	5.30
SGF-SE1	trepidò	142.62	5.28
SGF-S8	s bennardo	176.22	6.53
SGF-S9	Garga	363.31	13.46
SGF-S10	volpe in testa	780.85	28.92
SGF-SE2	garga + fragulo + frischini + san bennardo	109.59	4.06

SGF-SE3	Olivaro1	114.73	4.25
SGF-P1	Olivaro2	540.67	20.02
SGF-S11	Olivaro3	232.42	8.61
SGF-R1	Valle piccola	96.97	3.59
SGF-P2	Capuccini	244.41	9.05
SGF-F1	Variante	132.23	4.90
SGF-F2	Meterire	116.50	4.31
SGF-P3	Germano	1017.92	37.70
SGF-S12	Via xxv aprile	1507.40	55.83
SGF-F3	Ponte olivaro	99.18	3.67
SGF-S13	Bivio comune	51.81	1.92
SGF-F4	Montagna grande	43.28	1.60
SGF-S14	Meterire	414.91	15.37
SGF-S15	Frà Giuseppe	52.96	1.96
SGF-S16	Via castelsilano	181.22	6.71
SGF-S17	Via Trepidò	601.52	22.28
SGF-S18	Ospedale	431.70	15.99
SGF-R2	Scuola materna S.Francesco bacile	76.92	2.85
SGF-R3	Scuola elem Dante Alighieri	98.06	3.63
SGF-R4	Scuola elem fratelli bandiera	80.69	2.99
SGF-R5	Istituti statale d'arte	69.12	2.56
SGF-R6	Ragioneria	140.32	5.20
SGF-R7	Liceo scientifico	114.21	4.23
SGF-R8	Scuola media gioacchino da fiore	134.16	4.97
SGF-R9	Istituto professionale	98.78	3.66
SGF-R10	San Francesco (vaccarizziello)	104.97	3.89
SGF-R11	scuola elem olivaro	101.61	3.76
SGF-R12	scuola elem Corrado Alvaro	71.92	2.66
SGF-R13	Cerenza	63.40	2.35
CER-F1	Castelsilano	56.92	2.11

Per quanto riguarda l'area di Cosenza e di Rogliano, non è stato prelevato alcun campione d'acqua, vista già la presenza di questi dati in letteratura [Tansi C. et al., 2005]. Tali valori, come i risultati delle misure riportate in Tabella 5.25 mostrano che le concentrazioni del Radon disciolto nei campioni di acqua prelevati hanno un'incidenza radiologica trascurabile, essendo esse ben al di sotto dei 100 Bq/l, indicato nella Raccomandazione della Comunità Europea del 20 dicembre 2001 come valore al di sopra del quale è suggerito valutare se occorrono azioni correttive per tutelare la salute pubblica.

In particolare i valori maggiori si registrano nell'area di San Giovanni in Fiore, come era prevedibile, mentre i valori minimi si registrano. Anche se inferiori ai 100 Bq/l ci sono due campioni (SGF-S3 e SGF-S12) che rispettivamente presentano valori pari a 63.41 Bq/l e

55.83 Bq/l, provenienti entrambi da sorgente. Sono state prelevate diverse tipologie di acque come descritto nel Capitolo IV, per osservare le diverse concentrazioni che assume l'acqua da monte verso valle nel suo percorso, andando a coinvolgere, sorgenti, acquedotti, serbatoi, ecc..

Le acque 'terrestri', provenienti dal sottosuolo, presentano concentrazioni di Radon variabili a seconda del percorso e delle caratteristiche dei materiali attraversati.

## CAPITOLO VI

### ANALISI E DISCUSSIONI DEI RISULTATI DEL MONITORAGGIO DI GAS RADON

Nel seguente capitolo i dati ottenuti nelle diverse campagne di monitoraggio, costituenti una banca dati, sono stati analizzati e correlati in funzione di diversi parametri quali il contesto geologico, le variazioni stagionali, la tipologia strutturale dei microambienti, i materiali da costruzione, la frequenza (permanenza del personale nei singoli microambienti). In particolare sono stati presi in considerazione alcuni casi di studio di maggiore interesse.

#### 6.1 ANALISI DEL CONTRIBUTO DEL CONTESTO GEOLOGICO

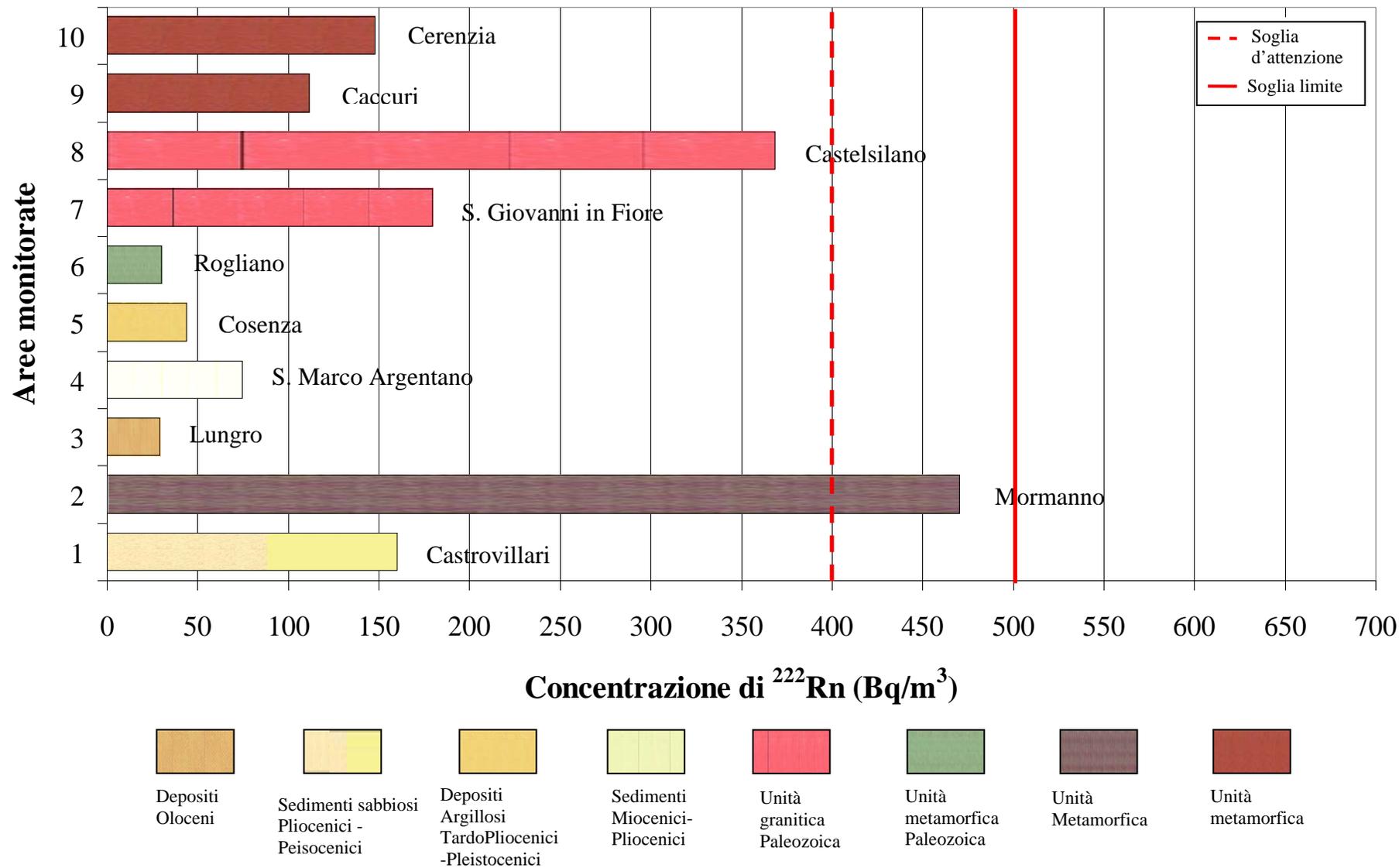
Nell'analisi dei risultati, correlati con il diverso contesto geologico, sono stati presi in considerazione solo i valori annuali, in quanto le altre variabili quali le variazioni meteorologiche di tipo stagionale e le variazioni di attività umana, quali l'apertura e la chiusura delle scuole vengono mediate. In Figura 6.1 sono riportati i valori medi annuali dei dati ottenuti dalle campagne di monitoraggio nelle diverse aree in relazione ai diversi contesti geologici-strutturali.

Si evince come, le concentrazioni minori si registrino per il Comune di Lungro, di Rogliano, Cosenza e San Marco Argentano, mentre le concentrazioni più alte si registrano per Mormanno e Castelsilano.

Nell'area di *Lungro* è stato preso in considerazione il solo presidio ospedaliero le cui concentrazioni risultano essere nettamente inferiori al limite normativo [D. L.gs. 241/00] nell'intero arco solare del 2005-2006.

Va sottolineato che tale edificio, oggetto di monitoraggio, ricade in un contesto geologico (vedi Capitolo IV), caratterizzato principalmente da conglomerati sabbiosi poligenici, quindi rientra in un'area a basso potenziale di concentrazione di gas Radon (carta dell'attitudine al Radon Figura 4.1). Inoltre osservando la Carta Geologica in Appendice A-4, si può notare come sia diverso il contesto geologico all'interno del paese, dove ricadono un maggior numero di edifici.

Per quanto riguarda, invece, l'area di *Rogliano*, notiamo come tale area, venga inserita in una zona ad alto potenziale di attitudine alla concentrazione di Radon (Figura 4.1 del Capitolo IV), vista la natura metamorfica di tali terreni. Da un rilevamento locale effettuato,



**Figura 6.1** – Valori medi delle campagne di misura annuali in confronto al contesto geologico. Con le linee rosse sono riportate i limiti normativi [D. L.gs. 241/00]

per spiegare tale anomalia, è emesso che le rocce dove poggiano, sono caratterizzati da un alto grado di alterazione. Quindi nei locali dell'area di Rogliano analizzati, l'accumulo di gas Radon è legato non tanto alla tipologia di rocce, ma allo stato di degrado.

Ciò ha potuto contribuire alla migrazione di ioni di Uranio esavalente, come spiegato nel Capitolo II (par. 2.3), quindi ad una possibile diminuzione dell'emissione di Radon.

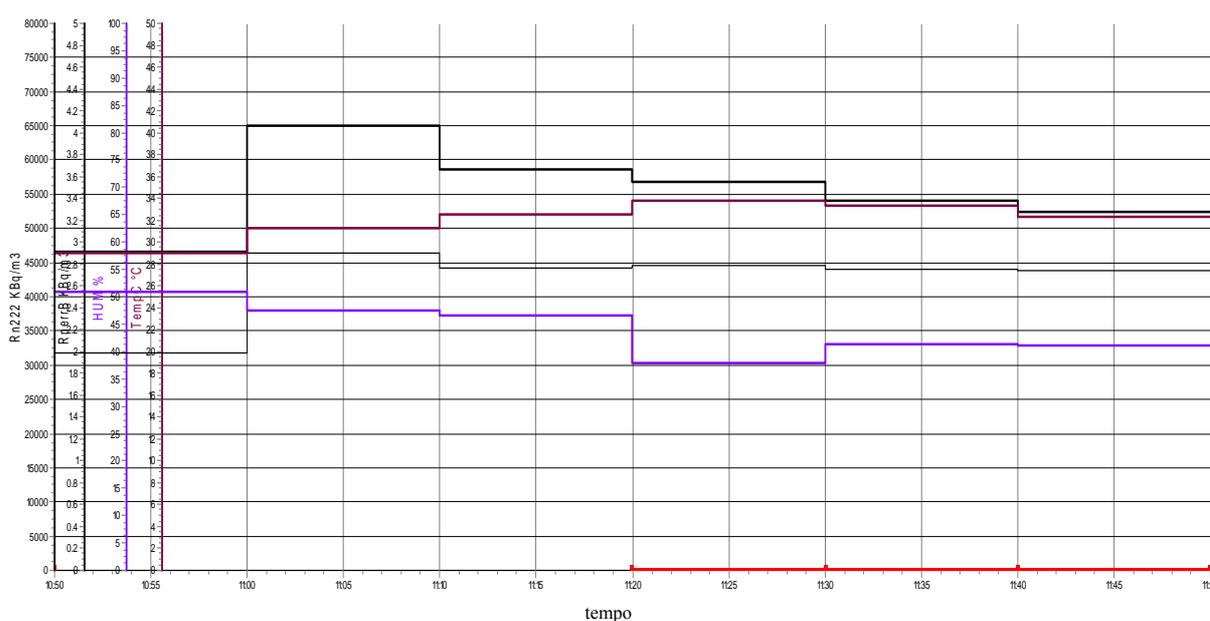
Le aree di Cosenza e San Marco Argentano, rientrano in un contesto geologico di natura sedimentaria, a bassa attitudine al Radon.

In particolare l'area di Cosenza monitorata è caratterizzata da argille e conglomerati che secondo la letteratura e secondo la valutazione della carta d'attitudine al Radon presentano basse concentrazioni date le litologie presenti. Va però sottolineato che, oltre alla litologia presente, è molto influente il contesto strutturale. Infatti, l'edificio del Liceo Scorza (CS1C) dove si registrano picchi di concentrazioni maggiori, è collocato nelle vicinanze di un sistema di faglie attivo che influisce in modo rilevante sull'accumulo di Radon [Tansi C. et al., 2005].

Per quanto riguarda invece l'area di San Marco Argentano va sottolineato il fatto che pur essendo tale area localizzata su depositi di natura sabbiosa - conglomeratica, ad ovest del centro abitato affiorano rocce metamorfiche in contatto strutturale con le rocce sedimentarie, quindi si potrebbero registrare in altri edifici limitrofi, concentrazioni da non tralasciare.

Per quanto riguarda l'area di Castrovillari anche se presenta una concentrazione annuale media di gas Radon medio-bassa, questa non è da non sottovalutare. Basti fare un confronto con l'istituto tecnico e per geometri (CAS1Bs), che, vista la sua posizione geologica in quanto, pur poggiando su sabbie, è sito alle pendici di un versante (M. S. Angelo) caratterizzato da dolomie e calcari dolomitici (vedi carta geologica in Appendice A-2) presenta concentrazioni di Radon maggiori.

In particolare, in prossimità di tale istituto, è stato possibile effettuare un ciclo di misura



**Figura 6.2** – Andamento delle emissioni dal suolo di gas Radon e dei parametri di umidità, pressione e temperatura, in prossimità dell'Istituto tecnico commerciale (CAS6Bs), in un tempo di acquisizione di 1 ora

attivo, con l'alphaguard (Figura 6.2), in modo da avere un andamento di emanazione di Radon nel sottosuolo. Come si può osservare i valori registrati in un intervallo di tempo di un'ora (dalle 10:50 alle 11:50 come riportato nell'asse delle ascisse) giustificano le concentrazioni riscontrate all'interno dei locali di tale edificio. Infatti si registra una concentrazione media ad 1 metro di profondità pari a  $55594.67 \pm 2653.33 \text{ Bq/m}^3$ . Ciò può essere dovuto non solo al suolo, ma anche ad eventuali materiali di riempimento usati nella costruzione di tale edificio.

Purtroppo non è stato possibile effettuare ulteriori misure per gli altri edifici.

Andrebbero a tal riguardo effettuate opportune precauzioni anti-Radon, al fine di convergere l'emanazione del suolo verso l'esterno. Inoltre, considerando che in quella zona sono presenti ulteriori edifici, andrebbe effettuato un monitoraggio mirato a tali zone, tenendole sotto controllo.

Va inoltre sottolineato, che in Figura 6.1 sono riportati i valori di concentrazione medie dell'intera area, ma all'interno dei singoli edifici ci sono locali in cui si registrano accumuli di Radon da non sottovalutare.

Inoltre da un punto di vista geologico un altro fattore molto influente è la diversa profondità delle falde acquifere. Ci sono punti localizzati, infatti, in cui si potrebbe ipotizzare ad un contributo rilevante da parte dell'acqua. Particolare attenzione è stata data, al locale CAS1A-5o dell'azienda ospedaliera, come si potrà vedere in seguito nel paragrafo 6.3.

L'area di Mormanno, monitorata rientra in una litologia caratterizzata da rocce di natura metamorfica, a contatto con rocce dolomitiche. In questo caso il contributo è relativo alla combinazione di tali litologie e alla distribuzione dei minerali torio-uraniferi presenti. I dati ottenuti sono in accordo con la ricostruzione della carta dell'attitudine al Radon, rientrando in una zona ad alto potenziale Radon.

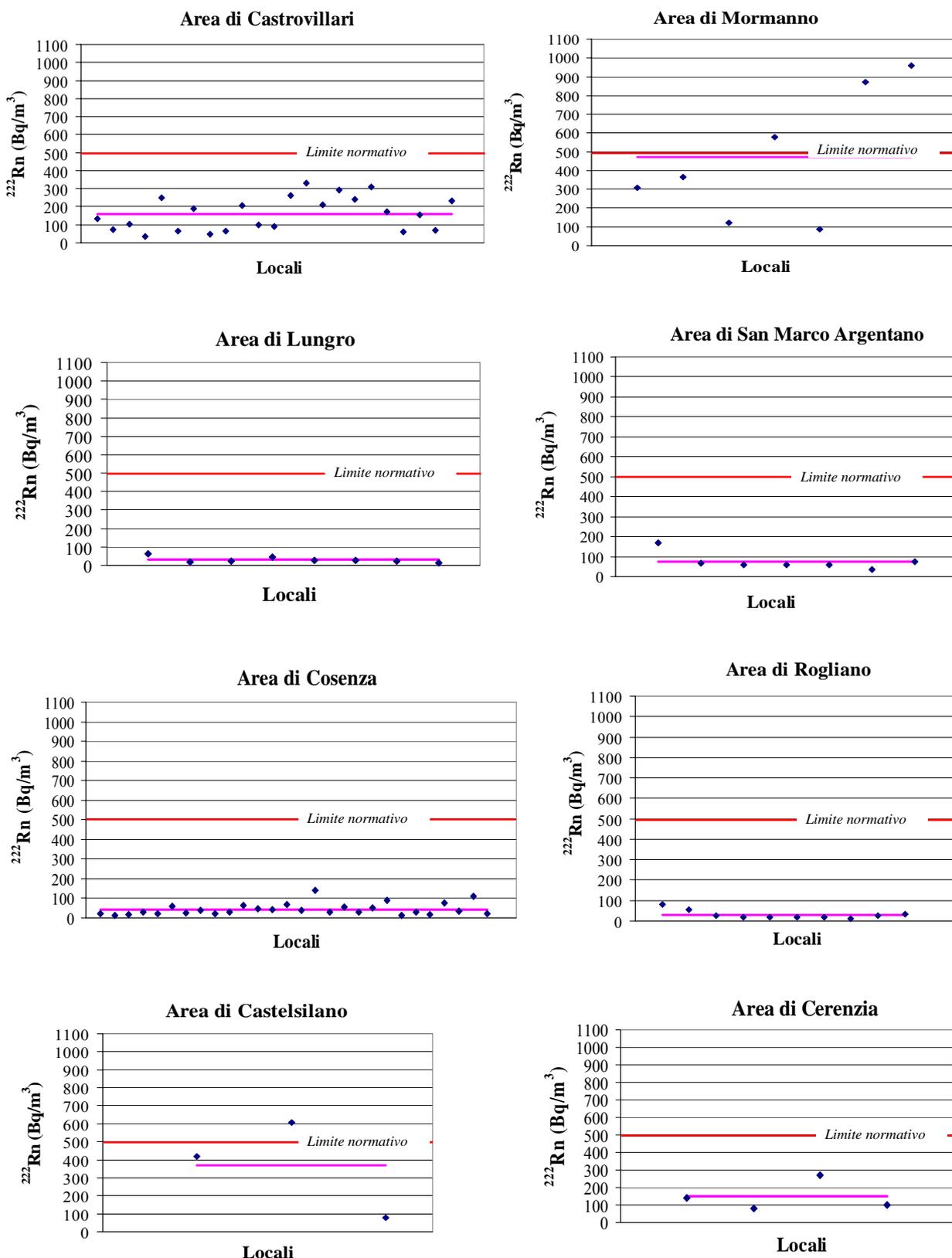
Inoltre si registrano valori d'interesse anche per l'area di San Giovanni in Fiore e Cerenzia. In questo caso il contesto geologico è per lo più costante, ma i diversi accumuli tra un edificio ed un altro (Figura 6.2) possono essere legati anche alla possibile presenza di intrusioni di filoni pegmatitici o in generale contenenti maggiori concentrazioni di minerali torio-uraniferi, che contribuiscono ad una maggiore emissione di Radon.

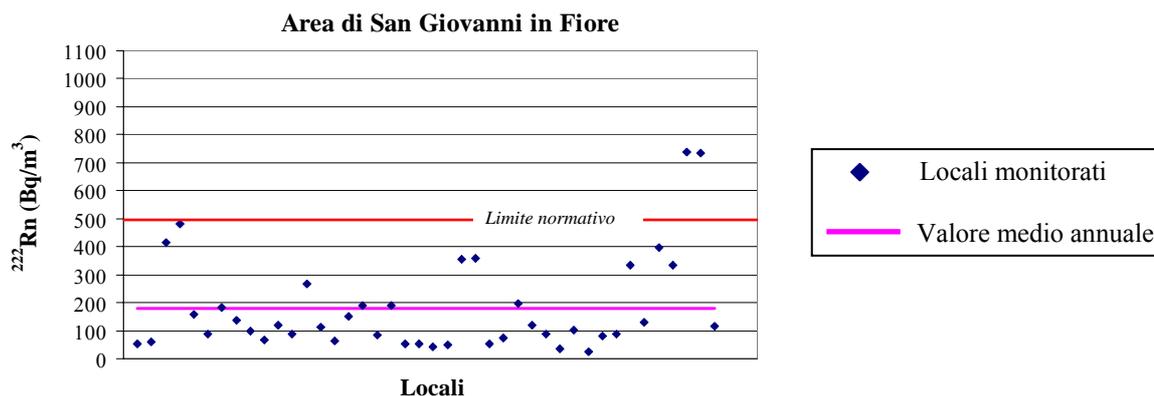
In conclusione si ha che i risultati medi riscontrati nelle diverse aree monitorate, risultano prevalentemente in linea con quanto previsto nella carta dell'attitudine al Radon (Figura 4.1) riportata nel Capitolo IV (par. 4.1): le zone inserite in un contesto geologico granitico-metamorfico, presentano concentrazioni maggiori rispetto alle aree che rientrano in bacini sedimentari o comunque sono relativi a depositi di natura sedimentaria. L'unica eccezione si presenta per Rogliano, in cui i valori riscontrati sono nettamente inferiori a quelli attesi. Ciò è legato principalmente al fatto che pur affiorando rocce metamorfiche queste presentano un grado di alterazione elevato, in prossimità dell'edificio considerato.

In Figura 6.2 sono stati analizzati gli andamenti delle concentrazioni dei singoli locali di ogni edificio rapportati alla concentrazione media relativa all'area di studio allo scopo di evidenziare casi particolari in cui si hanno evidenti scostamenti dalla media. Ciò significa che,

a parità di contesto geologico, sono altri i fattori che entrano in gioco nell'accumulo del gas Radon, come è analizzato nei paragrafi successivi.

In Dettaglio sono mostrati in Figura 6.2 i valori ottenuti rispettivamente alla media di ogni singola area.





**Figura 6.2** – Andamento delle concentrazioni di gas Radon dei vari locali nelle diverse aree, rispetto al valore medio annuale

Si può osservare come a parità di contesto geologico, nonostante il valore medio delle singole aree sia inferiore al limite normativo [D. Lgs. 241/00] alcuni locali nell'area di Mormanno, di San Giovanni in Fiore e di Castelsilano, si discostano nettamente da tale valore medio annuo, andando nettamente a superare i 500 Bq/m<sup>3</sup>.

Per tale motivo, questi casi particolari sono stati sottoposti ad una più approfondita analisi al fine di cogliere il contributo di altre variabili sull'accumulo di gas Radon.

## 6.2 ANALISI STAGIONALE

Effettuando un'analisi sulla tendenza dell'accumulo di gas Radon nelle stagioni più fredde (autunno-inverno) e in quelle più calde (primavera-estate), si può notare come i risultati ottenuti, illustrati nella Figura 6.3, mostrano tendenzialmente un maggior accumulo nelle stagioni invernali. Più che ad un contributo particolare delle variabili stagionali, ciò è legato ad un conseguente cambiamento delle abitudini e dell'utilizzo dei locali in funzione del periodo stagionale.

Inoltre, va considerato che, secondo le condizioni di pressione relativa presenti in un edificio, la concentrazione di Radon può subire sensibili variazioni sia giornaliere che stagionali. In genere i valori di Radon più elevati si osservano nelle prime ore del mattino, quando la differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno è maggiore. Per lo stesso motivo (a parte la diversa ventilazione) d'inverno le concentrazioni sono mediamente maggiori di quelle estive.

Per quanto riguarda l'area di Castrovillari, di Lungro e di Mormanno si rileva un comportamento non lineare. Infatti in alcuni locali si registrano accumuli maggiori nel periodo più caldo. Evidentemente tale accumulo è influenzato dall'impianto di climatizzazione, dalla tipologia dei singoli locali, dalla permanenza del personale all'interno delle unità lavorative, che implica un più frequente ricambio d'aria. Inoltre si può ipotizzare,

soprattutto per il presidio ospedaliero di Mormanno un non costante utilizzo dei locali, il che determina, in alcuni microambienti un accumulo di gas Radon maggiore nelle stagioni calde.

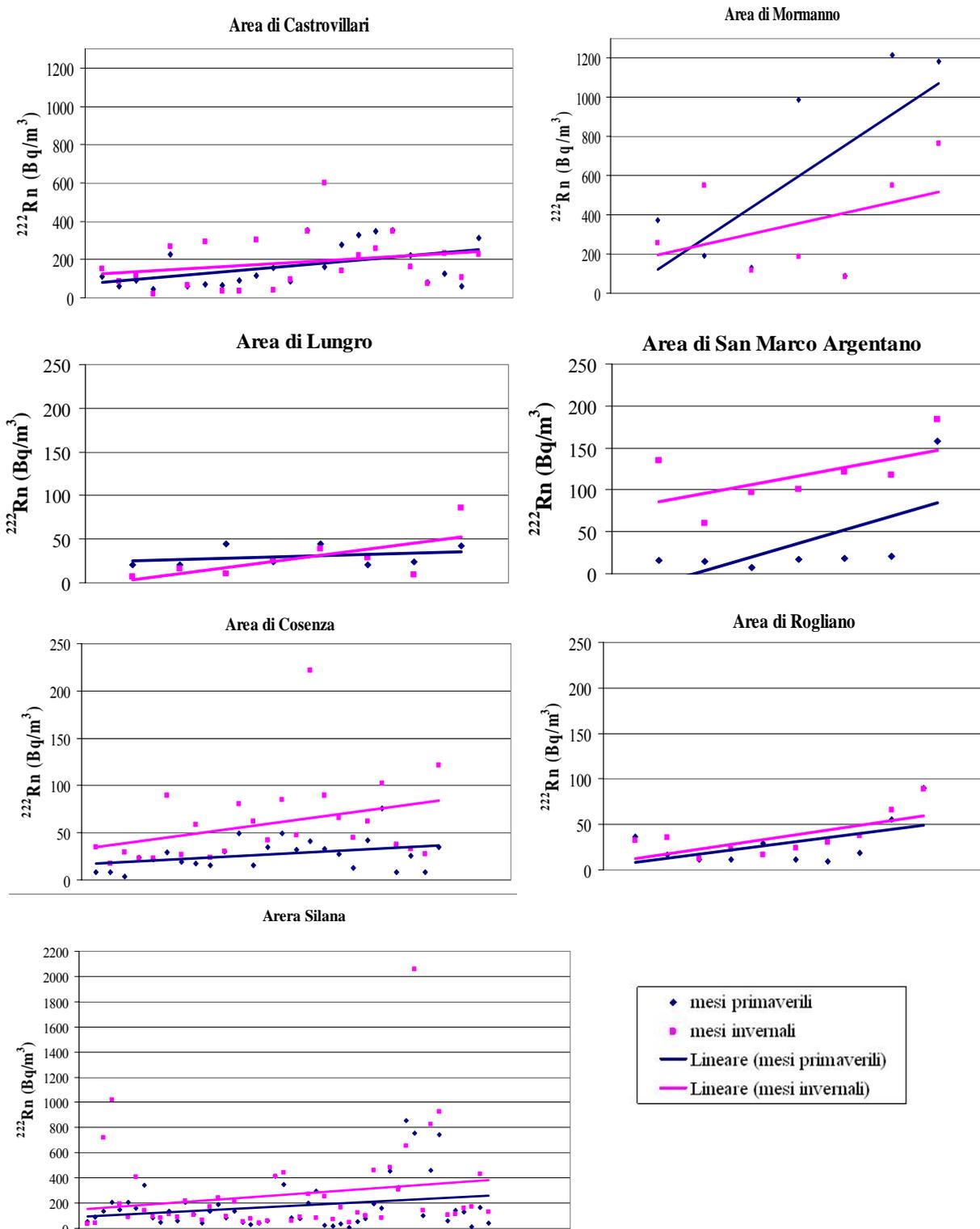


Figura 6.3 – Tendenza stagionale nelle aree monitorate

Per quanto riguarda l'area di Castrovillari, bisogna considerare che sono stati monitorati tre edifici scolastici, che in quanto tali restano chiusi nel periodo estivo. Quindi i locali non sono soggetti a nessun tipo di areazione, da qui il possibile maggior accumulo nei mesi estivi.

Per quanto riguarda l'area Silana l'andamento ha una tendenza maggiore nei mesi invernali, ma si sono volute evidenziare le variazioni di concentrazione nei diversi stati terreno/roccia. In particolare è stato preso in considerazione un periodo freddo caratterizzato da intense nevicate e il periodo successivo, in cui il suolo era privo di neve. Il gelo ostacola la fuoriuscita del Radon dal terreno, favorendone la fuga laddove il terreno non è gelato (nei locali interrati).

Le copiose precipitazioni nevose hanno provocato un accumulo di Radon negli ambienti confinati. I valori maggiori nel periodo invernale sono stati riscontrati nella scuola SGF1C, in cui i locali monitorati sono anche scarsamente frequentati e privi di impianto di condizionamento.

A tal fine, si potrebbe considerare, come unico fattore variabile, quello meteorologico e lo stato terreno/roccia. Come già accennato, il manto nevoso ostacola la fuoriuscita del gas Radon verso l'esterno ed è per questo motivo che trova come via preferenziale l'ingresso negli ambienti confinati.

Anche le condizioni ambientali esterne possono influire: in inverno, gli edifici presentano una temperatura interna superiore a quella esterna. L'aria tende quindi a penetrare all'interno dell'edificio, ostacolando così la dispersione nell'ambiente del Radon. Le considerazioni appena fatte sono confermate anche dai valori della scuola SGF1Q-32s, nel cui locale considerato si è appurata una bassa frequentazione, ma con la presenza di un impianto di condizionamento.

### **6.3 ANALISI DI CORRELAZIONE CON LE TIPOLOGIE ED USO DEI LOCALI**

Si è andati ad analizzare come l'accumulo di gas Radon possa variare da locale a locale, in uno stesso edificio in funzione delle tipologie strutturali di ogni singolo locale e delle abitudini d'uso.

#### **6.3.1 AREA DI CASTROVILLARI**

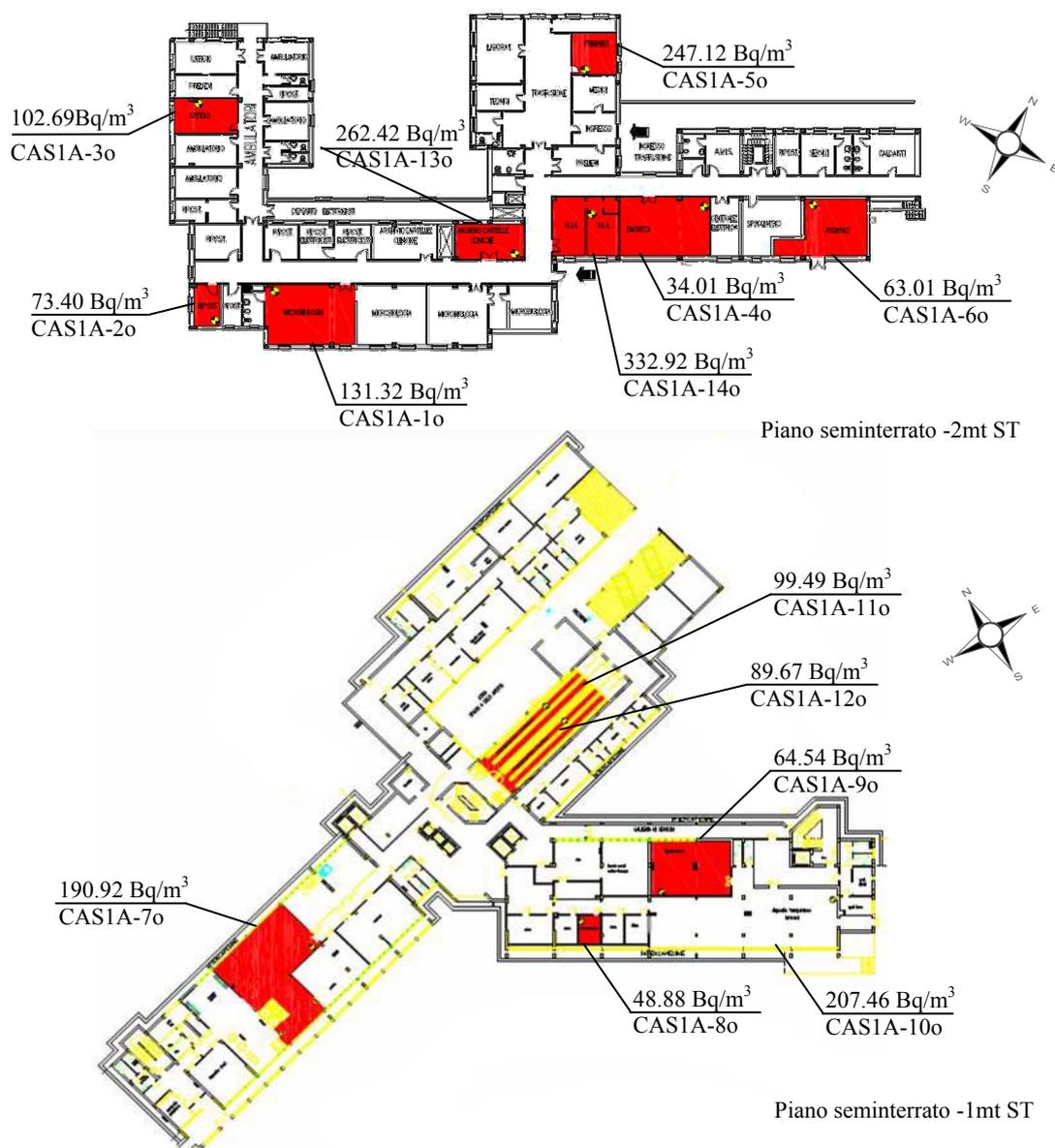
Correlando le variazioni di concentrazione di attività del Radon misurate nel corso delle prime due campagne di monitoraggio con le caratteristiche proprie di ciascun locale osservato e riassunte nella tabella C-1<sup>I</sup>, C-1<sup>II</sup> e C-2, riportata in appendice C, si rileva che i locali soggetti a maggiore frequentazione subiscono, nel secondo ciclo di monitoraggio semestrale, un decremento sostanziale rispetto a quelli meno frequentati e, se si osserva che tale periodo comprende anche quello estivo, si può avanzare l'ipotesi giustificativa che la maggiore

aerazione riduce la concentrazione del Radon all'interno dei locali, il che legittima il decremento registrato.

Si può notare come in uno stesso edificio (Figura 6.4), le concentrazioni di gas Radon possano variare da locale a locale, ad esempio si ha come nel primo ciclo trimestrale si passa da una concentrazione minima di  $\sim 73.92 \text{ Bq/m}^3$  (locale CAS1A-6o), ad un massimo di  $\sim 583.77 \text{ Bq/m}^3$  (locale CAS1A-5o), e nel ciclo annuale per gli stessi si passa da un valore minimo pari a  $\sim 63.01 \text{ Bq/m}^3$  ad un massimo di  $\sim 247.12 \text{ Bq/m}^3$ .

Va inoltre sottolineato che il locale CAS1A-5o, è sempre frequentato, anche se risulta essere poco areato, in opposizione al locale CAS1A-6o, che è frequentato solo per 1 ora al giorno (vedi Appendice C-1<sup>b</sup>). Inoltre quest'ultimo è caratterizzato dalla presenza di un accesso diretto verso l'esterno che, quando è praticato, viene mantenuto aperto, e inoltre sono presenti delle aperture in una parete dove vengono a giorno delle tubazioni.

Tali parametri influiscono notevolmente alla variazione di accumulo di Radon. In



**Figura 6.4** – Concentrazioni annue nei vari locali dell'azienda ospedaliera di Castrovillari (edificio CAS1). I locali analizzati sono stati evidenziati in rosso

questo caso la differente tipologia di pavimentazione diventa influente, visto che per il locale CAS1A-5o la pavimentazione è costituita da materiale di tipo polimerico sintetico su massetto, mentre l'altro locale è pavimentato con piastrelle ceramiche.

Facendo un confronto parallelo con una stanza vicino al locale CAS1A-5o (locale CAS1A-13o) questo presenta una concentrazione annuale pari a  $\sim 262.42 \text{ Bq/m}^3$  dovuta al maggior accumulo di gas, in quanto è poco frequentato e non presenta ulteriori aperture verso l'esterno, nessuna parete confina con l'esterno. Il contributo da parte della pavimentazione è nullo in quanto è presente del segato.

Inoltre, come si può osservare in Figura 6.5, il locale CAS1A-5o, relativo alla stanza di

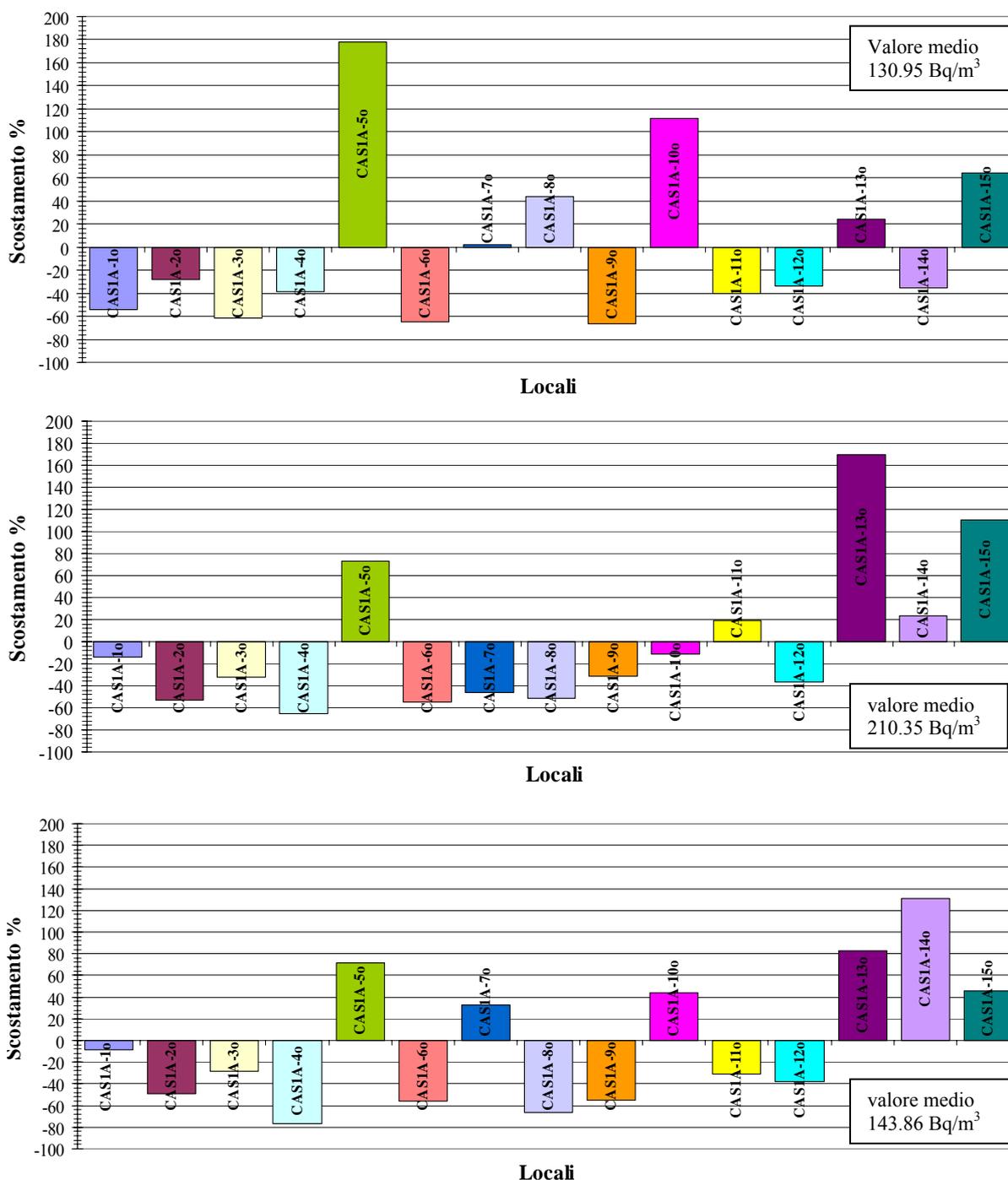


Figura 6.5 – Scostamento percentuale dal valore medio nei tre cicli di monitoraggio trimestrale, semestrale ed annuale nel presidio ospedaliero di Castrovillari

un primario, mostra uno scostamento percentuale netto positivo rispetto all'andamento generale dell'intero edificio, nonostante questo sia molto frequentato. Va tenuto presente, oltre alle osservazioni già fatte, che in tale ambiente è presente un lavandino, che può essere fonte di emanazione di gas Radon. Inoltre l'unica parete esterna presenta un'intercapedine dalla quale passano tutte le tubazioni, da qui un'ulteriore fonte di emissione.

Tale locale vista la sua peculiarità rispetto agli altri locali della stessa azienda è stato considerato come caso di studio particolare a sé, sottoponendolo ad ulteriori monitoraggi, attraverso l'utilizzo del contatore di particelle  $\alpha$  (alphaguard). Come periodo di misura si sono scelti 5 giorni del mese di maggio, precisamente l'acquisizione dei dati è iniziata il 25/05/06 alle 13:30 e si è conclusa il 30/05/06 alle 12:20. Si è riscontrato un valore medio di  $^{222}\text{Rn}$  pari a  $186.60 \pm 4.47 \text{ Bq/m}^3$  con pressione e temperatura rispettivamente pari a 964.26 mbar e 20.56 °C (Figura 6.6).

La quantità di Radon che entra in un edificio è considerata costante al variare del tempo: ma come si osserva in questo caso varia durante la giornata e dipende dalle condizioni meteorologiche.

Infatti, come si può osservare dall'andamento ottenuto in Figura 6.6 si registrano picchi più alti fino ai  $900 \text{ Bq/m}^3$  (intervallo 18:40 / 18:50 del 27 maggio). In particolare si ha che nell'intervallo di misura tra le 12:00 del 27 maggio e le 10:00 del 28 maggio si registra un incremento della concentrazione, proporzionale sia all'umidità e sia alle piogge.

Ciò è correlabile in quanto la pioggia può contribuire ad un effetto barriera (capping effect) saturando i pori degli strati più superficiali.

Inoltre osservando l'andamento della pressione si può notare che si ha una depressurizzazione all'interno del locale in esame, proprio in corrispondenza dell'incremento di concentrazione.

Va sottolineato che è stato difficile giustificare ulteriormente tali picchi d'intensità, in quanto saranno legati a cause intrinseche, e a condizioni al momento non visibili, collegate anche alla struttura del locale.

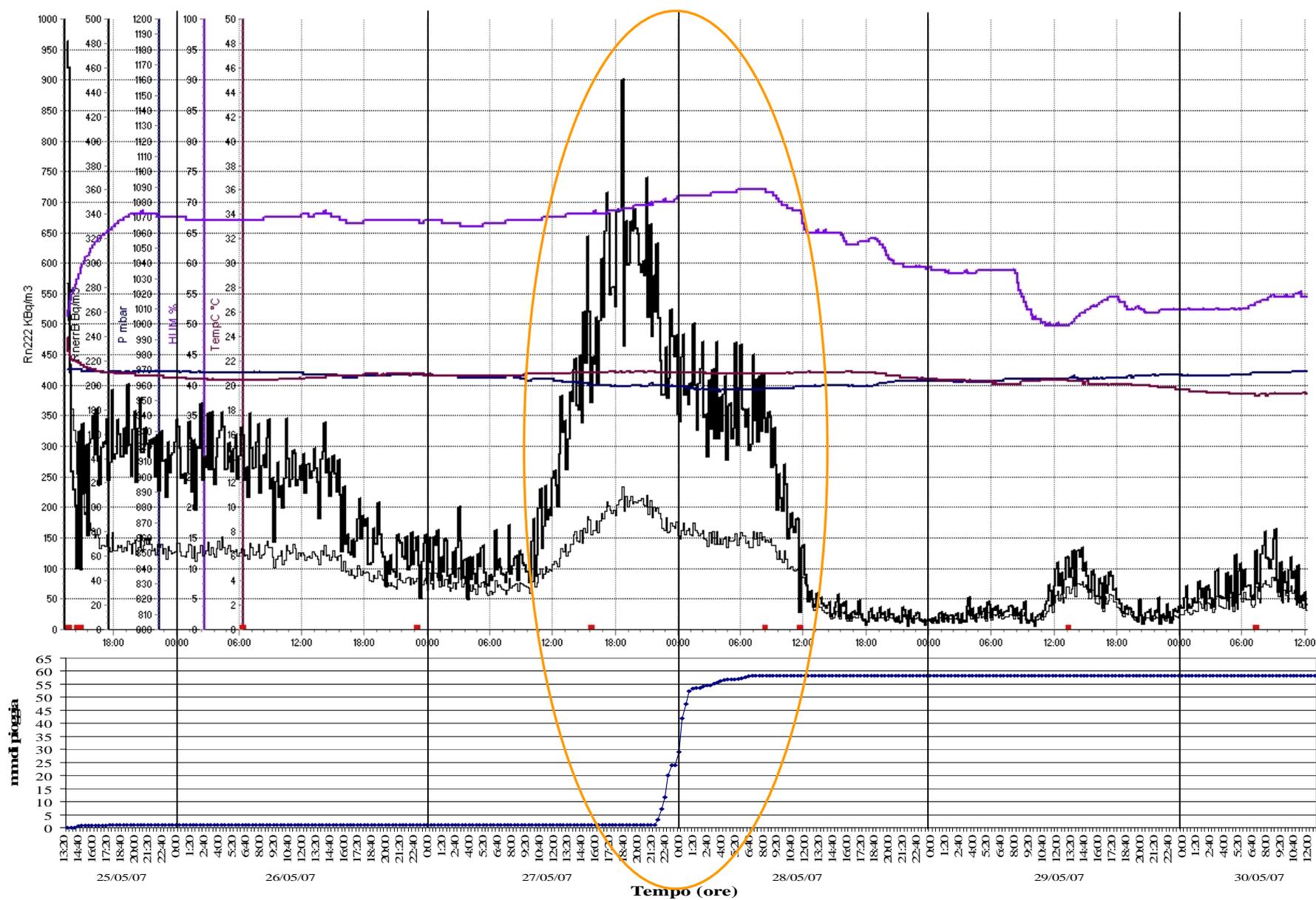


Figura 6.6 – Andamento della concentrazione in 5 giorni di campionamento con tecniche attive

Una situazione opposta si rileva nel locale CAS1A-15, che corrisponde ad un archivio di una sede staccata dall'intera struttura dell'ospedale (non riportata in planimetria), in cui la concentrazione di Radon risulta essere maggiore nei mesi più caldi. Tale locale risulta essere poco frequentato e la scelta di monitoraggio è stata effettuata per avere una concentrazione di riferimento.

La scarsa frequenza di un locale, in cui si può avere accumulo di Radon, può essere estremamente pericoloso, in quanto l'utente del locale si trova anche se per breve tempo, in un ambiente ad alta concentrazione di Radon.

Nei locali CAS1A-8o e CAS1A-9o CAS1A-11o si registrano concentrazioni maggiori nelle stagioni più calde rispetto a quelle più fredde (Figura 6.3). Tale situazione risulta contraria, anche se non rilevante. I primi due locali sono adibiti all'area di farmacia: il primo è un ufficio, dove è sempre attivo l'impianto di climatizzazione di solo riscaldamento, ed è sempre frequentato; il secondo è un deposito di farmaci, senza alcun tipo di climatizzazione, con un'aerazione variabile, visto che è comunicante con il locale CAS1A-10o, in cui è presente un accumulo maggiore nelle stagioni più fredde.

Tale locale (Figura 6.5) presenta un comportamento anomalo nel primo ciclo trimestrale, in quanto presenta un netto scostamento pur avendo una rilevante volumetria.

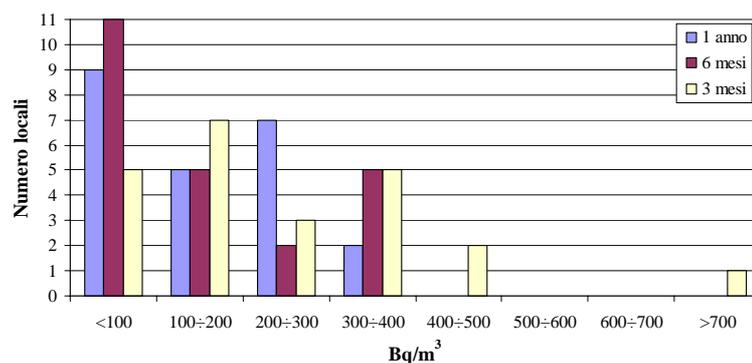
Per il locale CAS1A-11o si verifica una situazione diversa, in quanto trattasi di uno spogliatoio con un'apertura diretta verso l'esterno e, vista la varia frequentazione, l'aerazione non è costante.

Confrontando gli scostamenti di concentrazione di ogni locale dai singoli valori medi relativi ai tre tempi di campionamento di 3 mesi, 6 mesi ed un anno, si può osservare come il monitoraggio presenta concentrazioni diverse in assoluto. Considerando le concentrazioni relative a breve termine, queste tendono a concentrazioni maggiori e questo è vero in quanto nelle misure annuali si vanno ad annullare i fattori meteorologici e occasionali. Lo scostamento dal valore medio per i singoli locali, resta più o meno costante nei monitoraggi trimestrali, semestrali ed annuali. Ciò implica che nei locali con maggiore anomalia, andando a fare un'analisi più dettagliata contribuiscono in maniera rilevante, all'accumulo di gas Radon, la tipologie strutturali del singolo microambiente, la sua esposizione, la frequenza, l'aerazione. Fattori questi che come abbiamo visto precedentemente entrano in gioco nei meccanismi dell'accumulo indoor di Radon.

Inoltre nel territorio di Castrovillari sono state monitorate 3 scuole (Figura 5.2). Si è registrato che l'istituto (CAS1B) presenta concentrazioni maggiori rispetto sia ai valori delle altre due scuole, sia in confronto al presidio ospedaliero. Ciò come già analizzato precedentemente è legato più al contesto geologico, che non alla tipologia dei locali.

In Figura 6.7, è riportata la distribuzione della concentrazione di Radon in tutti i locali monitorati nell'area di Castrovillari. Si ha che nel primo periodo di osservazione il maggior numero di locali, che rappresenta il 30.43% del totale, ricade nell'intervallo 100÷200 Bq/m<sup>3</sup> (il 43.48% si ripartisce equamente tra i due intervalli <100 e 300÷400 Bq/m<sup>3</sup>, il 13.04% ricade

nell'intervallo 200÷300 Bq/m<sup>3</sup>, l'8.70% ricade nell'intervallo 400÷500 Bq/m<sup>3</sup>, e solo il 4.35% supera i 700 Bq/m<sup>3</sup>); nel secondo ciclo di misure il 47.83.% dei locali ricade nell'intervallo tra <100 Bq/m<sup>3</sup> (il 43.48% ha concentrazioni comprese equamente tra i range 100÷200 e 300÷400 Bq/m<sup>3</sup>, e l' 8.70 % tra 200÷300 Bq/m<sup>3</sup>); ed infine nel terzo ciclo di misure annuale si ha che il 39.13% di locali ricade in un intervallo di concentrazione inferiore a 100 Bq/m<sup>3</sup> (il 21.74% tra 100÷200 Bq/m<sup>3</sup>, il 30.43 tra 200÷300 Bq/m<sup>3</sup> e solo il 8.70% rientra nell'intervallo 300÷400 Bq/m<sup>3</sup>).



**Figura 6.7** – Distribuzione dei valori di concentrazione di Radon nell'area di Castrovillari

Pertanto, si può concludere che l'ospedale di Castrovillari risulta essere caratterizzato da una media di attività di Radon annuale pari a 143.86 Bq/m<sup>3</sup> inferiore al limite normativo di 500 Bq/m<sup>3</sup> [D. Lgs. 241/00]. Va rimarcato il fatto che, nonostante i valori annuali nel presidio ospedaliero in esame rientrino nei limiti normativi, sono presenti dei picchi di maggiore intensità, che non possono essere trascurati, vista soprattutto la rilevante frequenza del locale CAS1A-5o in esame.

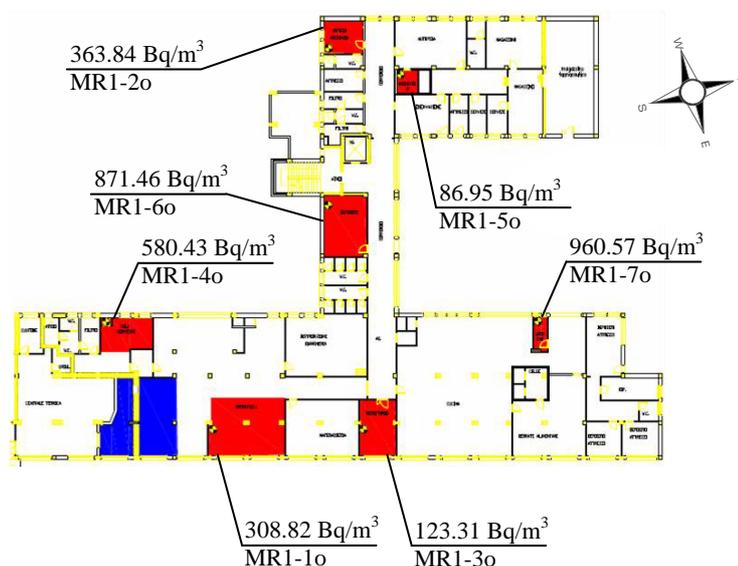
### 6.3.2 AREA DI MORMANNO CALABRO

I locali oggetto d'indagine nel presidio ospedaliero di Mormanno presentano, come riportato in Tabella C-3 in Appendice C, caratteristiche costruttive analoghe. Infatti si tratta di locali tutti al piano terra, quasi tutti con una parete a due metri sotto il piano campagna, provvisti tutti di impianto di riscaldamento attivo, accesso diretto verso l'esterno, ulteriori aperture verso l'esterno (le finestre dove presenti restano sempre chiuse), pavimento a diretto contatto col terreno, ma presentano una diversa frequentazione: i locali MR1-1o, MR1-2o, MR1-3o, MR1-5o, sono frequentati mediamente 5.5 ore/giorno; i locali MR1-4o, MR1-6o, MR1-7o sono frequentati con minore costanza (Figura 6.8). Come risulta evidente nelle Tabelle 5.8, 5.9 e 5.10 (Capitolo V) tali locali presentano valori di concentrazione più elevati

in tutti e tre i cicli di monitoraggio. Ciò è dovuto al maggior accumulo visto la poca frequentazione, e quindi lo scarso ricambio d'aria.

In questo caso si può notare in modo più marcato, come a parità di geologia, tipologia di costruzione e caratteristiche proprie di ogni locale, siano presenti condizioni di accumulo di Radon differenti, passando da un minimo annuale di  $\sim 86.95 \text{ Bq/m}^3$  per il locale MR1-5o ad una concentrazione massima pari a ben  $\sim 960.57 \text{ Bq/m}^3$  per il locale MR1-7o. Va sottolineato però che tale locale comunica con la restante parte dell'archivio, che presenta delle fessure che permettono un passaggio d'aria interno/esterno. Da qui molto probabilmente la giustificazione di una concentrazione più bassa.

Un dato che ha particolarmente attirato la nostra attenzione è quello relativo al locale MR1-7o, questo è uno stanzino utilizzato come spogliatoio per il personale della cucina. Esso



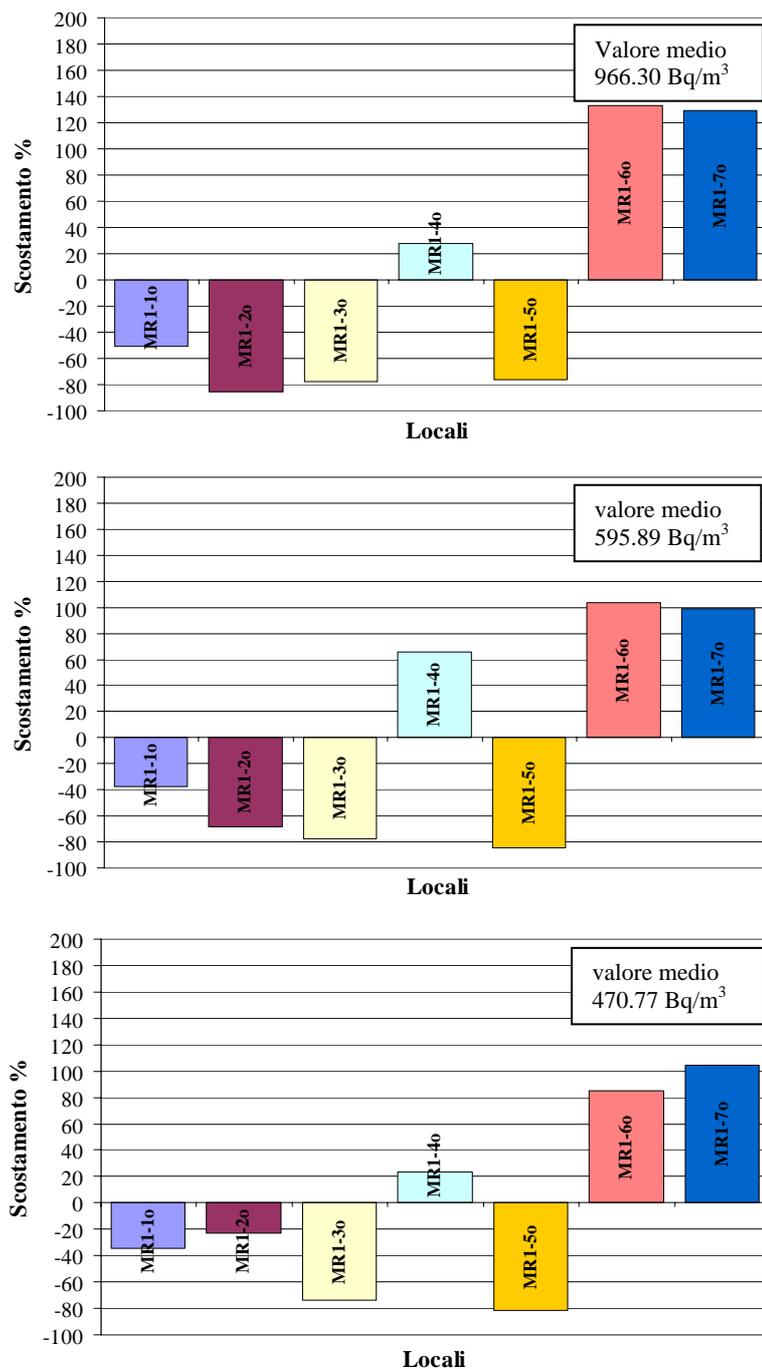
**Figura 6.8** - Concentrazioni annue nei vari locali dell'azienda ospedaliera di Mormanno (edificio MR1). I locali analizzati sono stati evidenziati in rosso

dà nella stessa, che presenta un accesso diretto verso l'esterno utilizzato per il carico viveri (vedi planimetria in Allegato B-5). Tale concentrazione "alta" riscontrata potrebbe essere dovuta, sia ad un'esposizione propria del locale rispetto ai venti e sia ad una possibile concentrazione maggiore di minerali Torio-uraniferi, in particolare negli scisti sottostanti tale locale e nelle dolomie attigue.

In particolare analizzando la Figura 6.9 si può osservare come i locali MR1-6o e MR1-7o si discostano nettamente dalla concentrazione media dell'edificio. Il locale MR1-7o è uno spogliatoio con annesso il bagno, utilizzato dal solo personale della cucina. Evidentemente, oltre al un contesto geologico, le tubazioni in genere possono fungere da possibile trasportatori di gas Radon, attraverso l'acqua, nonostante nel campione d'acqua prelevato all'interno dell'ospedale i valori risultino bassi (vedi Tabella 5.22).

Inoltre si può considerare che, anche se durante il giorno l'accumulo è inferiore per l'utilizzo, di tale locale durante la notte (vista l'attitudine di tale zona), quando la cucina è chiusa, si potrebbe prevedere un accumulo maggiore che fa quindi spiccare i valori di concentrazione in lunghi periodi di misura.

Tale caso particolare vuole sottolineare che sono tante le variabili che entrano in gioco, quando si parla di concentrazione di attività del Radon, e visto che può variare anche da locale



**Figura 6.9** – Scostamento percentuale dal valore medio nei tre cicli di monitoraggio trimestrale, semestrale ed annuale del presidio ospedaliero di Mormanno

a locale in uno stesso edificio, è necessario effettuare un monitoraggio tale da coinvolgere tutti gli edifici, e tutti i locali di ogni singolo edificio e anche le singole abitazioni, come quanto suggerito dalle Raccomandazioni della Comunità Europea [Raccomandazione CEC 90/143].

Senza voler creare un allarmismo, in parte non giustificato, trattandosi di tre valori di tale entità e, considerando la natura sperimentale del dato, che ha di per sé un certo margine di errore, si dovrebbero effettuare ulteriori misure parallele, apportando inizialmente solo cambiamenti abitudinari dello stesso locale, intensificando le aperture delle finestre, se ciò non dovesse bastare, stabilire le eventuali modifiche da adottare all'aerazione forzata di tali locali.

Infatti va comunque sottolineato il fatto che la soglia limite normativa è fissata pari a  $500 \text{ Bq/m}^3$  [D.Lgs. 241/00].

Inoltre, si precisa che non è stato possibile trovare una qualche correlazione fra le caratteristiche costruttive degli ambienti monitorati e la concentrazione di Radon misurata, avendo tutti i locali pareti sotterranee totalmente affacciate a cavedio aerato e pavimento a diretto contatto con il terreno (Tabella C-3 in Appendice C).

A conclusione dell'indagine effettuata nella presente campagna di misurazioni di gas Radon presso l'ospedale di Mormanno, si propone la lettura del grafico riportato in Figura 6.10, dal quale si evince che nel primo ciclo trimestrale la maggior parte degli ambienti analizzati, pari al 42.86% del totale, presenta una concentrazione di attività del Radon  $>700 \text{ Bq/m}^3$  (il 28.58% dei locali si ripartisce equamente negli intervalli di concentrazione di  $100\div 200$  e  $400\div 500 \text{ Bq/m}^3$  e il restante 28.57% tra  $200\div 300 \text{ Bq/m}^3$ ); ancora, nel ciclo a sei mesi si osserva una distribuzione percentuale pari sempre al 42.86% dei locali osservati nel range  $>700 \text{ Bq/m}^3$  (il 28.58% dei locali si ripartisce equamente negli intervalli di concentrazione di  $<100$  e  $300\div 400 \text{ Bq/m}^3$  e il restante 28.57% tra  $100\div 200 \text{ Bq/m}^3$ ); nell'ultimo ciclo annuale si ha che il 57.14% dei locati investigati presenta una concentrazione di Radon, che rientra negli intervalli di  $300\div 400$  e  $>700 \text{ Bq/m}^3$ , mentre 42.87% dei locali monitorati si ripartisce equamente tra gli intervalli di RAC pari a  $<100$ ,

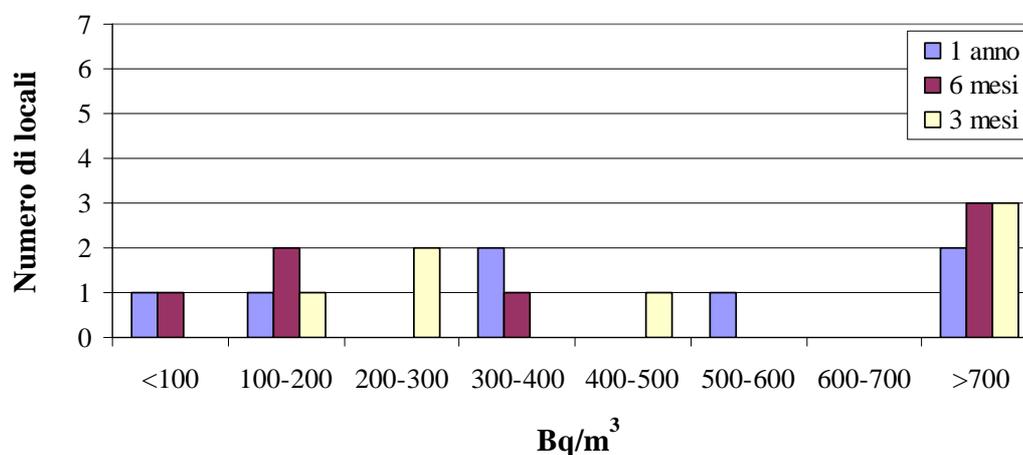


Figura 6.10– Distribuzione dei valori di concentrazione di Radon nell'ospedale di Mormanno

100÷200 e 500÷600 Bq/m<sup>3</sup>.

Pertanto, si può concludere che l'ospedale di Mormanno risulta essere caratterizzato da una media di attività di Radon pari a 470.77 Bq/m<sup>3</sup> inferiore al limite normativo di 500 Bq/m<sup>3</sup>, ma maggiore rispetto alla soglia d'attenzione di 400 Bq/m<sup>3</sup> [D. Lgs. 241/00]. All'interno dell'edificio considerato sono però presenti locali in cui tale limite viene superato. Tali valori non possono passare inosservati, visto la loro entità anche negli altri due cicli di monitoraggio. In tali casi sarebbe opportuno apportare, inizialmente, delle variazioni di ventilazione e ricambio d'aria, tenendo sempre sotto controllo il fenomeno di accumulo del Radon, ed eventualmente apportare delle opere di bonifica quali la pressurizzazione dei locali.

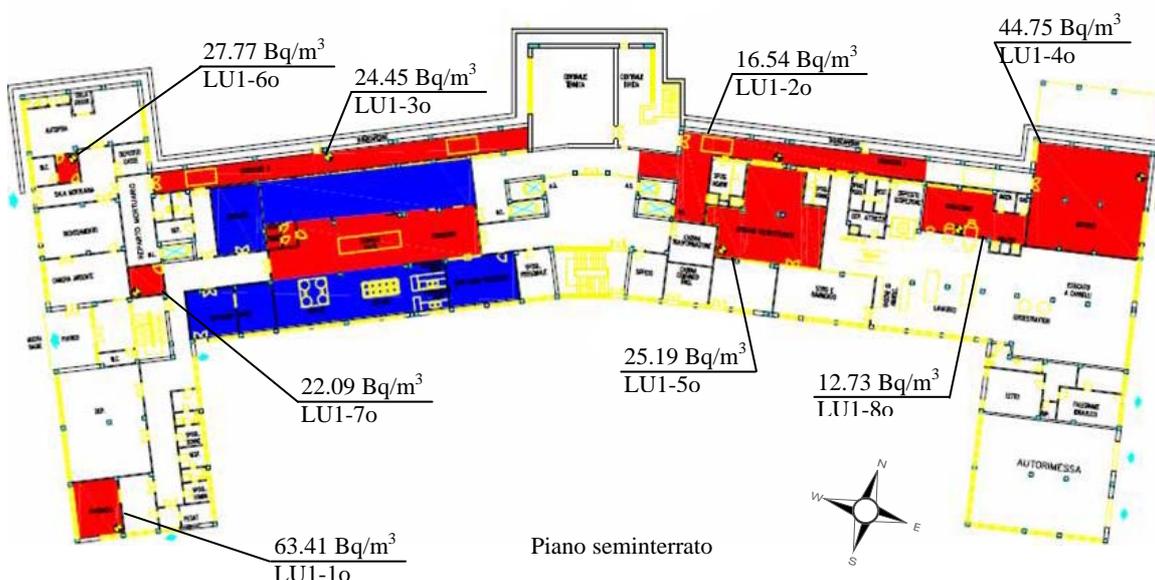
Fattore importante è il monitoraggio più fitto in tale area includendo anche, le abitazioni private, sempre per la tutela della salute pubblica.

### 6.3.2 AREA DI LUNGRO

In questa sede si è scelto di effettuare un monitoraggio mirato anche ad ambienti ad uso non lavorativo, ma di passaggio, poiché la struttura presenta ampi corridoi, che occupano gran parte del seminterrato non particolarmente aerati.

In tali ambienti che presentano analoghe caratteristiche costruttive e di frequentazione, (vedi tabella C-4 riportata in appendice C) il valore di concentrazione di Radon misurato è dello stesso ordine di grandezza e decresce nel secondo ciclo di misurazione di una percentuale che si attesta rispetto al primo intorno al 54%.

Confrontando il locale a maggior concentrazione LU1-1o ("farmacia"), con quello a minor concentrazione LU1-8o ("deposito"), abbiamo che il primo non ha un accesso diretto verso l'esterno, ma comunica solo con un altro locale, favorendo in tal modo la



**Figura 6.11** - Concentrazioni annue nei vari locali dell'azienda ospedaliera di Lungro (edificio LU1). I locali analizzati sono stati evidenziati in rosso

concentrazione di Radon. Invece, il secondo, a bassa RAC, è caratterizzato dalla presenza di una porta e una finestra (Tabella C-2 in appendice C), che non permettono un'adeguata chiusura dello stesso, e vi è un conseguenziale maggiore ricambio d'aria.

Inoltre dalla Figura 6.12 si evidenzia come il locale LU1-10 si discosta in modo

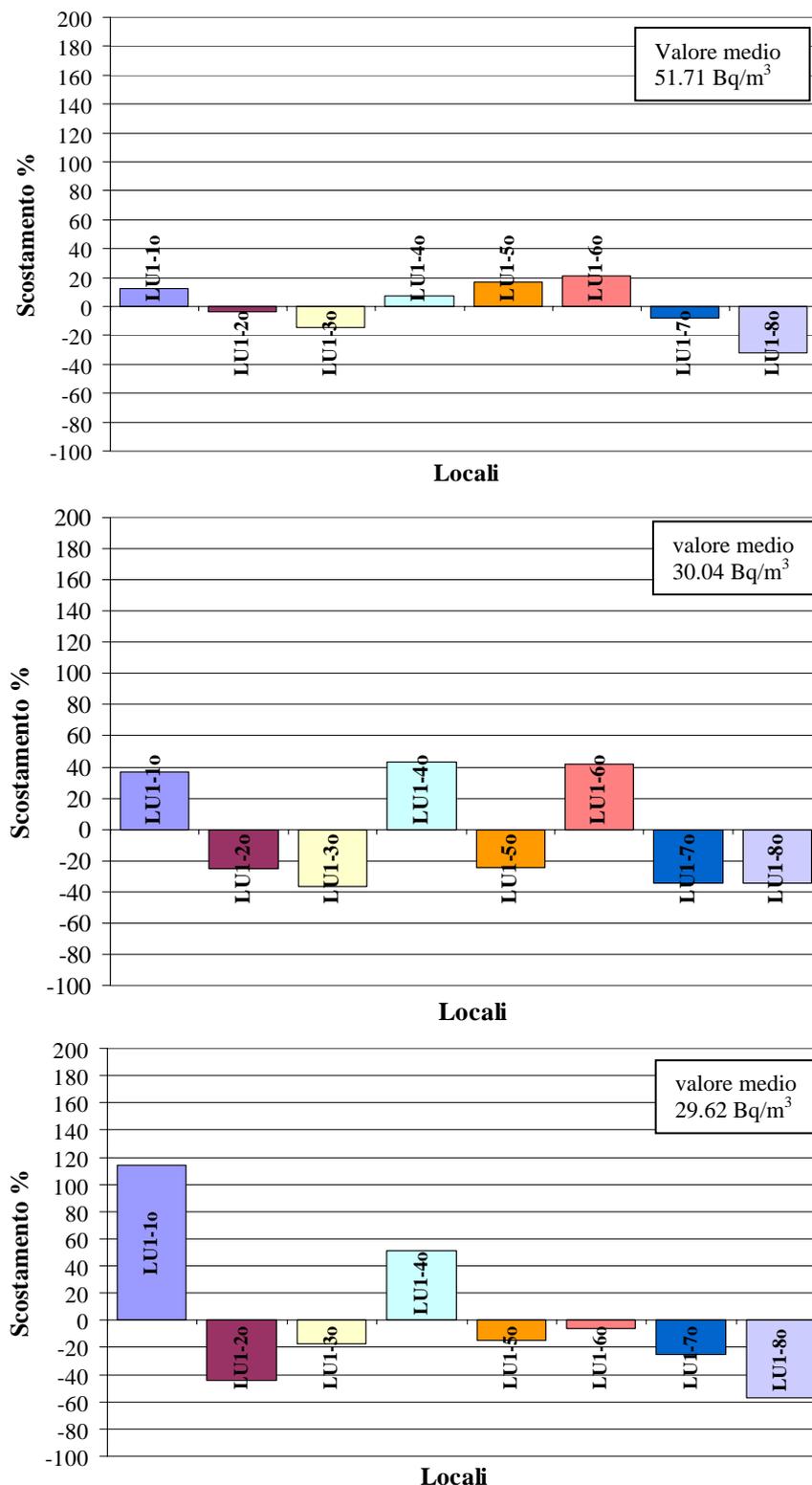


Figura 6.12 – Scostamento percentuale dal valore medio nei tre cicli di monitoraggio trimestrale, semestrale ed annuale nel presidio ospedaliero di Lungro

rilevante rispetto all'andamento generale, soprattutto nel ciclo di misura annuale. Evidentemente si hanno degli accumuli maggiori anche dovuti all'esposizione di tale locale.

Ambienti confinati quali LU1-1o, LU1-3o, LU1-5o, frequentati dal personale con regolarità per tutto l'arco dell'anno solare, confermano un trend di maggiore accumulo di Radon durante le stagioni più fredde, dovuto alla minore apertura delle finestre. Al contrario troviamo ambienti quali LU1-2o, LU1-6o, LU1-8o non frequentati con regolarità. I parametri influenti sono le caratteristiche proprie di ciascun locale. I locali LU1-4o e LU1-7o, non presentano apprezzabili differenze, probabilmente per la concomitanza di queste due cause.

Va comunque sottolineato che l'ospedale oggetto di monitoraggio ricade in un contesto geologico (vedi Capitolo V), caratterizzato principalmente da conglomerati sabbiosi poligenici, quindi rientra in un'area a basso potenziale di concentrazione di gas Radon (carta dell'attitudine al Radon Figura 4.1).

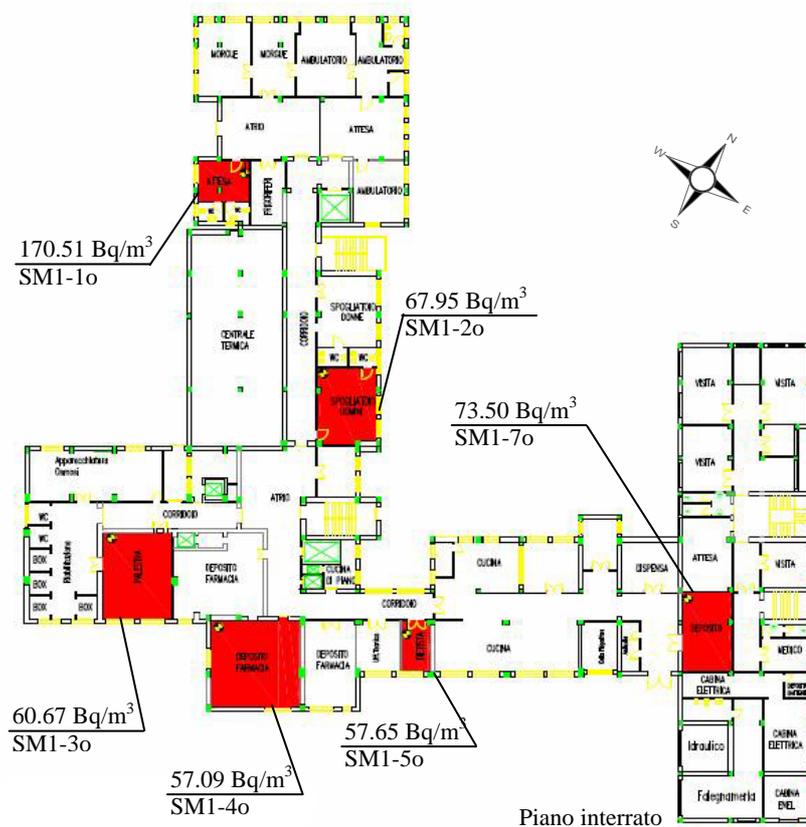
Pertanto, si può concludere che l'ospedale di Lungro risulta essere caratterizzato da una media di attività di Radon pari a  $29.62 \text{ Bq/m}^3$  nettamente inferiore al limite normativo di  $500 \text{ Bq/m}^3$  [D. Lgs. 241/00].

Nonostante per tale presidio ospedaliero le concentrazioni siano basse, dall'osservazione della Carta Geologica in Appendice A-4, si può notare come sia diverso il contesto geologico all'interno del paese, dove ricadono un maggior numero di edifici. Ciò non rende ovvio una bassa concentrazione anche in tali zone, che dovrebbero quindi, essere sottoposte ad un'indagine radiometrica adeguata.

#### **6.3.4 AREA DI SAN MARCO ARGENTANO**

In particolare anche in questo edificio si può notare come a parità di geologia si misurino valori di concentrazione diversi: la concentrazione annuale minima si registra nel locale SM1-6o pari a  $\sim 36.48 \text{ Bq/m}^3$  in opposizione al locale SM1-1o pari a  $\sim 170.51 \text{ Bq/m}^3$ .

Infatti nel locale SM1-1o è presente una scarsa aerazione, principalmente dovuta ad una scarsa frequentazione della stessa. Ciò porta ad un fenomeno di accumulo maggior di Radon indoor. In opposizione il locale SM1-6o presenta un accesso diretto verso l'esterno, favorendo a tal fine una migliore ventilazione.

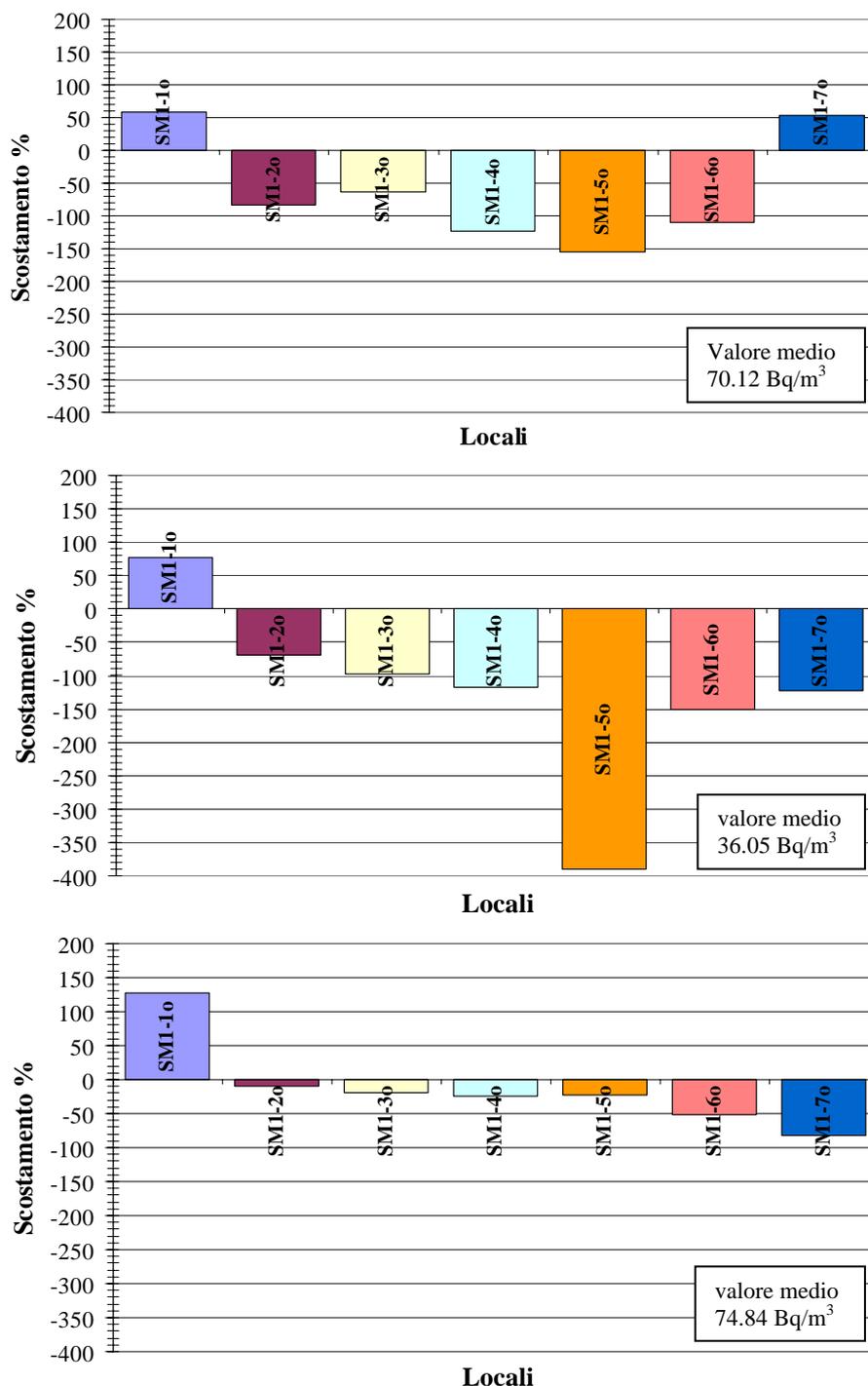


**Figura 6.13-** Concentrazioni annue nei vari locali dell'azienda ospedaliera di San Marco argentario (edificio SM1). I locali analizzati sono stati evidenziati in rosso

Infatti nel locale SM1-1o è presente una scarsa aerazione, principalmente dovuta ad una scarsa frequentazione della stessa. Ciò porta ad un fenomeno di accumulo maggiore di Radon indoor. In opposizione il locale SM1-6o presenta un accesso diretto verso l'esterno, favorendo a tal fine una migliore ventilazione.

Ciò emerge anche dalla Figura 6.14 in cui il locale SM1-1o, adibito a bagno nella sala attesa dell'obitorio si discosta dall'andamento medio dell'edificio. Dal punto di vista strutturale, l'elevata concentrazione può essere giustificata sia per la volumetria ridotta che dalla presenza di finestre sempre chiuse.

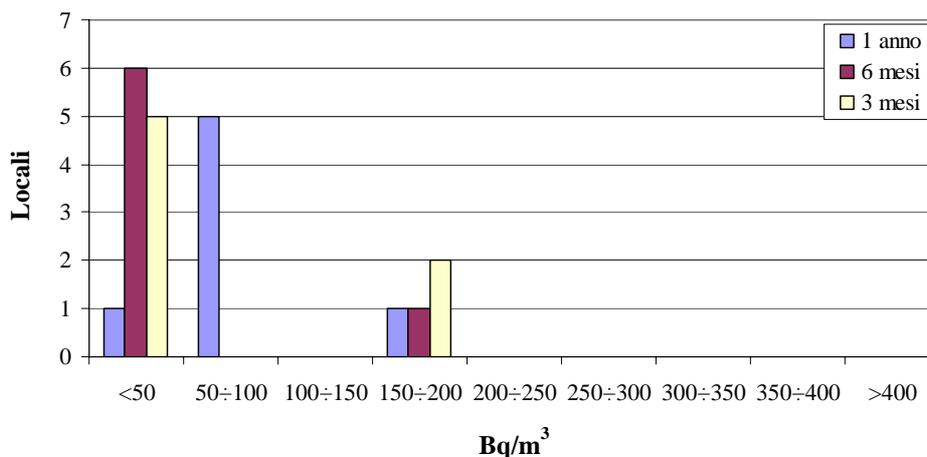
Per quanto riguarda, invece il locale SM1-5o, adibito ad ufficio, presenta uno scostamento percentuale inferiore rispetto alla media dell'intero edificio, legato alla frequentazione. Infatti la porta resta prevalentemente aperta quando è presente il personale.



**Figura 6.14** – Scostamento percentuale dal valore medio nei tre cicli di monitoraggio trimestrale, semestrale ed annuale nel presidio ospedaliero di San Marco Argentano

In Figura 6.15, è riportata la distribuzione della concentrazione di Radon in tutti i locali monitorati nel presidio ospedaliero di San Marco Argentano. Si ha che nel primo periodo di osservazione il maggior numero di locali, che rappresenta il 71.43% del totale, ricade nell'intervallo <math><50 \text{ Bq/m}^3</math> (il 28.57% ricade nell'intervallo di concentrazione di  $150 \div 200 \text{ Bq/m}^3$ ); nel secondo ciclo di misure l'85.71% ricade nell'intervallo <math><50 \text{ Bq/m}^3</math> (il restante 14.29% ha concentrazioni comprese nel range  $150 \div 200$ ); ed infine nel terzo ciclo di misure

annuale si ha che il 71.43% di locali ricade in un intervallo di concentrazione tra 100÷200 Bq/m<sup>3</sup> (il 28.57% si ripartisce equamente negli intervalli tra <100 e 150÷200 Bq/m<sup>3</sup>).



**Figura 6.15**– Distribuzione dei valori di concentrazione di Radon

Pertanto, si può concludere che l'ospedale di San Marco Argentano risulta essere caratterizzato da una media di attività di Radon pari a 74.84 Bq/m<sup>3</sup> nettamente inferiore al limite normativo di 500 Bq/m<sup>3</sup> [D. Lgs. 241/00].

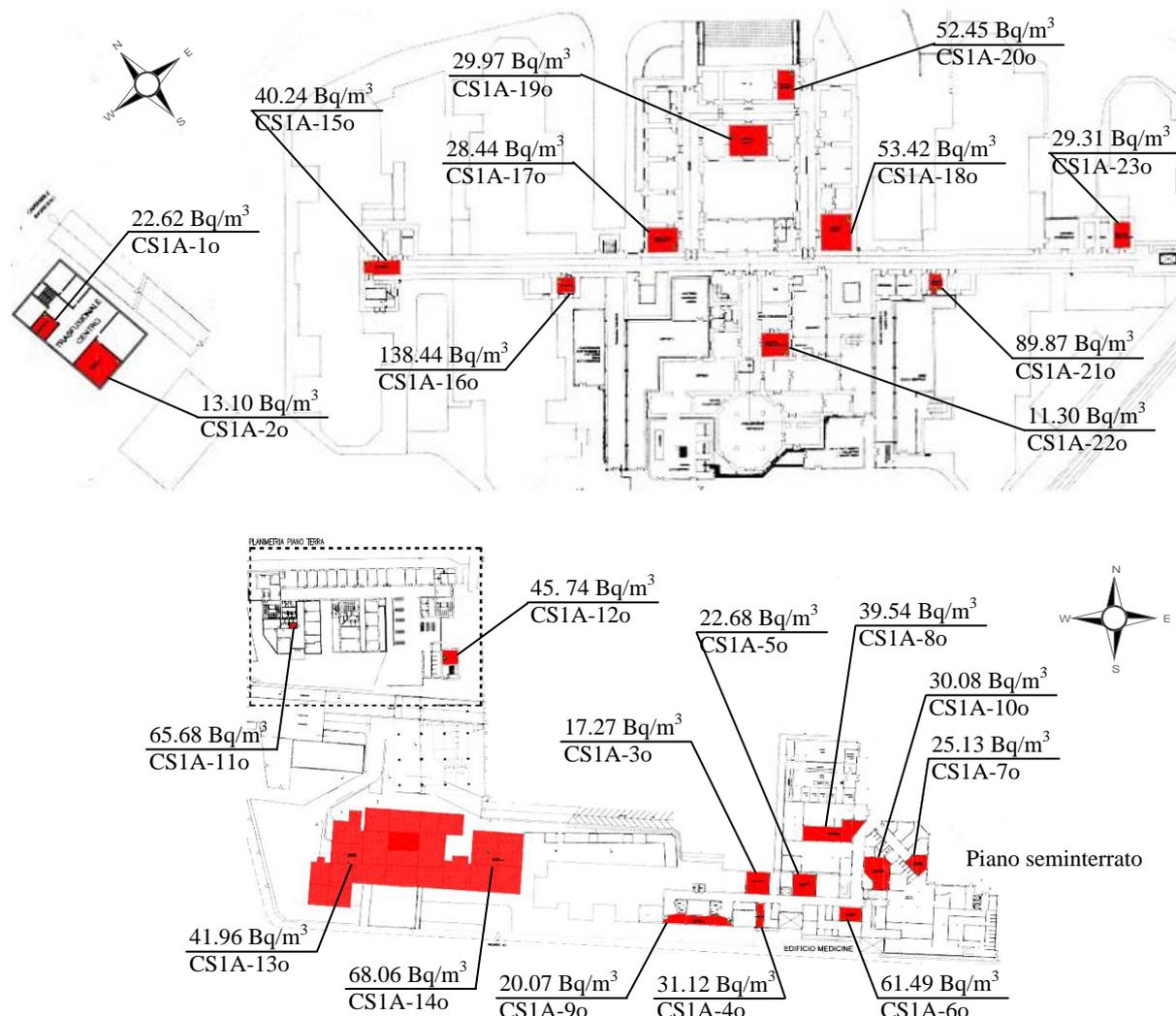
In tale caso puntuale di studio, nonostante si denotino, dei valori di RAC maggiori, questi rientrano sempre nei limiti normativi. Ciò non toglie il fatto che, i risultati ottenuti valgono anche per gli altri edifici dell'area di San Marco Argentano.

### 6.3.5 AREA DI COSENZA

Correlando le variazioni di concentrazione di attività del Radon misurate nel corso delle prime due campagne di monitoraggio con le caratteristiche proprie di ciascun locale osservato e riassunte nelle Tabelle C-6<sup>I</sup> e C-6<sup>II</sup> riportata in Appendice C, si rileva una non costante variazione di accumulo in funzione della frequenza, probabilmente dovuta alla diversa tipologia di costruzione e di posizione (Figura 6.16) (vedi Planimetria in Allegato B-8, B-9).

Prendendo in esame il locale a concentrazione minima annua, pari a ~11.30 Bq/m<sup>3</sup> (locale CS1A-23o), e il locale a concentrazione massima pari a ~138.44 Bq/m<sup>3</sup> (locale CS1A-16o), abbiamo che il fattore che maggiormente influisce anche in questo caso di studio in tale differenza è la frequentazione dello stesso, da cui la conseguenziale aerazione. Inoltre il locale CS1A-23o presenta un attivo impianto di riscaldamento/raffreddamento (Tabelle C-6<sup>I</sup>

e C-6<sup>II</sup> riportata in Appendice C) e comunica con ulteriori stanze, e, come si può notare dalla planimetria in Allegato B-8/9, una di queste presenta un accesso diretto verso l'esterno. In opposizione l'altro locale è un archivio/deposito poco frequentato e privo di alcun impianto di climatizzazione.



**Figura 6.16** - Concentrazioni annue nei vari locali dell'azienda ospedaliera di Cosenza (edificio CSIA). I locali analizzati sono stati evidenziati in rosso

Per entrambi i casi il contributo da parte della pavimentazione è nullo, visto che trattasi rispettivamente di materiale di tipo polimerico sintetico su massetto, e l'altro di segato. Da qui si può evincere tale differenza di attività di RAC riscontrata.

Analizzando gli scostamenti rispetto all'andamento medio della concentrazione in tale edificio (Figura 6.17), si osserva come il contrasto più netto si registra nel locale CS1-16o, e CS1-21o, adibiti entrambi ad archivi, con finestre murate, ma con ridotta volumetria, che evidentemente facilita l'accumulo di gas Radon.

Il locale CS1-2o, invece, presenta concentrazioni basse, probabilmente legato al fatto che fa parte di una struttura separata dal complesso dell'intero ospedale, con due pareti a contatto con l'esterno (vedi planimetria) e quindi più esposte.

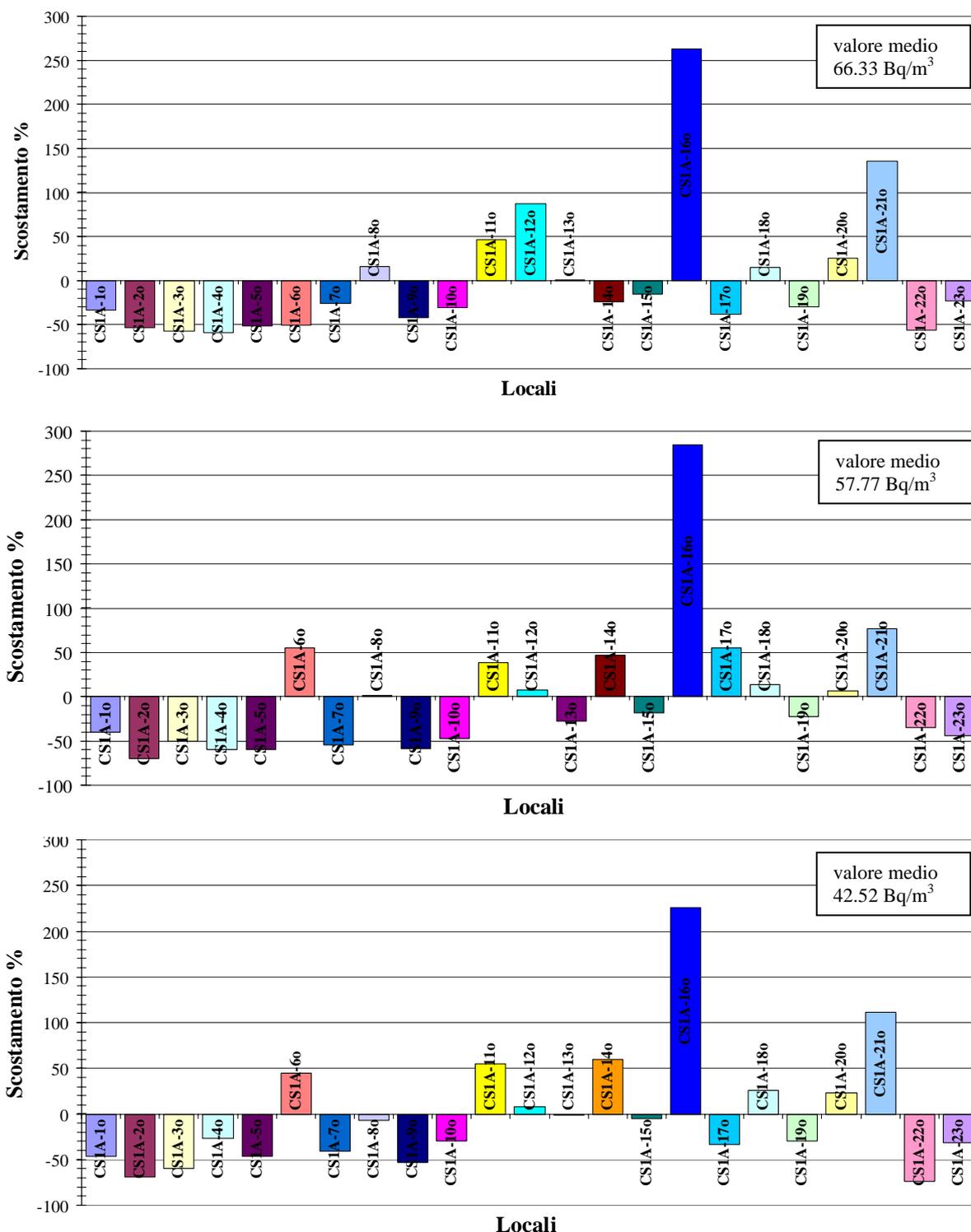


Figura 6.17 – Scostamento percentuale dal valore medio nei tre cicli di monitoraggio trimestrale, semestrale ed annuale nel presidio ospedaliero di Cosenza

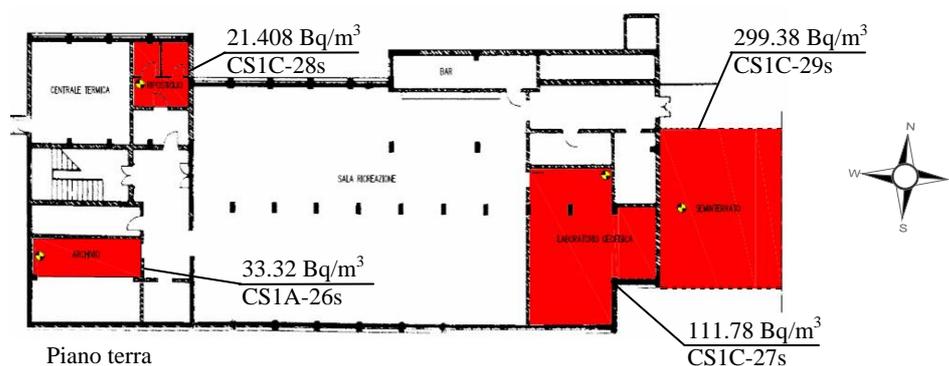
Nell'area di Cosenza è stato analizzato anche l'edificio del liceo scientifico statale "G.B. Scorza", dove sono stati presi in considerazione quattro locali seminterrati scelti per le

loro caratteristiche peculiari: un archivio e un ripostiglio/magazzino (senza impianto di climatizzazione, con presenza di tracce di umidità, con presenza di finestre tenute sempre chiuse e poco frequentate), il Laboratorio di Geofisica (con impianto di climatizzazione, privo di tracce di umidità e con presenza di finestre aperte saltuariamente), un seminterrato/intercapedine (adiacente al laboratorio di Geofisica, mai frequentato, privo di pavimentazione, con presenza di umidità).

Per quanto riguarda quest'ultimo, un valore maggiore si riscontra nel locale CS1C-29s: trattasi di un locale seminterrato di intercapedine tra le aule soprastanti e il terreno sottostante.

Tale concentrazione risulta essere, per l'esposizione annuale pari a  $\sim 299.38 \text{ Bq/m}^3$ , rappresentando la possibile concentrazione di fondo per l'aria limitrofa a tale edificio (Figura 6.18). Va sottolineato come tale intercapedine sia a contatto con il locale CS1C-27s, che ha un accumulo annuo di Radon pari a  $\sim 111.78 \text{ Bq/m}^3$  e in qualche modo viene influenzato dalla vicinanza dell'intercapedine.

Tale locale presenta un sistema di condizionamento (caldo/freddo) e viene frequentato mediamente 4 ore al giorno, come dichiarato dal personale docente. In opposizione troviamo gli altri due locali dello stesso edificio a concentrazione nettamente inferiori, pur essendo frequentati di meno (Vedi Tabella C-8 in Appendice C).



**Figura 6.18** - Concentrazioni annue nei vari locali del liceo scientifico statale G.B.Scorza (edificio CS1C). I locali analizzati sono stati evidenziati in rosso

È possibile notare come i dati evidenziano che locali di uno stesso edificio possano presentare concentrazioni differenti. I locali a concentrazione più alta risultano essere il laboratorio di Geofisica e l'intercapedine seminterrato. Tali locali sono adiacenti, ma la differenza di concentrazione rilevata è dovuta al fatto che il laboratorio di Geofisica risulta essere più frequentato, favorendo quindi una migliore aerazione dello stesso. Inoltre la presenza di un maggiore accumulo di gas Radon nell'intercapedine seminterrato, è anche attribuibile alla sua tipologia strutturale. Va sottolineato che tale intercapedine/seminterrato, è adiacente al laboratorio di Geofisica e sottostante un'aula del liceo in esame e ciò stimola un maggior studio di dettaglio di Radon indoor in tale area.

Facendo un'osservazione più ampia, si può dire che nel primo periodo di osservazione il maggior numero di locali, che rappresenta il 53.85% del totale, ricade nell'intervallo  $<50$

Bq/m<sup>3</sup> (il 34.62% ricade nell'intervallo di concentrazione di 50÷100 Bq/m<sup>3</sup> e l'11.55% si ripartisce equamente gli intervalli 100÷150, 150÷200 e 200÷250 Bq/m<sup>3</sup>); nel secondo ciclo di misure il 57.69% ricade nell'intervallo <50 Bq/m<sup>3</sup> (il 30.77% ha concentrazioni comprese equamente tra il range 50÷100 Bq/m<sup>3</sup>, il 7.69% tra 100÷150 Bq/m<sup>3</sup>, e solo il 3.85% rientra in un intervallo di RAC pari a 200÷250 Bq/m<sup>3</sup>); infine nel terzo ciclo di misure annuale si ha che il 69.23% di locali ricade in un intervallo di concentrazione tra <50 Bq/m<sup>3</sup> (il 23.08% tra 50÷100 Bq/m<sup>3</sup> e il 7.69% tra 100÷150 Bq/m<sup>3</sup>) (Figura 6.19).

Pertanto, si può concludere che gli edifici monitorati nell'area urbana di Cosenza risultino essere caratterizzati da una media di attività annuale di Radon pari a ~42.52 Bq/m<sup>3</sup> per l'ospedale "SS. Annunziata", a ~46.04 Bq/m<sup>3</sup> per l'ospedale "Mariano Santo" e a ~55.50 Bq/m<sup>3</sup> per il liceo scientifico "Scorza" (è stato esclusa nella media il locale CS1C-29s in quanto non abitabile) nettamente inferiori al limite normativo di 500 Bq/m<sup>3</sup> [D. Lgs. 241/00].

Come si evince da tali risultati, soprattutto nell'area urbana di Cosenza, di estensione maggiore rispetto alle aree di studio precedenti, riscontriamo valori puntuali tutti inferiori a quelli normativi, con un solo picco relativo ai primi due cicli (Figura 5.12). Caso diverso è per il locale CS1C-29s, che stimola un maggior studio di dettaglio di Radon indoor in tale area.

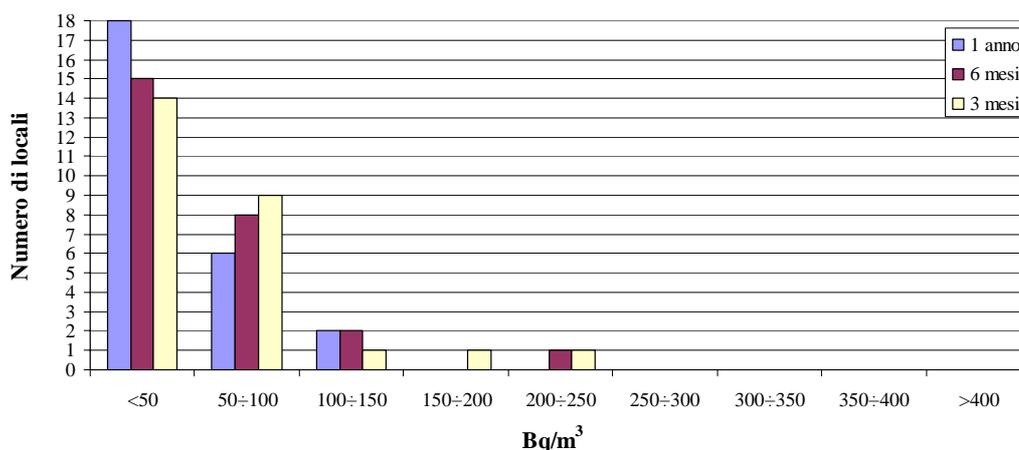
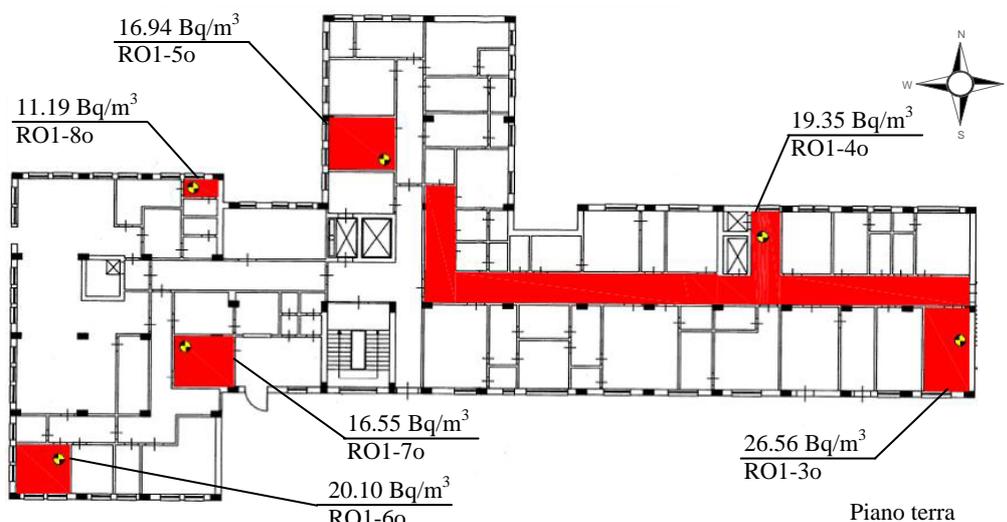


Figura 6.19 - Distribuzione dei valori di concentrazione di Radon nei locali monitorati del cosentino

### 6.3.6 AREA DI ROGLIANO

Prendendo in considerazione le misure di concentrazione relative all'intero arco solare, si osserva come si passa dai locali RO1-7o e RO1-8o, a concentrazione bassa, pari a ~16.55 e ~11.19 Bq/m<sup>3</sup>, a locali, RO1-1o e RO1-8o, a concentrazione più elevata (Figura 6.20). Ciò è dovuto ad un maggior accumulo dovuto alla scarsa aerazione pari a ~88.72 Bq/m<sup>3</sup>. In particolare il locale RO1-7o risulta essere ben areato, vista anche la sua destinazione d'uso. Inoltre va sottolineato che i locali a concentrazione maggiore sono siti in una struttura distaccata dal complesso dell'ospedale, quindi con tipologie di costruzione differenti da quella

dell'intero ospedale, dotato interamente di impianto di climatizzazione. L'unico locale a minor frequentazione, appartenente alla struttura dell'ospedale è il locale RO1-10o, che



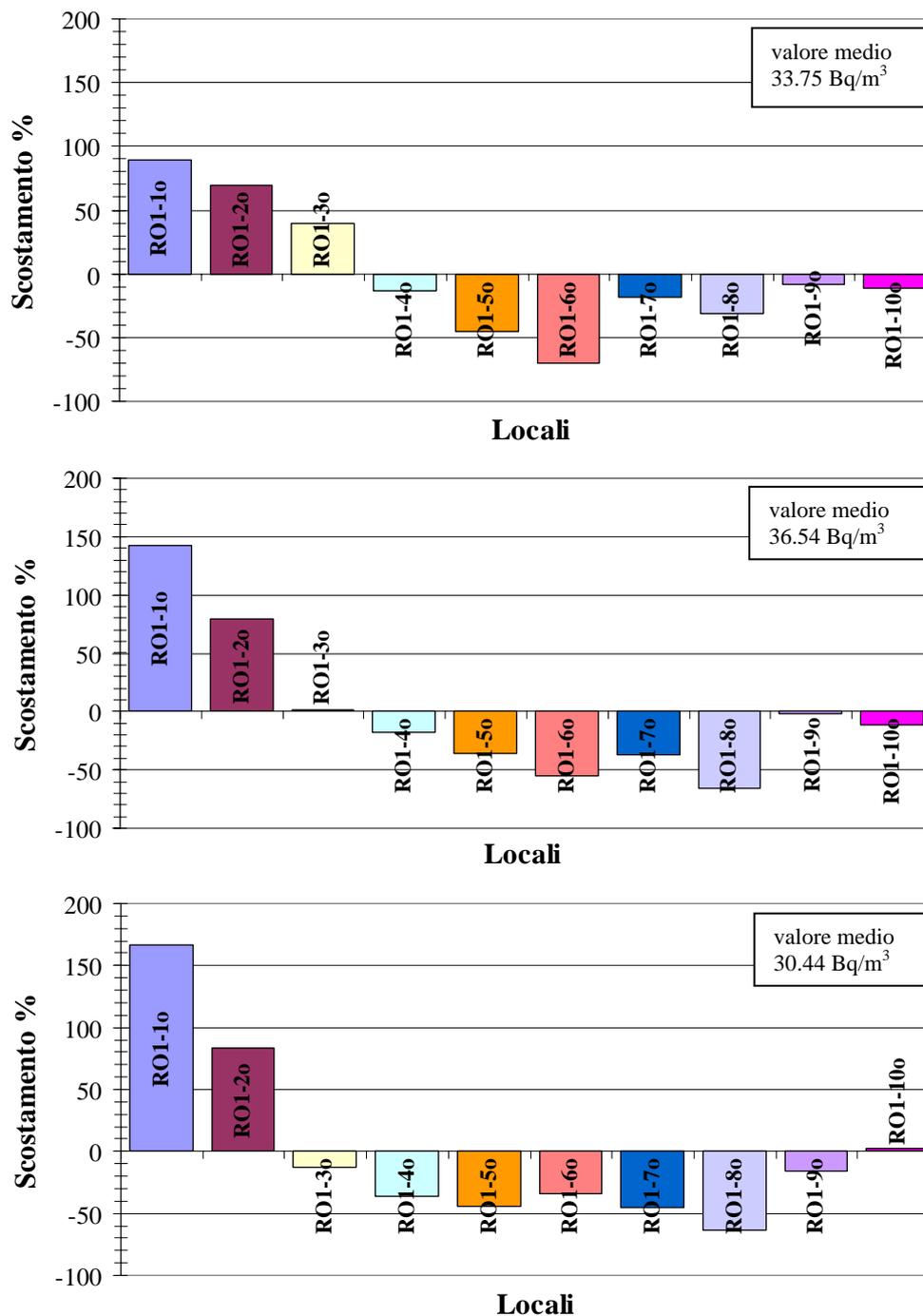
**Figura 6.20** - Concentrazioni annue nei vari locali dell'azienda ospedaliera di Rogliano (edificio RO1). I locali analizzati sono stati evidenziati in rosso

nonostante sia poco aerato e abbia due pareti a contatto col terreno, presenta, si una concentrazione più elevata rispetto agli altri, ma comunque bassa pari a  $\sim 31.25 \text{ Bq/m}^3$ .

Inoltre, anche se la variazione è minima tra il locale RO1-6o e RO1-7o va detto che, tali locali vicini tra loro (vedi Appendice B-11) e differenti per caratteristiche quali numero di finestra, esposizione delle pareti e il contatto o meno col terreno o altro piano (Vedi caratteristiche in Tabella C-9 in Appendice C), presentano concentrazioni simili dovute alla diversa aerazione legata alla differente destinazione d'uso.

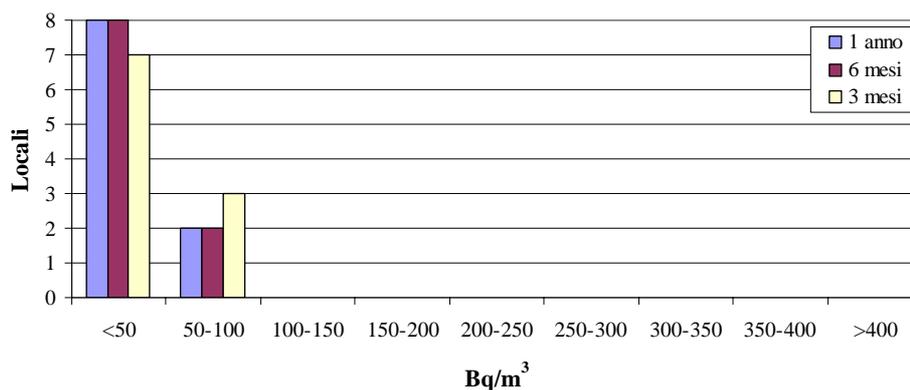
Inoltre i locali RO1-1o, RO1-2o, come si può osservare dalla Figura 6.22, presentano uno scostamento percentuale in positivo rispetto dall'andamento medio di tale struttura, in contrasto al locale RO1-6o che presenta uno scostamento percentuale in negativo. I primi due locali corrispondono a due archivi, staccati dall'edificio dell'ospedale, con finestre sempre chiuse. In particolare la differenza tra tali è legata ad un duplice motivo: 1- il locale RO1-1o, nonostante sia di volumetria maggiore è molto meno frequentato rispetto al locale RO1-2o, che inoltre è adibito anche ad ufficio.

Per quanto riguarda, invece, il locale RO1-6o, è la stanza del primario del laboratorio di analisi, e come si può osservare dalla planimetria in Figura 6.21, presenta su ambo i lati delle due pareti esterne, finestre, che non restano sempre chiuse.



**Figura 6.21** – Scostamento percentuale dal valore medio nei tre cicli di monitoraggio trimestrale, semestrale ed annuale nel presidio ospedaliero di Rogliano

In tale presidio ospedaliero, come si evince dalla Figura 6.22 si ha che nel primo ciclo di misure, il 70.0% del totale dei locali, ha una concentrazione di Radon  $<50 \text{ Bq/m}^3$  e il 30 % dei locali ha una concentrazione tra  $50 \div 100 \text{ Bq/m}^3$ ; nel secondo e terzo ciclo di misure, invece, si registra che l'80% dei locali presenta concentrazioni  $<50 \text{ Bq/m}^3$  e il restante 20.0% ha concentrazioni comprese tra  $50 \div 100 \text{ Bq/m}^3$ .



**Figura 6.22** - Distribuzione dei valori di concentrazione di Radon nei locali monitorati nell'ospedale di Rogliano

Pertanto, si può concludere che l'ospedale monitorato nell'area di Rogliano risulta essere caratterizzato da una media di attività annuale di Radon pari a  $\sim 30.44 \text{ Bq/m}^3$  nettamente inferiore al limite normativo di  $500 \text{ Bq/m}^3$  [D. Lgs. 241/00].

### 6.3.7 AREA DI SAN GIOVANNI IN FIORE, CACCURI, CERENZIA E CASTELSILANO

Andando ad osservare le concentrazioni registrate nella struttura ospedaliera si può osservare come si passa da valori minimi semestrali pari a  $\sim 27.87 \text{ Bq/m}^3$  (locale SGF1A-7o) a massimi pari a  $\sim 236.64 \text{ Bq/m}^3$  (locale SGF1A-2o). Tale differenza si osserva anche dallo scostamento percentuale rispetto all'andamento medio in Figura 6.23. Tali locali corrispondono rispettivamente all'obitorio, che oltre ad essere frequentato in maniera non costante, è interrato, e alla stanza di un primario, che viene frequentata mediamente 8 ore al giorno. L'accumulo che si registra è di notevole rilevanza, considerando anche che abitualmente, la finestra presente rimane spesso mantenuta socchiusa. Va comunque considerato che in tale presidio ospedaliero sono state prese in considerazione tutti locali abbastanza frequentati.

L'istituto della ragioneria (SGFC6) come quello d'arte (SGFB6), e lo psicopedagogico (SGFI6) sono strutture di recente edificazione, quindi presumibilmente, con un maggior isolamento dell'edificio. Solo la prima presenta una situazione differente con un accumulo maggiore, dovuto probabilmente sia alla sua posizione e sia alla scarsa aerazione, a cui sono sottoposti i locali monitorati. Non va dimenticato che, comunque, pur se un locale è frequentato per un breve intervallo di tempo, il fenomeno di accumulo che si viene a creare, non è salutare per il personale che lo frequenta.

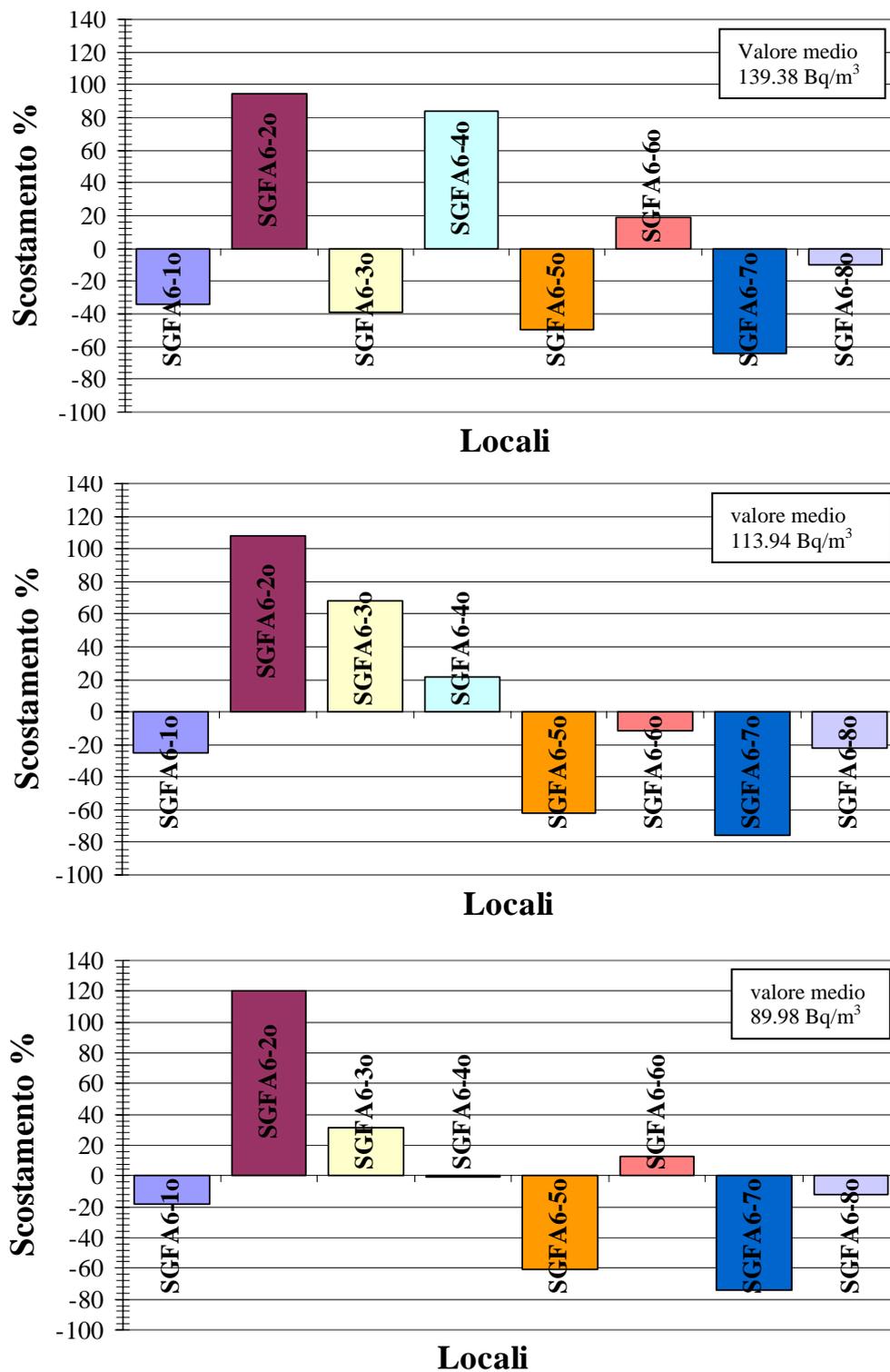


Figura 6.23– Scostamento percentuale dal valore medio nei tre cicli di monitoraggio trimestrale, semestrale ed annuale nel presidio ospedaliero di San Giovanni in Fiore

Per quanto riguarda invece gli edifici scolastici, possiamo notare come edifici quali SGF1C, SGF1E, SGF1Q-32s e SGF1R-33s, presentano concentrazioni di rilevanza, già a sei mesi: quasi tutti superano già il limite normativo d'attenzione pari a  $400 \text{ Bq/m}^3$ .

I dati, che spiccano maggiormente, sono quelli relativi alla biblioteca e alle chiese, in particolare la Chiesa Madre (SGF1W-41c) e l'Abbazia Florense (SGF1V-40c). Ciò che contribuisce in maniera rilevante alla concentrazione di attività di gas Radon misurata è la tipologia di costruzione. Trattasi di strutture interamente di granito, da qui la conseguenziale concentrazione di RAC.

Va messo in evidenza come edifici vicini, a parità di geologia presentino concentrazioni diverse, dipendenti dalla tipologia di costruzione diversa, ma anche dal tasso di aerazione. Va a tal fine ribadito che l'accumulo del Radon indoor può variare non solo da edificio ad edificio, ma anche da locale a locale in una stessa struttura. Ciò è dovuto oltre alle tipologie edilizie, all'aerazione, ma anche alla possibile presenza, come in questo caso, di intrusioni di filoni pegmatitici o in generale contenenti maggiori concentrazioni di minerali torio-uraniferi, che contribuiscono ad una maggiore concentrazione di Radon.

I dati che più spiccano in modo rilevante sono quelli relativi alla zona di Castelsilano, in particolare gli edifici CSI1A, CSI1B, che presentano valori elevati sia nel primo ciclo trimestrale che nel secondo ciclo semestrale, hanno una diversa tipologia di costruzione: il primo è una struttura di recente edificazione, il secondo è una struttura antica. Inoltre questi due locali a differenza del CSI1C, sono poco frequentati (~2 ore al mese da quanto dichiarato dal personale, da qui il maggior accumulo di concentrazione di gas Radon.

Per quanto riguarda, invece, le altre due aree di monitoraggio:

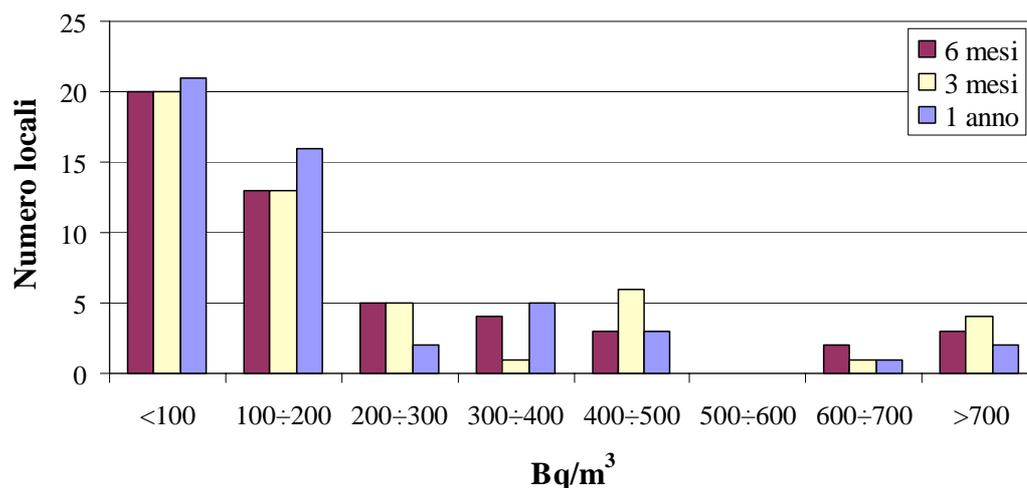
- per Caccuri è stato analizzato solo un locale adibito a laboratorio, frequentato comunque in modo sporadico;
- per Cerenza le tre scuole monitorate presentano simili tipologie di costruzioni e la differenza di accumulo di Radon è legata alla diversa esposizione dei locali e alle aperture presenti.

Andando a fare un discorso generale, raffigurato in Figura 6.24, si ha che la maggior parte dei locali monitorati pari al 40% presenta una concentrazione trimestrale  $<100 \text{ Bq/m}^3$  (il 26% ricade nell'intervallo compreso tra  $100 \div 200 \text{ Bq/m}^3$ , il 12% tra  $400 \div 500 \text{ Bq/m}^3$ , il 10% tra  $200 \div 300 \text{ Bq/m}^3$ , l'8% risulta  $>700 \text{ Bq/m}^3$  e il restante 4% ricade tra i range  $300 \div 400 \text{ Bq/m}^3$  e  $600 \div 700 \text{ Bq/m}^3$ ).

Nel ciclo semestrale, invece, si ha che la maggior parte dei locali pari al 40% ha una concentrazione di attività  $<100 \text{ Bq/m}^3$  (il 26% tra  $100 \div 200 \text{ Bq/m}^3$ , il 10% ricade nell'intervallo di  $200 \div 300 \text{ Bq/m}^3$ , il 12% si ripartisce equamente tra i range di  $400 \div 500$  e

>700 Bq/m<sup>3</sup>, l'8% rientra in un range di 300÷400 Bq/m<sup>3</sup> e il restante 4% ricade tra il 600÷700 Bq/m<sup>3</sup>).

Per quanto riguarda, invece, le misure annuali si registra che il 42 % dei locali monitorati nell'area silana presenta una concentrazione di gas Radon < 100 Bq/m<sup>3</sup> (il 32% tra 100÷200 Bq/m<sup>3</sup>, il 10% ricade tra il 300÷400 Bq/m<sup>3</sup>, il 6% tra il 400÷500 Bq/m<sup>3</sup>, l'8% si spalma equamente tra 200÷300 Bq/m<sup>3</sup> e >700 Bq/m<sup>3</sup>, ed infine l'ultimo 2% dei locali presenta una RAC che rientra in un range di 600÷700 Bq/m<sup>3</sup>.



**Figura 6.24** - Distribuzione dei valori di concentrazione di Radon nei locali monitorati nell'area di San Giovanni in Fiore

Pertanto, si può concludere che gli edifici monitorati nell'area silvana di San Giovanni in Fiore, Castelsilano, Caccuri e Cerenzia risultino essere caratterizzati rispettivamente da una media di attività annuale di Radon pari a ~180.06 Bq/m<sup>3</sup>, 369.01 Bq/m<sup>3</sup> e 148.37 Bq/m<sup>3</sup> inferiori al limite normativo di 500 Bq/m<sup>3</sup> [D. Lgs. 241/00]. Ciò non esclude il possibile rischio da parte di questi, sia perché trattasi di una media e poi, come abbiamo visto precedentemente, soprattutto per alcune scuole, si registrano dei valori di picco.

Si può concludere dicendo che già da tali dati, emerge la necessità di un continuo monitoraggio, tenendo sotto controllo tali valori, e apportando dove necessario opportuni sistemi di ventilazione forzata, quali la ventilazione dei vespai, la sigillatura di tutte le possibili vie d'ingresso dalle pareti e dai solai a contatto con il terreno, la pressurizzazione dell'edificio o l'aspirazione del gas dal suolo al di sotto dell'edificio. L'eliminazione completa non è possibile, ma si riesce a fornire un contributo rilevante per un miglior impatto sulla salute pubblica. Esistono però azioni di rimedio efficaci e controllate, attraverso cui è possibile ridurre la concentrazione a livelli accettabili.

## 6.4 ANALISI SUI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Sono stati considerati alcuni casi di studio particolari di edifici limitrofi costruiti con differenti materiali da costruzione. A tal fine si è scelta un'area ristretta nel centro urbano del Comune di San Giovanni in Fiore.

Sono stati presi in considerazione tre edifici scolastici limitrofi costruiti in calcestruzzo in concomitanza a due chiese e all'edificio della biblioteca, costruite in roccia granitica. I locali monitorati per ogni singolo edificio presentano lo stesso ordine di grandezza per quanto riguarda le ore di frequenza.

Come si può osservare dal grafico in Figura 6.25 si evince come le concentrazioni siano nettamente inferiori negli edifici in calcestruzzo, a parità di contesto geologico, vista la vicinanza di tali strutture, la diversa concentrazione registrata è associata ai diversi materiali da costruzione utilizzati. Infatti si rileva una concentrazione media annua pari a  $\sim 135.88$  Bq/m<sup>3</sup> negli edifici in cls, in contrapposizione agli edifici interamente in granito, che presentano un'attività media di Radon pari a  $\sim 613.45$  Bq/m<sup>3</sup>.

Gli altri fattori che entrano in gioco sono stati discriminati, dato l'evidente distacco dei valori di concentrazione. Dalla Tabella C-12 in Appendice C, si legge come sia diversa la locazione di tali microambienti considerati. Infatti due scuole (scuola elementare F.lli Bandiera e l'IPSIA) si trovano al piano terra con una parete interrata; il microambiente dell'Abbazia Forense (cripta) è interrato con una parete parzialmente a contatto con l'esterno; mentre i locali della Chiesa Madre, biblioteca e scuola media Marconi sono localizzati al seminterrato.

Come si può trarre dalla Figura 6.25, dagli edifici in pietra, la biblioteca presenta concentrazioni più basse rispetto alle due chiese. Ciò è legato all'aerazione e all'attività umana. Tale parametro influenza, ma non implica, l'accumulo di Radon indoor, in quanto è confrontabile con le tre scuole costruite in calcestruzzo. Va sottolineato a tal riguardo che il

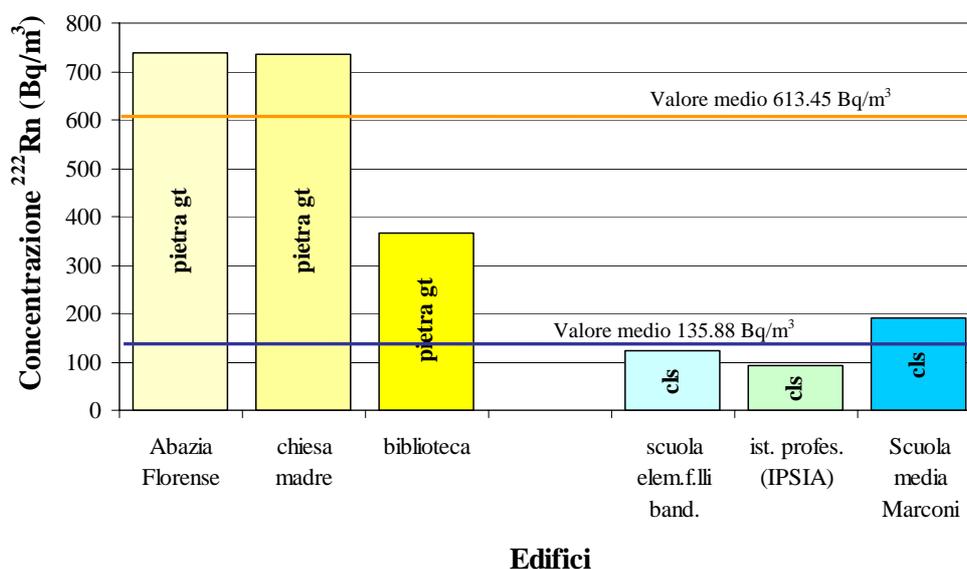


Figura 6.25 - Correlazione tra l'accumulo di gas Radon e il diverso materiale da costruzione

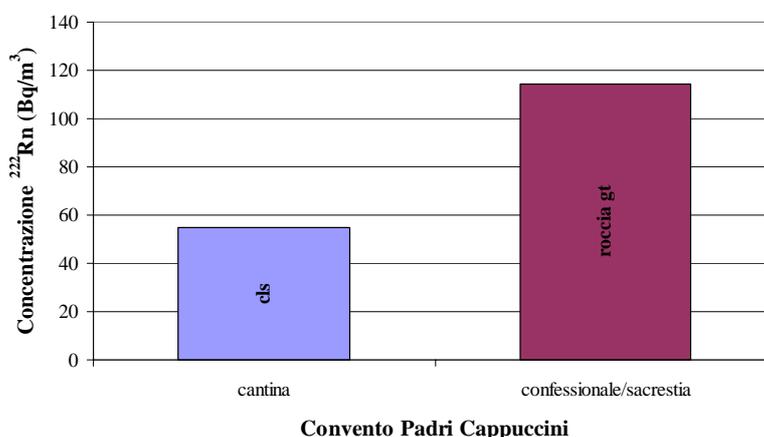
valore maggiore per gli edifici in calcestruzzo si registra nella scuola media Marconi, il cui locale considerato (adibito ad archivio) risulta essere poco frequentato dal personale e quindi poco areato. Da qui si evince come sia importante il ruolo e la scelta di un materiale da costruzione da un altro, specie il località in cui si ha già una significativa emissione di Radon dal suolo.

Infatti si ha che nei calcestruzzi la concentrazione di  $^{226}\text{Ra}$  rientra in un range di 10-80 Bq/Kg, in contrapposizione al granito che varia dai 100 ai 200 Bq/Kg (Tabella 2.6, Capitolo II).

**Tabella 6.1 - Concentrazioni di  $^{222}\text{Rn}$  nei tre cicli di monitoraggio relativi a 6 edifici campione**

EDIFICI	3 MESI (Bq/m <sup>3</sup> )	6 MESI (Bq/m <sup>3</sup> )	1 ANNO (Bq/m <sup>3</sup> )
Abazia Florense (SGFV6-40c)	656.16	780.34	739.54
chiesa madre (SGFW6-41c)	2058.57	1429.82	734.75
Biblioteca (SGFU6)	392.68	390.27	366.06
scuola elem. f.lli band. (SGFD6)	143.46	160.83	123.31
ist. profes. (IPSIA) (SGFF6)	94.50	87.59	93.66
Scuola media Marconi (SGFL6-26s)	210.00	173.53	190.66

Un ulteriore caso particolare è stato studiato nel Convento dei Padri Cappuccini, dove confrontando le misurazioni ottenute con tecniche attive (alpha-guard) nell'ala costruita in roccia granitica e quella ristrutturata in calcestruzzo, anche in qui troviamo un'accumulo maggiore nel microambiente costituito da roccia granitica.



**Figura 6.26 – Correlazione tra l'accumulo di gas Radon in due locali del Convento dei Padri Cappuccini, costruiti l'uno in calcestruzzo e l'altro interamente in roccia granitica**



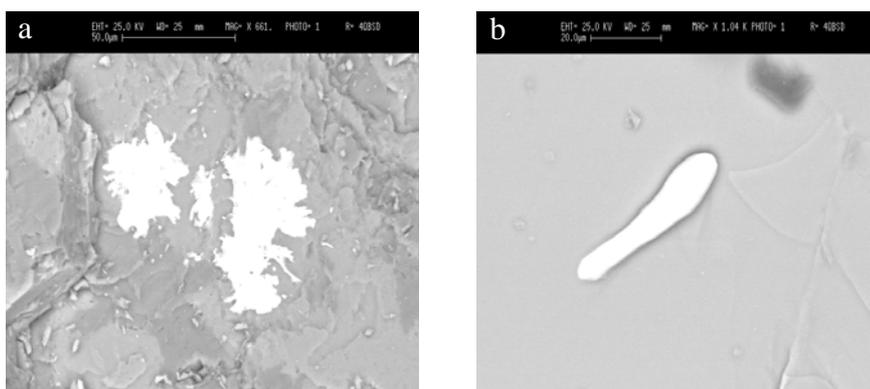
**Figura 6.27** – Stralcio planimetrico catastale del Convento dei Padri Cappuccini, con localizzazione dei punti di misura

In particolare le concentrazioni maggiori si rilevano nella stanza del confessionale (in cui non è stato possibile effettuare il monitoraggio passivo in quanto luogo di culto). Tale ambiente, di piccole dimensioni, è posto al piano terra, fa parte della struttura antica del convento, costruito in roccia granitica, con muri esterni di rilevanti dimensioni, di spessore pari a circa 0.5 mt. In Figura 6.27 è riportato lo stralcio planimetrico del Convento.

Supponendo la similitudine dei locali per tipologia e frequenza, dai dati ottenuti, si evincono che nei casi di studio riportati, il materiale da costruzione contribuisce in modo rilevante alle concentrazioni riscontrate. Infatti confrontando i valori medi delle concentrazioni di gas Radon degli edifici in pietra risultano circa 5 volte maggiori rispetto agli edifici costruiti in calcestruzzo.

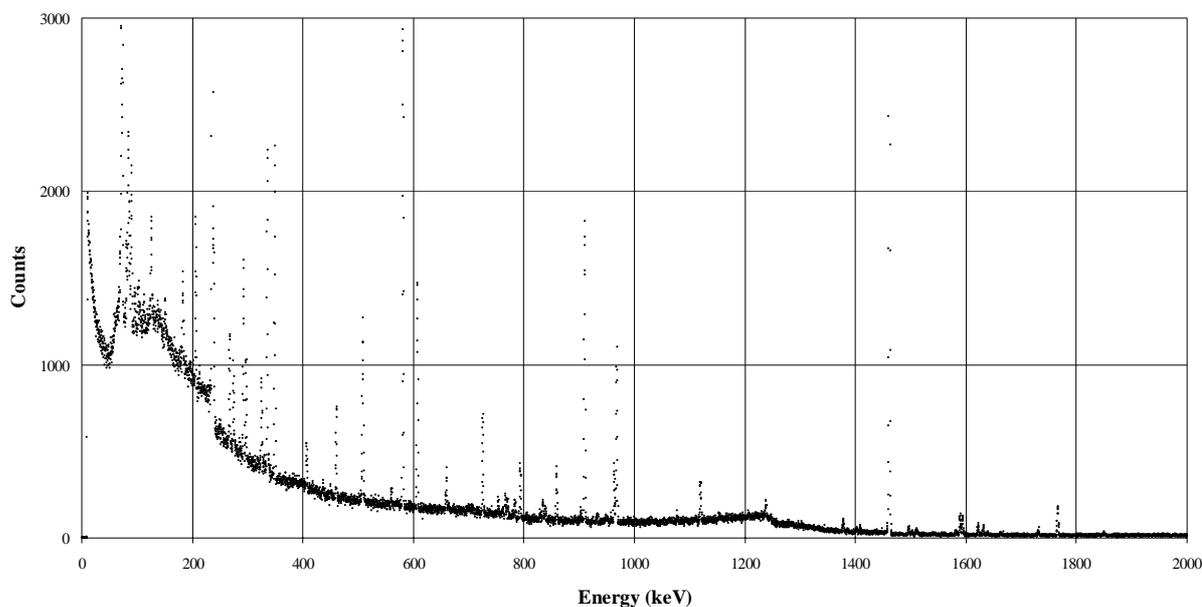
Inoltre si è caratterizzato da un punto di vista quantitativo un campione di granito di una cava dimessa rappresentativo dell'area e delle costruzioni in roccia. E' stato determinando attraverso spettrometria gamma al germanio iperpuro, l'effettiva radioemissività della roccia in esame. Tale campione di roccia, affiorante in una cava dimessa, vicino all'area urbana di San Giovanni, risulta costituito, attraverso diffrattometria RX, dalle seguenti associazioni mineralogiche: quarzo, plagioclasio, k-felspatto, biotite, muscovite e clorite.

Successivamente si è proceduto ad un'osservazione al microscopio elettronico (SEM) dove si sono riconosciuti come minerali pesanti radioattivi quali monazite (Figura 6.28a), zirconio (Figura 6.28b), e silicati di zirconio, contenenti in ppm concentrazioni di Uranio (Vedi Capitolo II) e vari ossidi di ferro.



**Figura 6.28** - Micrografia in backscattering al microscopio elettronico del granito di San Giovanni: a) associazione di cristalli di monazite; b) cristallo di zirconio

Il campione di granito esaminato mostra un elevato livello di radioattività, come si ci poteva ben aspettare. In Tabella 6.2 si riscontrano valori elevati di radioemissività dei radionuclidi di riferimento quali  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , e  $^{40}\text{K}$  (Figura 6.29).



**Figura 6.29** - Spettro gamma del campione di granito silano

**Tabella 6.2** - Radioemissività dei radionuclidi di riferimento del campione di granito

	Radioemissività (Bq/kg)		
Granito	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
	52	62	1606

#### 6.4.1 CASI PARTICOLARI DI STUDIO: LE TRE CHIESE DI SAN GIOVANNI IN FIORE

Di seguito vengono riportati tre casi di studio di chiese costruite in pietra nell'area urbana di San Giovanni in Fiore.

Le tre chiese in esame, costruite tutte in granito sono state sottoposte sia ad un monitoraggio passivo che attivo. In particolare per l'Abbazia Florenze, è stata considerata la cripta sotterranea, ampio ambiente doppio, con due finestre sempre chiuse, in diretto contatto col piano superiore tramite una gradinata; per la Chiesa Matrice è stato considerato uno stanzino della sacrestia, di piccole dimensioni (poco frequentato); infine per il convento dei Padri Cappuccini è stata presa in considerazione un locale seminterrato adibito a cantina, di medie dimensioni, con la presenza di una finestra sempre chiusa.

In questo caso sono stati presi in considerazione, oltre gli ambienti monitorati con i rivelatori CR-39, i seguenti ambienti:

- la sacrestia (a cui si accede allo stanzino) e le due cappelle laterali delle navate destra e sinistra della Chiesa di *Santa Maria delle Grazie*;
- le due cappelle laterali destra e sinistra (da quest'ultima si accede direttamente tramite una scalinata laterale alla cripta sottostante) dell'*Abbazia Florenze* (Figura 6.30);
- una stanza della sacrestia adibita a confessionale per la chiesa dei *Padri Cappuccini*.

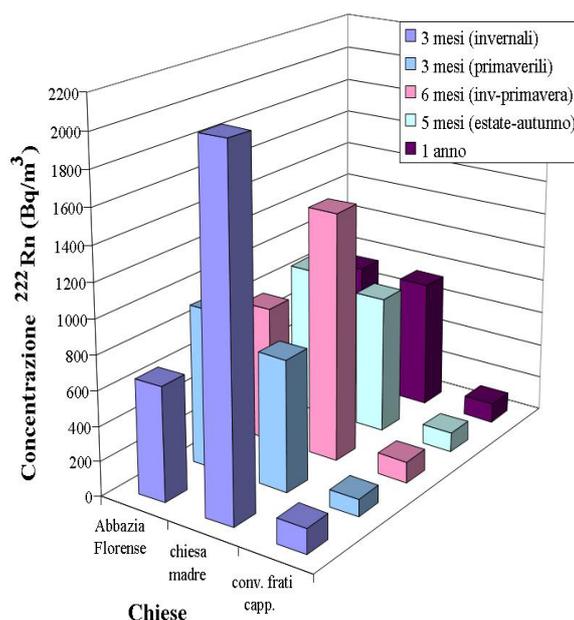


**Figura 6.30** – Immagini di due ambienti sottoposti a monitoraggio. A destra è raffigurato a la cappella sinistra dalla quale si accede direttamente alla cripta sotterranea (a destra)

Come illustrato in precedenza è stato effettuato, in prima analisi, un monitoraggio di tipo passivo, i cui risultati ottenuti sono rappresentati in Figura 6.31.

Come si può osservare i valori di concentrazione maggiori si riscontrano nell'Abbazia Florenze e nella chiesa Matrice. Infatti riscontriamo per le due chiese accumuli di concentrazione annuale di gas Radon molto simili pari rispettivamente a  $\sim 739.54 \text{ Bq/m}^3$  e a  $\sim 734.75 \text{ Bq/m}^3$ , in contrapposizione ai valori annuali rilevati al locale cantina del Convento dei Frati Cappuccini di  $\sim 115.22 \text{ Bq/m}^3$ .

Per quanto riguarda i tre mesi più freddi, caratterizzati da intense nevicate, i maggiori accumuli si registrano nello stanzino della sacrestia della Chiesa Matrice, dove si rileva il massimo picco di concentrazione pari a  $\sim 2058.57 \text{ Bq/m}^3$ . Nella cripta dell'Abbazia Florenze



**Figura 6.31** – Distribuzione dell'attività di Radon nelle tre chiese oggetto d'indagine di San Giovanni in Fiore nei 5 periodi di esposizione: 3 mesi, 3 mesi, 6 mesi, 5 mesi, 1 anno cumulativo

si registrano concentrazioni elevate sia nei mesi invernali, pari a  $\sim 656.16 \text{ Bq/m}^3$  che nei successivi tre mesi primaverili, dove si rileva una concentrazione di  $\sim 913.39 \text{ Bq/m}^3$ .

All'interno della cripta le variazioni climatiche stagionali non influiscono sull'accumulo di Radon, e inoltre va considerato, comunque, che l'aerazione all'interno di questa è da ritenersi costante per tutto l'anno.

Essendo inoltre, la cripta, completamente in pietra granitica e completamente interrata (eccetto una parete che è seminterrato, ma sotto il piano stradale esterno) quindi a contatto con la litologia granitica, non risente delle variazioni meteorologiche, ma solo dallo stato del terreno-roccia.

Va sottolineato che lo stanzino della Chiesa Matrice è di dimensioni molto piccole rispetto alla cripta, ed è caratterizzato da un'aerazione proporzionale all'apertura e chiusura dell'unica porta presente, dove infatti registriamo concentrazioni medie (per 50 minuti di acquisizione) pari a  $97.40 \text{ Bq/m}^3$  in opposizione alla cripta dell'Abbazia Florenze dove si registrano valori medi di  $533.20 \text{ Bq/m}^3$  (Tabella 6.3).

Quest'ultima è un ambiente molto ampio, come si può osservare in Figura 6.30, caratterizzato da due ambienti comunicanti, con presenza di una finestra per ambiente e comunicante con le scalinate di accesso.

Per quanto riguarda la Chiesa dei Padri Cappuccini riscontriamo valori relativamente bassi e andando ad analizzare le misure relative ai mesi invernali e primaverili riscontriamo un maggior accumulo nel periodo più freddo dove registriamo concentrazioni pari a  $\sim 142.64 \text{ Bq/m}^3$  rispetto al periodo primaverile con concentrazioni di  $\sim 101.98 \text{ Bq/m}^3$ .

Per quanto riguarda il monitoraggio attivo effettuato, i risultati ottenuti sono stati riassunti in Tabella 1, in cui sono rappresentati oltre i valori della concentrazione di Radon e il rispettivo errore di misura, anche i valori medi di acquisizione della pressione dell'aria (mbar), l'umidità relativa in (%) e di temperatura (°C).

In questo caso si può osservare, per gli ambienti analizzati nella Chiesa Matrice, come i valori maggiori si rilevano nella cappella laterale sinistra, che comunica con quella destra, evidentemente le variazioni, riscontrate sono dovute alla circolazione dell'area, in quanto nella cappella sinistra l'alpha-guard è stato posto in una posizione più riparata (cosa non possibile nella cappella destra visto che l'accesso era bloccato) e inoltre durante l'acquisizione è stata aperta la porta d'ingresso della chiesa.

Per quanto riguarda lo stanzino, questo, presenta concentrazioni che andavano ad aumentare col tempo di acquisizione, e proporzionali alle variazioni di umidità. Ciò potrebbe giustificare le concentrazioni rilevate con le misure passive (Figura 6.31).

**Tabella 6.3** – Schematizzazione della campagna di misura attiva effettuate nelle tre chiese di San Giovanni in Fiore

Luogo	$^{222}\text{Rn}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	$^{222}\text{Rn}+\text{error}$ Bq (Bq/m <sup>3</sup> )	in Air (mbar)	pressure	Humidity rel.(%)	Temperature (°C)
<b>Chiesa Matrice</b>						
Stanzino (sacrestia)*	97.40	± 27.80		913.20	55.34	20.36
Sacrestia	66.50	± 24.13		913.00	49.54	20.44
Cappella lat (abside sx)	103.85	± 30.24		913.00	47.70	21.04
Cappella lat (abside dx)	75.55	± 28.08		912.40	46.20	20.78
<b>Abbazia Forense</b>						
Cripta*	533.20	± 81.45		914.00	58.46	18.24
Cappella dx	379.20	± 91.60		913.00	61.32	18.52
Cappella sx	130.10	± 55.40		913.00	54.40	19.60
<b>Convento Padri Cappuccini</b>						
Cantina*	54.68	± 34.28		905.00	44.92	23.90
Confessionale/ sacrestia	114.45	± 34.38		905.00	46.86	22.72

\* ambienti sottoposti anche a monitoraggio passivo

Per quanto riguarda l'Abbazia Firenze i valori maggiori si sono riscontrati nella cripta, in cui i valori risultano crescenti nel tempo e con l'umidità. Inoltre tra i locali monitorati tale ambiente, presenta le temperature inferiori pari a ~18 °C, come si può notare dalla tabella 1. I valori riscontrati nella cripta, sono in linea con quanto atteso visto le caratteristiche proprie di tale ambiente già descritte precedentemente.

Per quanto riguarda le due cappelle analizzate le concentrazioni maggiori si registrano in quella destra, in quanto è un ambiente più piccolo rispetto alla cappella sinistra. Inoltre, in

quest'ultimo, si registra un trend di  $^{222}\text{Rn}$  lineare per gli intervalli di acquisizione di 10 minuti, nell'intera acquisizione di 50 minuti. Per quanto riguarda il Convento dei Padri Cappuccini, si rilevano concentrazioni maggiori nella stanza del confessionale, in cui non è stato possibile effettuare il monitoraggio passivo. Anche se tale ambiente (di piccole dimensioni) è posto al piano terra, fa parte nella struttura antica del convento, costituito di granito, con muri esterni di rilevanti dimensioni, pari a circa 0.5 mt.

I due tipi di monitoraggio sono indicativi di due contesti differenti: quello passivo è relativo a misure integrate nel tempo, quindi non sono influenzate da eventi occasionali a breve termine; quello attivo è un monitoraggio puntuale il cui valore è indicativo dei livelli di concentrazione a breve termine e quindi soggetto a variazioni occasionali. Per tale motivo va preso come tale, magari sarebbe stato necessario, in questo caso, monitorare per tempi più lunghi (1 settimana), ma visto i monumenti sacri analizzati non è stato possibile.

## 6.5 STIMA DELLA DOSE EQUIVALENTE

A tal punto, al termine delle campagne annuali, si è cercato di effettuare un tentativo di stimare la dose assorbita dai lavoratori.

In particolare per i lavoratori nelle attività indoor, il livello di azione, come riportato nell'Allegato 1-bis [6], è riconosciuto essere pari a:  $500 \text{ Bq/m}^3$  medi annui (che corrispondono a  $3 \text{ mSv/anno}$  per  $2.000$  ore lavorative). Lo schema dei limiti è riportato nella seguente Tabella 6.4.

**Tabella 6.4** – Schema dei limiti di valori di dose [D.Lgs 241/00]

<b>CRITERIO DI DOSE</b>	<b>LIMITE DI ESENZIONE</b>	<b>LIMITE DI ATTENZIONE</b>
Dose in eccesso	0.3 mSv / anno	1 mSv / anno

Per la valutazione delle esposizioni alle radiazioni ionizzanti si fa in genere riferimento ad una grandezza, l'equivalente di dose efficace, che costituisce un indice che permette di valutare gli effetti biologici delle radiazioni stesse sull'organismo umano e che viene espresso in Sievert (Sv).

Per questo motivo, si è provveduto a stimare il valore di tale grandezza in relazione alla concentrazione di Radon misurata nei posti di lavoro monitorati in ogni presidio ospedaliero oggetto d'indagine. A tale scopo sono stati valutati i contributi derivanti dalla permanenza del personale in ciascun ambiente confinato, tenendo a riferimento un valore medio di 2000 ore lavorative all'anno. Quindi, moltiplicando il valore medio annuo di concentrazione di Radon misurato in ogni locale per il numero medio di ore, che ogni lavoratore ha dichiarato di trascorrervi, si ottiene una valutazione dell'esposizione media cumulata nel semestre di osservazione espressa in  $\text{Bq/m}^3 \cdot \text{h}$ .

Utilizzando poi un apposito fattore di conversione [Sohrabi M., 1997], che tiene conto delle quantità di gas e di particolato inalati, che determinano l'irradiazione ai bronchi e ai polmoni, è stato infine valutato l'equivalente di dose efficace dovuto all'esposizione al Radon nei luoghi di lavoro. E' opportuno tenere presente che tali stime sono affette da incertezze, peraltro non eliminabili, legate da un lato alle misure e ai dati raccolti e dall'altro alle ipotesi ed ai modelli utilizzati nel ricavare i fattori di conversione che permettono di passare dalla concentrazione di Radon all'equivalente di dose efficace.

Andando a focalizzare l'attenzione sui valori di concentrazione annuale di Castrovillari, si può notare come nessun locale superi come concentrazione di RAC il limite d'attenzione normativo di  $400 \text{ Bq/m}^3$  [D.lgs. 241/00].

Andando ad effettuare una prima panoramica sui dati relativi alle campagne di monitoraggio annuale (terzo ciclo) si osserva come, solo per il presidio di Mormanno si registrano dei valori che superano la soglia d'attenzione normativa. Per gli altri edifici monitorati nelle altre aree indagate, i valori sono nettamente inferiori, fatta eccezione per Castrovillari, che però restano al di sotto dei  $400 \text{ Bq/m}^3$ .

Andando invece, a calcolare la stima della dose si rileva come nessun locale monitorato presenta dei valori superiori ai  $3 \text{ mSv/anno}$  (Figura 6.32).

Nelle Tabelle 6.5, 6.6 e 6.7 sono mostrate le ore di permanenza effettiva, attraverso il quale si è ricavati il valore di dose annua riportato nella stessa. Si può osservare come sei locali presentano un valore superiore al limite d'attenzione (Tabella 6.4). Tali locali sono distribuiti nel presidio ospedaliero di Castrovillari e Mormanno e corrispondono a locali abbastanza frequentati.

Inoltre sono presenti, sempre come dati stimati, solo tredici locali hanno di poco superato i limiti di esenzione, il restante è esente. Va sottolineato che le ore di permanenza sono comunque relative, in quanto non associate ai singoli componenti del personale: si quel caso si entrerebbe nella dosimetria personale. Tali valori sono perciò indicativi per la salute pubblica del personale frequentante tali locali.

**Tabella 6.5** – Equivalente di dose annuale relativo ai presidi dell'Asl-2 Castrovillari e alle scuole di Castrovillari

Sigla locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	Permanenza effettiva [h/anno]	DOSE [mSv/anno]
CAS1A-1o	microbiologia	131.32	2000	<b>0.79</b>
CAS1A-2o	locale fotocopiatrice	73.40	100	0.02
CAS1A-3o	uff.magazzino economato	102.69	750	0.23
CAS1A-4o	dispensa emoteca	34.01	750	0.08
CAS1A-5o	stanza primario	247.12	2000	<b>1.48</b>
CAS1A-6o	archivio 2	63.01	250	0.05
CAS1A-7o	cucina	190.92	2000	<b>1.15</b>
CAS1A-8o	farmacia ufficio	48.88	2000	0.29
CAS1A-9o	deposito farmaci	64.54	2000	<b>0.39</b>
CAS1A-10o	deposito farmaci temporaneo	207.46	750	<b>0.47</b>
CAS1A-11o	spogliatoio uomini	99.49	250	0.07
CAS1A-12o	spogliatoio donne	89.67	250	0.07
CAS1A-13o	archivio seminterrato	262.42	250	0.20
CAS1A-14o	ria	332.92	2000	<b>2.00</b>
CAS1A-15o	Archivio (ex-Inam)	210.07	25	0.02
CAS1B-16s	Archivio 1	292.08	50	0.04
CAS1B-17s	Archivio 2	240.61	50	0.04
CAS1B-18s	biblioteca (bagno/deposito)	310.07	750	<b>0.70</b>
CAS1B-19s	biblioteca (sala lettura)	173.64	1000	<b>0.52</b>
CAS1C-20s	biblioteca	61.39	900	0.17
CAS1C-21s	lab. CAD-meccanica	156.07	1000	<b>0.47</b>
CAS1C-22s	lab. elettrico	69.21	50	0.00
CAS1D-23s	deposito-archivio	232.40	70	0.01
MR1-1o	archivio1	308.82	1250	<b>1.16</b>
MR1-2o	ufficio archivio	363.84	1250	<b>1.36</b>
MR1-3o	refettorio	123.31	1500	<b>0.55</b>
MR1-4o	sala convegni	580.43	37.5	0.07
MR1-5o	archivio 2	86.95	1250	<b>0.33</b>
MR1-6o	deposito	871.46	50	0.13
MR1-7o	spogl. cucina	960.57	650	<b>1.87</b>
LU1-1o	farmacia	63.41	2000	<b>0.38</b>
LU1-2o	corridoio 1	16.54	250	0.01
LU1-3o	corridoio 2	24.45	250	0.02
LU1-4o	archivio	44.75	250	0.03
LU1-5o	archivio ristrutturato	25.19	2000	0.15
LU1-6o	sala mortuaria	27.77	300	0.02
LU1-7o	corridoio 3	22.09	250	0.02
LU1-8o	deposito	12.73	250	0.01
SM1-1o	attesa obitorio	170.51	50	0.03
SM1-2o	spogliatoio uomini	67.95	250	0.05
SM1-3o	palestra	60.67	250	0.05
SM1-4o	farmacia	57.09	1500	0.26
SM1-5	dietista	57.65	2050	<b>0.35</b>
SM1-6o	cucina	36.48	3000	<b>0.33</b>
SM1-7o	deposito cucina	73.50	250	0.01

**Tabella 6.6** – Equivalente di dose annuale relativo all'Asl-4 Cosenza e al liceo "Scorza"

Sigla locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	Permanenza effettiva [h/anno]	DOSE [mSv/anno]
CS1A-1o	magazz. (centro trasfus.)	22.62	150	0.01
CS1A-2o	centro trasf. prelievo (don.)	13.10	2000	0.08
CS1A-3o	spogl.(area lav..)	17.27	150	0.01
CS1A-4o	magazzino	31.12	100	0.01
CS1A-5o	spogl. donne (area lav.)	22.68	150	0.01
CS1A-6o	lavanderia	61.49	2000	<b>0.37</b>
CS1A-7o	magazz. economato	25.13	2000	0.15
CS1A-8o	deposito 1 (ditta pulizia)	39.54	50	0.01
CS1A-9o	deposito 2 (ditta pulizia)	20.07	1500	0.09
CS1A-10o	falegnameria (spogl.)	30.08	400	0.04
CS1A-11o	ufficio ticket	65.68	2000	<b>0.39</b>
CS1A-12o	ambulatorio oculistico	45.74	200	0.03
CS1A-13o	farmacia (deposito)	41.96	2000	0.25
CS1A-14o	bagno spogliat. (farmacia)	68.06	1000	0.20
CS1A-15o	corridoio (sotto pediatr.)	40.24	50	0.01
CS1A-16o	archivio deposito	138.44	40	0.02
CS1A-17o	ambulatorio chirurgia	28.44	2000	0.17
CS1A-18o	archivio clinico	53.42	2000	<b>0.32</b>
CS1A-19o	archivio clinico 1	29.97	2000	0.18
CS1A-20o	archivio clinico 2	52.45	2000	0.31
CS1A-21o	archivio clinico 3	89.87	20	0.01
CS1A-22o	centro sterilizzaz.	11.30	3000	0.10
CS1A-23o	archivio rianimazione	29.31	150	0.01
CS1B-24o	uff. tecnico	17.65	1500	0.08
CS1B-25o	archivio	74.44	1500	<b>0.33</b>
CS1C-26s	archivio	33.32	72	0.01
CS1C-27s	lab. Geofisica	111.78	1000	<b>0.34</b>
CS1C-28s	ripostigl. magazz.	21.40	30	0.002
RO1-1	archivio 1	81.27	360	0.09
RO1-2	archivio 2 (uff.)	55.74	2000	<b>0.33</b>
RO1-3	stanza primario (radiologia)	26.56	2000	0.16
RO1-4	corridoio radiologia	19.35	380	0.02
RO1-5	stanza caldeista	16.94	300	0.02
RO1-6	stanza primario (analisi)	20.10	1500	0.09
RO1-7	sala prelievi	16.55	2000	0.10
RO1-8	spogl. uomini lab.analisi	11.19	37.5	0.00
RO1-9	antibagno dipend. (mensa)	25.46	365	0.03
RO1-10	bagno mensa	31.25	50	0.005

Tabella 6.7 – Equivalente di dose annuale relativo all'area Silana

Sigla locale	Ambiente monitorato	RAC [Bq/m <sup>3</sup> ]	Permanenza effettiva [h/anno]	DOSE [mSv/anno]
SGFA6-1o	cucina reparto dialisi	73.86	340	0.08
SGFA6-2o	obitorio	198.47	250	0.15
SGFA6-3o	endoscopia	118.61	580	0.21
SGFA6-4o	magazzino	89.43	500	0.13
SGFA6-5o	stanza elettricisti	35.41	100	0.01
SGFA6-6o	stanza primario (Dott. Perfetti)	101.16	2000	<b>0.61</b>
SGFA6-7o	neferometria	23.55	2000	0.14
SGFA6-8o	capo sala reparto dialisi	79.31	2000	<b>0.48</b>
SGFB6-9s	bagno p. sott.	52.98	50	0.01
SGFB6-10s	bagno p. semint..	59.26	50	0.01
SGFC6-11s	bagno aula magna (deposito)	415.76	20	0.02
SGFC6-12s	bagno p.t.	481.40	20	0.03
SGFD6-13s	bagni palestra	159.28	50	0.02
SGFD6-14s	accesso cucina	87.34	1375	<b>0.36</b>
SGFE6-15s	stanza caffè	183.91	830	<b>0.46</b>
SGFE6-16s	bagno cuoca	138.29	360	0.15
SGFF6-17s	magazzino	98.82	1650	<b>0.49</b>
SGFF6-18s	bagno (deposito)	68.42	150	0.03
SGFF6-19s	aula magna	117.96	830	0.29
SGFF6-20s	lab. N.3	89.43	1650	<b>0.44</b>
SGFG6-21s	sala medica	266.32	50	0.04
SGFG6-22s	spogliatoio	111.01	50	0.02
SGFH6-23s	bagno palestra	64.17	20	0.00
SGFH6-22s	stanza dep. Materiale Elettorale	149.77	20	0.01
SGFH6-25s	Stanza vicino ascensore	188.52	20	0.01
SGFI6-26s	liceo psicopedagico	83.02	830	0.21
SGFL6-27s	Scuola media Marconi	190.66	20	0.01
SGFM6-28s	liceo scientifico	54.22	290	0.05
SGFN6-29s	Scuola materna Olivaro	54.22	380	0.06
SGFO6-30s	scuola elementare Casa Amato	42.23	120	0.02
SGFP6-31s	scuola elementare C. Alvaro	47.81	30	0.00
SGFQ6-32s	Scuola elementare Olivaro /Saltante	354.79	290	<b>0.31</b>
SGFR6-33s	Scuola materna S. Francesco (Bacile)	357.59	1660	<b>1.78</b>
SGFS6-34s	scuola elementare Dante Alighieri	52.05	200	0.03
SGFT6-35sc	stanza attività produttive	88.03	1820	<b>0.48</b>
SGFT6-36sc	archivio	332.67	50	0.05
SGFT6-37sc	magazzino operai	130.99	100	0.04
SGFU6-38b	biblioteca	397.18	1050	<b>1.25</b>
SGFU6-39b	biblioteca post mediatica	334.94	1050	<b>1.06</b>
CSI6A-1o	scuola elementare F.lli Pugl.	420.22	20	0.03
CSI6B-2o	Comune	607.31	48	0.09
CSI6C-3o	scuola media	79.51	300	0.07
CAC6-5s	scuola media	111.95	20	0.01
CER6A-6s	comune	141.58	2000	<b>0.85</b>
CER6B-7s	scuola elementare	81.28	2000	<b>0.49</b>
CER6C-8s	scuola media	268.46	290	0.23
CER6D-8s	scuola materna	102.16	580	0.18

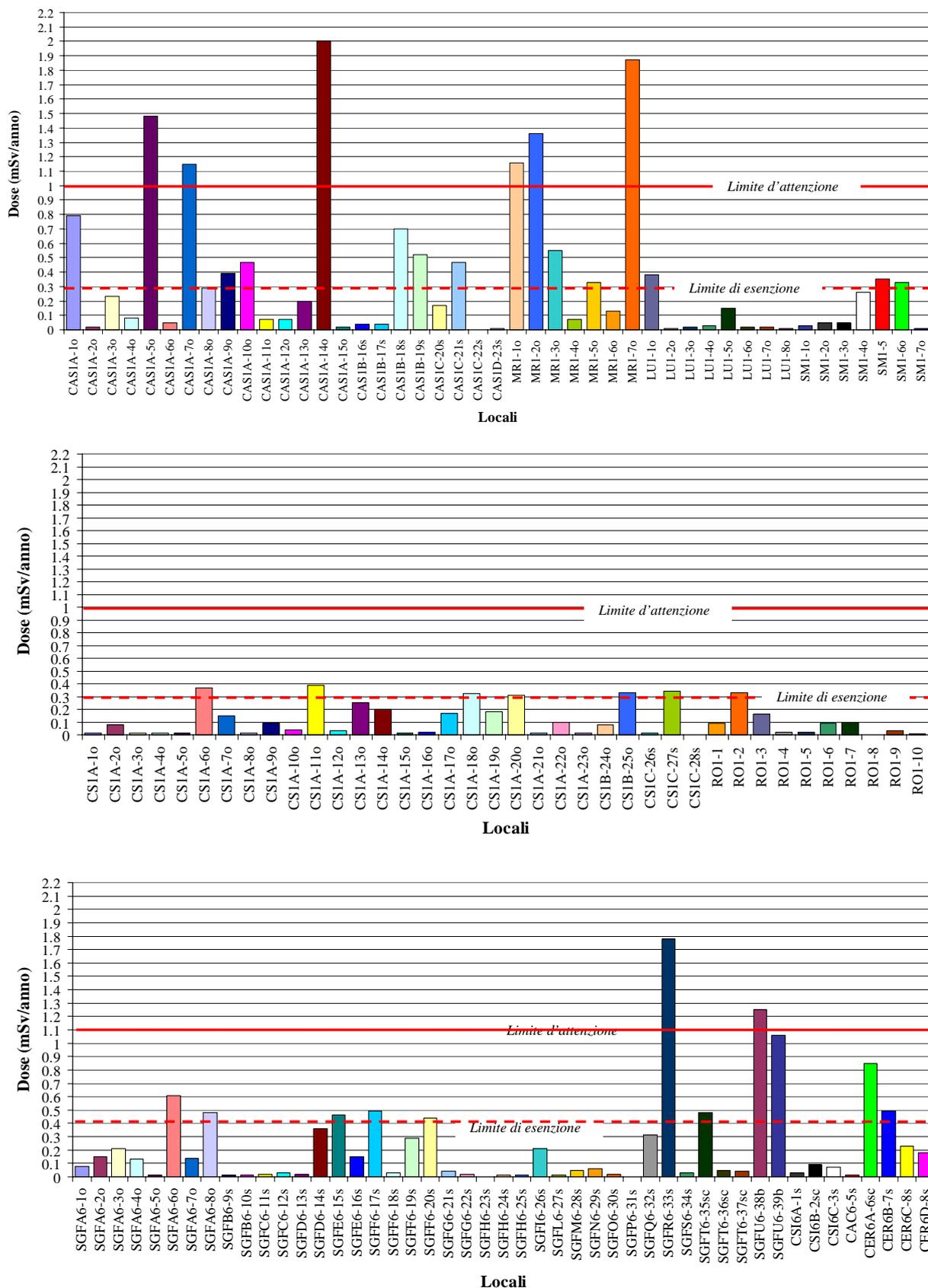


Figura 6.32 – Stima della dose equivalente in tutte i locali monitorati, con evidenziazioni con linea rossa i limiti normativi [D.Lgs.241/00]

## **CAPITOLO VI**

### **CARATTERIZZAZIONE CHIMICO-MINERALOGICA DEI CAMPIONI DI PAVIMENTO E DI ROCCIA**

Al fine di avere informazioni generali sui contributi di emissioni di radioattività dei materiali costituenti gli edifici, sono stati prelevati, in maniera non sistematica, campioni dei pavimenti (CAS1, LU1, LU2, SM1, SGF1, SGF2, CSTS1, CSTS2) più rappresentativi degli ambienti monitorati e dove possibile, come nel caso dell'ospedale di Mormanno e San Giovanni in Fiore, un campione di affioramento roccioso (MR1, SGF9, SGF10, SGF11, SGF12). Inoltre è stato scelto un campione rappresentativo di roccia granitica, sulla quale è stata condotta un'analisi radiometrica, con spettrometro gamma al germanio iperpuro.

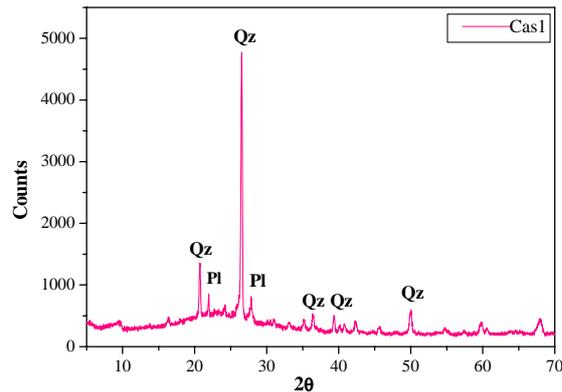
L'osservazione al microscopio elettronico effettuata con un detector per gli elettroni retrodiffusi (BSE), rivela la presenza di numerosi minerali pesanti, facilmente riconoscibili per il loro colore decisamente più chiaro dei minerali circostanti. Com'è noto, quando si osserva un materiale con un rivelatore per elettroni retrodiffusi, la tonalità di grigio è funzione del peso atomico medio del materiale in esame. Tanto più questo sarà elevato, tanto più il colore tenderà al grigio-chiaro o bianco.

Con un buon detector per elettroni retrodiffusi è possibile, in teoria, apprezzare differenze cromatiche dovute a pesi atomici differenti di una unità. Secondo molti studi, in condizioni ideali questa tecnica permette analisi microchimiche puntuali estremamente accurate.

Tale riconoscimento è stato preceduto da un'iniziale determinazione delle fasi mineralogiche presenti (>5%) attraverso un'analisi diffrattometrica a raggi X.

#### **7.1 CAMPIONE CAS1**

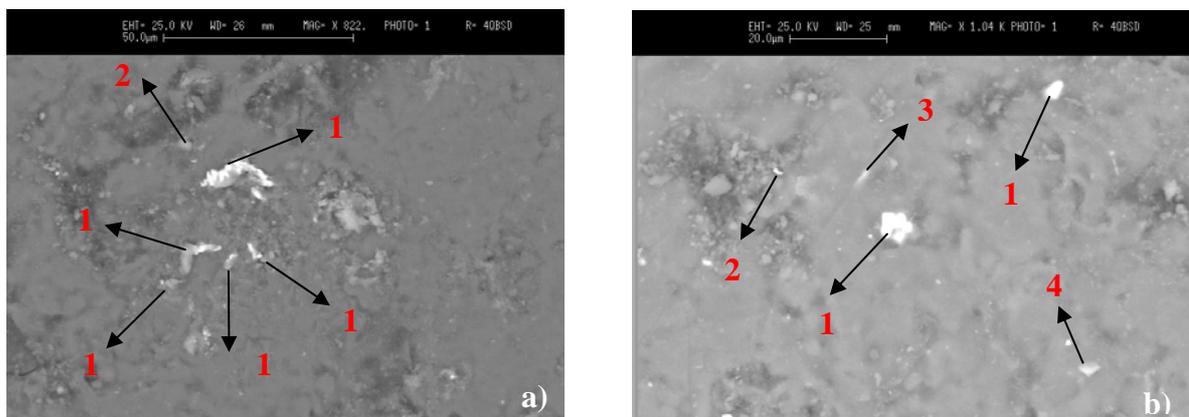
Il campione CAS1 è costituito da un grès porcellanato ed è relativo al pavimento più rappresentativo dell'ospedale di Castrovillari e Mormanno, della scuola Via Difesa e la scuola media di Castelsilano (Vedi Tabelle in Appendice C). Dall'analisi diffrattometrica RX, riportata in Figura 71, esso risulta essere costituito da quarzo (Qz) e plagioclasio (Pl).



**Figura 71** – Spettro RX del campione CAS 1

All'interno della pasta di fondo quarzo-feldspatica, i minerali pesanti radioattivi, riconosciuti al SEM, sono rappresentati da cristalli di apatite (cristallo 2) associati ad ossidi di ferro (cristallo 1) e a cloruri (parte grigio più chiaro intorno agli ox-Fe) (Figura 72a).

Come si può osservare in Figura 7.2b si è, inoltre, rilevata la presenza di cristalli allungati e tozzi di probabile monazite povera in terre rare, cristallo 2, e di silicati di zirconio ad abito irregolare, cristallo 1, associati ad ossidi di ferro e di titanio, cristallo 3, e cromite, cristallo 4.

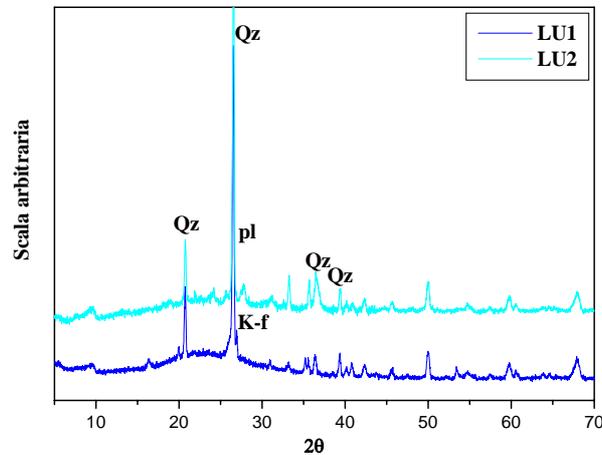


**Figura 7.2**– Micrografia ad elettroni retrodiffusi del campione CAS1: a) associazione di apatite (2) e ossidi di ferro (1); b) associazione di monazite (2), silicati di zirconio (1), ossidi di ferro, di titanio (3) e cromite (4)

## 7.2 CAMPIONI LU1-LU2

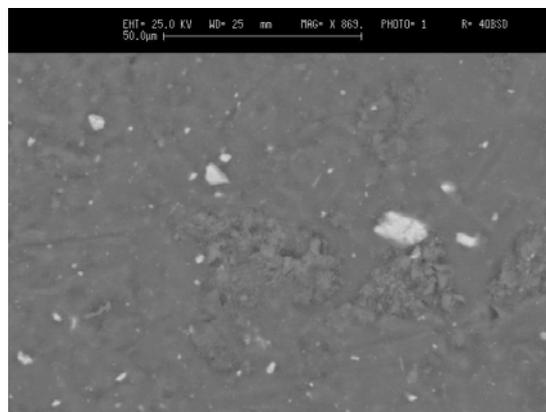
Presso l'ospedale di Lungro sono stati prelevati due campioni di pavimento più rappresentativi dell'edificio, uno di mattone ceramico (LU1) e l'altro di grés porcellanato (LU2).

In seguito all'analisi diffrattometrica a raggi X sono state riconosciute le seguenti fasi mineralogiche: quarzo (Qz) e k-feldspati (k-f) per il campione LU1 e quarzo (Qz) e plagioclasio (pl) per il campione LU2 (Figura 7.3).



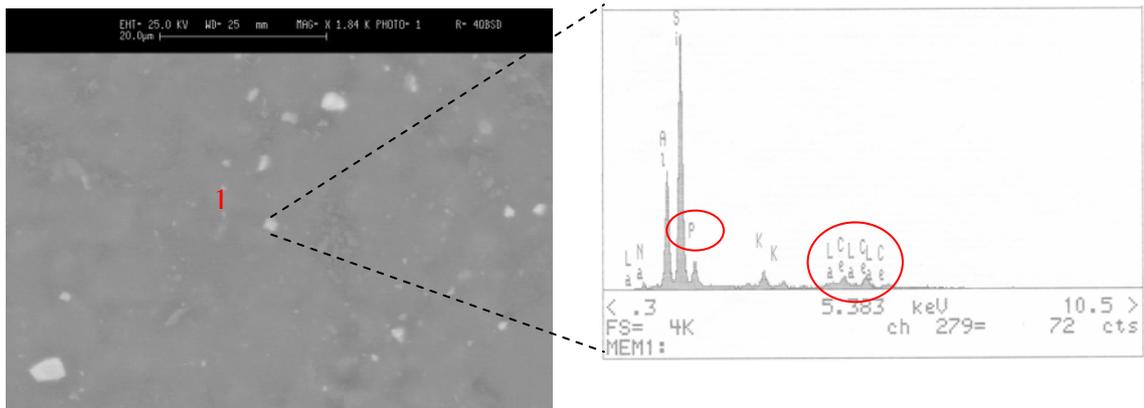
**Figura 7.3** – Spettro RX dei campioni LU1 e LU2

Dalla successiva osservazione al microscopio elettronico, immersa nella pasta di fondo quarzo- kfeldspatica del campione LU1, si riconoscono associazioni di cristalli di zircone, ad abito regolare e a forma allungata (Figura 7.4), e di probabili cristalli di monazite povera in terre rare (Figura 7.5).

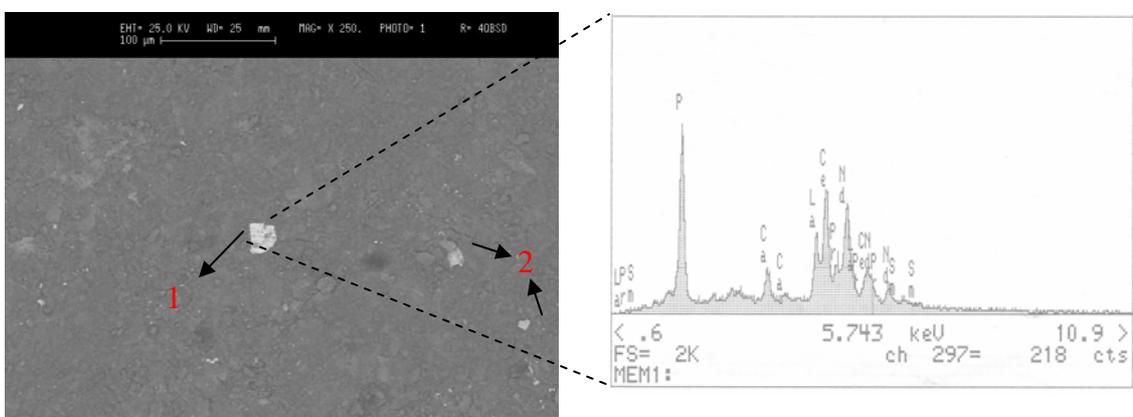


**Figura 7.4** – Micrografia (BSE) del campione LU 1: associazione di zirconi.

Per quanto riguarda il campione LU2 all'interno della pasta di fondo quarzo-feldspatica, si riconoscono probabili associazioni di monazite ricca in terre rare (1), cloruri, ossidi di ferro (2) e cristalli di ilmenite (figura 7.6).



**Figura 7.5**– Micrografia ad elettroni retrodiffusi del campione LU1: associazione di monazite con relativo spettro EDS (1) e di zirconi.

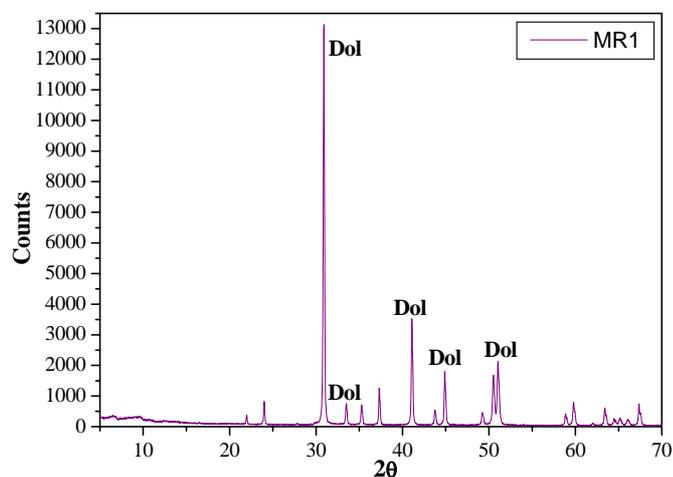


**Figura 7.6**– Micrografia ad elettroni retrodiffusi del campione LU2: associazione di monazite (1) e con relativo spettro EDS e di ossidi di ferro (2).

### 7.3 CAMPIONE MR1

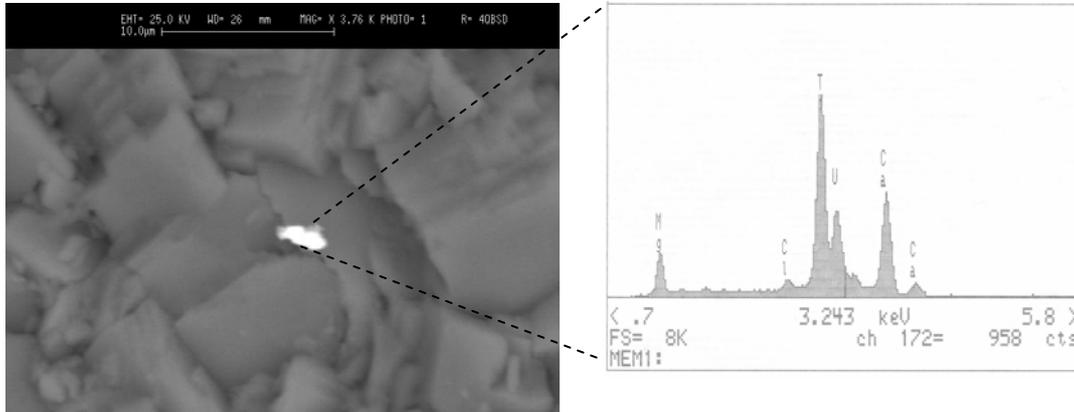
Tale campione è stato prelevato in un affioramento adiacente l’ospedale di Mormanno.

Da un’osservazione macroscopica risulta essere una dolomia, confermata dalla successiva analisi diffrattometrica a raggi X (Figura 6.7).

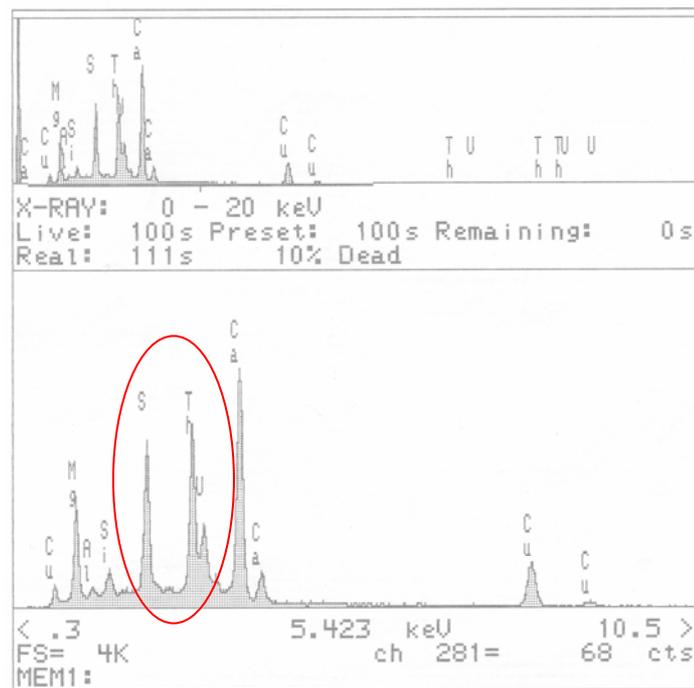


**Figura 7.7**– Spettro RX del campione MR1

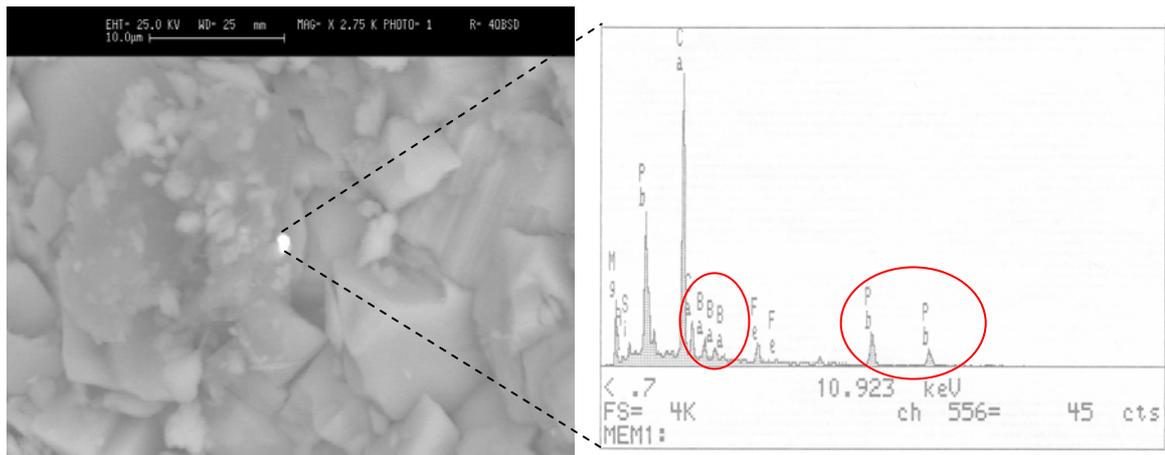
La successiva analisi di microscopia elettronica ha messo in evidenza la presenza di cloruri di torio e uranio, in Figura 7.8 di colore bianco, di solfato di uranio e torio (spettro in Figura 7.9 ), ossidi di piombo e bario, in Figura 7.10, ulteriori cristalli di ossidi di zinco e di ferro (Figura 7.13) e cloruri di potassio.



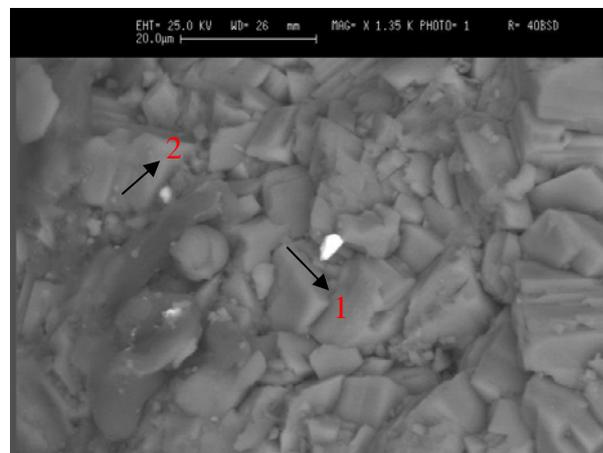
**Figura 7.8** – Campione MR1: micrografia SEM e relativo spettro EDS di un cloruro di torio e uranio (cristallo visualizzato in bianco)



**Figura 7.9** – MR1:Spettro EDS del solfato di torio e uranio



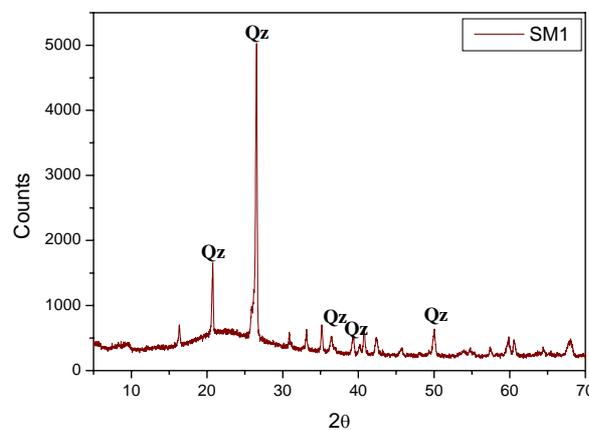
**Figura 7.10** – Campione MR1: micrografia SEM e relativo spettro EDS di un ossido di piombo e bario(cristallo visualizzato in bianco)



**Figura 7.11** – Micrografia SEM del campione MR1: ossidi di zinco (1) e di ferro(2)

#### 7.4 Campione SM1

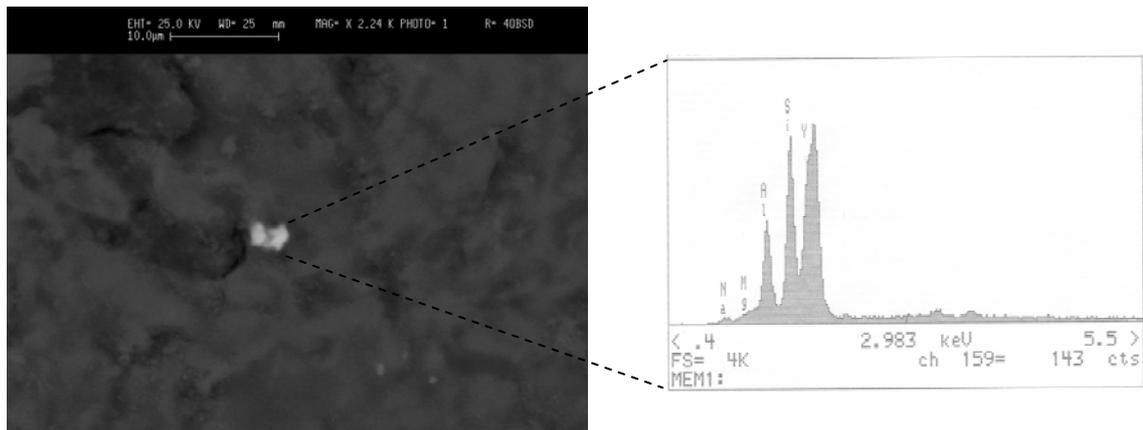
Il campione di materiale ceramico più rappresentativo dell'ospedale di San Marco Argentano è costituito da una pasta di fondo quarzo-feldspatica (spettro di Figura 7.12)



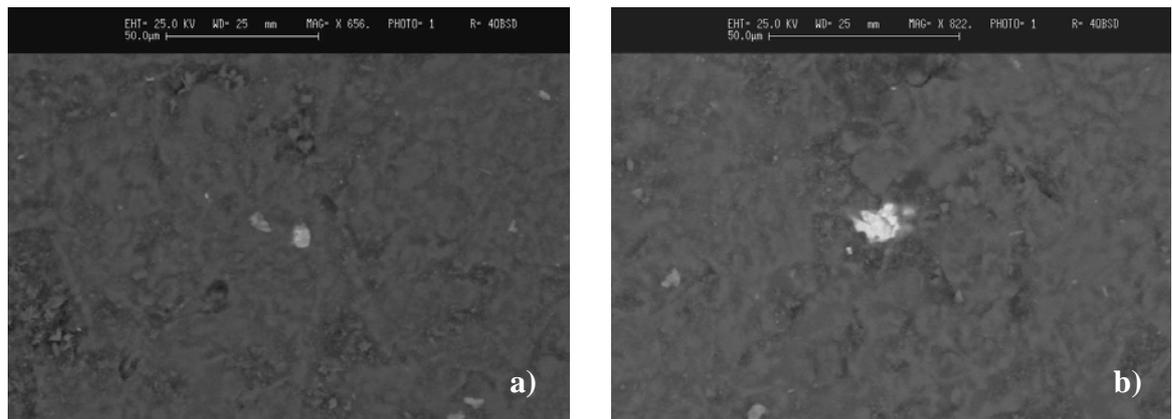
**Figura 7.12**- Spettro RX del campione SM1

Dalla successiva osservazione al microscopio elettronico si riconoscono probabili associazioni silicati di P, Mg e Y (Figura 7.13), di probabili monaziti ricche in terre rare (Figura 6.14), fosfato di ittrio (xenotime) con quantità di terre rare da minime a nulle, fosfato di bario, ossidi di ferro e titanite.

Inoltre sono presenti cristalli di zircone ad abito eudrale fratturato di dimensioni di circa 20 $\mu$ m (Figura 7.15).



**Figura 7.13** – Micrografia SEM del campione SM1 di un silicato di P, Mg e Y e relativo spettro EDS



**Figura 7.14** - Micrografia SEM del campione SM1: a) monazite; b) xenotime



**Figura 7.15**– Micrografia SEM del campione SM1: zircone (1) e illite (2)

## 7.5 CAMPIONI SGF1, SGF2 E SGF3

Trattasi di un campione di marmo, costituito da una componente carbonatica. Infatti dallo spettro diffrattometrico, si denota la componente della calcite (Figura 7.16).

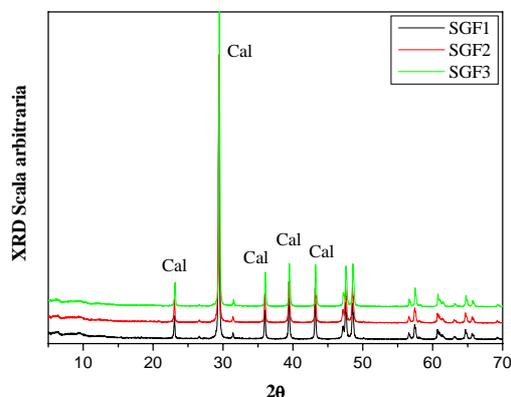


Figura 7.16 – Spettro RX del campione di marmo

Da un'osservazione al microscopio elettronico, si possono riconoscere in una pasta all'interno di una pasta di fondo carbonatica ( $\text{CaCO}_3$ ), alcuni cristalli di barite, come si può vedere in Figura 7.17

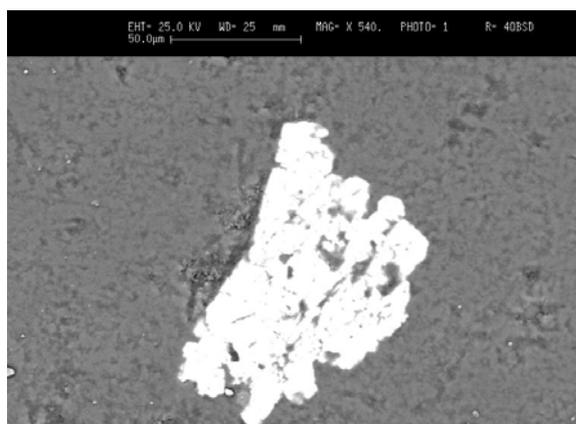
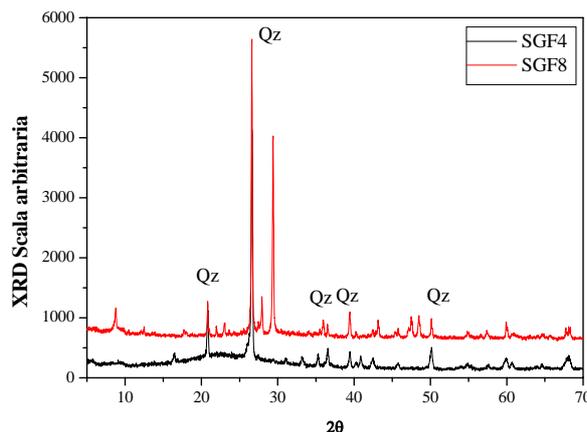


Figura 6.17 – Micrografia SEM del campione SM1:cristallo di barite,

## 7.6 CAMPIONE SGF4 E SGF8

Presso due scuole (liceo scientifico e scuola elementare “Dante Alighieri”) di San Giovanni in Fiore sono stati prelevati due campioni di pavimento più rappresentativi dell'edificio, entrambi di mezzo segato (SGF4, SFG8). Tale pavimentazione si riscontra anche in altri edifici non solo di San Giovanni e ma anche del presidio ospedaliero di Cosenza (vedi tipologia di pavimentazione nelle Tabelle in Appendice C)

In seguito all'analisi diffrattometrica a raggi X sono state riconosciute le seguenti fasi mineralogiche: quarzo (Qz) e k-feldspati (k-f) per il campione SGF4 e quarzo (Qz) e plagioclasio (pl) per il campione SFG8 (Figura 7.18).

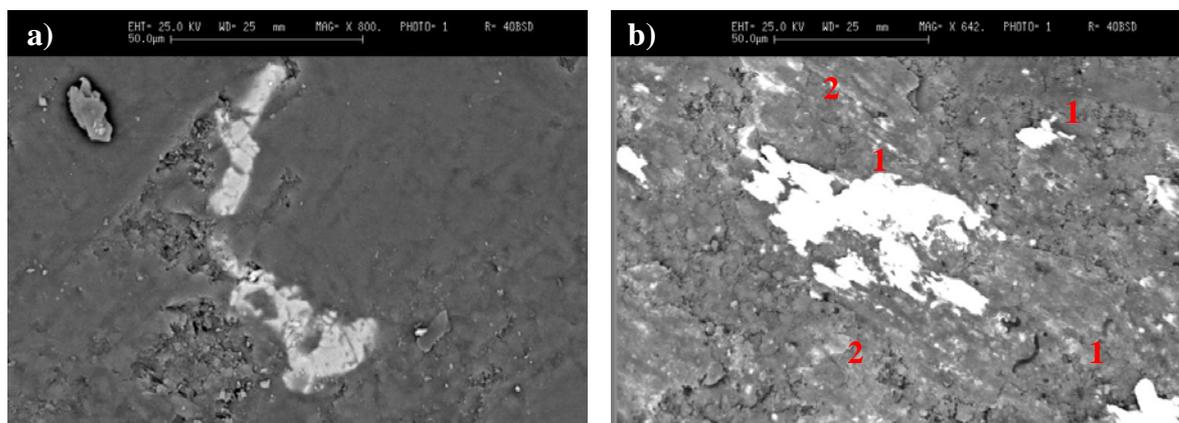


**Figura 7.18**– Spettro RX del campione di mezzosegato di marmo

Da un'osservazione al microscopio elettronico con detector ad elettroni retrodiffusi sono stati per lo più riconosciuti ossidi di ferro (Figura 7.19a).

Per quanto riguarda il campione SGF4, sono stati riconosciuti anche ossidi di Uranio e Thorio, (cristallo 1), e venature di barite (cristallo 2) come si può osservare in Figura 7.19b,

Solo tale campione di mezzosegato presentano tali associazioni di Uranio e torio nella loro mineralogia, negli altri campioni non ne sono stati riscontrati.

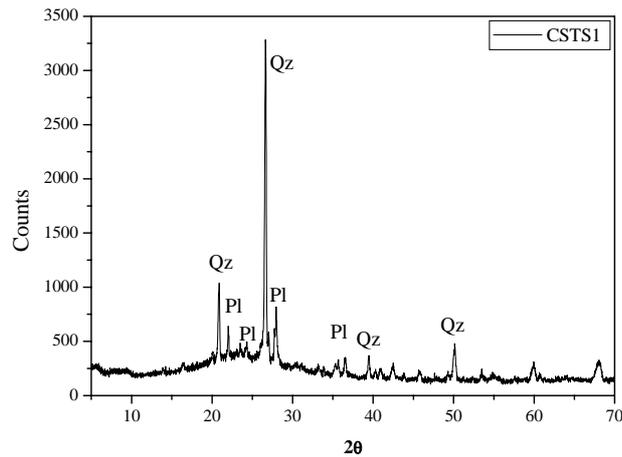


**Figura 7.19** – Associazione di ossidi di ferro (a) e associazioni di ossidi di Uranio e Torio associati a vene di barite in una pasta di fondosilico-carbonatica

## 7.7 CAMPIONE CSTS1

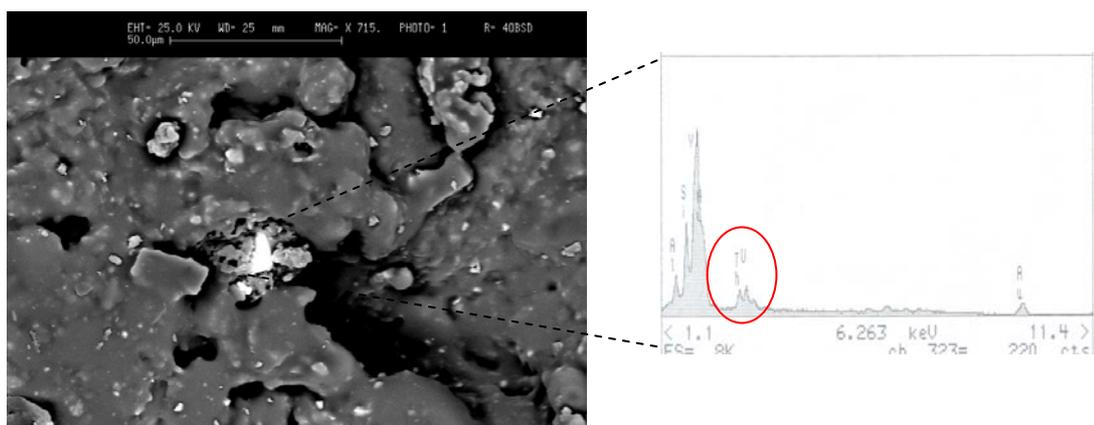
Il campione CSTS1 è un grès porcellanato, costituente il pavimento più rappresentativo della scuola media di Castelsilano (vedi Allegato C).

Dall'analisi diffrattometrica RX, uguale a quella riportata in Figura 7.20, risulta essere costituito da quarzo (Qz) e plagioclasio (Pl) prevalentemente di tipo albitico.

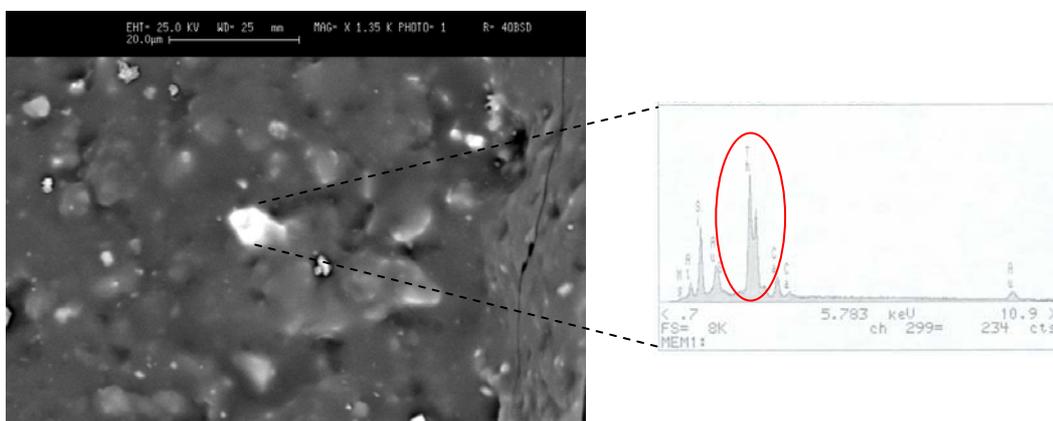


**Figura 7.20** – Spettro RX del campione di gres CSTS1

All'interno della pasta di fondo quarzo-feldspatica, i minerali pesanti radioattivi, riconosciuti al SEM, sono rappresentati da interessanti associazioni di cristalli silicato di ittrio con presenza di Uranio e Thorio (Figura 7.21 e 7.22), da cristalli di zircone (cristallo 1 in Figura 7.23) e da cristalli di silicato di zircone (cristallo 2 in Figura 7.23).



**Figura 7.21** – Micrografia SEM del campione CSTS1 di un silicato di Y e Th, con relativo spettro EDS

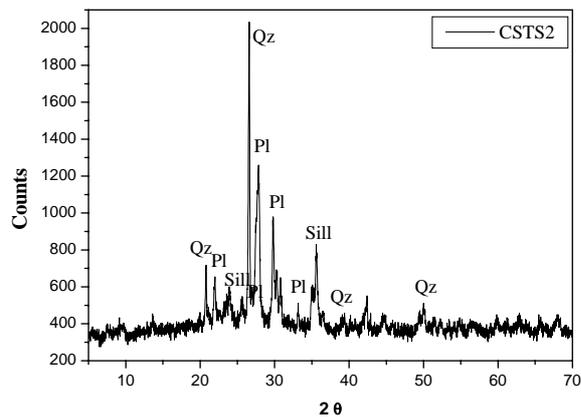


**Figura 7.22** – Micrografia SEM del campione CSTS1 di un silicato di Y e Th, con relativo spettro EDS

## 7.8 CAMPIONE CSTS2

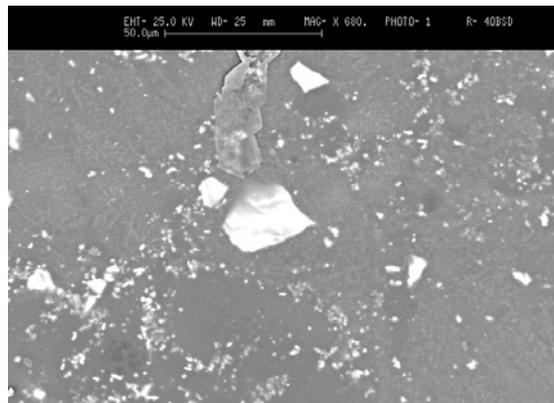
Il campione CSTS2 è una piastrella ceramica smaltata, costituente il tipo di pavimentazione della scuola elementare di Castelsilano e altri edifici come si può evincere dall'Allegato C.

Da un'analisi diffrattometrica si riconoscono le seguenti fasi mineralogiche: quarzo (Qz), Plagioclasio (Pl) e sillimanite (Sill) (Figura 7.24).



*Figura 7.24 – Spetto RX del campione CSTS2*

Da un'osservazione al microscopio elettronico si riconosce un numero rilevante di cristalli di zirconio in Figura 7.25. Evidentemente nella realizzazione di tali piastrelle sono state utilizzate sabbie zirconifere [ ].



*Figura 7.25 – Cristalli di zirconio(in bianco) immersi in una pasta di fondo quarzo-feldspatica*

## 7.9 CAMPIONE SGF9, SGF10, SGF11 E SGF12

Tali campioni sono stati prelevati rispettivamente in un affioramento adiacente l'Istituto d'Arte (SGF9), vicino l'anfiteatro dell'Abbazia (SGF10), vicino l'istituto I.T.C.G. (SGF11) e il liceo psicopedagogico (SGF12).

Da prima osservazione macroscopica risultano essere graniti, confermata dalla successiva analisi diffrattometrica a raggi X (Figura 7.26).

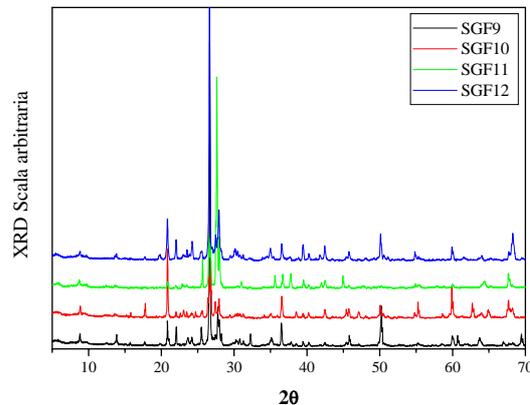


Figura 7.26 – Spettro RX dei campioni di roccia affiorante a S.Goivanni in Fiore

La successiva analisi di microscopia elettronica con elettroni retrodiffusi ha messo in evidenza la presenza di zirconi e silicati di zirconio, in Figura 7.27a di colore bianco, cristalli di silicati di Calcio con terre rare (REE) (Figura 6.27b) di apatite (Figura 7.28a), barite (Figura 7.28b) e ossidi di zinco e di ferro.

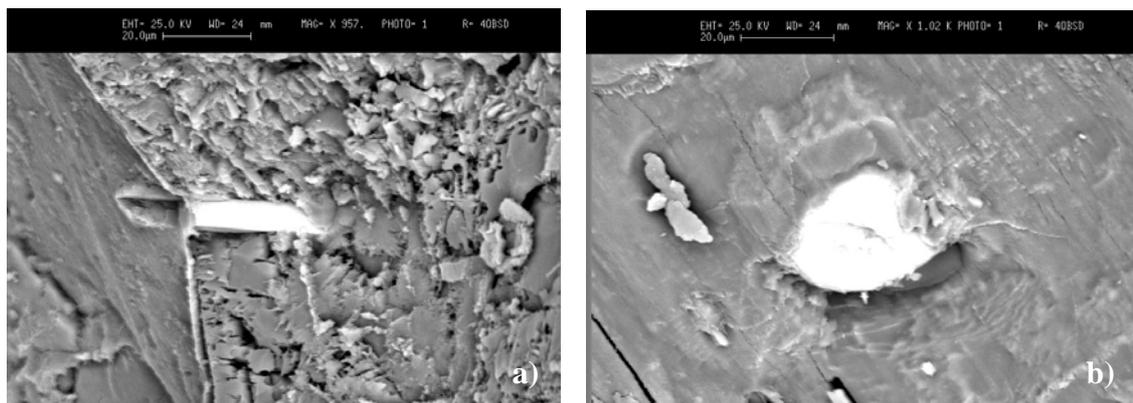


Figura 7.27 – Micrografia SEM di un cristallo di zirconio (a) e di un silicato di zirconio incluso in un minerale di biotite (b).

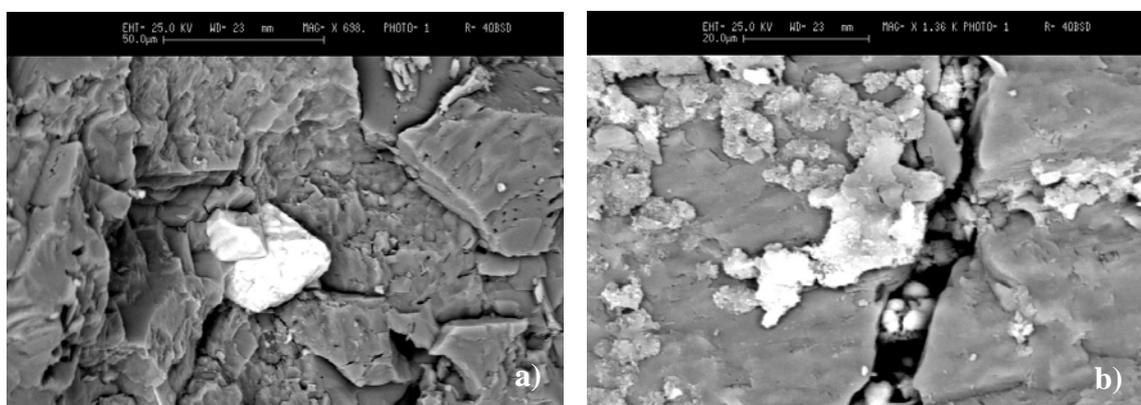


Figura 7.28 – Micrografia Sem di un cristallo di apatite(a) e di barite (b)

## CONCLUSIONI

I risultati ottenuti in questo lavoro di ricerca rappresentano non solo strumenti informativi per un'adeguata programmazione e pianificazione urbanistica del territorio, indispensabili per evitare in futuro, o attuare nel presente, eventuali opere di bonifica di edifici pubblici e/o privati, ma rappresentano un contributo conoscitivo di analisi e di studio, dei differenti fattori che contribuiscono al problema Radon.

Tale lavoro di ricerca non si propone di dare delle soluzioni tecniche, ma di fornire dei dati utili al progettista per eventuali piani regolatori, per l'ottimizzazione e la localizzazione degli edifici, nonché la divisione dei locali all'interno di questi, la loro esposizione in base alla destinazione d'uso, il rapporto finestre/pavimentazione e ottimizzazione degli impianti tecnologici degli edifici.

*Il Radon è un gas pericoloso, dal quale però si ci può difendere! Per cui non deve far paura!*

L'insieme dei risultati sperimentali derivanti dalla campagne di misure effettuate, permette di trarre le seguenti conclusioni:

### Concentrazione dell'attività di radon : Sintesi dei risultati ottenuti:

Dai risultati ottenuti e dalla successiva analisi e rielaborazione della banca dati ottenuta si può riassumere che:

- nell'area di Castrovillari si rileva una tendenza stagionale non lineare, e si registrano concentrazioni medie annuali di  $\sim 160.58 \text{ Bq/m}^3$ , presentando nelle globalità valori di concentrazione di attività di Radon inferiori al limite normativo di  $500 \text{ Bq/m}^3$ , anche se si registra un maggior accumulo in alcuni locali, che non sempre corrispondono a quelli meno frequentati. In particolare nel locale CAS1A-5o (stanza primario) è stato monitorato, con tecniche attive, con l'alphaguard per 5 giorni. Ciò ha messo in evidenza come si raggiunge picchi elevati fino a  $900 \text{ Bq/m}^3$  dovuti al connubio tra accumuli notturni, variabili climatiche ed ulteriori cause intrinseche non definibili.

Per quanto riguarda, invece, le scuole monitorate, una in particolare (l'istituto tecnico commerciale e per geometri) presenta dei valori alti, prossimi al valore di attenzione annuo. Tale differenza di concentrazioni è dovuto al contesto geologico. Infatti, nonostante tutti gli edifici monitorati rispetto all'istituto tecnico per geometri, poggiato su rocce sedimentarie quali sabbie conglomeratiche, tale istituto è ai piedi di un versante costituito prevalentemente da dolomie, che contribuiscono a tale incremento riscontrato.

- nell'area di Mormanno e Lungro si registra un andamento stagionale non completamente lineare legato all'impianto di condizionamento, dalla tipologia strutturale e dalle attività umane. In particolare le concentrazioni annuali nell'area di Mormanno risultano essere

superiori a quello che è il limite di attenzione normativo pari a  $400 \text{ Bq/m}^3$ , anche se nel particolare solo tre locali superano effettivamente il limite normativo di  $500 \text{ Bq/m}^3$ ; mentre nell'area di Lungro si registrano concentrazioni annuali nettamente inferiori al limite normativo;

- i risultati medi ottenuti nelle aree di San Marco Argentano, Cosenza, Rogliano sono nettamente inferiori al limite d'attenzione annuo e presentano un andamento stagionale lineare;
- nell'area Silana (San Giovanni in Fiore, Castelsilano, Caccuri e Cerenzia), mostrano valori di attività di Radon da non sottovalutare, di particolare attenzione.

In particolare gli edifici monitorati A San Giovanni in Fiore, mostrano valori al limite della soglia d'attenzione normativa [D.Lgs 241/00]. Fanno eccezione due chiese analizzate (l'Abbazia Firenze e la Chiesa Matrice, dove si riscontrano valori significativi annuali che superano il limite normativo di  $500 \text{ Bq/m}^3$  [D.Lgs 241/00], e picchi di accumulo trimestrali e semestrali da non trascurare.

Nel comune di Castelsilano solo il locale del municipio supera i  $500 \text{ Bq/m}^3$ .

Concludendo si ha che i risultati ottenuti hanno evidenziato come la geologia gioca un ruolo fondamentale all'accumulo della concentrazione indoor di Radon, ma allo stesso tempo questa non è una condizione sufficiente. La concentrazione di radon misurata dipende principalmente dalla litologia, ma varia da edificio a edificio per le diverse tipologie dei singoli ambienti confinati e di costruzione, dalla diversa esposizione (venti), dalla presenza di eventuali intrusioni nel suolo, e dal grado di alterazione della roccia.

I risultati delle diverse campagne di monitoraggio non sempre hanno mostrato un accordo con le previsioni di rischio, ricavate con lo studio della geologia locale. E' stato evidenziato infatti che zone come Rogliano con attitudine di rischio alto, poiché in un contesto geologico metamorfico, hanno mostrato una bassa tendenza di concentrazione.

Altre zone come l'istituto tecnico e per Geometri a Castrovillari, per le quali le previsioni di rischio facevano supporre bassi valori hanno riportato valori non in accordo.

E' stato evidenziato nella maggior parte dei casi studiati come in uno stesso edificio, quindi su uno stesso contesto geologico, si trovano locali che presentano tra loro concentrazioni di Radon completamente differenti e ancor più è possibile trovare singoli locali ad alto rischio. Esempio Nel caso dell'ospedale di Mormanno, dove mediamente i locali presentavano concentrazioni nettamente inferiori al limite normativo sono stati trovati locali ad alto rischio. Tutto ciò deve consolidare l'idea e il concetto che non esistono aree completamente esenti al pericolo Radon e che le previsioni possono essere efficaci solo studiando e associando in modo ponderale i diversi fattori come la geologia, la frequenza, la tipologia dell'edificio ecc.

Alcune misure puntuali in alcuni locali necessitano di ridurre le concentrazioni, facendole rientrare nei limiti normativi.

Si suggeriscono a tal fine interventi che possono essere anche solo l'apertura di finestre, laddove gli altri locali presentino concentrazioni minime nettamente inferiori, legate ad una loro migliore aerazione. Tali locali vanno comunque tenuti sempre sotto controllo, anche perché si potrebbero creare delle variazioni di pressione creando un "effetto camino".

Se nonostante questo non si dovessero avere dei decrementi delle concentrazioni si suggeriscono, sempre dopo un'analisi da parte del progettista, della possibilità di ventilazione dei vespai, o se questi non presenti, è possibile costruire uno o più pozzetti interrati anche lungo il perimetro esterno dell'edificio, utile all'aspirazione del gas Radon e alla sua incanalazione verso l'esterno dell'edificio.

### Stima della dose minima annua

La stima effettuata sulla dose media assorbita dal personale che lavorano nei locali monitorati delle diverse aree si mantengono inferiori al limite legislativo pari a 3mSv/anno. E' infatti stato osservato che, generalmente, ma non sempre, gli ambienti in cui le concentrazioni misurate sono più elevate sono caratterizzati da tempi di occupazione ridotti. Sono comunque presenti dei valori che superano il limite d'attenzione normativo pari a 1mSv/anno [D. Lgs. 241/00]. La maggior parte dei locali monitorati rientra nei limiti di esenzione.

Se si guardano i risultati ottenuti nell'Abbazia Firenze e nella Chiesa Matrice, nell'ottica del singolo valore e se si confronta tale dato col singolo utente, il valore va ridimensionato all'utilizzo dell'edificio. Per esempio la cripta, è principalmente ambiente di visita e non di celebrazioni religiose quindi il tempo di permanenza è relativamente basso, infatti ipotizzando un tempo di permanenza di 10 minuti che si ripete per 2-3 volte all'anno per una stessa persona, il valore della dose sarà nettamente inferiore rispetto ai limiti legislativi.

### Caratterizzazione chimico- mineralogica

- *Campioni di pavimento*

La caratterizzazione chimico- mineralogica dei vari campioni di pavimento, ha portato ad individuare, in tutti i campioni, una comune pasta di fondo quarzo- feldspatica, o carbonatica (marmi), all'interno della quale si riconosce in tracce la presenza di piccoli cristalli di minerali radioattivi accessori, come zircone, silicati di zircone e monazite, che localmente forniscono apprezzabili valori in ppm di concentrazioni di uranio. In alcuni casi sono stati riconosciuti anche minerali accessori contenenti Uranio e Torio.

- *Campione di affioramento roccioso*

Il valore medio di attività registrato presso l'ospedale di Mormanno e nel Comune di San Giovanni in Fiore, ha particolarmente attirato la nostra attenzione e per il quale si è ritenuto utile

eseguire un'indagine più approfondita che collegasse la radioattività ambientale con la geologia del luogo.

Per Mormanno è stato prelevato un campione affiorante vicino l'edificio monitorato, dalla cui analisi diffrattometrica a raggi X risulta essere una dolomia e la successiva analisi di microscopia elettronica evidenzia la presenza di tracce di torio e uranio combinati in cloruri e solfati. Si ricorda che in tale area affiorano anche rocce metamorfiche quali scisti. Pertanto il particolare dominio geologico (scisti-dolomie) giustifica, in prima analisi, la specifica concentrazione di radon misurata.

Per San Giovanni in Fiore è stato possibile effettuare oltre a tale caratterizzazione chimico-mineralogica, un'analisi spettrometrica di un campione di granito affiorante. Questo presenta valori elevati di radioemissività.

Va sottolineato che nel sud e in Calabria in particolare si dovrebbe esplicitare, innanzitutto, una maggiore funzione educativa del cittadino, e tutti gli edifici pubblici e privati dovrebbero essere sottoposti a monitoraggio,

Dai dati ottenuti si può affermare che il Radon disciolto nelle acque potabili non costituisce un rischio radiologico diretto per la popolazione. Tuttavia, sono stati misurati livelli anomali, localizzati perlopiù nella zona silana. Tali valori, pur non avendo di per sé rilevanza dosimetrica e quindi tantomeno sanitaria, possono però fungere da indicatori per la presenza di Radon nelle abitazioni. Sarebbe pertanto molto utile un proseguimento dei campionamenti di acqua negli altri comuni indagati, in modo da avere un quadro completo da cui poi, eventualmente, trarre delle indicazioni per la pianificazioni delle misure di Radon negli edifici.

*Dallo studio di ricerca si evince che:*

- Non è possibile prevedere solo da una lettura delle carte di attitudine al Radon l'effettivo "pericolo da inquinamento indoor da gas radon": è emerso infatti che microambienti, in contesti geologici con una scarsa attitudine al radon hanno riportato concentrazioni di gas radon elevati.
- Lo studio dell' inquinamento indoor difficilmente può essere generalizzato su larga scala come può essere fatto per problematiche ambientale di tipo outdoor.

E' vero che anche nel fenomeno inquinamento indoor contribuiscono variabili più esterne al contesto quali ad esempio le variabili meteorologiche, ma il loro effetto predominante non è diretto esse infatti agiscono in modo indiretto su altre variabili come, principalmente, il cambiamento delle abitudini d'uso dei microambienti. Ne consegue che ogni singolo ambiente va considerato come un caso a parte e studiato individualmente attraverso un'analisi sistematica e puntuale dei fattori che contribuiscono all'accumulo di gas radon. E' possibile individuare un approccio sistematico per la valutazione di rischio radon in microambienti che deve porre attenzione principalmente a due parametri predominanti:

- **tipologie strutturali:** dei microambienti come materiali da costruzione, presenza di tubazioni idrauliche, impianti di climatizzazione, aperture di areazioni ecc.

- **abitudine d'uso.**

Partendo dall'individuazione di queste variabile e attraverso un'analisi di esse in relazione al microambiente considerato è possibile intervenire attraverso azioni di contrasto per quanto attiene le abitudine d'uso e d'azione per quanto attiene la progettazione o la modificazione di caratteristiche strutturali dei locali.

Inoltre a termine delle analisi effettuate, si è cercato di elaborare una mappa del rischio Radon del territorio di San Giovanni in Fiore, attraverso analisi geostatistiche. Ciò non è stato possibile, in quanto, al contrario dell'outdoor, per l'inquinamento indoor da gas Radon, sono diversi e non assoluti, i parametri, che ne determinano e favoriscono la concentrazione.

Possibili sviluppi della ricerca

Il presente studio potrà essere collocato all'interno di un più ampio progetto di monitoraggio da condursi a livello regionale, in modo da infittire una mappa del rischio radon su scala locale, al termine del quale si potrà stabilire se i risultati ottenuti siano allineati con quelli medi della Regione Calabria o se evidenziano particolarità proprie delle aree esaminate.

E' auspicabile che in futuro, anche in Italia, si possa elaborare un modello di conversione che, tenendo conto della geologia specifica delle aree monitorate, del periodo di esposizione e delle caratteristiche del parco immobiliare su scala locale, possa permettere, tramite un opportuno fattore correttivo, di approssimare il valore di concentrazione misurato su breve periodo alla media annua, per meglio comprendere e quindi difendersi dal problema radon.

Sarebbe, infine, auspicabile l'introduzione in Italia di un'opportuna certificazione di qualità ambientale per le materie prime utilizzate nell'edilizia in modo da garantire, negli ambienti residenziali e lavorativi, migliori condizioni di salubrità attraverso la riduzione delle emissioni radioattive derivanti dai materiali da costruzione e di rivestimento interno.

## **APPENDICE A**





LEGENDA

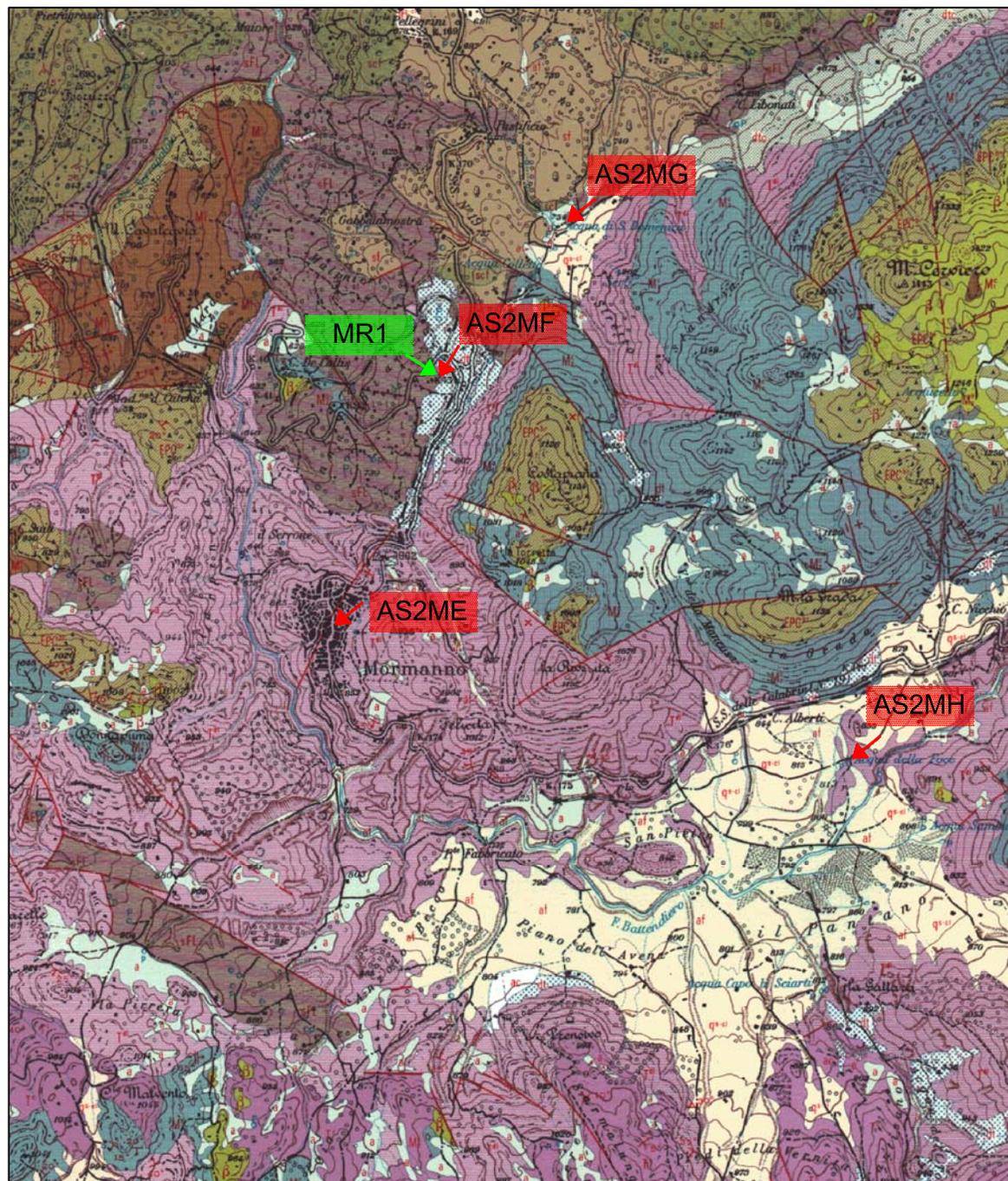
-  Alluvioni mobili, ciottolose e sabbiose, dei letti fluviali.
-  Alluvioni fissate dalla vegetazione o artificialmente.
-  Prodotti di solifussione e dilavamento, talora misti a materiale alluvionale.
-  Detriti di frana.
-  Sabbie gialle o giallo-rossastre, talora ocree, sabbie con ciottoli e conglomerati. Mal stratificati, talora a stratificazione incrociata. Contengono rari macrofossili. Il complesso, generalmente terrazzato, presenta una moderata resistenza all'erosione. Permeabilità elevata.
-  Antichi depositi sabbiosi e conglomeratici (q<sup>sa</sup>), o prevalentemente conglomeratici (q<sup>sa</sup>), di origine fluviale. I depositi erosionali sono spesso cementati e resistenti all'erosione, mentre quelli più fini sono in genere facilmente disgregabili. Permeabilità elevata.
-  Antiche conoidi e detriti di falda, spesso cementati, composti da frammenti angulari di calcari e dolomie, localmente associati a terra rossa. Talora passanti a depositi più sabbiosi (q<sup>sa</sup>). Presentano una discreta resistenza all'erosione e bassa permeabilità.
-  Alternanza di sabbie e conglomerati poligenici con piccoli e grossi ciottoli, calcarei e cristallini, ben arrotondati. Frequentemente interdigitati e talora con brusche variazioni laterali e verticali di facies. Il colore varia tra il giallo-bruno ed il giallo-rossastro (P<sup>1</sup>). Sono presenti localmente bande di conglomerati ben cementati associati a sabbie grossolane (P<sup>1</sup>), o lenti di sabbie giallastre, talora rossastre, a grana fine e media, poco cementate, male stratificate e localmente a stratificazione incrociata (P<sup>1</sup>). Scarsi i macrofossili, fra cui: *Buccinum carneum* LINNÉ, *Nucula sulcata* BRONN, *Nuculona pella* LINNÉ, *Chlamys flexuosa* POLI. La microfauna, generalmente scarsa, comprende: *Nonionella turrida* (WILLIAMSON), *Quinqueloculina longirostris* d'ORBIGNY, *Globorotalia truncatulinoides* (d'ORBIGNY) e *Nonion granosum* (d'ORBIGNY). La resistenza all'erosione di questo complesso varia in funzione del locale grado di cementazione. Permeabilità generalmente elevata.
-  Argille siltose grigio-azzurre, male stratificate, con intercalazioni e lenti di sabbie e conglomerati. Contengono una ricca e variata microfauna a foraminiferi comprendente: *Anomalina baltica* (SCHROETER), *Globigerina pachyderma* (EHRENBERG), *Bulimina marginata* (d'ORBIGNY), *Epinodes frigidus* (CUSHMAN) var. *granulatus* di NAPOLI, *Nonionella turrida* (WILLIAMSON); in associazione con ostracodi. Macrofauna abbondante, fra cui: *Cyprina islandica* LINNÉ, *Chlamys septemradiata* MÜLLER, *Turritella tricornata* BROCCHI, *Theridium vulgatum* BRUGUIÈRE. Localmente (Cassano allo Ionio) sono presenti lenti di olistotroma (P<sup>1</sup>), alcune delle quali non cartografabili, costituite da materiale fliocidico miocenico, talora con parti ancora stratificate, e rari blocchi di calcareisti e quarziti. Questo complesso presenta una resistenza all'erosione generalmente scarsa e le argille, quando saturate d'acqua, tendono a dare luogo a movimenti franosi. Permeabilità generalmente bassa.
-  Argille grigio-verdastre e brune, con sottili intercalazioni di arenarie marroni, da fini a grossolane. Locali intercalazioni, a carattere lenticolare, di arenarie grossolane, conglomerati e sabbie giallo-biancastre. In parte senza fossili ed in parte con una limitata microfauna a foraminiferi, fra cui: *Bulimina aculeata* (d'ORBIGNY), *Bolivina aff. ditostea* REUSS e *Valvulineria complanata* (CUSHMAN). Questo complesso presenta una resistenza all'erosione piuttosto scarsa, ed elevata franosità. Permeabilità bassa.
-  Dolomie e calcari dolomitici da grigi a nerastri (P<sup>1</sup>), con occasionali breccie intrafornazionali ed intercalazioni di argilliti fogliettate ed arenarie (P<sup>1</sup>). Le rocce sono spesso ben stratificate, ma localmente le tracce di stratificazione sono completamente distrutte dalla intensa fratturazione. I fossili sono rari: si sono osservati oscuri resti di alghe e gasteropodi. A NO di Castrovillari alle dolomie sono associate rocce basiche vulcaniche (P<sup>1</sup>). Le rocce sono generalmente resistenti all'erosione, eccetto quando sono intensamente tettonizzate. Permeabilità elevata.
-  Rocce ignee basiche, verde scuro e nerastre, di due tipi: rocce basiche vulcaniche associate ai calcari (P<sup>1</sup>) ed alle dolomie (P<sup>1</sup>); rocce basiche più grossolane associate alle filladi (P<sup>1</sup>). Queste rocce presentano una discreta resistenza all'erosione. Permeabilità da bassa a media.
-  Scisti filladici grigi, lucenti, con sottili e frequenti intercalazioni quarzitiche (facies fliocidiche). Gli scisti contengono spesso lenticelle, o segregazioni, di quarzo parallele alla scistosità; le quarziti presentano in genere irregolari venature di quarzo. Nel complesso sono sparsi numerosi piccoli ammassi di rocce basiche (P<sup>1</sup>). Le rocce sono in genere intensamente deformate ed intersecate da molte superfici di discontinuità (scistosità; diaclasi, fratture) che ne riducono la resistenza all'erosione; localmente tendono a dare luogo a movimenti franosi. Permeabilità bassa.

CAS

EDIFICIO MONITORATO

AS2C

PRELIEVO CAMPIONE ACQUA



LEGENDA

-  Prodotti di dilavamento, talora misti a materiale alluvionale.
-  Detriti di falda.
-  Depositi sabbiosi e conglomeratici male selezionati, con ciottoli calcarei e dolomitici, localmente passati a silti. Si tratta di materiali di origine fluviale, e forse lacustre, formati nelle depressioni dei rilievi calcareo-dolomitici. I depositi grossolani sono spesso cementati e resistenti all'erosione, mentre quelli più fini sono in genere facilmente disagiabili. Permeabilità elevata.
-  **Complesso floscido basale:** argille a scaglie color tabacco, in alternanza con calcari e quarziti. La componente argillosa è prevalente ed il complesso presenta una resistenza all'erosione piuttosto scarsa. Permeabilità bassa.
-  Calcari fossiliferi (prevalentemente calcareniti), generalmente ben stratificati, talora con intercalazioni di argille fogliettate brune e giallastre. Al contatto litologico sul "Piano della Vezza" si sviluppa una breccia calcarea cementata. Contengono una abbondante microfauna a grandi foraminiferi (per lo più *Nannulites* spp.) di età eocenica-oligocenica. Questo complesso presenta in genere una elevata resistenza all'erosione. Permeabilità da media ad elevata.
-  Conglomerati o breccie calcaree, spesso associati a lave basiche  $\beta$ . Contengono oscure Textulariidae, nonché alghe calcaree, radiali di echinidi e frammenti di molluschi. I frammenti contengono *Etioplectes elongata* ITSMANN e rudiste. Questo complesso presenta una elevata resistenza all'erosione ed elevata permeabilità.
-  Calcari compatti, calcari cristallini e calcari dolomitici, grigi, con occasionali lenti di silti, passanti lateralmente a calcari solisti con lenti di silti meno frequenti (M). Contengono rari foraminiferi associati ad alghe e frammenti di macrofossili. Localmente con *Thecamaria* sp. Sul versante meridionale di Monte Carverio si trova un orizzonte lenticolare di argilliti fogliettate sericistiche e ferruginose (M'), associate a calcari ed a lave basiche  $\beta$ . Le caratteristiche geotecniche di questo complesso sono simili a quelle riscontrabili nell'unità G'.
-  Calcari a grana fine, ben stratificati, localmente laminati (T'), con occasionali intercalazioni di argilliti fogliettate grigio-brune (M'). I calcari sono localmente interdigitati con la dolomia F'. Contengono rare alghe (tra cui *Palaedryocladia*), e gastrotrichi. Le caratteristiche geotecniche sono simili a quelle dell'unità G'.
-  Dolomie grigie, prevalentemente scure, (T''), con locali intercalazioni e lenti di calcari e calcari dolomitici'. Localmente si osservano breccie intrafornamentali ed intercalazioni di argilliti fogliettate grigio-brune (M'). Localmente contengono alghe, brachiopodi e gastrotrichi; talora con *Megalon* sp. e *Mordvitchia* sp. Le rocce, sono spesso ben stratificate, ma in molte località la stratificazione è stata distrutta da intensa fratturazione. Le rocce, quando non fratturate e ridotte ad un aggregato semi-incoerente di frammenti clastici, sono molto resistenti all'erosione. Permeabilità elevata.
-  Lave basiche o spilittiche, bollose, verdi scure. Queste rocce presentano una resistenza all'erosione inferiore a quella dei calcari e dolomie circostanti. Permeabilità da media da elevata.
-  Silti argillinosi lucenti con sottili intercalazioni di quarziti verdastre. Sono simili agli silti del Fiume Lao, ma con un grado di metamorfismo più elevato, caratterizzato da rilorte e sericite. Questo complesso è leggermente più resistente all'erosione dell'unità I'; le altre caratteristiche geotecniche sono analoghe.
-  Silti argillinosi grigi, bruni all'alterazione, con intercalazioni di quarziti verdastre a grana fine e, talora, di calcari cristallini. Gli silti sono generalmente lucenti e di aspetto fillico, ma il loro grado di metamorfismo è molto basso e localmente si osservano intercalazioni di argilliti non metamorfiche. Un piccolo ammasso di serpentina è associato a questo complesso. Le rocce sono intensamente deformate ed attraversate da numerose superfici di discontinuità. Le aree di maggiore tettonizzazione tendono a dare luogo a movimenti franosi. Permeabilità bassa. Silti del Fiume Lao.

MR1

EDIFICIO MONITORATO

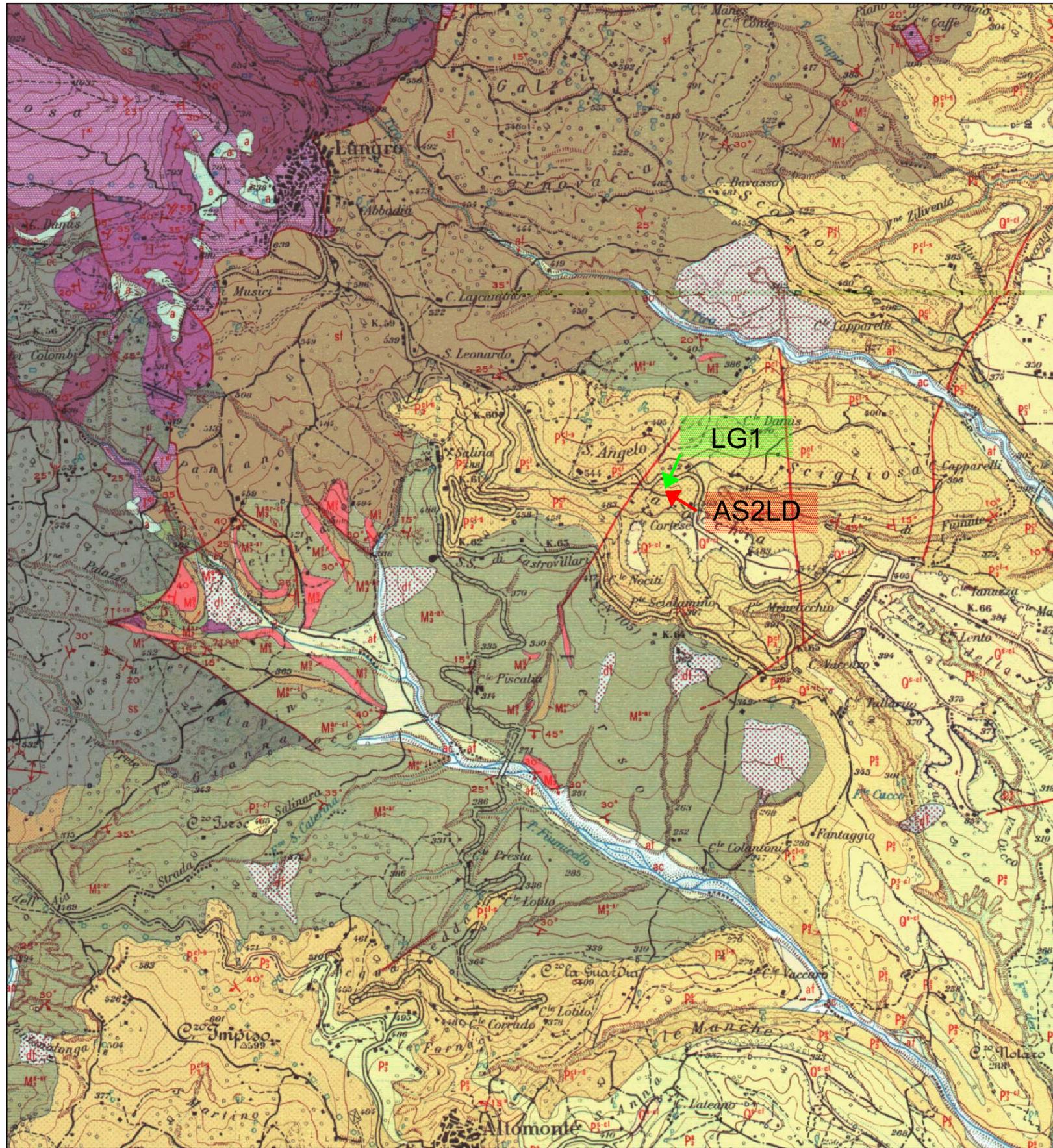
AS2M

PRELIEVO CAMPIONE ACQUA

0 250 500 750 1000 mt.

LUNGRO

A-4  
CARTA GEOLOGICA  
LOCALIZZAZIONE DEI SITI DI MISURA



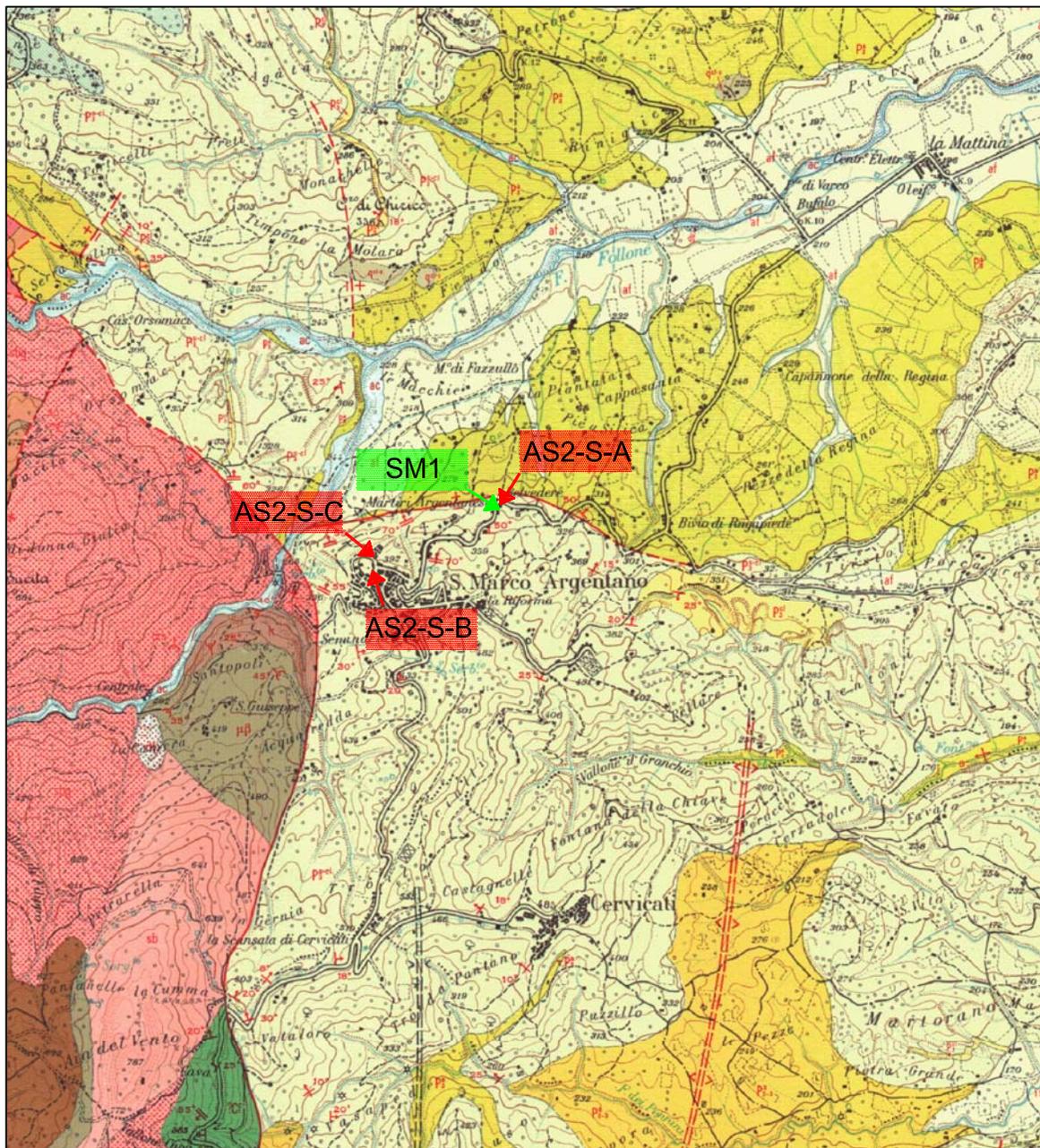
LEGENDA

- Alluvioni mobili, ciottolose e sabbiose, dei letti fluviali.
- Alluvioni fissate dalla vegetazione o artificialmente.
- Detriti di frana.
- Detriti di falda.
- Sabbie gialle e giallo-rossastre, talora ocree, sabbie con ciottoli e conglomerati. Male stratificate, talora a stratificazione incrociata. Contengono rari macrofossili. Il complesso è terrazzato in più ordini e spesso le superfici pianeggianti presentano una copertura superficiale di terra rossa e ciottoli, quale alterazione e rimaneggiamento continentale dei depositi sottostanti. La resistenza all'erosione di questi depositi è funzione del locale grado di cementazione. Permeabilità elevata.
- Alternanza di sabbie e conglomerati poligenici con piccoli e grossi ciottoli, calcarei, arenacei e cristallini, ben arrotondati. Frequentemente interdigitati e talora con brusche variazioni laterali e verticali di facies. Il colore varia tra il giallo-bruno ed il giallo-rossastro. Sono presenti localmente bande di conglomerati ben cementati e sabbie grossolane presentanti talora stratificazione incrociata. Frequenti intercalazioni argillo-siltose a carattere lenticolare. Scarsamente fossiliferi, e con rari e banali foraminiferi. Le caratteristiche geotecniche sono analoghe a quelle riscontrabili nell'unità Q<sup>ci</sup>.
- Sabbie giallastre, talora rossastre, a grana da fine a media, poco cementate, localmente a stratificazione incrociata. Generalmente fossilifere con: *Ostrea lamellosa* BROCCCHI, *Anomia ephippium* LINNE, *Chlamys globra* LINNE. La microfauna è piuttosto scarsa ed include specie bentoniche e planctoniche senza forme caratteristiche. Questo complesso presenta una resistenza all'erosione piuttosto scarsa. Permeabilità generalmente elevata.
- Argille siltose grigio-azzurre, male stratificate, con lenti ed intercalazioni di sabbie e conglomerati. Contengono una microfauna ricca e variata, fra cui: *Anomalina balthica* (SCHROETER), *Eponides frigidus* (CUSHMAN) var. *granulatus* di NAPOLI, *Bulimina marginata* d'ORBIGNY e *Virgulina schreibersiana* CZIEK. Macrofauna abbondante: *Cyprina islandica* LINNE, *Anadara diluvii* LAMARCK, *Turritella tricarinata* BROCCCHI, *Aporrhais pespelecani* LINNE. Questo complesso presenta scarsa resistenza all'erosione ed elevata franosità, specie in corrispondenza alle intercalazioni sabbiose. Permeabilità bassa.
- Conglomerati poligenici a grossi ciottoli, calcarei, arenacei e cristallini, fortemente cementati, talora con clinostratificazione. Generalmente si trovano intercalati nelle unità precedenti, specialmente in P<sup>ci</sup>, con grande sviluppo locale nell'area ad est di Lungro. Non fossiliferi. Questi depositi presentano una elevata resistenza all'erosione. Permeabilità elevata.
- Conglomerati sabbiosi poligenici a grossi e piccoli ciottoli, più o meno cementati e stratificati, con intercalazioni di sabbie conglomeratiche, male stratificate, talora a stratificazione incrociata. Scarsi resti di macrofossili nelle parti sabbiose. Le caratteristiche geotecniche di questo complesso sono analoghe a quelle riscontrabili nell'unità Q<sup>ci</sup>.
- Argille grigio-verdastre e brune, con sottili intercalazioni di arenarie marroni, da fini a grossolane M<sup>ci</sup>. Locali intercalazioni, a carattere lenticolare, di arenarie grossolane, conglomerati e sabbie giallo-biancastre M<sup>ci</sup>; arenarie gessose ed argille gessose con gesso primario in sottili straterelli e con gesso secondario in noduli ed ammassi MI. In parte senza fossili ed in parte con una limitata microfauna a foraminiferi, fra cui: *Globorotalia hirsuta* (d'ORBIGNY), *Vaginulina legumen* (LINNE) var. *elegans* d'ORBIGNY. Questo complesso presenta una resistenza all'erosione piuttosto scarsa ed elevata franosità. Permeabilità bassa.
- Gessi, ed anidriti, con intercalazioni di argille ed arenarie gessose e gessi detritici.
- Arenarie grossolane marroni, e conglomerati generalmente a piccoli ciottoli ben cementati e male stratificati. Questi depositi si trovano generalmente alla base della serie di evaporazione, ma sono anche intercalati alle argille M<sup>ci</sup>. Questo complesso presenta una resistenza all'erosione da media ad elevata. Permeabilità elevata.
- Dolomie e calcari dolomitici da grigi a grigio-scuri. Le rocce sono frequentemente fratturate e brecciate, e ciò spesso in conseguenza di una deformazione originaria. Localmente con *Megalodon* sp. La resistenza all'erosione di questo complesso varia, da moderata ad elevata, in funzione del locale grado di fratturazione. Le rocce sono localmente ridotte, dalla tettonizzazione, ad un aggregato semi-incoerente di granuli clastici. Permeabilità elevata.
- Calcare grigio-scuri, in strati sottili, con noduli e lenti di selce grigia. Contengono, molto sporadicamente, resti di alghe. Gli strati sono spesso contorti. Le caratteristiche geotecniche di questo complesso sono analoghe a quelle riscontrabili nell'unità C<sup>1</sup>.
- Argilloscisti lucenti, grigio-chiaro, verdi ed occasionalmente rossastri, con intercalazioni di calcari cristallini cc, ed occasionali sottili bande quarzitiche. Non fossiliferi. Questo complesso presenta una moderata resistenza all'erosione, con tendenza a dar luogo a movimenti franosi lungo le superfici di scistosità. Permeabilità generalmente bassa.
- Scisti filadici grigi, lucenti, con sottili e frequenti intercalazioni quarzitiche (facies flicsioidi). Gli scisti contengono spesso lenticelle, o segregazioni, di quarzo parallele alla scistosità; le quarziti presentano irregolari venature di quarzo. Le rocce sono in genere intensamente deformate, ed intersecate da molte superfici di discontinuità (scistosità, diaclasi e fratture) che ne riducono la resistenza all'erosione; localmente tendono a dar luogo a movimenti franosi. Permeabilità bassa.

**LG1** EDIFICIO MONITORATO

**AS2LD** PRELIEVO CAMPIONE ACQUA

0 250 500 750 1000 mt.



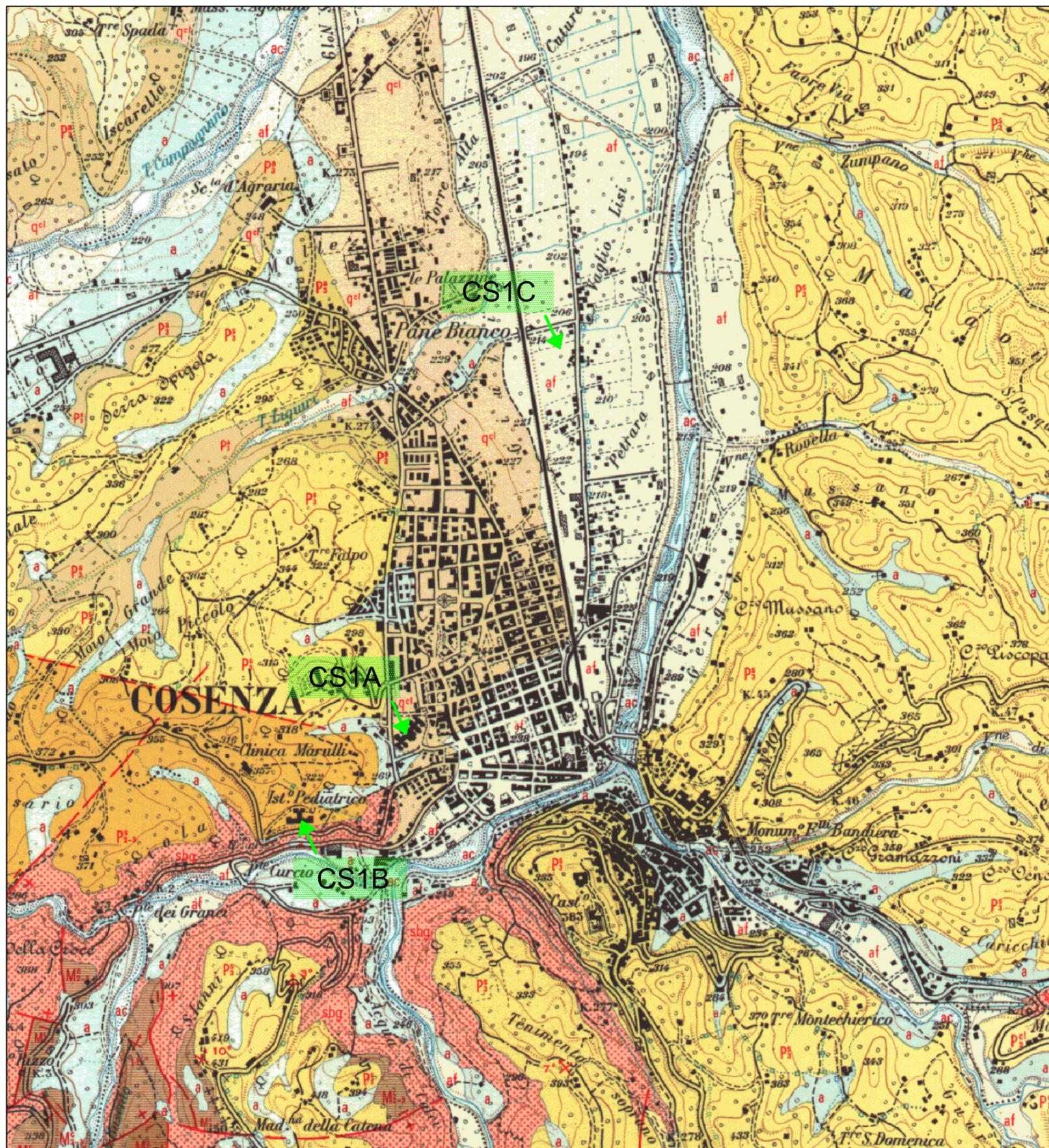
LEGGENDA

- |   |   |
|---|---|
| <p><b>ak</b> Alluvioni mobili, ciottolose e sabbiose, dei letti fluviali.</p> <p><b>df</b> Detriti di frana</p> <p><b>df</b> Detriti di falda.</p> <p><b>q*</b> Depositi conglomeratici (q*) o conglomeratici e sabbiosi (q*) di antichi terrazzi fluviali, ricorrenti lungo le valli attuali. Questi depositi sono poco consolidati e facilmente disagiabili. Permeabilità elevata.</p> <p><b>q**</b> Superficie di erosione pleistocenica intagliata nei depositi (q**).</p> <p><b>q**</b> Sabbie e conglomerati, bruno-chiaro, localmente cementati. Questi depositi sono per lo più poco consolidati e facilmente disagiabili. Permeabilità elevata.</p> <p><b>q*</b> Conglomerati, in genere ben cementati, composti da ciottoli sub-arrotondati o sub-angolari di calcare, subordinatamente di granito, anfifoliti e gneiss. Questo complesso presenta buona resistenza all'erosione.</p> <p><b>q*</b> Argille siltose grigie. Contengono una variata microfauna a foraminiferi, tra cui: <i>Anomalinella bellinica</i> (DIERCKEN), <i>Bulimina margareta</i> (CORNICI), <i>Uvigerina peregrina</i> (CUSHMAN), <i>Globigerina polyderna</i> (SANDBERG), <i>Belivina catanensis</i> (SEGURZA) e <i>Belivina elata</i> (SEGURZA). Questo complesso presenta scarsa resistenza all'erosione e tende a dar luogo a piccole frane rotazionali sui pendii più ripidi. Permeabilità bassa.</p> | <p><b>pi</b> Argille marnose del tutto simili alle precedenti, ma di età pliocenica medio-superiore.</p> <p><b>pi</b> Calcari cristallini in strati sottili, calcari arenacei e conglomeratici, argille marnose fogliettate; spesso intensamente fratturate e contorte. Non fossiliferi. Si tratta forse di una facies di acque basse dei calcari che affiorano nei pressi di Terranova di Sibari (Fr 229 I NE). Questo complesso presenta in genere una buona resistenza all'erosione. Permeabilità moderata.</p> <p><b>sb</b> Gneiss e scisti biotitici-granatiferi. Le rocce, spesso profondamente degradate, presentano una resistenza all'erosione da media ad elevata. Permeabilità bassa, con aumento delle stesse nelle zone degradate.</p> <p><b>sb</b> Scisti e gneiss biotitici. Le caratteristiche geotecniche sono analoghe a quelle dell'unità sb.</p> <p><b>sb</b> Serpentine massicce ed ornblenditi, probabilmente derivate per metamorfismo da rocce ultrabasiche intrusive, forse piroxenitici. Le rocce, spesso estesamente alterate e/o degradate, presentano una moderata resistenza all'erosione. Permeabilità da bassa a media.</p> |
|---|---|

**SM1** EDIFICIO MONITORATO

**AS2-S** PRELIEVO CAMPIONE ACQUA

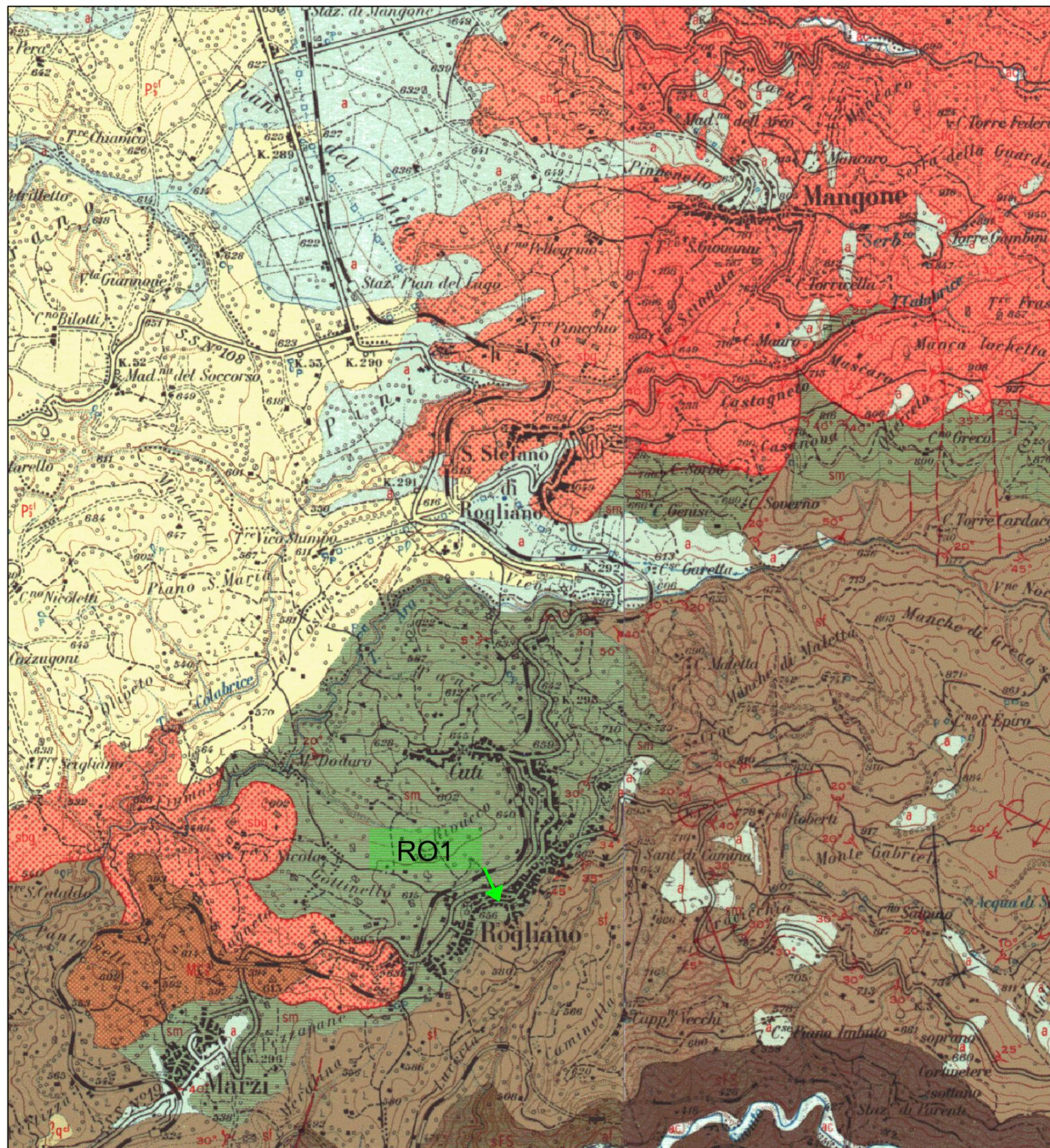




LEGENDA

- Alluvioni mobili, ciottolose e sabbiose, dei letti fluviali.
- Alluvioni fissate dalla vegetazione o artificialmente.
- Prodotti di dilavamento e solifusione, talora misti a materiale alluvionale.
- Detriti di frana, con blocchi anche cospicui in corrispondenza alle scarpate dei calcari  $M_{1,2}$ .
- Conoidi di deiezione.
- Depositi conglomeratici, giallo-bruno-rossastri, di antichi terrazzi fluviali. I ciottoli, ben arrotondati, sono immersi in una matrice sabbiosa, localmente limosa. I depositi del fianco sinistro della valle del T. Campagnano sono da considerarsi antichi depositi di dilavamento, probabilmente misti a materiale di origine alluvionale ed a detriti di pendio. Questi depositi sono discretamente costipati e presentano una moderata resistenza all'erosione. Permeabilità generalmente elevata.
- Conglomerati e ghiaie, da bruni a bruno-rossastri, con ciottoli ben arrotondati di roccia cristallina in una matrice sabbiosa grossolana. Non fossiliferi. Si tratta di un complesso chiaramente regressivo e probabilmente in parte di origine continentale. Localmente il passaggio alle sabbie  $P_1$  sottostanti è graduale ed avviene con interdigitazione di livelli sabbiosi e conglomeratici. Questo complesso è in genere ben costipato e presenta una discreta resistenza all'erosione. Permeabilità elevata.
- Sabbie bruno-chiare, generalmente a grana da fine a media ( $P_1$ ). Ad est del fiume Crati, verso la Sila, si hanno locali sottili intercalazioni silteose o argillose e sporadici orizzonti conglomeratici. A sud di Cosenza si osservano, con una certa frequenza, livelli cementati, talora grossolani. Nella zona di Cozzo della Difesa le sabbie sono spesso conglomeratiche con piccoli ciottoli e ghiaie, e presentano una colorazione rossastra ( $P_1^{II}$ ). Localmente, al contatto con il cristallino del basamento, si sviluppano conglomerati con ciottoli discretamente arrotondati ( $P_1$ ). Contengono variabili microfane a foraminiferi, comprendenti: *Anomalina balthica* (SCHROETER), *Virgulina schreibersiana* CZIZEK, *Bulimina marginata* d'ORBIGNY, *Globigerina inflata* d'ORBIGNY e *Paroepionides repandus*. Localmente con macrofossili abbondanti, fra cui: *Calyptraea chinensis* LINNE, *Chlamys* cf. *islandica* MULLER, *Cyprina islandica* LINNE, *Hedreria brocchii* MONTEROSATO, *Lutaria lutaria* LINNE. Questo complesso, in genere discretamente costipato, presenta una moderata resistenza all'erosione; questa è più elevata nelle zone con frequenti intercalazioni arenacee. Permeabilità generalmente elevata.
- Argille siltose grigio-chiare ( $P_1$ ). Localmente il passaggio alle sabbie  $P_1$  molto graduale ed avviene con interdigitazione di strati argillosi e sabbiosi: ciò è stato indicato con un limite punteggiato. Contengono una microfana a foraminiferi ricca e variata, comprendente: *Bulimina marginata* d'ORBIGNY, *Eponides frigidus* (CUSHMAN), var. *granulatus* di NAPOLI, *Globigerina inflata* d'ORBIGNY e *Valvulineria brodyana* (FORNASINI). I macrofossili, localmente molto abbondanti, denotano una fauna tipicamente calabrona, con: *Begonia aculeata* POLI, *Cyprina islandica* LINNE, *Nassarius semistriatus* BROCCCHI. Nelle argille è intercalato un banco di calcarenite compatta grigio-giallastra ( $P_1$ ); contiene una variata microfana a foraminiferi (fra cui *Globigerina inflata* d'ORBIGNY), assieme a briozoi e frammenti di macrofossili. Questo complesso presenta scarsa resistenza all'erosione e bassa permeabilità.
- Argille siltose del tutto simili alle precedenti, ma in continuità di affioramento con una vasta plaga che, nell'area del P. 229 a nord, contiene microfane del Pliocene medio oltre che del Calabrono.
- Sabbie bruno-chiare, talora giallastre, a grana da media a grossolana. Localmente con strati di arenarie tenere. Contengono una microfana variata con foraminiferi bentonici e planctonici, fra cui: *Globigerina inflata* d'ORBIGNY, *Triloculina gibba* d'ORBIGNY, *Globorotalia crassula* CUSHMAN & STEWART e *Cassidulina neocarinata* THALMANN. Macrofossili localmente abbondanti, comprendenti: *Dosinia lupinus* LINNE, *Lutaria lutaria* LINNE, *Nassarius semistriatus* BROCCCHI e *Turritella tricarinata* BROCCCHI. Le caratteristiche geotecniche di questo complesso sono analoghe a quelle riscontrabili nell'unità  $P_1$ .
- Argille siltose e marnose grigio-chiare. Contengono in genere una ricca e variata microfana a foraminiferi del Pliocene inferiore, comprendente: *Globorotalia hirsuta* (d'ORBIGNY), *Anomalina helicina* (COSTA), *Uvigerina rutula* CUSHMAN, *Ellipsoidina ellipsoides* SEGUENZA e *Pleurostomella alternans* SCHWAGER. Questo complesso presenta scarsa resistenza all'erosione e bassa permeabilità.
- Calcare evaporitico bianco-giallastro, generalmente tenero e vacuolare. Nell'affioramento tra i torrenti Caronte e Campagnano, questa unità raggiunge uno spessore considerevole (oltre i 50 m), e fra gli strati calcarei sono intercalate marne, silts ed argille, generalmente non fossiliferi. Questo complesso presenta in genere una discreta resistenza all'erosione. Permeabilità moderata.
- Argille siltose, argille marnose e silts, grigi e biancastri; localmente con intercalazioni di silts sabbiosi e marne, violacei. In parte non fossiliferi, in parte con microfane a foraminiferi limitate e mal conservate, o ricche e variate; contengono abbondanti specie planctoniche, fra cui: *Globorotalia menardi* (d'ORBIGNY), *Orbulina turatilis* BRONNIMAN, *Orbulina univera* d'ORBIGNY; e le seguenti caratteristiche specie bentoniche: *Bulimina aculeata* d'ORBIGNY, *Uvigerina tenuistriata* REUSS var. *goudryinoides* LIPPARINI e *Valvulineria complanata* (d'ORBIGNY). Questo complesso presenta scarsa resistenza all'erosione e bassa permeabilità.
- Calcari e calcareniti bianco-giallastri o rosati, spesso arenacei; vacuolari e talora teneri, massicci o grossolanamente stratificati. Spesso si tratta di calcari biohermali con coralli e *Balanus* sp. Contengono rari foraminiferi bentonici, alghe calcaree, briozoi e frammenti di echinidi. Spesso con macrofossili: *Aequipecten scabrellus* LINNE, coralli isolati e massivi. La roccia presenta una elevata resistenza all'erosione. Permeabilità moderata, elevata nelle zone fratturate.
- Conglomerati poligenici, con ciottoli ben arrotondati di roccia prevalentemente cristallina in una matrice sabbiosa grossolana. Talora, verso il contatto con il calcare  $M_{1,2}$ , si sviluppano intercalazioni di argille siltose e sabbiose. Questi depositi sono in genere costipati e presentano una discreta resistenza all'erosione. Permeabilità elevata.
- Affioramento isolato di roccia granodioritica alterata, con vene pegmatitiche.
- Complesso igneo-metamorfico costituito da para-gneiss e scisti biotitici, spesso con granati visibili ad occhio nudo, associati a gneiss granitoidi e vene, ed ammassi di roccie granitiche, senza granati. Sporadicamente si hanno zone di gneiss basici, anfibolici. Le rocce sono localmente molto brecciate (▲▲▲). Frequentemente si hanno intercalazioni ad ammassi di calcari cristallini. Le rocce, consistenti e resistenti all'erosione nelle zone profondamente incise, sono spesso intensamente degradate, verso la sommità dei rilievi, ove sono molto più facilmente disgregabili. Permeabilità generalmente bassa.
- Calcari cristallini e marmorei. Formano intercalazioni ed ammassi anche considerevoli nelle rocce dell'unità  $sb_1$ . Gli affioramenti possono presentare inclusioni di rocce ignee o metamorfiche. Piccoli affioramenti non cartografabili: (\*\*\*).

CS1 EDIFICIO MONITORATO

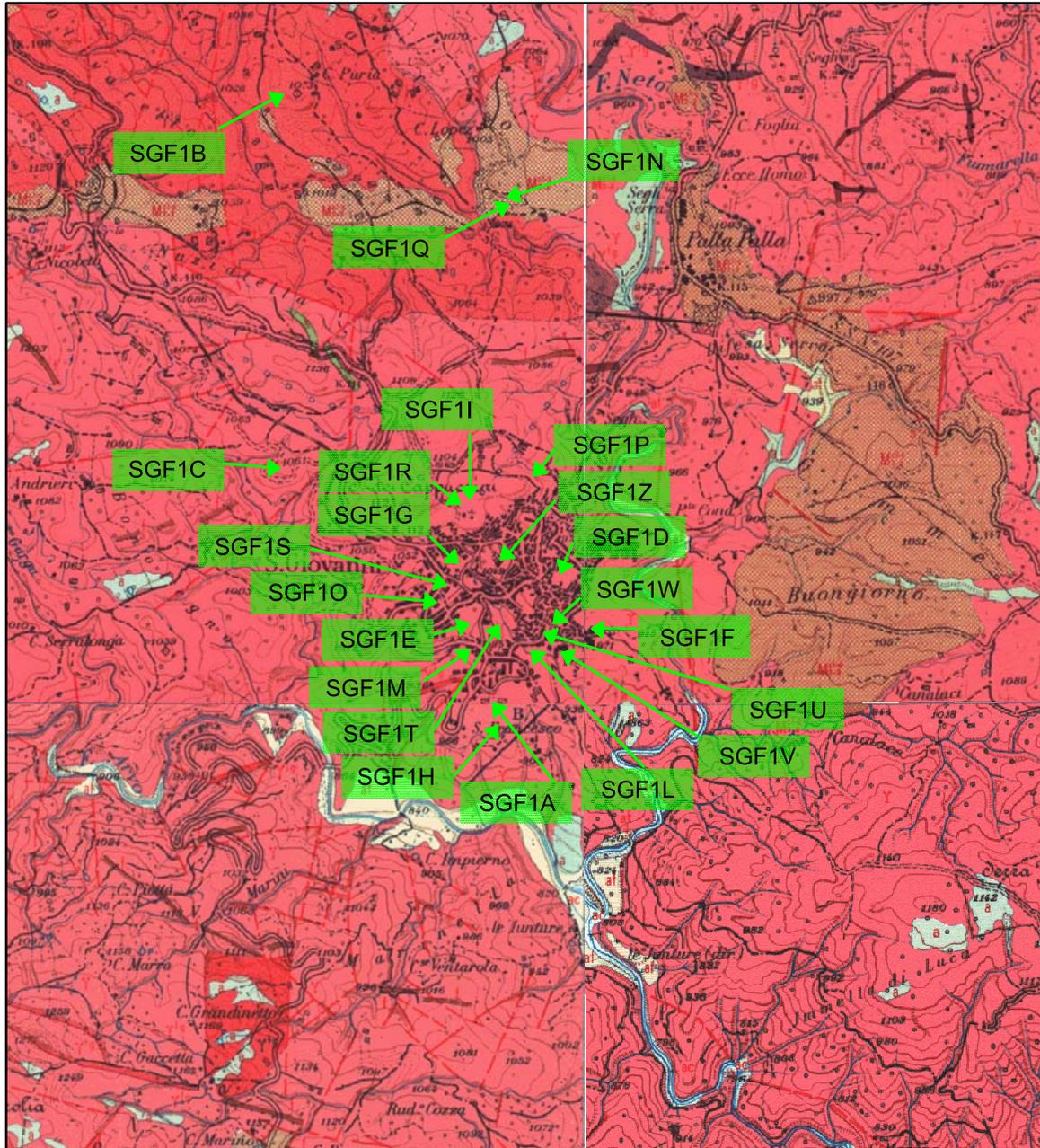


LEGENDA

- |  |   |  |  |
|--|---|--|--|
|  | Alluvioni mobili, ciottolose e sabbiose, dei letti fluviali.  |  | Calcarei e calcareniti bianco-giallastri o rosati, spesso arenacei; vacuolari e talora teneri, massicci o grossolanamente stratificati. Spesso si tratta di calcari biohermali con coralli e <i>Balanus</i> sp. Contengono associazioni di microfossili molto variabili, spesso limitate, con foraminiferi planctonici e bentonici, in associazione con alghe calcaree, briozoi e frammenti di lamellibranchi ed echinidi. Localmente si osservano pectinidi mal conservati. La roccia presenta una elevata resistenza all'erosione. Permeabilità moderata, elevata nelle zone fratturate.   |
|  | Alluvioni fissate dalla vegetazione o artificialmente.  |  | Conglomerati poligenici, con ciottoli ben arrotondati di rocce prevalentemente cristalline, in una matrice sabbiosa grossolana. Localmente le sabbie possono essere prevalenti. Molto sporadicamente, verso il contatto con il calcare <i>MI1</i> , si hanno intercalazioni di argille siltose contenenti una microfauna scarsa e non significativa, con foraminiferi e frammenti di lamellibranchi. A luoghi i conglomerati sono molto grossolani (p. es. a M.te Serratore) e contengono grossi ciottoli di un caratteristico granito biotitico grossolano, talora leggermente flogliettato, che non affiora attualmente nelle vicinanze. Questi depositi sono in genere costipati e presentano una discreta resistenza all'erosione. Permeabilità elevata. |
|  | Prodotti di dilavamento, talora misti a materiale alluvionale.  |  | Dolomie da grigie a nerastre, da finemente cristalline a ceroidi, generalmente ben stratificate (strati inferiori al metro), ma localmente massicce, o con stratificazione non evidente. Locali intercalazioni di calcari dolomitici. Generalmente non fossilifere, ma a luoghi con rari foraminiferi agglutinanti. Un orizzonte lenticolare di silti e marne dolomitiche in strati sottili, poco diazenizzate, si osserva sul fianco occidentale di M.te S. Giovanni (P). Le rocce presentano una resistenza all'erosione molto elevata. Permeabilità da media ad elevata.  |
|  | Detriti di pendio.  |  | Serpentine verdi nelle filladi.  |
|  | Detriti di frana.   |  | Scisti quarzosi biancastri, con scistosità laminare molto regolare. Occasionalmente gneissici ed occhiadini. Normalmente le rocce non presentano intrusioni. Il limite con gli scisti <i>SI</i> è localmente piuttosto graduale. Queste rocce presentano in genere una buona resistenza all'erosione, eccetto nelle zone di più intensa fratturazione. Permeabilità generalmente bassa.  |
|  | Conoidi di deiezione.   |  | Scisti filladici quarzoso-sericitici-cloritici, grigi e verdastri; localmente con bande quarziche verde-chiaro. Noduli e lenticelle di quarzo parallele alla scistosità sono molto frequenti. Locali intercalazioni lenticolari, od ammassi, di calcari cristallini (cc). Le rocce sono spesso ondulate e pieghettate, ma con una certa regolarità; localmente si osservano intercalazioni di scisti quarzosi molto simili alle rocce dell'unità <i>SM</i> . Questo complesso presenta in genere una discreta resistenza all'erosione; movimenti franosi si possono manifestare nelle zone di fratturazione o quando la scistosità si presenti a fransapoggio. Permeabilità bassa.   |
|  | Conglomerato composto da frammenti male arrotondati di filladi, localmente con una matrice sabbiosa. Questi depositi presentano una resistenza all'erosione piuttosto scarsa, ed elevata permeabilità.  |  | Scisti del Fiume Savuto: scisti quarzoso-feldspatici, occasionalmente con biotite, grigio-bruni. Le rocce, ben diaclastate ed a scistosità regolare, tendono a rompersi secondo regolari blocchi squadrati. Questo complesso presenta una discreta resistenza all'erosione. Permeabilità da bassa a media.   |
|  | Conglomerati, da bruni a bruno-rossastri, con ciottoli ben arrotondati di rocce cristalline in una matrice sabbiosa grossolana; locali intercalazioni, o lenti, sabbiose e ghiaiose. Questi depositi sono probabilmente in parte di origine continentale. Questo complesso è in genere ben costipato e presenta una discreta resistenza all'erosione. Permeabilità elevata.   |  | Scisti del Fiume Savuto: scisti quarzoso-feldspatici, occasionalmente con biotite, grigio-bruni. Le rocce, ben diaclastate ed a scistosità regolare, tendono a rompersi secondo regolari blocchi squadrati. Questo complesso presenta una discreta resistenza all'erosione. Permeabilità da bassa a media.   |
|  | Sabbie da fini a grossolane, con qualche intercalazione arenacea. Passano gradualmente ai conglomerati <i>PI</i> . Questo complesso presenta una moderata resistenza alla erosione ed elevata permeabilità.   |  | Scisti del Fiume Savuto: scisti quarzoso-feldspatici, occasionalmente con biotite, grigio-bruni. Le rocce, ben diaclastate ed a scistosità regolare, tendono a rompersi secondo regolari blocchi squadrati. Questo complesso presenta una discreta resistenza all'erosione. Permeabilità da bassa a media.   |
|  | Calcare evaporitico bianco-giallastro, tenero e vacuolare. Non fossilifero. La roccia presenta una certa resistenza all'erosione e moderata permeabilità.   |  | Scisti del Fiume Savuto: scisti quarzoso-feldspatici, occasionalmente con biotite, grigio-bruni. Le rocce, ben diaclastate ed a scistosità regolare, tendono a rompersi secondo regolari blocchi squadrati. Questo complesso presenta una discreta resistenza all'erosione. Permeabilità da bassa a media.   |
|  | Argille siltose, argille marnose e silti, grigie e biancastre; localmente con intercalazioni di silti sabbiosi, e marne, violacee. In parte non fossilifere, in parte con microfauna a foraminiferi limitate e mal conservate, o ricche e variate; contengono abbondanti specie planctoniche, fra cui: <i>Globorotalia menardi</i> (d'ORBIGNY), <i>Orbulina univera</i> d'ORBIGNY, <i>Orbulina bilobata</i> (d'ORBIGNY); e le seguenti caratteristiche specie bentoniche: <i>Bulimina aculeata</i> d'ORBIGNY, e <i>Bulimina aff. dilatata</i> REUSS. Questo complesso presenta scarsa resistenza all'erosione e bassa permeabilità. |  | Scisti del Fiume Savuto: scisti quarzoso-feldspatici, occasionalmente con biotite, grigio-bruni. Le rocce, ben diaclastate ed a scistosità regolare, tendono a rompersi secondo regolari blocchi squadrati. Questo complesso presenta una discreta resistenza all'erosione. Permeabilità da bassa a media.   |

**RO1** EDIFICIO MONITORATO



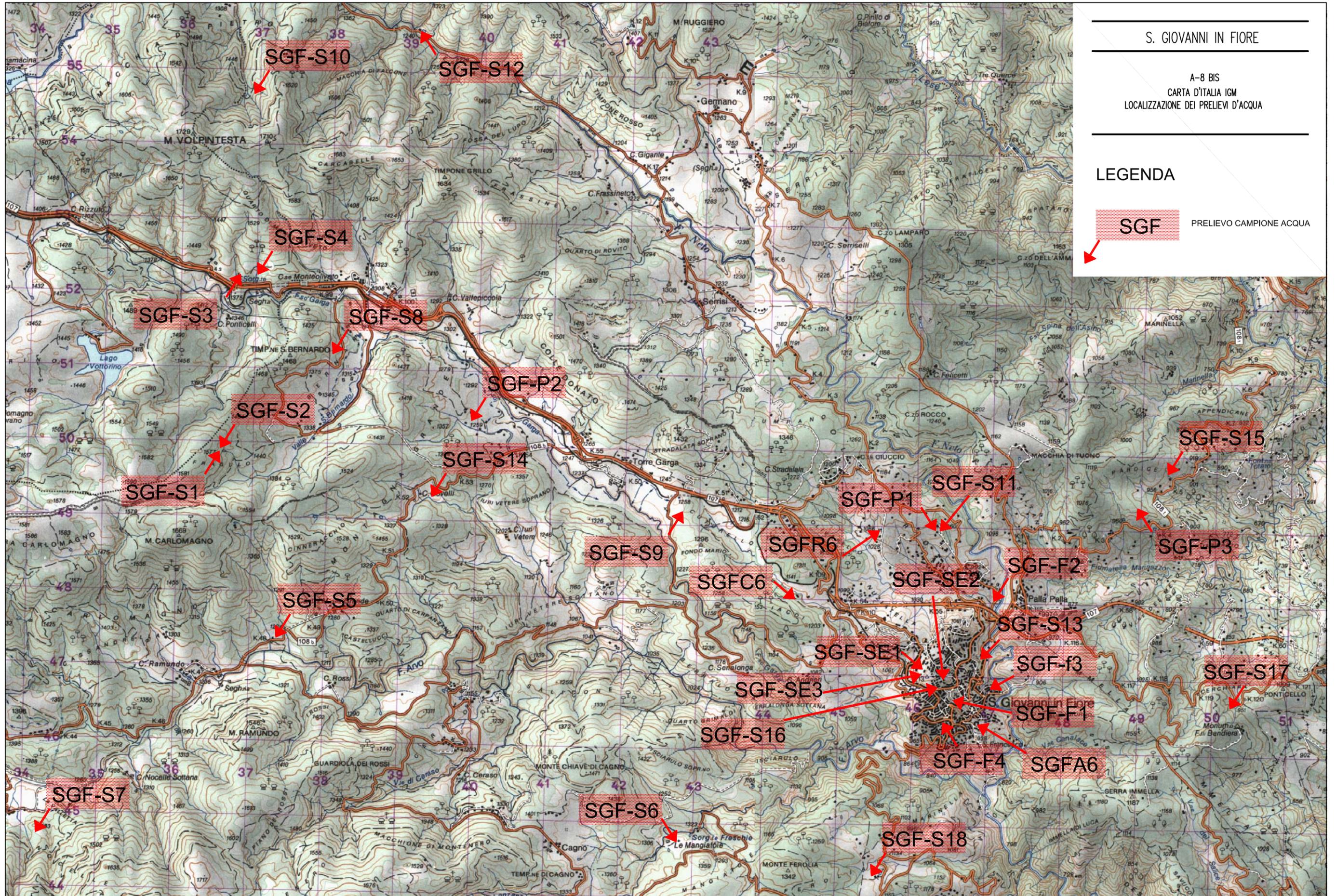


LEGENDA

-  Alluvioni fissate dalla vegetazione o artificialmente.
-  Prodotti di dilavamento, talora misti a materiale alluvionale.
-  Conoidi di delazione.
-  Conglomerati e breccie ben consolidati, costituiti da ciottoli, da angolari fino a ben arrotondati, di rocce granitiche in una matrice sabbiosa. I depositi basali sono spesso bruno-rossastri. Non fossiliferi. Questo complesso presenta una moderata resistenza all'erosione ed elevata permeabilità.
-  Granito a grana da fine a media, localmente con un certo arricchimento in soda. Per lo più biotitico, talora con muscovite predominante. La roccia è generalmente consistente e presenta una elevata resistenza all'erosione. Permeabilità bassa, con aumento della stessa nelle zone di fratturazione.
-  Filoni e piccole intrusioni di rocce acide: felsite (f); porfido quarzifero (q); sienite (s).
-  Complesso di rocce acide, grossolane, a composizione variabile tra la quarzo diorite ed il granito. Per lo più biotitiche, talora con muscovite predominante. Localmente con vene (non cartografabili) di pegmatite. Piccoli xenoliti basici ricorrono sporadicamente; essi si fanno meno frequenti verso la parte orientale della tavoletta. Come consistenza si varia da roccia fresca, e resistente all'erosione, a roccia alterata e degradata, facilmente disgregabile. Permeabilità generalmente bassa, con aumento della stessa nelle zone di fratturazione e degradazione.
-  Scisti e gneiss biotitici a grana da media a grossolana. Nei pressi del contatto con il granito essi possono contenere muscovite, andalusite e cordierite. Le rocce di questo complesso sono generalmente resistenti all'erosione. Permeabilità bassa, con aumento della stessa nelle zone di fratturazione.
-  Anfiboliti plagioclastiche associate agli scisti e gneiss biotitici.
-  Rocce basiche a composizione variabile tra il gabbro e la diorite, localmente metamorfosate, ai margini, ad anfibolite plagioclastiche. Queste rocce sono spesso profondamente alterate, degradate e facilmente disgregabili. Permeabilità moderata nelle parti degradate, probabilmente decrescente, in profondità verso la roccia più fresca.

**SGF1** EDIFICIO MONITORATO





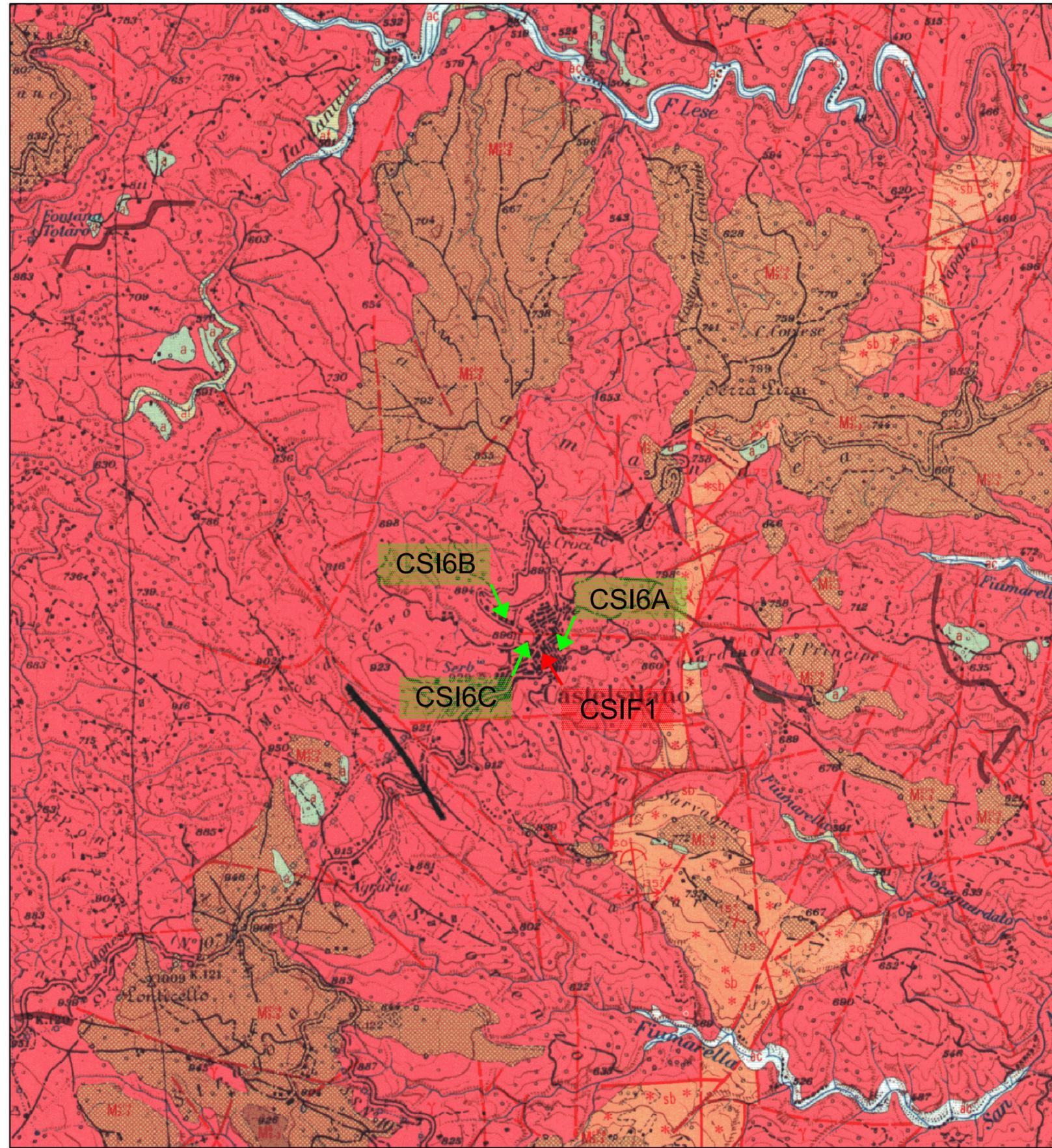
S. GIOVANNI IN FIORE

A-8 BIS  
 CARTA D'ITALIA IGM  
 LOCALIZZAZIONE DEI PRELIEVI D'ACQUA

LEGENDA

**SGF** PRELIEVO CAMPIONE ACQUA

0 400 800 1200 1600 2000 mt.

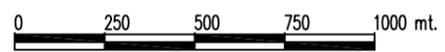


LEGENDA

- |   |  |
|---|--|
| <p><b>ac</b><br/>  Alluvioni mobili, ciottolose e sabbiose, dei letti fluviali.</p> <p><b>af</b><br/>  Alluvioni fissate dalla vegetazione o artificialmente.</p> <p><b>a</b><br/>  Prodotti di solifluzione e dilavamento, talora misti a materiale alluvionale.</p> <p><b>df</b><br/>  Detriti di frana.<br/>                 Detriti di frana di <b>M1</b>.</p> <p><b>cn</b><br/>  Conoidi di deiezione.</p> <p><b>M1</b><br/>  Gesso a grana fine, ben stratificato, variante da gesso sabbioso o conglomeratico, alla base, a gesso relativamente puro. La roccia presenta una certa resistenza all'erosione e tende a formare scarpate. La permeabilità è elevata, a causa della solubilità del gesso, ed alla conseguente formazione di canali sotterranei.</p> <p><b>M2</b><br/>  Argille siltose grigio-chiare, contenenti una microfauna variata fra cui: <i>Globigerinoides trilobus</i> (REUSS), <i>Orbulina universa</i> d'ORBIGNY, <i>Uvigerina aubeiriana</i> FORNASSINI, <i>Vulvulina pennatula</i> (BATSCH). Le argille presentano una scarsa resistenza all'erosione e, quando impregnate d'acqua, tendono a dar luogo a movimenti franosi sui pendii più ripidi. Permeabilità bassa.</p> | <p><b>M3</b><br/>  Arenarie grossolane grigio-chiare, brune all'alterazione, localmente conglomeratiche. Esse presentano una resistenza all'erosione relativamente elevata. Permeabilità moderata, con aumento della stessa nelle zone di fratturazione.</p> <p><b>M2</b><br/>  Conglomerati e breccie ben consolidati, costituiti da ciottoli, da angolari fino a ben arrotondati, di rocce granitiche in una matrice sabbiosa. I depositi basali sono spesso bruno-rossastri. Non fossiliferi. Questo complesso presenta una moderata resistenza all'erosione ed elevata permeabilità.</p> <p><b>y1</b><br/>  Filoni e piccole intrusioni di rocce acide: granito biotitico con muscovite a grana fine (<b>y1</b>); felsite (<b>f</b>); sienite (<b>s</b>); porfido sienitico (<b>y</b>).</p> <p><b>y</b><br/>  Granito biotitico grossolano, localmente intersecato da vene (non cartografabili) di basalto porfirico (<b>β</b>) e lamprofiro (<b>λ</b>). Piccoli xenoliti basici ricorrono, sporadicamente, in tutta la massa. Come consistenza, si varia da roccia fresca, e resistente all'erosione, a roccia alterata e degradata, facilmente disgregabile. Permeabilità generalmente bassa, con aumento della stessa nelle zone di fratturazione e degradazione.</p> <p><b>sb</b><br/>  Scisti a grana da media a grossolana, occasionalmente gneiss quarzoso-biotitico-muscovitico, spesso occhiadini, talora con clorite. Sia l'ortoclasio che l'albite sono generalmente presenti. Nei pressi del contatto col granito essi sono andalusitici, occasionalmente con tornalina (***). Ad est di Savelli, sulla strada, gli scisti presentano picchiettature di materiale scuro, forse carbonioso. Le rocce di questo complesso sono generalmente resistenti all'erosione. Permeabilità bassa, con aumento della stessa nelle zone di fratturazione.</p> |
|---|--|

**CSI6** EDIFICIO MONITORATO

**CSIF** PRELIEVO CAMPIONE ACQUA





## **APPENDICE B**





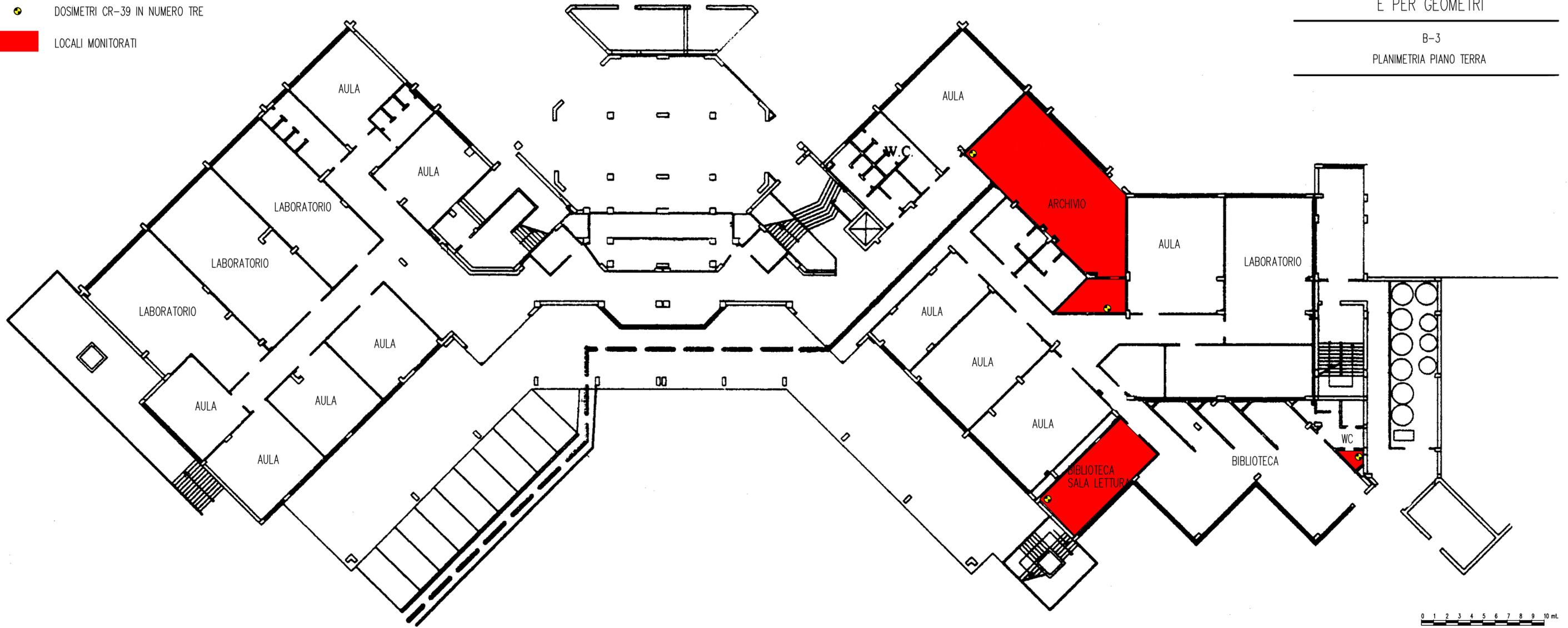
LEGENDA

● DOSIMETRI CR-39 IN NUMERO TRE

■ LOCALI MONITORATI

ISTITUTO TECNICO COMMERCIALE  
E PER GEOMETRI

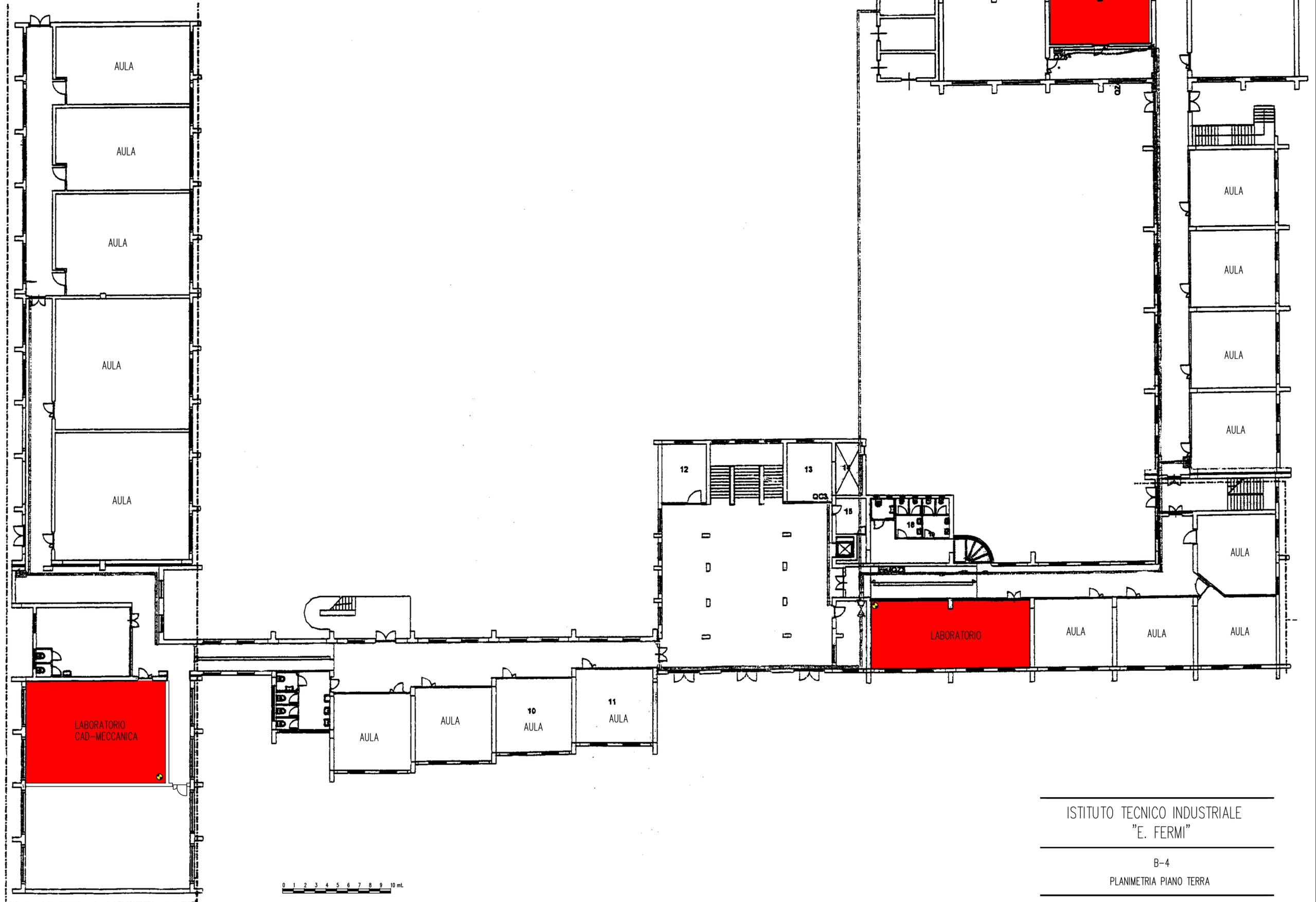
B-3  
PLANIMETRIA PIANO TERRA



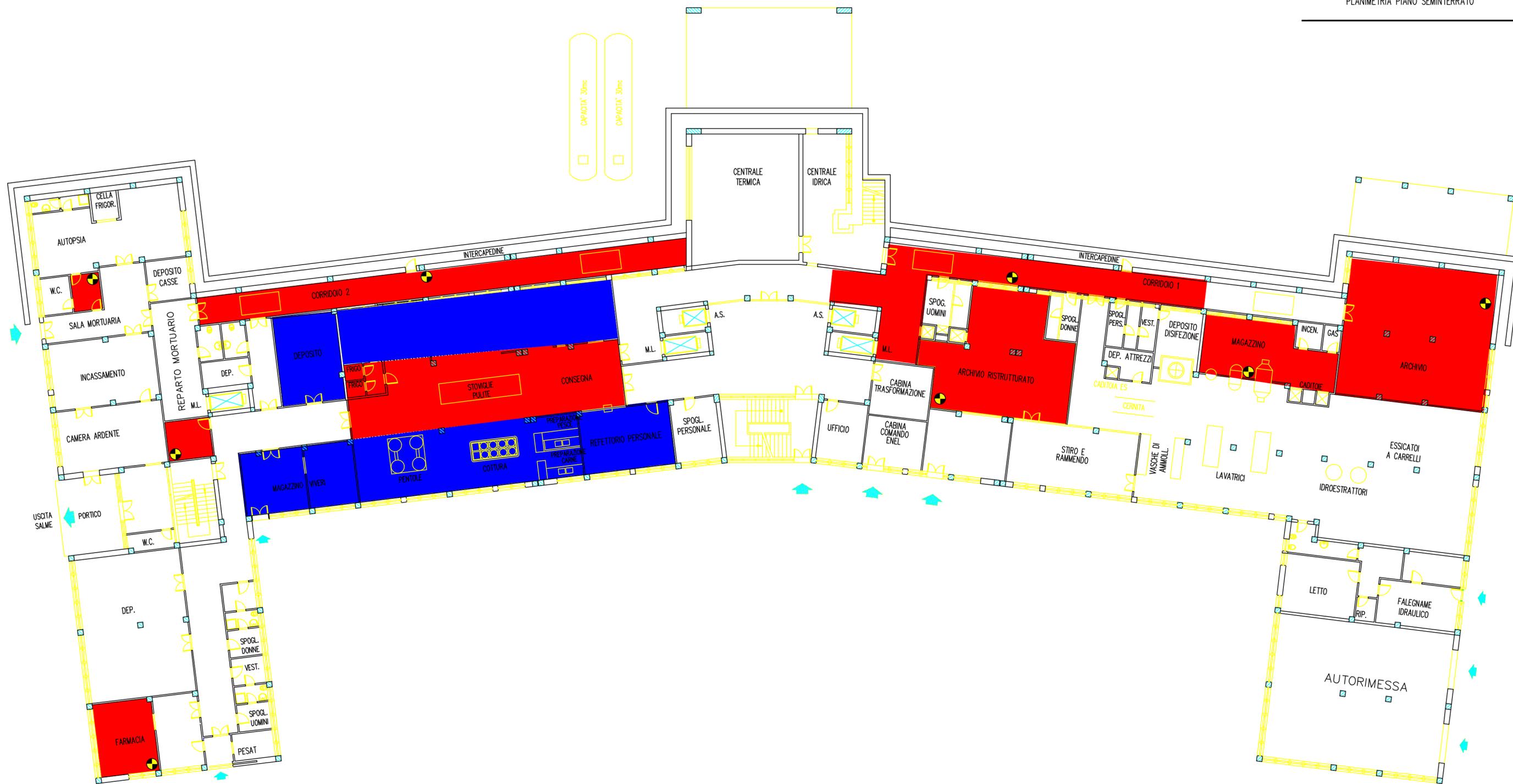
LEGENDA

● DOSIMETRI CR-39 IN NUMERO TRE

■ LOCALI MONITORATI







0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 mt.

LEGENDA

- DOSIMETRI CR-39 IN NUMERO TRE
- LOCALI MONITORATI
- IN RISTRUTTURAZIONE



LEGENDA

 DOSIMETRI CR-39 IN NUMERO TRE

 LOCALI MONITORATI



LEGENDA



DOSIMETRI CR-39 IN NUMERO TRE



LOCALI MONITORATI

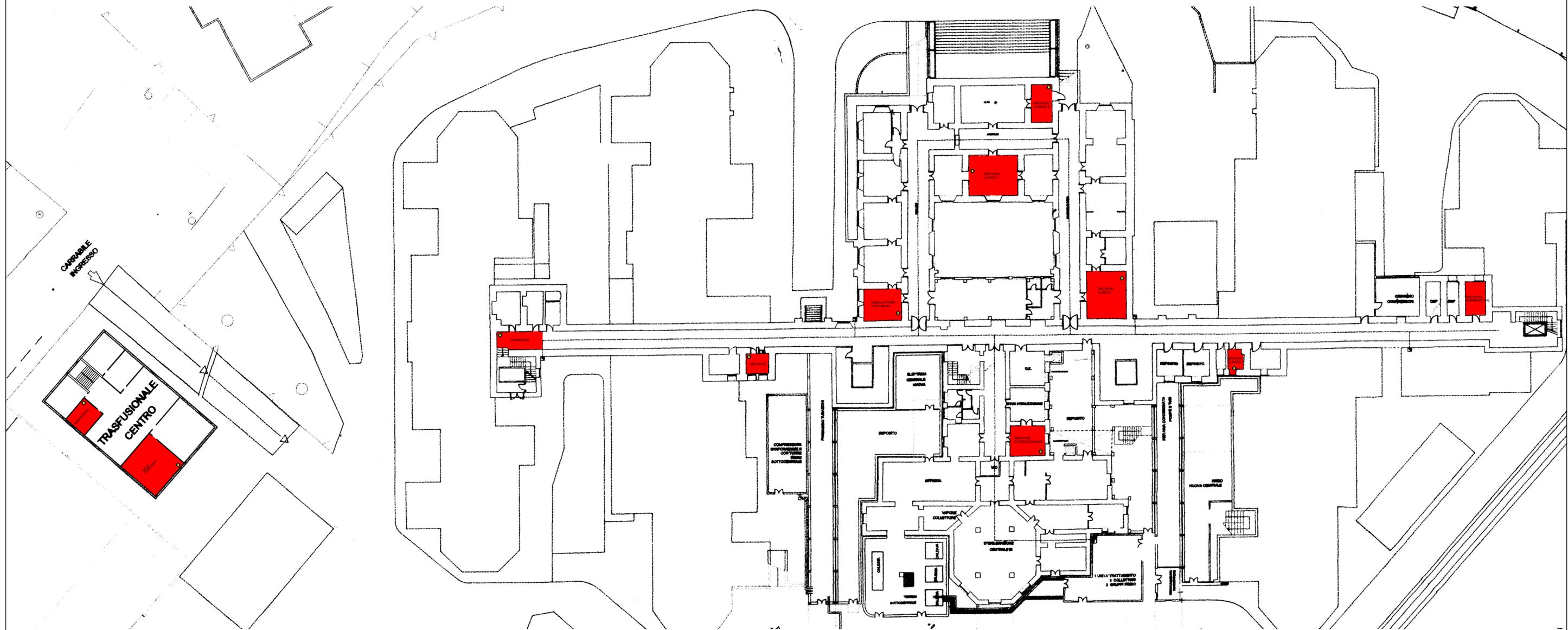
AZIENDA SANITARIA N.4 COSENZA

B-8

PRESIDIO OSPEDALIERO "ANNUNZIATA" DI COSENZA

PLANIMETRIA PIANO SEMINTERRATO

NORD



LEGENDA



DOSIMETRI CR-39 IN NUMERO TRE



LOCALI MONITORATI



COMPLESSO IN FASE DI ULTIMAZIONE

NORD



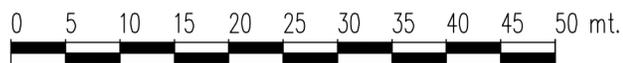
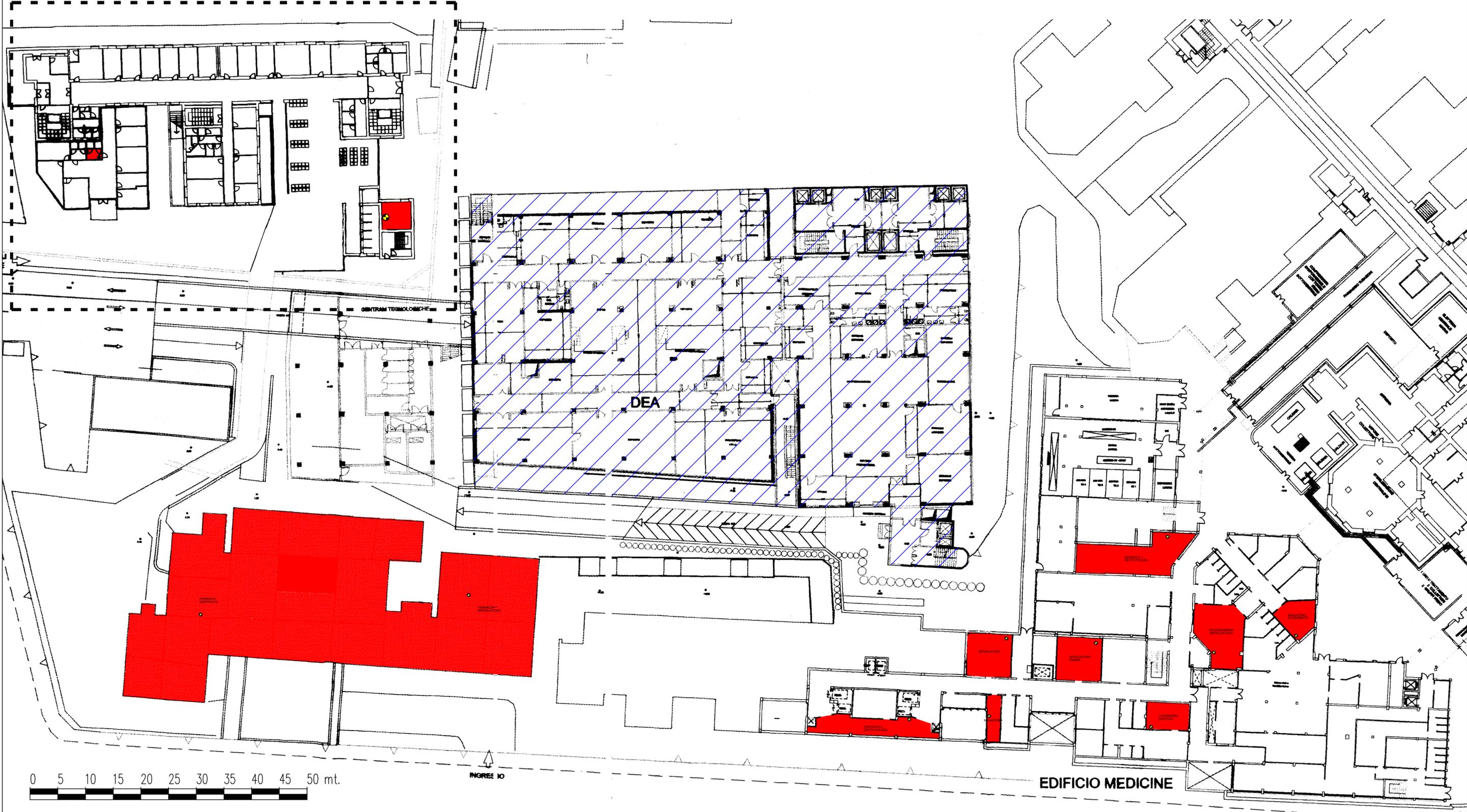
AZIENDA SANITARIA N.4 COSENZA

B-9

PRESIDIO OSPEDALIERO "ANNUNZIATA" DI COSENZA

PLANIMETRIA PIANO SEMINTERRATO

PLANIMETRIA PIANO TERRA



INGRESSO

EDIFICIO MEDICINE

LEGENDA

 DOSIMETRI CR-39 IN NUMERO TRE

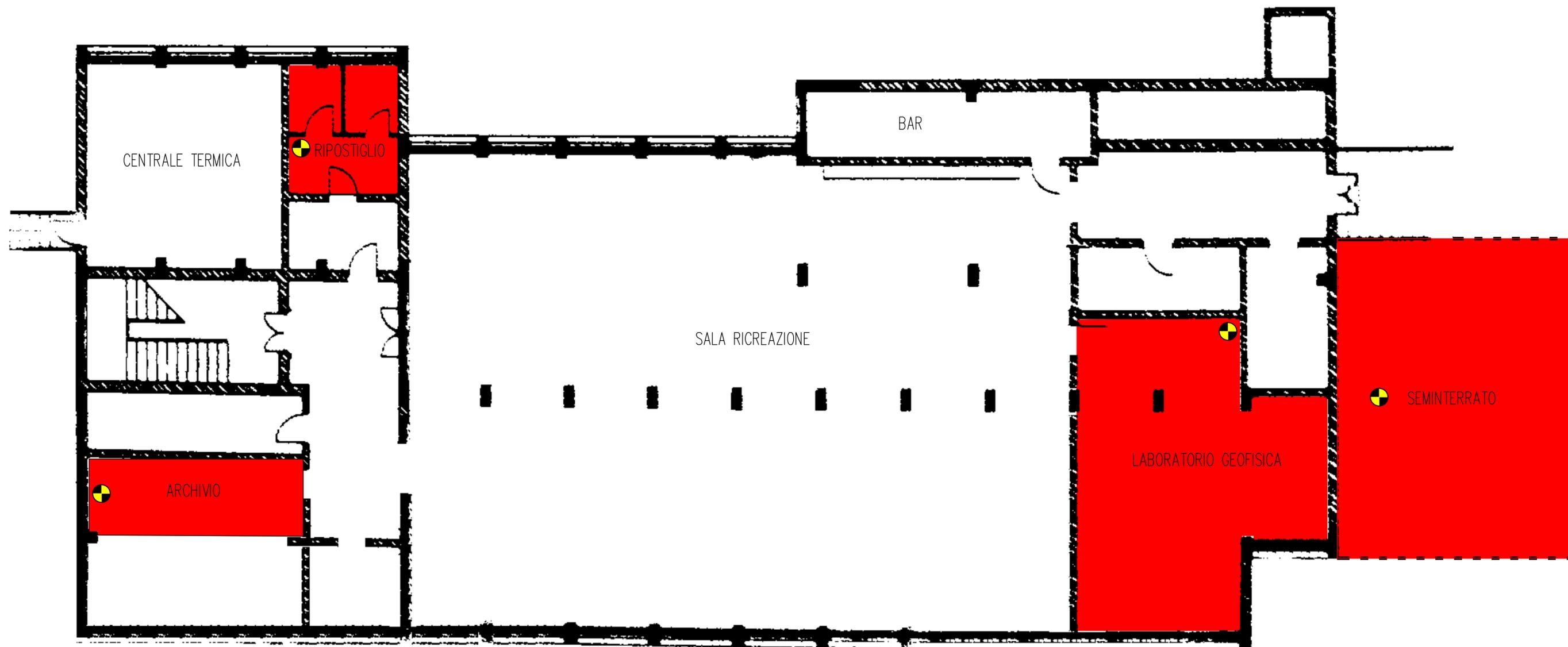
 LOCALI MONITORATI

LICEO SCIENTIFICO STATALE

B-10

"G.B. SCORZA"

PLANIMETRIA PIANO TERRA



LEGENDA

 DOSIMETRI CR-39 IN NUMERO TRE

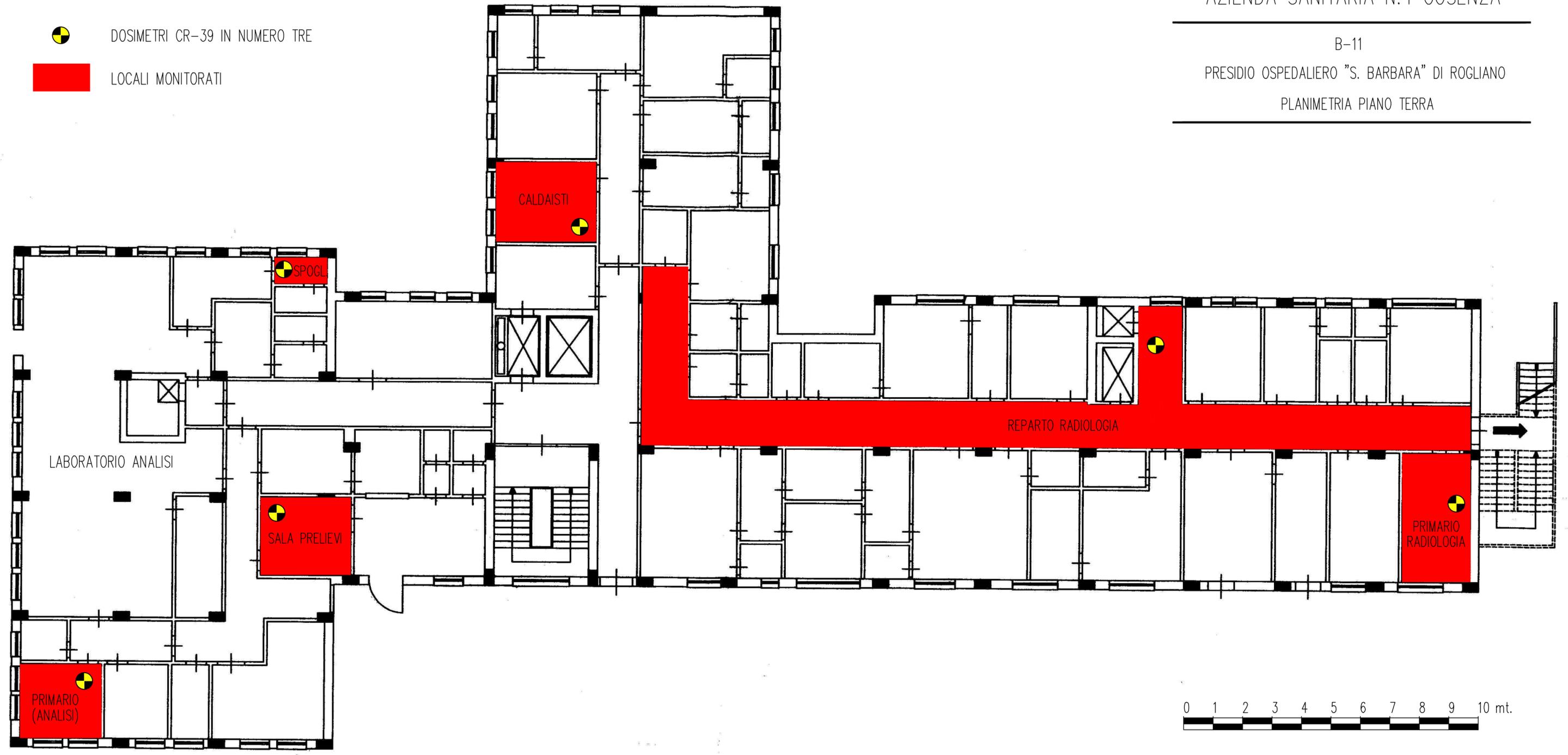
 LOCALI MONITORATI

AZIENDA SANITARIA N.4 COSENZA

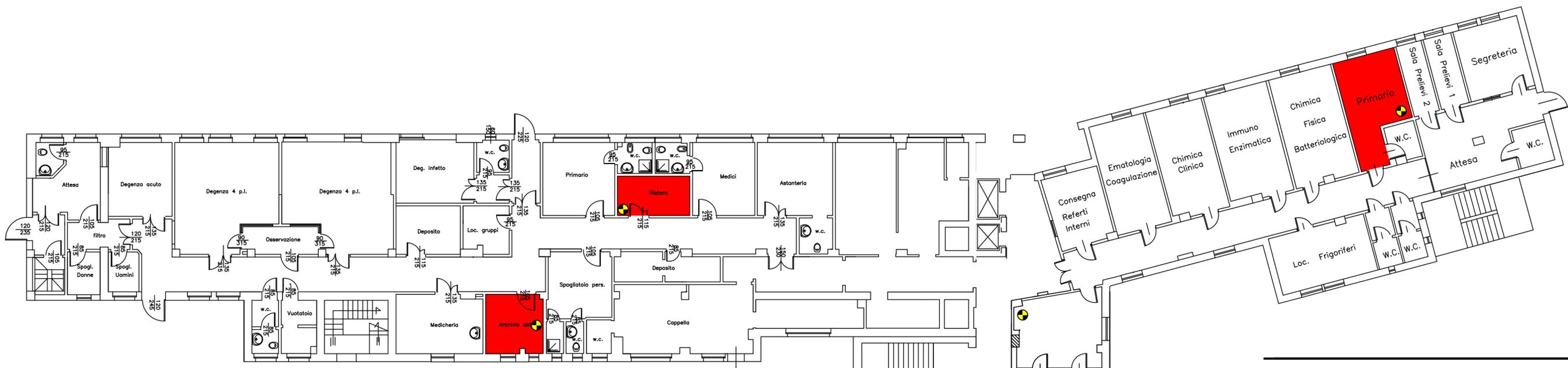
B-11

PRESIDIO OSPEDALIERO "S. BARBARA" DI ROGLIANO

PLANIMETRIA PIANO TERRA



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 mt.

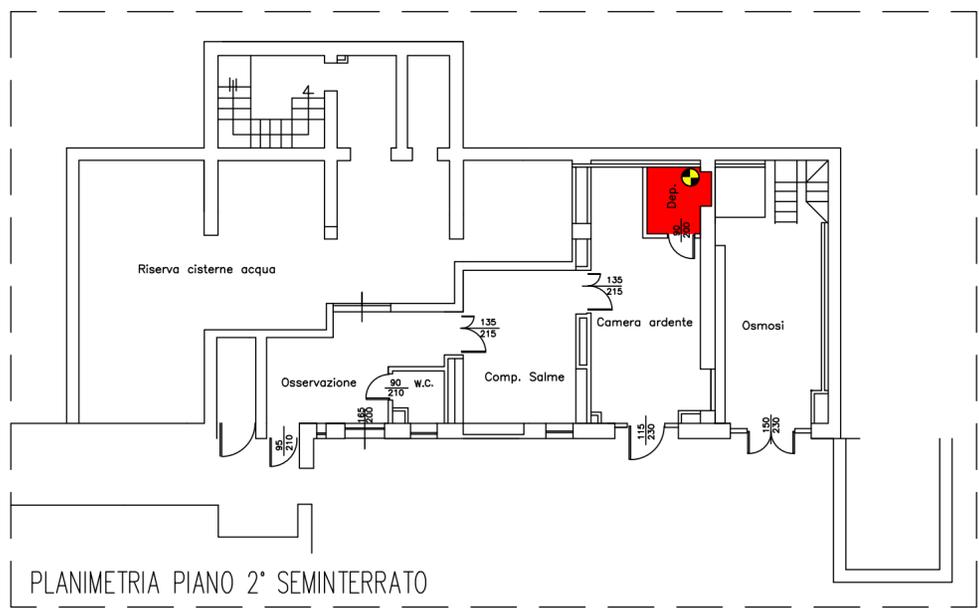


AZIENDA SANITARIA N.5 CROTONE

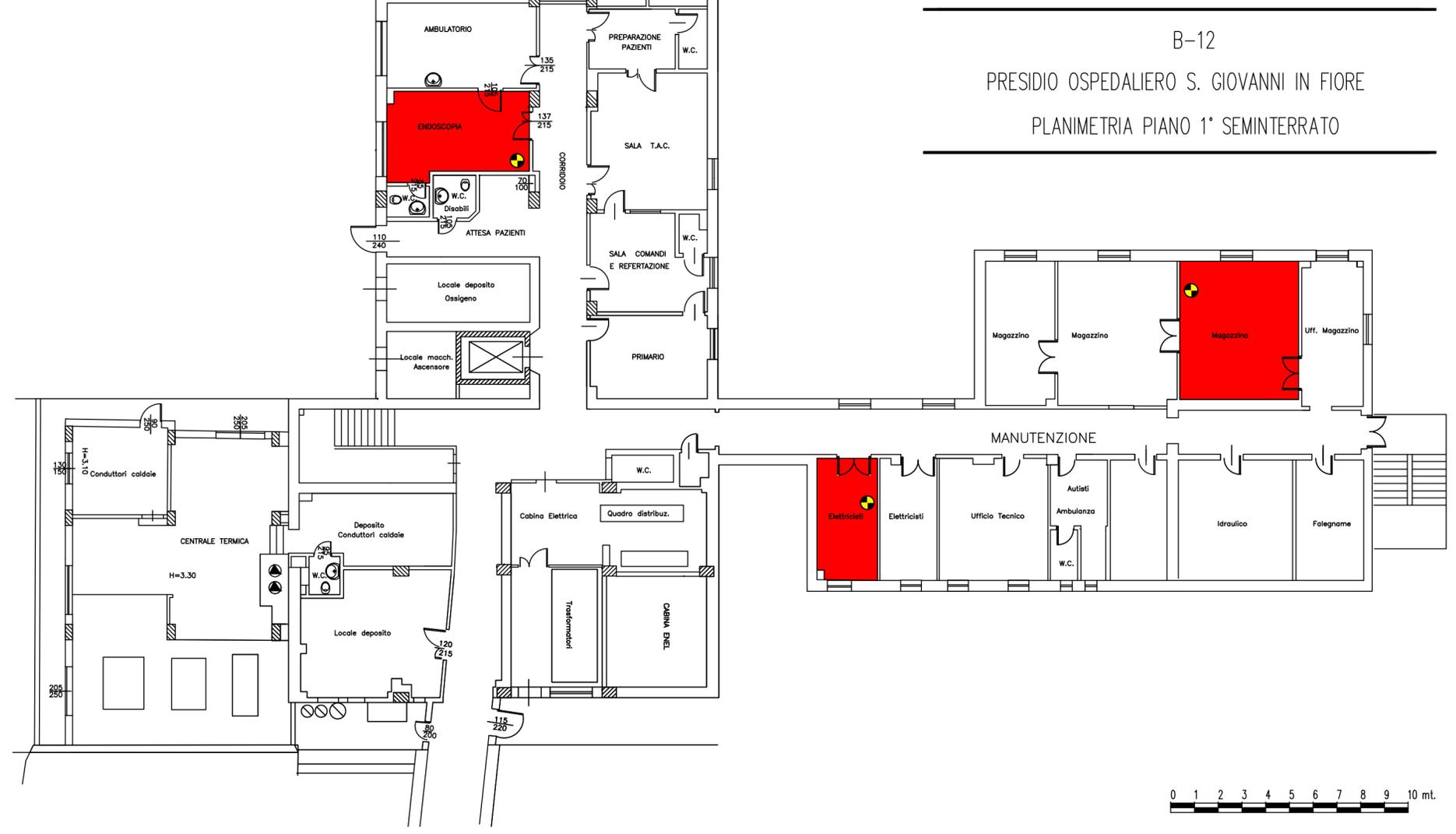
B-12

PRESIDIO OSPEDALIERO S. GIOVANNI IN FIORE

PLANIMETRIA PIANO 1° SEMINTERRATO



PLANIMETRIA PIANO 2° SEMINTERRATO



LEGENDA

 DOSIMETRI CR-39 IN NUMERO TRE

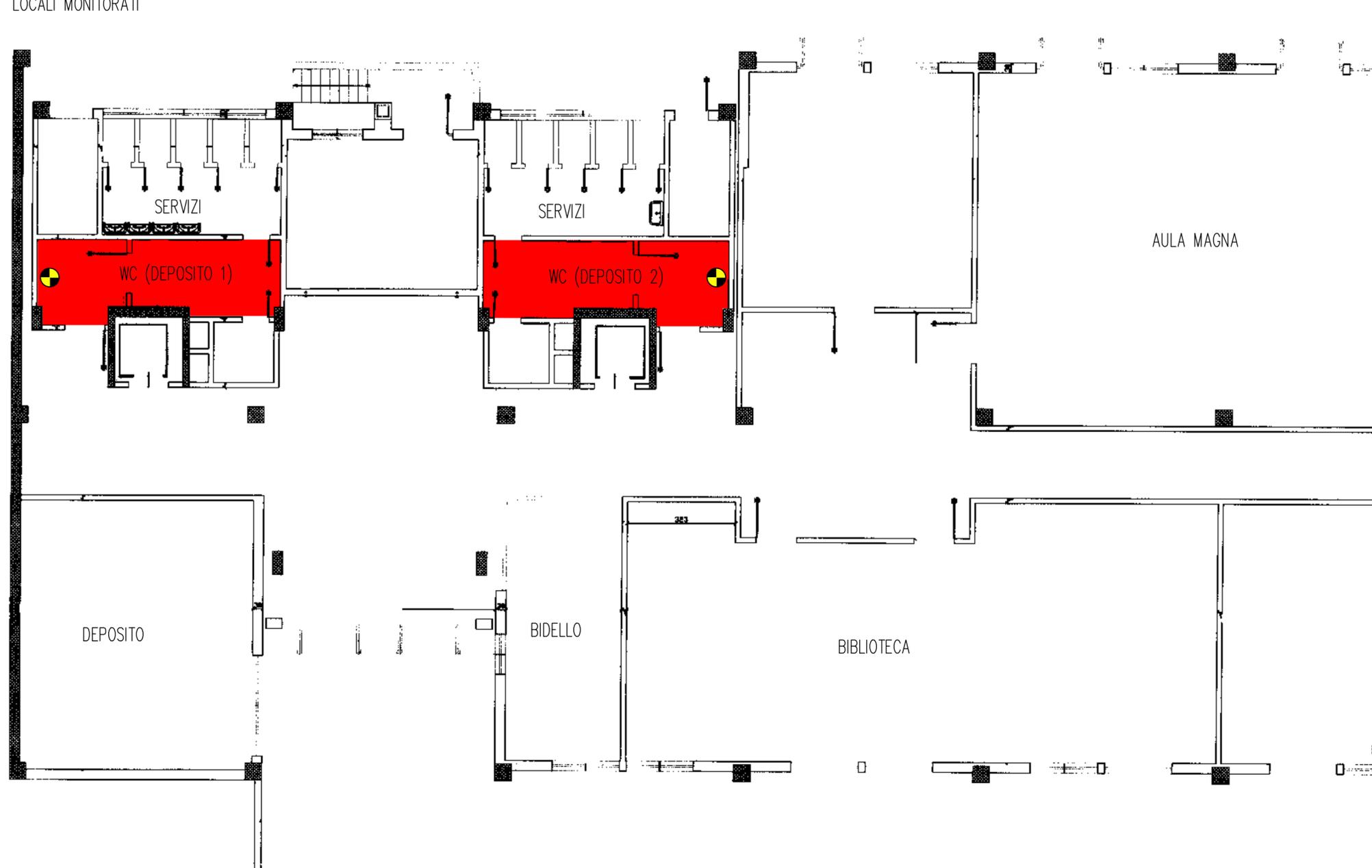
 LOCALI MONITORATI



LEGENDA

 DOSIMETRI CR-39 IN NUMERO TRE

 LOCALI MONITORATI

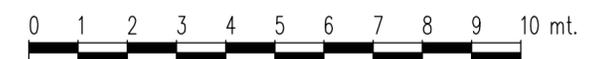


COMUNE DI S. GIOVANNI IN FIORE

B-13

ISTITUTO D'ARTE

PLANIMETRIA PIANO SEMINTERRATO



LEGENDA

 DOSIMETRI CR-39 IN NUMERO TRE

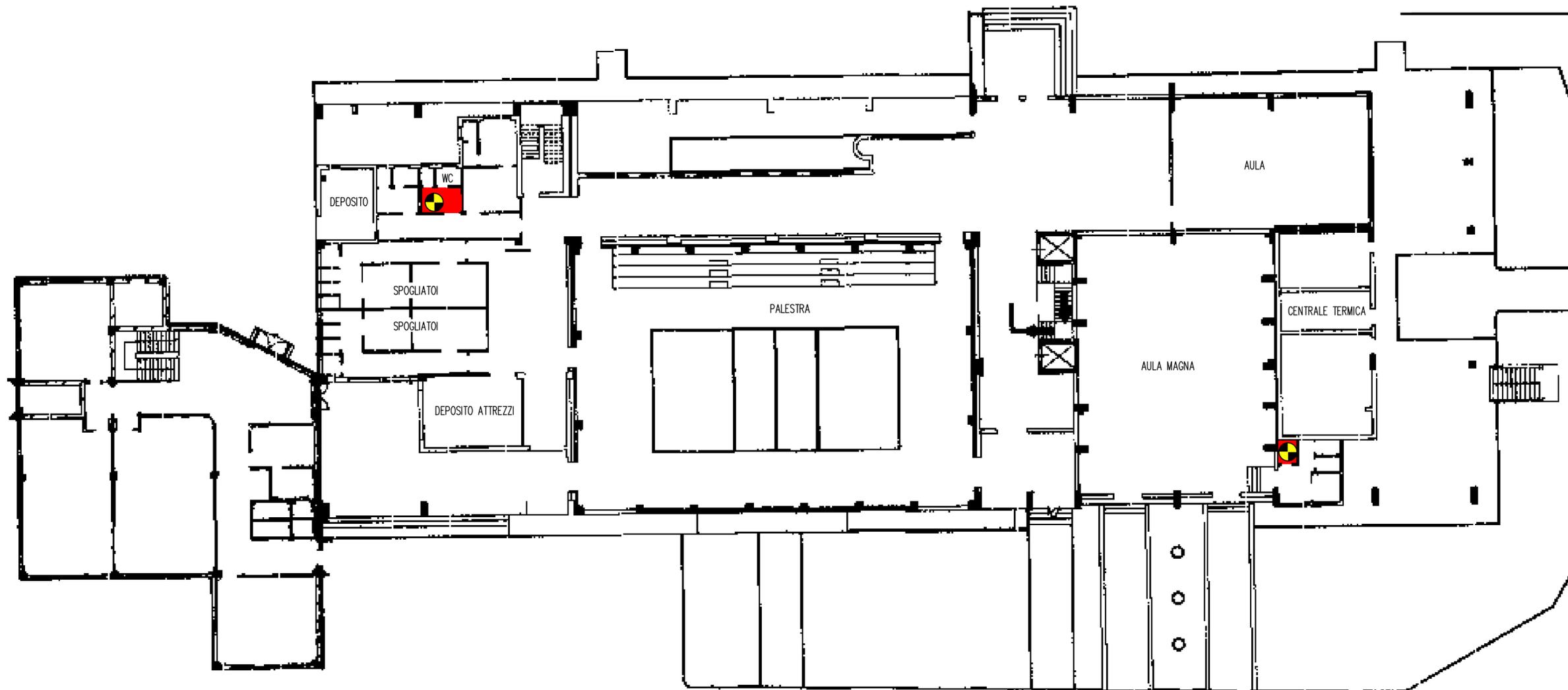
 LOCALI MONITORATI

COMUNE DI S. GIOVANNI IN FIORE

B-14

I.T.C.G. RAGIONERIA

PLANIMETRIA PIANO TERRA



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 mt.

LEGENDA

 DOSIMETRI CR-39 IN NUMERO TRE

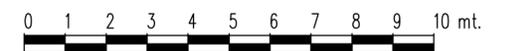
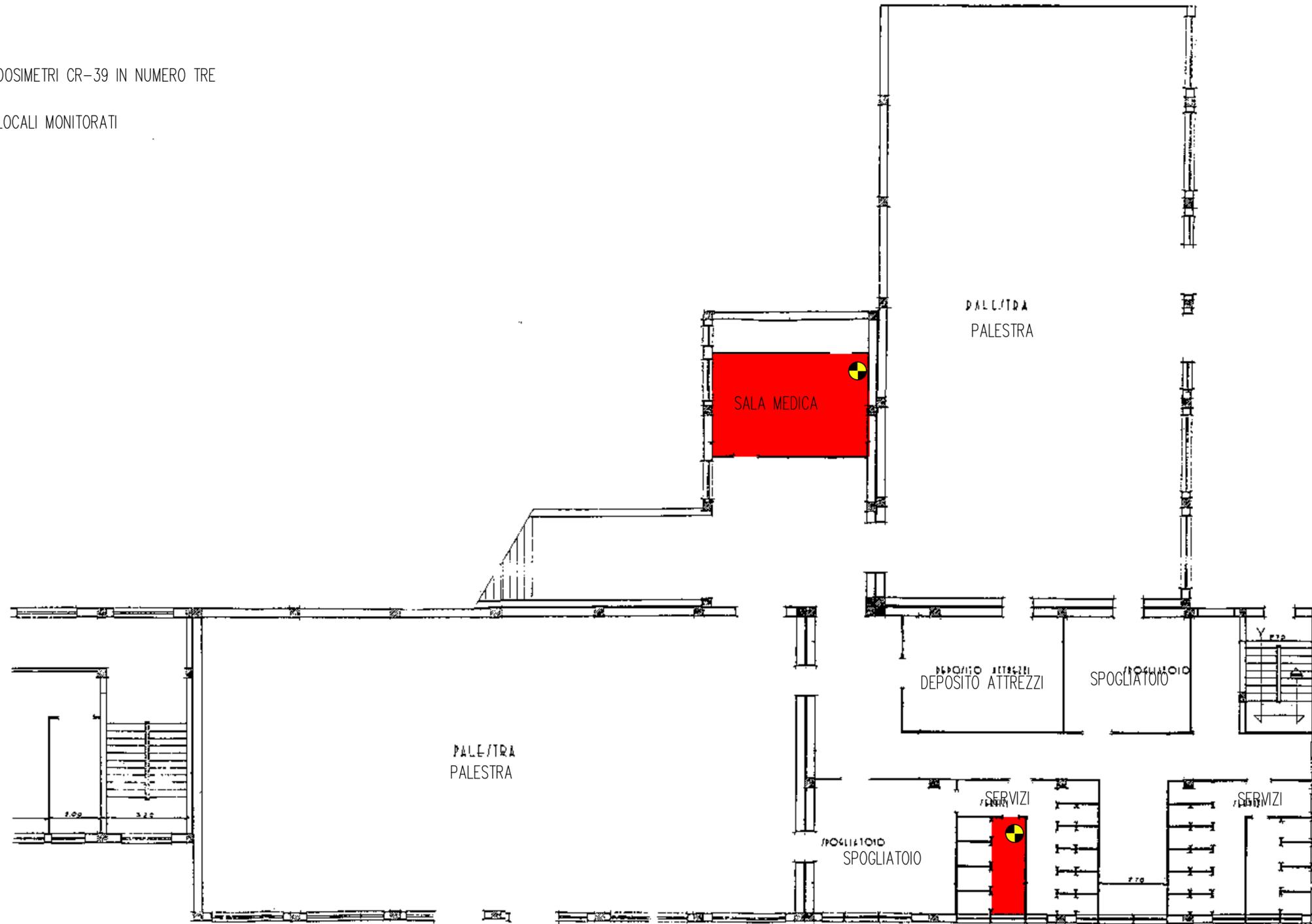
 LOCALI MONITORATI

COMUNE DI S. GIOVANNI IN FIORE

B-15

SCUOLA MEDIA "GIOACCHINO DA FIORE"

PLANIMETRIA PIANO TERRA



LEGENDA

 DOSIMETRI CR-39 IN NUMERO TRE

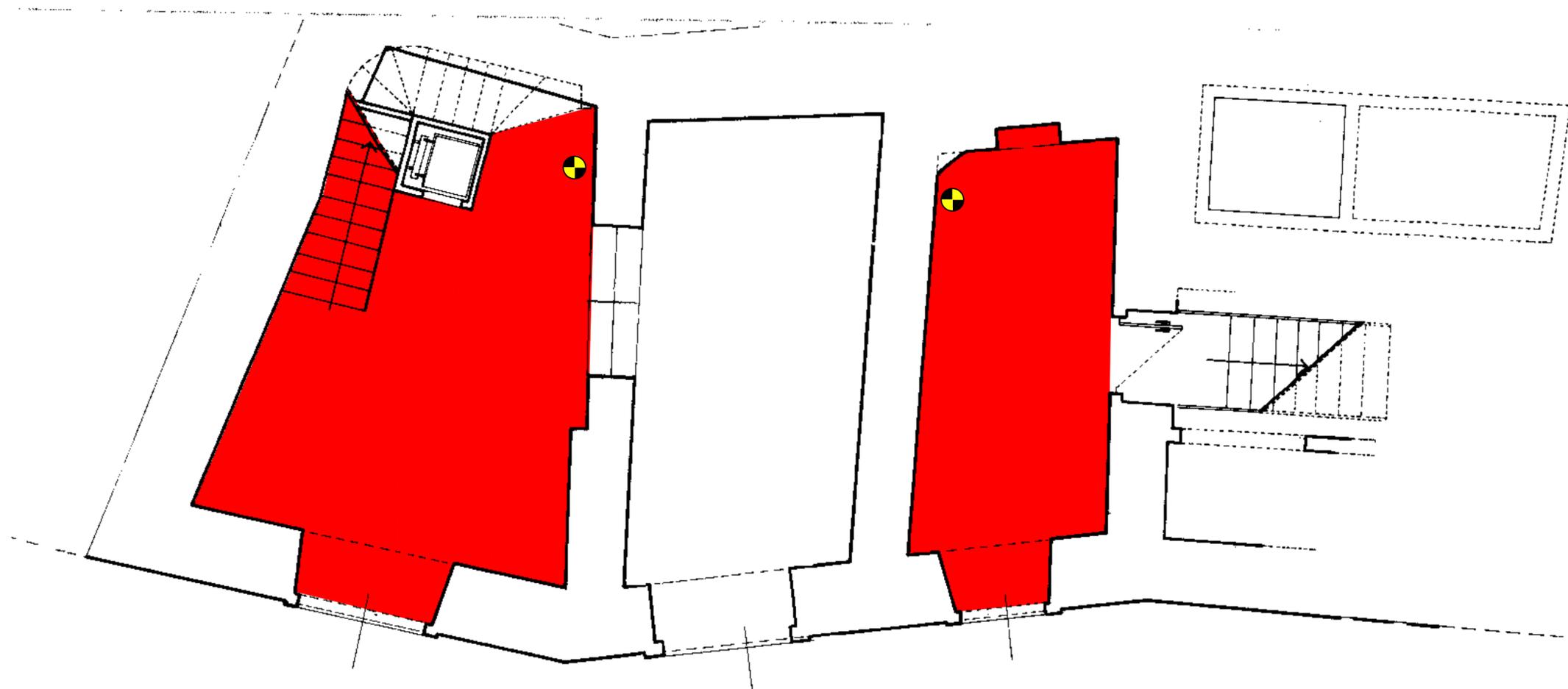
 LOCALI MONITORATI

COMUNE DI S. GIOVANNI IN FIORE

B-16

BIBLIOTECA

PLANIMETRIA PRIMO LIVELLO



## **APPENDICE C**

**Tabella C-1<sup>I</sup>- Presidio ospedaliero di Castrovillari (CASIA): caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>mq</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto dallo esterno</b>	<b>Ulteriori aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
F56673 F56740 F56680	Archivio 1	2 mST	22.0	1 ora/giorno	nessuno	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/06	segato
F56773 F56727 F56685	Microbiologia	2 mST	47.0	8 ore/giorno	riscald./raffred.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/06	Materiale polimerico sintetico
F 56671 F56716 F56721	Locale fotocop.	2 mST	9.6	0.4 ore/giorno	nessuno	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/06	segato
56702 F56709 F56696	Ufficio magazzino economato	2 mST	19.8	3 ore/giorno	nessuno	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	si	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/06	
F 56755 F 56688 F56745	Dispensa emoteca	2 mST	48.0	3 ore/giorno	nessuno	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/06	segato
F56718 F 56769 F56667	Stanza primario	2 mST	16.6	8 ore/giorno	solo riscald.	parzialmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	si	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/06	Materiale polimerico sintetico
F 56758 F 56682 F56758	RIA	2 mST	35.0	8 ore/giorno	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/06	
F 56766 F 56701 F56926	Archivio 2	2 mST	35.5	1 ora/giorno	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	si	si	no	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/06	Ceramico bianco*

**Tabella C-1<sup>II</sup> - Presidio ospedaliero di Castrovillari (CASIA): caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>mq</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto dallo esterno</b>	<b>Ulteriori aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
F 56768 F 56715 F56761	Cucina	3m ST	235.0	6 ore/giorno	nessuno, ventilazione	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	si	si	vapori cucina	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/05	gres
F 56724 F 56881 F56672	Farmacia ufficio	3m ST	24.6	8 ore/giorno	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	si	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/05	gres
F 56760 F 56778 F56802	Deposito farmaci	3m ST	94.8	6 ore/giorno	nessuno	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/05	gres
F 56751 F 56746 F56742	Deposito temporaneo farmaci	3m ST	53.0	3ore/giorno	nessuno	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/05	
F 56698 F 56733 F56731	Spogliatoio uomini	3m ST	60.0	1 ora/giorno	nessuno	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/05	Monocottura ceramica
F 56752 F 56927 F56786	Spogliatoio donne	3m ST	60.0	1 ora/giorno	nessuno	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/05	Monocottura ceramica
F56683 F56737 F56913	archivio (ex-Inam)	3m ST		1 ora/mese	nessuno	Sono parzialmente affacciate a cavedio aereato	a contatto diretto col terreno	no	si	si	16/03/05	21/06/05	20/09/05	16/03/05	segato

**Tabella C-2 - Scuole di Castrovillari: caratteristiche dei locali monitorati**

Id Detector	Utilizzo	Piano	mq	Permanenza personale	Impianto clima	Pareti sotterranee	Pavimento	Accesso diretto dallo esterno	Ulteriori aperture verso l'esterno	Tracce umidità	Data Installaz.	Ritiro a 3 mesi	Ritiro a 6 mesi	Ritiro 1 anno	Tipologia di pavimento
<b>Istituto tecnico "E. Fermi" (CAS6C)</b>															
G16004 G16009 G16168	biblioteca	Piano terra		2 ore/giorno	Solo riscaldam.	Totalmente affacciate a cavedio areato	È a contatto diretto col terreno	si	si	Si (poca)	23/03/06	19/06/06	26/09/06	-	segato
G15938 G16170 G16169	Lab. elettronica	Piano terra		1 ora/settimana	Solo riscaldam.	Totalmente affacciate a cavedio areato	È a contatto con un vespaio areato	no	si (finestre sempre chiuse)	si	23/03/06	19/06/06	26/09/06	-	segato
G15905 G15906 G15993	Lab. CAD meccanica	Piano terra		4 ore/giorno	Solo riscaldam.	Totalmente affacciate a cavedio areato	È a contatto con un vespaio areato	no	si (finestre sempre chiuse)	si	23/03/06	19/06/06	26/09/06	-	segato
<b>Istituto tecnico per geometri (CAS6B)</b>															
G15903 G15995 G15987	Archivio 1	Piano terra		1ora /settimana	Solo riscaldam	Totalmente affacciate a cavedio areato	È a contatto diretto col terreno		si (finestre sempre chiuse)		23/03/06	19/06/06	26/09/06	-	Gres
G15864 G15997 G15862	Archivio 2	Piano terra		saltuario	Solo riscaldam.	Totalmente affacciate a cavedio areato	È a contatto diretto col terreno		no		23/03/06	19/06/06	26/09/06	-	Gres
G15874 G15978 G16171	Biblioteca – sala lettura	Seminter-rato		3 ore/giorno	Solo riscaldam	Totalmente affacciate a cavedio areato	È a contatto diretto col terreno	no	si (finestre quasi sempre chiuse)	si	23/03/06	19/06/06	26/09/06	-	Gres rosa
G15861 G15901 G15960	Biblioteca (bagno-deposito)	Seminter-rato		1 ora/settimana	Solo riscaldam	Totalmente affacciate a cavedio areato	È a contatto diretto col terreno	no	no	no	23/03/06	19/06/06	26/09/06	-	Gres verde + piastrelle di rivestimento in gres
<b>Liceo scientifico "Enrico Mattei" (CAS6D)</b>															
G16071 G16068 G16075	Deposito - archivio	Seminter-rato		2 ore/settimana	nessuno	Parzialmente affacciate a cavedio areato	È a contatto diretto col terreno	si	no	no	23/03/06	19/06/06	26/09/06	-	Gres

**Tabella C-3 - Presidio ospedaliero di Mormanno (MR1): caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>mq</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto dallo esterno</b>	<b>Ulteriori aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
F 56923 F 56776 F56741	Archivio 1	PT Una parete 2 mt sotto p.c.	8.8	5 ore/giorno	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	si	si	si	24/3/05	21/6/05	20/09/05	24/03/06	Gres rosa
F 56787 F 56791 F56781	Ufficio archivio	PT Una parete 2 mt sotto p.c.	13.9	5 ore/giorno	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	si	si	si	24/3/05	21/6/05	20/09/05	24/03/06	Gres rosa
F 56774 F 56749 F56749	Spogliatoio cucina*	PT	5.1	0.5 ore/giorno	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	si	si	no	24/3/05	21/6/05	20/09/05	24/03/06	Piastrelle bianche ceramiche di rivestimento
F 56784 F 56780 F56756	Deposito*	PT Una parete 2 mt sotto p.c.	28.3	saltuaria	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	finestre sempre chiusure	si	24/3/05	21/6/05	20/09/05	24/03/06	Gres rosa
F 56670 F 56782 F56759	Refettorio	PT Una parete 2 mt sotto p.c.	21.5	6 ore/giorno	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	finestre	si	24/3/05	21/6/05	20/09/05	24/03/06	Piastrelle bianche ceramiche di rivestimento
F 56719 F 56748 F56887	Sala convegni	PT	34.8	1 volta al mese	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	si	no	no	24/3/05	21/6/05	20/09/05	24/03/06	Gres rosa
F 56753 F 56772 F56750	Archivio 2	PT	6.5	5 ore/giorno	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	si	24/3/05	21/6/05	20/09/05	24/03/06	Gres rosa

**Tabella C-4 - Presidio ospedaliero di Lungro (LUI): caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>mq</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto dallo esterno</b>	<b>Ulteriori aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
F 30119 F 30084 F30124	Farmacia	1ST	23.0	8 ore/giorno	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/06	Mattonelle rosse
F 30004 F 30090 F29935	Corridoio 1	1ST	9.0	saltuaria	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	si (molta)	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/06	Mattonelle rosse
F 30108 F 30082 F29994	Corridoio 2	1ST	88.0	saltuaria	solo riscald.	completamente a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	si	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/06	Mattonelle rosse
F 30069 F 29939 F30005	Archivio	1ST	110.0	1 ore/giorno	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	si	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/06	Mattonelle rosse
F 30088 F 30063 F30062	Deposito	1ST	38.0	1 ore/giorno	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	si	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/06	Mattonelle rosse
F 30039 F 29940 F30083	Archivio ristrutturato	1ST (una sola parete)	79.0	8ore/giorno	solo riscald.	solo parzialmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	si	no	no	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/06	Gres rosa
F 30089 F 30120 F30113	Sala mortuaria	1ST	26.0	6ore/settimana	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/06	Mattonelle rosse
F 29974 F 30020 F30055	Corridoio 3	1ST	72.0	saltuaria	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/06	Mattonelle rosse

**Tabella C-5 - Presidio ospedaliero di San Marco Argentano(SM1): caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>mq</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto dallo esterno</b>	<b>Ulteriori aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
F 30057 F 30056 F29966	Attesa obitorio	PT	8.8	2 ore/giorno	solo riscald.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	si	no	si	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/05	marmo
F 30045 F 30094 F30064	Spogliatoio uomini	2 m sotto piano campagna	35.9	1ora/giorno	solo riscad.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	si	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/05	p.v.c.
F 30052 F 30077 F30042	Palestra	2 m sotto piano campagna	49.0	1ora/giorno	solo riscad.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	si	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/05	Ceramico bianco
F 56743 F 30058 F30070	Farmacia	2 m sotto piano campagna	64.5	2ore/giorno	solo riscad.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	si	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/05	
F 30122 F 30100 F29963	Dietista	2 m sotto piano campagna	12.3	6ore/giorno	solo riscad.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	finestra	si	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/05	Piastrelle di rivestimento Ceramico
F 30049 F 30112 F30085	Cucina	2 m sotto piano campagna	163.5	12ore/giorno	solo riscad.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	si	si	no	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/05	ceramico
F 30081 F 30111 F30126	Deposito cucina	2 m sotto piano campagna	32.1	1ora/giorno	solo riscad.	totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	19/04/05	22/07/05	24/10/05	19/04/05	ceramico

**Tabella C-6<sup>1</sup> - Presidio ospedaliero di Cosenza (SS. Annunziata) (CSIA): caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto verso l'esterno</b>	<b>Ulteriori aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
F30071 F30051 F29982	magazz. (centro trasfus.)	seminterrato	3 ore/settimana	no	solo parzialmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	Si (finestre sempre chiuse)	no	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	segato
F30127 F29992 F30040	centro trasf. prelievo (don.)	seminterrato	8ore/giorno	Solo riscaldamento	solo parzialmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	si	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	
F30021 F30046 F30114	spogl.(area lav..)	seminterrato	3 ore/settimana	no	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	
F30103 F30075 F30091	magazzino		1-2 ore/settimana		solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno				27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	
F30066 F29967 F30109	spogl. donne (area lav.)	seminterrato	3 ore/settimana	no	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	si	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	
F30034 F30044 F30101	lavanderia	seminterrato	6 ore/giorno	Solo riscaldamento	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	si	si	no	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	Gres rosa
G16368 G16362 G16360	magazz. economato	seminterrato	8 ore/giorno	Solo riscaldamento	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	poca	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	
G16340 G16404 G16365	deposito 1 (ditta pulizia)	seminterrato	1 volta/mese	no	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	poca	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	
G16342 G16379 G16343	deposito 2 (ditta pulizia)	seminterrato		no	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	si	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	Gres rosa

**Tabella C-6<sup>II</sup> - Presidio ospedaliero di Cosenza (SS. Annunziata)(CSIA): caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto verso l'esterno</b>	<b>Ulteriori aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
G16394 G16383 F30076	falegnameria (spogl.)	P.T	1ora /giorno	no	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	Si (finestra sempre chiusa)	si	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	
G16378 G16390 G16376	ufficio ticket	P.T	10 ore/giorno	si	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	marmo
G16361 F16398 G16361	ambulatorio oculistica	P.T.	3ore/settimana	no	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	Piastrelle bli + rivestimento in gres*
G16392 G16385 G16381	farmacia (deposito)	P.T.		no	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	segato
G16375 G 16384 G16350	bagno spogliat. (farmacia)				solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno				27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	
G16233 G16182 G16178	corridoio (sotto pediatria)	2 mST	1 ora/mese	no	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	si	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	mezzo segato
G16215 G16195 G16218	archivio (deposito)	2 mST	saltuario	no	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	Si (sigillate)	si	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	mezzo segato
G16304 G16284 G16259	Ambulatorio chirurgia	2 mST	10 ore/giorno	solo riscaldamento	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	
G16208 G16183 G16243	archivio clinico	2 mST	8 ore/giorno	no	solo totalmente a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	si	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	segato

**Tabella C-6<sup>III</sup> - Presidio ospedaliero di Cosenza (SS. Annunziata) (CSIA): caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto verso l'esterno</b>	<b>Ulteriori aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
G16191	Archivio clinico 1	2 mST	8 ore/giorno	solo riscaldamento	solo parzialmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	si	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	segato
G16172														
G16264														
G16207	Archivio clinico 2	2 mST	8 ore/giorno	no	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	Si (mai aperta)	no	no	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	segato
G16202														
G16262														
G16173	archivio clinico 3	2 mST	0.5 ore /anno	no	solo totalmente a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	si	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	segato
G16245														
G16180														
G16200	centro sterilizzaz.	1 mST	10 ore/giorno	si	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	Materiale di tipo polimerico sintetico
G16227														
G16213														
G16409	archivio rianimazione	2 mST	1 ora/mese	no	solo parzialmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	si	27/09/05	02/01/06	11/04/06	27/09/06	segato
G16424														
G16252														

**Tabella C-7 - Presidio ospedaliero di Cosenza (Mariano Santo)(CS1B): caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto verso l'esterno</b>	<b>Ulteriori aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
G15439	uff. tecnico	P.T	3 ore/giorno	Solo riscaldamento	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	si	Si	no	19/11/05	22/02/06	23/05/06	19/11/06	segato
G15649														
G15688														
G15992	archivio	1 mST	5ore/giorno	Solo riscaldamento	solo parzialmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	Si	si	19/11/05	22/02/06	23/05/06	19/11/06	segato
G15925														
G16030														

**Tabella C-8 - Liceo scientifico “Scorza” di Cosenza (CSIC): caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto dallo esterno</b>	<b>Ulteriori aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
F30026 F29985 F30106	archivio	2 mST	1.5ore/settimana	no	solo parzialmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	Si (sempre chiuse)	si	20/06/05	28/09/05	12/01/06	20/06/06	segato
F30054 F30121 F30000	lab. Geofisica	2 mST	4 ore/giorno	si	solo parzialmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	20/06/05	28/09/05	12/01/06	27/09/06	segato
F30067 F30061 F27501	ripostigl. magazz.	2 mST	1 ora/mese	no	solo parzialmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	Si (sempre chiuse)	si	20/06/05	28/09/05	12/01/06	27/09/06	segato
F30072 F30065 F30107	seminterrato	1 mST	mai	no	solo parzialmente affacciate a cavedio aerato	Non presente	si	no	si	20/06/05	28/09/05	12/01/06	27/09/06	terreno

**Tabella C-9 - Presidio ospedaliero di Rogliano ("Santa Barbara")(ROI): caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto verso l'esterno</b>	<b>Ulteriori aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
G15425 G15977 G15924	archivio 1		1 ora /giorno	no	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	Si (finestra sempre chiusa)	si	19/11/05	22/02/06	23/05/06	19/11/06	segato
G15935 G15936 G15932	archivio 2 (uff.)	P.T	10 ore/giorno	si	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	19/11/05	22/02/06	23/05/06	19/11/06	marmo
G15758 G15639 G15781	stanza primario (radiologia)	P..T	10 ore/giorno	si	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	si	19/11/05	22/02/06	23/05/06	19/11/06	Piastrelle blu + rivestimento in gres*
G16423 G16311 G16420	corridoio radiologia		8 ore/giorno	si	solo parzialmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	si	no	si	19/11/05	22/02/06	23/05/06	19/11/06	Materiale polimerico sintetico
G15797 G15793 G15629	stanza caldeista				solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno				19/11/05	22/02/06	23/05/06	19/11/06	
G15668 G15421 G15632	stanza primario (analisi)	Primo piano	10 ore/giorno	no	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto con un altro piano	no	no	si	19/11/05	22/02/06	23/05/06	19/11/06	mezzo segato
G16020 G16037 G15971	sala prelievi	P.T	6 ore/giorno	no	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	si	19/11/05	22/02/06	23/05/06	19/11/06	Gres rosa
G15673 G15607 G15621	spogl. uomini lab.analisi	P.T (una parete interrata)	10 ore/giorno	solo riscaldamento	solo totalmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	19/11/05	22/02/06	23/05/06	19/11/06	Gres rosa
G15965 G15897 G15954	antibagno dipend. (mensa)	2 mST	1 ore/giorno	no	solo totalmente a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	si	19/11/05	22/02/06	23/05/06	19/11/06	Gres rosso
G15614 G15654 G15792	bagno mensa	P.T	1 ore/giorno	no	solo parzialmente affacciate a cavedio aerato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	19/11/05	22/02/06	23/05/06	19/11/06	Gres rosa

**Tabella C-10 - Presidio ospedaliero di San Giovanni in Fiore (SGFIA): caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto dallo esterno</b>	<b>Ulteriori aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
G16231 G16225 G16186	Magazzino	Seminterrato	10 ore/settimana	NO	completamente a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	NO	NO	NO	09/01/06	10/04/06	10/07/06	09/01/07	Mattonelle rosse
G16177 G16290 G16291	Neferometria	Piano terra	8 ore/giorno	riscaldamento	parzialmente a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	NO	NO	NO	09/01/06	10/04/06	10/07/06	09/01/07	gres
G16256 G16217 G16239	Primario Dott. Perfetti	Piano terra	8 ore/giorno	riscaldamento	totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	NO	Si	NO	09/01/06	10/04/06	10/07/06	09/01/07	gres
G16234 G16214 G16242	Stanza elettricisti	Seminterrato	2 ore/settimana	NO	parzialmente a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	NO	NO	NO	09/01/06	10/04/06	10/07/06	09/01/07	Mattonelle rosse
G16260 G16237 G16221	Capo sala reparto dialisi	Piano terra	8 ore/giorno	solo riscaldamento	totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	NO	Si	NO	09/01/06	10/04/06	10/07/06	09/01/07	gres
G15761 G15734 G15750	Cucina reparto dialisi	Piano terra	7 ore/settimana	NO	parzialmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	NO	NO	NO	09/01/06	10/04/06	10/07/06	09/01/07	gres
G15800 G15741 G15799	Obitorio	Piano terra	1 ora/giorno	NO	completamente a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	NO	NO	NO	09/01/06	10/04/06	10/07/06	09/01/07	gres
G15813 G15818 G15820	Endoscopia	Seminterrato	12 ore settimanali	solo riscaldamento	completamente a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	NO	Si	NO	09/01/06	10/04/06	10/07/06	09/01/07	gres

**Tabella C-11<sup>1</sup> - Scuole di San Giovanni in Fiore: caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto dallo esterno</b>	<b>Ulteriori Aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
<b>(SGF1B)</b>														
G15605 G15598 G15783	bagno p. sott.	seminterrato	1ora/settimana	solo riscaldam	una parete a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	no	23/12/05	23/03/06	26/06/06	23/12/06	
G15598 G15689 G 15618	bagno p. semint..	seminterrato	1ora/settimana	solo riscaldam	una parete a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	no	23/12/05	23/03/06	26/06/06	23/12/06	
<b>I.T.C.G. – Ragioneria (SGF1C)</b>														
G15616 G15603 G15646	bagno aula magna (dep.)	seminterrato	1 ora/mese	no	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	23/12/05	23/03/06	26/06/06	23/12/06	gres
G15415 G15664 G15630	bagno p.t.	P.T	1 ora/mese	no	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	23/12/05	23/03/06	26/06/06	23/12/06	gres
<b>Bandiera (SGF1D)</b>														
G15650 G15676 G15685	bagni palestra	P.T	1ora/settimana	solo riscaldam	parzialmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	23/12/05	23/03/06	26/06/06	23/12/06	Mattonelle rosse
G15782 G15430 G16298	accesso cucina	P.T	5ore/giorno	solo riscaldam	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	22/12/05	2203/06	26/06/06	22/12/06	mezzosegato
<b>Scuola materna Via Difesa (SGF1E)</b>														
G15696 G15710 G15627	stanza caffè	seminterrato	3ore/giorno	no	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	no	22/12/05	23/03/06	26/06/06	22/12/06	Gres rosa
G15440 G15736 G15766	bagno cuoca	seminterrato	10ore/settimana	solo riscaldam	parzialmente affacciate a cavedio areato	con un altro piano	no	no	no	22/12/05	23/03/06	26/06/06	22/12/06	Gres rosa

**Tabella C-11<sup>H</sup> - Scuole di San Giovanni in Fiore: caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto dallo esterno</b>	<b>Ulteriori Aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
<b>(SGF1F)</b>														
G15921 G15990 G16036	magazzino	P.T..	6ore/giorno	solo riscaldam	parzialmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	si	si	no	22/12/05	2203/06	26/06/06	22/12/06	Mattonelle rosse
G16333 G16281 G15909	bagno (deposito)	P.T..	3 ore/settimana	no	parzialmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	22/12/05	2203/06	26/06/06	22/12/06	mezzosegato
G16266 G16408 G16410	aula magna	P.T..	3 ore/giorno	no	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	22/12/05	2203/06	26/06/06	22/12/06	gres
G16274 G16275 G16273	lab. N.3	P.T..	6 ore/giorno	solo riscaldam	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	si	si	no	22/12/05	2203/06	26/06/06	22/12/06	Mattonelle rosse
<b>Scuola media Gioacchino da Fiore (SGF1G)</b>														
G16297 G16416 G16294	sala medica	P.T	saltuaria	solo riscaldam	parzialmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	22/12/05	2203/06	22/06/06	22/12/06	gres
G16419 G16337 G16334	spogliatoio	Primo piano	saltuaria	no	Totalmente affacciate a cavedio areato	con un altro piano	no	si	no	22/12/05	2203/06	22/06/06	22/12/06	gres
<b>(SGF1H)</b>														
G15823 G15803 G15830	bagno palestra	seminterrato	1ora/mese	no	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	si	no	no	12/01/06	12/04/06	11/07/06	12/01/07	Ceramica bianca
G15801 G15834 G15817	stanza dep. Materiale Elettorale	seminterrato	1ora/mese	no	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	no	12/01/06	12/04/06	11/07/06	12/01/07	Marmo
G15815 G15832 G15810	Stanza vicino ascensore	seminterrato	1ora/mese	no	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	no	12/01/06	12/04/06	11/07/06	12/01/07	marmo

**Tabella C-11<sup>III</sup> - Scuole di San Giovanni in Fiore (edifici da SGF11 a SGF15): caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto verso l'esterno</b>	<b>Ulteriori aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
G15916 G15974 G16307	liceo psicopedagogico (presidenza)	P.T.	3 ore/giorno	solo riscaldam	Una parete a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	si	no	23/12/05	22/03/06	26/06/06	23/12/06	cemento
G15939 G15967 G16018	Scuola media Marconi (archivio)	seminterrato	1 ora/mese	no	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	no	22/12/05	22/03/06	22/06/06	22/12/06	mezzosegato
G16272 G16235 G16302	liceo scientifico (lab. Audiovisivo)	seminterrato	1 ora/giorno	solo riscaldam	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	si	no	no	22/12/05	22/03/06	26/06/06	22/12/06	mezzosegato
G15677 G15625 G15595	Scuola materna Olivaro (sala computers)	P.T..	10ore/settimana	solo riscaldam	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	23/12/05	23/03/06	23/06/06	23/12/06	Mattonelle ceramiche smaltate (bianche)
G15429 G15601 G15413	scuola elem. Casa Amato (dep. cucina)	P.T.	12ore/mese	solo riscaldam	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	no	28/12/05	23/03/06	30/06/06	28/12/06	
G15745 G15716 G15755	scuola elem. C. Alvaro (stanza 20)	seminterrato	saltuaria	solo riscaldam	Parzialmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	si	si	27/12/05	23/03/06	30/06/06	27/12/06	Mattonelle ceramiche smaltate (verdi)
G15405 G15644 G15404	Scuola elem.Oliv./Salt ante (ripost.)	P.T..	1ora/giorno	solo riscaldam	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	23/12/05	22/03/06	23/06/06	23/12/06	Mattonelle ceramiche smaltate (blu)
G15652 G15419 G15777	Scuola materna San Francesco (Bacile)	P.T.	6ore/giorno	solo riscaldam	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	23/12/05	23/03/06	23/06/06	23/12/06	Mattonelle ceramiche
G15725 G15767 G15753	scuola elem. Dante Alig. (stanza caffè)	P.T.	10 ore/mese	no	Parzialmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	27/12/05	23/03/06	30/06/06	27/12/06	mezzosegato

**Tabella C-12 - Scuole di San Giovanni in Fiore: caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto dallo esterno</b>	<b>Ulteriori Aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
<b>(SGFIT)</b>														
G15829 G15809 15816	stanza attività produttive	P.T..	5 ore/giorno	solo riscaldam	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	si	no	11/01/06	12/04/06	11/07/06	11/01/07	mezzosegato
G16197 G16203 G16250	archivio	seminterrato	1 ora/settimana	solo riscaldam	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	si	no	no	11/01/06	12/04/06	11/07/06	11/01/07	mezzosegato
G15802 G15812 G15819	magazzino operai	seminterrato	2 ore/settimana	solo riscaldam	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	no	11/01/06	12/04/06	11/07/06	11/01/07	cemento
<b>Biblioteca (SGFIU)</b>														
G15748 G15724 G15752	biblioteca	seminterrato	3 ore/giorno	solo riscaldam	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	no	11/01/06	12/04/06	11/07/06	11/01/07	ceramico
G15711 G15798 G15805	biblioteca post mediatica	seminterrato	3 ore/giorno	solo riscaldam	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	no	11/01/06	12/04/06	11/07/06	11/01/07	ceramico
<b>(edifici da SGFIV a SGFIZ)</b>														
G15831 G15768 G15811	Abazia forense (cripta sotterranea)	interrato	12 ore/mese	no	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	no	12/01/06	12/04/06	12/01/07*	12/01/07	Mattoni rossi
G15651 G15645 G15420	chiesa madre (sacrestia)	seminterrato	1 ora/giorno	no	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	no	22/12/05	22/03/06	23/06/06	22/01/06	
G15591 G15626 G15738	convento frati capp. (cantina)	seminterrato	12 ore/mese	no	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	si	no	27/12/05	23/03/06	30/06/06	27/12/06	cemento

**Tabella C-13 – Edifici di Castelsilano, Caccuri e Cerenzia: caratteristiche dei locali monitorati**

<b>Id Detector</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Piano</b>	<b>Permanenza personale</b>	<b>Impianto clima</b>	<b>Pareti sotterranee</b>	<b>Pavimento</b>	<b>Accesso diretto dallo esterno</b>	<b>Ulteriori Aperture verso l'esterno</b>	<b>Tracce umidità</b>	<b>Data Installaz.</b>	<b>Ritiro a 3 mesi</b>	<b>Ritiro a 6 mesi</b>	<b>Ritiro 1 anno</b>	<b>Tipologia di pavimento</b>
<i>(edifici da CS111 a CSTIC)</i>														
G15747 G15746 G15713	Scuola elem. Fil.Pugl. (deposito)	P.T.	2 ore/mese	solo riscaldam	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	13/01/06	19/04/06	13/07/06	13/01/07	gres
G15702 G15762 G15759	Comune (archivio)	½ mt sotto	4 ore/mese	no	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	no	si	13/01/06	19/04/06	13/07/06	13/01/07	mezzosegato
G15806 G15808 G15806	Scuola media (aula professori)	P.T.	6 ore/giorno	solo riscaldam	a contatto col terreno	a contatto diretto col terreno	no	si	no	13/01/06	19/04/06	13/07/06	13/01/07	mezzosegato
G15708 G15757 G15735	Scuola media (laboratorio)	P.T.	raramente	no	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	si	no	si	23/12/05	23/03/06	30/06/06	23/12/06	Mattonelle ceramiche bianche
G15822 G16224 G15828	Comune (ufficio anagrafe)	P.T.	6 ore/giorno	solo riscaldam	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	11/01/06	19/04/06	13/07/06	11/01/07	
G16185 G15764 G15804	Scuola elementare (bidelleria)	P.T.	6 ore/giorno	solo riscaldam	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	13/01/06	19/04/06	13/07/06	13/01/07	Mattonelle ceramiche bianche
G16241 G15744 G15717	Scuola media (bagno professori)	P.T.	1ora/giorno	no	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	si	no	13/01/06	19/04/06	13/07/06	13/01/07	Mattonelle ceramiche bianche
G16198 G16270 G15751	Scuola materna (cucina)	P.T.	2 ore/giorno	solo riscaldam	Totalmente affacciate a cavedio areato	a contatto diretto col terreno	no	no	no	13/01/06	19/04/06	13/07/06	13/01/07	Mattonelle ceramiche bianche

## ***Riferimenti bibliografici***

AMODIO MORELLI L., BONARDI G., COLONNA V., DIETRICH D., GIUNTA G., IPPOLITO F., LIGUORI V., LORENZONI S., PAGLIONICO A., PERRONE V., PICCARRETA G., RUSSO M., SCANDONE P., ZANETTIN LORENZONI E., ZUPPETTA A. (1976): *L'Arco Calabro Peloritano nell'orogene appenninico-maghrebide*. Memorie della Società Geologica Italiana 17, 1–60;.

ANPEQ (2001) – Il Radon negli ambienti sotterranei nel nuovo assetto normativo. *VI Forum di sorveglianza fisica di radioprotezione*.

ANPEQ (2002): *La radioprotezione nelle attività industriali e di ricerca. Manuale informativo ad uso dei lavoratori*. Pubblicato dalla Regione Lombardia-Sanità in ottobre 2001.

ANPEQ (2003) – Rischio Radon: cosa è, come si misura, come si interviene.

APAT (2004) – Attività lavorative ad elevato contenuto di radioattività naturale (NORM : Naturally Occurring Radioactive materials). *Dipartimento Stato dell'Ambiente e Metrologia Ambientale, CTN-AGF*.

ARPA (2003) – Il contenuto di radioattività naturale nelle acque di falda nell'Oltrepò Pavese.

BOURBON B., TURNER S., HENDERSON G.M., LUNDSTROM C. (2003) – Introduction to U-Series Geochemistry. *U-Series Geochemistry in Reviews, Mineralogy & geochemistry Volume 2*, Bourbon B., Turner S., Henderson G.M. and Lundstrom C. Editors, Washington, 1-19.

BEOZZO M. (1990) – Measurement of Indoor Radon Levels in the Bologna Metropolitan Area. *Proc. Int. Conf. On Particle Track in Solids, Marburg, Germany, 197*.

BOCHICCHIO F., CAMPOS VENUTI G., NUCCETELLI C., PIERMATTEI S., RISICA S., TOMMASINO L., TORRI G. (1994) – Indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni. *ANPA-ISS*.

BOCHICCHIO F., CAMPOS VENUTI G., NUCCIATELLI C., PIERMATTEI S., RISICA S., TOMMASINO L., TORRI G. (ANPA, ISS) (1996) – Results of the representative italian national survey on radon indoors. *Health Physics, 71, 721-748*.

BOCHICCHIO F., CAMPOS VENUTI G., NUCCETELLI C., PIERMATTEI S., RISICA S., TOMMASINO L., TORRI G. (1999) – Result of the national Survey on radon indoors in all the 21 Italian Region. *Proc. Workshop "Radon in the Living Environment", Athens, 997-1006*.

BOCHICCHIO F., CAMPOS VENUTI G., PIERMATTEI S., NUCCETELLI C., RISICA S., TOMMASINO L., TORRI G., MAGNONI M., AGNESOD G., SGOBATI G., BONOMI M., MINACH L., TROTTI F., MALISAN M.R., MAGGILOLO S., GAIDOLFI L., GIANNARDI C., RONGONI A., LOMBARDI M., CHERUBINI G., D'OSTILIO S., CRISTOFARO C., PUGLIESE M., MARTUCCI V., CRISPINO A., CUZZOCREA P., SANSONE SANTAMARIA A., CAPPAL M.: (2005) *Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions*. *Radiation Measurements* 40, 686 – 694.

BONNER N. A. AND KAHN M. (1951) – Radioactivity applied to chemistry. *Wahl A. C. and Bonner N. A, New York, 157*.

BORSI S. ET DUBOIS R.. (1968): *Dannes geochronologiques sur l'histoire hercynienne et alpine de la Calabre centrale*. *C.R.Ac. Sc. Paris, 226, 72-75*.

BRONDI A., FERRETTI O., MASPERONI L., ANSELMI B., BENVENÙ F. (1971) - *Valutazione delle concentrazioni di minerali pesanti nelle spiagge calabresi*. L'Industria mineraria, pp. 233-247.

CALAMOSCA M. (2005) – Comunicazioni personali. *ENEA ION-IRP, Bologna*.

CAMPOS VENUTI G., PIERMATTEI S. (1998) – Il radon indoor: stato ed evoluzione della normativa. *Rapporto ISTISAN 98/3, ISS, Roma*.

CAZZOLI S. (2003) – *Valutazione teoriche e sperimentali sulla radioattività naturale dei materiali da costruzione*. Convegni sulle metodologie radiometriche e radiochimiche nella radioprotezione da materiali da costruzione, *ANPEQ*.

CHAUHAN R. P., CHAKARVARTI S. K. (2002) – Radon diffusion through soil and fly ash: effect of compaction. *Pergamon Press, 143-146*.

CONFERENZA DEI PRESIDENTI DELLE REGIONI E DELLE PROVINCE AUTONOME DI TRENTO E BOLZANO (2003) – Linee guida per le misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei. *Roma*.

DECRETO LEGISLATIVO 17 MARZO 1995, N. 230 – Attuazione delle direttive Euratom 80/836, 84/466, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti. *Gazzetta Ufficiale n. 136 Suppl. Ordinario, 13 giugno 1995*.

DECRETO LEGISLATIVO 26 MAGGIO 2000, N. 241 – Attuazione della direttiva 96/29/Euratom in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti. *Gazzetta Ufficiale n. 203 Suppl. Ordinario, 31 agosto 2000*.

DECRETO LEGISLATIVO 2 FEBBRAIO 2001, N. 31 – *Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alle acque destinate al consumo umano*; *Gazzetta Ufficiale n. 52 Suppl. Ordinario, 3 marzo 2001*.

DECRETO LEGISLATIVO 9 MAGGIO 2001, N. 257 – Disposizioni integrative e correttive del decreto legislativo 26 maggio 2000, n. 241, recante attuazione della direttiva 96/29/Euratom in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti. *Gazzetta Ufficiale n. 153 Serie Generale, 4 luglio 2001*.

DE MARTINO S., SABBARESE C. (1997): *A method for emanation coefficient measurements of  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  from soil*. *Phys. Chem. Earth*, vol 22, pp 19-23.

DENAGBE S. J., (2000): *Radon-222 concentration in subsoil and its exhalation rate from a soil sample*. *Radiation Measurements*, vol 32, pp 27-34.

DIETRICH D., LORENZONI S., SCANDONE P., ZANETTIN LORENZONI E. & DI PIERRO M. (1976) *Contribution to the knowledge of the tectonic units of Calabria. Relationships between composition of K-white micas and metamorphic evolution*. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, 95, 193-217.

DOUGLAS G. BROOKINS: *Il problema del radon nelle abitazioni*. Ed. C.E.L.I.

DUMBLETON B. (1995) – Radon in drinking water-is it a problem?. *Water and Waste Treatment*, 134-135.

DURRANI S. A. (1997): *Radon measurement by etched track detectors: Application in Radiation Protection, Earth science and environment*. Saeed A. Durrani & Radomir Ilic Editores.

EISENBUD M., PASCHOA A. S., (1989): Environmental Radioactivity, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. 280, pp 470-482;

EN ISO/IEC 17025 (maggio 2000) – Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e di taratura.

ENEA (1999) – *La radioprotezione in Italia. La salvaguardia della popolazione e dell'ambiente*. ISBN 88-8286-074-4, 30- 34, 55-57.

EREN SAN S. (2005) – *The influencs of gamma radiation on the electro- optical characteristics of CR-39 polymer*. Journal of Radiological Protection 25, Institute of Phisical Publishing, 93-97.

FLEISCHER R. L. AND MOGRO- CAMPERO A. (1980) – Radon emanation over an ore body: Search for long distance trasport of radon. *Nuclear Instr. Meth.*

FLEISCHER R.L., HART H.R. AND MOGRO-CAMPERO A. (1980): *Radon emanation over an ore body: Search for long distance transport of radon*. Nucl. Instr. Meth. 173,169.

FONTANA C., MUSUMECI R.G. TONNARINI S., TRAVISI R., VALERIANI F. (2002) – Measurements of indoor radon concentration in Italian red cross work places: preliminary results. *Atti del congresso: Towards harmonisation of radiation protection in Europe- Firenze 8-11 ottobre 2002*.

FOSSATI F. (1959) – *Quantities, Units and Measuring Methods of Ionizing Radiation*. Milano, 56-68.

GALLI G., MANCINI C. (1996): *Esposizione alla radioattività ambientale. Ingegneria Nucleare e Tecnologie Energetiche*. Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia, 4.

GIACOMELLI G. (1990) – Misure di radon nelle abitazioni di Bologna. *Il Nuovo Saggiatore* 6,4- 5.

GOMEZ ESCOBAR V., TOMÈ F. V., LOZANO J. C. (1999): *Procedure for the determination of  $^{222}\text{Rn}$  exalation and effective  $^{226}\text{Ra}$  activity in soil samples*. Applied Radiation and Isotopes, vol 50, pp 1039-1047.

HAFEZ A. F. (1998): *The bulk-etch thickness for the formation of etched through tracks in CR-39 detectors as a tool for nuclear spectrometry: a computational study*. Radiation Physics and Chemistry 53, Pergamon Press, 367-376.

HAFEZ A. F., NAIM M. A. (1992): *Plastic nuclear track detection methods for estimation of thorium to uranium ratio in thick natural materials*. Nucl. Instrum. Methods in Phis. Res. 869, Elsevier Press, 373.

ICRP (1993) – Protection Against Radon-222 at Home and at Work. *ICRP Publication 65, Annals of the ICRP23, Pergamon Press, Oxford*.

ICRP (1995) – Agedependent Doses to Member or the Public from intake of Radionuclides: Part 4, Inhalation Dose Coefficients. *ICRP publication 71, Annals of the ICRP 25, Pergamon Press, Oxford*.

ICRP (1996) – Agedependent Doses to Member or the Public from intake of Radionuclides: Part 5, Inhalation Dose Coefficients. *ICRP publication 72, Annals of the ICRP 26, Pergamon Press, Oxford.*

ICRP (1997) – Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers. *ICRP Publication 78, Annals of the ICRP 7, 1-2. Pergamon Press, Oxford.*

IELSCH G., THIÈBLEMONT D., LABED V., RICHON P., TYMEN G., FERRY C., ROBÈ M. C., BAUDRON J. C., BÉCHENNEC F. (2001): *Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) level variations on a regional scale: influence of the basement trace element (U, Th) geochemistry on radon exhalation rates.* Journal of Environmental Radioactivity, vol 53, pp75-79.

IETTO A., BARILLARO A.M., CALLIGARO G., MANCUSO C.(1992): *Elementi per una revisione dei rapporti Appennino-Arco Calabro.*

ISKANDAR D., YAMAZAWA H., IIDA T. (2004): *Quantification of the dependency of radon emanation power on soil temperature.* Applied Radiation and Isotopes 60, Elsevier Press, 971-973.

JOANNIDES G., PAPACHRISTODOULOU C., KARAMANIS D. T., STAMOULIS K. C., MERZIMEKIS T.J.,(1996): *Measurements of  $^{222}\text{Rn}$  migration in soil.* Journal of Radioanalytical and Nuclear chemistry, vol. 208, pp.541-547.

JONSSON G. (2001): *Soil radon depth dependence.* Radiation Measurements, vol 34, pp 415-418.

KEMSKY J., KLINGEL R. AND SICHL A. (1996): *Classification and mapping of the radon- affected areas in Germany.* Radiation Measurement, Vol. n. 37, Pergamon Press, 435-439.

KING C.Y. (1980): *Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes.* Jou. Geoph. Res. 85, 3065.

KNOLL G.F. (1979): *Radiation detections and measurement,* John Wiley & Sons.

KRISTIANSSON K.AND MALMQVIST L. (1982) – *Evidence for non diffusive transport of  $^{222}\text{Rn}$  in the ground and a new physical model for transport.* Geoph. 47, 1444.

LANZAFAME G. & ZUFFA G.G. (1976): *Geologia e petrografia del Foglio Bisignano ( Valle del Crati, Calabria): con carta geologica 1: 50000.* Geol. Romana, 15, 223-270.

LANZAFAME G. & TORTORICI L (1981).*La tettonica recente della Valle del F. Crati; Calabria.* Geog. Geo. Dinam. Quat.,4,11-21.

LUGG A. (1997) – *Indoor Radon Gas: A potential health hazard resulting from implementing energy-efficiency measures.* Applied energy Vol. n. 2, 100-102.

MAKELAINEN I. (2001) – *Correlations between radon concentration and indoor gamma dose rate, soil permeability and dwelling substructure and ventilation.**The science of the total Environment* 272, 283-289.

MAZUR D. (1999) – *Measurement of Radon concentration in soil gas by CR-39 Detectors.* Radiation Measurement 31, Pergamon Press, Oxford, 295-300.

MESSINA A., COMPAGNONI R., DE VIVO B., PERRONE V., RUSSO S., BARBIERI M., SCOTT B. (1991): *Geological and petrochemical study of the Sila Massif plutonic rocks - northern Calabria, Italy.* Bollettino della Società Geologica Italiana 110, 165–206.

MOGRO-CAMPERO A. AND FLEISCHER R.L. (1977): *Subterrestrial fluid convection: an hypothesis for long-distance migration of radon within earth.* Earth. Planet. Sci. Lett. 34, 321.

MORONI M. (2001): *Il Radon. Tecniche di misura e risanamento con elementi di calcolo, modulistica e legislazione di base*, Il Sole 24 ORE, 10-12.

NATIONAL RADIOLOGICAL PROTECTION BOARD (2000) – Validation scheme for laboratories making measurements of radon in dwellings: 2000 revision.

NATIONAL RADIOLOGICAL PROTECTION BOARD (2001) – Result of the 2000 NRPB Intercomparison of the passive radon detectors.

NATIONAL RADIOLOGICAL PROTECTION BOARD (2002) – Result of the 2001 NRPB Intercomparison of the passive radon detectors.

NAZAROFF W. W. AND NERO A.V. (1988) – Radon and its decay products in indoor air. *Wiley & sons Inc*, 3.

NCRP *Report n. 27* (1998) – Operational Radiation Safety Program. *Recommendations of the NCRP*.

NUCCETELLI C. E BOCHICCHIO F. (1997) – Panorama delle attività di ricerca e di monitoraggio sul toron. *Atti del Convegno Radon tra natura e ambiente costruito, Venezia*, 203.

NUCCETELLI C, BOLZAN C., GRISANTI G. & RISICA S.: *Building materials as a source of gamma radiation and radon concentration: tests and improvement of experimental methods.* Research Program PR-22/IS, Subproject 1, National Institute of Health, p. P-1b-19.

NUCCETELLI C. & BOLZAN C (2001): *In situ gamma spectroscopy to characterise building materials as radon and thoron sources.* The Science of the Total Environment 272,355-360, pp. 1387-1394.

ORTEC EG&G, GammaVision-32 (2000): *Gamma-Ray Spectrum Analysis and MCA Emulator. Software User's Manual (V 5.2).* Perkin Elmer Instruments.

PERSICO E.: *Gli atomi e la loro energia.* Zanichelli ed..

PORCELLI D., SWARZENSKI P.W. (2003) – The Behavior of U- and Th-series Nuclides in Groundwater. *U-Series Geochemistry in Reviews, Mineralogy & geochemistry Volume 2*, Bourbon B., Turner S., Henderson G.M. and Lundstrom C. Editors, Washington, 317-336.

PRZYLIBSKI T., (2000): *Estimating the emanation coefficient from crystalline rocks in to groundwater.* Applied Radiation and Isotopes, vol 53, pp 473-479.

RACCOMANDAZIONE DELLA COMMISSIONE 2001/928/EURATOM *Sulla tutela della popolazione contro l'esposizione al radon nell'acqua potabile.* Gazzetta ufficiale delle Comunità Europee n. L344, 28 dicembre 2001.

RADOSYS 2000 – MANUALE D'USO.

RISICA S. BOLZAN C. & NUCCETELLI C. (2001): *Radioactivity in building materials: room model analysis and experimental methods*. The Science of the Total Environment 272, pp. 119-126.

ROBINSON A. L., SEXTRO R.G.(1995): *The influence of a subslab gravel layer and open area on soil-gas and Radon entry into two experimental basements*. *Health Physics*, 69:367-377.

ROGERS V.C., NIELSON KALKWARF, (1984): *Radon attenuation handbook for uranium mill tailings cover design*. Nat. Tech. Info Serv., U.S. Dept of Commerci, NUREG/CR-3533

ROMER A. (2003) – *Radioattività e abitazione*. Università della Svizzera Italiana.

RUDI A. S. (2002-2003) – *Misure di Radon disciolto in acque sorgive*. *Dipartimento di Fisica, Università degli studi della Calabria*.

SABOL J., WENG P. S. (2002): *Radiation Protection Dosimetry*.

SABOL J., WENG P.S. (1995): *Introduction to Radioaction Protection Dosimetry*, World Scientific.

SCHUMAN R.R. AND OWEN D. E. (1988): *Relationships between Geology, equivalent uranium concentration and radon in soil gas*. U.S. Geological survey Open-File Report 88-18, Fairfax County, Virginia, 28.

SHWEIKANI R., GADDUI T. G., DURRANI S. A. (1995): *The effect of soil parameters on the radon concentration values in the environment*. *Radiation Measurements*, vol. 25, pp.581-584.

SINGH A. K., SENGUPTA D., PRASAD R. (1999): *Radon exhalation rate and uranium estimation in rock sample from Bihar uranium and copper mines using the SSNTD technique*. *Applied Radiation and Isotopes*, vol 51, pp107-113.

SOHRABI M. (1997) – *High Radon Levels in Nature and in Dwellings: Remedial Action*. *Radon Measurements by etched track detectors*, Saeed A. Durrati & Radomir Ilic Editors, 225-237, World scientific.

STEJNY J., CARRELL J., PALMER M.J. (2000): *Polymerization, structure and track recording property of CR-39 cured with photoinitiators*. *Radiation measurements* 32, 299-305.

TANNER A..B. (1980): *Radon migration in the ground a review*. Gendsell T. F. & Lowder W. M. editors, University of Chicago Press, Chicago, 5-56.

TANSI C., TALLARICO A., IOVINE G., FOLINO GALLO M., FALCONE G. (2005): *Interpretation of radon anomalies in seismotectonic and tectonic-gravitational settings: the south-eastern Crati graben (Northern Calabria, Italy)*, *Tectonophysics* 396, Issue: 3-4, 181– 193.

TOMMASINO L. (1998): *Radon*. *Encyclopedia of Analytical Science*, Academic Press Limited, 4359-4368.

TOMMASINO L. (1997): *Passive sampling and monitoring of radon and other gases*. *Atti del Convegno Radon tra natura e ambiente costruito*, Venezia, pp. 21-27.

TOMMASINO L. (1995): *Nuclear Tracks Radiation Measurement* 17, 43.

VERGINE A. L., GIROLETTI E., (2003) *Radiazioni ionizzanti Protezione della popolazione, dei lavoratori e dei pazienti*. Tutela ambientale a cura di Luca Ramacci Sistemi editoriali ISBN 88-513-0095-X.

UNI CEI ENV 13005 (luglio 2000) – Guida all'espressione dell'incertezza di misura.

UNSCEAR (1982) – Report to the General Assembly. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UN, New York*.

UNSCEAR (1988) – Report to the General Assembly. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UN, New York*.

UNSCEAR (1993) – Report to the General Assembly, Sources and effects of ionizing radiation. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UN, New York*.

WOODS J. AND SPINKS J.W. (1964) – *An Introduction to Radiation Chemistry*. New York-Londra, 37-43.

WHO-IARC (WORLD HEALTH ORGANIZATION - INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER) (1988). *ARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic risks to Humans: man made mineral fibres and Radon*. IARC MONOGRAPH VOL.43, LYON, FRANCE;.

### **Siti web consultati**

<http://cnts.wpi.edu/rsh/docs/Bochicchio IRIO- RnCaItaly.pdf>

[http://www.nrp.org/publications/w\\_series\\_reports/](http://www.nrp.org/publications/w_series_reports/)

<http://www.arpalombardia.it/new/live/download/convegna/15ed/Pisati.pdf>

[http://www.arpa.veneto.it/agenti\\_fisici/htm/radon\\_8.asp#66](http://www.arpa.veneto.it/agenti_fisici/htm/radon_8.asp#66)

<http://www.bo.infn.it/slim/ntd.htm>

<http://www.editaly.com/radon/download/guida.pdf>

<http://www.fgambiente.it>

<http://www.forumpa.it/forum2004/convegna/relazioni/1258-rosabianca-trevisi-1.pdf>

<http://www.radonitalia.it>

[http://www.sinanet.apat.it/site/\\_Files/annuario\\_2004](http://www.sinanet.apat.it/site/_Files/annuario_2004)

[www.epa.gov/iaq/radon/pubs/devprot1.html](http://www.epa.gov/iaq/radon/pubs/devprot1.html)

[www.radon.it](http://www.radon.it)

[www.unscear.org](http://www.unscear.org)