



COMITATO NAZIONALE PER LA RICERCA
E PER LO SVILUPPO DELL'ENERGIA NUCLEARE
E DELLE ENERGIE ALTERNATIVE

AREA ENERGIA, AMBIENTE E SALUTE

**MISURA «IN CAMPO» DELLA
CONCENTRAZIONE DI
RADIOEMETTITORI GAMMA
NEL TERRENO**

S. BORTOLUZZI, M. MONTALTO, M. NOCENTE,
R. GIACOMELLI, P. SPEZZANO



COMITATO NAZIONALE PER LA RICERCA
E PER LO SVILUPPO DELL'ENERGIA NUCLEARE
E DELLE ENERGIE ALTERNATIVE

AREA ENERGIA, AMBIENTE E SALUTE

MISURA «IN CAMPO» DELLA CONCENTRAZIONE DI RADIOEMETTITORI GAMMA NEL TERRENO

S. BORTOLUZZI, M. MONTALTO, M. NOCENTE
R. GIACOMELLI, P. SPEZZANO

ENEA - Area Energia, Ambiente e Salute -
Centro Ricerche Energia Saluggia, Vercelli

Testo pervenuto nel luglio 1990

*si ringraziano tutte le persone di questo laboratorio,
che hanno consentito con il loro lavoro alla definizione,
realizzazione e stesura finale di questo rapporto*

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA
rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'ente.

Summary: we are going to show you how to proceed for a rapid measurement in the field of the radionuclides gamma activities in soil, with the right calibration factors.

This methodology is useful for simple and quickly gamma-analysis in environmental study or during nuclear emergency situation.

Comparision from the "in situ" and laboratory measures are reported to provide an accurate methodology valuation.

Riassunto: presentiamo, in questo lavoro, come procedere per operare una rapida misura in campo dell'attività dei radionuclidi gamma emettitori nel suolo, utilizzando i corretti fattori di calibrazione.

Questa tecnica consente una rapida e veloce analisi gamma del terreno per studi ambientali, o in casi di situazioni di emergenza nucleare.

E' riportata infine una comparazione tra misure su terreni utilizzando sia la tecnica in oggetto che le tradizionali procedure di campionamento ed analisi in laboratorio.

INTRODUZIONE

La tecnica di determinazione dei radionuclidi presenti nel terreno mediante spettrometria gamma in campo non è nuova . Sviluppata dall'Health and Safety Laboratory (HASL) prima per rivelatori a scintillazione NaI(Tl), in seguito per rivelatori a stato solido del tipo a Ge(Li). Nei lavori a cura di Beck(1) venivano esemplificate le problematiche e le azioni connesse con l'uso del sistema.

La misura in campo della radioattività presente nel terreno consente di evitare la raccolta di campioni e le successive operazioni di trattamento degli stessi. I vantaggi pratici risiedono nella migliore sensibilità, rappresentatività della misura e per certe situazioni (vedasi casi di rilasci accidentali o situazioni di emergenza), la possibilità di disporre in tempi brevi di stime della deposizione al suolo con un grado di accuratezza migliore di quella esibita da altri metodi.

La crescente disponibilità sul mercato di strumentazione all'avanguardia, consente di ottimizzare e di potenziare le prestazioni del metodo:

- rivelatori iperpuri al Ge di tipo p od n con caratteristiche di efficienza, risoluzione e rapporto Compton sempre più vantaggiose;

- dewar e sistemi di rifornimento dell'azoto liquido di raffreddamento di migliori capacità e caratteristiche;

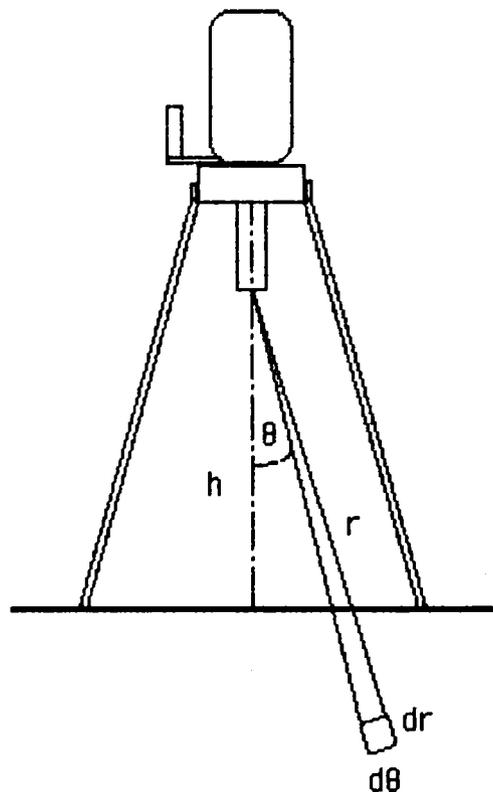
- multicanali portatili alimentati a batterie, completi di elettronica, visori a cristalli liquidi, con caratteristiche analoghe a quelli usati nei laboratori;

- elaboratori (microcomputer "lap top") con potenzialità in grado di supportare i normali "package" presenti sul mercato per l'analisi gamma e eventualmente modem per l'invio degli spettri e/o dei risultati ai laboratori.

DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

Per correlare i dati ottenuti dallo spettro con la concentrazione di un dato radionuclide nel terreno, si opera con una combinazione di metodi sperimentali e teorici. Si considera la geometria del campo come semi-infinita, eliminando problemi di assorbimento ed orografia locale, l'area di un picco in uno spettro ottenuto dalla misura in campo, rappresenta una frazione dell'integrale del flusso di radiazione gamma incidente, durante il tempo di acquisizione, sul rivelatore. Il flusso dipende infine dalla particolare distribuzione del radionuclide gamma emettitore nel terreno, questa si assume essere legata in maniera esponenziale con la profondità, mentre è costante lungo la superficie. In figura 1 riportiamo lo rappresentazione schematica, con le grandezze considerate e i gradi di libertà del sistema.

fig.1



Con riferimento alla figura n°1 indichiamo con:

- $\frac{N_0}{\phi}$ intensità di gamma raccolti dal rivelatore per unità di flusso di energia E incidente parallelamente all'asse di simmetria del rivelatore;
- $\frac{N_f}{N_0}$ fattore correttivo per l'anisotropia della risposta del rivelatore al variare dell'angolo θ di incidenza del flusso di fotoni;
- $\frac{\phi}{A}$ il flusso γ incidente sul rivelatore emesso per unità di concentrazione di attività di un particolare radionuclide nel terreno;

inoltre possiamo esprimere $\frac{N_f}{A}$ con l'equazione [1] dal Beck (1):

$$[1] \quad \frac{N_f}{A} = \frac{N_0}{\phi} \cdot \frac{N_f}{N_0} \cdot \frac{\phi}{A}$$

La prima grandezza è costituita dal rapporto tra l'area di un picco gamma di energia E espressa nell'unità di tempo e il relativo flusso gamma incidente parallelamente all'asse principale del rivelatore. Detta grandezza descrive la risposta del rivelatore al campo di radiazione gamma, questa grandezza dipende dall'energia della radiazione incidente e dalle caratteristiche del rivelatore.

La seconda grandezza corregge la risposta del rivelatore al campo di radiazione gamma per il flusso che incide non ortogonalmente alla superficie del rivelatore. Posto $\frac{N(\theta)}{N_0}$ uguale al rapporto tra la risposta del rivelatore a fotoni di energia E incidenti con un angolo θ rispetto a quelli incidenti ortogonalmente al rivelatore ($\theta=0^\circ$), scriveremo:

$$[2] \quad \frac{N_f}{N_0} = \frac{1}{\phi} \int_0^{\pi/2} \phi(\theta) \frac{N(\theta)}{N_0} d\theta$$

Eccettuando per la radiazione gamma a bassa energia (<150 keV), il rapporto $\frac{N(\theta)}{N_0}$ e di conseguenza $\frac{N_f}{N_0}$ si mantiene su valori prossimi all'unità, piccole differenze sono da attribuirsi principalmente alla struttura portante del rivelatore e alla presenza del sistema di raffreddamento e di preamplificazione.

In ultimo consideriamo la relazione riportata sempre dal Beck (1), considerando la concentrazione dei radionuclidi nel terreno con un profilo esponenziale lungo la verticale. Il flusso totale di radiazione gamma di energia E ad una altezza h dal suolo :

$$[3] \quad \phi(r, \theta) = 2\pi \int_0^{\pi/2} \int_{h/\cos\theta}^{\infty} \frac{S_0}{4\pi r^2} e^{[-(\alpha/\rho)\rho z]r^2 + [-\mu_s(r-h/\cos\theta)] + (-\mu_a h/\cos\theta)} \sin\theta \, dr \, d\theta$$

dove indichiamo con:

h	altezza dell'interfaccia rivelatore-superficie (fig. 1)
S ₀	concentrazione del radionuclide (Bq/kg)
α	coefficiente di distribuzione lineare (m ⁻¹)
ρ	densità del suolo (kg/m ³)
z	profondità verticale dell'elemento di terreno (fig. 1)
μ _s	coefficiente lineare di assorbimento del suolo (m ⁻¹)
μ _a	coefficiente lineare di assorbimento dell'aria (m ⁻¹)

integrando rispetto ad r la [3] otteniamo:

$$[4] \quad \phi(\cos\theta) = \int_0^1 \frac{\alpha SA}{2\rho} \left[\frac{1}{\alpha/\rho \cos\theta + \mu_s/\rho} \right] e^{-t/\cos\theta} d\cos\theta$$

t distanza espressa in termini di libero cammino medio in aria

SA attività superficiale del terreno (Bq/m^2)

Il valore del flusso dipende dal coefficiente α che indica la distribuzione verticale del radionuclide nel terreno.

Per $\alpha \Rightarrow \infty$ la distribuzione sarà superficiale, tipicamente il caso di un deposito di fall-out fresco. Invece se $\alpha=0$ si avrà il caso di una distribuzione omogenea del radionuclide nel terreno (i radionuclidi naturali). Per qualunque valore di α la soluzione dell'integrale [4] dovrà essere approssimata con metodi di calcolo numerici.

EQUIPAGGIAMENTO E PROCEDIMENTO IN CAMPO

Nel nostro caso abbiamo utilizzato per le prove un rivelatore portatile Ge iperpuro di tipo n con finestra di berillio, dewar portatile con un'autonomia di 24 ore, sonda di spegnimento automatico dell'alta tensione in caso di mancanza di azoto liquido. Nella tabella 1 sono riportate le caratteristiche del rivelatore utilizzato.

Tabella n°1

Diametro cristallo (mm)	54,3
Lunghezza cristallo (mm)	52,9
Tensione operativa (Volt)	-4000
Efficienza relativa (%)	28
Rapporto picco-Compton	53,8
FWHM-1333 keV- (keV)	1,89
FWHM-5,9 keV- (keV)	0,648

Il rivelatore è stato posizionato su un treppiede regolabile, opportunamente modificato per consentirne la regolazione dell'altezza dal suolo del rivelatore e il corretto posizionamento rispetto al piano orizzontale. Completa la strumentazione un multicanale portatile alimentato a batterie, con memoria di 4096 canali, registratore a cassette e canale di I/O seriale. Infine si può integrare, la strumentazione citata, con un computer portatile "lap-top", o equivalente, in grado di memorizzare lo spettro e procedere all'analisi in tempo reale (appendice A).

In base alle assunzioni fatte nella formulazione del modello, il rivelatore dovrà essere posizionato su tratti di terreno relativamente liberi e pianeggianti. Sono da evitare zone disturbate da edifici od altre costruzioni, zone di fitta vegetazione, o non propriamente piane. Inoltre nel caso si debbano intraprendere studi sulla deposizione dei radionuclidi di fall-out, il terreno in studio non deve essere stato soggetto ad alcuna attività umana, che abbia alterato l'opera di dilavamento od erosione dello stesso. In questo modo possiamo tranquillamente assumere una distribuzione verticale dei radionuclidi uniforme per i naturali ed esponenziale per quelli artificiali di fall-out.

La distanza rivelatore-suolo nelle nostre prove è stata fissata a circa 1 metro, in tal modo l'area utile è da considerarsi di circa 10 metri per una profondità, variabile a seconda dell'energia dei gamma incidenti, di 15-30 cm (2), il Beck riporta i valori in appendice B

I tempi di acquisizione variano a seconda della particolare applicazione, normalmente un intervallo di tempo dell'ordine della ventina di minuti può consentire di individuare i radionuclidi più abbondanti (Cs^{137} , Cs^{134} , Bi^{214} , ...), mentre tempi più lunghi possono consentire l'individuazione di radionuclidi meno abbondanti o emissioni particolari.

Gli spettri ottenuti sono stati analizzati in laboratorio con il sistema di analisi SILGAMMA su elaboratore microVax II. Per il trasferimento dal multicanale portatile all'elaboratore e la codifica degli spettri è stato elaborato all'uopo un software in grado di rendere compatibili i dati acquisiti con il codice di calcolo. Questo ci ha consentito di avere una valutazione ottimale delle aree dei picchi statisticamente rilevabili e relativi errori. La fase successiva di calcolo delle attività per unità dimensionale è svolto mediante un opportuno programma, che utilizza le curve di calibrazione, di correzione e di calcolo del flusso in base alla distribuzione verticale scelta.

CALIBRAZIONE DEL SISTEMA

La valutazione di $\frac{N_0}{\phi}$ in funzione dell'energia dei gamma incidenti sul rivelatore è stata effettuata in maniera sperimentale. A tale scopo si sono utilizzate sorgenti gamma puntiformi di attività nota, con emissioni gamma distribuite lungo il "range" di energia tra 0-2 MeV (3).

Tabella n°2

Radionuclide	attività (kBq)
Am ²⁴¹	43,7
Ba ¹³³	20,9
Cs ¹³⁷	35,0
Co ⁶⁰	10,4

Il rivelatore è stato posto in una camera schermata, onde ridurre sullo spettro il contributo della radiazione di fondo ambientale, in condizioni identiche a quelle che poi sono state utilizzate per le misure in campo. Le sorgenti sono state poste ad una distanza di 1 metro, in modo che il flusso che incide sul rivelatore sia approssimativamente parallelo all'asse principale dello stesso. Lo schema sperimentale rispetta l'assunzione teorica della grandezza $\frac{N_0}{\phi}$.

Mediante le aree di ciascun fotopicco ottenuto negli spettri e dal flusso gamma relativo, calcolato a partire dall'attività della sorgente utilizzata, corretto per la frazione assorbita in aria, si può calcolare l'andamento di $\frac{N_0}{\phi}$ in funzione dell'energia della radiazione gamma (tabella 3).

Tabella n°3

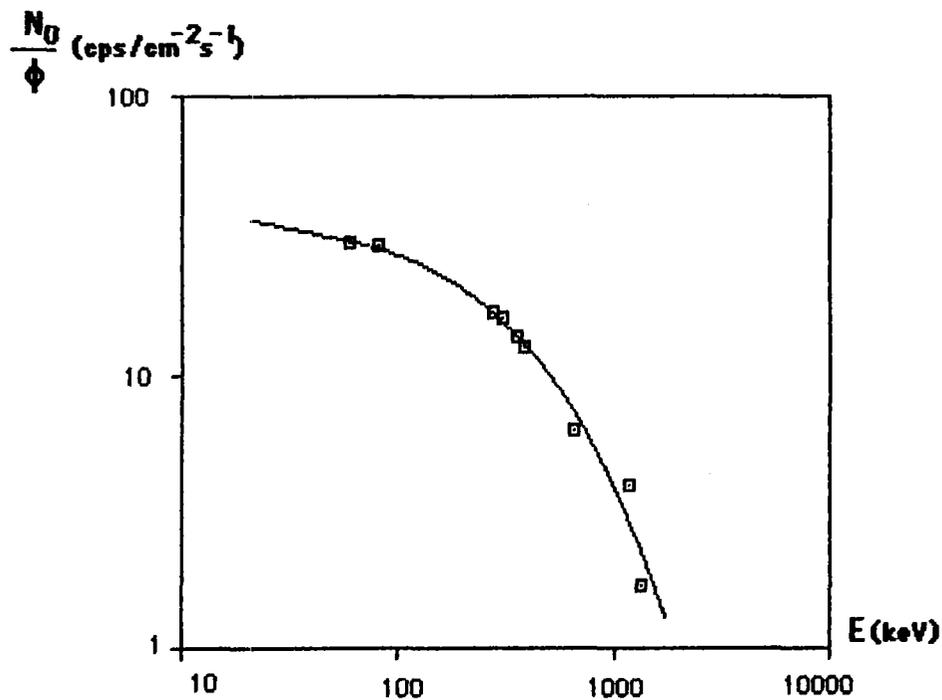
Energia (keV)	flusso (cm ⁻² s ⁻¹)	errore (cm ⁻² s ⁻¹)	efficienza (cps/cm ⁻² s ⁻¹)	errore (cps/cm ⁻² s ⁻¹)
60	1,21E-01	3,96E-03	2,95E+01	1,00E+00
81	5,60E-02	2,56E-03	2,91E+01	1,40E+00
276	1,17E-02	5,34E-04	1,68E+01	1,08E+00
303	2,99E-02	1,37E-03	1,60E+01	8,43E-01
356	1,02E-01	4,66E-03	1,37E+01	6,58E-01
384	1,48E-02	6,78E-04	1,26E+01	7,74E-01
662	2,34E-01	9,18E-03	6,28E+00	2,61E-01
1173	8,18E-02	2,08E-03	3,95E+00	1,56E-01
1332	8,20E-02	2,09E-03	1,71E+00	8,92E-02

I valori di $\frac{N_0}{\phi}$ ed energia sono stati correlati, col metodo dei minimi quadrati, utilizzando una funzione del tipo:

$$[5] \quad \frac{N_0}{\phi} = e \sum_{n=0}^3 a_n \ln(E)^n$$

l'andamento della funzione in relazione ai punti calcolati è visualizzato in fig. n°2, gli scarti si riferiscono agli errori statistici delle misure e dell'attività delle sorgenti con un livello di confidenza del 95%, non sono inclusi gli errori sistematici connessi al metodo seguito.

figura n°2



$$\{R = 0,99\} \quad \frac{N_0}{\phi} = 10^{2,8518 - 2,2073 \cdot \log(E) + 1,2793 \cdot \log(E)^2 - 0,2656 \cdot \log(E)^3}$$

Per stimare più velocemente i valori di risposta del rivelatore si può riferirsi al lavoro della Helfer(2), nel quale sono stati correlate le risposte di più rivelatori portatili con il parametro di efficienza relativa tabulato per ciascun germanio.

Sempre dallo stesso lavoro si possono ricavare i valori correttivi di $\frac{N_f}{N_0}$ anisotropia della risposta del rivelatore in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione. Tali valori sono tabulati in funzione, del rapporto tra lunghezza e diametro del cristallo di germanio del rivelatore, dell'energia dei gamma considerati (appendice C). Dai valori riportati in tabella possiamo rilevare la scarsa incidenza del parametro sul risultato finale in relazione alle approssimazioni connesse con la metodologia, in base a queste considerazioni si è deciso di utilizzare i valori riportati ed evitare di procedere ad una valutazione sperimentale del coefficiente di correzione.

DISCUSSIONE

Nel metodo proposto si devono valutare la dipendenza della stima effettuata con la scelta dei parametri nell'equazione [4] e il grado di accuratezza che viene richiesto al valore. Sul risultato finale peseranno la dipendenza dalla composizione chimica del suolo per la determinazione di μ_s , la maggior aderenza possibile delle caratteristiche del punto di misura alle condizioni che stanno alla base della formulazione del modello.

In generale un oculata pianificazione e valutazione delle caratteristiche del punto di misura in rapporto alla bontà dei risultati che si vogliono conseguire consente l'ottimizzazione del metodo.

Convieni però considerare, che se l'assunzione di una distribuzione omogenea per i radionuclidi naturali, o superficiale per una deposizione

recente di fall-out, dà in generale risultati soddisfacenti, per la valutazione di deposizioni ad opera di eventi passati (Chernobyl), i risultati sono affetti dalla determinazione del profilo di distribuzione verticale dei radionuclidi nel terreno. Sfortunatamente non è possibile stimare α in maniera dipendente ad uno dei parametri usati. Variando l'altezza del rivelatore dal suolo non si hanno incrementi significativi tra le diverse distribuzioni, ne è possibile per confronto tra le diverse emissioni di un radionuclide o di uno che si comporta in maniera simile, usando per esempio il Cs^{134} per la valutazione del Cs^{137} , abbiamo per una distribuzione $\alpha/\rho=0,21 \text{ cm}^2/\text{gr}$ il rapporto dei valori di $\frac{\phi}{A}$ tra le emissioni a 662 keV e 1365 keV è di 0,82, mentre per $\alpha/\rho=6,25 \text{ cm}^2/\text{gr}$ abbiamo un rapporto di 0,89. Questo è il vero limite del metodo, che ci costringe, qualora sia richiesta un buon grado di precisione, a condurre una campagna di misure indipendente, prelevando carote di terreno da sezionare, che verranno in seguito analizzate in laboratorio per la determinazione del parametro α .

Il raffronto tra valori ottenuti con il metodo riportato e la raccolta tradizionale dei campioni di terreno ed analisi in laboratorio, oppure per raffronto con l'intensità di dose di una camera ad ionizzazione, è già stata ampiamente verificata(5), non rilevando, in genere, scarti superiori al 10 %.

Per controllare la bontà delle calibrazioni effettuate, abbiamo provveduto ad operare una serie di comparazioni tra i due metodi. Sono stati scelti dei terreni non lavorati che rispondessero ai requisiti citati, si è provveduto ad una o più acquisizioni ed in seguito al prelievo di quattro o cinque campioni superficiali di terreno in un intorno di raggio di 10 metri dal punto di misura. I campioni raccolti sono stati analizzati in maniera classica, cioè: essiccazione ed omogenizzazione del terreno, misura gamma su contenitore di Marinelli non sigillato, per impedire il formarsi

dell'equilibrio tra i radionuclidi delle serie naturali, determinazione delle concentrazioni dei radionuclidi.

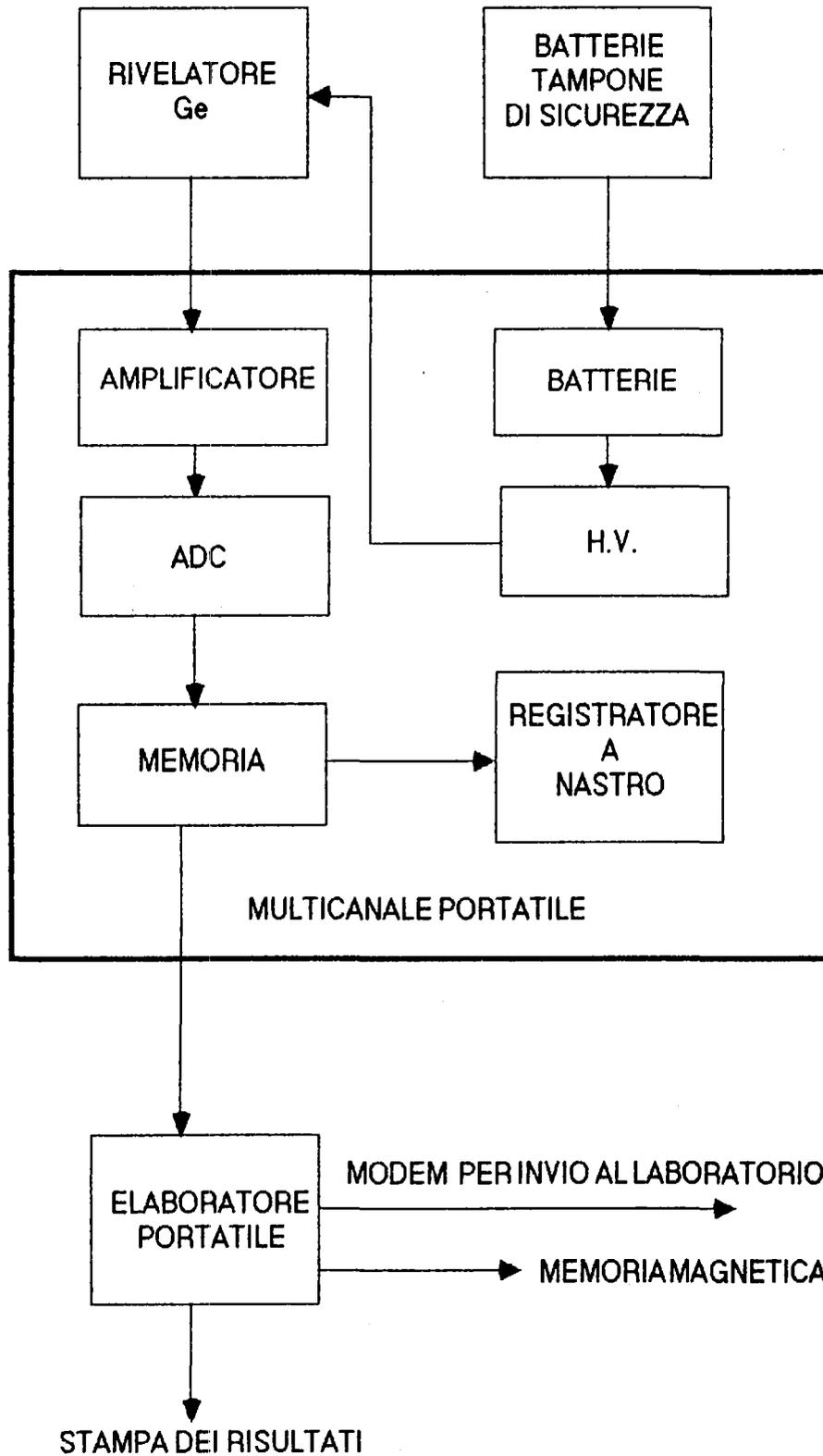
I risultati sono raffrontati in appendice D.

CONCLUSIONI

In conclusione, la tecnica di spettrometria in campo consente ad un laboratorio di sorveglianza o di ricerca di avere una metodologia valida e sufficientemente accurata, per la valutazione immediata dell'attività depositata nell'ambiente. Di particolare utilità diventa in situazioni di emergenza, laddove viene richiesta una risposta rapida sull'entità della deposizione al suolo. In questa particolare situazione la strumentazione fornisce a parità di tempo un'informazione più completa e dettagliata delle usuali procedure.

Di particolare interesse può essere l'applicazione in campagne di controllo o mappatura di aree geografiche di particolare interesse. In tale direzione si sta muovendo il nostro laboratorio per una campagna per lo studio dell'erosione e del dilavamento del cesio nel bacino imbrifero di un lago.

APPENDICE A Schema a blocchi della strumentazione utilizzata



APPENDICE B Percentuale del flusso incidente ad angoli minori di θ

θ' ($^\circ$)	r (m)	145 keV			662 keV			1460 keV		
		0	0,21	∞	0	0,21	∞	0	0,21	∞
90	∞	100	100	100	100	100	100	100	100	100
84	9,95	93	89	62	92	85	53	92	83	51
79	4,90	84	76	45	82	70	39	82	67	36
73	3,18	73	64	34	72	58	30	72	54	27
66	2,29	63	52	26	62	46	23	61	43	21
60	1,73	53	42	20	52	37	17	52	33	16
53	1,33	43	32	15	41	28	13	41	25	11
46	1,02	32	23	10	31	20	9	31	18	8
37	0,75	21	15	6	21	13	6	21	11	5
26	0,48	11	7	3	10	6	3	10	5	2

[†] angolo di incidenza definito come in figura n°1

APPENDICE C Fattore di correzione angolare $\frac{N_f}{N_0}$

E (MeV)	rapporto lunghezza - diametro del cristallo								
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
0,3 [†]	0,81	0,82	0,83	0,86	0,91	0,99	1,08	1,18	1,31
0,3 ^{††}	0,80	0,80	0,81	0,83	0,88	0,97	1,07	1,19	1,35
0,5	0,84	0,85	0,85	0,88	0,93	0,99	1,06	1,14	1,25
	0,82	0,82	0,83	0,85	0,90	0,97	1,06	1,16	1,29
0,7	0,86	0,86	0,87	0,90	0,93	0,98	1,05	1,12	1,21
	0,83	0,84	0,85	0,87	0,91	0,97	1,05	1,14	1,25
1,0	0,88	0,88	0,89	0,91	0,94	0,98	1,03	1,10	1,18
	0,85	0,85	0,86	0,88	0,92	0,97	1,04	1,12	1,22
1,5	0,91	0,91	0,91	0,92	0,94	0,97	1,02	1,07	1,13
	0,86	0,87	0,88	0,90	0,93	0,97	1,03	1,10	1,17
2,0	0,92	0,92	0,93	0,93	0,94	0,96	1,00	1,05	1,10
	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,97	1,02	1,08	1,14

[†] distribuzione uniforme del radionuclide ($\alpha/\rho = 0$)

^{††} distribuzione superficiale del radionuclide ($\alpha/\rho = \infty$)

APPENDICE D Raffronto tra misure su terreni con le due metodologie

Terreno Saluggia (VC)

Nuclide	misura tradizionale (Bq/kg [†] -m ^{2''})	misura in campo (Bq/kg [†] -m ^{2''})	α/p (cm ² /gr)	trad/camp*
Pb ²¹²	3,63E+01 ± 5,47E+00	2,79E+01 ± 2,22E+00	0	0,8
Pb ²¹⁴	2,86E+01 ± 3,41E+00	2,13E+01 ± 1,89E+00	0	0,7
Tl ²⁰⁸	1,19E+01 ± 1,40E+00	9,95E+00 ± 8,68E-01	0	0,8
Bi ²¹⁴	2,87E+01 ± 3,32E+00	2,37E+01 ± 1,94E+00	0	0,8
Cs ¹³⁷	1,08E+04 ± 3,25E+03	1,07E+04 ± 7,18E+02	0,312	1,0
Cs ¹³⁴	1,83E+03 ± 4,72E+02	1,56E+03 ± 1,13E+02	0,625	0,9
Ac ²²⁸	3,40E+01 ± 4,71E+00	3,80E+01 ± 3,38E+00	0	1,1
K ⁴⁰	4,76E+02 ± 7,87E+01	6,67E+02 ± 4,76E+01	0	1,4

Terreno Viverone(VC)

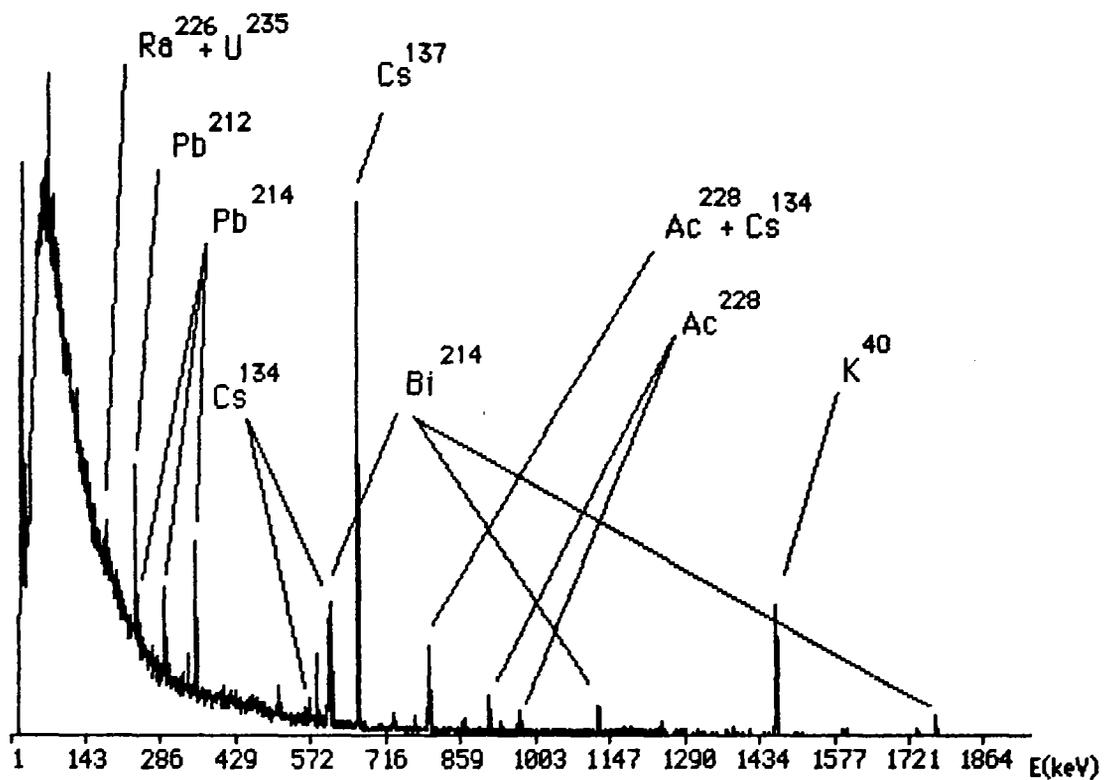
Nuclide	misura tradizionale (Bq/kg [†] -m ^{2''})	misura in campo (Bq/kg [†] -m ^{2''})	α/p (cm ² /gr)	trad/camp*
Pb ²¹²	3,69E+01 ± 1,82E+00	2,42E+01 ± 1,36E+00	0	0,7
Pb ²¹⁴	2,73E+01 ± 1,96E+00	3,07E+01 ± 1,57E+00	0	1,1
Tl ²⁰⁸	1,19E+01 ± 4,49E-01	8,39E+00 ± 6,07E-01	0	0,7
Bi ²¹⁴	2,72E+01 ± 1,73E+00	1,27E+01 ± 1,47E+00	0	0,5
Cs ¹³⁷	4,62E+03 ± 4,98E+02	4,88E+03 ± 1,01E+02	0,625	1,1
Cs ¹³⁴	6,42E+02 ± 1,02E+02	7,75E+02 ± 4,02E+01	0,625	1,2
Ac ²²⁸	3,30E+01 ± 1,24E+00	2,93E+01 ± 2,31E+00	0	0,9
K ⁴⁰	3,68E+02 ± 7,57E+01	4,92E+02 ± 1,81E+01	0	1,3

† attività espresse in Bq/kg per i radionuclidi "naturali"

'' attività espresse in Bq/m² per i radionuclidi di fall-out: Cs¹³⁷ e Cs¹³⁴

* rapporto tra le attività determinate in maniera tradizionale e con la misura in campo

APPENDICE E Esempio di spettro acquisito con la tecnica descritta



BIBLIOGRAFIA

- (1) H.L. Beck et al.- *In situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry*- HASL 258 (1972)
- (2) I.K. Helfer K.M. Miller - *Calibration factors for Ge detectors used for field spectrometry*- Health Physics vol.55 pp. 15-29 (1988)
- (3) K. Yoshihara, H. Kudo, T. Sekine - *Periodic table with nuclides and reference data*- Springer-Verlag (1985)
- (4) G. Erdtmann, W. Soyka - *The gamma rays of the radionuclides*- Verlag Chemie (1979)
- (5) L.Bramati, C.Maffei, G. Pandolfi - *In situ gamma ray spectrometry in accidental situations: potentiality and limitations*- International Symposium on Environmental Contamination following a Major Nuclear Accident. IAEA-SM-306/23P

Edito a cura dell'ENEA, Direzione Centrale Relazioni.
Viale Regina Margherita, 125 - Roma
Finito di stampare nel mese di maggio 1991

Fotoriproduzione e stampa
a cura delle Arti Grafiche S. Marcello - Viale R. Margherita, 176

Questo fascicolo è stato stampato su carta riciclata