

LA RADIOATTIVITÀ NATURALE NELLE ACQUE TERMALI E MINERALI: PROBLEMATICHE DOSIMETRICHE E NORMATIVE PER LA POPOLAZIONE

C. Nuccetelli*, F. Bochicchio*, G. Ruocco^

** Istituto Superiore di Sanità*

^ Ministero della Salute

INTRODUZIONE

Il consumo in Italia di acqua minerale imbottigliata è rilevante e in continua crescita e la pratica di brevi soggiorni presso stabilimenti termali, per motivi turistici o medico-cosmetici, è pure molto diffusa. Sia le acque minerali imbottigliate che le acque termali possono contenere radionuclidi di origine naturale, la cui concentrazione, in talune situazioni, può portare a problemi di radioprotezione sia per i lavoratori che per la popolazione.

La protezione dei lavoratori dalla radioattività di origine naturale è regolata in Italia dal D.L.vo 241/00 che recepisce la Direttiva Europea 96/29/Euratom, e non viene considerata in questo lavoro. D'altra parte, sia in Italia che nell'Unione Europea, la protezione dei consumatori dalla radioattività naturale nelle acque minerali non è regolata da alcuna legge e le esposizioni ad acque termali non sono trattate in dettaglio.

Per questi motivi il Ministero della Salute, che ha il compito di autorizzare le attività termali e la commercializzazione delle acque minerali imbottigliate sulla base delle caratteristiche dell'acqua, ha incaricato il Consiglio Superiore di Sanità di affrontare la questione. Il Consiglio Superiore di Sanità, a sua volta, ha chiesto all'Istituto Superiore di Sanità di fornire sia dei calcoli dosimetrici appropriati che un'analisi della normativa di radioprotezione che potesse essere applicata o adattata a queste situazioni. L'Istituto Superiore di Sanità ha quindi prodotto due diversi rapporti in cui vengono affrontate separatamente le problematiche delle acque termali e di quelle minerali imbottigliate. Sulla base di questi rapporti il Consiglio Superiore di Sanità ha espresso due distinti pareri, recepiti poi dal Ministero della Salute.

In questo lavoro vengono presentati e brevemente discussi, prima per le acque termali e poi per quelle minerali imbottigliate, i risultati dei calcoli dosimetrici e delle valutazioni normativo-radioprotezionistiche contenute nelle relazioni dell'Istituto Superiore di Sanità, nonché una sintesi dei pareri del Consiglio Superiore di Sanità adottati dal Ministero della Salute.

RADIOATTIVITÀ NELLE ACQUE TERMALI

SINTESI DELLA RELAZIONE DELL'ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ

La regolamentazione dell'uso di acque termali radioattive costituisce un problema di non semplice soluzione a causa della mancanza di una normativa specifica sia a livello italiano che europeo. Di conseguenza si è cercato di adattare a questa situazione le normative relative a tematiche simili, quali quelle sulle acque potabili, sulla base dei principi e delle norme generali della radioprotezione.

L'impostazione seguita è di tipo protezionistico, cioè volta al contenimento ed all'eventuale riduzione delle dosi efficaci dei membri della popolazione che usano con diverse modalità acque termali radioattive, sulla base di una valutazione, sia pur cautelativa, di tipiche situazioni espositive. Questo obiettivo è del resto facilitato dall'esistenza di efficaci sistemi di rimozione del radon dall'acqua.

Calcoli dosimetrici per le acque minerali termali

Sono stati analizzati i seguenti usi di acque termali radioattive: 1) ingestione di acqua imbottigliata proveniente da stabilimenti termali; 2) ingestione di acqua presso stabilimenti termali; 3) aerosol-terapia; 4) balneo-terapia; 5) fango-terapia.

Dei vari radionuclidi naturali potenzialmente presenti nelle acque termali, sono stati presi in considerazione solo il ^{222}Rn , ed in caso di ingestione anche il ^{210}Po ed il ^{210}Pb , perché ad essi sono generalmente associate le dosi maggiori.

I calcoli delle dosi efficaci alla popolazione sono stati effettuati per concentrazioni di ^{222}Rn nell'acqua pari a 100 Bq/l per l'uso 1 sopra elencato, e 500 Bq/l per gli usi 2-5.

1) Ingestione di acqua imbottigliata proveniente da stabilimenti termali

Sono state prese in esame due ipotesi di ingestione:

A) consumo nello stesso giorno dell'imbottigliamento (questa situazione è estremamente improbabile, e viene presa in considerazione in quanto ad essa corrisponderebbe il valore massimo teorico di dose efficace);

B) consumo nell'arco di 2 anni successivi all'imbottigliamento, limite entro il quale viene raccomandato il consumo dalla normativa vigente, caso in cui il contributo principale alla dose è invece fornito dal ^{210}Pb e dal ^{210}Po prodotti dal decadimento del ^{222}Rn presente nell'acqua al momento dell'imbottigliamento.

Assunzioni:

- 2 litri d'acqua ingeriti al giorno, 365 giorni/anno
- 100 Bq/l di concentrazione di attività di ^{222}Rn nell'acqua al momento dell'imbottigliamento
- ^{210}Po e ^{210}Pb non presenti nell'acqua al momento dell'imbottigliamento
- fattore di dose per ingestione: $3.5 \cdot 10^{-9}$ Sv/Bq (valore medio per gli adulti, NRC 1999)
- fattori di dose per ingestione per ^{210}Pb e ^{210}Po : $6.9 \cdot 10^{-7}$ Sv/Bq e $1.2 \cdot 10^{-6}$ Sv/Bq (valore per gli adulti, CUE 1996, D.Lvo 241/00)

Risultati:

Ipotesi di ingestione A: 0.256 mSv/anno (solo da ^{222}Rn)

Ipotesi di ingestione B (^{210}Pb): 0.024 mSv/anno (max) e 0.023 mSv/anno (media su 2 anni).

La concentrazione di attività di ^{210}Pb raggiunge il suo massimo (=0.047 Bq/l) dopo circa 40 giorni, per poi rimanere quasi costante per i due anni successivi (media=0.045 Bq/l).

Ipotesi di ingestione B (^{210}Po): 0.038 mSv/anno (max) e 0.029 mSv/anno (media su 2 anni).

La concentrazione di attività di ^{210}Po raggiunge il suo massimo (=0.044 Bq/l) dopo circa 2 anni (media=0.033 Bq/l).

2) Ingestione di acqua presso stabilimenti termali

In questo caso il consumo si assume limitato nel tempo (max 2 cicli di cure termali all'anno) e senza alcun ritardo durante il quale il ^{222}Rn possa decadere. In tali condizioni quindi la dose efficace è dovuta solo all'ingestione di ^{222}Rn mentre il contributo del ^{210}Pb e del ^{210}Po prodotti dal ^{222}Rn è sostanzialmente trascurabile.

Assunzioni:

- 2 litri d'acqua ingeriti al giorno, 12 giorni di permanenza per ciclo e 2 cicli all'anno
- 500 Bq/l di concentrazione di attività di ^{222}Rn nell'acqua al momento dell'ingestione
- ^{210}Po e ^{210}Pb non presenti nell'acqua al momento dell'ingestione
- fattore di dose per ingestione: $3.5 \cdot 10^{-9}$ Sv/Bq (valore medio per gli adulti, NRC 1999):

Risultati:

0.085 mSv/anno

3) Aerosol-terapia

In questo caso si assume l'ipotesi cautelativa che tutto il ^{222}Rn contenuto nell'acqua utilizzata per produrre gli aerosol (tipicamente 1 litro) venga inalato e viene applicato il fattore di dose per inalazione assunto nel rapporto UNSCEAR del 2000. Un altro fattore di dose molto diffuso è quello stimato in precedenza dall'ICRP nella pubblicazione n.65 (1993) – adottato dalla direttiva europea 96/29/Euratom e quindi anche dal D.L.vo 241/00 che recepisce tale direttiva – ed è pari a $\sim 2/3$ di quello dell'UNSCEAR. Va sottolineato che questi fattori di dose sono calcolati per situazioni espositive (in termini di fattore di equilibrio tra radon e prodotti di decadimento a vita breve e di quantità e dimensione degli aerosol presenti nell'aria) tipici degli ambienti domestici, ma sono qui utilizzati in quanto non esistono calcoli specifici per situazioni particolari quali quella in esame. Sulla base di considerazioni dosimetriche di modelli polmonari (es. ICRP 1987, Birchall e James 1994) si può comunque ritenere che eventuali differenze siano contenute.

Assunzioni:

- 1 litro d'acqua per ogni seduta, 12 sedute per ciclo di terapia e 2 cicli di terapia all'anno
- 500 Bq/l di concentrazione di attività di ^{222}Rn nell'acqua
- fattore di dose per inalazione: 3.0×10^{-6} mSv per Bq di ^{222}Rn inalato, derivato dal fattore di 0.025 mSv per Bq/m³ di ^{222}Rn in aria, che si riferisce ad un'esposizione in ambiente domestico di circa 7000 ore all'anno (UNSCEAR 2000), assumendo una rateo di respirazione di 1.2 m³/h
- tutta l'attività presente nell'acqua viene inalata (ipotesi cautelativa)

Risultati:

0.035 mSv/anno

4) Balneo-terapia

Per la balneo-terapia viene calcolata sia la dose efficace dovuta all'irraggiamento esterno dovuta alla radiazione gamma emessa dai prodotti di decadimento del radon presenti in acqua, sia la dose efficace da inalazione del radon emanato dall'acqua stessa.

Per effettuare la valutazione della dose da irraggiamento esterno per immersione in acqua contenente ^{222}Rn è stato usato un modello con cui si calcola la dose assorbita in aria (espressa in Gy) in un foro al centro di un mezzo (in questo caso acqua). Dal valore ottenuto si ricava la dose efficace attraverso un coefficiente di conversione di 0.7 Sv/Gy (UNSCEAR 2000), che pur essendo stato calcolato per uno spettro più complesso di radiazioni gamma (prodotto da tutti i radionuclidi naturali presenti nel suolo) rappresenta una buona approssimazione (lievemente sovrastimata) per questo caso specifico.

Per stimare la dose da inalazione di radon emanato dall'acqua della piscina, è necessario, in assenza di dati sperimentali, stimare la concentrazione di radon nell'aria immediatamente sovrastante l'acqua della piscina. Per tener conto della vastità della superficie emanante e della elevata temperatura dell'acqua di una piscina termale, è stato ipotizzato di poter aumentare di un ordine di grandezza il fattore di trasferimento acqua-aria stimato in 10^{-4} dall'NRC per i diversi tipi di utilizzo d'acqua nelle abitazioni (NRC 1999).

Assunzioni:

- piscina di 50 m x 25 m x 150 cm
- 20 min per ogni seduta, 12 sedute per ciclo di terapia e 2 cicli di terapia all'anno
- 500 Bq/litro di concentrazione di attività di ^{222}Rn nell'acqua
- 10^{-3} come fattore di trasferimento tra la concentrazione di ^{222}Rn in acqua e la concentrazione di ^{222}Rn nell'aria appena sovrastante la piscina (a circa 20–30 cm dalla superficie dell'acqua)
- rateo di respirazione di 1.2 m³/h

Risultati:

0.017 mSv/anno (di cui 0.014 mSv/anno da inalazione di ^{222}Rn e dei suoi prodotti di decadimento, e 0.0025 mSv/anno da irraggiamento esterno gamma)

Data l'incertezza sul fattore di trasferimento tra l'acqua e l'aria appena sovrastante la piscina (~20–30 cm dalla superficie dell'acqua), è stato suggerito che, almeno in una prima fase, venga richiesta per gli stabilimenti termali la determinazione sperimentale della concentrazione di ^{222}Rn nell'aria appena sovrastante la piscina (a circa 20–30 cm dalla superficie dell'acqua).

5) Fango-terapia

Il calcolo della dose da irraggiamento esterno da radiazione gamma per immersione nel fango è stato effettuato con modalità analoghe a quello relativo all'immersione in piscina, tenendo ovviamente conto delle diverse dimensioni della vasca, della diversa densità, composizione e concentrazione di ^{222}Rn del fango rispetto all'acqua.

Per quanto riguarda invece l'inalazione del ^{222}Rn esalato dal fango, essa è stata trascurata assumendo che il trasferimento del ^{222}Rn dal fango all'aria sia almeno 10 volte inferiore a quello dall'acqua all'aria usato per la balneo-terapia.

Assunzioni:

- vasca di 1.5 m x 1.5 m x 3 m
- 20 min per ogni seduta, 12 sedute per ciclo di terapia e 2 cicli di terapia all'anno
- 500 Bq/l di concentrazione di attività di ^{222}Rn nell'acqua con cui viene prodotto il fango
- 0 Bq/kg di concentrazione di attività di ^{222}Rn nell'argilla con cui viene prodotto il fango
- fango composto da 50% (in peso) di acqua e 50% (in peso) di argilla (è stato cautelativamente trascurato il decadimento del ^{222}Rn nell'acqua con cui viene prodotto il fango)

Risultati:

0.002 mSv/anno (valore al centro della vasca, dovuto all'irraggiamento gamma esterno).

Considerazioni sulle dosi efficaci calcolate e proposte di livelli di concentrazione di ^{222}Rn , ^{210}Pb e ^{210}Po da non superare nelle acque minerali termali

Come già sottolineato nell'introduzione, le dosi efficaci stimate nella sezione precedente non possono essere confrontate con riferimenti normativi specifici, in quanto assenti. Pertanto è stato effettuato un confronto sia con le normative inerenti a tematiche il più possibile vicine alle situazioni in esame, in particolare quelle relative all'acqua potabile, sia con le normative più generali di radioprotezione.

Ingestione di acqua imbottigliata proveniente da stabilimenti termali

Per quanto riguarda il consumo di acqua in bottiglia proveniente da stabilimenti termali, si può far riferimento alla raccomandazione europea 2001/928/Euratom sulla radioattività naturale nell'acqua potabile (CE 2001) ed alla normativa italiana sul consumo di acqua potabile (D.L.vo 31/2001).

La raccomandazione europea 2001/928/Euratom propone di fissare un limite all'interno dell'intervallo di valori di concentrazione di radon in acqua di 100–1000 Bq/l. Inoltre, utilizzando come riferimento per la dose efficace 0.1 mSv/anno, valore che la direttiva europea 98/83/EC sul consumo di acqua potabile (poi recepita nella legislazione italiana col D.L.vo 31/2001) adotta come parametro per la dose efficace dovuta alla presenza di radioattività in acqua, raccomanda che la concentrazione di ^{210}Pb e di ^{210}Po non superi i valori, rispettivamente, di 0.2 Bq/l e 0.1 Bq/l. Il valore di 0.1 mSv/anno non include le dosi dovute all'eventuale presenza nell'acqua di trizio (per il quale vi è uno specifico limite di 100 Bq/l), potassio-40, radon e prodotti di decadimento del radon.

La dose efficace annua dovuta alla presenza di 100–1000 Bq/l di ^{222}Rn nell'acqua potabile è, secondo le stime riportate nella sezione precedente, uguale a 0.26–2.56 mSv. Va sottolineato che

questi valori piuttosto alti “accettati” dalla raccomandazione europea sono presumibilmente motivati dall’essere l’acqua potabile una necessità primaria; analoga necessità non sussiste però per le acque imbottigliate, anche perché esistono numerose acque imbottigliate con contenuto trascurabile di radioattività.

I valori di dose precedenti sono applicabili in linea teorica anche al consumo di acqua termale appena imbottigliata (in questo caso la dose è dovuta al solo ^{222}Rn), ma l’inevitabile ritardo tra l’imbottigliamento dell’acqua ed il suo consumo produce una riduzione della concentrazione di radon di oltre un fattore 100 (medio nei due anni). Dai calcoli riportati nella sezione precedente, si vede che se il consumo avviene (come previsto dalle norme vigenti) nell’arco di due anni dall’imbottigliamento la dose efficace raggiunge un valore massimo di 0.062 mSv/anno e un valore medio di 0.052 mSv/anno per 100 Bq/l di ^{222}Rn (in questo caso è dovuta al ^{210}Pb ed il ^{210}Po prodotti dal ^{222}Rn dopo l’imbottigliamento). Inoltre, durante questo periodo, le concentrazioni di attività di ^{210}Pb e ^{210}Po rimangono sempre inferiori ai valori massimi proposti dalla raccomandazione europea 2001/928/Euratom sulla radioattività naturale nell’acqua potabile.

Le considerazioni precedenti si basano sull’ipotesi che la concentrazione di ^{210}Pb e ^{210}Po sia nulla al momento dell’imbottigliamento. E’ quindi necessario, almeno in una prima fase di caratterizzazione della radioattività dell’acqua, misurare le concentrazioni di attività di ^{210}Pb e ^{210}Po all’imbottigliamento per verificare che non vengano superati i valori raccomandati dalla 2001/928/Euratom, sia alla sorgente che, per il contributo aggiuntivo derivante dal decadimento del ^{222}Rn , durante tutto il periodo di commerciabilità dell’acqua.

In conclusione, sulla base di queste considerazioni, ed in attesa di una normativa specifica in ambito nazionale e/o europeo, si è ritenuto ritiene di poter proporre, come concentrazioni da non superare nell’acqua termale imbottigliata, il valore di 100 Bq/l per il ^{222}Rn , il più cautelativo rispetto al range 100–1000 Bq/l proposto nella raccomandazione europea 2001/928/Euratom per l’acqua potabile, ed i valori di 0.2 Bq/l e 0.1 Bq/l, riportati nella stessa raccomandazione, rispettivamente per il ^{210}Pb ed il ^{210}Po .

In ogni caso, data la disponibilità di efficaci e semplici sistemi di rimozione del ^{222}Rn dall’acqua e la non trascurabilità delle dosi efficaci stimate, si ritiene che si debba cercare di ottenere un valore il più basso ragionevolmente possibile di concentrazione di ^{222}Rn nell’acqua termale imbottigliata (e, ove possibile, anche di ^{210}Pb ed il ^{210}Po al momento dell’imbottigliamento), anche sensibilmente inferiore al valore massimo proposto.

Uso di acqua contenente radioattività naturale negli stabilimenti termali

Le stime di dose effettuate nella sezione precedente per le diverse terapie condotte negli stabilimenti termali danno nel loro complesso un valore di 0.140 mSv all’anno per chi si sottopone a tali terapie, nel caso di acque termali contenenti 500 Bq/l.

Il contributo nettamente prevalente (0.085 mSv/anno) è quello connesso all’ingestione. In assenza di una normativa specifica, si può considerare come valore da non superare una concentrazione di attività di ^{222}Rn di 500 Bq/l. Questo valore risulta all’interno dell’intervallo 100–1000 Bq/l indicato dalla raccomandazione europea 2001/928/Euratom sulle acque potabili (CE 2001) e, secondo le ipotesi fatte, produce una dose efficace minore della dose totale di 0.1 mSv/anno riportata nel D.L.vo 31/2001 sul consumo d’acqua potabile (D.L.vo 2001). Va segnalato che, nei calcoli sopra effettuati, non è stata considerata la dose dovuta all’eventuale presenza alla sorgente di ^{210}Pb e ^{210}Po . Ove per tali radionuclidi si applicassero i limiti previsti nella raccomandazione europea 2001/928/Euratom per l’acqua potabile (0.2 Bq/l e 0.1 Bq/l, rispettivamente), si avrebbe un contributo aggiuntivo di 0.013 mSv/anno.

Sulla base di queste considerazioni, si ritiene che, in assenza di una normativa specifica, per il complesso degli usi di acque contenente radioattività naturale negli stabilimenti termali la concentrazione di ^{222}Rn non debba superare il valore di 500 Bq/l. Va però sottolineato che, dato il ruolo rilevante dell’ingestione e la disponibilità di efficaci e semplici sistemi di rimozione del ^{222}Rn dall’acqua, si ritiene che si debba comunque cercare di ottenere, almeno per l’ingestione, un valore il più basso possibile, anche sensibilmente inferiore al valore massimo proposto.

Considerazioni relative alla pubblicità di alcuni stabilimenti termali

Nella pubblicità di alcuni stabilimenti termali si afferma che le proprietà curative delle acque siano legate alla componente radioattiva, in particolare del radon. Si ritiene ciò non corretto per i seguenti motivi. Come è noto, nessun organismo sanitario nazionale o internazionale ha finora riconosciuto tali proprietà curative delle cure termali con radon. Inoltre, sulla base della direttiva europea 97/43 e del suo recepimento in Italia con il D.L.vo 187/2000, non si può sottoporre volutamente un paziente ad una sorgente di radiazioni senza che sia effettuato il processo di giustificazione di tale esposizione, che consiste non solo nel dimostrare che vi sono effetti positivi di tale esposizione, ma anche che gli effetti positivi superino il rischio connesso all'uso delle radiazioni ionizzanti. Inoltre devono essere prese in considerazione tecniche e procedure alternative che non comportino esposizione alle radiazioni ionizzanti.

SINTESI DEL PARERE DEL CONSIGLIO SUPERIORE DI SANITÀ

La III sezione del Consiglio Superiore di Sanità – che delle problematiche delle acque termali radioattive si era già occupata nel 2000 – nella seduta del 18 giugno 2002, a conclusione di un iter iniziato a settembre 2001, ha espresso il suo parere al Ministro della Salute.

In tale parere viene considerato:

- che la cancerogenicità delle radiazioni ionizzanti, ed in particolare di quelle prodotte dal radon e dai suoi prodotti di decadimento, è riconosciuta dai principali organismi sanitari internazionali e che, su questa base, l'Unione Europea ha emanato una direttiva (96/29/Euratom) che include la protezione dei lavoratori dalle esposizioni a radiazioni ionizzanti di origine naturale connesse ad attività lavorative, comprese quelle che hanno luogo presso gli stabilimenti termali;
- che successivamente, il recepimento di tale direttiva nella legislazione italiana (D.L.vo 241/00) ha rafforzato la scelta di protezione dei lavoratori nelle terme;
- che al momento, invece, nessun organismo sanitario internazionale ha riconosciuto una eventuale efficacia terapeutica dell'uso di tali acque per quel che riguarda la componente radioattiva;
- che, peraltro, risulta che alcuni stabilimenti termali pubblicizzano le proprietà curative delle loro acque facendo riferimento alla componente radioattiva, in particolare al radon;

Sulla base delle suddette considerazioni, viene ritenuto opportuno:

- utilizzare in assenza di norme specifiche, quale riferimento per la problematica in questione le normative che regolamentano la presenza di radioattività nelle acque potabili nonché i limiti proposti dalla Raccomandazione 2001/928/Euratom;
- adottare, alla luce dei principi generali della radioprotezione, un'impostazione che privilegi il contenimento e la riduzione delle dosi efficaci di coloro che utilizzano con diverse modalità acque termali radioattive;

Viene considerato inoltre:

- che esistono, e sono diffusamente utilizzati in molti Paesi, sistemi per ridurre la concentrazione di radon nell'acqua che ne sfruttano la scarsa solubilità in acqua, basandosi essenzialmente sulla movimentazione della stessa;
- che questi sistemi possono essere utilizzati anche negli stabilimenti termali per ridurre notevolmente la concentrazione di radon nell'acqua prima del suo utilizzo per le diverse applicazioni;
- che in questo modo, tra l'altro, si ridurrebbero in generale anche le esposizioni ai lavoratori del settore termale;

La III sezione del Consiglio Superiore di Sanità, sentito l'Istituto Superiore di Sanità, ritiene pertanto, in attesa di una normativa specifica in ambito nazionale e/o europeo, di proporre:

1. per l'acqua termale imbottigliata, valori massimi accettabili di concentrazione pari a:
 - 100 Bq/l per il ^{222}Rn
 - 0.2 Bq/l per il ^{210}Pb
 - 0.1 Bq/l per il ^{210}Po .
2. per tutti gli altri usi di acque degli stabilimenti termali, valori massimi accettabili di ^{222}Rn pari a 500 Bq/l.

Inoltre viene raccomandato che venga prestata una particolare attenzione alla procedura di campionamento, al fine di evitare la dispersione del gas prima della misura e che siano adottati metodi analitici affidabili e rispondenti ai principi di buona tecnica.

Infine, viene auspicato:

- che, data la disponibilità di efficaci e semplici sistemi di rimozione del ^{222}Rn dall'acqua e la non trascurabilità delle dosi efficaci stimate, essi vengano comunque adottati al fine di ridurre quanto più possibile l'esposizione alla radioattività naturale contenuta nelle acque termali;
- che le autorità competenti predispongano controlli sulla pubblicità degli stabilimenti termali, e, ove si riscontrino affermazioni circa una presunta efficacia terapeutica dell'esposizione a radon nelle terme, si adottino opportuni provvedimenti.

RADIOATTIVITÀ NELLE ACQUE MINERALI

SINTESI DELLA RELAZIONE DELL'ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ

Analogamente a quanto effettuato per le acque termali, si è cercato di adattare a questa situazione le normative relative a tematiche simili, quali quelle sulle acque potabili, sulla base dei principi e delle norme generali della radioprotezione. Questa assimilazione appare ancor più giustificata dagli elevati e crescenti consumi di acque minerali imbottigliate. Le valutazioni dosimetriche e radioprotezionistiche riportate si applicano naturalmente anche alle acque imbottigliate non minerali, sia in considerazione del loro uso crescente, sia in quanto esse rientrano esplicitamente nel campo di applicazione delle normative sull'acqua potabile (D.L.vo 31/2001). Di seguito, quindi, col termine "acque minerali" si intenderà riferirsi alle acque imbottigliate, sia minerali che non.

Calcoli dosimetrici per le acque minerali

Dei vari radionuclidi naturali potenzialmente presenti nelle acque minerali, vengono qui presi in considerazione quelli ai quali sono generalmente associate le dosi maggiori (UNSCEAR 2000), e precisamente: 1) gli isotopi naturali dell'uranio; 2) il ^{228}Ra ed il ^{226}Ra ; 3) il ^{222}Rn ; 4) il ^{210}Po ed il ^{210}Pb .

I calcoli della dose efficace alla popolazione qui di seguito riportati sono stati effettuati generalmente per concentrazioni nell'acqua pari a 1 Bq/l, mentre per il ^{222}Rn il calcolo è stato fatto per 100 Bq/l. Inoltre, sono state considerate tutte le classi di età della popolazione prese in esame dalla normativa nazionale di radioprotezione (D.L.vo 241/2000), a differenza di quanto effettuato per le acque termali, per le quali si era invece ipotizzato un consumo da parte della sola popolazione adulta. Sono stati utilizzati i coefficienti di dose per ingestione riportati nel D.L.vo 241/2000. I coefficienti di dose per il ^{222}Rn , non presenti nel D.L.vo 241/2000, sono stati invece presi dal rapporto NRC (1999). In tutti i calcoli sottostanti, si considera che l'acqua minerale possa essere utilizzata in modo equivalente alla generica acqua potabile, assumendo i seguenti consumi: 250

litri/anno per età = 1 anno, 350 litri/anno per età 1–10 anni, 750 litri/anno per età >17 anni (UE 1999, Risica e Grande 2000). Inoltre, sulla base di questi dati, per le età 10–12 anni si è assunto lo stesso consumo della classe d'età 1–10 anni, mentre per la classe 12–17 anni il consumo è stato qui interpolato a 550 litri/anno. I consumi per le età inferiori a 17 anni, minori di quelli degli adulti, riducono l'effetto dei coefficienti di dose più alti per la popolazione non adulta.

1) Uranio naturale

In caso di ingestione, la dose efficace impegnata in un anno, per 1 Bq/l di concentrazione di uranio naturale in acqua, è riportata nella tabella seguente:

Età (anni)	= 1	1–2	2–7	7–12	12–17	>17
Coefficienti di dose (10^{-8} Sv/Bq)	35.5	12.5	8.4	7.1	7.0	4.7
Dose efficace (mSv/anno)	0.088	0.044	0.030	0.025	0.039	0.035

2) ^{228}Ra e ^{226}Ra

Gli isotopi del radio maggiormente diffusi sono il ^{228}Ra e il ^{226}Ra . Per quanto riguarda il ^{228}Ra , la dose efficace impegnata in un anno per 1 Bq/l di concentrazione in acqua è:

Età (anni)	= 1	1–2	2–7	7–12	12–17	>17
Coefficienti di dose (10^{-7} Sv/Bq)	300	57	34	39	53	6.9
Dose efficace (mSv/anno)	7.5	2.0	1.2	1.4	2.9	0.5

I corrispondenti valori per il ^{226}Ra sono i seguenti:

Età (anni)	= 1	1–2	2–7	7–12	12–17	>17
Coefficienti di dose (10^{-7} Sv/Bq)	47	9.6	6.2	8.0	15	2.8
Dose efficace (mSv/anno)	1.2	0.3	0.2	0.3	0.8	0.2

3) ^{222}Rn

In questo caso si è proceduto nello stesso modo dell'ingestione di acqua imbottigliata proveniente da stabilimenti termali, prendendo in esame due ipotesi di consumo ed utilizzando i fattori di dose dell'NRC (1999), e le dosi sono state calcolate anche per la popolazione non adulta.

Assunzioni:

- 100 Bq/l di concentrazione di attività di ^{222}Rn nell'acqua al momento dell'imbottigliamento
- ^{210}Po e ^{210}Pb non presenti nell'acqua al momento dell'imbottigliamento

Risultati:

*Valori di dose efficace nell'ipotesi di ingestione A
(ipotesi non realistica che massimizza la stima di dose, che in tal caso è dovuta solo al ^{222}Rn)*

Età (anni)	= 1	1–2	2–7	7–12	12–17	>17
Coefficienti di dose (10^{-9} Sv/Bq)	40	23	10	5.9	4.2	3.5
Dose efficace (mSv/anno)	1.0	0.81	0.35	0.21	0.23	0.26

*Valori di dose efficace nell'ipotesi di ingestione B: contributo del ^{210}Pb
(la cui concentrazione di attività raggiunge un massimo di 0.047 Bq/l dopo circa 40 giorni, per poi rimanere quasi costante per i due anni successivi, con una media sui 2 anni di 0.045 Bq/l)*

Età (anni)	= 1	1–2	2–7	7–12	12–17	>17
Coefficienti di dose (10^{-6} Sv/Bq)	8.4	3.6	2.2	1.9	1.9	0.69
Dose efficace (mSv/anno)	0.095	0.057	0.035	0.030	0.046	0.023

Valori di dose efficace nell'ipotesi di ingestione B: contributo del ^{210}Po
 (la cui concentrazione di attività raggiunge un massimo di 0.044 Bq/l dopo ~2 anni, con una media di 0.033 Bq/l)

Età (anni)	= 1	1-2	2-7	7-12	12-17	>17
Coefficienti di dose (10^{-9} Sv/Bq)	26.0	8.8	4.4	2.6	1.6	1.2
Dose efficace (mSv/anno)	0.215	0.102	0.051	0.030	0.029	0.029

4) ^{210}Po e ^{210}Pb

In caso di presenza di ^{210}Po e ^{210}Pb nell'acqua al momento dell'imbottigliamento, le dosi efficaci impegnate in un anno per 1 Bq/l di concentrazione in acqua, con le stesse ipotesi di consumo utilizzate e gli stessi coefficienti di dose impegnata riportati nel punto precedente, sono:

Età (anni)	= 1	1-2	2-7	7-12	12-17	>17
Dose efficace ^{210}Pb (mSv/anno)	2.10	1.26	0.77	0.67	1.03	0.50
Dose efficace ^{210}Po (mSv/anno)	6.50	3.08	1.54	0.91	0.86	0.88

Considerazioni sulle dosi efficaci calcolate e proposte di livelli da non superare per la concentrazione di radionuclidi naturali nelle acque minerali

Come già sottolineato nell'introduzione, le dosi efficaci stimate nella sezione precedente non possono essere confrontate con riferimenti normativi specifici, in quanto assenti. Pertanto si effettuerà qui un confronto con le normative inerenti a tematiche il più possibile vicine alle situazioni in esame, in particolare quelle relative all'acqua potabile.

Normative utilizzate

La radioattività naturale nell'acqua potabile, anche imbottigliata, è regolata dal D.L.vo 31/2001 che recepisce la direttiva europea 98/83/EC (CUE 1998). In particolare viene introdotta come parametro una *dose totale indicativa* da non superare uguale a 0.1 mSv all'anno. In caso di superamento di tale parametro "... l'autorità d'ambito, d'intesa con l'azienda unità sanitaria locale interessata e con il gestore, individuate tempestivamente le cause della non conformità indica i provvedimenti necessari per ripristinare la qualità, dando priorità alle misure di esecuzione, tenuto conto dell'entità del superamento del valore del parametri pertinente e del potenziale pericolo per la salute umana" (art. 10, comma 1).

Va sottolineato che la dose indicativa *totale* di 0.1 mSv/anno non include le dosi dovute all'eventuale presenza, tra i radionuclidi naturali, di potassio-40, di radon e dei suoi prodotti di decadimento.

Per radon ed i suoi prodotti di decadimento (in particolare ^{210}Pb e ^{210}Po) si può far riferimento alla raccomandazione europea 2001/928/Euratom sul radon nell'acqua potabile (CE 2001), nella quale si propone di fissare un limite all'interno dell'intervallo di valori di concentrazione di radon in acqua di 100-1000 Bq/l. Inoltre, utilizzando come riferimento per la dose efficace 0.1 mSv/anno, si raccomanda che la concentrazione di ^{210}Pb e di ^{210}Po non superi i valori, rispettivamente, di 0.2 Bq/l e 0.1 Bq/l.

Criteria utilizzati per ricavare la proposta di livelli di concentrazione di attività da non superare

I calcoli di dose efficace impegnata presentati nella sezione precedente mostrano che le dosi più elevate sono quelle relative agli infanti (età = 1 anno). Allo scopo di proteggere tutti gli individui della popolazione, si propone quindi di utilizzare gli infanti come *gruppo di riferimento* o *gruppo critico*. Le concentrazioni di radionuclidi nell'acqua minerale da non superare saranno quindi derivate in modo che le dosi per gli infanti non superino la dose di riferimento.

Per quanto riguarda l'uranio naturale ed il radio, il D.L.vo 31/2001 prevede come dose totale da non superare il valore di 0.1 mSv/anno, valore in base al quale vengono ricavati qui di seguito (nei paragrafi 1 e 2) i valori di concentrazione di attività in acqua da non superare, denominati CMA (concentrazione massima ammessa) per i singoli radionuclidi, nell'ipotesi che non siano presenti in

acqua altri radionuclidi. Nel caso però di presenza contemporanea di più radionuclidi, la loro concentrazione deve essere tale da non superare la dose *totale* di 0.1 mSv/anno, e pertanto deve essere rispettata la seguente formula:

$$\frac{C_U}{CMA_U} + \frac{C_{^{228}\text{Ra}}}{CMA_{^{228}\text{Ra}}} + \frac{C_{^{226}\text{Ra}}}{CMA_{^{226}\text{Ra}}} \leq 1$$

1) Uranio naturale

Sulla base dei calcoli di dose efficace riportati nella sezione A e dei criteri riportati qui sopra, la concentrazione di uranio naturale non dovrebbe superare i 3 Bq/l per gli adulti e 1.2 Bq/l per i lattanti (età = 1 anno). Si fa comunque notare che questi valori di concentrazione corrispondono, rispettivamente, a 0.16 mg/l e 0.064 mg/l, che sono di gran lunga superiori al valore massimo raccomandato dall'OMS per l'acqua potabile, per quel che riguarda gli effetti dell'uranio non dovuti alla radioattività, pari a 0.002 mg/l.

In conclusione, si propone come concentrazione massima ammessa per l'uranio naturale:

$$CMA_U = 1.2 \text{ Bq/l.}$$

2) ^{228}Ra e ^{226}Ra

Sulla base dei calcoli di dose efficace e dei criteri sopra riportati, la concentrazione non dovrebbe superare, per il ^{228}Ra , 0.20 Bq/l per gli adulti e 0.01 Bq/l per i lattanti (età = 1 anno), e, per il ^{226}Ra , 0.50 Bq/l per gli adulti e 0.09 Bq/l per i lattanti (età = 1 anno).

In conclusione, si propone come concentrazione massima ammessa per i due isotopi del radio:

$$CMA_{\text{Ra-}^{228}} = 0.01 \text{ Bq/l}$$

$$CMA_{\text{Ra-}^{226}} = 0.09 \text{ Bq/l.}$$

3) ^{222}Rn

La raccomandazione europea 2001/928/Euratom sul radon nell'acqua potabile propone di fissare un limite all'interno dell'intervallo di valori di concentrazione di radon in acqua di 100–1000 Bq/l.

La dose efficace annua dovuta alla presenza di 100–1000 Bq/l di ^{222}Rn nell'acqua potabile è, secondo i calcoli riportati nella sezione precedente, uguale a 0.26–2.56 mSv per gli adulti, e 1–10 mSv per i lattanti. Va sottolineato che questi valori di dose piuttosto alti sono “accettati” dalla raccomandazione europea presumibilmente in quanto l'acqua potabile è un bene necessario; analoga necessità non sussiste però per le acque minerali, anche perché esistono numerose acque minerali con contenuto trascurabile di radioattività.

I valori di dose precedenti sono applicabili in linea teorica anche al consumo di acqua minerale appena imbottigliata (in questo caso la dose è dovuta al solo ^{222}Rn), ma l'inevitabile ritardo tra l'imbottigliamento dell'acqua ed il suo consumo produce una riduzione della concentrazione di radon di oltre un fattore 100 (nell'ipotesi di un consumo uniforme nei due anni successivi all'imbottigliamento), rendendo la dose sostanzialmente trascurabile, anche per i lattanti, nel caso di concentrazione di ^{222}Rn nell'acqua al momento dell'imbottigliamento uguale a 100 Bq/l.

Quindi, sulla base della dose prodotta direttamente dal ^{222}Rn presente in acqua al momento dell'imbottigliamento, si potrebbe assumere, come concentrazione di ^{222}Rn da non superare, il valore di 100 Bq/l. Va però tenuto conto che il consumo dilazionato rispetto all'imbottigliamento produce, oltre alla rapida riduzione della concentrazione di radon, un aumento della concentrazione di ^{210}Pb ed il ^{210}Po .

Per quanto riguarda il ^{210}Pb ed il ^{210}Po che si formano a seguito del decadimento di 100 Bq/l di ^{222}Rn nel periodo tra l'imbottigliamento ed il consumo, dai calcoli riportati nella sezione A si vede che, se il consumo avviene mediamente nell'arco di due anni dall'imbottigliamento, la dose efficace raggiunge un valore complessivo di 0.064 mSv/anno per gli adulti, e di 0.388 mSv/anno per i lattanti.

Sulla base di quest'ultimo valore di dose, anche se le concentrazioni di attività di ^{210}Pb e ^{210}Po rimangono sempre inferiori ai valori massimi proposti dalla raccomandazione europea

2001/928/Euratom, è quindi necessario, per proteggere i lattanti dal ^{222}Rn allo stesso livello richiesto per l'insieme di uranio naturale e radio (cioè per non superare per tale fascia d'età la dose efficace di 0.1 mSv/anno), limitare la concentrazione di ^{222}Rn nelle acque minerali ad un valore non superiore a circa 30 Bq/l, cosa del resto generalmente possibile, data la disponibilità di efficaci e semplici sistemi di rimozione del ^{222}Rn dall'acqua (cfr. sezione D).

4) ^{210}Pb e ^{210}Po

Le considerazioni precedenti si basano sull'ipotesi che la concentrazione di ^{210}Pb e ^{210}Po sia nulla al momento dell'imbottigliamento. La presenza, al momento dell'imbottigliamento, di ^{210}Pb e ^{210}Po è trattata nella già citata raccomandazione 2001/928/Euratom sull'acqua potabile, nella quale si raccomanda di non superare per il ^{210}Pb ed il ^{210}Po le concentrazioni rispettivamente di 0.2 e 0.1 Bq/l, a cui corrisponde una dose efficace di 0.1 mSv/anno. Va però evidenziato che questo vale per gli adulti, mentre per i lattanti le dosi efficaci per unità di concentrazione di attività sono superiori. Sulla base dei calcoli di dose riportati nella sezione A, è quindi necessario, per proteggere i lattanti dal ^{210}Pb ed dal ^{210}Po allo stesso livello previsto per gli adulti dalla raccomandazione citata, che le concentrazioni di ^{210}Pb e di ^{210}Po non superino il valore, rispettivamente, di 0.048 e 0.015 Bq/l.

SINTESI DEL PARERE DEL CONSIGLIO SUPERIORE DI SANITÀ

La III sezione del Consiglio Superiore di Sanità, nella seduta del 9 dicembre 2002, ha espresso il suo parere, a seguito di una specifica richiesta della Direzione Generale competente del Ministero della Salute, facente seguito ai precedenti pareri sulle acque minerali termali, in merito all'eventuale rischio derivante dal consumo quotidiano di acque minerali destinate all'imbottigliamento che potrebbero presentare livelli di radioattività naturale.

In tale parere, basato su un rapporto richiesto all'uopo all'Istituto Superiore di Sanità, viene tenuto conto:

- degli elevati e crescenti consumi di acque minerali imbottigliate;
- della evoluzione della conoscenza relativa ai rischi connessi alle radiazioni ionizzanti;
- della mancanza di una normativa specifica sia a livello nazionale che europeo circa la regolamentazione dell'uso di acque minerali, per quel che riguarda il loro contenuto di radionuclidi di origine naturale;
- dei valori di dose efficace dovuta all'ingestione di acqua minerale contenente radionuclidi naturali, valori che risultano sensibilmente superiori per i lattanti rispetto a quelli per gli adulti;

e viene ritenuto opportuno, sulla base delle suddette considerazioni:

- utilizzare in assenza di norme specifiche, quale riferimento per la problematica in questione, le normative che regolamentano la presenza di radioattività nelle acque potabili, anche imbottigliate, (D.Lvo 31/2001), nonché i limiti proposti dalla Raccomandazione 2001/928/Euratom;
- adottare, alla luce dei principi generali della radioprotezione, un'impostazione che privilegi il contenimento e la riduzione delle dosi efficaci di coloro che consumano acque minerali radioattive;

La III sezione del Consiglio Superiore di Sanità, sentito l'Istituto Superiore di Sanità, e considerato che in molti Paesi sono diffusamente utilizzati sistemi per ridurre la concentrazione di uranio, radio e radon nell'acqua, ha ritenuto pertanto di proporre, in attesa di una normativa specifica in ambito nazionale e/o europeo, i seguenti valori massimi accettabili di concentrazione per alcuni dei radionuclidi naturali potenzialmente presenti nell'acqua minerale imbottigliata:

- 2.9 Bq/l per l'uranio naturale
- 0.2 Bq/l per il ^{228}Ra
- 0.5 Bq/l per il ^{226}Ra

se presenti singolarmente. Nel caso però di presenza contemporanea di uranio ed isotopi del radio, la loro concentrazione deve essere tale da non superare la dose totale di 0.1 mSv/anno e pertanto deve essere rispettata la seguente formula:

$$\frac{C_U}{CMA_U} + \frac{C_{^{228}\text{Ra}}}{CMA_{^{228}\text{Ra}}} + \frac{C_{^{226}\text{Ra}}}{CMA_{^{226}\text{Ra}}} \leq 1$$

dove la CMA (concentrazione massima di attività) è pari a:

- 2.9 Bq/l per l'uranio naturale
- 0.2 Bq/l per il ^{228}Ra
- 0.5 Bq/l per il ^{226}Ra

facendo salvi eventuali valori più bassi previsti, anche in futuro, da normative nazionali o comunitarie legati agli effetti di tossicità chimica di tali radionuclidi, in particolare per quel che riguarda l'uranio.

Relativamente al radon e ai suoi prodotti di decadimento il Consiglio Superiore di Sanità ha ritenuto di proporre, per l'acqua minerale imbottigliata, i seguenti valori massimi accettabili di concentrazione:

- 100 Bq/l per il ^{222}Rn
- 0.1 Bq/l per il ^{210}Po
- 0.2 Bq/l per il ^{210}Pb .

Inoltre, in Consiglio ha ritenuto che non possono essere indicate per i lattanti le acque minerale imbottigliate che presentino valori di concentrazione dei suddetti radionuclidi superiori ai seguenti:

- 1.1 Bq/l per l'uranio naturale
- 0.01 Bq/l per il ^{228}Ra
- 0.09 Bq/l per il ^{226}Ra
- 32 Bq/l per il ^{222}Rn
- 0.02 Bq/l per il ^{210}Po
- 0.05 Bq/l per il ^{210}Pb

con le stesse specificazioni precedentemente riportate relativamente alla concentrazione globale e ad eventuali valori più bassi richiesti in relazione alla tossicità chimica di tali radionuclidi, in particolare dell'uranio.

Infine il Consiglio ha invitato l'Ufficio Legislativo del Ministero della Salute ad approfondire gli aspetti giuridici in merito alla possibilità di una norma che attui tale parere, e ha suggerito che, trascorso un periodo di tre anni, l'intera problematica venga riesaminata alla luce di nuove acquisizioni scientifiche.

BIBLIOGRAFIA

Birchall, A. and James, A.C. *Uncertainty analysis of the effective dose per unit exposure from radon progeny and implications for ICRP risk-weighting factors*. Radiat. Prot. Dosim. 53(1-4), 133-140 (1994)

CE (Commissione Europea) 2001/928/Euratom. *Raccomandazione della Commissione del 20 dicembre 2001 sulla tutela della popolazione contro l'esposizione al radon nell'acqua potabile*. Gazzetta ufficiale delle Comunità europee L 344/85, 28-12-2001.

CUE (Consiglio dell'Unione Europea). *Direttiva 96/29/EURATOM del Consiglio, del 13 maggio 1996, che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti*. Gazzetta Ufficiale della Comunità Europea L 159, 26-06-1996.

Direttiva 97/43/Euratom del Consiglio del 30 giugno 1997 riguardante la protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti connesse a esposizioni mediche e che abroga la direttiva 84/466/Euratom. Gazzetta ufficiale n. L 180 del 09/07/1997 PAG. 0022 - 0027

CUE (Consiglio dell'Unione Europea). *Direttiva 98/83/EC del Consiglio del 3 novembre 1998 relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano*. Gazzetta ufficiale della Comunità Europea L 330/32, 5-12-1998.

D.L.vo 187/2000 (Decreto Legislativo 26 maggio 2000, n.187). *Attuazione della direttiva 97/43/Euratom in materia di protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti connesse ad esposizioni mediche*. Suppl. ordinario n.105 alla Gazzetta Ufficiale n.157 del 7 luglio 2000, serie generale.

D.L.vo 241/2000 (Decreto legislativo 26 maggio 2000, n.241) *Attuazione della direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti delle radiazioni ionizzanti*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.203, 31 agosto 2000.

D.L.vo 31/2001 (Decreto Legislativo 2 febbraio 2001, n.31). *Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano*. Suppl. ordinario n.41/L alla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.52, 3 marzo 2001, serie generale.

EML (Environmental Measurements Laboratory) U.S. Department of Energy *HASL-300 The Procedures Manual of the Environmental Measurements Laboratory 28th Edition*. Editor Nancy A. Chieco, Environmental Measurements Laboratory U.S. Department of Energy, New York, 1997. (Su internet al sito <http://www.eml.doe.gov/publications/procman/>)

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). *Methods, Occurrence and Monitoring Document for Radon in Drinking Water*. Office of Ground Water and Drinking Water U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC 20460 EPA Contract No. 68-C7-0005, 1999. (Su internet al sito <http://www.epa.gov/safewater/radon/momp1.pdf>)

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). *National Primary Drinking Water Regulations; Radionuclides; Final Rule Part II*. Environmental Protection Agency 40 CFR Parts 9, 141, and 142.. U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC, 2000. (Su internet al sito <http://www.epa.gov/safewater/rads/radfr.pdf>)

Giovani C., Agnesod G., Bellino L., Bonomi M., Cappai M., Cherubini G., Forte M., Garavaglia M., Maggiolo S., Magnoni M., Minach L., Risica S., Sansone A., Trotti F. *Natural Radioactivity in Italian Drinking and Mineral water: Experimental Data and Dose Assessment*. In: Proceedings of 5th International Conference on High Levels of Natural Radiation and Radon Areas. Monaco, 4-7 settembre 2000. BfS 24/2002, editori J.Peter, G Schneider e A. Bayer, BfS (Bundesamt für Strahlenschutz), Monaco 2002.

ICRP. *Lung cancer risk from indoor exposures to radon Daughters*. ICRP Publication 50. Ann. ICRP 17(1) (1987)

ICRP. *Protection Against Radon-222 at Home and at Work*. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2) (1993).

Minach L. *Misure della radioattività in Alto Adige: 1990-1994. Concetti, Misurazioni, Analisi*. Provincia Autonoma di Bolzano, 115, pp.103–114, 1995.

NRC (National Research Council). *Risk Assessment of Radon in Drinking Water*. National Academy Press, Washington, D.C., 1999.

Risica S., Grande S. *Council Directive 98/83/EC on the quality of water intended for human consumption: calculation of derived activity concentrations*. Rapporto ISTISAN 00/16, Istituto Superiore di Sanità, Roma, 2000.

UE (Unione Europea). *Article 31 working party on radioactivity in drinking water*. Brussels 28 gennaio 1999.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). *Sources and Effects of Ionizing Radiation. 2000 Report to the General Assembly, with Annexes*. United Nations, New York, 2000.

WHO (World Health Organization). *Guidelines for drinking-water quality*. WHO, Geneva, 1998.