

# 4 Valutazioni dosimetriche

La **dose** è la grandezza che descrive gli **effetti delle radiazioni ionizzanti** sugli organismi viventi. Il calcolo della dose è complicato perché deve tener conto delle diverse vie di esposizione, del tipo di radiazione e dello specifico radionuclide. In questo capitolo sono presentate le **valutazioni dosimetriche** sia per la popolazione piemontese in generale che per la popolazione che vive in prossimità degli impianti nucleari presenti sul territorio.

## 4.1 Generalità

Dal momento che i danni che si manifestano in seguito all'esposizione alle radiazioni ionizzanti dipendono dalla quantità di energia depositata dalla radiazione ionizzante in un determinato volume, per quantificare gli effetti nocivi sugli organismi viventi e in particolare sull'uomo, si fa uso di una grandezza, detta dose, o più precisamente dose equivalente, che ha appunto le dimensioni di un'energia nell'unità di massa. L'unità di misura di questa grandezza è il Sv, pari a 1 J/kg. Per esprimere in maniera sintetica l'effetto di un campo di radiazioni complesso che interessa in modo disomogeneo i vari organi che compongono il corpo umano si fa poi uso di un'altra grandezza, la *dose efficace*, che è un'estensione del concetto di dose e che tiene conto complessivamente dei diversi tipi di radiazione e della diversa radiosensibilità dei tessuti del corpo umano. In parole semplici la dose efficace altro non è che la dose ponderata sia sul tipo e sull'energia delle radiazioni che sulla radiosensibilità dell'organo bersaglio della radiazione. La *dose efficace* è dunque la grandezza fisica a cui si riferiscono i limiti di legge. In particolare, il D.Lvo 230/95 e ss.mm.ii. fissa un limite di 1 mSv/anno per i membri della popolazione: tale limite riguarda la sola radioattività di origine artificiale ed esclude dal computo anche le esposizioni mediche. In questa pubblicazione vengono riportate le stime della dose efficace complessivamente ricevuta dalla popolazione, con una particolare attenzione al contributo derivante dalle sorgenti artificiali. A questo proposito si farà riferimento a due differenti condizioni di esposizione:

- esposizione della popolazione piemontese nel suo insieme
- esposizione alla radioattività di origine artificiale del cosiddetto gruppo critico, cioè di quella porzione di popolazione che risiede nelle vicinanze dei siti nucleari.

Le modalità di calcolo e i presupposti per questi due casi sono evidentemente differenti e verranno quindi trattati in due distinti paragrafi. Un ultimo paragrafo sarà infine

dedicato al confronto tra la dose efficace per la popolazione in generale e per la popolazione che vive in prossimità dei siti nucleari (gruppi critici).

## 4.2 Dose alla popolazione piemontese

Il calcolo della dose efficace media alla popolazione deve tener conto di tutti possibili contributi. In generale si è soliti distinguere 3 diverse vie di esposizione:

- i) ingestione      ii) inalazione      iii) irraggiamento

Per ciascuna di queste vie è quindi necessario procedere a un calcolo o a una stima.

### 4.2.1 Dose da ingestione

La dose da ingestione di alimenti contaminati da radionuclidi artificiali è stata calcolata tenendo conto dei risultati ottenuti nell'analisi radiometrica degli alimenti che compongono la dieta. Sono state quindi fatte le seguenti assunzioni:

- sono stati considerati solo il Cs-137 e lo Sr-90: il Cs-137 in quanto è, attualmente, il radioisotopo artificiale più diffuso nell'ambiente, mentre lo Sr-90 perché, pur essendo presente in minor quantità, è chimicamente affine al Calcio e si concentra quindi in modo particolare nel latte, uno degli alimenti centrali per la dieta umana;
- è stato quindi calcolato il valore medio della concentrazione dei suddetti elementi radioattivi per ogni alimento, considerando solo i valori di concentrazione risultati superiori alla sensibilità strumentale (MAR); i valori ottenuti si possono così considerare delle sovrastime dell'effettiva concentrazione media;
- per tutti gli altri radioisotopi artificiali, per i quali non si è mai avuto un riscontro positivo (cioè superiore alla MAR) si è assunto un valore nullo;

Il calcolo della dose media annuale è quindi stato eseguito utilizzando la seguente formula:

$$E = \sum_i C_i \cdot Q_i \cdot k$$

dove  $E$  è la dose efficace,

$C_i$  è la concentrazione del radionuclide nell' $i$ -esimo alimento,

$Q_i$  è la quantità dell' $i$ -esimo alimento consumato in un anno da un individuo;

$k$  è il coefficiente di conversione Sv/Bq per il radionuclide, riportato sul D.Lvo 230/95 e ss.mm.ii.

Seguendo l'approccio sopra descritto sono risultati rilevanti per i calcoli dosimetrici solamente il latte vaccino, la carne bovina e i funghi. I primi due alimenti per la loro importanza nella dieta umana, i funghi per il relativamente elevato contenuto di Cs-137 rispetto agli altri alimenti.

Nel caso del latte è stata effettuata una valutazione separata per il latte di cascina (latte vaccino crudo) e per il latte di centrale (latte pastorizzato fresco). Il primo contiene in genere una quantità maggiore di radioattività, in quanto i bovini in questo tipo di allevamenti si nutrono più frequentemente di foraggio fresco, spesso prodotto in aree montane dove la ricaduta radioattiva di Chernobyl è stata più massiccia.

Per i consumi medi annuali degli alimenti è stato fatto riferimento alla dieta media proposta da UNSCEAR <sup>[16]</sup> e riportata nella seguente tabella.

**Tabella 4.1: Dieta media della popolazione utilizzata per i calcoli dosimetrici <sup>[16]</sup>.**

Classe di popolazione	Consumi medi annuali kg/anno		
	Lattanti < 1 anno	Bambini 7-12 anni	Adulti >17 anni
latte e derivati	120	110	105
carne	15	35	50
cereali	45	90	140
vegetali freschi	20	40	60
frutta	60	110	170
pesce	5	10	15
acqua e bevande	150	350	500

Di seguito sono quindi riportati i risultati delle valutazioni dosimetriche ottenuti con la metodologia sopra descritta per i bambini (con età inferiore a 1 anno) e per gli adulti.

Nei calcoli dosimetrici, per quanto concerne lo Sr-90, i cui valori estremamente bassi sono ormai prossimi alla sensibilità strumentale, sono stati utilizzati per le stime relative agli anni 2008 e 2009 i dati raccolti in precedenza. La stima della dose totale (Cs-137 + Sr-90) è stata ottenuta sommando al contributo del Cs-137 quello dello Sr-90 relativo al latte vaccino crudo.

**Tabella 4.2: Dose da ingestione di alimenti contaminati da Cs-137 e Sr-90 per i lattanti (< 1 anno).**

Alimento	Consumo coeff.		Cs-137 Bq/kg				Dose efficace mSv/anno			
	kg/anno	Sv/Bq	2006	2007	2008	2009	2006	2007	2008	2009
Carne bovina	15	9,60E-09	2,253	0,990	1,240	0,247	3,24E-04	1,43E-04	1,79E-04	3,56E-05
Latte vaccino crudo	120	9,60E-09	0,473	0,573	1,336	1,455	5,45E-04	6,60E-04	1,54E-03	1,68E-03
Latte vaccino pastorizzato fresco	120	9,60E-09	0,226	0,143	0,111	0,183	2,60E-04	1,65E-04	1,28E-04	2,11E-04
Alimento	Consumo coeff.		Sr-90 Bq/kg				Dose efficace mSv/anno			
	kg/anno	Sv/Bq	2006	2007	2008	2009	2006	2007	2008	2009
Latte vaccino crudo	120	4,70E-08	0,045	0,061	0,045	0,050	2,54E-04	3,44E-04	2,54E-04	2,84E-04
Latte vaccino pastorizzato fresco	120	4,70E-08	0,034	0,046	*	0,04	1,92E-04	2,59E-04	*	2,26E-04
<b>Totale Cs-137 + Sr-90</b>							<b>1,12E-03</b>	<b>1,15E-03</b>	<b>1,97E-03</b>	<b>2,00E-03</b>
Limite di non rilevanza radiologica mSv								1,00E-02		
Limite dose efficace mSv/anno								1,00E+00		

**Tabella 4.3: Dose efficaci da ingestione di alimenti contaminati da Cs-137 e Sr-90 per gli adulti (> 17 anni).**

Alimento	Consumo coeff.		Cs-137 Bq/kg				Dose efficace mSv/anno			
	kg/anno	Sv/Bq	2006	2007	2008	2009	2006	2007	2008	2009
Carne bovina	50	1,30E-08	2,253	0,99	1,24	0,247	1,46E-03	6,44E-04	8,06E-04	1,61E-05
Latte vaccino crudo	105	1,30E-08	0,612	0,676	1,8	1,455	8,35E-04	9,23E-04	2,46E-03	1,99E-03
Latte vaccino pastorizzato fresco	105	1,30E-08	0,226	0,143	0,111	0,183	3,08E-04	1,95E-04	1,52E-04	2,50E-04
Funghi	1	1,30E-08	50	70	26	23,3	6,50E-04	9,10E-04	3,38E-03	3,03E-04
Alimento	Consumo coeff.	Sr-90 Bq/kg				Dose efficace mSv/anno				
	kg/anno	Sv/Bq	2006	2007	2008	2009	2006	2007	2008	2009
Latte vaccino crudo	105	2,80E-08	0,045	0,061	0,045	0,050	1,32E-04	1,79E-04	1,32E-04	1,48E-04
Latte vaccino pastorizzato fresco	105	2,80E-08	0,034	0,046	*	0,04	1,00E-04	1,35E-04	*	1,18E-04
<b>Totale Cs-137 + Sr-90</b>							<b>3,08E-03</b>	<b>2,66E-03</b>	<b>3,73E-03</b>	<b>2,60E-03</b>
Limite di non rilevanza radiologica mSv								1,00E-02		
Limite dose efficace mSv/anno								1,00E+00		

Come si osserva dalle tabelle, la dose efficace da ingestione di radionuclidi artificiali è dell'ordine di qualche  $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ , cioè estremamente bassa, circa tre-quattro ordini di grandezza inferiore al limite di  $1 \text{ mSv}/\text{anno}$  imposto dalla normativa e quasi un ordine di grandezza inferiore al limite di non rilevanza radiologica ( $10 \mu\text{Sv}/\text{anno}$ ). Assai più consistente è il contributo dovuto all'ingestione di radionuclidi di origine naturale (K-40 e radionuclidi delle famiglie radioattive di U-238 e Th-232), per i quali però non si applica il limite di legge di  $1 \text{ mSv}/\text{anno}$ : per essi si può infatti stimare un contributo  $0,304 \text{ mSv}/\text{anno}$  <sup>[17]</sup>.

## 4.2.2 Dose da inalazione

Il sistematico monitoraggio della radioattività in atmosfera (vedasi di [paragrafo 1.1.1](#) Dose gamma in aria e [paragrafo 1.1.2](#) Particolato atmosferico), permette di escludere significative presenze di radionuclidi artificiali. Ne consegue che la componente artificiale della dose da inalazione è insignificante ( $< 1 \text{ nSv}/\text{anno}$ , almeno 4 ordini di grandezza inferiore al limite di non rilevanza radiologica) e dunque può senz'altro essere trascurata. Diverso è il discorso per la radioattività naturale. Infatti il radon, gas radioattivo discendente dall'Uranio-238, liberandosi dal terreno e dai materiali da costruzione, si disperde in atmosfera e tende ad accumularsi nei luoghi chiusi, specialmente se poco aerati. Decadendo, genera inoltre alcuni radionuclidi (figli) che attaccandosi al particolato vengono inalati e trattenuti nell'apparato respiratorio. Ciò determina un contributo di dose assai variabile (i livelli di radon sono assai differenti da ambiente a ambiente) ma comunque considerevole: si può infatti stimare un valore medio di  $1,49 \text{ mSv}/\text{anno}$ . Va ricordato che anche per il radon, facendo parte della radioattività naturale, non si applica il limite di dose annuo di  $1 \text{ mSv}$ . Lo studio del radon, per la sua importanza e peculiarità, costituisce un settore a sé stante della radioattività naturale e non verrà quindi trattato in dettaglio in questo rapporto: si rimanda per approfondimenti a specifiche pubblicazioni <sup>[18]</sup>.

### 4.2.3 Dose da irraggiamento

Anche il principale contributo alla dose da irraggiamento è addebitabile ai radionuclidi naturali contenuti nel suolo. Una quota di norma inferiore ma apprezzabile e che aumenta con l'altitudine, è dovuta all'irraggiamento diretto dei raggi cosmici. Anche il Cs-137, depositatosi sul suolo in seguito all'incidente di Chernobyl e tuttora presente, contribuisce all'irraggiamento anche se, in generale, in misura assai più contenuta. Uno specifico studio sulla dose gamma da irraggiamento sviluppato da Arpa ha permesso di stimare in 0,779 mSv/anno l'irraggiamento medio di origine naturale (radionuclidi + raggi cosmici) e in 0,074 mSv/anno quello addebitabile al solo Cs-137 <sup>[1]</sup>.

### 4.2.4 Dose efficace totale

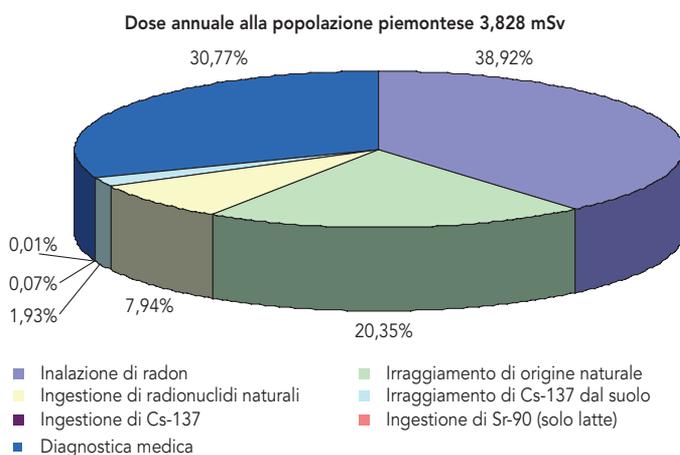
La somma dei contributi (medi) della dose da ingestione, da inalazione e da irraggiamento fornisce la dose efficace totale media che può essere attribuita alla popolazione piemontese. Nella tabella e nelle figure seguenti sono riportati i risultati della dose efficace annuale dovuta alle tre vie di esposizione, distinguendo tra radioattività artificiale e naturale.

I valori presentati non si riferiscono a una particolare classe di età, ma a un generico individuo: laddove erano infatti disponibili stime differenziate per classi di età è stato preso come rappresentativo il valore più alto.

Sia nella **Tabella 4.4** che in **Figura 4.1** è stata aggiunta anche la dose media dovuta a esposizioni per scopi medici: si tratta come si vede di un valore importante, 1,178 mSv/anno, il 31% della dose complessiva, che raggiunge i 3,828 mSv/anno.

Scorporando il contributo dovuto alle esposizioni mediche, si ottiene una dose efficace media di 2,65 mSv/anno, in grandissima parte dovuta alla componente naturale (97%) con il residuo 3% di origine artificiale (pari a 0,077 mSv/anno) attribuibile quasi esclusivamente al solo irraggiamento dal suolo del Cs-137 (si veda **Figura 4.2**). In **Figura 4.3** è infatti mostrata la suddivisione del contributo artificiale nelle sue 3 componenti principali:

- irraggiamento da Cs-137 nel suolo (96%);
- ingestione Cs-137 (3,6%);
- ingestione Sr-90 (0,4%).



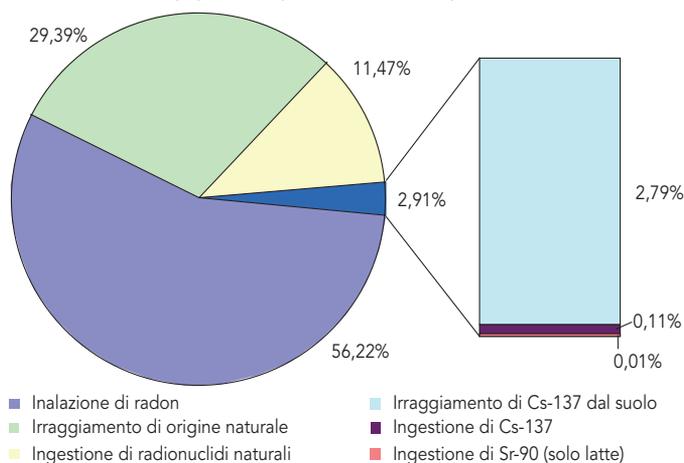
**Figura 4.1**

Contributo delle varie vie di esposizione alla dose annuale alla popolazione piemontese.

**Tabella 4.4: Dose media annuale alla popolazione piemontese dovuta alle varie vie di esposizione.**

Vie di esposizione	mSv/anno	Fonte dei dati
Inalazione di radon	1,49	Dossier ENEA
Irraggiamento di origine naturale	0,779	Arpa Piemonte
Ingestione di radionuclidi naturali	0,304	Dossier ENEA
Irraggiamento di Cs-137 dal suolo	0,074	Arpa Piemonte
Ingestione di Cs-137	0,0029	Arpa Piemonte
Ingestione di Sr-90 (solo latte)	0,0003	Arpa Piemonte
Irraggiamento da nube contaminata	tascurabile	-
Inalazione di Cs-137	tascurabile	-
Diagnostica medica	1,178	Dossier ENEA
<b>totale</b>	<b>3,828</b>	

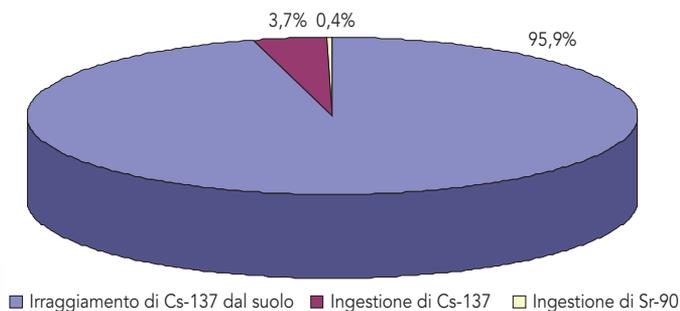
**Dose annuale alla popolazione piemontese senza esposizioni mediche 2,650 mSv**



**Figura 4.2**

Contributo delle varie vie di esposizione alla dose annuale alla popolazione piemontese. Non sono state considerate le esposizioni a scopo medico e sono evidenziati i contributi della radioattività di origine artificiale.

**Dose annuale alla popolazione piemontese da radionuclidi artificiali 0,077 mSv**



**Figura 4.3**

Contributo dei diversi radionuclidi e delle varie vie di esposizione alla dose annuale alla popolazione piemontese da radionuclidi artificiali.

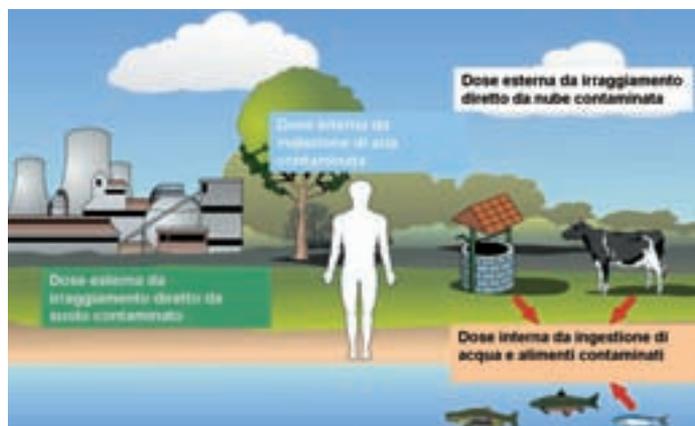
## 4.3 Dose ai gruppi critici della popolazione

Come già esposto in precedenza, la normativa vigente fissa, per l'esposizione a radiazioni di origine artificiale, il limite di *dose efficace E* per gli individui della popolazione in 1 mSv/anno e in 10  $\mu$ Sv/anno il *limite per la non rilevanza radiologica*, soglia al di sotto della quale si può ritenere del tutto trascurabile l'impatto radiologico. Sulla base dei risultati delle misure effettuate nell'ambito delle reti di monitoraggio dei siti nucleari è possibile calcolare la *dose efficace* per i *gruppi critici* della popolazione.

La stima della *dose efficace* deve necessariamente tenere conto di tutte le possibili vie di esposizione – *vie critiche* – per tutti gli individui dei *gruppi critici*. Vanno pertanto valutati tre contributi specifici: esposizione esterna, ingestione e inalazione.

Gli effluenti liquidi e gassosi, immessi nell'ambiente secondo le rispettive formule di scarico, sono responsabili della eventuale contaminazione delle matrici ambientali: acqua superficiale, sedimenti fluviali, suolo, acqua di falda, particolato atmosferico. Possono inoltre essere responsabili in maniera diretta della contaminazione delle matrici alimentari (ad esempio attraverso la deposizione al suolo della contaminazione presente in aria).

La contaminazione delle matrici ambientali può trasferirsi alle matrici alimentari di produzione locale: pesce, latte, riso, ortaggi; può trasferirsi inoltre all'acqua potabile distribuita dagli acquedotti. Le matrici ambientali contaminate sono responsabili della dose da esposizione esterna e da inalazione, mentre le matrici alimentari contaminate sono responsabili della dose da ingestione.



Rappresentazione schematica delle vie critiche per un individuo appartenente al gruppo critico.

Per il calcolo della dose, conoscendo le specifiche degli impianti da monitorare, sono state assunte le seguenti ipotesi estremamente cautelative:

- sono stati considerati i contributi dei radionuclidi di riferimento (cioè quei radionuclidi che sono presenti negli scarichi degli impianti perché peculiari del loro ciclo produttivo), anche se al di sotto dei limiti di rivelabilità (MAR);
- per i radionuclidi il cui contributo agli scarichi è trascurabile è stato comunque considerato cautelativamente il contributo alla dose efficace con un fattore di peso pari a 0,1 (ad eccezione di Sr-90 per il quale il contributo è stato considerato integralmente, data l'elevata radiotossicità);

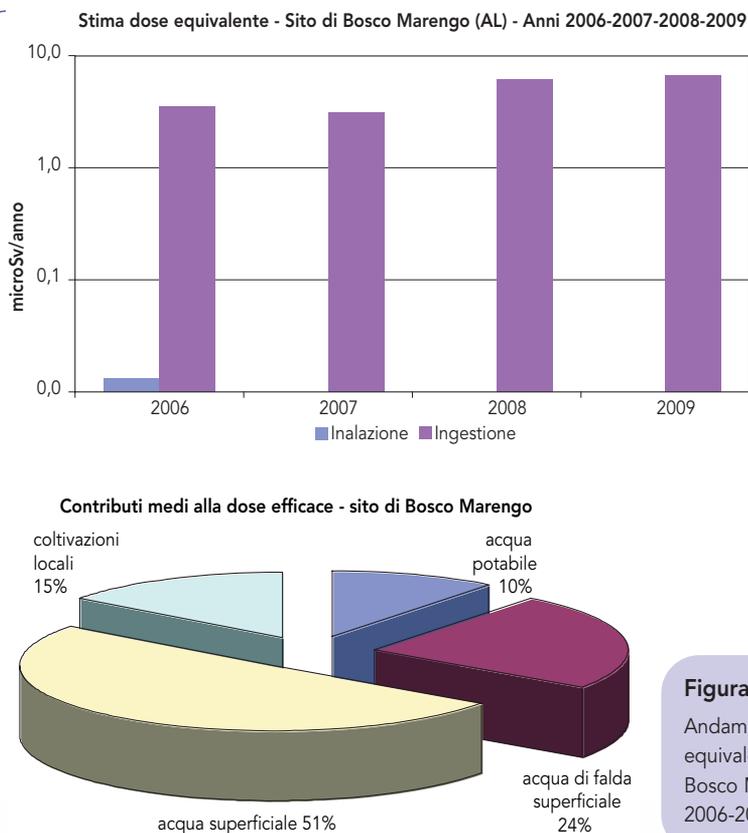
- le concentrazioni di Uranio misurate presso il sito di Bosco Marengo sono imputabili esclusivamente alle attività dell'impianto;
- gli individui della popolazione residente nei pressi degli impianti consumano esclusivamente produzioni locali.

È stata utilizzata per gli individui del *gruppo critico* la dieta media proposta da UNSCEAR già riportata nella precedente **Tabella 4.1** [16].

Pur assumendo le ipotesi estremamente cautelative sopra riportate, nel periodo 2006-2009 oggetto di questo rapporto, per tutti i siti nucleari piemontesi è sempre stato ampiamente rispettato non solo il limite di 1 mSv/anno per gli individui del *gruppo critico* ma anche il *limite di non rilevanza radiologica* di 10  $\mu$ Sv/anno. Per tutti i siti si ricava infatti un contributo di dose al *gruppo critico* di qualche  $\mu$ Sv/anno. Di seguito viene presentato il dettaglio dei calcoli dosimetrici per ciascun sito.

### SITO DI BOSCO MARENGO

In **Figura 4.4** è riportato l'andamento nel tempo della *dose efficace* presso il sito di Bosco Marengo ed in particolare nel grafico a torta sono rappresentati i contributi percentuali medi alla *dose efficace*, ad evidenziare che diversi comparti ambientali contri-



**Figura 4.4**

Andamento della dose equivalente presso il sito di Bosco Marengo nel periodo 2006-2009.

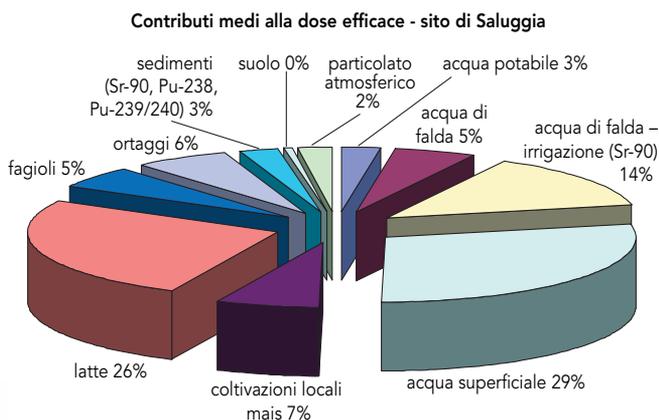
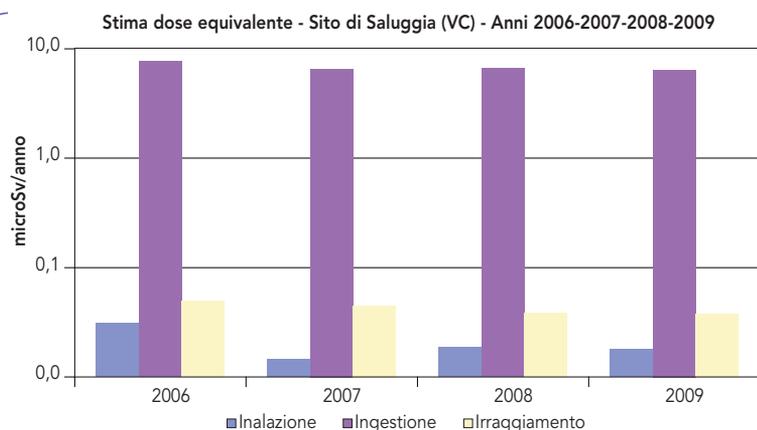
buiscono in maniera uniforme alla *dose efficace*. Si rammenta a tale proposito che l'Uranio è un elemento radioattivo naturale pressoché ubiquitario.

Il contributo da inalazione è stato valutato solo per l'anno 2006 quando, in occasione del trasferimento del combustibile fresco (si veda il [paragrafo 2.3.4](#)) sono state effettuate misure sul particolato atmosferico, mentre il contributo da irraggiamento è stato ritenuto trascurabile in relazione ai radionuclidi di interesse.

Analoghe considerazioni possono essere formulate per la tossicità chimica dell'Uranio.

## SITO DI SALUGGIA

In [Figura 4.5](#) è riportato l'andamento nel tempo della dose efficace presso il sito di Saluggia ed in particolare nel grafico a torta sono rappresentati i contributi percentuali medi alla dose efficace, ad evidenziare che alcuni comparti ambientali – quali l'acqua potabile, il particolato atmosferico ed il suolo – forniscono un contributo trascurabile alla dose efficace. Si evidenzia inoltre che il contributo fornito dalla contaminazione dell'acqua di falda superficiale (vedasi il [paragrafo 2.4.3](#)) è confrontabile a quelli dell'acqua superficiale e del latte.

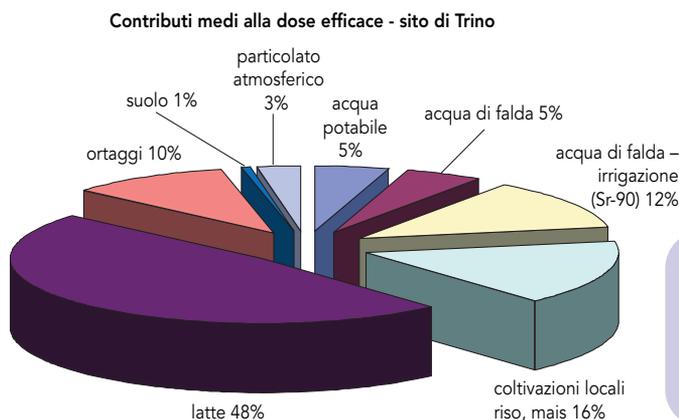
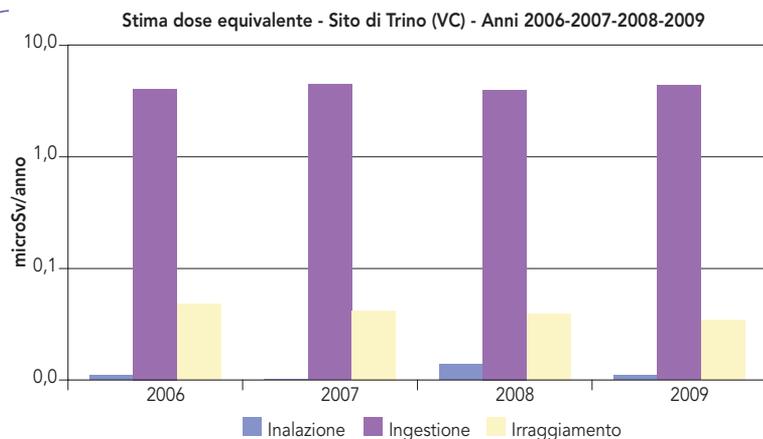


**Figura 4.5**

Andamento della dose efficace presso il sito di Saluggia nel periodo 2006-2009.

## SITO DI TRINO

In **Figura 4.6** è riportato l'andamento nel tempo della dose efficace presso il sito di Trino ed in particolare nel grafico a torta sono rappresentati i contributi percentuali alla dose efficace, ad evidenziare che alcuni comparti ambientali – quali l'acqua potabile, l'acqua di falda superficiale, il particolato atmosferico ed il suolo – forniscono un contributo trascurabile alla dose efficace. Si evidenzia inoltre che il maggior contributo alla dose è fornito dal latte.



**Figura 4.6**

Andamento della dose efficace presso il sito di Trino nel periodo 2006-2009.

## 4.4 Confronto tra la dose alla popolazione nel suo insieme e la dose ai gruppi critici

Dal confronto dei risultati delle stime dosimetriche effettuate per la popolazione piemontese nel suo insieme e il gruppo critico costituito dai cittadini che risiedono nelle vicinanze delle installazioni nucleari si possono ricavare alcune interessanti considerazioni.

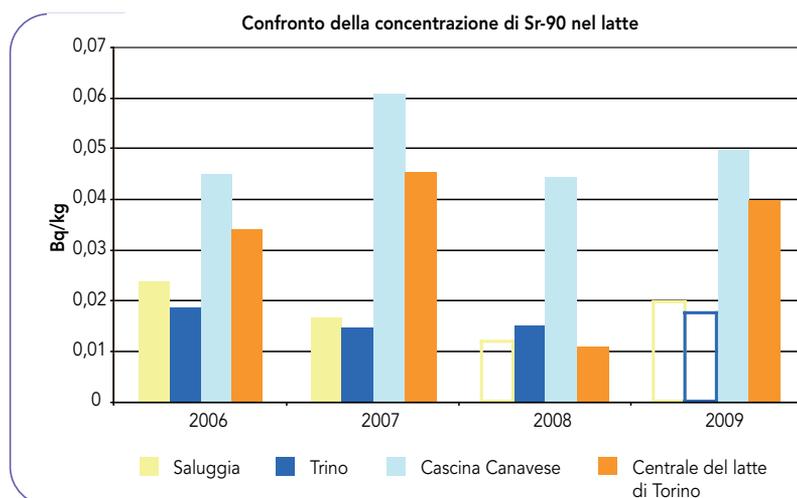
Limitandosi infatti al contributo della sola radioattività di origine artificiale, si può vedere infatti che la dose media da radioattività artificiale per il cittadino piemontese medio

risulta essere di circa  $77 \mu\text{Sv}/\text{anno}$  (Tabelle 4.3 e 4.4), un valore decisamente più elevato (di circa un ordine di grandezza) di quello che si calcola per i gruppi critici dei tre siti nucleari ( $< 10 \mu\text{Sv}/\text{anno}$ ) come illustrato nel paragrafo precedente. Questo risultato, per certi versi sorprendente, è essenzialmente dovuto a due motivi:

- il contributo dovuto ai reflui rilasciati dai siti nucleari nell'ambiente circostante i siti stessi è assai contenuto e tende a confondersi con il contributo dovuto ai residui del fallout di Chernobyl;
- I valori di concentrazione di Cs-137 nei suoli misurati nell'ambito delle reti locali di monitoraggio sono inferiori al valore medio piemontese e non distinguibili dal contributo dell'incidente di Chernobyl; nella valutazione della dose da irraggiamento esterno, in via cautelativa, si è comunque attribuita agli impianti una frazione della dose dovuta al Cs-137 presente nei suoli, tenendo conto anche dei fattori di occupazione, delle vie critiche e della distribuzione della contaminazione.

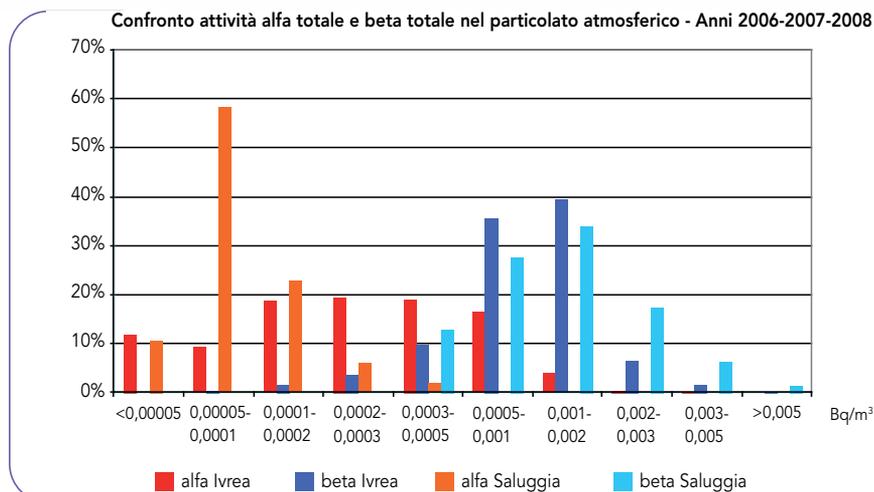
Questo fatto può essere bene evidenziato anche da un confronto diretto tra le concentrazioni di radionuclidi di origine artificiale nelle matrici prelevate intorno ai siti nucleari e quelle rilevate in matrici analoghe, prelevate in altre zone del Piemonte (Figure 4.7 e 4.8). In genere si hanno concentrazioni simili, ma in alcuni casi quelle intorno ai siti nucleari sono persino leggermente inferiori.

Queste valutazioni indicano, in conclusione, che la presenza dei siti nucleari non è causa di un significativo aumento della dose efficace alla popolazione che vive nelle vicinanze degli impianti stessi.



**Figura 4.7**

Concentrazione di Sr-90 nel latte prelevato vicino ai siti nucleari e nel latte prelevato in altre zone del Piemonte. Le concentrazioni risultate inferiori alla sensibilità strumentale sono state rappresentate con rettangoli trasparenti corrispondenti alla sensibilità stessa.



**Figura 4.8**

Distribuzione percentuale dell'attività alfa totale e beta totale nel particolato atmosferico prelevato a Ivrea e prelevato a Saluggia. Non si notano particolari differenze, a parte una distribuzione leggermente più larga per l'attività alfa misurata a Ivrea.