

*Valutazione del rischio
radiologico in attività sanitarie
comportanti l'impiego di
sostanze radioattive non
sigillate*





Riferimenti tecnici

- ◆ “Proposta di linea guida per la omogeneizzazione delle norme interne di radioprotezione nei servizi di Medicina Nucleare” Gruppo di studio “Normativa e Radioprotezione” Associazione Italiana di Medicina Nucleare Notiziario di Medicina Nucleare, Anno XI, n. 2 (1999)
- ◆ I.C.R.P. Publication n. 68 “Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers, 1995
- ◆ ICRP Publication 57, radiological protection of the worker in medicine and dentistry, 1989
- ◆ Manuale Tecnico AIRP “La radioprotezione nell’impiego medico “in vivo” di sostanze radioattive non sigillate” (1995)
- ◆ Manuale Tecnico AIRP “La radioprotezione nell’impiego “in vitro” di sostanze radioattive non sigillate nelle attività sanitarie e di ricerca medica” (1991)
- ◆ D. Delacroix et al, Radionuclide and radiation protection data handbook 2002, Radiation Protection and dosimetry, Vol.98 N.1, 2002



Principali applicazioni diagnostiche di sostanze radioattive non sigillate

Radionuclide	Scopo	Applicazioni principali
99m-Tc	Diagnostico <i>in vivo</i>	Scintigrafia ossea
99m-Tc	Diagnostico <i>in vivo</i>	Scintigrafia Tiroidea
99m-Tc	Diagnostico <i>in vivo</i>	Scintigrafia Polmonare
99m-Tc	Diagnostico <i>in vivo</i>	Funzionalità Renale
99m-Tc	Diagnostico <i>in vivo</i>	Funzionalità Cardiaca
67-Ga	Diagnostico <i>in vivo</i>	Ricerca focolai infiammatori
67-Ga	Diagnostico <i>in vivo</i>	Scintigrafia polmonare
201-Tl	Diagnostico <i>in vivo</i>	Scintigrafia miocardica
123-I	Diagnostico <i>in vivo</i>	Scintigrafia surrenalica midollare
123-I	Diagnostico <i>in vivo</i>	Captazione Tiroidea
111-In	Diagnostico <i>in vivo</i>	Marcatura piastrine
131-I	Diagnostico <i>in vivo</i>	Scintigrafia surrenalica
131-I	Diagnostico <i>in vivo</i>	Scintigrafia Total Body
131-I	Diagnostico <i>in vivo</i>	Iodiocaptazioni
59-Fe	Diagnostico <i>in vivo</i>	Ferrocinetica
51-Cr	Diagnostico <i>in vivo</i>	Sopravvivenza Emazie
Co-57/Co58	Diagnostico <i>in vivo</i>	Assorbimento vitamina B12

Radionuclide	Scopo	Applicazioni principali
125-I	Diagnostico <i>in vitro</i>	Dosaggio radioimmunologico

Principali sostanze radioattive non sigillate impiegate in ambiente sanitario

Radionuclide	T _{1/2} (g)	E _(γ,x) principali (keV)	mSv/h a 30 cm ⁽¹⁾	mSv/h a 100 cm ⁽²⁾	mSv/h a contatto ⁽³⁾	Range massimo per β ed elettroni in Plastica (mm)	TVL (mm di Pb)	Dose pelle ⁽⁴⁾ (mSv/h)
99-Mo/99m-Tc	2.75	141, 740, 778	5.43E-04	4.61E-05	7.43E+00	4.0	19	1.89E+00
99m-Tc	0.25	141	2.61E-04	2.24E-05	3.54E-01	0.3	1	2.46E-01
201-Tl	3.04	71, 135, 167	1.97E-04	1.85E-05	2.85E-01	0.3	1	2.70E-01
67-Ga	3.26	93, 185, 300	2.79E-04	2.54E-05	4.02E-01	0.2	6	3.51E-01
123-I	0.55	27, 159	5.16E-04	3.43E-05	6.05E-01	0.3	2	3.78E-01
111-In	2.80	23, 171, 245	9.94E-04	7.17E-05	1.22E+00	0.5	3	3.78E-01
51-Cr	27.70	320	6.04E-05	5.35E-06	8.69E-02	< 0.1	7	1.49E-02
57-Co	271.80	122, 137	2.52E-04	2.17E-05	3.35E-01	< 0.1	1	1.19E-01
58-Co	70.80	511, 811	1.68E-03	1.45E-04	2.47E+00	1.2	29	2.97E-01
59-Fe	44.50	1099, 1292	1.860E-03	1.60E-04	2.74E+00	1.2	45	9.73E-01
131-I	8.00	284, 365, 637	7.29E-04	6.36E-05	1.13E+00	1.6	11	1.62E+00
18-F	1.83 h	511	1.81E-03	1.58E-04	2.88E+00	1.7	17	1.95E+00
89-Sr	50.50	909 (< 1%)	2.27E-07	1.87E-07	1.64E+01	5.3	35	1.78E+00
125-I	59.9	27, 31	3.90E-04	1.44E-05	6.20E-01	< 0.1	< 1	2.11E-02

¹ Dose profonda in tessuto, sorgente puntiforme, 1 MBq

² Irradiazione da un vial da 10 ml, 1 MBq

³ Irradiazione da una siringa da 5 ml non schermata, 1 MBq

⁴ Irradiazione per deposizione uniforme, 1 kBq/cm², strato germinale della cute (70 μm)



RADIOFARMACI UTILIZZATI IN PET

	$E_{\beta \text{ max}}$	E_{γ}	$T_{1/2}$
^{18}F	634 keV (97%)	511 keV (194%)	1.83 h
^{11}C	960 keV (100%)	511 keV (200%)	20.4 min
^{13}N	1199 keV (100%)	511 keV (200%)	9.97 min
^{15}O	1732 keV (100%)	511 keV (200%)	2.04 min



Principali applicazioni terapeutiche di sostanze radioattive non sigillate

	$E_{\beta \text{ max}}$	E_{γ}	$T_{1/2}$	Applicazione	Attività somministrate
^{89}Sr	1492 keV (100%)	909 keV (<1%)	50.7 g	Metastasi ossee	148 MBq
^{186}Re	939 keV (22%) 1077 keV (72%)	59-63 keV (5%) 137 keV (9%)	3.78 g	Metastasi ossee	1300 MBq
^{153}Sm	634 keV (35%) 703 keV (44%) 807 keV (21%)	41-47 keV (61%) 103 keV (28%)	1.95 g	Metastasi ossee	3000 MBq
^{131}I	248 keV (2%)	284 (6%)	8.04 g	Terapia ablativa	3000 MBq
	334 keV (7%)	365 (82%)		Metastasi	5550 MBq
	606 keV (90%)	637 (7 %)		Ipertiroidismo	185 MBq



Stima del rischio radiologico

**Perché
effettuarla**

- Per valutare l'acceptabilità o meno del rischio
- Per **valutare** l'adeguatezza dei dispositivi tecnici di radioprotezione
- Per **dimostrare** l'adeguatezza dei dispositivi tecnici di radioprotezione
- Per individuare eventuali criticità
- Per sapere quali sono i valori dosimetrici massimi attesi nell'ambito dell'esercizio del reparto
- Perché previsto dalla legge (Art. 79 e 61)
- Per indicare una classificazione di radioprotezione tecnicamente motivata



**Condizione necessaria
per effettuare
analisi del rischio**

**Conoscenza delle modalità
di impiego delle sostanze radioattive
*Analisi di processo?***



Modalità di impiego di sostanze radioattive non sigillate

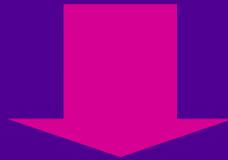
99m-Tc	Viene eluito da colonne cromatografiche di allumina sulle quali è fissato il generatore Mo-99; il dispositivo che consente l'eluizione è composto da una colonna cromatografica munita agli estremi di filtri che, oltre a trattenere l'allumina ivi contenuta, fanno sì che l'eluente (NaCl 0.9%) scenda attraverso la colonna in modo omogeneo. L'eluizione di 99m-Tc avviene per scambio ionico. La colonna è contenuta in una blindatura di piombo di spessore compreso tra 4 e 7 cm. L'eluizione dovrebbe avvenire secondo modalità che minimizzano il rischio di contaminazione personale e dell'ambiente di lavoro, nonché il rischio legato all'irraggiamento esterno; l'eluito dovrebbe essere contenuto in un contenitore schermato da circa 1 cm di Pb. Sul preparato radioattivo eluito vengono eseguite semplici operazioni di marcatura dei composti di interesse; la determinazione dell'attività da somministrarsi viene effettuata per via volumetrica e successivamente verificata con l'attivimetro allocato all'interno della cella calda; viene somministrato di norma per via endovenosa dal personale medico utilizzando siringhe schermate con 2 mm di Pb. Il personale, durante l'utilizzo del materiale radioattivo, può e deve utilizzare guanti in lattice a perdere.
131-I	Viene utilizzato sottoforma di capsule di attività nota che vengono somministrate al paziente immediatamente dopo l'apertura dei contenitori da trasporto che le contengono. Può altresì essere utilizzato anche in forma liquida nel qual caso la determinazione dell'attività da somministrarsi viene effettuata per via volumetrica e successivamente verificata con l'attivimetro presente in camera calda. Il personale, durante l'utilizzo del materiale radioattivo, può e deve utilizzare guanti in lattice a perdere.
Ga-67, Tl-201, I-123, In-111, Sr-89, Fe-59, I-125, Cr-51	Vengono prelevati nella quantità utile dai contenitori da trasporto; la determinazione dell'attività da somministrarsi viene effettuata per via volumetrica e successivamente verificata con l'attivimetro allocato all'interno della cella calda; vengono somministrati di norma per via endovenosa dal personale medico utilizzando siringhe schermate con 2 mm di Pb. Il personale, durante l'utilizzo del materiale radioattivo, può e deve utilizzare guanti in lattice a perdere.
I-125 (R.I.A.)	Viene prelevato nella quantità utile dai contenitori di trasporto utilizzando pipette Eppendorf; la determinazione dell'attività da utilizzarsi viene effettuata per via volumetrica. Il personale, durante l'utilizzo del materiale radioattivo, può e deve utilizzare guanti in lattice a perdere.
Co-57/Co-58	Viene utilizzato sottoforma di capsule di attività nota che vengono somministrate al paziente immediatamente dopo l'apertura dei contenitori da trasporto che le contengono. Il personale, durante l'utilizzo del materiale radioattivo, può e deve utilizzare guanti in lattice a perdere.



*Fonti di rischio in attività comportanti
l'impiego di sostanze radioattive non sigillate*

Irradiazione esterna

Irradiazione interna



**Preparazione e
somministrazione
radiofarmaci**

**Irradiazione
dal paziente**

Inalazione

Ingestione

Irradiazione Cutanea



*Fonti di rischio in attività comportanti
l'impiego di sostanze radioattive non sigillate*

Irradiazione esterna

**Preparazione e
somministrazione
radiofarmaci**

**Irradiazione
dal paziente**

**Dose equivalente estremità
Dose Efficace**

Dose Efficace



Stima del rischio radiologico per irradiazione esterna

Input

- **Numero e tipologia di esami annui**
- **Caratteristiche fisiche delle sostanze**
- **Stima dei campi di radiazione**
- **Tipologia e numero del personale coinvolto**
- **Modalità di svolgimento del lavoro (tempo e distanza)**
- **Stima degli “eventi anomali”**

**Output
intermedio**

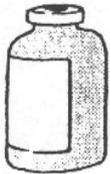
- **Dose (efficace o equivalente) collettiva**

Output finale

- **Dose (efficace o equivalente) individuale**

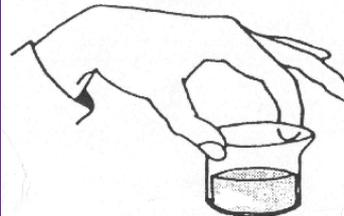
Rischio di irradiazione esterna preparazione e somministrazione

flacone da 10 ml



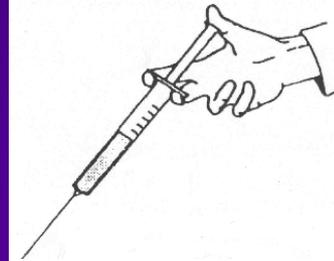
100 cm

beaker da 50 ml



a contatto

siringa da 5 ml



	$\mu\text{Sv/h/GBq}$
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	22
^{131}I	64
^{201}Tl	19
^{67}Ga	25
^{111}In	72
^{18}F	158
^{153}Sm	15
^{186}Re	4
^{89}Sr	0.2
^{11}C	163
^{13}N	163
^{15}O	167

	mSv/h/GBq
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	77
^{131}I	223
^{201}Tl	63
^{67}Ga	88
^{111}In	243
^{18}F	563
^{153}Sm	48
^{186}Re	14
^{89}Sr	0.08
^{11}C	581
^{13}N	581
^{15}O	593

	mSv/h/GBq
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	354
^{131}I	1130
^{201}Tl	285
^{67}Ga	402
^{111}In	1222
^{18}F	2880
^{153}Sm	241
^{186}Re	380
^{89}Sr	16500
^{11}C	6410
^{13}N	12900
^{15}O	30500

Stima del rischio: dose equivalente estremità diagnostica in vivo - preparazione e somministrazione

Parametri di riferimento

- A) Campo di radiazione di riferimento [mSv/h a contatto]* 1.31E+00
 B) Campo di radiazione di riferimento [mSv/h a contatto]** 1.31E+02
 C) Durata manipolazione/paziente (minuti) *** 1
 D) Numero di pazienti sottoposti a esame scintigrafico/anno 6500

* Irradiazione da una siringa da 5 ml schermata con 2 mm di Pb, 370 MBq di 99m-Tc

** Irradiazione da una siringa da 5 ml **non** schermata, 370 MBq di 99m-Tc

*** Per manipolazione si intende la preparazione e la somministrazione

$$\frac{(D_i + D_{ia})}{1000}$$

Personale	Dose collettiva ($\mu\text{Sv} \times$ persona/anno)	N. Operatori	Dose individuale assorbibile ($\mu\text{Sv}/\text{anno}$)	Ore/anno/persona in condizioni di esposizione senza schermatura	Dose individuale assorbibile in assenza di schermature ($\mu\text{Sv}/\text{anno}$)	Totale (mSv/anno)
Medico	141895	2	70948	1	131000	202
T.S.R.M.	141895	2	70948	1	131000	202

$$D_c = A \times C \times D \times 1000/60$$

$$D_i = D_c / N.\text{Operatori}$$

$$D_{ia} = B \times D_i \times 1000$$



Stima del rischio: dose equivalente estremità diagnostica in vitro

Campo di radiazione di riferimento [$\mu\text{Sv/h}$ a 1 m]* 1.44E-02

* Vial da 10 ml contenente 1 MBq di ^{125}I

Personale	Distanza di riferimento (m)	Attività di riferimento (MBq)	Ore di esposizione/anno/operatore	Dose individuale assorbibile ($\mu\text{Sv/anno}$)
1 Tecnico R.I.A.	0.1	5	1000	7200



Rischio di esposizione delle estremità: dispositivi tecnici di protezione

- ◆ Devono essere utilizzati contenitori e siringhe schermate
- ◆ Deve essere valutata la necessità di pinze e telemanipolatori
- ◆ Deve essere ridotto al minimo il contatto diretto con contenitori e siringhe



Stima del rischio: dose efficace diagnostica in vivo - preparazione e somministrazione

Campo di radiazioni di riferimento ($\text{mSv h}^{-1} \text{MBq}^{-1}$ a 1 m) *	2.24E-05
Attività di riferimento (MBq)	740
Distanza sorgente - operatore (m)	0.5

* Irradiazione da un vial da 10 ml, 1 MBq di $^{99\text{m}}\text{Tc}$

Personale	Ore totali di esposizione per anno	Dose collettiva ($\mu\text{Sv} \times$ persona/anno)	N. Operatori	Dose individuale assorbibile ($\mu\text{Sv}/\text{anno}$)
Medico	100	6630	2	3315
T.S.R.M.	100	6630	2	3315



Rischio di irradiazione esterna irradiazione da parte del paziente

- ◆ Costituisce la fonte di rischio potenziale più importante
- ◆ Necessità di garantire una protezione ottimizzata del box comandi
- ◆ Va sfruttato l'elemento tempo e distanza



Rischio di irradiazione esterna

Tipici campi di radiazione prodotti dal paziente

Esame/Terapia	Radiofarmaco	Attività (MBq)	Rateo di dose equivalente (nSv h ⁻¹ MBq ⁻¹)					
			Subito dopo la somministrazione			Due ore dopo la somministrazione		
			A contatto	0.3 m	1 m	A contatto	0.3 m	1 m
Scintigrafia ossea	^{99m} Tc MDP	150 – 600	27	13	4	13	7	2
Scintigrafia epatica	^{99m} Tc Colloide	10 – 250	27	13	4	20	10	3
Determinazione del volume plasmatico	^{99m} Tc RBC	550 – 740	27	13	4	20	10	3
Scintigrafia Miocardica	²⁰¹ Tl	50 - 110	36	18	6	36	18	6
Localizzazione metastasi	¹⁸ F	250 - 500	/	/	70 - 150			
Terapia ablativa	¹³¹ I	3000	/	/	30 - 50			
Terapia delle metastasi	¹³¹ I	5550	/	/	30 – 50			
Iperteroidismo	¹³¹ I	185	/	/	50 – 80			

Dipendenza del rischio dalla distanza dal paziente in cardiologia nucleare

Esame	Radiofarmaco	Attività somministrata (MBq)
Angiocardioscintigrafia	^{99m}Tc - RBC	740

A contatto
del paziente

15 $\mu\text{Sv/h}$

A 30 cm
dal paziente

7 $\mu\text{Sv/h}$

A 100 cm
dal paziente

2 $\mu\text{Sv/h}$

Dipendenza del rischio dalla distanza dal paziente in cardiologia nucleare

Esame	Radiofarmaco	Attività somministrata (MBq)
Scintigrafia Miocardica	^{201}Tl	110

A contatto
del paziente

4 $\mu\text{Sv/h}$

A 30 cm
dal paziente

2 $\mu\text{Sv/h}$

A 100 cm
dal paziente

0.7 $\mu\text{Sv/h}$

Dipendenza del rischio dalla distanza dal paziente in medicina nucleare

Esame	Radiofarmaco	Attività somministrata (MBq)
Scintigrafia Ossea	^{99m}Tc MDP	555

A contatto
del paziente

15 $\mu\text{Sv/h}$

A 30 cm
dal paziente

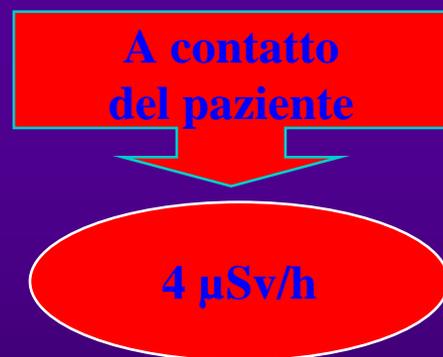
7.2 $\mu\text{Sv/h}$

A 100 cm
dal paziente

2.2 $\mu\text{Sv/h}$

Dipendenza del rischio dalla distanza dal paziente in medicina nucleare

Esame	Radiofarmaco	Attività somministrata (MBq)
Scintigrafia Epatica	^{99m}Tc Colloide	150



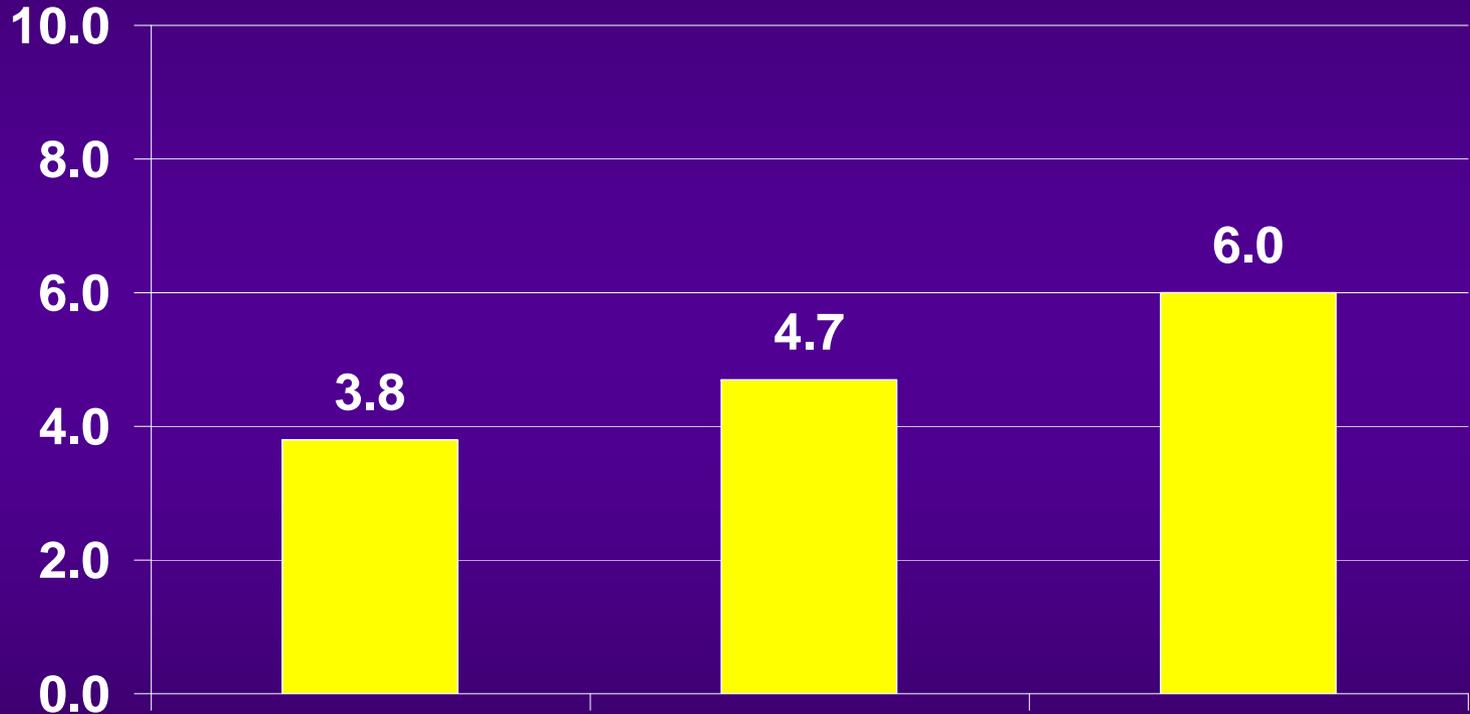


CAMPO DI RADIAZIONI GENERATO DA UN PAZIENTE SOTTOPOSTO A TRATTAMENTO TERAPEUTICO CON ^{131}I

	Attività somministrata (GBq)	H* a 1 m dal paziente ($\mu\text{Sv/h}$)	H* a 1 m dal paziente ($T = 0 \rightarrow \infty$) (mSv)
Terapia ablativa	3	100 - 150	4 - 5
Terapia delle metastasi	5.55	175 - 300	5 - 8
Iper tiroidismo	0.185	10 - 15	0.5 - 1



INIEZIONE DEL RADIOFARMACO (F18)



McElroy et al.
(1998)

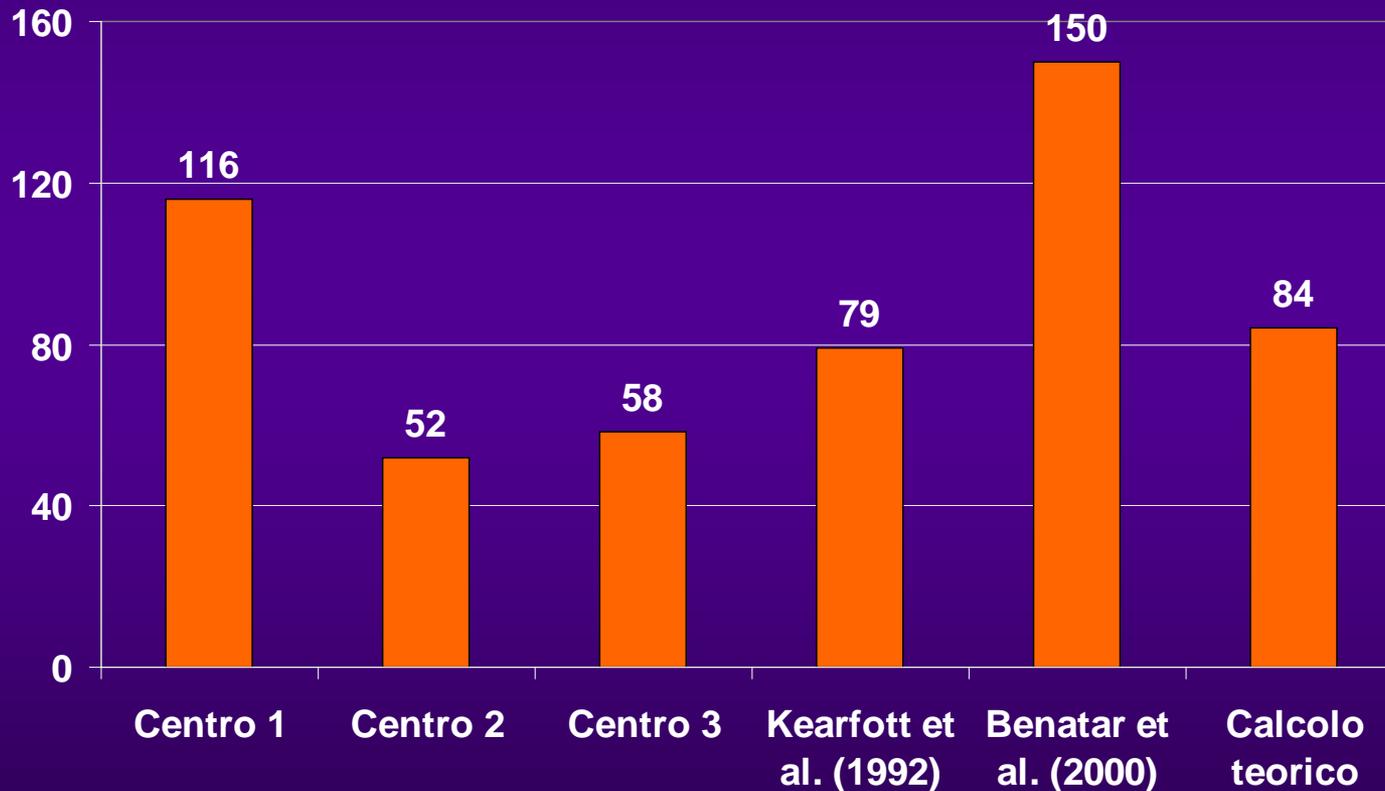
Centro 1

Centro 2

Dose efficace per iniezione ($\mu\text{Sv}/\text{GBq}$ somministrato)

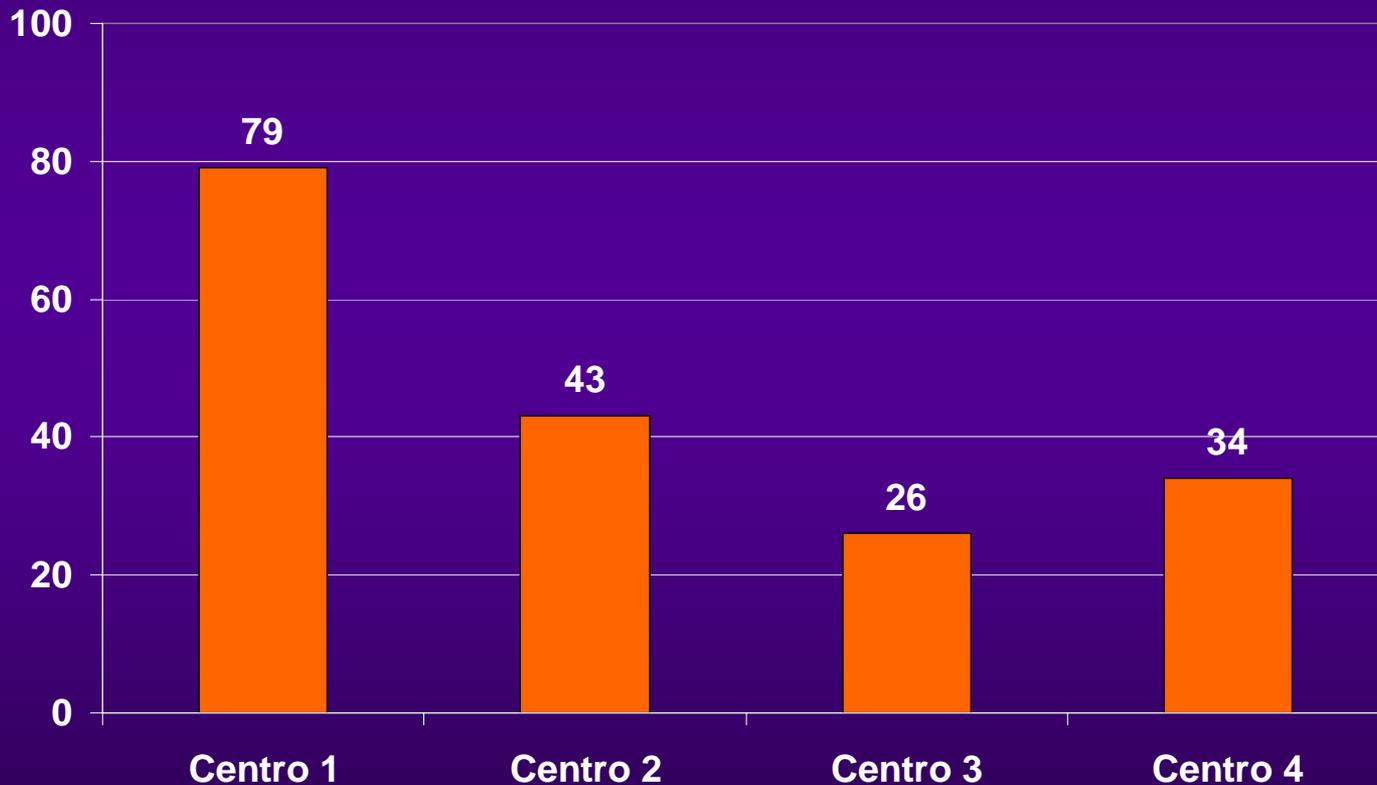


Rateo di dose a 1 m dal paziente al momento della somministrazione ($\mu\text{Sv/h}$)/(GBq di F-18 somministrato)



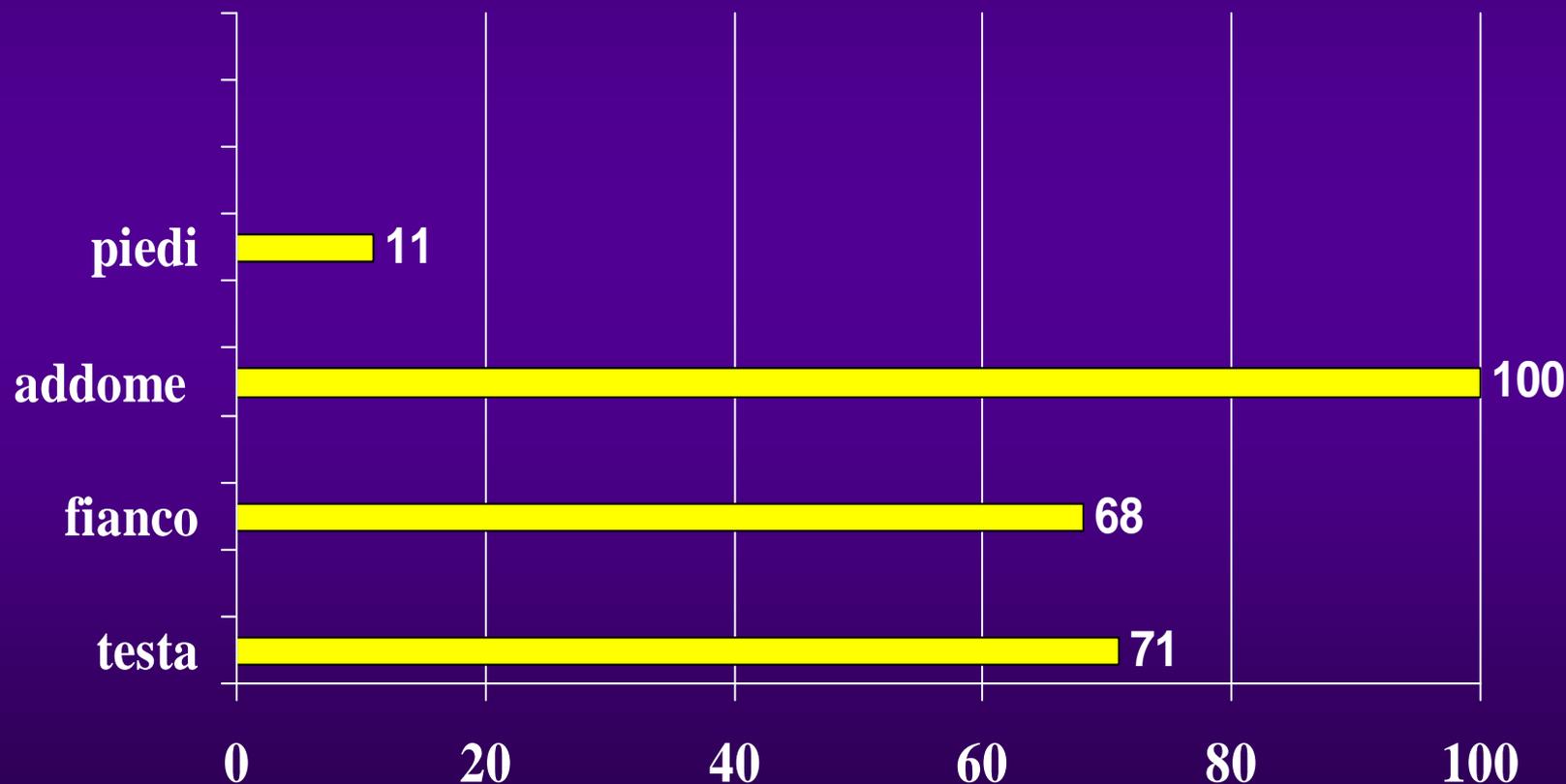


*Rateo di dose a 1 m dal paziente al momento dell'esecuzione dell'esame
($\mu\text{Sv/h}$)/(GBq F-18 somministrato)*



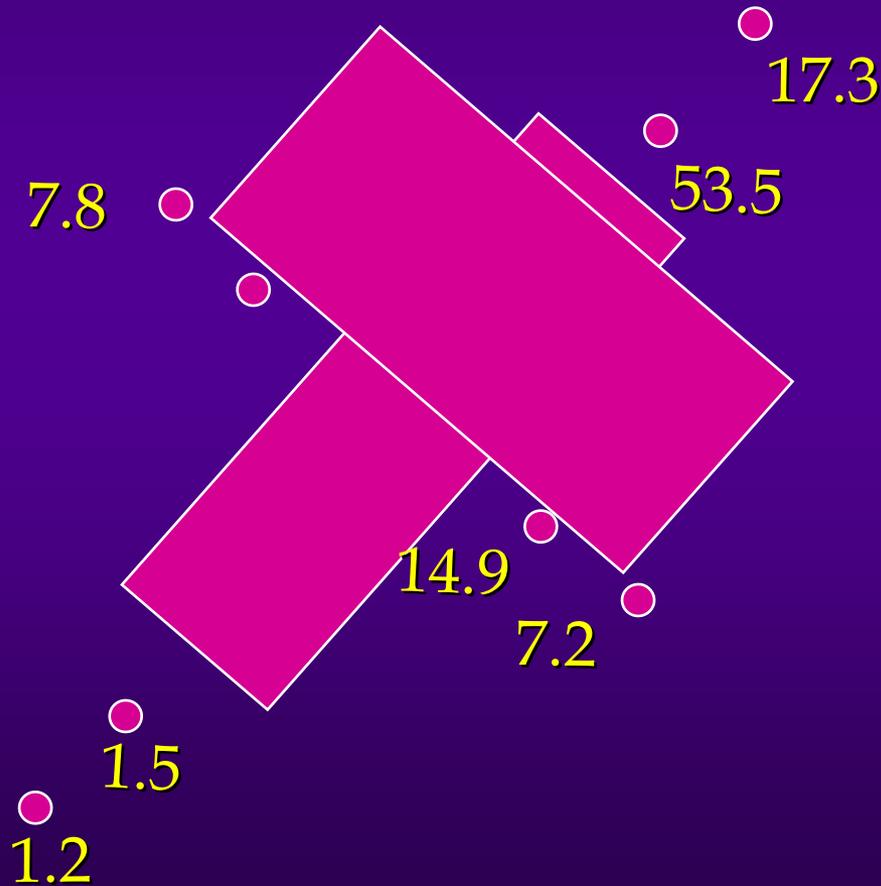


*Distribuzione del rateo di dose (%)
intorno al paziente (a 1 m)
(ad un'ora dalla somministrazione di F-18)*





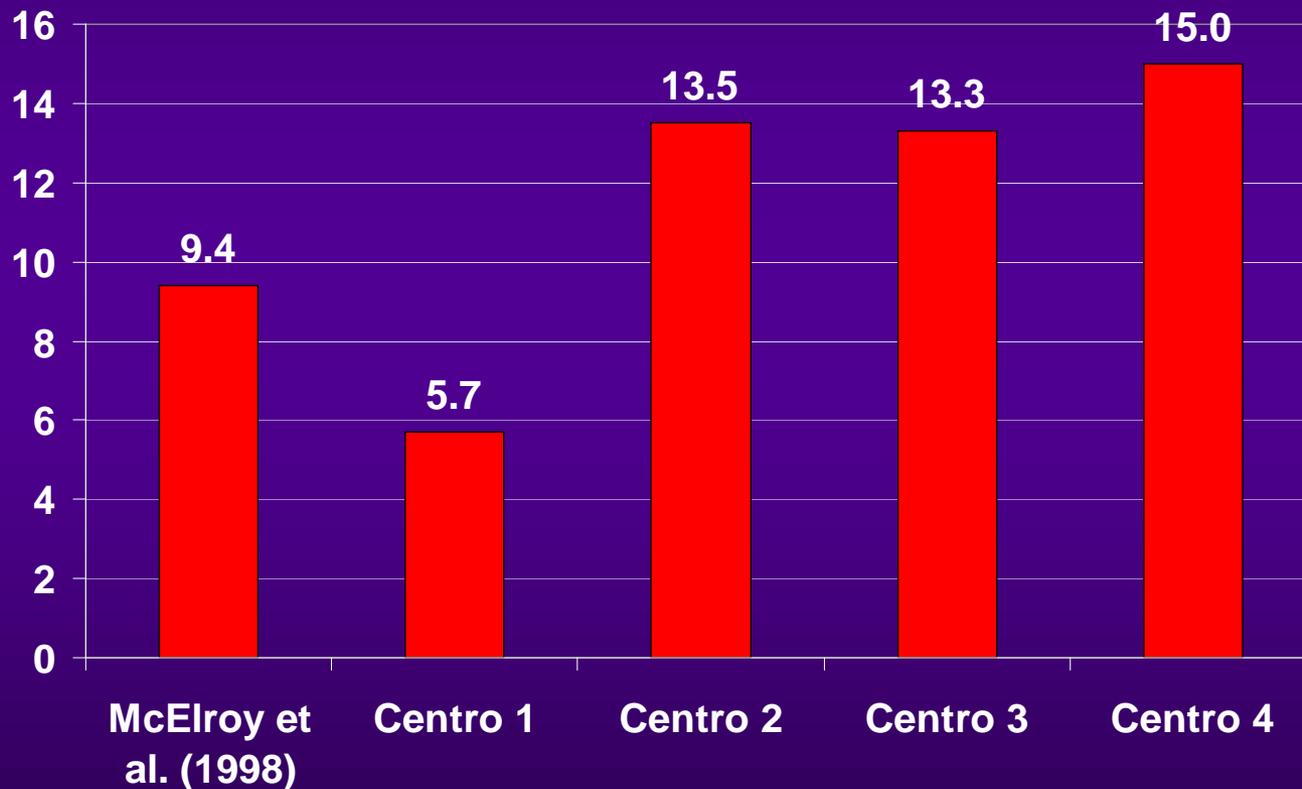
*Esempio di distribuzione del rateo di dose
intorno ad un apparecchio PET
($\mu\text{Sv}/\text{h}/\text{GBq}$ F-18 somministrato ad un'ora
dalla somministrazione)*





Dose per esecuzione esame (TSRM)

($\mu\text{Sv}/\text{GBq}$ F-18 somministrato)





Esempio di stima del rischio di irradiazione esterna da parte di un paziente portatore di 740 MBq di ^{99m}Tc

A) Campo di radiazioni di riferimento [$\mu\text{Sv/h}$ a 1 m]	3
B) Durata della preparazione del paziente (h/pz)	0.17
C) Distanza paziente operatore durante la preparazione (m)	1
E) Distanza paziente-posizione protetta operatore (m)	2.5
F) Protezione della barriera da 2 mm di Pb	0.01
G) Numero di pazienti sottoposti a esame scintigrafico/anno	6500
H) Durata acquisizione esame/paziente (h)	0.5

Personale	Dose collettiva (μSv x persona/anno) a 1 m dovuta alla preparazione degli esami	Dose collettiva (μSv x persona/anno) a 2.5 m dovuta all'effettuazione degli esami	N. Operatori	Dose individuale assorbibile ($\mu\text{Sv}/\text{anno}$)
Medico	3315	16	2	1666
T.S.R.M.	3315	16	2	1666
Ausiliario	3315	16	2	1666



$$G \times B \times A$$

$$G \times H \times A \times F/E^2$$

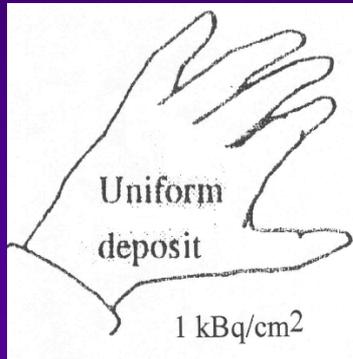


Esempio di stima del rischio da irradiazione esterna (mSv)

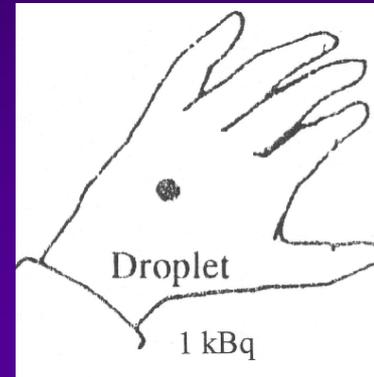
	Medici		TSRM		Ausiliari	
	Estremità	Efficace	Estremità	Efficace	Estremità	Efficace
Preparazione	/	/	202	3	/	/
Somministrazione	202	3	/	/	/	/
Esecuzione dell'esame	/	/	/	1.5	/	1.5
Totale	202	3	202	4.5	0	1.5



Rischio di irradiazione esterna da contaminazione cutanea



	mSv/h
^{99m} Tc	0.25
¹³¹ I	1.62
²⁰¹ Tl	0.27
⁶⁷ Ga	0.35
¹¹¹ In	0.38
¹⁸ F	1.95
¹⁵³ Sm	1.62
¹⁸⁶ Re	1.81
⁸⁹ Sr	1.78
¹¹ C	1.95
¹³ N	1.90
¹⁵ O	2.00



	mSv/h
^{99m} Tc	0.0088
¹³¹ I	0.57
²⁰¹ Tl	0.008
⁶⁷ Ga	0.004
¹¹¹ In	0.065
¹⁸ F	0.79
¹⁵³ Sm	0.72
¹⁸⁶ Re	0.91
⁸⁹ Sr	1.21
¹¹ C	1.12
¹³ N	1.20
¹⁵ O	1.40



Rischio di irradiazione esterna da contaminazione cutanea

- ◆ Va effettuata la stima della dose equivalente allo strato germinale della cute (7 mg/cm^2)
- ◆ La stima va effettuata nell'ipotesi del mancato utilizzo dei guanti in lattice
- ◆ La stima può essere effettuata a partire da un valore di contaminazione cutanea pari a circa 30 Bq/cm^2 , valore riferibile ad una contaminazione non immediatamente avvertibile e, in quanto tale, da non originare una immediata decontaminazione personale



Rischio di irradiazione esterna da contaminazione cutanea

Contaminazione cutanea di riferimento

30 Bq/cm²

Radionuclide	Ore di esposizione/anno	mSv/h per kBq/cm²	Dose equivalente assorbibile dalla cute [mSv/anno]
99m-Tc	500	0.25	≅ 4
89-Sr	500	1.78	≅ 27



Stima del rischio radiologico per inalazione

Input

- Carico di lavoro e durata dell'esposizione
- Caratteristiche fisiche delle sostanze
- Ventilazione dei locali
- Valutazione della risospensione
- Valutazione degli "eventi anomali"

**Output
intermedio**

- Stima delle concentrazioni in aria
- **Stima della quantità di sostanze radioattive inalate**

Output finale

- **Dose efficace impegnata individuale**



Contaminazione volumetrica: termini sorgente

- ◆ eventuale evaporazione dei preparati radioattivi durante la loro preparazione
- ◆ eventuale evaporazione della contaminazione presente sulle superfici di lavoro
- ◆ eventuale espirato dei pazienti (^{131}I)
- ◆ eventuale risospensione di particolato radiocontaminato



Contaminazione volumetrica: obiettivi perseguibili (di progetto)

- ◆ riduzione delle concentrazioni di sostanze radioattive in aria in modo che le dosi efficaci dovute ad inalazione non siano superiori a $1/10$ dei limiti di dose
- ◆ abbattimento delle concentrazioni di sostanze radioattive al punto di immissione in ambiente ai valori più bassi possibili
- ◆ riduzione del particolato atmosferico in ingresso finalizzato all'abbattimento dell'eventuale risospensione
- ◆ mantenimento di condizioni ambientali (temperatura e umidità relativa) tali da ridurre la evaporazione delle sostanze radioattive al momento della loro preparazione



Stima della contaminazione volumetrica: diagnostica

$$\frac{dC_i}{dt} = -(R + \lambda_i) \times C_i + F_i(t) \times \frac{A_i}{V}$$

C_i	=	Concentrazione del radionuclide <i>iesimo</i> [Bq/m ³]
R	=	Numero dei ricambi aria per ora [h ⁻¹]
λ_i	=	Costante di decadimento del radionuclide <i>iesimo</i> [h ⁻¹]
F	=	Frazione oraria di evaporazione [h ⁻¹]
A_i	=	Attività del radionuclide <i>iesimo</i> utilizzata durante una manipolazione [Bq]
V	=	Volume dell'ambiente [m ³]

Soluzione generale con la condizione al contorno $C(0) = 0$

$$C_i(t) = \frac{F \times A_i}{V \times (R + \lambda_i)} \times \left[1 - e^{-(R + \lambda_i) \times t} \right] \longrightarrow t \rightarrow \infty \quad C_{eq} = \frac{F \times A_i}{V \times R}$$



Stima della contaminazione volumetrica: terapia con ^{131}I

- ◆ si può assumere che il contributo alla radiocontaminazione in aria sia dovuto principalmente all'esperto dei pazienti
- ◆ si può assumere che una frazione oraria pari a 3.9×10^{-6} della attività somministrata venga escreta con un $T_{1/2}$ effettivo pari a circa 22 ore e che l'andamento della funzione di escrezione per esalazione sia di tipo monoesponenziale.
(K. Nishizawa, et al., Monitoring of I excretions and used materials of patients treated with ^{131}I , Health Physics, Vol 38 pp.467-481, 1980)



Stima della contaminazione volumetrica: terapia con ^{131}I

$$\frac{dC}{dt} = -(R + \lambda_{I-131}) \times C_{I-131} + F(t) \times \frac{A(t)_{I-131}}{V}$$

C_{I-131}	=	Concentrazione in aria del I-131 [Bq/m ³]
R	=	Numero dei ricambi aria per ora [h ⁻¹]
λ_{I-131}	=	Costante di decadimento del ^{131}I [h ⁻¹]
F	=	Frazione oraria di esalazione [h ⁻¹]
λ_e	=	Costante di decadimento per espirazione del ^{131}I [h ⁻¹]
$A(t)_{I-131}$	=	Attività [Bq] di ^{131}I incorporata dal paziente al tempo t dopo la somministrazione = $F_0 \times e^{-\lambda_0 t}$
V	=	Volume dell'ambiente [m ³]



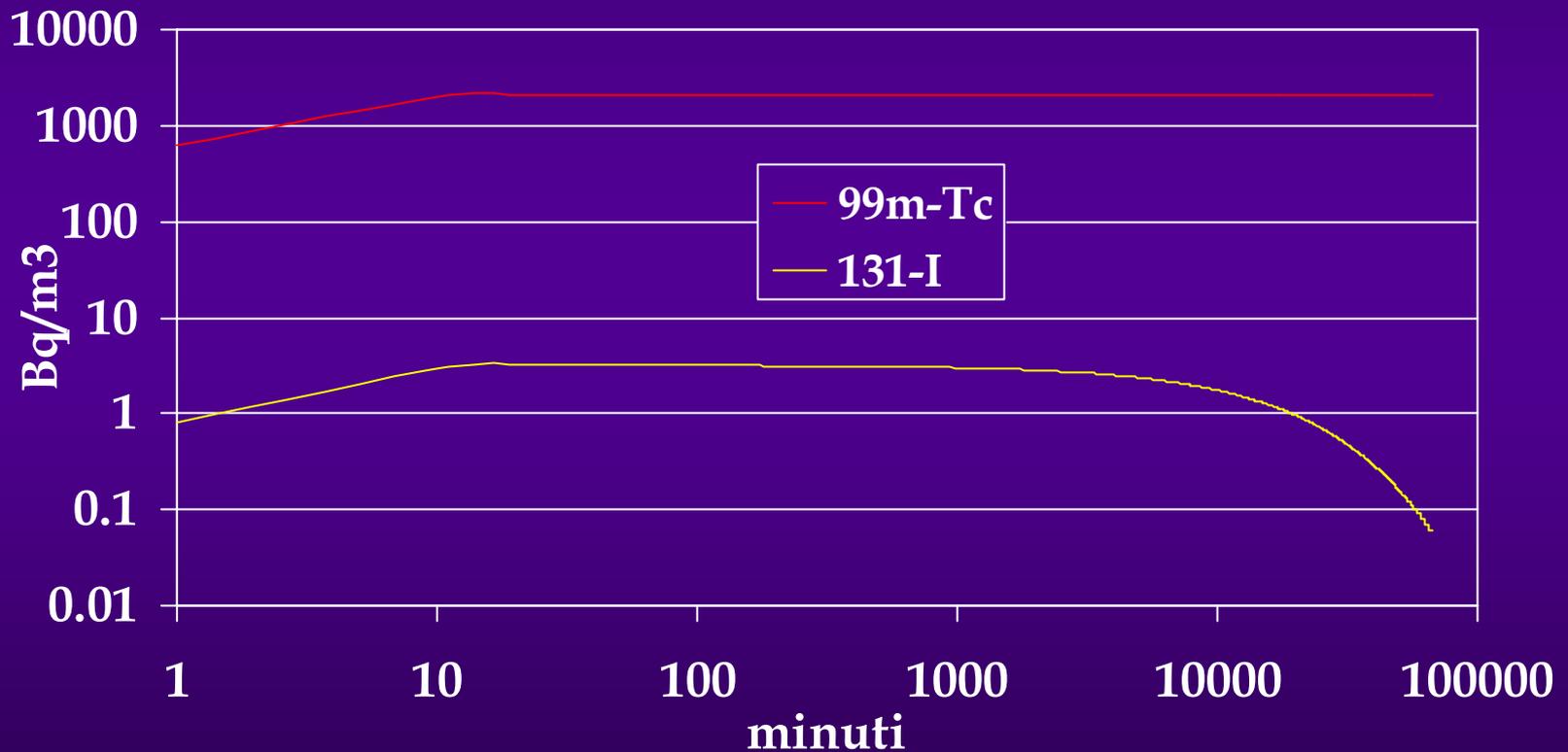
Stima della contaminazione volumetrica: terapia con ^{131}I

Soluzione generale con la condizione al contorno $C(0) = 0$

$$C(t) = \frac{F \times A_{I-131}}{V \times (R + \lambda - \lambda_e)} \times \left[e^{-\lambda_e \times t} - e^{-(R+\lambda) \times t} \right]$$



Andamento nel tempo della contaminazione volumetrica





Incorporazione per inalazione

- ◆ Brodsky (1980) riporta una frazione di attività inalata a seguito di incidenti inferiore a 10^{-6}
- ◆ Nishiyama e coll. (1980) riportano di non aver riscontrato contaminazioni anche dopo inalazione profonda di soluzione di ^{99m}Tc , né di aver riscontrato presenza di contaminazione nel muco nasale di operatori contaminati
- ◆ Eadie e coll. (1980) riportano valori di concentrazione radioattiva di ^{99m}Tc sotto cappa di 2.8 Bq/m^3 nel caso di eluizione del generatore e di 0.12 Bq/m^3 nel caso di preparazione delle dosi da somministrare



Attività terapeutiche con ^{131}I

- ◆ Le soluzioni di radioiodio presentano un alto potenziale di volatilizzazione.
- ◆ La volatilità dipende dalle caratteristiche della soluzione (può variare di un fattore fino a 100).
- ◆ Le capsule presentano una volatilizzazione potenziale del radioiodio inferiore. Essa è però a sua volta estremamente variabile e in alcuni casi può superare quella di una buona soluzione



Incorporazione per inalazione

- ◆ Pollock e Myser (1979) determinano un valore di f_1 pari a 10^{-5} h^{-1} per una soluzione di ^{131}I a contatto con l'aria
- ◆ Nishiyama e coll. (1980) indicano una frazione incorporata di soluzione volatile di ^{131}I -ioduro, da parte di operatori addetti alla somministrazione, pari a 6.3×10^{-6}



Attività terapeutiche con ^{131}I

- ◆ Browning e coll. (1978) riportano i seguenti valori di concentrazione radioattiva nell'ambiente (sorgenti aperte per 1 h):
 - ◆ 36 Bq/m^3 per GBq di ^{131}I soluzione
 - ◆ 0.56 Bq/m^3 per GBq di ^{131}I in capsule
- ◆ Nishiyama e coll. (1980) riportano, invece, i seguenti valori di attività incorporata come frazione dell'attività manipolata:
 - ◆ 6.3×10^{-6} per soluzione volatile
 - ◆ 2.2×10^{-6} per soluzione volatile sotto cappa
 - ◆ 7×10^{-8} per soluzione non volatile



Incorporazione per inalazione

Si può ritenere che, ai fini della valutazione del rischio di inalazione nella normale attività di impiego di sostanze radioattive a scopo diagnostico o terapeutico (**con esclusione dello ^{131}I**), sia ampiamente cautelativo considerare un tasso di evaporazione f_1 pari a $10^{-3} \div 10^{-4}$ e frazioni inalate dell'ordine di un fattore pari a 10^{-6} rispetto all'attività impiegata



Attività terapeutiche con ^{131}I

- ◆ Il paziente è sorgente di contaminazione ambientale
- ◆ Nishizawa e coll. (1980) hanno ricavato la frazione dell'attività somministrata immessa in aria dal paziente (espirazione e traspirazione):

$$1.4 \cdot 10^{-5} - 1.2 \times 10^{-7} \text{ h}^{-1}$$

- ◆ Blum e coll. hanno misurato la quantità totale di radioattività che va a contaminare il materiale presente nella camera di degenza a seguito di una terapia:

$$22.2 \text{ MBq per } 3.7 \text{ GBq somministrati pari ad una frazione di } 6 \times 10^{-3}$$



Incorporazione per inalazione: risospensione

- ◆ Assumendo una contaminazione superficiale costante di circa 30 kBq/m^2 (corrispondente al livello di registrazione per radionuclidi di classe A) e un fattore di risospensione dell'ordine di circa $4 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$, si ottiene un valore di concentrazione in aria di particolato radiocontaminato di circa 1 Bq/m^3
- ◆ Pertanto tale fenomeno non contribuisce in maniera significativa alla eventuale radiocontaminazione volumetrica, se non in caso di versamento di rilevanti quantità di materiale radioattivo ed il suo contributo quantitativo rientra nell'errore con cui viene effettuata la stima.



Esempio di calcolo della concentrazione di sostanze radioattive in aria

Volume della Camera Calda:	27 m ³
Frazione Oraria di evaporazione:	0.001 h ⁻¹
Numero ricambi aria/ora Camera Calda:	21 h ⁻¹
Numero ricambi aria/ora Attesa Calda:	17 h ⁻¹

Radionuclide	Attività utilizzata/Paziente [MBq] presa a riferimento	C_{eq} o C_{max} [Bq/m³]
99m-Tc	1200	2 E+03
201-Tl	85	1 E+02
67-Ga	185	3 E+02
123-I	185	3 E+02
111-In	30	5 E+01
51-Cr	7.4	1 E+01
59-Fe	3.7	7 E+00
131-I Capsule	555	3 E+00
89-Sr	150	3 E+02
125-I	0.2	3 E-01



Esempio di stima dell'incorporazione per inalazione

Volumetria inspirata*

0.95 m³/h

Ore complessive di esposizione

2000 h/anno

Radionuclide	Pazienti/anno	Ore di esposizione/anno	Possibile incorporazione [Bq]
99m-Tc	6500	1885	4 E+06
201-Tl	100	29	4 E+03
67-Ga	12	3	1 E+03
123-I	10	3	9 E+02
111-In	25	7	4 E+02
51-Cr	50	14	2 E+02
59-Fe	10	3	2 E+01
131-I	3	1	3 E+00
89-Sr	25	7	2 E+03
125-I	150	43	1 E+01

* I.C.R.P. Publication N.23 "Reference Man: anatomical, Physiological and metabolic Characteristics"



Esempio di stima della dose efficace da inalazione

Radionuclide	Possibile incorporazione [Bq]	Coefficiente Sv/Bq per dose efficace*	Dose efficace impegnata [μ Sv/anno]
99m-Tc	4 E+06	2.9E-11	110
201-Tl	4 E+03	7.6E-11	0
67-Ga	1 E+03	2.8E-10	0
123-I	9 E+02	1.1E-10	0
111-In	4 E+02	3.1E-10	0
51-Cr	2 E+02	3.6E-11	0
59-Fe	2 E+01	3.5E-09	0
131-I	3 E+00	1.1E-08	0
89-Sr	2 E+03	7.5E-09	14
125-I	1 E+01	7.3E-09	0
TOTALE			135

*I.C.R.P. Publication n. 68 "Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers, 1995



Incorporazione per ingestione

Il principale veicolo di incorporazione di sostanze radioattive, è costituito dalla contaminazione asportabile dalle superfici di lavoro eventualmente depositata sull'epidermide e da qui veicolata alla bocca

$$Q_i = A_i \times f_{1i} \times f_{2i}$$

Q_i =Attività del radionuclide i-esimo incorporabile annualmente per ingestione [Bq]

A_i =Attività del radionuclide i-esimo somministrabile nel corso dell'anno solare [Bq]

f_{1i} =Frazione di A_i che dà luogo a contaminazione superficiale [adimensionale]

f_{2i} =Frazione dell'attività depositata sulle superfici che dà luogo a contaminazione interna [adimensionale]



Incorporazione per ingestione

- ◆ Brodsky (1980) indica una frazione di radioattività impiegata incorporata nella normale attività operativa inferiore a 10^{-6} e che cautelativamente può essere considerato un valore di 10^{-5}
- ◆ Nishiyama e coll. (1980) riportano che la più importante via di incorporazione è quella mani-bocca durante la preparazione del radiofarmaco e una frazione ingerita inferiore a 10^{-7})



Esempio di stima dell'incorporazione per ingestione (diagnostica)

$$f_1 = 1 \text{ E-03}$$

$$f_2 = 1 \text{ E-02}$$

Radionuclide	Attività utilizzabile/ anno [MBq]	Possibile incorporazione [Bq]
99m-Tc	3700000	4 E+07
201-Tl	7400	7 E+04
67-Ga	2220	2 E+04
123-I	740	7 E+03
111-In	740	7 E+03
51-Cr	370	4 E+03
57-Co	37	4 E+02
58-Co	37	4 E+02
59-Fe	37	4 E+02
131-I	3700	4 E+04
89-Sr	3700	4 E+04
125-I	37	4 E+02



Esempio di stima della dose efficace da ingestione

Radionuclide	Possibile incorporazione [Bq]	Sv/Bq per dose efficace *	Dose efficace impegnata [μ Sv/anno]
99m-Tc	4 E+07	2.2E-11	814
201-Tl	7 E+04	9.5E-11	7
67-Ga	2 E+04	1.9E-10	4
123-I	7 E+03	2.1E-10	2
111-In	7 E+03	2.9E-10	2
51-Cr	4 E+03	3.8E-11	0
57-Co	4 E+02	2.1E-10	0
58-Co	4 E+02	7.4E-10	0
59-Fe	4 E+02	1.8E-09	0
131-I	4 E+04	2.2E-08	814
89-Sr	4 E+04	2.6E-09	96
125-I	4 E+02	1.5E-08	6
TOTALE			1745

*I.C.R.P. Publication n. 68 "Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers, 1995



Attività annua impiegata a scopo diagnostico comportante l'assorbimento di una dose efficace impegnata per contaminazione interna pari a 1 mSv

Radionuclide	$E(50)/A_{\text{inalata}}$ (Sv/Bq)	$E(50)/A_{\text{ingerita}}$ (Sv/Bq)	Attività impiegata comportante $E(50) = 1 \text{ mSv}$ (GBq/anno)
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	2.9×10^{-11}	2.2×10^{-11}	3205
^{131}I	1.1×10^{-8}	2.2×10^{-8}	8
^{67}Ga	2.8×10^{-10}	1.9×10^{-10}	334
^{111}In	3.1×10^{-10}	2.9×10^{-10}	295
^{201}Tl	7.6×10^{-11}	9.5×10^{-11}	1170



Attività terapeutiche con ^{131}I

- ◆ Sulla base di questi dati è possibile ricavare l'attività annua manipolata tale da comportare una determinata dose efficace impegnata
- ◆ In particolare, nel solo caso di somministrazione con capsule o con soluzioni non volatili, si stimano dosi efficaci impegnate di 1 mSv ogni circa 400 - 500 GBq impiegati



Esempi di stima dosimetrica in caso di eventi anomali

Puntura accidentale e incorporazione di 3.7 MBq di ^{99m}Tc /Pertecentato

*I.C.R.P. Publication n.80, Radiation Dose to patients from radiopharmaceuticals, Addendum to ICRP 53, 1998

Organo Maggiormente esposto	mGy/MBq*	Dose assorbita [mGy]	mSv/MBq*	Dose efficace assorbita [mSv]
Intestino	5.7E-02	0.21	1.3E-02	0.05

Incontinenza dopo la somministrazione di ^{99m}Tc /DTPA per scintigrafia renale

Attività somministrata (MBq)	220
Frazione escreta	50%
Superficie contaminata (m ²)	1
Contaminazione superficiale (MBq/m ²)	110
Risospensione (m ⁻¹)	1 E-03
Contaminazione volumetrica (Bq/m ³)	110000
Durata dell'esposizione (h)	0.5

Possibile incorporazione [Bq]	Coefficiente Sv/Bq per dose efficace	Dose efficace impegnata [μSv]
52250	2.9E-11	1.5



Valutazione qualitativa del rischio

<i>Tipo di attività</i>	<i>Rischio da irradiazione esterna</i>	<i>Rischio da irradiazione interna</i>
<i>“in vivo” diagnostica</i>	<i>moderato - alto</i>	<i>basso - moderato</i>
<i>“in vivo” terapeutica</i>	<i>alto</i>	<i>moderato - alto</i>
<i>“in vitro”</i>	<i>basso - moderato</i>	<i>basso</i>



In ogni caso:

**maggiore è la conoscenza diretta della situazione lavorativa,
migliore sarà la stima del rischio effettuata**

**un buon progetto risolve più della metà dei problemi
radioprotezionistici in fase di esercizio**