



Impiego della spettrometria gamma in campo per la stima della deposizione e della concentrazione dei radionuclidi nel suolo: valutazione critica dei fattori ambientali che influenzano maggiormente i risultati

M. Marga, S. Bertino, M. Ghione e M. Magnoni

Spettrometria Gamma in campo: Incertezza

$$C = \frac{N_p}{t \cdot r \cdot \varepsilon}$$

- C = Attività (Bq/Kg)
- N_p = Conteggi (area netta sul picco)
- t = tempo di conteggio (s)
- ε = efficienza di conteggio per unità di massa [cps/(Bq·kg⁻¹)]
- r = resa gamma

Spettrometria Gamma in campo: Incertezza

$$\varepsilon = \frac{N_f}{A} = \frac{N_0}{\Phi} \cdot \frac{\Phi}{A} \cdot \frac{N_f}{N_0}$$

- N_0/Φ Efficienza intrinseca del rivelatore, calcolata in sede di taratura, è il rateo di conteggi di picco per unità di flusso non diffuso, espresso di solito in cps/fotoni/s·cm²
- Φ/A Parametro che mette in relazione il flusso di fotoni non diffusi che arrivano al rivelatore da un particolare radionuclide con la concentrazione di attività di quest'ultimo nel terreno, espresso, per radionuclidi distribuiti uniformemente nel terreno in (fotoni/s·cm²)/(Bq/kg)
- N_f/N_0 Fattore di correzione angolare, adimensionale, tiene conto della risposta angolare del rivelatore (=1)

Incertezza sull'efficienza intrinseca

$$N_0 / \Phi$$

- ❖ Banco ottico
- ❖ Sorgenti puntiformi di ^{60}Co , ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu
(da 59 keV a 1408 keV) di nota attività a_s
- ❖ Misure di 4 ore



Incertezza sull'efficienza intrinseca

N_0 / Φ

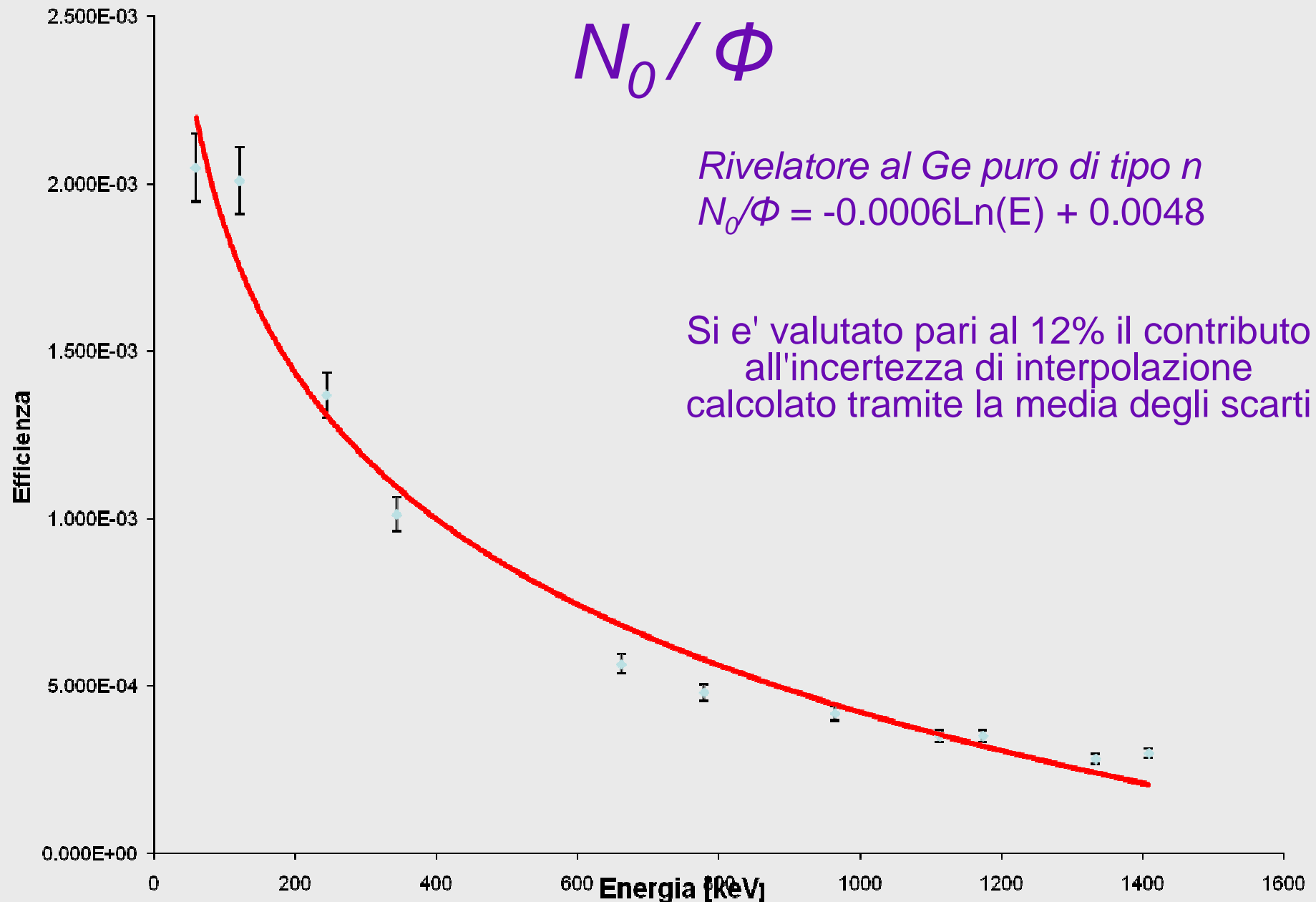
l'incertezza complessiva sui singoli termini N_0 / Φ
è quasi del tutto determinata
dall'incertezza sul flusso $\Phi = a_s / 4\pi r^2$
cioè in ultima analisi dall'incertezza sull'attività a_s
delle sorgenti di taratura
che conservativamente abbiamo assunto pari
al 5%

Incertezza sull'efficienza intrinseca

$$N_0 / \Phi$$

Rivelatore al Ge puro di tipo n
 $N_0 / \Phi = -0.0006 \ln(E) + 0.0048$

Si e' valutato pari al 12% il contributo
all'incerteza di interpolazione
calcolato tramite la media degli scarti



Incertezza su Φ/A

L'andamento del flusso non diffuso di un determinato radionuclide uniformemente distribuito nel terreno è descritto dalla seguente equazione:

$$\frac{\Phi}{A}(E) = \int_0^1 \frac{S_0}{2} \cdot \frac{e^{-\frac{(\mu/\rho)_a \cdot h \cdot \rho_a}{\omega}}}{(\mu/\rho)_s} d\omega$$

Dove

$\omega = \cos(\theta)$,

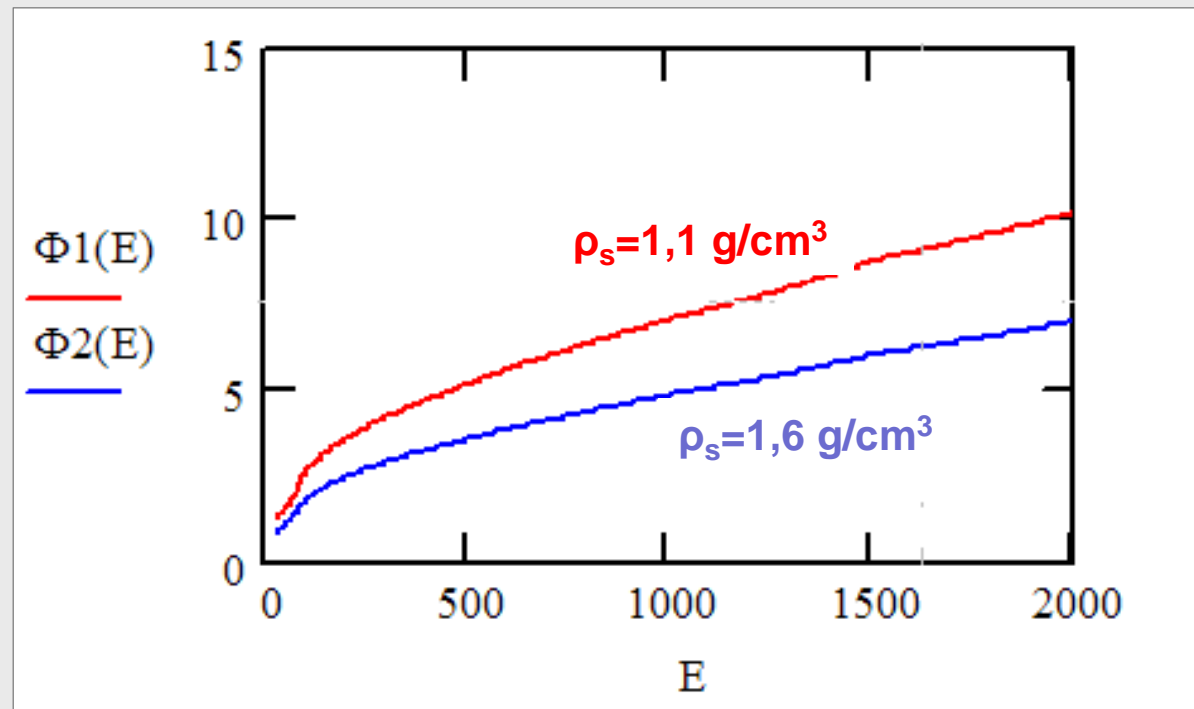
$\rho_{s,a}$ è la densità rispettivamente di suolo (s) e aria (a) [g/cm³]

$\mu_{s,a}$ è il coefficiente di attenuazione rispettivamente di suolo (s) e aria (a) [cm⁻¹]

S_0 è la concentrazione unitaria [fot/(s·g)]

Incertezza su Φ/A

la densità del suolo rappresenta un
fattore critico nel calcolo del flusso?



Incertezza su Φ/A

la mancata conoscenza a priori della densità del suolo introduce una fonte di incertezza!

Ipotizzando una distribuzione rettangolare di densità del terreno nell'intervallo da 1.1 a 1.6 g/cm³ si ottiene un'incertezza percentuale sul flusso $u(\Phi/A)$:

	$u(\Phi/A)$ %
Pb 212 (238 keV)	10.7
Pb 214 (352 keV)	10.7
Bi 214 (609 keV)	10.7
Ac 228 (911 keV)	10.7
K 40 (1461 keV)	10.7
Bi 214 (1764 keV)	10.7

Incertezza su ε

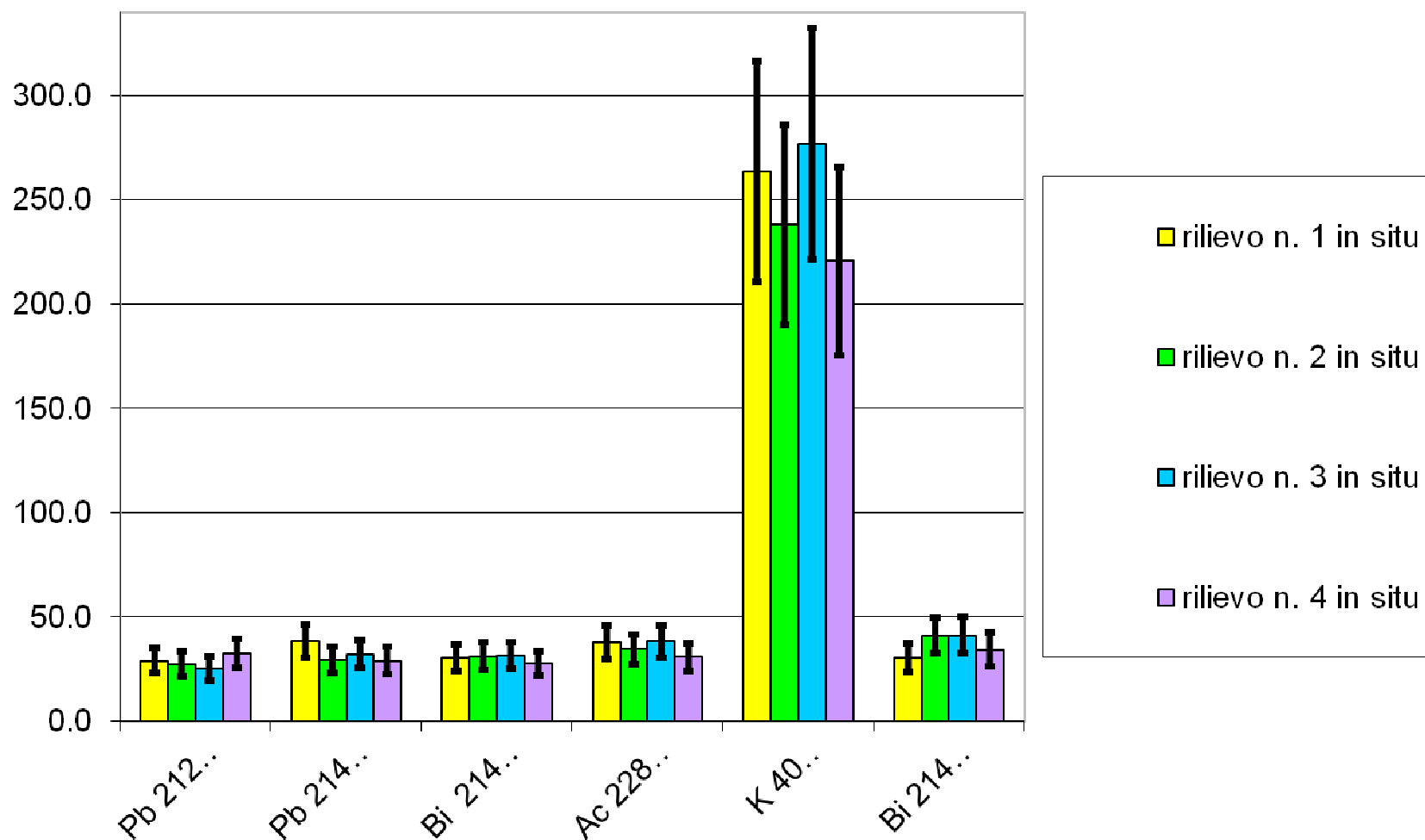
il calcolo dell'incertezza
dell'efficienza risulterà dalla
composizione, tramite
propagazione gaussiana,
delle incertezze sui fattori
 N_0/Φ e Φ/A

	$u(\varepsilon)$ (%)
Pb 212 (238 keV)	19.8
Pb 214 (352 keV)	19.8
Bi 214 (609 keV)	19.8
Ac 228 (911 keV)	19.8
K 40 (1461 keV)	19.8
Bi 214 (1764 keV)	19.8

Incertezza sulla concentrazione di attività

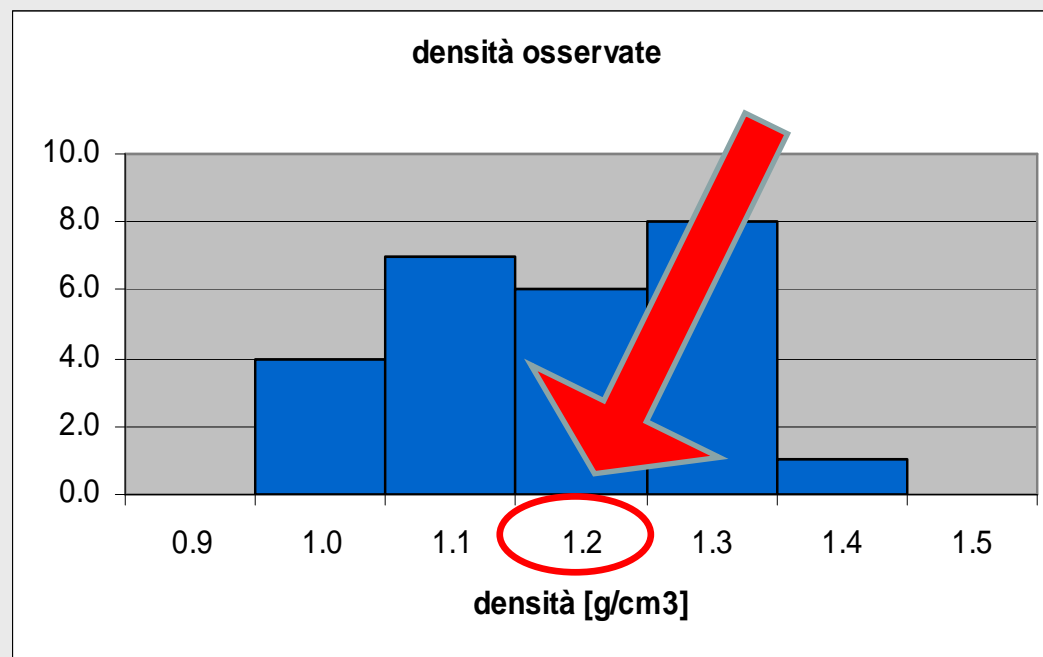
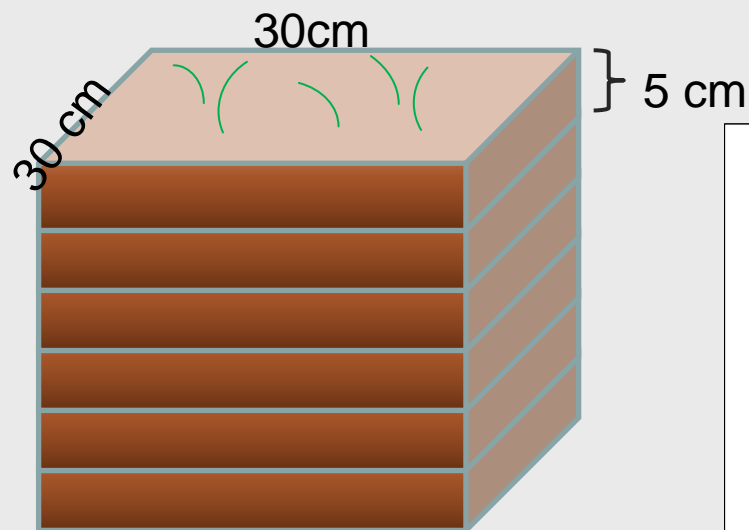
	rilievo n. 1 in situ			rilievo n. 2 in situ			rilievo n. 3 in situ			rilievo n. 4 in situ		
	C (Bq/kg)	u(C) (Bq/kg)	u(C) %	C (Bq/kg)	u(C) (Bq/kg)	u(C) %	C (Bq/kg)	u(C) (Bq/kg)	u(C) %	C (Bq/kg)	u(C) (Bq/kg)	u(C) %
Pb 212 (238 keV)	29.3	6.0	20.6	27.6	6.0	21.8	25.4	5.6	22.2	32.8	7.0	21.3
Pb 214 (352keV)	38.7	8.0	20.7	29.7	6.4	21.4	32.4	6.8	21.1	29.2	6.5	22.3
Bi 214 (609 keV)	30.7	6.3	20.6	31.4	6.5	20.6	31.6	6.5	20.6	28.0	6.0	21.4
Ac 228 (911 keV)	38.0	7.8	20.6	34.7	7.2	20.9	38.3	7.9	20.6	30.9	6.8	22.0
K 40 (1461 keV)	263.8	52.9	20.0	238.3	47.8	20.1	276.9	55.6	20.1	220.8	45.3	20.5
Bi 214 (1764 keV)	30.5	6.7	22.0	41.0	8.6	20.9	41.3	8.7	21.0	34.5	34.5	23.8

Incertezza sulla concentrazione di attività



Incertezza sulla concentrazione di attività – confronto con Spettrometria Gamma in Laboratorio

Sono stati effettuati quattro campionamenti in punti diversi della stessa area misurata in situ prelevando zolle di terreno di 30x30 cm² dello spessore di 5 cm a diverse profondità in modo da avere sei campioni stratificati fino ad una profondità di 30 cm.

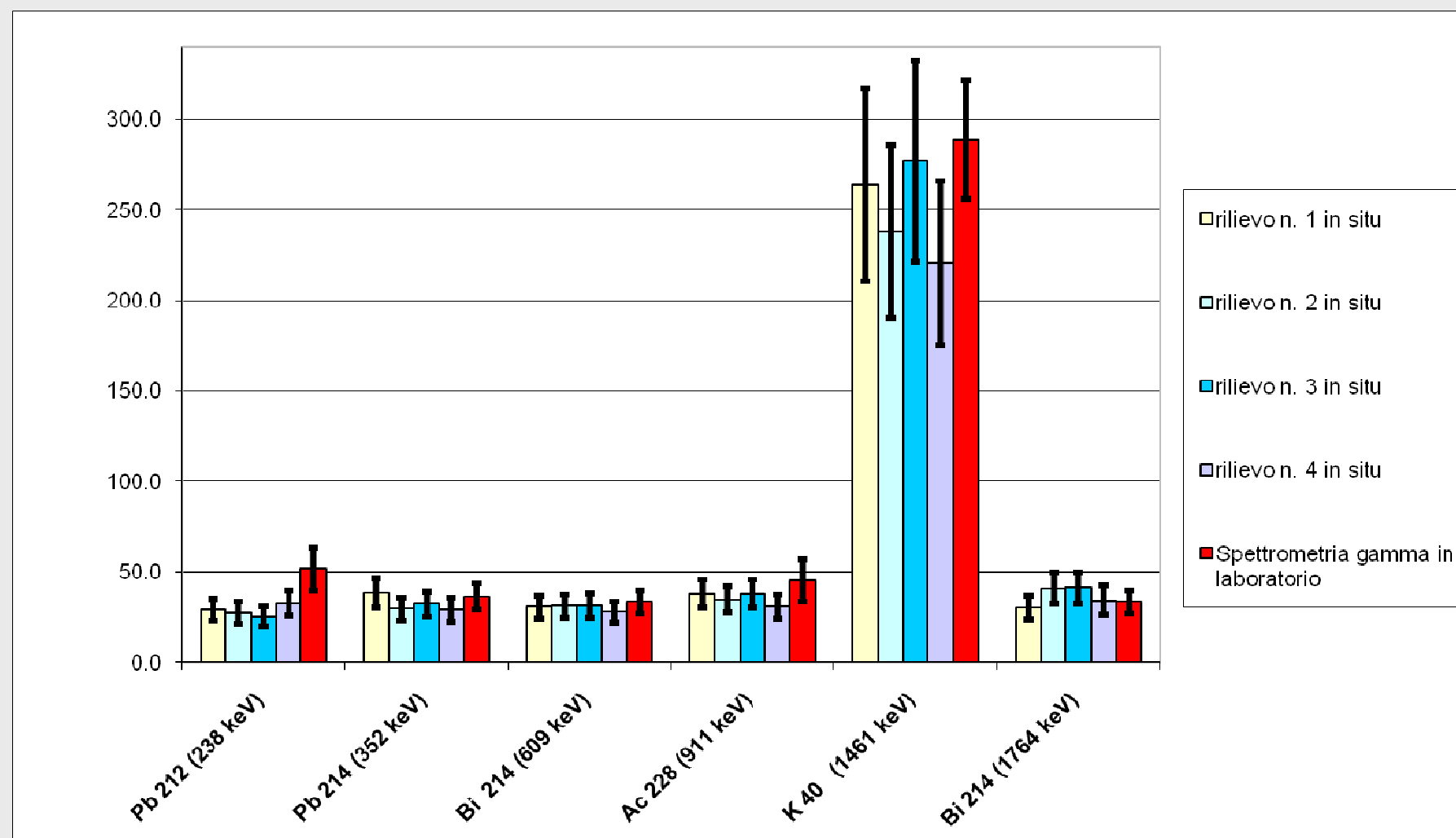


Incertezza sulla concentrazione di attività – confronto con Spettrometria Gamma in Laboratorio

	C [Bq/kg]	u(C) [Bq/kg]	u(C) %
Pb 212 (238 keV)	48.8	10.5	21.5
Pb 214 (352keV)	34.2	7.4	21.6
Bi 214 (609 keV)	31.9	7.2	22.6
Ac 228 (911 keV)	44.2	7.9	17.9
K 40 (1461 keV)	270.7	48.9	18.1
Bi 214 (1764 keV)	31.9	7.2	22.6

Il valore di
Concentrazione
di Attività è la
media dei 24
campioni e
l'incertezza è
calcolata come
deviazione
standard della
media

Incertezza sulla concentrazione di attività – confronto con Spettrometria Gamma in Laboratorio





20
AV
SWITZ

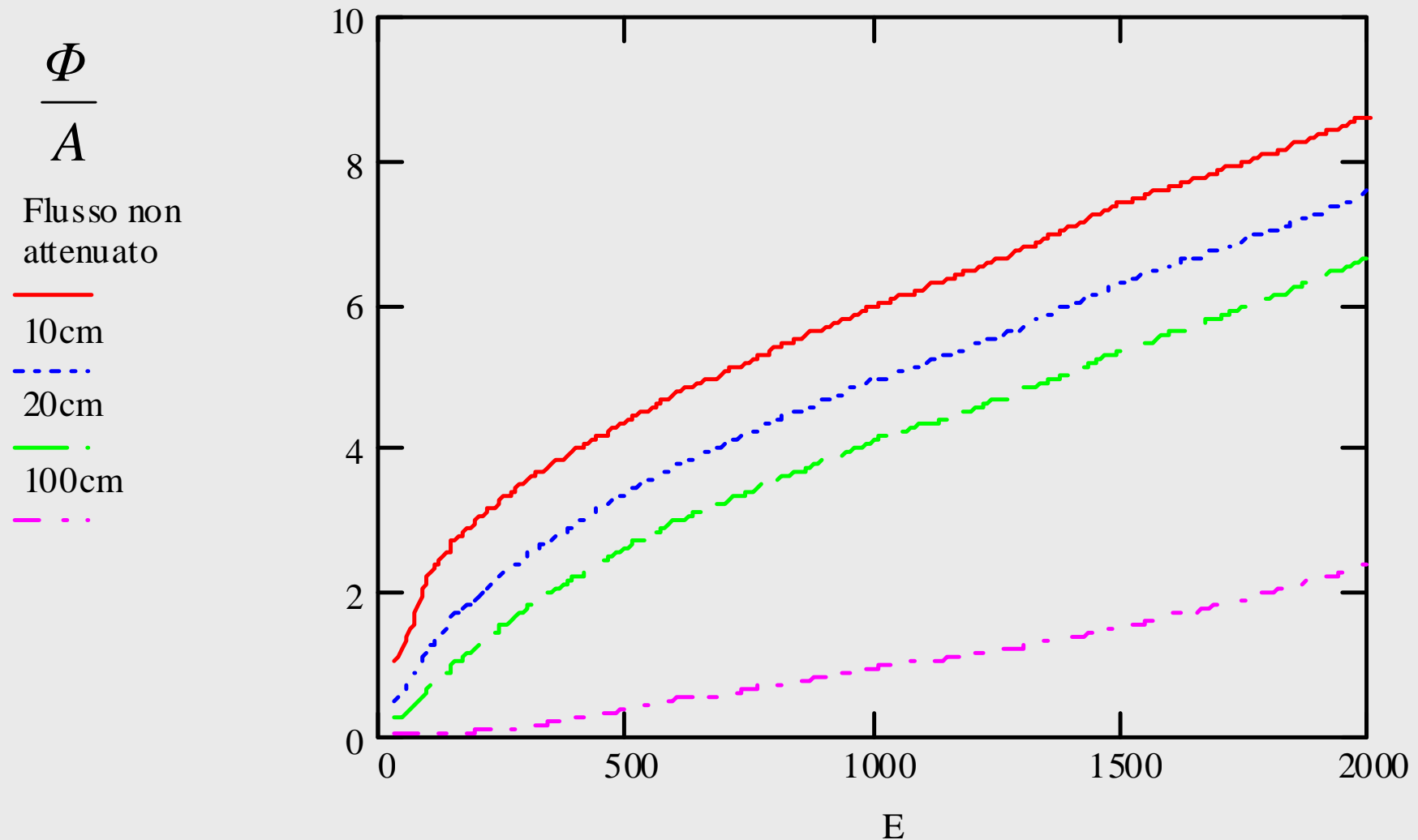


Calcolo dell'attenuazione dovuta ad uno strato di neve

L'andamento del flusso non diffuso di un determinato radionuclide uniformemente distribuito nel terreno ricoperto da uno spessore h_w di neve è descritto dalla seguente equazione

$$\frac{\Phi}{A}(E) = \int_0^1 \frac{\rho_s}{2} \cdot \frac{e^{-\frac{-(\mu/\rho)_a \cdot (h-h_w) \cdot \rho_a - (\mu/\rho)_w \cdot h_w \cdot \rho_w}{\omega}}}{(\mu/\rho)_s} d\omega$$

Calcolo dell'attenuazione dovuta ad uno strato di neve



Calcolo dell'attenuazione dovuta ad uno strato di neve



Si è calcolata l'incertezza su Φ/A non solo al variare della densità del terreno ma anche al variare della densità della neve, ipotizzando una distribuzione rettangolare tra $0.11 - 0.44 \text{ g/cm}^3$ di ρ_w .

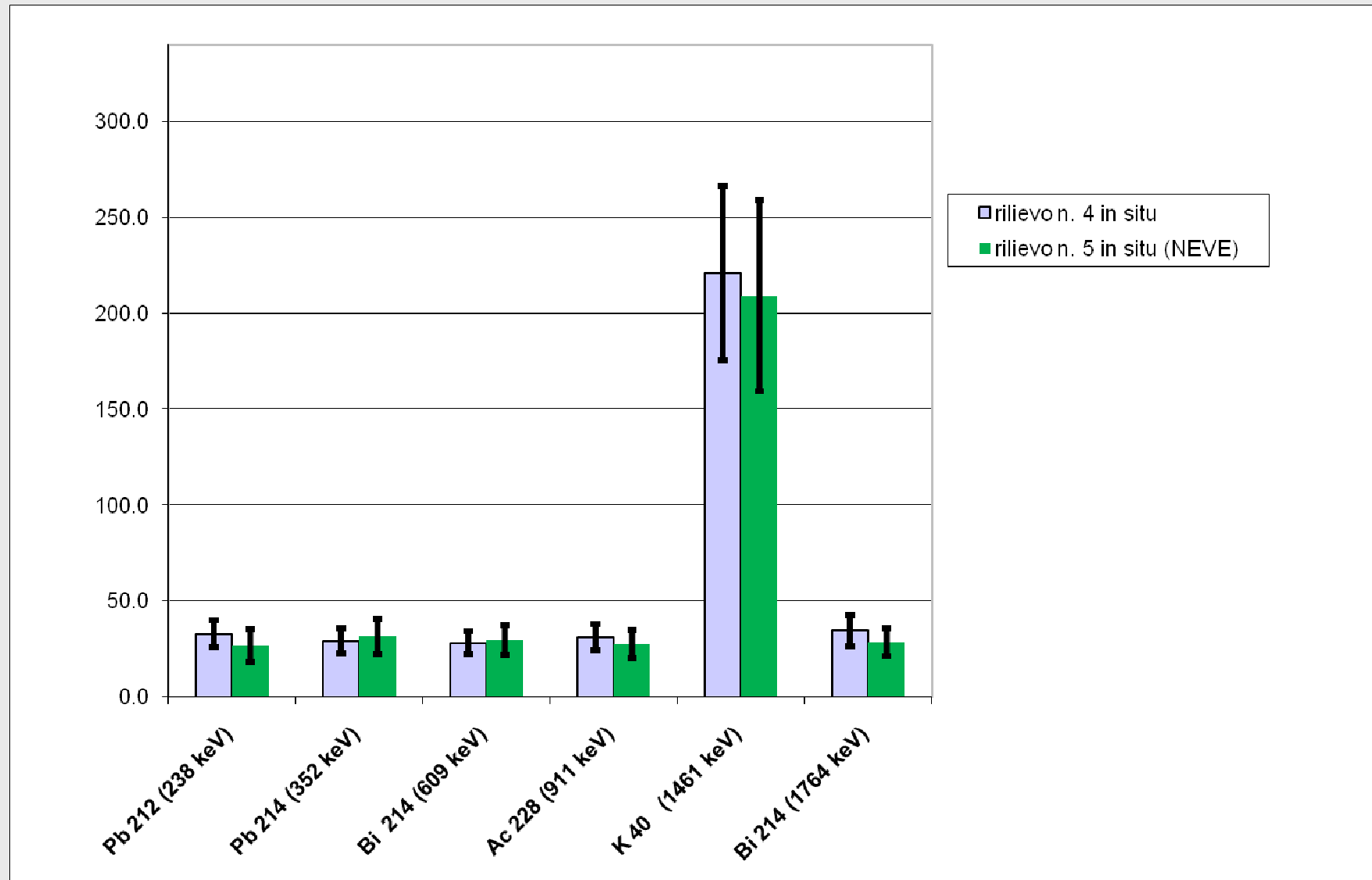
Calcolo dell'incertezza dovuta ad uno strato di neve

	Strato di 10 cm di neve $u(\Phi/A)$ %	Strato 20 cm di neve $u(\Phi/A)$ %	Incertezza legata alla densità del terreno $u(\Phi/A)$ %
Pb 212 (238 keV)	22.3	31.9	10.7
Pb 214 (352keV)	20.0	28.0	10.7
Bi 214 (609 keV)	17.6	23.8	10.7
Ac 228 (911 keV)	16.6	22.1	10.7
K 40 (1461 keV)	15.6	20.3	10.7
Bi 214 (1764 keV)	15.1	19.3	10.7

Calcolo dell'incertezza dovuta ad uno strato di neve - risultati

	rilievo n. 5 in situ (NEVE)			rilievo n. 4 in situ		
	Conc. di Attività (Bq/kg)	u(C) (Bq/kg)	u(C) %	Conc. di Attività (Bq/kg)	u(C) (Bq/kg)	u(C) %
Pb 212 (238 keV)	26.7	8.7	32.6	32.8	7	21.3
Pb 214 (352keV)	31.4	9.3	29.5	29.2	6.5	22.3
Bi 214 (609 keV)	29.4	7.7	26.1	28	6	21.4
Ac 228 (911 keV)	27.4	7.1	26.1	30.9	6.8	22
K 40 (1461 keV)	209	49.8	23.8	220.8	45.3	20.5
Bi 214 (1764 keV)	28.4	7.2	25.3	34.5	34.5	23.8

Confronto tra misure in situ con e senza neve



Conclusioni

L'utilizzo della spettrometria gamma in campo per il calcolo quantitativo porta risultati soddisfacenti con incertezze dell'ordine del 20-25% per tempi di acquisizione variabili tra i 1000'' e i 2500''.

Questo lavoro ha preso in considerazioni solo i radionuclidi naturali per i quali si suppone una distribuzione uniforme nel terreno.

Ulteriori studi valuteranno anche i radionuclidi artificiali, per i quali la distribuzione verticale come è noto non è uniforme nonché la presenza di eventuali disomogeneità per i radionuclidi naturali