



# **Misure di concentrazione alfa totale e beta totale nel particolato atmosferico in situazioni di emergenza**

**Porzio L., Albertone L.**

**Arpa Piemonte – Dipartimento Tematico Radiazioni  
Struttura Semplice Siti Nucleari,  
Via Trino 89, 13100 Vercelli (VC), [sitinucleari@arpa.piemonte.it](mailto:sitinucleari@arpa.piemonte.it)**

**Novara, 7 giugno 2012**



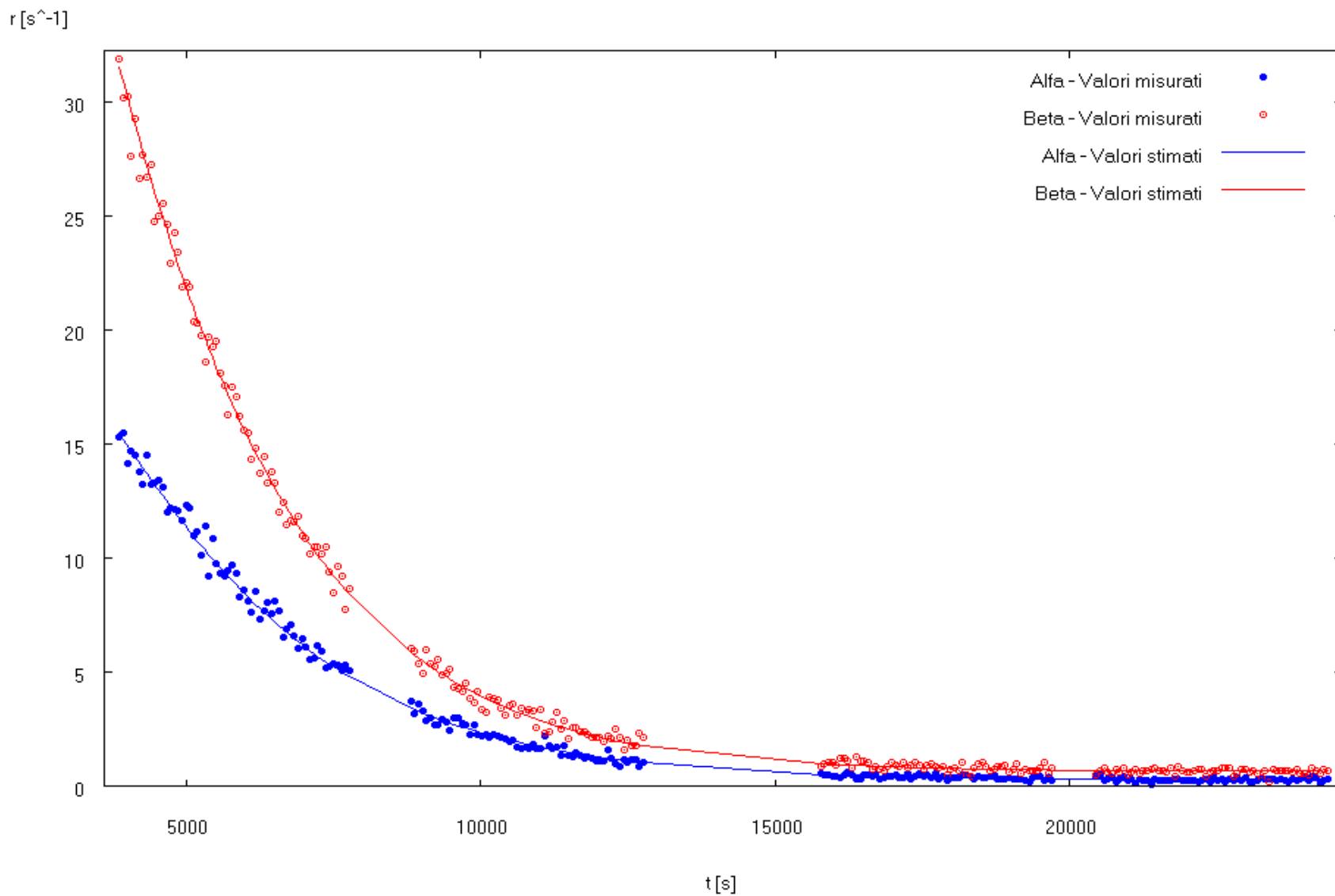
# **Perché concentrazioni alfa totale e beta totale nel particolato atmosferico?**

- Strumentazione necessaria non particolarmente complessa e facilmente disponibile in campo.
- Nella I fase – o fase iniziale – di un'emergenza radiologica o nucleare in generale non si ha un'informazione *a priori* della composizione isotopica della contaminazione.
- Sempre necessaria per conoscere la contaminazione totale del particolato atmosferico.
- Unica informazione disponibile nel caso di radionuclidi non facilmente rivelabili (Sr-90, Pu, U).



# Principali radionuclidi naturali a vita breve potenzialmente presenti in aria

Padre	$T_{1/2}$	BR	Figlio		Padre	$T_{1/2}$	BR	Figlio	
Rn-222	91,75 h	1	Po-218	$\alpha$	Rn-220	55,6 s	1	Po-216	$\alpha$
Po-218	183 s	0,9998 0,0002	Pb-214 At-218	$\alpha$ $\beta$	Po-216	0,150 s	1	Pb-212	$\alpha$
At-218	2 s	1	Bi-214	$\alpha$	Pb-212	10,639 h	1	Bi-212	$\beta$
Pb-214	26,8 m	1	Bi-214	$\beta$	Bi-212	60,55 m	0,3593 0,6407	Tl-208 Po-212	$\alpha$ $\beta$
Bi-214	19,9 m	0,0002 0,9998	Tl-210 Po-214	$\alpha$ $\beta$	Po-212	2,96E-07 s	1	Pb-208	$\alpha$
Po-214	1,64E-04 s	1	Pb-210	$\alpha$	Tl-208	186 s	1	Pb-208	$\beta$
Tl-210	79,2 s	1	Pb-210	$\beta$					





# Valori di riferimento per diversi tempi di esposizione

Radionuclide	Concentrazione integrata in aria Bq s/m <sup>3</sup>	T = 1 ora Bq/m <sup>3</sup>	T = 24 ore Bq/m <sup>3</sup>
Pu-239	2.4 10 <sup>5</sup>	6.7 10 <sup>1</sup>	2.8
Sr-90	1.4 10 <sup>8</sup>	3.9 10 <sup>4</sup>	1.6 10 <sup>3</sup>



# Principali radionuclidi naturali a vita breve potenzialmente presenti nel particolato atmosferico raccolto su filtro

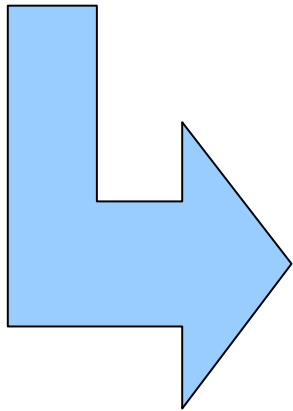
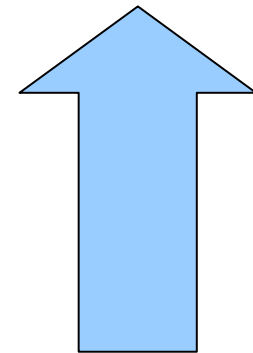
Padre	$T_{1/2}$	BR	Figlio	Padre	$T_{1/2}$	BR	Figlio
Po-218	183 s	1	Pb-214 $\alpha$	Pb-212	10,639 h	1	Bi-212 $\beta$
Pb-214	26,8 m	1	Bi-214 $\beta$	Bi-212	60,55 m	0,3593 0,6407	Tl-208 $\alpha$ Po-212 $\beta$
Bi-214	19,9 m	1	Po-214 $\beta$	Po-212	2,96E-07 s	1	Pb-208 $\alpha$
Po-214	1,64E-04 s	1	Pb-210 $\alpha$	Tl-208	186 s	1	Pb-208 $\beta$



# Attività su filtro durante l'aspirazione

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_i}{dt} = 0 \\ A_1 = 0 \\ \frac{dA_2}{dt} = -\lambda_2 A_2 + C_2 \varphi \\ \frac{dA_{i+2}}{dt} = -\lambda_{i+2} A_{i+2} + BR_{i+1 \rightarrow i+2} \lambda_{i+2} A_{i+1} + C_{i+2} \varphi \quad i = 1, 2, 3 \dots \\ A_i(0) = 0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_2 = C_2 \varphi \cdot a_{22}(t) \\ A_3 = C_2 \varphi \cdot a_{32}(t) + C_3 \varphi \cdot a_{33}(t) \\ A_4 = C_2 \varphi \cdot a_{42}(t) + C_3 \varphi \cdot a_{43}(t) + C_4 \varphi \cdot a_{44}(t) \end{array} \right.$$



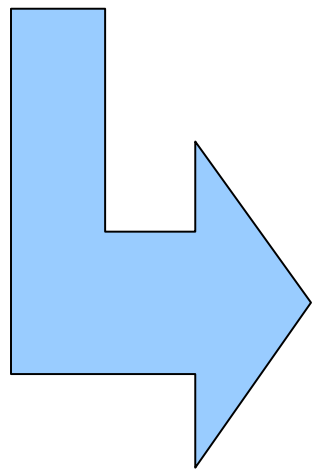
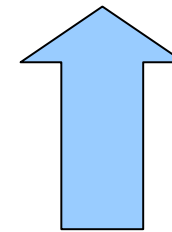
$$\left\{ \begin{array}{l} A_2 = \frac{C_2 \varphi}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \\ A_3 = \frac{C_2 \varphi}{\lambda_2} BR_{2 \rightarrow 3} \left( 1 - \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} e^{-\lambda_3 t} \right) + \frac{C_3 \varphi}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_3 t}) \\ A_4 = \frac{C_2 \varphi}{\lambda_2} BR_{2 \rightarrow 3} BR_{3 \rightarrow 4} \left( 1 - \frac{\lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_2 \lambda_4}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t} - \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_4 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_3)} e^{-\lambda_4 t} \right) + \\ + \frac{C_3 \varphi}{\lambda_3} BR_{3 \rightarrow 4} \left( 1 - \frac{\lambda_4}{\lambda_4 - \lambda_3} e^{-\lambda_3 t} + \frac{\lambda_3}{\lambda_4 - \lambda_3} e^{-\lambda_4 t} \right) + \frac{C_4 \varphi}{\lambda_4} (1 - e^{-\lambda_4 t}) \end{array} \right.$$





# Attività su filtro dopo l'aspirazione

$$\left\{ \begin{array}{l} B_1 = 0 \\ \frac{dB_2}{dt} = -\lambda_2 B_2 \\ \frac{dB_{i+2}}{dt} = -\lambda_{i+2} B_{i+2} + BR_{i+1 \rightarrow i+2} \lambda_{i+2} B_{i+1} \quad i = 1, 2, 3 \dots \\ B_i(t_a) = A_i(t_a) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} B_2 = C_2 \phi \cdot b_{22}(t) \\ B_3 = C_2 \phi \cdot b_{32}(t) + C_3 \phi \cdot b_{33}(t) \\ B_4 = C_2 \phi \cdot b_{42}(t) + C_3 \phi \cdot b_{43}(t) + C_4 \phi \cdot b_{44}(t) \end{array} \right.$$

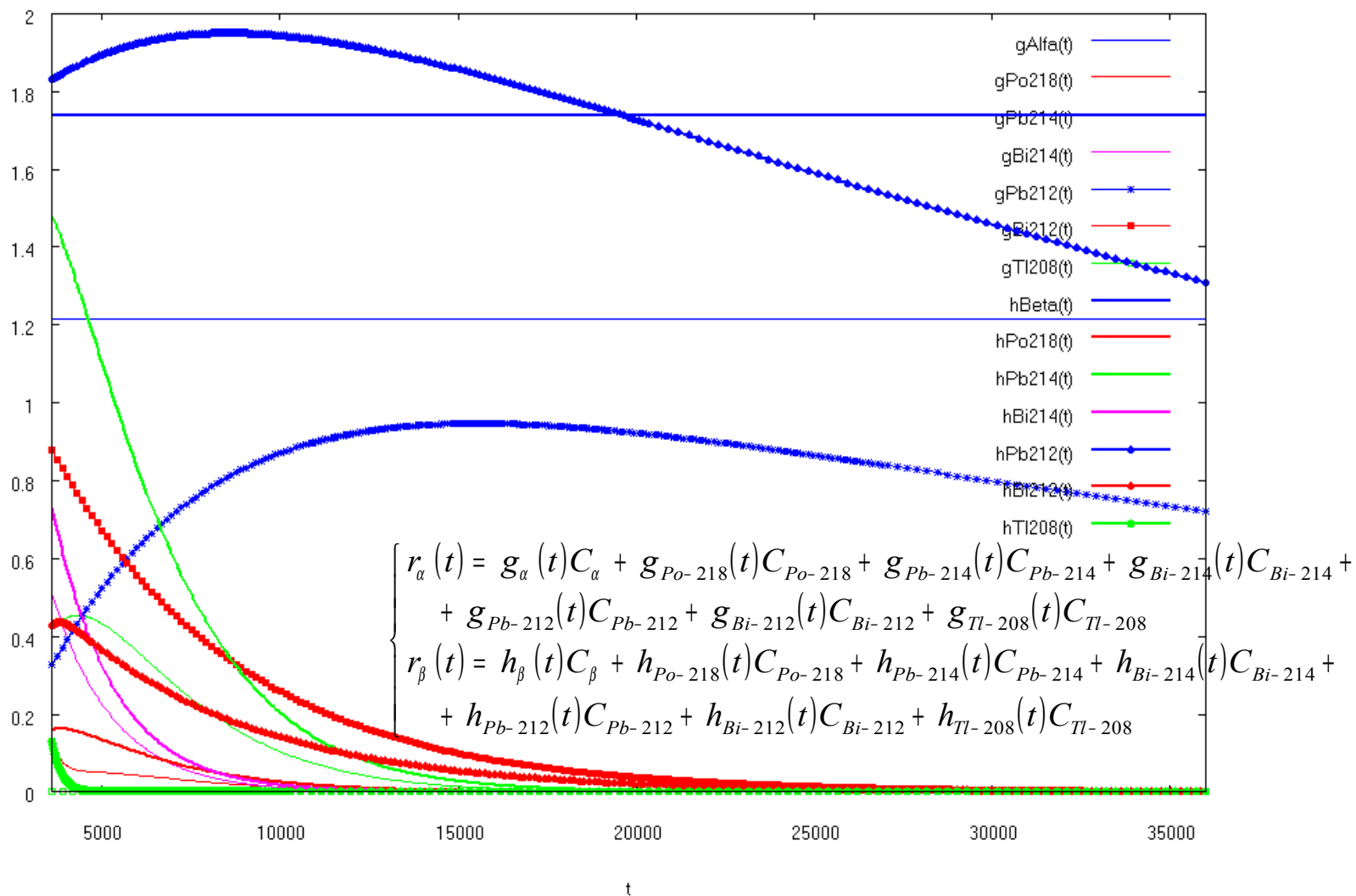


$$\left\{ \begin{array}{l} B_2 = C_2 \phi \cdot a_{22}(t_a) e^{-\lambda_2(t-t_a)} \\ B_3 = C_2 \phi \left[ BR_{2 \rightarrow 3} \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} a_{22}(t_a) e^{-\lambda_2(t-t_a)} + \left( a_{32}(t_a) - BR_{2 \rightarrow 3} \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} a_{22}(t_a) \right) e^{-\lambda_3(t-t_a)} \right] + C_3 \phi \cdot a_{33}(t_a) e^{-\lambda_3(t-t_a)} \\ B_4 = C_2 \phi \left[ BR_{2 \rightarrow 3} BR_{3 \rightarrow 4} \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} \frac{\lambda_4}{\lambda_4 - \lambda_2} a_{22}(t_a) e^{-\lambda_2(t-t_a)} + \right. \\ \left. + \left( BR_{3 \rightarrow 4} \frac{\lambda_4}{\lambda_4 - \lambda_3} a_{32}(t_a) - BR_{2 \rightarrow 3} BR_{3 \rightarrow 4} \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} \frac{\lambda_4}{\lambda_4 - \lambda_3} a_{22}(t_a) \right) e^{-\lambda_3(t-t_a)} + \right. \\ \left. + \left( a_{42}(t_a) - BR_{3 \rightarrow 4} \frac{\lambda_4}{\lambda_4 - \lambda_3} a_{32}(t_a) + BR_{2 \rightarrow 3} BR_{3 \rightarrow 4} \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} \frac{\lambda_4}{\lambda_4 - \lambda_3} a_{22}(t_a) \right) e^{-\lambda_4(t-t_a)} \right] + \\ + C_3 \phi \left[ BR_{3 \rightarrow 4} \frac{\lambda_4}{\lambda_4 - \lambda_3} a_{33}(t_a) e^{-\lambda_3(t-t_a)} + \left( a_{43}(t_a) - BR_{3 \rightarrow 4} \frac{\lambda_4}{\lambda_4 - \lambda_3} a_{33}(t_a) \right) e^{-\lambda_4(t-t_a)} \right] + C_4 \phi \cdot a_{44}(t_a) e^{-\lambda_4(t-t_a)} \end{array} \right.$$





# Ratei di conteggio attesi





# Stima concentrazioni in aria

$$\begin{cases} \mathbf{r}_\alpha(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{C} \\ \mathbf{r}_\beta(t) = \mathbf{B} \cdot \mathbf{C} \end{cases}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} g_\alpha(t) & 0 & g_{Pb-214}(t) & g_{Bi-214}(t) & g_{Pb-212}(t) & g_{Bi-212}(t) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & h_\beta(t) & h_{Pb-214}(t) & h_{Bi-214}(t) & h_{Pb-212}(t) & h_{Bi-212}(t) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_\alpha \\ C_\beta \\ C_{Pb-214} \\ C_{Bi-214} \\ C_{Pb-212} \\ C_{Bi-212} \end{pmatrix}$$

$$\chi^2 = (\mathbf{r}_\alpha - \mathbf{r}_\alpha^*)^T \mathbf{U}_{\mathbf{r}_\alpha}^{-1} (\mathbf{r}_\alpha - \mathbf{r}_\alpha^*) + (\mathbf{r}_\beta - \mathbf{r}_\beta^*)^T \mathbf{U}_{\mathbf{r}_\beta}^{-1} (\mathbf{r}_\beta - \mathbf{r}_\beta^*) \quad \min \quad \chi^2 \leq \chi^2(0.99, 2m - n)$$

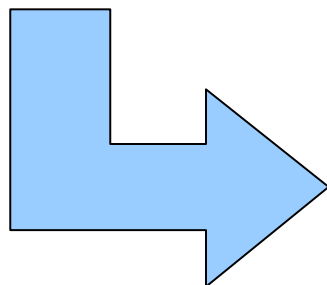
$$\mathbf{M} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{r}_\alpha}^{-1} (\mathbf{r}_\alpha^*) \cdot \mathbf{A} + \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{r}_\beta}^{-1} (\mathbf{r}_\beta^*) \cdot \mathbf{B}$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{r}_\alpha}^{-1} (\mathbf{r}_\alpha^*) \cdot \mathbf{r}_\alpha^* + \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{r}_\beta}^{-1} (\mathbf{r}_\beta^*) \cdot \mathbf{r}_\beta^*$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{C}$$

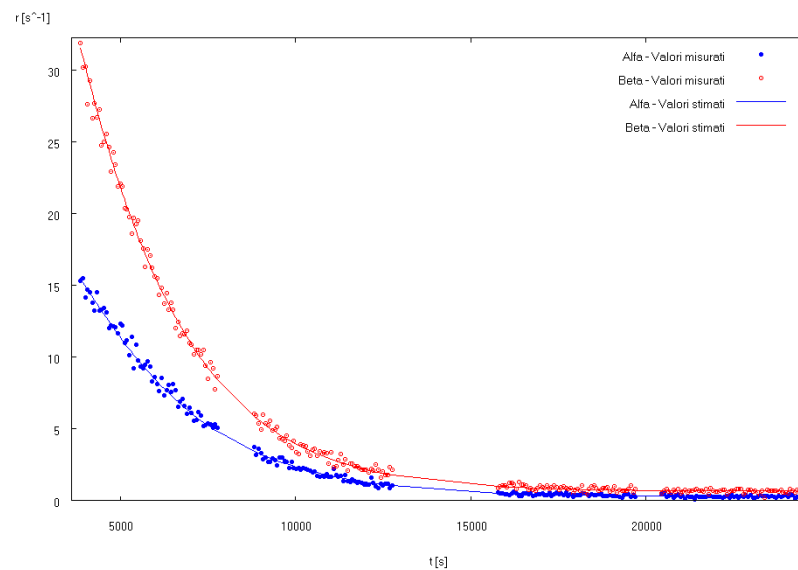
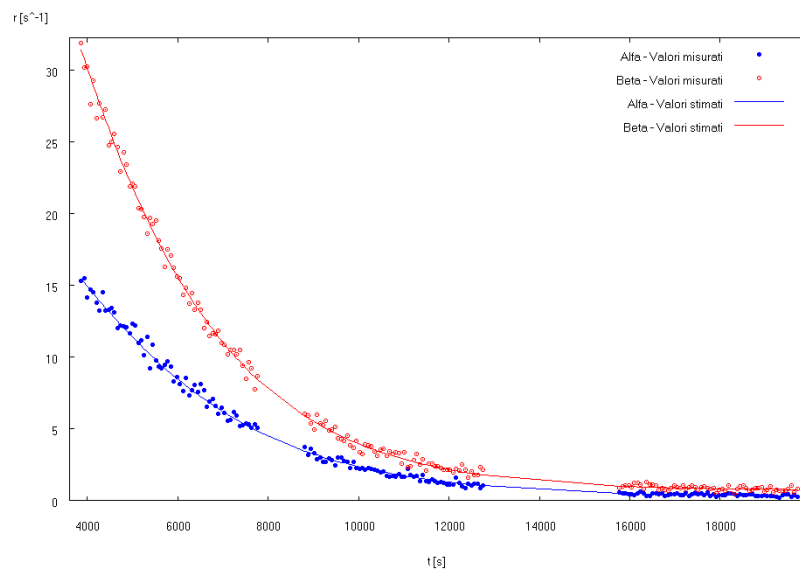
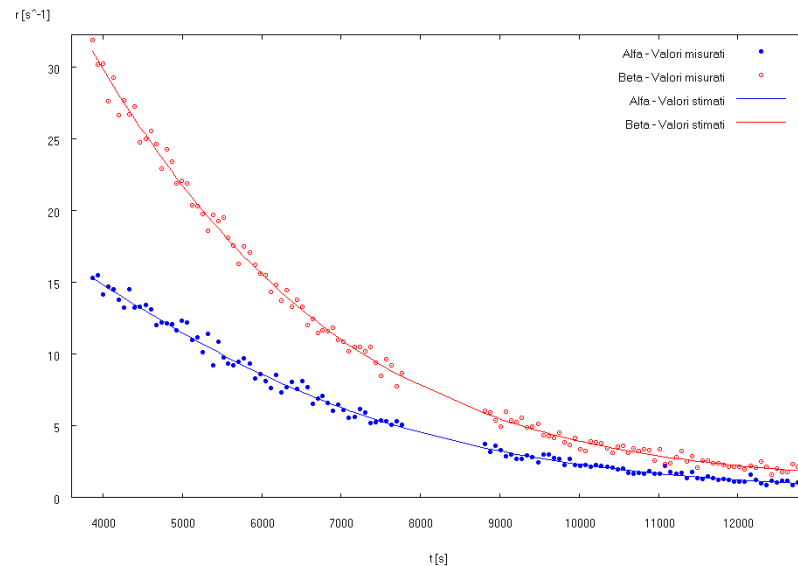
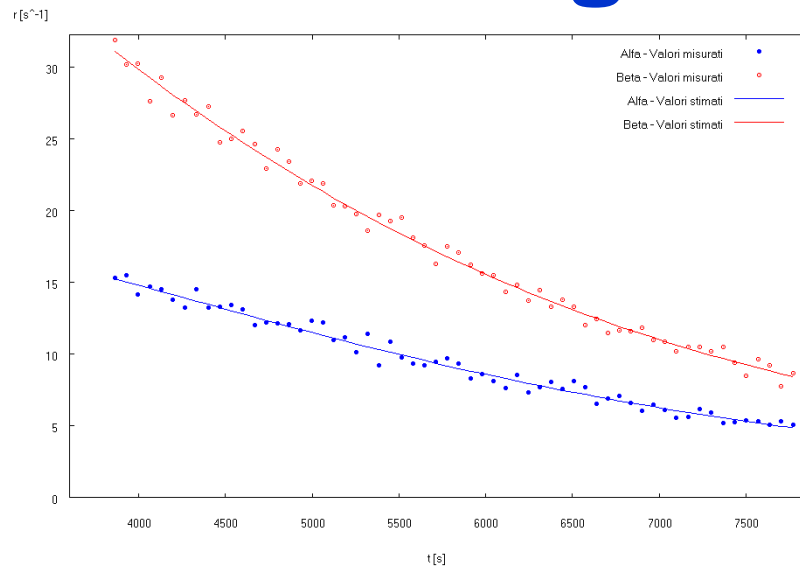
$$\mathbf{C} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{V} = \left[ \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{r}_\alpha}^{-1} (\mathbf{r}_\alpha^*) \cdot \mathbf{A} + \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{r}_\beta}^{-1} (\mathbf{r}_\beta^*) \cdot \mathbf{B} \right]^{-1} \cdot \left[ \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{r}_\alpha}^{-1} (\mathbf{r}_\alpha^*) \cdot \mathbf{r}_\alpha^* + \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{r}_\beta}^{-1} (\mathbf{r}_\beta^*) \cdot \mathbf{r}_\beta^* \right]$$

$$\mathbf{U}_C = \mathbf{M}^{-1} = \left[ \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{r}_\alpha}^{-1} (\mathbf{r}_\alpha^*) \cdot \mathbf{A} + \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{r}_\beta}^{-1} (\mathbf{r}_\beta^*) \cdot \mathbf{B} \right]^{-1}$$



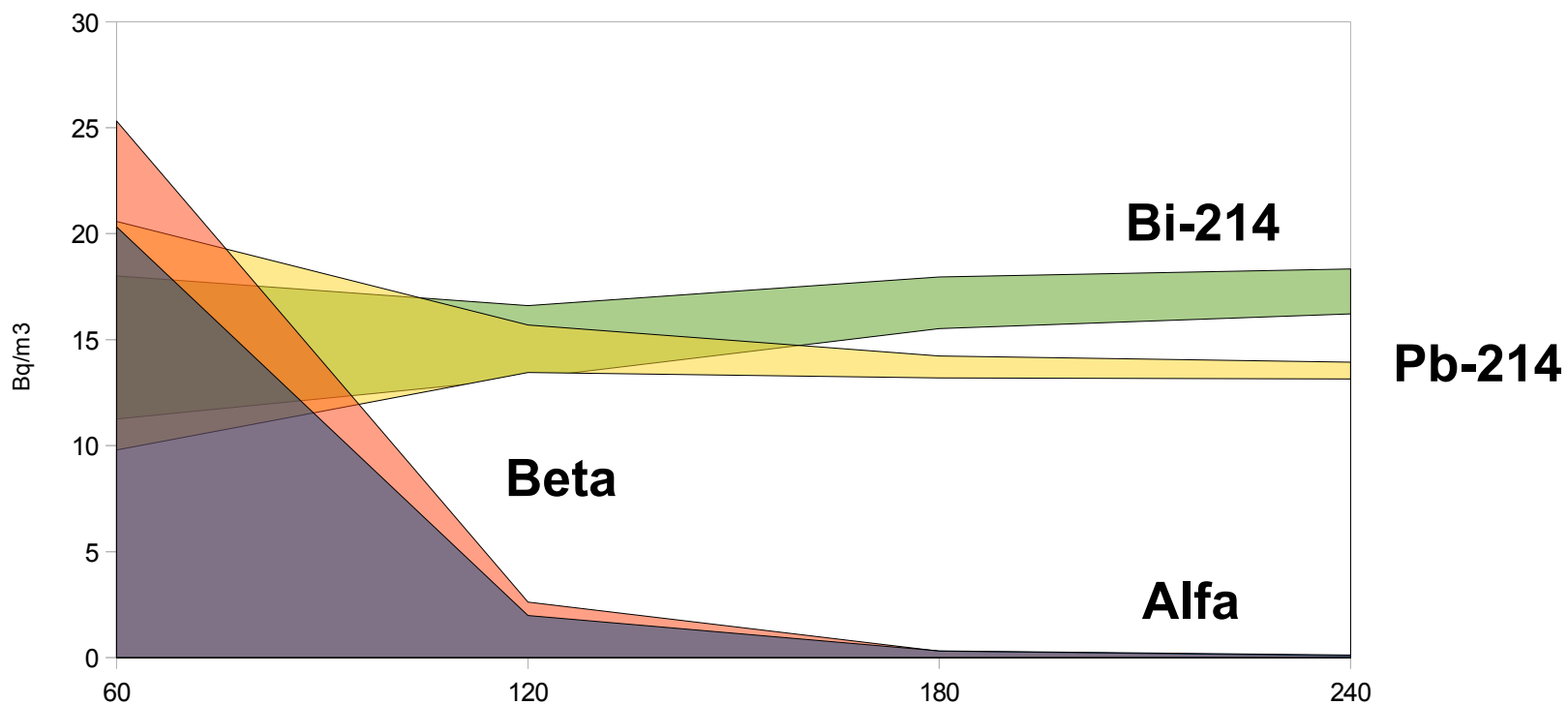


# Segnale “naturale”





## Segnale “naturale”



Intervalli di confidenza k=2, 95%

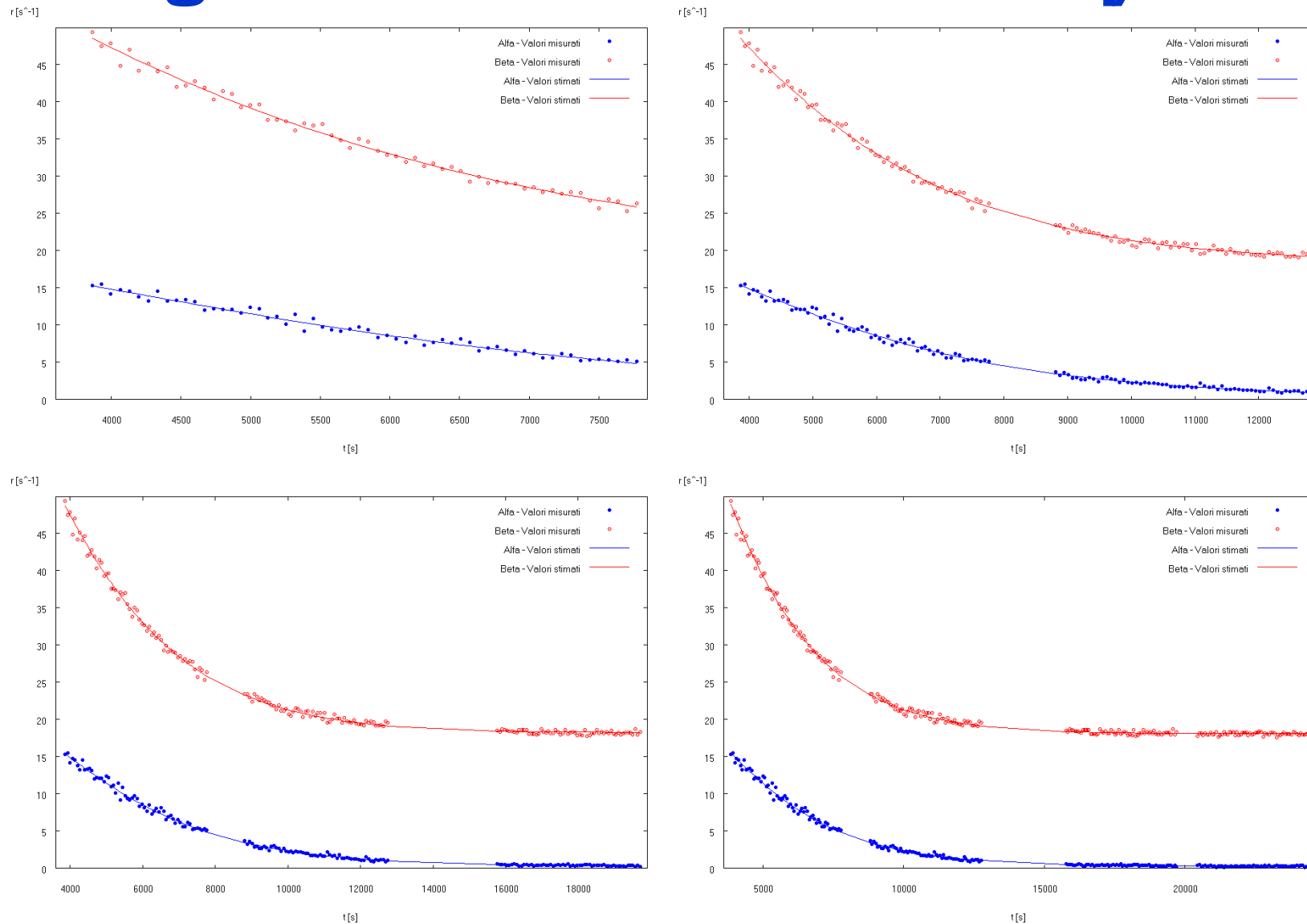


# Segnale “naturale”

Numero misure	di	m = 60	m = 120	m = 180	m = 240
$C_{\alpha}$		< 20.32	< 1.98	< 0.311	< 0.116
$C_{\beta}$		< 25.31	< 2.62	< 0.300	< 0.0792
$C_{Pb-214}$		15.19 ± 5.39	14.57 ± 1.12	13.71 ± 0.52	13.54 ± 0.40
$C_{Bi-214}$		14.63 ± 3.38	14.89 ± 1.71	16.74 ± 1.22	17.28 ± 1.06
$\chi^2$		125.72	252.09	388.23	539.97
$\chi^2(0.99, 2m-6)$		149.13	284.33	415.90	545.63

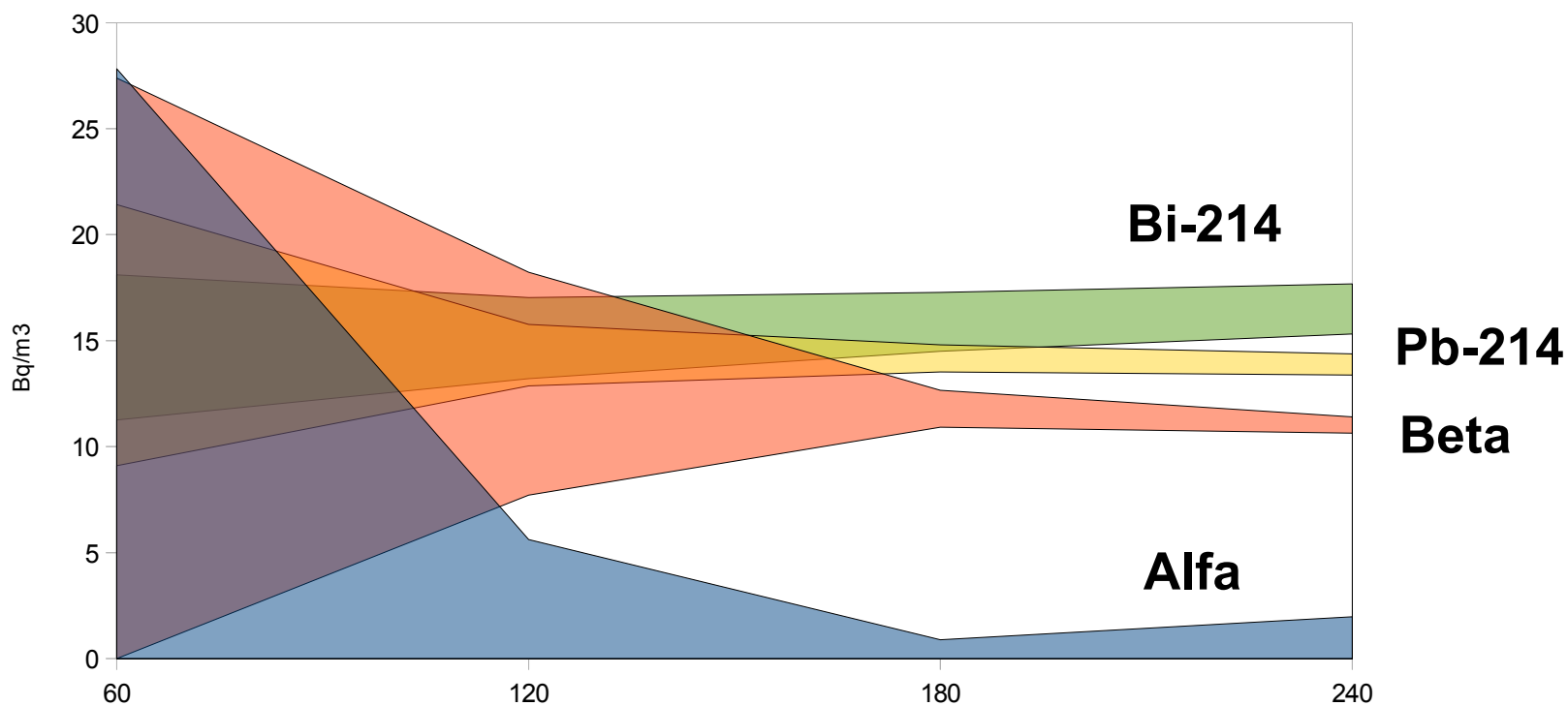


# Segnale “disturbato” - Beta 10 Bq/m<sup>3</sup>





# Segnale “disturbato” - Beta 10 Bq/m<sup>3</sup>



Intervalli di confidenza k=2, 95%





# Segnale “disturbato” - Beta 10 Bq/m<sup>3</sup>

Numero misure	di	m = 60	m = 120	m = 180	m = 240
$C_{\alpha}$		< 27.83	< 5.62	< 0.89	< 1.97
$C_{\beta}$		< 27.39	12.97 ± 5.26	11.79 ± 0.87	11.02 ± 0.38
$C_{Pb-214}$		15.26 ± 6.16	14.31 ± 1.45	14.16 ± 0.64	13.88 ± 0.50
$C_{Bi-214}$		14.68 ± 3.42	15.12 ± 1.91	15.89 ± 1.39	16.50 ± 1.18
$\chi^2$		105.88	186.11	255.31	340.85
$\chi^2(0.99, 2m-6)$		149.13	284.33	415.90	545.63



## Sviluppi del modello

- Valutazione del numero minimo di misure necessarie a verificare il rispetto dei valori di riferimento.
- Implementazione del modello in un foglio di calcolo in modo da renderlo più facilmente utilizzabile.



## Conclusioni

Il modello proposto può essere un strumento utile alla stima delle concentrazioni alfa totale e beta totale nel particolato atmosferico di radionuclidi a vita non breve nel caso di emergenze radiologiche o nucleari, nel corso delle quali è necessario disporre di valutazioni in tempi molto ristretti, condizionati da tempi di aspirazione e di misura non superiori a qualche ora.