
	Istituto di Radioprotezione	Sigla di identificazione IRP-P000-009	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 2 45
---	-----------------------------	--	-----------	---------------	-----------------

## Indice

<b>1. Premessa</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Scopo e campo di applicazione</b> .....	<b>4</b>
<b>3. Grandezze protezionistiche e grandezze operative</b> .....	<b>5</b>
<b>4. Riferimenti normativi e pubblicazioni correlate</b> .....	<b>6</b>
<b>5. Termini e definizioni</b> .....	<b>8</b>
<b>6. Tecniche di misura</b> .....	<b>10</b>
6.1. Programma di Monitoraggio.....	10
6.2. Generalità sulle tecniche di misura con rateometri portatili.....	10
6.3. Metodi di valutazione di bassi ratei di equivalente di dose ambientale.....	12
6.4. Metodi semplificati di valutazione di bassi ratei di equivalente di dose ambientale.....	13
6.5. Metodi semplificati di valutazione di alti ratei di equivalente di dose ambientale.....	14
6.6. Strumentazione per radiazione X, gamma e particelle beta.....	14
<b>7. Metodo di valutazione della misura</b> .....	<b>16</b>
<b>8. Valutazione delle incertezze</b> .....	<b>18</b>
<b>9. Radionuclidi e calibrazione</b> .....	<b>20</b>
<b>10. Limiti caratteristici della metodica di misura (ISO 11929)</b> .....	<b>21</b>
10.1. Formule per il calcolo della soglia di decisione.....	23
10.2. Formule per il calcolo del limite di rivelabilità.....	23
<b>11. Intervallo di confidenza e migliore stima del rateo di <math>H^*(10)</math> (ISO 11929)</b> .....	<b>25</b>
<b>12. Livelli di riferimento per le misure di <math>H^*(10)</math></b> .....	<b>26</b>
<b>Allegato 1. Strumenti di misura e Scheda Strumento</b> .....	<b>28</b>
<b>Allegato 2. Scheda di misura per il tecnico di radioprotezione</b> .....	<b>33</b>
<b>Allegato 3. Scheda elaborazione dati per l'Esperto Qualificato</b> .....	<b>37</b>
<b>Allegato 4. Esempio di stima di <math>H^*(10)</math> da radiazione gamma e beta emettitori</b> .....	<b>41</b>
a) Valutazione del metodo di misura.....	41
b) Esempio numerico e foglio di calcolo.....	42
c) Considerazioni conclusive.....	45

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 3 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	------------------------

## 1. Premessa


L'Istituto di Radioprotezione ENEA (IRP) assicura la sorveglianza fisica di radioprotezione per tutte le attività con rischi da radiazioni ionizzanti all'interno dei centri di ricerca ENEA, con lo scopo principale di tutelare la salute dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente.

Le procedure prevedono la descrizione delle singole tecniche e metodologie di misura, fanno riferimento a documenti internazionali aggiornati e referenziabili e applicano le norme tecniche nazionali ed internazionali in vigore, facendo tesoro dell'esperienza dei centri ENEA, maturata nel corso degli anni.

Il documento *Misura di equivalente di dose ambientale da fotoni e beta emettitori con strumentazione portatile* riassume molte informazioni utili per l'Esperto Qualificato e per il tecnico della radioprotezione, include nozioni teoriche e indicazioni pratiche per l'esecuzione di una misura per mezzo di strumentazione portatile.

Si rammenta che dal punto di vista della radioprotezione il rischio collegato ad alti valori di equivalente di dose ambientale è dovuto alla esposizione esterna. La corretta esecuzione della misura e la successiva valutazione dei valori numerici registrati è quindi necessaria per l'ottimizzazione della radioprotezione e la riduzione del rischio.

Il documento non ha la pretesa di essere esaustivo per ogni argomento trattato ma cerca di fornire spunti per approfondimenti e brevi compendi referenziati per l'impiego in attività pratiche di radioprotezione.


	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 4 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	------------------------

## 2. Scopo e campo di applicazione

La procedura ha come obiettivo l'ottimizzazione della qualità e dell'accuratezza della misura delle radiazioni nell'ambiente e quindi la valutazione della dose ad essa correlata.

L'interesse crescente sulle misure dei livelli di radiazione a cui sono esposti i lavoratori e il pubblico è correlato alla necessità di poter evidenziare la presenza di malfunzionamenti o situazioni di emergenza dovuti alle radiazioni ionizzanti, sapendo che tale contributo si somma alla radiazione di origine naturale (di per sé molto variabile in funzione delle caratteristiche del suolo, dei materiali da costruzione e della componente di radiazione cosmica).

Nella presente procedura si tratta esclusivamente il monitoraggio ambientale a scopo radioprotezionistico, per il controllo delle radiazioni nei luoghi di lavoro e per la definizione delle zone controllate e sottoposte a restrizioni, eseguito con strumentazione portatile; si considera esclusivamente la misura di equivalente di dose ambientale.

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 5 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	------------------------

### 3. Grandezze protezionistiche e grandezze operative

L'ICRP raccomanda i limiti individuali di dose espressi per mezzo di grandezze protezionistiche, esplicitamente riconosciute come non misurabili.

Nella pratica occorre operare con grandezze misurabili, pertanto sono state introdotte le grandezze operative, caratterizzate dalle seguenti caratteristiche: misurabilità e conservatività. Esse infatti devono essere in linea con la strumentazione in uso (o eventualmente richiedono l'applicazione di marginali modifiche) e devono produrre valori maggiori della corrispondente grandezza protezionistica, senza tuttavia introdurre eccessive sovrastime, incompatibili con il rigore, anche di natura economica, del principio di ottimizzazione della radioprotezione [1].


L'esercizio della radioprotezione comprende il monitoraggio ambientale, per il controllo delle radiazioni nei luoghi di lavoro e per la definizione delle zone controllate e sottoposte a restrizioni, ed il monitoraggio individuale, per il controllo e la limitazione delle esposizioni individuali.

Si deve ricordare che in ogni condizione di misura il campo di radiazione visto da un rivelatore ambientale in aria libera differisce da quello visto da un dosimetro personale indossato da un lavoratore (in questo caso il campo di radiazioni è fortemente influenzato dalla retrodiffusione e assorbimento delle radiazioni nel corpo). L'utilizzo di diverse grandezze dosimetriche operative riflette questa differenza; in Tabella 1 si sintetizzano le diverse grandezze operative per il monitoraggio dell'irradiazione esterna (individuale o ambientale) [2].

**Tabella 1 Applicazione delle grandezze dosimetriche operative al monitoraggio delle esposizioni esterne [2].**


Compiti	Grandezze operative per il Monitoraggio Ambientale	Grandezze operative per il Monitoraggio Individuale
Controllo della dose efficace	Equivalente di Dose Ambientale, $H^*(10)$	Equivalente di dose individuale, $H_p(10)$
Controllo della dose alla cute, alle mani e piedi ed al cristallino	Equivalente di dose direzionale, $H'(0.07, \Omega)$	Equivalente di dose individuale, $H_p(0.07)$

Nella maggior parte delle situazioni pratiche di esposizione per irradiazione esterna, l'equivalente di dose ambientale adempie lo scopo di fornire una stima conservativa o un limite superiore per il valore delle grandezze soggette a limite. Ciò non è sempre vero per persone soggette a campi di radiazioni di alta energia e nei campi di radiazione cosmica [3].


	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 6 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	------------------------

#### 4. Riferimenti normativi e pubblicazioni correlate

1. M. Pellicioni – Le grandezze operative di radioprotezione – Convegno ISPESL – L'applicazione dei nuovi decreti legislative in materia di radioprotezione - 2001
2. Annals of the ICRP 103 – The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection – Vol. 37/2-4 2008
3. M. Pellicioni – The impact of ICRP Publication 92 on the conversion coefficients in use for cosmic ray dosimetry- Rad. Prot. Dos. 109, 303 - 309
4. Decreto Legislativo 230/1995 e successive modificazioni e integrazioni
5. Peter Ambrosi – Radiation Protection and Environmental Standard – Metrologia 46 (2009) S99-S111
6. UNI CEI 70099:2008 Vocabolario Internazionale di Metrologia – Concetti fondamentali e termini correlate (VIM)
7. Glossario di Radioprotezione – Sorveglianza Fisica – Rapporto tecnico ENEA, RT/2007/8/ASPRES - 2007
8. ICRP 75 – General Principles for the Radiation Protection of Workers, Annals of the ICRP 27, No.1 - 1997
9. P.H. Burgess – Guidance on the choice, use and maintenance of hand-held radiation monitoring equipment- Report NRPB R326 - 2001
10. National Physical Laboratory -Measurement Good Practice Guide n°14 – The examination testing and calibration of Portable Radiation Protection Instruments- Teddington UK,ISSN 1368-6550, Marzo 1999
11. National Physical Laboratory -Measurement Good Practice Guide n°30 – Practical radiation monitoring- Teddington UK,ISSN 1368-6550, Ottobre 2002
12. S. Neumaier, H. Dombrowki – EURADOS Intercomparisons and the Harmonization of Environmental Radiation Monitoring – Radiation Protection Dosimetry, pp.1-9 - 2014
13. Radiation Protection 106 – Technical recommendations on measurement of external environmental gamma radiation doses - 1999
14. ISPESL-AIRP-ANPEQ-ENEA -Indicazioni Operative per la qualità della misura in radioprotezione – 2009
15. IAEA-EPR-RANET-2010 –Response and Assistance Network
16. IAEA-PRTM-1(Rev1) –Practical Radiation Technical Manual-Workplace Monitoring for Radiation and Contamination – 2004
17. ISPESL-INMR-ENEA-AIFM-AIRP-ANPEQ – Qualità della misura in radioprotezione – Indicazioni operative per un sistema di qualità metrologica nelle misure di equivalente di dose ambientale  $H^*(10)$  con monitori di area - 2009
18. NKS-257 – Radiation survey meters used for environmental monitoring - 2012
19. ISO 11929:2010(E) - Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation - Fundamentals and application
20. Il concetto di “non rilevanza radiologica di una pratica” : recepimento ed implementazione della direttiva 96/29 – AIRP – XXXVI Convegno Nazionale di Radioprotezione – Palermo 2013
21. IAEA EPR-FIRST RESPONDERS 2006- Manual for first Responders to a Radiological Emergency- 2006
22. IAEA-TECDOC-1162 – Generic procedure for assessment and response during a radiological emergency - 2000
23. R.Brambilla – Qualità della misura in radioprotezione – Corso AIFM - “Aspetti Operativi dei lavoratori e della popolazione nelle attività sanitarie - Milano 2012
24. ISO 4037 – 3 - X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy -


	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag.</b> 7	<b>di</b> 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	------------------	-----------------

- Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence - 1999
25. International Electrotechnical Commission, IEC. Radiation protection instrumentation - Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors. IEC International standard 60846-1. Genève: IEC, 2009.
  26. International Electrotechnical Commission. Radiation protection instrumentation - Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 2: High range beta and photon dose and dose rate portable instruments for emergency radiation protection purposes. IEC International standard 60846-2. Genève: IEC, 2007.
  27. G.Iurlaro "Misura della contaminazione superficiale con metodi diretti" – ENEA - IRP-P000-004 - 2014

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag.</b> 8	<b>di</b> 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	------------------	-----------------


## 5. Termini e definizioni

Termine	Definizione
equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$ [4]	Equivalente di dose in un punto di un campo di radiazioni che sarebbe prodotto dal corrispondente campo espanso e unidirezionale nella sfera ICRU ad una profondità di 10mm, sul raggio opposto alla direzione del campo unidirezionale. L'unità di misura dell'equivalente di dose ambientale è il joule per kilogrammo (J/kg); e il suo nome speciale è il sievert (Sv).
equivalente di dose direzionale $H'(d,\Omega)$ [4, 5]	Equivalente di dose in un punto di un campo di radiazioni che sarebbe prodotto dal corrispondente campo espanso, nella sfera ICRU, ad una profondità, $d$ , su un raggio in una specifica direzione, $\Omega$ . L'unità di misura dell'equivalente di dose direzionale è il joule per kilogrammo (J/kg); e il suo nome speciale è il sievert (Sv). La direzione $\Omega$ è una direzione fissata nello spazio e ai fini della procedura non sarà specificata; inoltre la profondità di riferimento considerata sarà 0,07 mm. Si indicherà l'equivalente di dose direzionale con il simbolo $H'(0,07)$ .
esposizione [4]	qualsiasi esposizione di persone a radiazioni ionizzanti
esposizione esterna [4]	esposizione prodotta da sorgenti situate all'esterno dell'organismo
esposizione interna [4]	esposizione prodotta da sorgenti introdotte nell'organismo
esposizione totale [4]	Combinazione dell'esposizione esterna e dell'esposizione interna
fondo naturale di radiazioni [4]	Insieme delle radiazioni ionizzanti provenienti da sorgenti naturali, sia terrestri che cosmiche, semprechè l'esposizione che ne risulta non sia accresciuta in modo significativo da attività umane.
grandezze protezionistiche [4]	Grandezze dosimetriche correlate al corpo umano che l'ICRP ha sviluppato per la protezione radiologica con lo scopo di quantificare il detrimento della popolazione dovuta all'esposizione alle radiazioni ionizzanti sia per l'irraggiamento esterno parziale e al corpo intero sia per l'introduzione di radionuclidi. Le grandezze protezionistiche non sono misurabili.
kerma, $K$ [4]	(Kinetic Energy Released to the MATter) Grandezza definita per le particelle non cariche, coincide con il rapporto tra $dE_{tr}$ e $dm$ , dove $dE_{tr}$ è la somma dell'energia cinetica iniziale di tutte le particelle cariche liberate in un elemento di massa $dm$ di un materiale dalle particelle non cariche incidenti: $K = \frac{dE_{tr}}{dm}$ L'unità di misura del kerma è il joule per kilogrammo (J/kg), e il suo nome speciale è il gray (Gy).
grandezze operative [4]	Grandezze impiegate nelle applicazioni pratiche per il monitoraggio e per le indagini relative all'esposizione esterna e all'introduzione dei radionuclidi. Esse sono definite per le misure e valutazioni di dose nel corpo.
incertezza di misura [6]	Parametro non negativo che caratterizza la dispersione dei valori della grandezza che sono attribuiti a un misurando, sulla base delle informazioni utilizzate.

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 9 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	------------------------

<b>Termine</b>	<b>Definizione</b>
limite [7]	Valore di una grandezza di radioprotezione che non deve essere superato.
limite di dose [4]	Valore raccomandato della dose efficace o della dose equivalente per organo o tessuto, per un individuo, che non deve essere superato nelle situazioni di esposizione pianificata.
misura radiometrica diretta [7]	Misura di una grandezza radiometrica effettuata direttamente su una matrice o sul corpo umano.
monitoraggio di routine [8]	Monitoraggio periodico nel corso delle ordinarie attività lavorative, inteso a dimostrare che le condizioni di lavoro ambientali, inclusi i livelli di dose, rimangono soddisfacenti, e che i requisiti di legge vengano rispettati.
monitoraggio speciale [8]	Monitoraggio di carattere sistematico, che tipicamente concerne una situazione nell'ambiente di lavoro nella quale non sono disponibili informazioni sufficienti a dimostrarne un adeguato controllo, e che è inteso a procurare informazioni dettagliate al fine di chiarire ogni problema e definire le future procedure.
radiometro [7]	Apparecchiatura, comprendente uno o più rivelatori e elettronica associata, per la misura di grandezze correlate alle radiazioni ionizzanti.
radiazione ionizzante [7]	Radiazione in grado di produrre la ionizzazione di atomi e delle molecole del mezzo attraversato.
sfera ICRU[4]	Questa è una sfera di materiale tessuto-equivalente (diametro 30 cm, tessuto molle ICRU con densità 1g/cm <sup>2</sup> e con la seguente composizione massica: il 76,2% di ossigeno, l'11,1% di carbonio, il 10,1% di idrogeno ed il 2,6% d'azoto).
sievert [4]	Nome speciale dell'unità di dose equivalente o di dose efficace. Le dimensioni del sievert sono J kg <sup>-1</sup> . Quando la dose equivalente o la dose efficace sono espresse in rem valgono le seguenti relazioni: 1 rem = 10 <sup>-2</sup> Sv e 1Sv=100rem.
sorgente naturale [7]	Sorgente di radiazioni ionizzanti di origine naturale, sia terrestre che extraterrestre.
sorgente radioattiva [4]	Sorgente di radiazioni ionizzanti costituita da materia radioattiva, ancorchè contenuta in apparecchiature o dispositivi in genere, dei quali, ai fini della radioprotezione, non si può trascurare l'attività o concentrazione di radionuclidi o l'emissione di radiazione.
sorveglianza fisica [4]	L'insieme dei dispositivi adottati, delle valutazioni, delle misure e degli esami effettuati, delle indicazioni fornite e dei provvedimenti formulati dall'Esperto Qualificato al fine di garantire la protezione sanitaria dei lavoratori e della popolazione.
zona classificata [4]	Ambiente di lavoro sottoposto a regolamentazione per motivi di protezione contro le radiazioni ionizzanti. Le zone classificate possono essere zone controllate o zone sorvegliate.
zona controllata [4]	Zona classificata, il cui accesso è segnalato e sottoposto a regolamentazione, nella quale, sulla base di accertamenti e valutazioni compiuti dall'Esperto Qualificato, sussiste per i lavoratori che vi operano il rischio di superamento di prefissati valori di dose.



	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag.</b> 10	<b>di</b> 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

<b>Termine</b>	<b>Definizione</b>
zona sorvegliata [4]	Qualsiasi zona classificata che non sia zona controllata; in essa, sulla base di accertamenti e valutazioni compiuti dall'Esperto Qualificato, sussiste per i lavoratori che vi operano il rischio di superamento di uno dei limiti di dose fissati per le persone del pubblico.

## 6. Tecniche di misura

### 6.1. Programma di Monitoraggio

Lo scopo principale di un programma di monitoraggio è confermare che i livelli di radiazione siano accettabili, in accordo con la designazione dell'area monitorata (zona controllata, zona sorvegliata e zona ad accesso libero) e con le precauzioni impiegate in termini radioprotezionistici. Un secondo obiettivo è generalmente controllare possibili incrementi dei livelli di radiazione che possano nel caso richiedere variazioni delle attività lavorative nell'area considerata. Ciò può portare all'indagine sulle cause dell'incremento dei livelli di radiazione e alla ricerca di possibili azioni da compiere affinché si realizzi una inversione di tendenza [9].

Talvolta è richiesto il monitoraggio di aree con ratei di dose da radiazione X o gamma molto bassi, nelle zone prossime ai laboratori o impianti in cui siano presenti sorgenti di radiazione ionizzante, con lo scopo di confermare le valutazioni di dose per il pubblico.

Generalmente in un programma di monitoraggio si effettuano misure di rateo di equivalente di dose ambientale, attuando le seguenti precauzioni:


- impiego di strumentazione idonea alla tipologia di sorgente di radiazione da controllare;
- scelta della grandezza da misurare nella opportuna unità di misura: es. rateo di equivalente di dose ambientale in  $\mu\text{Sv/h}$ ;
- verifica dell'idoneo intervallo di funzionamento dello strumento in funzione dell'intensità dei campi di radiazione da misurare;
- valutazione attenta delle letture dello strumento (ricordando che le letture dello strumento tendono a stabilizzarsi non prima di 10s, soprattutto in condizioni di bassi livelli di dose).

Per realizzare un efficace programma di monitoraggio della dose occorre:

- identificare l'area da monitorare e reperire tutte le informazioni relative ai campi di radiazione presenti e ai risultati dei precedenti sopralluoghi;
- definire il dettaglio e l'accuratezza necessari;
- definire i livelli di riferimento (per es. espressi in termini di  $\mu\text{Sv/h}$ ) e identificare le procedure da impiegare qualora siano superati;
- indicare il personale autorizzato ad eseguire il programma di monitoraggio;
- verificare la tipologia di strumentazione di monitoraggio disponibile (verificare anche lo stato di calibrazione);
- annotare le condizioni ambientali (temperatura, umidità).

### 6.2. Generalità sulle tecniche di misura con rateometri portatili

Il rateo di dose viene misurato separatamente per X,  $\alpha$ ,  $\beta$  e per la radiazione neutronica ed è necessario utilizzare strumentazione idonea ad ogni diversa situazione.

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 11 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------------

Per la radiazione X e gamma con energia superiore a 17keV, la grandezza operativa di riferimento è l'equivalente di dose ambientale  $H^*(10)$ . Gli strumenti per le misure di dose da fotoni possono essere di diversa tipologia: camere a ionizzazione, rivelatori Geiger-Muller, contatori proporzionali e rivelatori a scintillazione [10]. Per i fotoni con energia inferiore a 17 keV la grandezza più importante da misurare è  $H'(0,07)$  e le misure si eseguono generalmente con camere a ionizzazione ad aria libera [11].

La grandezza operativa impiegata per le misure di dose da beta emettitori è l'equivalente di dose direzionale  $H'(0,07)$ , e si ricorre all'impiego di strumenti con finestra sottile o camere a ionizzazione con finestra aperta. Tali rivelatori possono essere utilizzati anche per il monitoraggio della radiazione gamma [11].

Durante le attività di monitoraggio delle radiazioni con strumenti portatili si dovrebbero seguire alcuni semplici accorgimenti che si ritiene opportuno menzionare [11] :


- assicurarsi che lo strumento sia acceso prima di entrare nella zona di interesse;
- fare in modo che lo strumento sia acclimatato alle condizioni ambientali di misura (es. se lo strumento viene lasciato in una zona fredda, come un veicolo durante la notte, può non essere alla sua temperatura di funzionamento corretto);
- in assenza di spazio ricorrere all'utilizzo della sonda separata (qualora fosse disponibile);
- eseguire la misura posizionando lo strumento ad una distanza pari a 1m dal suolo;
- tenere lo strumento comodamente in posizione stabile durante la lettura;
- disporre lo strumento nella posizione corretta, che punta nella direzione del campo di radiazione qualora sia noto;
- se non è noto il campo di radiazione occorre muoversi nelle due direzioni principali a passi regolari per assicurarsi che nessuna sorgente sia trascurata;
- assicurarsi che il display possa essere visto e/o il segnale acustico possa essere ascoltato;
- lo strumento deve essere impostato nell'intervallo di funzionamento più sensibile;
- in situazioni di lettura variabile cercare di scartare le possibili letture spurie/estreme applicando il "buon senso ";
- non trascurare i tempi di risposta dello strumento ogni volta che ci si trova in condizioni di campo di radiazione variabile.

Generalmente si considera una geometria di irraggiamento isotropa nel piano orizzontale, a meno di specifiche misure in prossimità di interruzioni di barriera o di specifiche verifiche della buona progettazione delle barriere primarie.

Si ribadisce che le misure di esposizione esterna sono preferibilmente eseguite con rateometri in aria libera, pertanto si deve tener presente che il campo di radiazioni letto differisce da quello "visto" da un dosimetro personale portato sul corpo, dove il campo di radiazioni è influenzato fortemente dalla retodiffusione e dall'assorbimento delle radiazioni nel corpo stesso [2].

Occorre tener presente che variazioni repentine nelle misure di dose possono essere indicative della localizzazione di sorgenti (chiamate anche hot spot) o fasci collimati. Alla radiazione della sorgente primaria si somma inoltre la radiazione diffusa da oggetti, pareti, pavimenti e soffitti con energia più bassa rispetto a quella primaria.

Ogni volta che ci si trova in situazioni anomale, quando la strumentazione indica la presenza di campi inaspettati, in situazioni di dubbio, l'operatore deve abbandonare l'area in esame e concordare con l'Esperto Qualificato le azioni da compiere.

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 12 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------------

### 6.3. Metodi di valutazione di bassi ratei di equivalente di dose ambientale

La misura del rateo di dose in un ambiente naturale, con la radiazione di fondo che comprende la componente terrestre e la radiazione cosmica secondaria è descritta dalla seguente equazione [12]:

$$\dot{R} = \dot{R}_B + r_{SCR} \cdot \dot{H}^*(10)_{SCR} + r_{TR} \cdot \dot{H}^*(10)_{TR} + r_{Art} \cdot \dot{H}^*(10)_{Art}$$

Dove  $\dot{R}$  è la lettura dello strumento espresso in una grandezza per unità di tempo (es.  $\mu\text{Sv/h}$ );  $\dot{R}_B$  è il fondo intrinseco dello strumento;  $r_{SCR}$  è la risposta alla radiazione cosmica secondaria e  $r_{TR}$  è la risposta alla radiazione terrestre dello strumento. Infine  $r_{Art}$  è la risposta dello strumento alla radiazione artificiale, generalmente è funzione dell'energia  $E$  e dell'angolo di incidenza della radiazione, e include il fattore di taratura.  $\dot{H}^*(10)_{SCR}$  è il rateo di equivalente di dose ambientale dovuto alla radiazione cosmica secondaria,  $\dot{H}^*(10)_{TR}$  è il rateo di equivalente di dose ambientale dovuto alla radiazione terrestre e  $\dot{H}^*(10)_{Art}$  è il rateo di equivalente di dose ambientale dovuto alla radiazione artificiale prodotta dalle attività umane. L'incremento del rateo di dose ambientale si può calcolare (quando possibile), applicando la formula inversa [12]:

$$\dot{H}^*(10)_{Art} = r_{Art}^{-1}(\dot{R} - \dot{R}_B - r_{SCR} \cdot \dot{H}^*(10)_{SCR} - r_{TR} \cdot \dot{H}^*(10)_{TR})$$

Tale valutazione è eseguibile quando sono noti tutti i parametri presenti nell'equazione.


Il contributo del fondo intrinseco  $\dot{R}_B$  è dovuto al rumore elettronico e alla presenza di materiali debolmente radioattivi che compongono lo strumento. E' possibile identificarlo in un ambiente libero da radiazioni (schermato sia dalla radiazione terrestre che dalla radiazione cosmica).

La radiazione cosmica può eliminarsi eseguendo specifiche misure in miniere situate a circa 600 m di profondità. Il rimanente contributo dovuto alle rocce/terreno si può virtualmente eliminare con una schermatura di 10 cm di piombo con basso contenuto di radioattività o in un area di salgemma puro dove la contaminazione del  $^{40}\text{K}$  sia molto bassa (2-3 Bq/kg corrispondente a circa 0,6nGy/h) [13].

La risposta dello strumento al campo complesso dei raggi cosmici può essere determinato in un campo di radiazione cosmica puro, privato della componente terrestre. Generalmente si considera una postazione su una zattera (caratterizzata da bassa attività intrinseca) al centro di un lago o in mare ad una distanza di 1 km dalla costa e su una profondità di acqua minima di 5m. I valori di riferimento della radiazione cosmica sono dati in funzione della posizione geografica sul livello del mare, della pressione e della temperatura, della variazione stagionale e delle variazioni periodiche associate ai cicli solari. Si deve tener presente che la risposta  $r_{SCR}$  è valida esclusivamente per il campo di radiazione cosmica nel punto di misura. Conoscendo i contributi della radiazione terrestre e cosmica si può determinare il rateo di dose ambientale [13].

Nella pratica comune si tende ad acquisire i dati in una specifica posizione e con un particolare strumento e si valutano esclusivamente le variazioni significative rispetto alle letture in condizioni standard. Questa metodologia è rischiosa perché non tiene conto delle possibili variazioni della radiazione cosmica che può erroneamente condizionare la lettura e causare errate interpretazioni; occorre pertanto valutare le misure "anomale" caso per caso, includendo una eventuale analisi delle possibili cause di variazione dei conteggi.

Si può ribadire che per ogni misura è importante definire la precisione a cui si vuole arrivare e quindi le opportune accortezze necessaria al raggiungimento dello scopo. Per

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 13 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------------

misure di bassi ratei di equivalente di dose ambientale è necessario considerare il contributo del fondo nello specifico punto di misura.

#### 6.4. Metodi semplificati di valutazione di bassi ratei di equivalente di dose ambientale

In base a quanto già descritto nel precedente paragrafo, qualora la misura di rateo di equivalente ambientale riguardi aree di lavoro, laboratori o facility in condizioni di sicura presenza di radiazione antropogenica, è possibile eseguire misure con metodi semplificati, considerando la sottrazione del valore medio del fondo misurato con lo specifico strumento in uso e correlato allo specifico punto di misura (si può eseguire nel punto di interesse in condizioni di sorgente "OFF" o in aree sicuramente non soggette al campo di radiazioni e considerate equivalenti dal punto di vista delle condizioni ambientali):

$$\dot{R}_F = \dot{R}_B + r_{SCR} \cdot \dot{H}^*(10)_{SCR} + r_{TR} \cdot \dot{H}^*(10)_{TR}$$

Nel presente documento si considera equivalente la simbologia  $\dot{H}^*(10)_{Art}$  e  $\dot{H}^*(10)$ , poiché è oggetto di interesse la valutazione del contributo della radiazione artificiale.

Il rateo di equivalente di dose ambientale dovuto alla sorgente di radiazione artificiale sarà quindi:

$$\dot{H}^*(10) = r_{Art}^{-1} \cdot (\dot{R} - \dot{R}_F)$$

Eq. 1

Dove:

$\dot{R}$  è il rateo della grandezza misurata nello specifico punto di interesse e  $\dot{R}_F$  è il rateo del valore di fondo complessivo che tiene conto della specificità dello strumento e della posizione di misura (include la componente dovuta ai materiali da costruzione dell'edificio/impianto, la componente del fondo ambientale locale e la componente della radiazione cosmica secondaria).

Il valore medio di  $\dot{R}_F$  può essere facilmente valutato in laboratori/impianti che prevedono la possibilità di schermare la sorgente o interrompere i fasci di radiazione, nelle condizioni di sorgente a riposo o spenta.

L'inverso della risposta alla radiazione artificiale è dato da:

$$r_{Art}^{-1} = C_F(\alpha', E') \cdot S(\alpha) \cdot S(E) \cdot k_{T,P}$$

Eq. 2


Dove  $C_F$  è il fattore di calibrazione per la specifica energia  $E'$  con angolo di incidenza  $\alpha'$ ; mentre  $S(\alpha)$  e  $S(E)$  sono la risposta dello strumento nelle condizioni di misura per un dato angolo di incidenza  $\alpha$  e una data energia  $E$  (non sempre l'energia della radiazione misurata e la geometria di misura corrispondono alle specifiche modalità di calibrazione  $E'$  e  $\alpha'$ ). Si trascurano la non linearità della risposta dello strumento e le fluttuazioni dovute alle influenze ambientali.

Il valore di misura  $\dot{H}^*(10)$  deve essere corretto in relazione alle condizioni ambientali (es. in ambienti non climatizzati) con il fattore correttivo per temperatura e pressione dato dalla formula seguente:

$$k_{T,P} = \frac{273,2 + T}{273,2 + T_0} \times \frac{p_0}{p}$$

$T_0$  e  $p_0$  sono i valori di temperatura e pressione in condizione di riferimento (generalmente 20°C e 101kPa). La temperatura si esprime sempre nell'unità di misura del Sistema Internazionale, in gradi Celsius (°C) [14].

E' evidente che risulta semplificato il calcolo per tutti i rivelatori in cui la risposta dello strumento è costante al variare dell'energia e nelle condizioni in cui la geometria di misura

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 14 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------------

coincide con la geometria di calibrazione. Infine si evince che la misura dell'equivalente di dose ambientale può essere più precisa (quantitativa) se sono note le caratteristiche del campo; mentre in condizioni in cui non sia nota l'energia o la direzione primaria o ogni qualvolta siano presenti più sorgenti con energie molto diverse la valutazione può essere per lo più qualitativa o può richiedere particolari accortezze nell'esecuzione della misura stessa e nella elaborazione dei dati.

## 6.5. Metodi semplificati di valutazione di alti ratei di equivalente di dose ambientale

Ogni volta che si conosce il fondo medio ambientale (es. 150nSv) e si esegue una misura in condizioni di alti ratei di dose (es.  $>2\mu\text{Sv/h}$ ), dovuti alla presenza certa di sorgenti di radiazioni ionizzanti, si può considerare trascurabile la valutazione del contributo del fondo ambientale e correggere il valore letto sullo strumento semplicemente utilizzando gli opportuni fattori che tengono in conto la calibrazione dello strumento e la variazione della risposta in funzione dell'energia e dell'angolo di incidenza del campo di radiazione. La stima semplificata per alti ratei di dose comporta una variazione che può considerarsi trascurabile (es. dell'ordine del 10%) rispetto al valore calcolato con precisione considerando il fondo ambientale, e la divergenza tra il valore semplificato e il valore effettivo tende a ridursi notevolmente con l'aumentare del rateo di dose misurato. Tali calcoli sono tipicamente utilizzati in condizione di reale emergenza con alti campi di radiazione.

## 6.6. Strumentazione per radiazione X, gamma e particelle beta

Nella tabella seguente si riportano i criteri minimi richiesti alla strumentazione per le misure di dose da fotoni e particelle beta [15].

**Tabella 2 Criteri minimi richiesti alla strumentazione per le misure di dose da fotoni e particelle beta [15]**


Tipo di Strumento	Grandezza da misurare	Unità di misura	Intervallo di funzionamento	Note
Rivelatore beta-gamma multipurpose	Ratei di dose	Sv/h	0.05 $\mu\text{Sv/h}$ -100mSv/h oppure 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ -1Sv/h	Con opzione finestra
Rivelatore gamma telescopico	Ratei di dose	Sv/h	0.1 $\mu\text{Sv/h}$ -10Sv/h	

Durante le campagne periodiche di misura si consiglia di utilizzare in primo luogo la strumentazione più sensibile (es. rivelatori a ioduro di sodio) ed eventualmente ricorrere a strumenti per alti campi di radiazione se necessario. In circostanze in cui il fondo gamma è molto alto impiegare rivelatori idonei (es. GM) dotati di sonde telescopiche [11].

Nella Tabella 3 sono riassunte le specifiche dei rivelatori di dose per fotoni e particelle beta, evidenziando i punti di forza e le limitazioni che li caratterizzano [11,13]:

**Tabella 3 Riassunto di alcune fondamentali specifiche dei rivelatori di dose per fotoni e particelle beta**

Tipo di Strumento	Vantaggi	Limitazioni
-------------------	----------	-------------

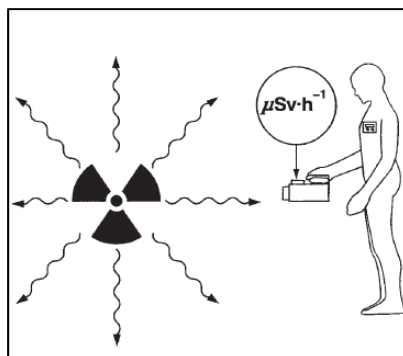
	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 15 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------------

<b>Tipo di Strumento</b>	<b>Vantaggi</b>	<b>Limitazioni</b>
Camera a ionizzazione	Alta sensibilità. Fondo intrinseco molto basso. Risposta in funzione dell'energia buona. Risposta angolare molto buona. Rivelatore robusto. Non ha problemi con i campi pulsati. Buona dinamica: 2 $\mu$ Sv/h -10 mSv/h o in altri modelli 2 $\mu$ Sv/h-10 Sv/h.	Sensibile alle variazioni di temperatura e all'umidità . Richiede una buona manutenzione. In generale non ha una uscita audio. Rivelatore ingombrante e pesante. Molto costoso.
Contatore Proporzionale	Alta sensibilità. Fondo intrinseco basso. Risposta in funzione dell'energia regolabile. Risposta angolare buona. Buono per misure di X e gamma con energie <30keV. Idoneo per le misure beta di alta energia. In generale è idoneo ai campi pulsati. Utilizzabile a basse e alte dosi. Rivelatore piccolo e leggero. Talvolta con uscita audio.	Rilevatore non molto robusto (soprattutto per le versioni $\square$ ). Utilizza una tensione di polarizzazione molto alta. Sensibile alla variazione dell'alta tensione. Costoso.
GM con pareti in acciaio compensato in energia	Fondo intrinseco alto. Risposta in funzione dell'energia soddisfacente. Risposta angolare buona. Utilizzabile a basse e medio-alte dosi. Basso costo. Uscita audio.	Non adatto alla rivelazione delle particelle $\beta$ e per X, $\gamma$ di energia inferiori a 50keV la risposta è molto "ripida". Ha problemi di campi pulsati.
GM con finestra sottile frontale e compensato in energia	Ottima risposta in energia per X e gamma da 10-15 keV fino a 1.25 MeV. Risposta angolare buona.	Lo strumento con il filtro rimovibile è molto delicato.
GM con finestra frontale	Risposta alle radiazioni X e gamma a partire da 5 keV e a tutte le radiazioni $\beta$ che contribuiscono all'equivalente di dose ambiente e/o direzionale. Risposta angolare buona.	Se utilizzato con la finestra non protetta (es. per misure $\beta$ ) è molto vulnerabile. Risposta scadente in energia per radiazioni X e gamma.
Scintillatore plastico	Fondo intrinseco basso. Risposta in funzione dell'energia buona. Risposta angolare soddisfacente. Utilizzabile a basse e alte dosi. Può produrre una risposta di dose logaritmica.	Pesante, ingombrante e poco robusto. Costoso. In generale nessuna uscita audio.
Scintillatore a ioduro di sodio	Sensibilità molto alta. Identificazione del nuclide. In genere con uscita audio.	Molto costoso. Limitata gamma dinamica.

## 7. Metodo di valutazione della misura

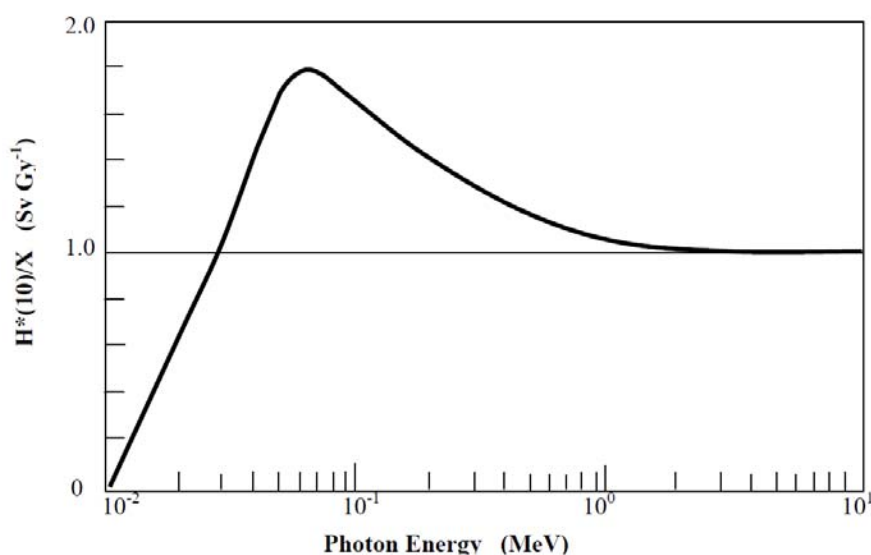
Un rateometro è idoneo alla misura di dose per il campo di radiazione in esame quando assorbe l'energia della radiazione incidente e la converte nella grandezza radiometrica di riferimento.

Durante i sopralluoghi di sorveglianza ambientale e per gli tutti scopi della radioprotezione le grandezze operative che devono essere misurate utilizzando i rateometri per i campi di radiazione X,  $\gamma$  e  $\beta$  sono già state introdotte nel capitolo 6.2.



**Figura 1** Un rateometro misura il rateo di equivalente di dose ambientale generato da una sorgente di radiazione ionizzante [16].

Quasi tutti i nuovi strumenti per le misure di dose forniscono la misura in sievert; talvolta misurano grandezze dosimetriche correlate all'equivalente di dose ambientale (es. kerma in aria) espresse in Gy e occorre convertire con appositi fattori di conversione i dati nella grandezza di riferimento (tale operazione non è banale e spesso richiede informazioni dettagliate sul campo di radiazione in esame). In Figura 2 si riporta l'andamento del fattore di calibrazione  $H^*(10)/X$  (Sv/Gy) in funzione dell'energia [11].



**Figura 2** Fattore di conversione da kerma in aria ad equivalente di dose ambientale in funzione dell'energia [11].

Se si impiegano strumenti datati ci si imbatte spesso in scale e display che visualizzano i dati nelle vecchie unità di misura (mrem/h, mrad/h e mR/h) [16].



Per completezza si riportano nella Tabella 4 i fattori di conversione per le diverse unità di misura.

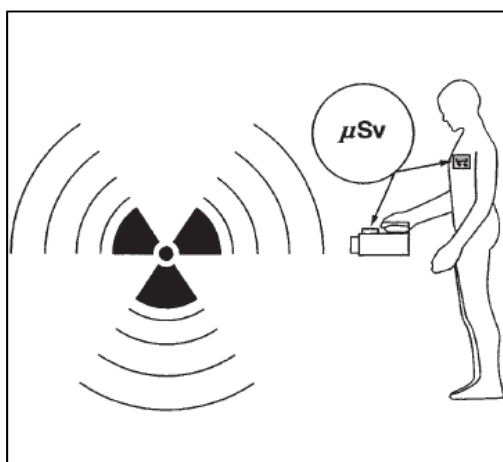
**Tabella 4 Relazioni tra le unità di misura per le grandezze più utilizzate nella misura di dose.**

Grandezza	Unità di misura da convertire	Unità di misura alternativa	Moltiplicare per
Equivalente di dose Ambientale	Sv	rem (roentgen equivalent man)	$10^2$
Kerma in Aria	Gy	rad	$10^2$

Le valutazioni della dose possono essere affette da errore:

- Quando le condizioni geometriche di calibrazione non sono replicate nella misura (strumento in prossimità della sorgente, presenza di spettri diffusi e trasmessi). E' sicuramente complicato calcolare un corretto fattore di calibrazione per spettri diffusi o trasmessi, ma generalmente ciò non è necessario se si impiegano strumenti che forniscono direttamente le grandezze dosimetriche di riferimento (la loro risposta è lineare in funzione dell'energia) [11].

- Quando le caratteristiche della sorgente non si sposano con i tempi di acquisizione ed elaborazione dello strumento (per sorgenti pulsate con impulsi di durata inferiore a  $30\mu\text{s}$  misurate con rivelatori che contano gli impulsi come GM, alcuni contatori proporzionali o rivelatori a scintillazione) [11]. Rateometri che lavorano in integrazione sono più adatti in tali condizioni [16].



**Figura 3 I rateometri che lavorano in integrazione misurano l'equivalente di dose ambientale anche per le sorgenti di radiazione che variano la loro intensità rapidamente nel tempo. La stessa logica di misura caratterizza i dosimetri personali dei lavoratori esposti [16].**

Le valutazioni di dose durante i monitoraggi di routine possono essere confrontati con i valori eseguiti prima dell'inizio delle attività con rischio radiologico (quando tali dati siano disponibili, generalmente per nuove strutture o nuove zone classificate) [11].



## 8. Valutazione delle incertezze

Come è noto ogni misura deve essere associata ad una sua incertezza. Si riporta di seguito il valore dell'incertezza  $u(\dot{H}^*(10))$  calcolato a partire dalle equazioni Eq. 1 e Eq. 2:

$$u(\dot{H}^*(10)) = \sqrt{(r_{Art}^{-1})^2 [u^2(\dot{R}) + u^2(\dot{R}_F)] + \left[ \left( \frac{u(C_F)}{C_F} \right)^2 + \left( \frac{u(S(\alpha))}{S(\alpha)} \right)^2 + \left( \frac{u(S(E))}{S(E)} \right)^2 + \left( \frac{u(k_{T,P})}{k_{T,P}} \right)^2 \right] \times \dot{H}^*(10)^2}$$

Eq. 3

In ambienti climatizzati le variazioni di temperatura e pressione possono essere trascurati, al contrario le condizioni ambientali possono variare notevolmente nelle campagne di misura "in campo". Generalmente si può considerare, in un approccio semplificato, un coefficiente correttivo  $k_{T,P}=1$ , con una variazione massima del 10%. Fanno eccezione i casi in cui le misurazioni vengono effettuate in condizioni ambientali estreme, es. per  $T < 0^\circ$ ,  $T > 40^\circ\text{C}$  o anche ad altitudini significative, in cui si deve calcolare il coefficiente correttivo  $k_{T,P}$  [17].

L'incertezza del fattore di calibrazione  $C_F$  dello strumento è fornita dal centro di taratura nel certificato di taratura, generalmente i valori possono variare dal 5% fino al 20% in funzione dell'intensità del rateo di radiazione impiegato (i valori delle incertezze aumentano per bassi ratei della grandezza misurata). Si tenga presente che l'incertezza del fattore di calibrazione riportata sul certificato è generalmente l'incertezza estesa con fattore di copertura  $k=2$ .

L'incertezza sulla risposta dello strumento in funzione dell'energia e dell'angolo di incidenza,  $S(\alpha)$  e  $S(E)$ , possono essere valutati dai dati tecnici forniti dalla casa costruttrice dello strumento. Si può considerare una valutazione dell'incertezza di tipo B, ipotizzando una distribuzione rettangolare per un intervallo di energia o angolare predefinito e riportato nei manuali dello strumento [17].

La dipendenza della risposta in funzione dell'energia può variare anche in funzione della scala di misura utilizzata. Alcuni modelli in commercio indicano una variazione massima del 30% nell'intervallo energetico 23keV - 7MeV (si riporta a titolo di esempio il grafico di risposta di uno Scintillator Probe 6150 AD-b Automess); mentre la variazione dovuta alla direzionalità del fascio è stimata del 20% per angoli di incidenza tra  $0^\circ$  e  $\pm 80^\circ$ .

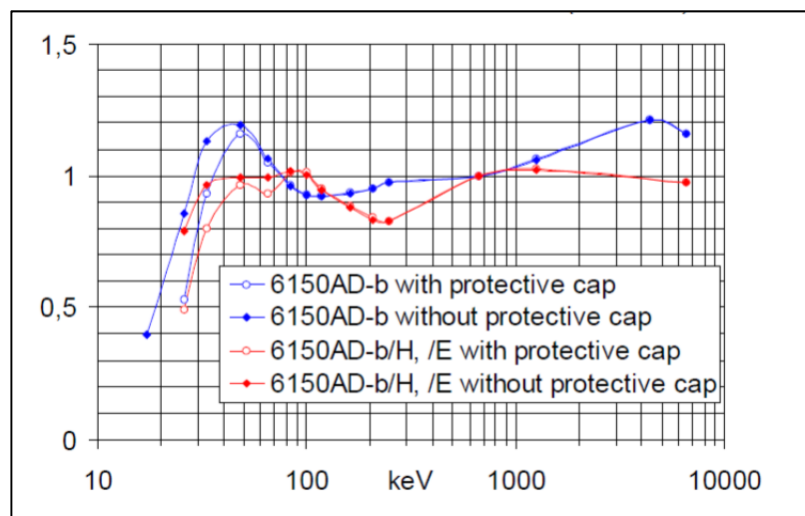



Figura 4 Variazione della risposta dello strumento Scintillator Probe 6150 AD-b Automess al variare dell'energia della radiazione misurata, normalizzata al valore del  $^{137}\text{Cs}$ .

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 19 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------------

Per valutare le incertezze di tipo A associate alle letture dello strumento  $\dot{R}$  e  $\dot{R}_F$ , si considera la distribuzione di probabilità di tipo normale [17]. Può essere utile conoscere il tempo di integrazione dello strumento per calcolare le incertezze:  $u(\dot{R}_F) = \sqrt{M_F/t_F^2}$  e  $u(\dot{R}) = \sqrt{M_R/t_R^2}$ .

Generalmente si considera l'incertezza sulla serie di misure ripetute con uno scarto tipo sperimentale associato al valore medio ottenuto dalle  $n$  misure (es. tre misure), si riporta il valore medio e lo scarto quadratico associato al misurando  $\dot{R}$ , per le letture di fondo il calcolo è equivalente:


$$\dot{R} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{R}_i}{n}$$

e

$$u^2(\dot{R}) = \frac{\sum_{i=1}^n (\dot{R}_i - \dot{R})^2}{n-1}.$$

Il calcolo dell'incertezza deve quindi tenere conto di tutti i contributi associati alle grandezze da cui dipende il misurando e può essere ridotta di molto se sono noti i radionuclidi o le specifiche del campo di radiazione (es. l'energia, la posizione della sorgente o la direzione del fascio) e le condizioni di misura (temperatura, pressione e umidità). In assenza di informazioni specifiche la misura sarà valida ma ovviamente la sua incertezza sarà rilevante.

L'incertezza delle misure con monitori durante le survey è tipicamente del  $\pm 30\%$  in laboratorio, in condizioni di misura ben definite, mentre in campo aperto l'incertezza per le misure di survey sono maggiori [18].

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag.</b> 20	<b>di</b> 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

## 9. Radionuclidi e calibrazione

La calibrazione di uno strumento per ogni ipotetico scenario di misura non è applicabile. Molti produttori forniscono efficienze per un ristretto numero di radionuclidi (es.  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) ottenute in condizioni ideali di misura; in pratica l'utilizzatore per fornire un valore di  $H^*(10)$  è costretto a fare alcune ipotesi riguardo il campo di radiazioni qualora non avesse informazioni sufficienti.

In talune circostanze si è chiamati a misurare la dose senza aver alcuna indicazione della tipologia di sorgente, pertanto si deve partire sempre dalla strumentazione più sensibile e si deve impiegare per i calcoli l'opportuno valore della efficienza di calibrazione dello strumento.

In altri casi la misura è richiesta in laboratori in cui si faccia uso di più radionuclidi e in queste circostanze l'Esperto Qualificato può approfondire la ricerca avvalendosi del personale del laboratorio, cercando tutte le informazioni necessarie per identificare quale sia la componente dominante del campo di radiazioni oppure può scegliere di eseguire una misura con un radionuclide di riferimento garantendo una valutazione cautelativa.

La calibrazione degli strumenti deve fornire fattori di calibrazione in grado di riportare la lettura dello strumento in equivalente di dose ambientale e direzionale nell'unità di misura del S.I. (qualora gli strumenti fossero di vecchia generazione).

## 10. Limiti caratteristici della metodica di misura (ISO 11929)

Il limite di rivelabilità per una metodica di misura prescelta è il valore più piccolo rivelabile, con elevato grado di affidabilità, della grandezza stessa, ed è un valore molto maggiore della soglia di decisione (valore fissato per definire la presenza di un effetto fisico).

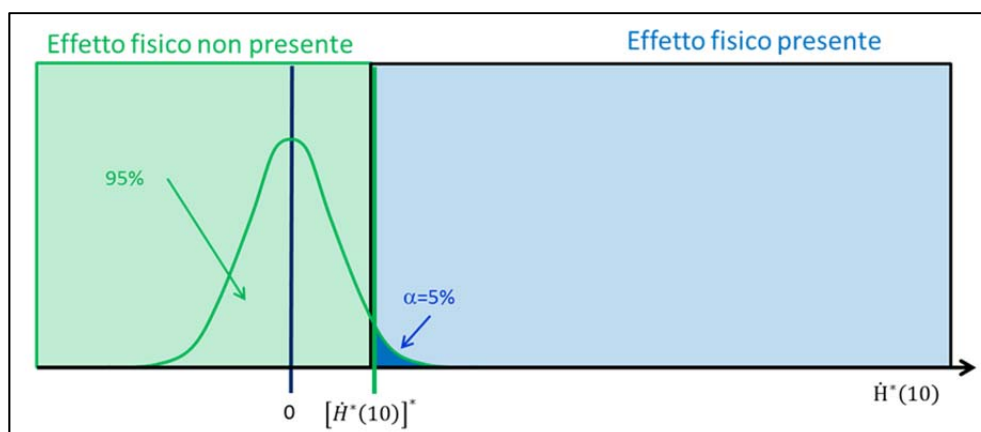
Tale limite deve essere usato per verificare che la strumentazione impiegata sia idonea alla misura da eseguire, esso deve essere confrontato con i livelli di riferimento derivati per le misure di rateo di dose (vedi capitolo 12).

La soglia di decisione è data da [19]:

$$[\dot{H}^*(10)]^* = k_{1-\alpha} \cdot \tilde{u}(0) \quad \text{Eq. 4}$$

si assume che ci sia una probabilità  $\alpha$  (generalmente pari al 5%) di rifiutare l'ipotesi che l'effetto fisico sia assente (probabilità di falso positivo pari a 5%).

Il valore dei quantili  $k_{1-\alpha}$  della distribuzione normale standard sono tabulati nell'allegato E della norma ISO 11929:2010, si consideri  $k_{1-\alpha}=t$  e  $\phi(t)=1-\alpha$ .



**Figura 5 Rappresentazione schematica della soglia di decisione  $[\dot{H}^*(10)]^*$  per l'equivalente di dose ambientale.**

In pratica se il valore misurato di  $\dot{H}^*(10) \leq [\dot{H}^*(10)]^*$  è sufficientemente probabile che il valore vero sia zero e si può affermare che non ci siano variazioni di dose rispetto ai valori di fondo. Il valore vero del misurando sarà circa zero ( per  $\dot{R} \approx \dot{R}_F$  si ottiene  $\dot{H}^*(10) \approx 0$ ).

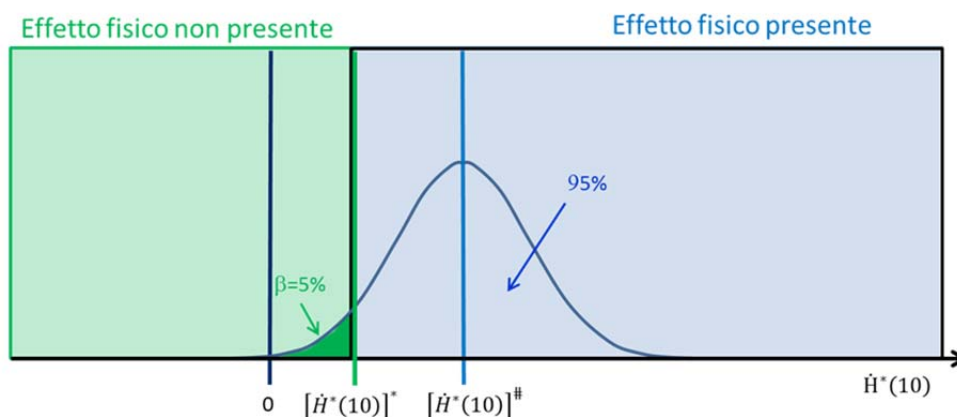
Il limite di rivelabilità è la soluzione più piccola della seguente equazione [19]:

$$[\dot{H}^*(10)]^\# = [\dot{H}^*(10)]^* + k_{1-\beta} \cdot \tilde{u}([\dot{H}^*(10)]^\#) \quad \text{Eq. 5}$$

e si può calcolare attraverso un processo iterativo partendo dall'approssimazione

$$[\dot{H}^*(10)]^\# \approx 2 \cdot [\dot{H}^*(10)]^* \quad \text{Eq. 6}$$

Generalmente si considera  $\beta$  pari al 5%; questo vuol dire che  $[\dot{H}^*(10)]^\#$  ha una probabilità del 95% di essere associato ad un effetto fisico realmente presente e, per converso, di rifiutare, erroneamente, che l'effetto fisico sia presente (probabilità di falso negativo pari al 5%).

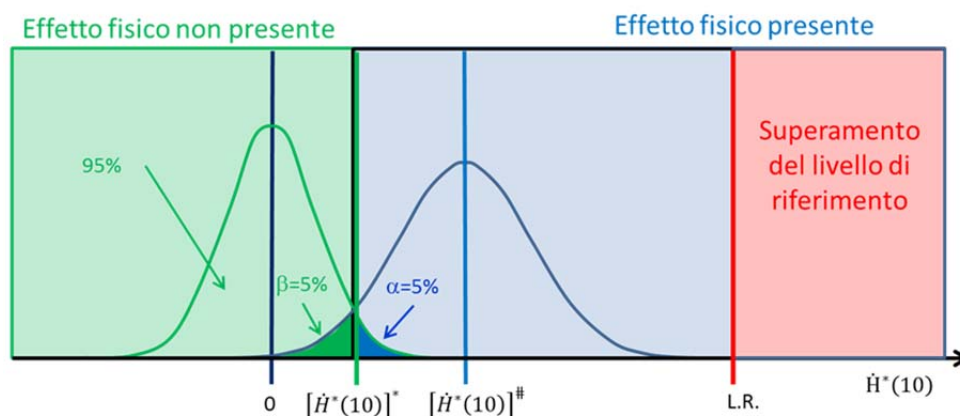


**Figura 6** Rappresentazione schematica del limite di rivelabilità  $[\dot{H}^*(10)]^\#$  e della soglia di decisione  $[\dot{H}^*(10)]^*$ .


In pratica se il valore misurato di  $\dot{H}^*(10) > [\dot{H}^*(10)]^*$  è sufficientemente probabile che il valore vero non sia zero e si può affermare che ci sono variazioni di dose rispetto ai valori di fondo. Per valori misurati  $\dot{H}^*(10) \geq [\dot{H}^*(10)]^\#$  si può affermare che la probabilità che un effetto fisico sia presente è maggiore del 95%.

I valori del quantile  $k_{1-\beta}$  della distribuzione normale standard è tabulato nell'allegato E della norma ISO 11929:2010, si consideri  $k_{1-\beta}=t$  e  $\phi(t)=1-\beta$ .

Per meglio illustrare i concetti sopra esposti si riporta nella Figura 7 una rappresentazione schematica dei limiti caratteristici della metodica di misura e il livello di riferimento per la grandezza da misurare.



**Figura 7** Rappresentazione schematica di tutti i limiti caratteristici della metodica di misura,  $[\dot{H}^*(10)]^*$  e  $[\dot{H}^*(10)]^\#$ , e del livello di riferimento L.R. per la grandezza in esame. Nella parte a sinistra del valore  $[\dot{H}^*(10)]^*$  è evidenziata l'area verde associata alla probabilità che l'effetto fisico non sia presente, mentre alla parte a destra di  $[\dot{H}^*(10)]^*$  è associata la presenza un rateo di equivalente di dose ambientale dovuto alla presenza di una sorgente di radiazione artificiale, differenziando i valori che rientrano nel rispetto dei livelli di riferimento (area azzurra) da quelli che lo superano (area rossa).

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 23 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------------

## 10.1. Formule per il calcolo della soglia di decisione

In questo paragrafo si riprendono le formule dei capitoli 6.4 e 8 e si sviluppano nel dettaglio per la misura di equivalente di dose ambientale per la radiazione beta-gamma con metodo diretto.

Il valore dell'equivalente di dose ambientale è data dalla equazione Eq. 1 e l'incertezza  $u(\dot{H}^*(10))$  è data dalla Eq. 3. Se si considera l'incertezza standard per il fondo e per la misura pari rispettivamente a  $u(\dot{R}_F) = \sqrt{M_F/t_F^2}$  e  $u(\dot{R}) = \sqrt{M_R/t_R^2}$ , con  $M_F$  valore di fondo integrato nel tempo di  $t_F$  e  $M_R$  valore della misura acquisito nel tempo di integrazione  $t_R$ , si ottiene la seguente formula:

$$u(\dot{H}^*(10)) = \sqrt{(r_{Art}^{-1})^2 \left[ \frac{M_R}{t_R^2} + \frac{M_F}{t_F^2} \right] + \left[ \left( \frac{u(C_F)}{C_F} \right)^2 + \left( \frac{u(S(\alpha))}{S(\alpha)} \right)^2 + \left( \frac{u(S(E))}{S(E)} \right)^2 + \left( \frac{u(k_{T,P})}{k_{T,P}} \right)^2 \right] \times \dot{H}^*(10)^2}$$

Per calcolare la soglia di decisione data dalla Eq. 4 è opportuno porre la seguente condizione:

$$\dot{H}^*(10)=0 \text{ ( in pratica } \dot{R}=\dot{R}_F)$$

e quindi  $M_R = (M_F/t_F) \cdot t_R$ , da cui segue:

$$\tilde{u}(0) = \sqrt{\left( \frac{M_F}{t_R \cdot t_F} + \frac{M_F}{t_F^2} \right) \times (r_{Art}^{-1})^2}.$$

Considerando  $\alpha$  pari al 5%, vale a dire  $\phi(t)=1-\alpha=0,95$ , si ottiene  $k_{1-\alpha}=1,645$ . La soglia di decisione è quindi:

$$[\dot{H}^*(10)]^* = 1,645 \times \sqrt{\left( \frac{M_F}{t_R \cdot t_F} + \frac{M_F}{t_F^2} \right) \times (r_{Art}^{-1})^2}.$$

Eq. 7

Quando  $t_R$  e  $t_F$  sono uguali è possibile scrivere:

$$[\dot{H}^*(10)]^* = 1,645 \cdot \sqrt{2 \cdot u^2(\dot{R}_F) \cdot (r_{Art}^{-1})^2}.$$

## 10.2. Formule per il calcolo del limite di rivelabilità


Il limite di rivelabilità è la soluzione più piccola della Eq. 5 e il calcolo si esegue attraverso iterazioni successive, partendo dalla condizione definita dalla Eq. 6.

Se si considera che il valore della grandezza integrata nel tempo di misura è  $M_R = \dot{R} \cdot t_R$ , partendo dalla Eq. 1 si calcola  $M_R^\#$  e dalla Eq. 3 si ottiene il valore della sua incertezza associata:

$$M_R^\# = \dot{R}_F \cdot t_R + \frac{[\dot{H}^*(10)]^\# \cdot t_R}{(r_{Art}^{-1})} \quad \text{e} \quad u^2(\dot{R}^\#) = \frac{M_R^\#}{t_R^2} = \frac{\dot{R}_F + [\dot{H}^*(10)_{Art}]^\# / [(r_{Art}^{-1})]}{t_R}.$$

Segue che:

$$\tilde{u}([\dot{H}^*(10)]^\#) = \sqrt{(r_{Art}^{-1})^2 \left[ \frac{\dot{R}_F + \frac{[\dot{H}^*(10)]^\#}{(r_{Art}^{-1})}}{t_R} + \frac{M_F}{t_F^2} \right] + \left[ \left( \frac{u(C_F)}{C_F} \right)^2 + \left( \frac{u(S(\alpha))}{S(\alpha)} \right)^2 + \left( \frac{u(S(E))}{S(E)} \right)^2 + \left( \frac{u(k_{T,P})}{k_{T,P}} \right)^2 \right] \times [\dot{H}^*(10)]^{\#2}}$$

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 24 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------------


L'equazione finale di  $\bar{u}([\dot{H}^*(10)]^\#)$  è funzione di  $[\dot{H}^*(10)]^\#$  e pertanto dalla Eq. 5 segue che anche  $[\dot{H}^*(10)]^\#$  è funzione di  $[\dot{H}^*(10)]^\#$ . Si può calcolare attraverso il processo iterativo che parte dall'approssimazione riportata nell'Eq. 6.

In pratica si deve partire dalla soluzione della seguente equazione:

$$\begin{aligned}
 & [\dot{H}^*(10)]^\# \\
 & = [\dot{H}^*(10)]^\# + 1,645 \\
 & \cdot \sqrt{\left( r_{Art}^{-1} \right)^2 \left[ \frac{\dot{R}_F + \frac{2 \cdot [\dot{H}^*(10)]^\#}{r_{Art}^{-1}}}{t_R} + \frac{M_F}{t_F^2} \right] + \left[ \left( \frac{u(C_F)}{C_F} \right)^2 + \left( \frac{u(S(\alpha))}{S(\alpha)} \right)^2 + \left( \frac{u(S(E))}{S(E)} \right)^2 + \left( \frac{u(k_{T,P})}{k_{T,P}} \right)^2 \right] \times [2 \cdot [\dot{H}^*(10)]^\#]^2}
 \end{aligned}$$

Eq. 8

e si deve sostituire il valore di  $[\dot{H}^*(10)]^\#$  così ottenuto nella medesima equazione fino a quando il valore di  $[\dot{H}^*(10)]^\#$  non si stabilizza. Nell'Eq. 8 si assume che  $\beta$  sia pari al 5% e quindi  $k_{1-\beta}=1,645$ .

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 25 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------------

## 11. Intervallo di confidenza e migliore stima del rateo di $\dot{H}^*(10)$ (ISO 11929)

Ogni qualvolta che l'effetto fisico è presente (cioè quando è verificata la condizione  $\dot{H}^*(10) > [\dot{H}^*(10)]^*$ ), si considera l'intervallo di confidenza all'interno del quale è presente il valore vero del misurando con una probabilità pari a  $1-\gamma$ .

Si definiscono pertanto i seguenti limiti dell'intervallo di confidenza del valore vero:

$$\text{limite inferiore} \rightarrow \dot{H}^*(10)^{\triangleleft} = \dot{H}^*(10) - k_p u[\dot{H}^*(10)] \quad \text{Eq. 9}$$

$$\text{limite superiore} \rightarrow \dot{H}^*(10)^{\triangleright} = \dot{H}^*(10) + k_q u[\dot{H}^*(10)] \quad \text{Eq. 10}$$

Se si considera una probabilità pari a  $1-\gamma$  pari al 95% di avere il valore vero all'interno dell'intervallo di confidenza si pongono le seguenti condizioni:

- La probabilità che il valore vero dato dal risultato sperimentale sia minore del limite inferiore dell'intervallo di confidenza e pari a  $\frac{\gamma}{2}$ :  $P(\dot{H}^*(10) < \dot{H}^*(10)^{\triangleleft}) = \frac{\gamma}{2}$
- La probabilità che il valore vero dato dal risultato sperimentale sia superiore al limite superiore dell'intervallo di confidenza è pari a  $\frac{\gamma}{2}$ :  $P(\dot{H}^*(10) > \dot{H}^*(10)^{\triangleright}) = \frac{\gamma}{2}$

Con p e q definiti come segue:

$$p = \omega \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{2}\right) = \omega \cdot 0.975, \quad q = 1 - \omega \cdot \frac{\gamma}{2} = 1 - \omega \cdot 0.025$$

e dove  $\omega$  è una funzione del misurando  $\dot{H}^*(10)$  e della sua incertezza:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\dot{H}^*(10)/u[\dot{H}^*(10)]} \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right) dv \quad \text{Eq. 11}$$

I valori  $k_p$  e  $k_q$  sono i quantili associati alle probabilità p e q che si possono ricavare dalla tabella E.1 della ISO 11929:2010 oppure applicando la formula inversa alla distribuzione normale standardizzata in un foglio di calcolo.

Infine si associa alla misura la migliore stima del rateo di equivalente di dose ambientale:

$$\widehat{H}^*(10) = \dot{H}^*(10) + \frac{u[\dot{H}^*(10)]}{\omega \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{\frac{-\dot{H}^*(10)^2}{2 \cdot u^2[\dot{H}^*(10)]}\right\} \quad \text{Eq. 12}$$

con la sua incertezza standard associata:

$$u[\widehat{H}^*(10)] = \sqrt{u^2[\dot{H}^*(10)] - \left(\widehat{H}^*(10) - \dot{H}^*(10)\right) \cdot \widehat{H}^*(10)} \quad \text{Eq. 13}$$

Per valori di  $\dot{H}^*(10) \geq 4 \cdot u(\dot{H}^*(10))$ , con  $\omega=1$ ,  $\gamma=0,05$  e quindi  $k_{1-\frac{\gamma}{2}}=1,96$ , si possono impiegare le formule semplificate:

$$\dot{H}^*(10)^{\triangleleft} = \dot{H}^*(10) - 1,96 \cdot u(\dot{H}^*(10)) \quad \text{e} \quad \dot{H}^*(10)^{\triangleright} = \dot{H}^*(10) + 1,96 \cdot u(\dot{H}^*(10)).$$

e si può porre:

$$\widehat{H}^*(10) = \dot{H}^*(10) \quad \text{e} \quad u[\widehat{H}^*(10)] = u(\dot{H}^*(10)).$$

Un esempio numerico, con una trattazione dettagliata dell'applicazione della ISO 11929:2010, è presentato nell' Allegato 4.



## 12. Livelli di riferimento per le misure di $H^*(10)$

$H^*(10)$  è una grandezza operativa che fornisce valori direttamente confrontabili con i limiti di dose previsti dalla legge poiché impiega la stessa unità di misura. Si deve tener presente che i limiti, definiti nel D.Lgs.230/95 e ss.mm.ii., si riferiscono alla dose efficace, tale grandezza dosimetrica include il contributo delle radiazioni all'esposizione esterna e all'esposizione interna dovuta alla contaminazione per ingestione o inalazione. L'esposizione totale è direttamente confrontabile con i valori misurati solo qualora non sia presente il rischio di contaminazione interna. Di seguito si considererà solo tale fattispecie.

Nella Tabella 5 sono riportati i valori di riferimento per la dose efficace in accordo con il D.Lgs.230/95 e ss.mm.ii..

Classificazione della popolazione e dei lavoratori	Limiti di Dose Efficace	Periodo di Riferimento
Popolazione	1 mSv	1 anno solare
Categoria B	6 mSv	1 anno solare
Categoria A	20 mSv	1 anno solare

Tabella 5 Limiti di dose efficace per la popolazione e i lavoratori esposti.

I livelli di riferimento per le misure di  $H^*(10)$  devono quindi essere contestualizzati in relazione all'effettivo tempo di esposizione del personale e ai valori misurati di  $\dot{H}^*(10)$ .

Ogni Esperto Qualificato dovrà verificare il rispetto dei limiti di legge impiegando tutte le informazioni di cui dispone oltre ai risultati delle misure eseguite.

E' opportuno, inoltre, che su tutti gli strumenti siano correttamente impostati i valori di allarme, per garantire al singolo lavoratore impegnato nella campagna di misure di non incorrere in sovraesposizioni alle radiazioni ionizzanti.

Per i rateometri portatili in condizioni di emergenza si consiglia di fissare i valori di allarme pari a 100  $\mu\text{Sv/h}$  [21]. Valori di soglia più bassi, 1  $\mu\text{Sv/h}$  o 10  $\mu\text{Sv/h}$ , possono essere preferibili in condizioni di routine.


Si riassumono in Tabella 6 dei livelli di riferimento che possono essere impostati per le misure di routine al variare della classificazione delle aree. Per derivare i livelli di riferimento si può considerare il fattore di occupazione massimo di 2000 h e i valori di dose efficace associati alle varie aree. Si può considerare per un'area libera, non classificata, il limite di dose di 0,3 mSv per anno solare [20] per la popolazione con l'ipotesi cautelativa che possano essere presenti contemporaneamente fino a tre fonti di radiazione artificiale.

Classificazione delle aree	Valore Dose Efficace	Tempo di occupazione	L.R.
Area Libera	0,3 mSv - 1 mSv	2000 h	0,15 $\mu\text{Sv/h}$ - 0,50 $\mu\text{Sv/h}$
Zona Sorvegliata	1 mSv - 6mSv	2000 h	0,50 $\mu\text{Sv/h}$ - 3 $\mu\text{Sv/h}$
Zona Controllata	6 mSv - 20 mSv	2000 h	3 $\mu\text{Sv/h}$ - 10 $\mu\text{Sv/h}$

Tabella 6 Livelli di Riferimento al variare della classificazione delle aree, considerando un periodo di occupazione media pari a 2000 ore e un intervallo dei valori di dose efficace di riferimento.

Si precisa che i livelli di riferimento possono variare notevolmente al variare del carico di lavoro effettivo degli impianti (durata complessiva di tempo in condizioni ON o con sorgenti aperte durante un anno) e possono tener conto del fattore di occupazione dei locali che differisce notevolmente al variare della destinazione d'uso.

Qualora si dovesse verificare la condizione di non rilevanza radiologica il valore di riferimento dovrebbe essere pari a 10  $\mu\text{Sv}$  per anno solare; tale verifica sperimentale richiede misure molto accurate e generalmente associate a procedure non eseguite nelle misure di survey.

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag.</b> 27	<b>di</b> 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Si precisa che per ogni ambiente di lavoro generalmente l'operatore esperto conosce il livello medio del fondo ambientale, pertanto ogni variazione dal livello di base merita ulteriori approfondimenti e la notifica dell'evento stesso.

In molti manuali in cui siano trattati gli interventi in emergenza [21,22] sono inoltre indicati i valori di riferimento e le azioni da compiere per alti valori misurati dei ratei di equivalente di dose ambientale.

<b>H*(10)</b>	<b>Azioni da compiere</b>
1 mSv/h	Aree in cui non permanere.
10 mSv/h	Aree in cui procedere velocemente e con estrema cautela.
100 mSv/h	Aree da cui allontanarsi. Eseguire esclusivamente azioni con lo scopo di salvare vite umane. Permanenza massima <30minuti.
1000 mSv/h	Aree ad accesso interdetto.

**Tabella 7 Istruzioni generali in situazioni di emergenza per il personale addetto alle misure di dose.**

## Allegato 1. Strumenti di misura e Scheda Strumento

Lo strumento deve essere in grado di misurare la dose generata dalla specifica radiazione da rivelare (beta, fotoni o neutroni) e inoltre deve essere idoneo alla l'intensità del campo di radiazione: per basse dosi si impiegano per esempio strumenti in grado di lavorare nell'intervallo 0.05 $\mu$ Sv/h-100mSv/h mentre per medie ed alte dosi occorre utilizzare strumenti in grado di lavorare nell'intervallo 0.1 $\mu$ Sv/h-10Sv/h.

Prima di effettuare un monitoraggio con un rateometro si deve prendere visione del manuale di misura dello strumento approfondendo le nozioni relative al suo funzionamento e alla tipologia di letture fornite ( $\mu$ Sv,  $\mu$ Sv/h, mSv, mSv/h). Nei manuali della strumentazione è comunemente riportato il valore dell'intervallo di misura in cui lo strumento può operare, ad esempio da 50nSv/h a 99,99 $\mu$ Sv/h per uno Scintillator Probe 6150 AD-b Automess.

La taratura dello strumento deve essere eseguita periodicamente presso laboratori qualificati, i test devono seguire protocolli scritti e ampiamente documentati. Il periodo di tempo consigliato tra un controllo ed il successivo è non superiore ai 3 anni [23, 24].

Per valutare le prestazioni del rivelatore si sottopone lo strumento ai Type Tests; prima della messa in commercio è responsabilità del produttore eseguire tali verifiche in accordo con quanto stabilito dalle organizzazioni internazionali IEC [25,26] e ISO [24].

Assumendo che lo strumento sia consegnato in buone condizioni, nel laboratorio di arrivo dovranno essere eseguiti i test di prima verifica o *test before first use* (TBFU). Si raccomanda la riproduzione di alcune prove del test, che potranno essere ripetute periodicamente (conferma metrologica periodica) poiché le prestazioni dello strumento possono variare con il tempo, i componenti possono deteriorarsi e danneggiarsi con l'uso. Nella Tabella 8 è trascritto un elenco dei test richiesti per i rivelatori di dose. Come procedura interna di ogni laboratorio è consigliabile definire un intervallo temporale per la conferma metrologica periodica; tutti i risultati ottenuti devono rimanere all'interno della tolleranza prevista del 30% rispetto ai dati forniti dal Type Test [10].

Strumento	TBFU / Prima Verifica Metrologica	Verifica Metrologica Periodica
Dose da fotoni	Risposta ad alti ratei di dose Linearità Dipendenza dall'energia Dipendenza direzionale Misura di fondo	Risposta ad alti ratei di dose Linearità Dipendenza dall'energia  Misura di fondo
Dose da particelle beta	Risposta ad alti ratei di dose Linearità Risposta alla radiazione beta Misura di fondo	Risposta ad alti ratei di dose Linearità Risposta alla radiazione beta Misura di fondo


**Tabella 8 Elenco dei test generalmente richiesti per la conferma metrologica dei rateometri[10].**

La verifica metrologica periodica dello strumento dovrà essere eseguita anche in seguito ad ogni taratura e dipende dalle modalità di utilizzo e di funzionamento del singolo apparecchio. Essa deve originare una risposta in accordo con il certificato di taratura.

Inoltre si suggerisce un controllo di buon funzionamento dello strumento prima di ogni utilizzo (quotidianamente se l'utilizzo è frequente). Per variazioni della risposta dello strumento superiori al 30% rispetto a quelle aspettate si consiglia di ripetere la taratura del rivelatore.

Si riporta di seguito un esempio di una Scheda Strumento definita per un rateometro [14] applicata ad un rivelatore Automess Dose Rate Meter 6150 ADb-H, in dotazione presso l'ENEA Casaccia. La Scheda Strumento è essenzialmente costituita di tre parti:



	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag.</b> 30	<b>di</b> 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

## CONFERMA METROLOGICA (lettura della sorgente di prova o del sistema di riferimento)


- Eseguire la conferma metrologica quando uno strumento ( nuovo o riparato ) viene consegnato munito del suo certificato di taratura.
- Sono previsti i seguenti controlli: misura di fondo, verifica della risposta ad alti ratei di dose, verifica della linearità, verifica della dipendenza dall'energia e dipendenza direzionale.
- *Es.* Per questo scopo utilizzare una sorgente sigillata gamma emettitore di  $^{137}\text{Cs}$  .
- Eseguire una lettura di fondo in  $\mu\text{Sv/h}$  e successivamente posizionare il rivelatore a distanze predefinite in posizione allineata alla sorgente. Registrare i dati al variare della distanza e verificare che il valore misurato rientri nella variazione massima del 20% [18] rispetto al valore teorico (verifica degli alti ratei e verifica della linearità). Se possibile disegnare un grafico con i valori misurati in funzione della distanza per verificare l'abbattimento al variare della radice quadrata della distanza stessa.
- Eseguire una lettura con la sorgente a  $45^\circ$  rispetto alla direzione principale del rivelatore e confrontare la variazione percentuale con i valori riportati sul certificato di taratura dello strumento. Variazione massima consentita 20% per fotoni da 662keV.
- Eseguire una misura ad una distanza predefinita con una altra sorgente gamma (es.  $^{60}\text{Co}$ ) o con una sorgente beta emettitore (es.  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ). Variazione massima consentita 30% [13].

## MODALITA' DEL CONTROLLO DI BUON FUNZIONAMENTO

- Verificare le condizioni generali dello strumento (danni evidenti)
- Verificare lo stato della batteria dello strumento prima di ogni utilizzo, verificare che sia udibile il segnale di allarme.
- Eseguire una lettura di fondo in  $\mu\text{Sv/h}$  e verificare che la lettura sia confrontabile con i valori di riferimento della conferma metrologica (stesso locale).
- Nella medesima modalità di esecuzione prevista per la conferma metrologica impiegare la sorgente gamma di riferimento. Effettuare una misura, in una specifica geometria in accordo con la conferma metrologica: stessa sorgente, stessa distanza e medesimo allineamento, stesso locale. Il valore letto si deve confrontare con i valori di riferimento della conferma metrologica
- I valori ottenuti nel controllo periodico ad ogni utilizzo possono differire dal valore di riferimento dell'ultima conferma metrologica con una tolleranza massima del 20%. Qualora i valori superassero la tolleranza massima lo strumento non deve essere impiegato e deve essere opportunamente etichettato con chiara indicazione del **NON CORRETTO FUNZIONAMENTO**. Lo strumento dovrà essere nuovamente sottoposto ad una procedura di conferma metrologica e se necessario dovrà essere effettuata una nuova taratura. L'operatore è tenuto a compilare l'apposita tabella, riportando i valori letti .





	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 33 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------------

## **Allegato 2. Scheda di misura per il tecnico di radioprotezione**

La scheda di misura per il tecnico di radioprotezione ha lo scopo di riassumere brevemente tutte le informazioni necessarie alla elaborazione dei dati dell'Esperto Qualificato.

Si tratta di una scheda standard che può essere impiegata per monitoraggi di routine in laboratori o impianti ispirata alla Scheda Rapporto di Misura del documento ISPEL-AIRP-ANPEQ-ENEA [17].

Nei sopralluoghi periodici è importante che i dati di misura in punti specifici siano facilmente reperibili così da consentire una prima verifica dello stato delle aree monitorate anche sulla base dei valori non elaborati e forniti dallo strumento.

Si ricorda che è importante registrare tutti i valori di lettura della misura con misuratore di dose affinché possano essere confrontati con il valore di fondo e con gli appropriati limiti [9].


La scheda di misura è composta da:

- i. una prima parte esclusivamente descrittiva: include tutti i parametri necessari per la misura dell'equivalente di dose ambientale con strumentazione portatile e riassume tutte le operazioni che il tecnico di radioprotezione deve eseguire e segnalare per una corretta rielaborazione dei dati;
- ii. una seconda parte specifica del laboratorio/impianto: illustra su una planimetria dettagliata i punti di campionamento /misura prescelti dell' Esperto Qualificato;
- iii. una terza parte numerica: consiste nel rapporto di misura dettagliato con i valori numerici ottenuti nella campagna di misura (possono essere presenti più rapporti di misura).

Si allega di seguito un esempio di scheda con 8 punti di misura distribuiti all'interno di un bunker, in cui è presente un tubo a raggi X, e nelle aree adiacenti.

E' fondamentale definire un codice identificativo della scheda di misura che deve essere richiamato nella scheda di elaborazione dati associata.



	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 34 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------------

<b>SCHEDA MISURA</b>	<b>Codice: es.456</b>
<b>DEFINIZIONE DEL RATEO DI EQUIVALENTE DI DOSE AMBIENTALE DA MISURA DIRETTA</b>	

**EQUIVALENTE DI DOSE AMBIENTALE ( $\mu\text{Sv/h}$ ):**

$$\dot{H}^*(10) = r_{Art}^{-1} \cdot (\dot{R} - \dot{R}_F)$$

Dove:

$\dot{R}$  = lettura osservata ( $\mu\text{Sv/h}$ ) -  $t_R$  tempo di integrazione dello strumento o tempo preimpostato per la misura

$\dot{R}_F$  = rateo di conteggio di fondo ( $\mu\text{Sv/h}$ ) -  $t_F$  tempo di integrazione dello strumento o tempo preimpostato per la misura di fondo

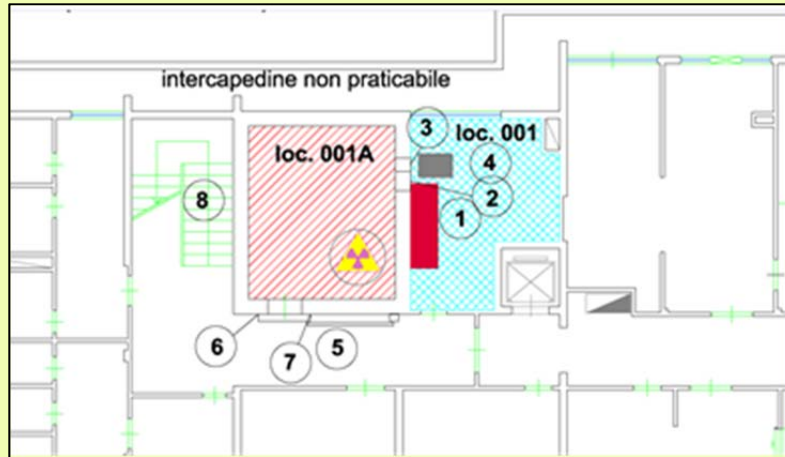
$r_{Art}$  è la risposta dello strumento alla radiazione artificiale ed è funzione delle caratteristiche dello strumento, del campo di radiazione e delle condizioni di misura (in condizioni estreme indicare temperatura T e pressione p)

**MODALITA' DI ESECUZIONE DELLA MISURAZIONE DIRETTA**

- La misura di equivalente di dose ambientale deve essere eseguita nelle posizioni indicate nella figura allegata alla DESCRIZIONE DEL SITO/MODALITÀ DI CAMPIONAMENTO.
- Il codice di misura della tabella RAPPORTO DI MISURA coincide con il numero riportato nella planimetria in DESCRIZIONE DEL SITO/MODALITÀ DI CAMPIONAMENTO.
- Scegliere il rateometro idoneo alla misura da eseguire per prestazioni e dimensioni (vedere i relativi libretti di istruzione degli strumenti).
- Tutti i campi presenti in STRUMENTO DI MISURA devono essere compilati, indicando la data in cui è stata effettuata l'ultima calibrazione dello strumento e i radionuclidi con cui è stato tarato lo strumento.
- Specificare la modalità con cui si è eseguita la misura, se in integrazione o in rateo di conteggio, e indicare sempre il tempo di integrazione o il tempo di riferimento impostato per l'acquisizione in modalità rateo.
- Indicare la distanza tra strumento di misura e il suolo (si raccomanda una distanza 1 m).
- Considerare i valori dello strumento in Sv/h e suoi sottomultipli.
- Eseguire una misura di fondo. Generalmente i valori misurati in ambienti privi di sorgente di radiazione possono variare in funzione dei materiali da costruzione impiegati per gli edifici: es. 0.075  $\mu\text{Sv/h}$  - 0.145  $\mu\text{Sv/h}$ .
- Annotare la presenza di sorgenti libere o schermate riportando sulla mappa eventuali correzioni qualora fossero necessarie. Specificare le caratteristiche di funzionamento della sorgente qualora si effettuassero controlli con sorgente aperta/accessa.
- Indicare nella tabella del RAPPORTO DI MISURA i tempi utilizzati per la misura di fondo e per tutte le misure previste dal campionamento.
- Specificare nelle note temperatura e pressione ogni volta che si acquisiscono dati in condizioni estreme.
- Verificare che la risposta del rateometro sia stabile ed eseguire una misura per ogni punto di campionamento. Riportare i valori letti nella tabella del RAPPORTO DI MISURA.  
Se si dispone di dati analoghi acquisiti in precedenti sopralluoghi verificare che i valori misurati siano confrontabili con lo storico. Se si dispone di livelli derivati forniti per il caso specifico dall'Esperto Qualificato eseguire l'opportuno confronto con i valori misurati.
- Ogni qualvolta si registrino valori anomali informare immediatamente l'Esperto Qualificato. Indicare eventuali note nell'apposito spazio.
- Inserire la data e firma dell'operatore che ha eseguito la misura.

**DESCRIZIONE DEL SITO / MODALITA' DI CAMPIONAMENTO**
**Sito:** Edificio P28

**Oggetto:** Controlli periodici

**Schema di campionamento:**

**STRUMENTO DI MISURA**
**Marca e Modello:** Automess Dose Rate Meter 6150 ADb-H

**CERTIFICATO DI CALIBRAZIONE**
**Data:**  
 24/10/2012

**Sorgenti di riferimento:** 137-Cs

**MODALITA' DI ESECUZIONE DELLA MISURA**
**Modalità di acquisizione:**

 Rateo di conteggio 

 Integrazione 

 Tempo di riferimento dello strumento:  $t_R(s) =$  \_\_\_\_\_


 Tempo di misura impostato:  $t_R(s) =$  8

 Distanza rivelatore – suolo (m) = 1
**DESCRIZIONE DELLA SORGENTE DI RADIAZIONE**
**es. Apparecchio :** Giraldoni, CHF-320/4-15BEG

**Condizioni di acquisizione dati:**

Tensione (kV)	Corrente (mA)	Filtrazione aggiuntiva
250	15	1,5 mm Cu



	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 37 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------------

### Allegato 3. Scheda elaborazione dati per l'Esperto Qualificato

La *Scheda elaborazione dati* è di pertinenza dell'Esperto Qualificato. Essa è costituita di due parti:

- i. una descrittiva: in cui è esposta la modalità di elaborazione dei dati con le relative formule;
- ii. una riassuntiva: in cui sono riportati i dati numerici, risultato delle elaborazione dei dati forniti dalla *Scheda di misura per il tecnico della radioprotezione operativa*, e i livelli di riferimento per la tecnica di misura considerata.

Nella sorveglianza fisica può essere utile elaborare i dati relativi alle ispezioni periodiche successive per verificare che non vi siano sostanziali variazioni; in un grafico con i valori delle date in ascissa e in ordinata le misure elaborate per ogni singolo punto si può verificare la costanza dei dati e dell'approccio di misura nel tempo [9].

Nell'esempio allegato si considera il laboratorio già illustrato nell' Allegato 2.

I valori dei livelli di riferimento per l'equivalente di dose ambientale sono ottenuti applicando le formule specifiche introdotte nel capitolo 10 ed elaborate con un opportuno foglio di calcolo presentato nel dettaglio nell' Allegato 4.

Nel Rapporto di Misura sono sintetizzate tutte le informazioni relative alla metodica di misura impiegata e i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati:

- livelli di riferimento,
- posizione in cui è eseguita la singola misura,
- lettura osservata e tempo di acquisizione dati,
- limite inferiore e limite superiore dell'intervallo di confidenza,
- migliore stima del misurando e incertezza calcolata,
- un primo test di verifica per definire se il valore di dose calcolato è inferiore al livello di riferimento scelto,
- un secondo test di verifica, ancora più cautelativo, per valutare se il valore di dose cui si somma la sua incertezza è inferiore al livello di riferimento scelto.

L'Esperto Qualificato dovrebbe annotare commenti e indicazioni relative ad eventuali azioni di rimedio da compiere qualora i test riportino l'indicazione  $\widehat{H}^*(10) > L.R.$  oppure  $\widehat{H}^*(10) + u[\widehat{H}^*(10)] > L.R.$  .

**SCHEDA ELABORAZIONE DATI**
**Rif. Codice Scheda Misura: es.456**
**MODALITA' DI ELABORAZIONE DELLA MISURAZIONE DIRETTA**

Si considerano trascurabili le correzioni dovute alle variazioni delle condizioni ambientali (variazioni di temperatura e pressione).

La misura di fondo è acquisita nel medesimo ambiente con la sorgente di radiazione spenta.

L'elaborazione si basa sui valori ottenuti in integrazione o, per le acquisizioni in modalità rateo, sui valori medi calcolati a partire da tre misure ripetute nelle medesime condizioni.

I risultati numerici sono ottenuti dall'applicazione della norma ISO 11929, attraverso l'elaborazione dei dati acquisiti con un opportuno foglio di calcolo in cui sono inserite le seguenti formule.

**EQUIVALENTE DI DOSE AMBIENTALE ( $\mu\text{Sv/h}$ ):**

$$\dot{H}^*(10) = r_{Art}^{-1} \cdot (\dot{R} - \dot{R}_F)$$

Dove:

$\dot{R}$  = lettura osservata ( $\mu\text{Sv/h}$ ) -  $t_R$  tempo di integrazione dello strumento o tempo preimpostato per la misura

$\dot{R}_F$  = rateo di conteggio di fondo ( $\mu\text{Sv/h}$ ) -  $t_F$  tempo di integrazione dello strumento o tempo preimpostato per la misura di fondo -  $M_F$  misura di fondo integrata nel tempo di conteggio

$$r_{Art}^{-1} = C_F(\alpha', E') \cdot S(\alpha) \cdot S(E) \cdot k_{T,P}$$

$C_F$  = fattore di calibrazione per la specifica energia  $E'$  con angolo di incidenza  $\alpha'$

$S(\alpha)$  = risposta dello strumento nelle condizioni di misura per un dato angolo di incidenza  $\alpha$

$S(E)$  = risposta dello strumento nelle condizioni di misura ad una data energia  $E$

$$k_{T,P} = \frac{273,2+T}{273,2+T_0} \times \frac{p_0}{p} \text{ fattore correttivo per temperatura o pressione}$$

$T_0=20^\circ\text{C}$ ,  $p_0=101\text{kPa}$  e  $T$  e  $p$  sono la temperatura e pressione registrate durante la misura

**INCERTEZZA ( $\mu\text{Sv/h}$ ):**

$$u(\dot{H}^*(10)) = \sqrt{(r_{Art}^{-1})^2 [u^2(\dot{R}) + u^2(\dot{R}_F)] + \left[ \left( \frac{u(C_F)}{C_F} \right)^2 + \left( \frac{u(S(\alpha))}{S(\alpha)} \right)^2 + \left( \frac{u(S(E))}{S(E)} \right)^2 + \left( \frac{u(k_{T,P})}{k_{T,P}} \right)^2 \right] \cdot \dot{H}^*(10)^2}$$

**LIMITI CARATTERISTICI DELLA MISURA**
**Soglia di decisione ( $\mu\text{Sv/h}$ ):**

$$[\dot{H}^*(10)]^* = 1,645 \times \sqrt{\left( \frac{M_F}{t_R \cdot t_F} + \frac{M_F}{t_F^2} \right) \times (r_{Art}^{-1})^2}$$

**Limite di rivelabilità ( $\mu\text{Sv/h}$ ):**

$$[\dot{H}^*(10)]^\#$$

$$= [\dot{H}^*(10)]^* + 1,645$$

$$\cdot \sqrt{(r_{Art}^{-1})^2 \left[ \frac{\dot{R}_F + \frac{2 \cdot [\dot{H}^*(10)]^\#}{(r_{Art}^{-1})}}{t_R} + \frac{M_F}{t_F^2} \right] + \left[ \left( \frac{u(C_F)}{C_F} \right)^2 + \left( \frac{u(S(\alpha))}{S(\alpha)} \right)^2 + \left( \frac{u(S(E))}{S(E)} \right)^2 + \left( \frac{u(k_{T,P})}{k_{T,P}} \right)^2 \right] \times [2 \cdot [\dot{H}^*(10)]^\#]^2}$$

calcolato attraverso un processo iterativo partendo dall'approssimazione

$$[\dot{H}^*(10)]^\# \approx 2 \cdot [\dot{H}^*(10)]^*$$

**INTERVALLO DI CONFIDENZA**


$$\dot{H}^*(10)^< = \dot{H}^*(10) - k_p u[\dot{H}^*(10)] \quad \text{e} \quad \dot{H}^*(10)^> = \dot{H}^*(10) + k_q u[\dot{H}^*(10)]$$

Con  $\gamma$  pari al 5% e quindi  $p = \omega \times 0,975$ ,  $q = 1 - \omega \times 0,025$ , e

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\dot{H}^*(10)/u[\dot{H}^*(10)]} \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right) dv$$

**Migliore stima del misurando**

$$\widehat{H}^*(10) = \dot{H}^*(10) + \frac{u[\dot{H}^*(10)]}{\omega \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{ \frac{-\dot{H}^*(10)^2}{2 \cdot u^2[\dot{H}^*(10)]} \right\};$$

	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag. di</b> 39 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------------

$$u[\widehat{H}^*(10)] = \sqrt{u^2[\dot{H}^*(10)] - (\widehat{H}^*(10) - \dot{H}^*(10)) \cdot \widehat{H}^*(10)}$$

**N° Schede Rapporto di misura allegate: es.1**

**RAPPORTO DI MISURA**

**N° = es.1**

**Radionuclide o Energia di riferimento** 137-Cs

**Misura di Fondo (in ambiente in assenza di sorgenti di radiazioni ionizzanti)**

$t_F$ (s)	$\dot{R}_F$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	$u(\dot{R}_F)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
8	0,12	0,02

**Soglia di decisione**

$\alpha=$ 0,05	$k_{1-\alpha}=$ 1,645
$[\hat{H}^*(10)]^*$ ( $\mu\text{Sv/h}$ ) =0,05	

**Limite di rivelabilità**

$\beta=$ 0,05	$k_{1-\beta}=$ 1,645
$[\hat{H}^*(10)]^\#$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )=0,10	

**Livello di riferimento**

L.R. 1 ( $\mu\text{Sv/h}$ )=	0,15	Verifica del metodo =	OK
L.R. 2 ( $\mu\text{Sv/h}$ )=	0,50	Verifica del metodo =	OK

Punti di misura	$t_R$ (s)	$\dot{R}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	$\hat{H}^*(10)^<$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	$\hat{H}^*(10)^>$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	$\widehat{H}^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	$u[\widehat{H}^*(10)]$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Verifica 1 L.R.2	Verifica 2 L.R.2
P1	8	0,13	-	-	<H#	-	ok	ok
P2	8	0,28	0,04	0,37	0,20	0,08	ok	ok
P3	8	0,60	0,14	1,08	0,60	0,24	$H^\wedge > \text{L.R.2}$	$H^\wedge + u(H^\wedge) > \text{L.R.2}$
P4	8	0,14	-	-	<H#	-	ok	ok
P5	8	0,22	0,02	0,24	0,13	0,06	ok	$H^\wedge + u(H^\wedge) > \text{L.R.1}$
P6	8	0,17	0,01	0,14	0,07	0,04	ok	ok
P7	8	0,22	0,02	0,24	0,13	0,06	ok	$H^\wedge + u(H^\wedge) > \text{L.R.1}$
P8	8	0,21	0,02	0,21	0,11	0,05	ok	$H^\wedge + u(H^\wedge) > \text{L.R.1}$

**Note Conclusive:**

- Le misure eseguite nei punti P1, P2, P3 e P4 fanno riferimento ad un'area sorvegliata e quindi tali valori sono confrontati con valori di riferimento adeguati alla classificazione del locale (se si considera il limite inferiore di 1 mSv/anno si può derivare un livello di riferimento L.R.2 =0.50  $\mu\text{Sv/h}$ ). In tali condizioni i test di verifica sono superati per i punti P1, P2 e P4.
- Il punto P3 è in corrispondenza dell'interruzione di schermatura necessario per il passaggio dei cavi dalla sala controllo alla sala bunker. Il punto non è accessibile fisicamente da nessun operatore, il controllo è eseguito con la sola strumentazione posizionata in prossimità del passaggio cavi. Quindi non sussistono rischi di sovraesposizione per il personale classificato che occupa la sala controllo, come verificato dai risultati numerici dei punti P1- P2 -P4.
- Le misure eseguite nei punti P5, P6, P7 e P8 sono confrontati con il livello di riferimento per l'area libera (se si considera il limite inferiore di 0.3mSv/anno si può derivare un livello di riferimento L.R.2 =0.15  $\mu\text{Sv/h}$ ). Il test di verifica 1 è sempre superato. Ciò non è vero per il test di verifica 2 più restrittivo. Si precisa che le aree non classificate in prossimità del bunker sono un corridoio ed una scala e quindi se si considera il fattore di occupazione 1/4 per tali aree di transito si può essere certi del rispetto dei livelli di riferimento.

**DATA:**
**Esperto Qualificato:**

## Allegato 4. Esempio di stima di $H^*(10)$ da radiazione gamma e beta emettitori

### a) Valutazione del metodo di misura

Per poter eseguire una buona misura la metodica impiegata (che include lo strumento di misura, i parametri di funzionamento e la modalità di esecuzione) deve garantire che il limite di rivelabilità sia inferiore al livello di riferimento. E' opportuno ricordare che è essenziale impostare correttamente la scala di acquisizione dello strumento e calcolare il limite di rivelabilità della tecnica di misura impiegata.

Si rimanda all'Allegato 7 della "Misura della contaminazione superficiale con metodi diretti" per una migliore comprensione dell'applicazione della norma ISO 11929 [27], in cui sono anche rappresentate schematicamente le operazioni da compiere per l'esecuzione della misura di contaminazione con metodo diretto. La stessa metodologia si applica ad ogni tipologia di misura.


Nella Tabella 9 sono riassunti tutti i dati necessari alla stesura del rapporto di misura; per ogni punto di campionamento con  $\hat{R} > \hat{R}_F$ , si considera un valore di equivalente di dose ambientale diverso da zero per ogni valore superiore a  $[\hat{H}^*(10)]^*$ , caso in cui la grandezza misurata non si considera generata dagli effetti delle fluttuazioni del fondo, ma si associa ad un effetto fisico presente.

Dati acquisiti ed elaborati				Esito del rapporto di misura	
$\hat{R} > \hat{R}_F$	$[\hat{H}^*(10)]^*$ ( $\alpha=0,05$ )	$[\hat{H}^*(10)]^\#$ ( $\beta=0,05$ )	L.R.	Risultato	Note
NO	-	-	-	N.D. <sup>2</sup> $\alpha, [\hat{H}^*(10)]^*, \beta, [\hat{H}^*(10)]^\#, L.R.$	Effetto fisico non presente
SI	$\hat{H}^*(10) < [\hat{H}^*(10)]^*$	$\hat{H}^*(10) < [\hat{H}^*(10)]^\#$	$\hat{H}^*(10) < L.R.$	$\hat{H}^*(10) < [\hat{H}^*(10)]^\#$ $\alpha, [\hat{H}^*(10)]^*, \beta, [\hat{H}^*(10)]^\#, L.R.$	
SI	$\hat{H}^*(10) > [\hat{H}^*(10)]^*$	$\hat{H}^*(10) < [\hat{H}^*(10)]^\#$	$\hat{H}^*(10) < L.R.$	$\widehat{H}^*(10) \pm u[\widehat{H}^*(10)]$ $\alpha, [\hat{H}^*(10)]^*, \beta, [\hat{H}^*(10)]^\#, L.R.,$ $\hat{H}^*(10)^\ominus, \hat{H}^*(10)^\triangleright$	Effetto fisico presente con il rispetto del livello di riferimento
		$\hat{H}^*(10) > [\hat{H}^*(10)]^\#$	$\hat{H}^*(10) < L.R.$	$\widehat{H}^*(10) \pm u[\widehat{H}^*(10)]$ $\alpha, [\hat{H}^*(10)]^*, \beta, [\hat{H}^*(10)]^\#, L.R.,$ $\hat{H}^*(10)^\ominus, \hat{H}^*(10)^\triangleright$	Effetto fisico presente con il rispetto del livello di riferimento
			$\hat{H}^*(10) > L.R.$	$\widehat{H}^*(10) \pm u[\widehat{H}^*(10)]$ $\alpha, [\hat{H}^*(10)]^*, \beta, [\hat{H}^*(10)]^\#, L.R.,$ $\hat{H}^*(10)^\ominus, \hat{H}^*(10)^\triangleright$	Effetto fisico presente con il superamento del livello di riferimento

Tabella 9 Riassunto dei dati necessari per la documentazione da associare alla misura.

<sup>2</sup> N.D.: valore non definibile.



	<b>Istituto di Radioprotezione</b>	<b>Sigla di identificazione</b> IRP-P000-009	<b>Rev.</b> 0	<b>Distrib.</b> L	<b>Pag.</b> 42	<b>di</b> 45
---	------------------------------------	---	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

## b) Esempio numerico e foglio di calcolo

Per meglio spiegare l'applicazione delle formule introdotte nella procedura si analizzerà in questo paragrafo un esempio pratico di misura dell'equivalente di dose ambientale.

In un laboratorio in cui sia presente un tubo a raggi X (250kV, 15mA) si devono eseguire misure di equivalente di dose ambientale per controlli periodici con uno strumento Automess Dose Rate Meter 6150 ADb-H. Lo scopo dei controlli periodici è verificare che la schermatura del bunker sia adeguata e non vi siano malfunzionamenti o anomalie.

Generalmente simili misure danno ratei confrontabili con i valori di fondo ambientale; nell'eventualità in cui si osservi un valore del rateo di dose alto è opportuno indagare sulle cause e identificare la possibile interruzione nella schermatura.

Si precisa che quando un fascio a raggi X è schermato l'energia media della radiazione è maggiore rispetto a quella teorica (tipicamente il 30% dell'energia massima di picco), ed è valida l'ipotesi che l'energia media del fascio sia prossima all'energia massima [11].

Nell'esempio riportato si considerano due livelli di riferimento, uno per i punti di misura in aree libere L.R.1 e uno per i punti di misura in aree classificate L.R.2., rispettivamente pari a  $0.15\mu\text{Sv/h}$  e  $0.5\mu\text{Sv/h}$  (vedi paragrafo 12).

Inoltre, il valore di  $C_F$  e la relativa variabilità sono desunti dal certificato di taratura dello strumento; la variabilità massima della risposta angolare (40%) è ricavata dai dati forniti dal costruttore nei type test e riportato nel manuale dello strumento; la variabilità massima (posta pari al 10%) della risposta strumentale alla radiazione con energia del  $^{137}\text{Cs}$  (pari a 0.85) è stata desunta ipotizzando una distribuzione rettangolare dei valori di  $S(E)$  tra minimo e massimo riportati nel manuale dello strumento. Si è trascurato il coefficiente correttivo per temperatura e pressione.

Si devono definire le modalità di esecuzione della misura nel laboratorio in oggetto per garantire la radioprotezione: tempo di misura del fondo e tempo di misura per ogni singolo punto di campionamento.

Nell'esempio presentato si utilizza un foglio di calcolo che impiega tutte le formule presentate nei paragrafi 6.4, 8, 10 e 11 e le applica per una misura di equivalente di dose ambientale.

I campi bianchi con caratteri azzurri indicano i dati che devono essere inseriti nel file dall'utilizzatore.

I dati di input per definire la campagna di misura sono:

Dati campagna di misura					
Sito		Edificio PP, piano interrato			
Caratteristiche dello strumento					
Nome dello strumento		Dose Rate Meter 6150 Adb-H			
Scheda Strumento di riferimento		es n°345			
Radionuclide o Energia di	137-Cs	L.R. 1 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		0,15	
		L.R. 2 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		0,50	
	$C_F$	$S(\alpha)$	$S(E)$	$k_{T,P}$	$1/r_{Art}$
	1,05	1,00	0,85	1	1,24
	$u(C_F)$	$u(S(\alpha))$	$u(S(E))$	$u(k_{T,P})$	
	0,03	0,40	0,09	0	
	$u^2(C_F)/C_F^2$	$u^2(S(\alpha))/S(\alpha)^2$	$u^2(S(E))/S(E)^2$	$u^2(k_{T,P})/k_{T,P}^2$	
	0,0009	0,16	0,01	0,000	
Misura di Fondo (in ambiente in assenza di sorgenti di radiazioni ionizzanti)					
$t_F(s)$	$\dot{R}_F (\mu\text{Sv/h})$	$M_F(\mu\text{Sv})$	$u(\dot{R}_F) (\mu\text{Sv/h})$		
8	0,12	0,016	0,016		
Tempo di integrazione delle singole misure					
$t_R(s)$					
8					

Si verifica la bontà del metodo di misura:

<b>Soglia di decisione</b>		
$\tilde{u}(0) (\mu\text{Sv/h})$		0,028
$[\dot{H}^*(10)]^* (\mu\text{Sv/h})$		<b>0,045</b>
<b>Limite di rivelabilità</b>		
ipot. Iniz $[\dot{H}^*(10)]^\#$		0,091
1° iterazione		0,097
2° iterazione		0,098
3° iterazione		0,098
4° iterazione		0,098
5° iterazione		0,098
$[\dot{H}^*(10)]^\# (\mu\text{Sv/h})$		<b>0,098</b>
<b>Verifica della bontà del metodo</b>		
L.R. 1 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		<b>OK</b>
L.R. 2 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		<b>OK</b>

Dai valori ottenuti per  $[\dot{H}^*(10)]^\#$  si deduce che il processo iterativo può fermarsi a 3 iterazioni (le variazioni successive sono trascurabili ai fini del calcolo).

Con i parametri scelti, che hanno garantito il rispetto dei livelli di riferimento, si sono eseguite 8 misure in 8 punti di campionamento prescelti.

I dati acquisiti sono quindi elaborati applicando le equazioni Eq. 1 e Eq. 2:

Elaborazione dei dati				
Punti di misura	$\dot{R}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	$\dot{H}^*(10)$	$\dot{H}^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	$u(\dot{H}^*(10))$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
P1	0,13	0,00865	<H#	-
P2	0,28	0,19394	0,194	0,088
P3	0,60	0,59294	0,593	0,250
P4	0,14	0,02224	<H#	-
P5	0,22	0,12353	0,124	0,061
P6	0,17	0,06300	0,063	0,040
P7	0,22	0,12353	0,124	0,061
P8	0,21	0,10500	0,105	0,054
				-
				-
				-
				-

Segue la valutazione dell'intervallo di confidenza e della miglior stima dei misurandi:

	$\frac{\dot{H}^*(10)}{u(\dot{H}^*(10))}$	$\gamma$	$\omega$	p	q	$k_p$	$k_q$	Intervallo di confidenza		Migliore stima del misurando	
								$\dot{H}^*(10)^<$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	$\dot{H}^*(10)^>$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	$\hat{\dot{H}}^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	$u[\hat{\dot{H}}^*(10)]$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
P1	-	0,05	-	-	-	-	-	-	-	<H#	-
P2	2,21	0,05	0,99	0,96	0,98	1,77	1,97	0,04	0,37	0,20	0,08
P3	2,37	0,05	0,99	0,97	0,98	1,83	1,96	0,14	1,08	0,60	0,24
P4	-	0,05	-	-	-	-	-	-	-	<H#	-
P5	2,03	0,05	0,98	0,95	0,98	1,69	1,97	0,02	0,24	0,13	0,06
P6	1,57	0,05	0,94	0,92	0,98	1,40	1,99	0,01	0,14	0,07	0,04
P7	2,03	0,05	0,98	0,95	0,98	1,69	1,97	0,02	0,24	0,13	0,06
P8	1,94	0,05	0,97	0,95	0,98	1,64	1,97	0,02	0,21	0,11	0,05

Le operazioni di calcolo di concludono con la trascrizione in un report finale di tutti i parametri identificativi della misura in accordo con quanto riassunto nella Tabella 9.

Per mettere in evidenza eventuali risultati anomali sarebbe opportuno confrontare il livello di riferimento con la migliore stima del misurando, come previsto nella colonna "Verifica 1".

Infine è anche possibile confrontare il livello di riferimento con il valore ottenuto dalla somma della migliore stima del misurando con la sua incertezza (ipotizzando un fattore di

copertura  $k=1$ ), come impostato ad esempio nell'ultima colonna del report dati denominata "Verifica 2"

<b>Radionuclide o Energia di riferimento</b>		137-Cs							
<b>Misura di Fondo (in ambiente in assenza di sorgenti di radiazioni ionizzanti)</b>									
$t_F$	$\dot{R}_F$	$u(\dot{R}_F)$							
(s)	( $\mu\text{Sv/h}$ )	( $\mu\text{Sv/h}$ )							
8	0,12	0,02							
<b>Soglia di decisione</b>									
$\alpha=0,05$		$k_{1-\alpha}=1,645$							
		$[\dot{H}^*(10)]^*$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )= 0,05							
<b>Limite di rivelabilità</b>									
$\beta=0,05$		$k_{1-\beta}=1,645$							
		$[\dot{H}^*(10)]^*$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )= 0,10							
<b>Livello di riferimento</b>			LR.1 ( $\mu\text{Sv/h}$ )= 0,15			Verifica del metodo= OK			
			LR.2 ( $\mu\text{Sv/h}$ )= 0,50			Verifica del metodo= OK			
<b>Punti di misura</b>	$t_R$	$\dot{R}$	$\dot{H}^*(10)^<$	$\dot{H}^*(10)^>$	$\widetilde{H}^*(10)$	$u[\widetilde{H}^*(10)]$	<b>Verifica 1</b>	<b>Verifica 2</b>	
	(s)	( $\mu\text{Sv/h}$ )	( $\mu\text{Sv/h}$ )	( $\mu\text{Sv/h}$ )	( $\mu\text{Sv/h}$ )	( $\mu\text{Sv/h}$ )			
P1	8	0,13	-	-	<H#	-	ok	ok	
P2	8	0,28	0,04	0,37	0,20	0,08	ok	ok	
P3	8	0,60	0,14	1,08	0,60	0,24	$H^A > \text{LR.2}$	$H^A+u(H^A) > \text{LR.2}$	
P4	8	0,14	-	-	<H#	-	ok	ok	
P5	8	0,22	0,02	0,24	0,13	0,06	ok	$H^A+u(H^A) > \text{LR.1}$	
P6	8	0,17	0,01	0,14	0,07	0,04	ok	ok	
P7	8	0,22	0,02	0,24	0,13	0,06	ok	$H^A+u(H^A) > \text{LR.1}$	
P8	8	0,21	0,02	0,21	0,11	0,05	ok	$H^A+u(H^A) > \text{LR.1}$	

### c) Considerazioni conclusive

Si conclude che una simile presentazione dei dati per le misure di equivalente di dose ambientale durante le campagne di misure per la verifica della sorveglianza ambientale consente di identificare con chiarezza i punti in cui i livelli di riferimento sono superati e attraverso una regolare archiviazione dei rapporti di misura si possono valutare eventuali variazioni, indipendentemente dalla strumentazione impiegata.

Si raccomanda di eseguire i calcoli considerando tutti i contributi all'equivalente di dose ambientale; qualora fossero presenti anche sorgenti neutroniche si può fare una valutazione separata per la radiazione beta-gamma e per la radiazione neutronica, utilizzando gli appositi fogli di calcolo opportunamente corretti. Non si deve trascurare l'effetto cumulativo dei contributi dei singoli campi di radiazione e il valore totale deve essere confrontato con i livelli di riferimento per la grandezza in esame.

Ogni dato numerico che supera i livelli di riferimento dovrebbe essere commentato e opportunamente valutato dall'Esperto Qualificato.