



***CENTRO REGIONALE DI
RIFERIMENTO PER LA
RADIOATTIVITÀ AMBIENTALE***

REPORTING 2003 - 2004 - 2005

A CURA DI
GIANCARLO BUCCELLA

Trasformare le diversità in ricchezza: questo è uno dei principi fondamentali dell'azione dell'Agenzia Europea dell'Ambiente, chiamata a coordinare trentuno Paesi membri per assicurare ai cittadini una continua e tempestiva informazione sulle tematiche ambientali.

Per raggiungere i suoi obiettivi l'AEA chiede la collaborazione soprattutto alle Agenzie nazionali.

L'Agenzia italiana può ormai contare sulla solidità di un sistema agenziale, costituito in poco più di dieci anni, che può essere letto come una versione in scala ridotta della struttura ambientale europea, E' necessario che le potenzialità finora espresse a livello nazionale trovino sempre più manifestazione in ambito europeo, contribuendo al rafforzamento dei programmi di cooperazione tra i Paesi per un dialogo costante e proficuo.

Jacqueline McGlade (Direttore esecutivo dell'AEA)

In una società avanzata come quella italiana la conservazione e la valorizzazione del patrimonio naturale del Paese devono andare di pari passo con lo sviluppo. Questa impostazione della questione ambientale pone al centro dell'attenzione l'uomo anziché la natura. Sono sempre stato convinto, infatti, che ogni politica ambientale debba essere antropocentrica, deve tendere a garantire all'uomo le migliori condizioni di vita in un ambiente sano, nel quale sviluppare le sue potenzialità. La tutela dell'ambiente ha innanzitutto la funzione di garantire la migliore qualità della vita umana.

On. Altero Matteoli (Ministro dell'Ambiente)

L'ARTA (Agenzia Regionale per la Tutela dell'Ambiente) contribuisce a svolgere le attività ed i compiti di cui all'art. 1 del decreto legge n.496/1993, convertito nella legge n.61/1994, connessi all'esercizio delle funzioni pubbliche per la protezione dell'ambiente.

L'Agenzia è ente di diritto pubblico, dotato di personalità giuridica e autonomia amministrativa, tecnico-giuridica, patrimoniale e contabile, e di un proprio statuto approvato dalla Giunta Regionale.

Dagli Art.2 e 5 della L.R. n. 64/1998 (legge regionale istitutiva dell'ARTA).

Come non sottolineare che occorre contrastare quel senso dell'avere e del godere ad ogni costo, che spinge l'uomo a farsi padrone assoluto di quanto lo circonda. E come negare che, tra gli esiti negativi di questa "cultura di dominio", vi sia anche un uso distorto della natura, che ne deturpa il volto, ne pregiudica gli equilibri, e non si arresta nemmeno di fronte alla minaccia del disastro ecologico?

Con la promozione della dignità umana si coniuga il diritto ad un ambiente sano, poiché esso pone in evidenza la dinamica dei rapporti tra individuo e società. **Un insieme di norme internazionali, regionali e nazionali sull'ambiente sta dando gradualmente forma giuridica a tale diritto.** Le misure giuridiche, tuttavia, non bastano da sole. Il pericolo di danni gravi alla terra e al mare, al clima, alla flora ed alla fauna, richiede un cambiamento profondo nello stile di vita tipico della moderna civiltà dei consumi, particolarmente nei Paesi più ricchi.

Il presente ed il futuro del mondo dipendono dalla salvaguardia del creato, perché esiste una costante interazione tra la persona umana e la natura. **Porre il bene dell'essere umano al centro dell'attenzione per l'ambiente è, in realtà, la maniera più sicura per salvaguardare la creazione;** in tal modo, infatti, viene stimolata la responsabilità di ciascuno nei confronti delle risorse naturali e del loro giudizioso utilizzo.

Giovanni Paolo II (1/1/1999)

Pescara, giugno 2006

INDICE

1. Uno sguardo storico sull'origine della Agenzie Ambientali.....	pag. 3
2. Introduzione storica alla scoperta della radioattività.....	pag. 9
3. La radioattività nella storia.....	pag. 12
4. Il sistema della radioprotezione ambientale in Italia.....	pag. 14
5. Rapporto attività del Centro Regionale di Riferimento della Radioattività Ambientale ARTA-Abruzzo.....	pag. 19
6. Calcolo della dose assorbita da radioattività di origine antropica.....	pag. 35
7. La basi e i principi della radioprotezione.....	pag. 44
8. Scheda di approfondimento 1: Cos'è la radioattività.....	pag. 51
9. Scheda di approfondimento 2: L'uomo e le radiazioni ionizzanti.....	pag. 61
10. Scheda di approfondimento 3: Le applicazioni della radioattività.....	pag. 65
11. Scheda di approfondimento 4: Il fondo naturale di radiazione ionizzante.....	pag. 69
12. APPENDICE.....	pag. 73

Ringraziamenti:

Questo lavoro non sarebbe stato possibile senza il paziente lavoro di insegnamento che ho ricevuto dal Dr. Sandro D'Ostilio, senza la sua grande competenza professionale ed il suo esempio di dedizione e generosità.

Uno sguardo storico sull'origine delle Agenzie Ambientali

- tratto dalla pubblicazione APAT: "Le conferenze nazionali delle Agenzie Ambientali" (2006) -

A quasi vent'anni dalla nascita del Ministero dell'Ambiente, l'interesse per la protezione dell'ambiente nel nostro Paese, in Europa ed a livello globale ha raggiunto una maturità di intenti, di studi, di partecipazione e di referenti, Ormai l'Italia si muove in un quadro europeo ed internazionale che ha posto i problemi ambientali in cima alle priorità, per il benessere dell'uomo e per la preservazione del pianeta. Il cammino è stato lungo ed è proiettato nel futuro verso obiettivi precisi per il nuovo millennio.

E' opinione comune che l'Italia sia partita in ritardo rispetto agli altri Paesi europei nell'introdurre nel proprio bagaglio legislativo, culturale e sociale la dovuta attenzione per le tematiche di difesa dell'ambiente. L'Agenzia Nazionale, le Agenzie Regionali e delle Province Autonome per la protezione ambientale nascono negli anni Novanta in un contesto profondamente segnato da un'eccessiva frammentarietà delle competenze. Precedentemente a quella data, non esisteva un sistema in grado di garantire la necessaria efficienza ed un ulteriore elemento di scarso rendimento era prodotto dalla confusa sovrapposizione delle attività ambientali con quelle relative ai problemi sanitari.

L'attenzione alla difesa dell'ambiente nasce in Italia a cavallo degli anni Sessanta e Settanta con l'avvento dell'associazionismo e dei movimenti ecologisti a tutela della natura e del paesaggio. Tuttavia esiste un vuoto istituzionale in materia e una frammentarietà di competenze fra numerosi soggetti. A metà degli anni Ottanta la carenza di un referente a livello di governo è colmata dalla nascita del Ministero dell'Ambiente nel 1986. Prima di allora da un punto di vista normativo esistevano alcune leggi che risalgono agli anni Venti e Trenta. Tra le più datate si ricordano i regi decreti del 1922-23 che istituiscono quelli che oggi sono definiti i parchi nazionali "storici", come il Parco Nazionale del Gran Paradiso, il capostipite italiano, o il Parco Nazionale d'Abruzzo; ma c'è anche la legge 29 giugno 1939, che, agli albori del secondo conflitto mondiale, salvaguardava la protezione delle bellezze naturali del nostro territorio. Dagli anni Sessanta si è proceduto ad un sostanziale ampliamento della legislazione ambientale.

Un importante nodo da sciogliere è rappresentato dal quadro interpretativo in cui si colloca il termine "ambiente". Oggi significa una complessità di aspetti, dal suolo all'aria, dal *reporting* alle aree urbane, dalle ispezioni alle valutazioni di impatto ambientale. Negli anni Settanta e Ottanta significava natura e, al massimo, urbanistica. Per questo motivo il tema dell'ambiente non appare sempre vasto e complesso quale esso è. Prima di arrivare alla legge 349/86 istitutiva del Ministero dell'Ambiente le competenze in materia ambientale sono frammentate fra diversi ministeri. Quello dei Lavori Pubblici, fra le sue molteplici attività, si occupava di pianificazione urbana, opere idrauliche e inquinamento delle acque interne. Il dicastero dell'Agricoltura e delle foreste era competente sulle opere di sistemazione dei territori montani, di parchi e riserve. Il Ministero della Sanità si occupava di igiene del suolo, inquinamento atmosferico, controlli sulle acque.

Gli anni Ottanta rappresentano un passaggio di forte evoluzione su più fronti, dal politico-sociale a quello internazionale. È un periodo di transizione col superamento di tanti pregiudizi, di maturazione, di nuovi stili di vita, di acquisizione di nuovi modelli culturali all'insegna della globalizzazione. In ambito sociale, si assiste ad un crescente e pressante ruolo dei media nel comunicare dati ed informazioni su aspetti di degrado ambientale. Nascono le prime trasmissioni televisive dedicate all'ambiente, soprattutto si enfatizzano gli eventi incidentali che possono creare danni irreversibili (Chernobyl, Fermo-plant, ACNA di Cengio, "navi dei veleni" nelle

acque del Tirreno, versamenti in mare, alghe nell'Alto Adriatico ecc). Questo provoca una conseguente presa di coscienza da parte della gente nei vari strati sociali. Il processo culturale però non è lineare, perché l'attenzione è rivolta alle situazioni di crisi in corso incidentale, piuttosto che a fenomeni cronici di inquinamento progressivo di aria, suolo, acqua: sarà necessaria una lenta fase di maturazione nell'aggregare al concetto di "globalizzazione" alle problematiche connesse alla tutela dell'ambiente; fino a comprendere che "l'ambiente siamo noi". Un cambiamento sociale rilevante si registra con l'istituzione di una struttura di Protezione Civile, prima come Ministero, successivamente come Dipartimento alle dipendenze della Presidenza del Consiglio dei Ministri. Si affrontano le situazioni di emergenza, caso per caso, anche se si comincia timidamente a parlare di "prevenzione". In questo contesto, c'è inoltre da registrare la promozione del volontariato e dell'associazionismo.

In questo periodo, lo Stato si avvale di istituti di riferimento come: l'ISS (Istituto Superiore di Sanità), l'ISPESL (Istituto Superiore Prevenzione e Sicurezza sul Lavoro), l'ENEA-DISP (Direzione per la Sicurezza Nucleare e la Protezione Sanitaria), il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, i centri tecnici dell'allora Ministero dell'Industria, del Ministero dell'Agricoltura e del Ministero dei Lavori Pubblici; i Servizi Tecnici della Presidenza del Consiglio dei Ministri; l'ENEA e il CNR per gli aspetti di innovazione tecnologica e di base. Molti di questi istituti hanno compiti operativi. In particolare, l'ENEA-DISP, oltre ad essere Autorità di controllo in materia di energia nucleare, ha sviluppato al suo interno competenze diffuse di "cultura della sicurezza", promosse in ambito ONU, che antepongono il concetto di "prevenzione" e di approccio multi-disciplinare alla base della gestione degli impianti industriali (compresi quelli di produzione energetica), delle attività connesse ai trasporti, delle aree urbane, costiere e delle aree naturali protette.

Si assiste poi all'evoluzione del movimento ambientalista, che nel mondo occidentale nasce sotto l'egida di appelli accorati del tipo *Save our planet* ed agli inizi è accusato di catastrofismo, ma che ha il grande merito di aver scosso l'opinione pubblica, governi, mondo imprenditoriale a ricercare rimedi e soluzioni ai processi di crescente degrado delle varie matrici ambientali. Molte forme di associazionismo e di organizzazioni di volontariato non governative hanno carattere internazionale e progressivamente contribuiscono alla costruzione di indirizzi razionali, basati su adeguate conoscenze tecnico-scientifiche, fino all'affermazione del concetto di sostenibilità che coniuga globalmente sviluppo economico, equità e progresso sociale, tutela dell'ambiente. In ambito politico-istituzionale, bisogna considerare la nascita dei partiti politici "verdi" che pongono come priorità all'azione di Governo la salvaguardia dell'ambiente e la migliore qualità della vita. In realtà, questi due ultimi proponenti, assieme al *welfare*, sono gradualmente inseriti nei programmi di tutti gli altri attori politici, quali elementi di attenzione nei riguardi dell'elettorato. Un altro attore coinvolto nel generale cambiamento degli anni Ottanta è sicuramente il mondo industriale, con la sensibilizzazione del mondo imprenditoriale a fornire risposte adeguate alle crescenti esigenze e regole di legge, che superino interessi prettamente commerciali. Se migliorano i processi industriali al tempo stesso si aprono nuove fette di mercato negli ambiti dell'innovazione tecnologica, dell'impiantistica, delle energie pulite, della ricerca farmacologica. I grandi gruppi industriali adottano strategie di collaborazione in contesti internazionali e nei Paesi industrializzati, trasferendo però talvolta cicli produttivi ad alto rischio in Paesi in via di sviluppo.

In ambito internazionale, numerosi organismi come l'ONU, l'OCSE, la CEE, la *Association of South-East Asian Nations* sono impegnati per la promozione di misure integrate di protezione nei riguardi di fattori di pressione (dai cambiamenti climatici alle disparità sociali e alla povertà), attraverso studi, l'organizzazione di *summit*, emissione di convenzioni, protocolli, direttive e regolamenti, accordi e programmi di interventi economici. Pilastro basilare di quest'azione *super partes* è la diffusione di una cultura finalizzata ad ottenere un'adeguata sicurezza ed una dignitosa qualità della vita, a fornire garanzie alle generazioni future, a stimolare una *governance* efficiente degli ecosistemi e dei comportamenti umani in contesti globali, nazionali e locali di sviluppo sostenibile. Sviluppo sostenibile come ricerca di equilibri tra molteplici fattori, che deve coinvolgere responsabilmente tutte le fasce della comunità.

La convinzione comune di tutti gli organismi internazionali è che il Pianeta si debba considerare "un organismo vivente", in cui l'uomo gioca un ruolo chiave essendo "l'attore della scena".

Vale la pena di fare un breve excursus sull'articolazione delle strutture che in Italia si occupavano di controlli prima del 1978, anno in cui si delinea un netto cambiamento della politica ambientale in Italia attraverso la riforma sanitaria prevista dalla legge n. 833. Con essa si istituivano all'interno del Servizio Sanitario Nazionale i Presidi Multizonali di Prevenzione (PMP), organi provinciali che nascevano con l'obiettivo di svolgere attività tecnico-scientifiche per la conduzione dei controlli in ambito ambientale.

Prima di tale data, in base al Testo Unico delle Leggi sanitarie emanato nel 1934, erano le province ad avere in carico i Laboratori di Igiene e Profilassi, attraverso i quali si esercitavano le azioni di vigilanza e controllo in base alle indicazioni fornite dai medici provinciali. Con il passare degli anni e con il crescere di esigenze legate a questioni ambientali, tali amministrazioni avevano assunto via via compiti aggiuntivi in materia di conservazione e tutela dell'ecosistema, ampliando così le proprie competenze dalla sola tutela della salute a quella dell'ambiente in generale.

Con la riforma sanitaria del 1978 si puntò a costruire un sistema organico in grado di seguire interamente le questioni di tipo sanitario, dalla prevenzione alla riabilitazione, passando attraverso la terapia. Ma il nodo centrale è la prevenzione, affidata al coinvolgimento di personale quasi esclusivamente medico che opera nelle strutture sanitarie. La legge delegava, quindi, le attività relative alla prevenzione ambientale al settore sanitario, secondo il presupposto che tutela della salute e protezione dell'ambiente sono due elementi complementari e fondamentali nella vita dell'uomo.

I Presidi Multizonali di Prevenzione erano compresi nelle Unità Sanitarie Locali e dal punto di vista meramente operativo riunivano le competenze di strutture già esistenti, come gli storici Laboratori di Igiene e Profilassi – LIP (fondati inizialmente alle dipendenze del Ministero dell'Interno per vigilare

sulle problematiche di tipo alimentare e delle bevande), l'Ente Nazionale per la Prevenzione degli Infortuni e l'Associazione Nazionale per il Controllo della Combustione. I PMP acquisiscono, quindi, le competenze affidate dal Ministero della Sanità ai soggetti sopraccitati e le ampliano grazie all'attribuzione di ambiti sempre più diversificati: rumore, onde elettromagnetiche, inquinamento delle acque, del suolo e dell'aria.

Come si accennava, le attività dei PMP sono coordinate e gestite da medici del servizio sanitario. Ed è già in questo passaggio la prima difficoltà per un'efficace gestione dei controlli ambientali: la conduzione di ricerche e la raccolta dei dati su argomenti quali il monitoraggio dell'inquinamento dell'aria o delle acque era affidato alla supervisione di professionalità di estrazione sanitaria, non provenienti da una formazione specifica in campo ambientale.

Il forte legame che la legge n. 833/78 prevedeva tra controlli ambientali e competenze sanitarie genera una serie di distorsioni alle quali, a partire dalla seconda metà degli anni Ottanta, si cerca di porre rimedio.

Le strutture del tempo non erano in grado di garantire lo svolgimento efficace delle funzioni necessarie alla protezione dell'ambiente, soprattutto perché questo sistema soffriva di troppe lacune, sia professionali sia operative.

È giudizio unanime che l'affidamento dei compiti in materia ambientale alle Unità Sanitarie Locali per il tramite dei PMP non fosse soddisfacente. In base alla relazione della Commissione Affari sociali della Camera del 1989, relativa all'indagine conoscitiva sulla rete di prevenzione dei rischi produttivi, lavorativi e ambientali, emergeva un inadeguato funzionamento degli uffici del Servizio Sanitario. Il Ministero dell'Ambiente, già attivo da almeno tre anni, affidava le analisi ambientali al settore sanitario; tuttavia i laboratori delle USL gravati da molti altri impegni, non svolgevano in modo efficace i controlli e le attività richieste, rendendo estremamente difficile agire in un'ottica diversa da quella dell'emergenza. All'inizio degli anni Novanta appariva necessario un cambiamento istituzionale che portasse alla creazione di organi preposti esclusivamente alla protezione ambientale, che agissero non solo in modo ispettivo e sanzionatorio delle azioni a danno dell'ambiente, ma soprattutto in un'ottica di prevenzione, di conoscenza e di informazione. In base a questo complesso di considerazioni, la Commissione della Camera reputava prioritario creare un organo *ad hoc* dotato di un alto profilo tecnico-scientifico, che fosse una sorta di "ponte" fra l'attività del Ministero e

gli ambiti territoriali sanitari dal punto di vista dei modelli operativi di analisi e della riorganizzazione dei presidi stessi. Nell'ambito di un orientamento più generalizzato del Governo e creare strutture *ad hoc* per lo svolgimento dei compiti più propriamente tecnici, anche in ambito ambientale si avvertiva l'esigenza di istituire un'Agenzia che fungesse da *trait d'union* fra l'ambito governativo del dicastero dell'ambiente e i Presidi.

La nascita del Ministero dell'Ambiente

La coscienza che fosse necessario creare un'autorità organica responsabile in materia ambientale, che potesse programmare gli interventi e pianificare le azioni e gli indirizzi, si fa sempre più chiara. Si fece più forte anche alla luce di gravi episodi nazionali ed internazionali che ponevano l'attenzione della popolazione sulle priorità della protezione e salvaguardia ambientale. Nel 1976 una nube tossica contenente grandi quantità di diossina si sprigionò a Seveso in provincia di Milano provocando gravi danni alla salute degli abitanti della zona, la cui entità è ancora allo studio. Nello stesso anno in cui si istituiva il Ministero dell'Ambiente l'esplosione di un reattore nucleare della centrale ucraina di Chernobyl provocò l'innalzamento di una nube radioattiva e furono gravissime le conseguenze sulla salute di centinaia di migliaia di abitanti anche nei paesi limitrofi.

Sulla scia del grave episodio di Chernobyl in Italia si votò nel 1987 per tre referendum sul tema del nucleare, nei quali si chiedeva ai cittadini italiani di esprimersi in merito all'abrogazione di alcune disposizioni di legge sugli insediamenti di centrali. L'opinione pubblica votò a larga maggioranza per l'abrogazione e questo risultato sancì, di fatto, l'abbandono del nucleare da parte dell'Italia come forma di approvvigionamento energetico. Da quel momento furono progressivamente abbandonati i progetti relativi alla costruzione delle centrali nucleari e si avviarono processi di smantellamento e messa in sicurezza dei rifiuti radioattivi.

Nel frattempo, sotto l'influenza delle vicende di cronaca e dall'emergere a livello sociale e politico dell'esigenza di una struttura di governo specifica per la tutela ambientale, fu istituito nel 1986, con la legge n. 349, il Ministero dell'Ambiente. Questo cambiamento crea un riferimento istituzionale unitario al quale si possono rivolgere tutti i soggetti sensibili alle tematiche ambientali, ponendosi come necessario coordinamento tra Stato e Regioni, Province e Comuni.

La legge istitutiva del Ministero, pur indicando un cambiamento governativo nei confronti della questione ambientale, tuttavia non prevedeva l'adeguamento delle strutture operative e, di fatto, non permetteva di modificare il sistema delineato anni prima dalla riforma sanitaria.

Aver creato un dicastero apposito per le questioni ambientali non aveva necessariamente semplificato le attribuzioni e i compiti, che difatti rimanevano ancora lacunosi e ramificati, ma sicuramente riaffermava la preminenza dello Stato in materia ambientale e creava un centro di riferimento degli interessi pubblici.

Le prime realtà agenziali regionali e provinciali

La legge n. 61/94 prevedeva che le Regioni e le Province Autonome di Trento e Bolzano istituissero le Agenzie Regionali e delle Province Autonome, dotate di autonomia tecnico-giuridica e amministrativa, poste sotto la vigilanza del Presidente della Giunta. Le Regioni e le Province Autonome si impegnavano a garantirne l'autonomia scientifica e gestionale e la capacità di auto-programmazione, in armonia con l'ordinamento dell'Agenzia centrale.

La riforma dei controlli ambientali pose le premesse per la nascita di nodi regionali, dotati di grande autonomia, coordinati in una rete centro-periferia che permetteva di adattare i principi e gli obiettivi definiti a livello statale alle esigenze locali. L'istituzione delle Agenzie Regionali e delle Province Autonome, quali sedi periferiche della rete coordinata dall'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, si collegava sia al modello delle Agenzie in campo europeo, sia all'esigenza interna di organizzare i controlli e le attività. In scala ridotta rispetto alle difficoltà attraversate nei primi anni di attività dall'ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente), anche a livello regionale le Agenzie di protezione ambientale si trovarono a dover superare numerosi ostacoli. In attesa della promulgazione di leggi regionali, secondo il comma 3 dell'articolo 2 della legge 61 /94, erano attribuite momentaneamente alle Province le funzioni amministrative non chiaramente definite in materia di autorizzazione e controllo per la salvaguardia dell'igiene e dell'ambiente. Questa norma, di fatto, stabiliva che, fino all'adeguamento delle Regioni, i controlli ambientali continuassero ad essere esercitati dai PMP e dalle USL. Nonostante il limite di sei mesi stabilito dalla legge per l'istituzione delle Agenzie, non tutte le Regioni provvidero entro la scadenza prevista, costringendo all'allungamento dei termini per le inadempienti. I problemi maggiori riguardavano l'individuazione del modello amministrativo da seguire: era assente, infatti, una predefinizione e le Agenzie, distinte dall'organizzazione dei dicasteri e delle amministrazioni regionali e locali, non si ispiravano ancora a nuove modalità operative. La principale minaccia era quella di creare organi regionali da inquadrare nell'ambito degli enti strumentali, cioè enti diretti a svolgere, con margini ristretti di autonomia e sotto la diretta vigilanza delle istituzioni di amministrazione attiva, attività tecnico-gestionali e operative che l'apparato organizzativo ordinario non era in grado di soddisfare direttamente.

L'autonomia decisionale nell'esercizio delle proprie funzioni e l'avvio concreto dell'esperienza delle Agenzie si potevano raggiungere attraverso scelte di impostazioni più ampie sul piano organizzativo ovvero nuove relazioni tra il libello politico (Ministero dell'Ambiente, Regioni, Province e Comuni), il livello tecnico-scientifico (affidato all'Agenzia Nazionale) e il livello tecnico-operativo (affidato alle Agenzie Regionali e delle Province Autonome).

Lo Stato continuava a fissare il minimo comune denominatore valido su tutto il territorio nazionale per la tutela dell'ambiente, determinando gli *standard* di qualità ambientale ed i valori limite di emissione di sostanze inquinanti; le Regioni potevano fissare limiti più restrittivi, compatibilmente con le regole previste dalla programmazione dello Stato. A tal fine si rese necessario implementare la presenza di strutture tecniche in grado di fornire le informazioni, le elaborazioni ed i controlli indispensabili, a livello sia centrale sia regionale.

Le perplessità poste dalla legge sul modello organizzativo da seguire per istituire le ARPA e le APPA, non impedirono ad alcune regioni, come la Toscana, il Piemonte, l'Emilia Romagna, la Liguria, la Valle d'Aosta, il Veneto e le due Province Autonome di Trento e Bolzano a provvedere rapidamente all'attuazione delle definizioni della legge n. 61 /94 di loro competenza. La relativa tempestività con la quale queste Regioni e le due Province Autonome approvarono le leggi per la riforma del sistema dei controlli ambientali era collegata a diversi fattori: efficienza degli apparati; migliore capacità di proposta degli organismi preesistenti; raggiunta maturità culturale verso le tematiche di protezione dell'ambiente, probabilmente dovuta alla presenza di forti realtà industriali e di eccellenti centri di ricerca scientifica. Il ritardo delle altre Regioni si può spiegare soprattutto con la difficoltà a modificare e scindere forti strutture organizzative già dirette a svolgere i servizi di tutela della salute.

Le prime leggi approvate per l'istituzione delle ARPA e delle APPA evidenziano un sistema abbastanza omogeneo ed uniforme di modello organizzativo. Emergeva positivamente la volontà delle prime Agenzie di impostare le proprie attività secondo il principio della multireferenzialità, con la dichiarazione dell'impegno di rivolgersi costantemente alle Province ed ai Comuni della Regione di appartenenza, nel contesto di un più ampio coordinamento con l'Agenzia Nazionale e quella Europea dell'Ambiente. Inoltre, elencavano i meccanismi di collegamento tra le attività svolte dalle Agenzie e le attività svolte dalle USL, data la stretta interconnessione tra controlli ambientali e controlli sanitari che caratterizzava le funzioni dei precedenti Presidi Multizonali di Prevenzione.

A queste prime regioni si accodarono via via tutte le altre, si noti come la Regione Abruzzo risulti nel gruppo di mezzo avendo costituito la propria Agenzia nel 1998, anche se sua operatività si data a partire dal 2000.

Costituzione delle Agenzie

ANPA (ora denominata APAT)

Legge 21 gennaio 1994 n.61 (Istituzione del sistema delle Agenzie ambientali)

ARPA PIEMONTE – 1995

ARPA TOSCANA-1995

ARPA EMILIA-ROMAGNA – 1995

ARPA LIGURIA – 1995

ARPA VALLE D'AOSTA 1995

APPA TRENTO – 1995

APPA BOLZANO – 1995

ARPA VENETO – 1996

ARPA BASILICATA – 1997

ARPA MARCHE 1997

ARPA FRIULI VENEZIA GIULIA – 1998

ARPA UMBRIA – 1998

ARTA ABRUZZO – 1998

ARPA CAMPANIA – 1998

ARPA LAZIO – 1998

ARPA PUGLIA – 1998

ARPA CALABRIA – 1999

ARPA LOMBARDIA – 1999

ARPA MOLISE – 1999

ARPA SICILIA 2001

ARPA SARDEGNA - 2002

Introduzione storica della scoperta della radioattività

L'8 novembre 1895 Wilhelm Conrad Roentgen, professore di fisica all'Università di Wurzburg, stava studiando le caratteristiche dei raggi prodotti all'interno di un tubo nel quale era stato prodotto il vuoto e generata un'alta differenza di potenziale tra due elettrodi in esso contenuti. Questi raggi, chiamati *raggi catodici*, avevano origine in prossimità dell'elettrodo *catodo* ed erano diretti verso l'elettrodo *anodo*. Roentgen studiava, in particolare, la luminescenza indotta dal fascio di raggi catodici sul vetro del tubo. A un certo punto decise di "oscurare" questa luminescenza ricoprendo il tubo con un mantello sottile di cartone nero, in grado di impedire il passaggio dei raggi del sole o di una lampada ad arco; in queste condizioni notò una debole emissione luminosa provenire da un piccolo schermo fluorescente di carta spalmato di platinocianuro di bario, che si trovava casualmente a una certa distanza dal tubo.

La fluorescenza indotta sullo schermo durante il funzionamento del tubo persisteva anche allontanando lo schermo fluorescente o ponendo il tubo stesso in una cassetta di legno chiusa ermeticamente.

Tutto questo non trovava ragionevole spiegazione con il fenomeno dei raggi catodici, oggetto di studio da parte di numerosi fisici in quel periodo (JJ. Thomson dimostrò nel 1897 che i raggi catodici sono costituiti da cariche elet-triche negative, in seguito chiamate *elettroni*). Roentgen si accorse inoltre, con grande emozione, che interponendo la propria mano tra il tubo e lo schermo fluorescente appariva su questo l'ombra delle proprie ossa!

A questo punto comprese che qualcosa di sconosciuto, avente origine nel tubo, era in grado di attraversare il cartone opaco, o la cassetta di legno, la propria mano e di giungere a produrre fluorescenza sullo schermo: aveva scoperto i raggi X, così chiamati da Roentgen proprio per sottolinearne la natura sconosciuta. Nel giro di poche settimane Roentgen fu in grado di studiare e di descrivere le più importanti caratteristiche dei raggi X, e in particolare:

- la loro capacità di impressionare lastre fotografiche;
- la loro capacità di produrre ionizzazione in aria o in altri gas;
- la loro capacità di attraversare, senza apprezzabile attenuazione, molti materiali a basso numero atomico e a bassa densità;
- il loro significativo assorbimento durante il passaggio attraverso materiali ad alto numero atomico e ad alta densità.

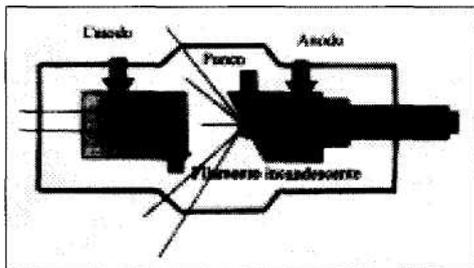
Il primo lavoro presentato da Roentgen, intitolato "Un nuovo tipo di raggi", riportava, oltre alle modalità di produzione e alle caratteristiche principali dei raggi X, anche l'immagine ormai famosa delle "ombre delle ossa della mano" della moglie.

Proprio il diverso grado di assorbimento dei raggi X in materiali a diverso numero atomico e a diversa densità è la caratteristica che viene sfruttata in radiologia clinica per "vedere" l'interno del corpo umano e, nell'industria e nella ricerca, per esaminare peculiarità o difetti interni a manufatti in genere metallici. La scoperta dei raggi X diede al clinico medico, da alcuni decenni già in possesso dello *stetoscopio* (lo "strumento che guarda dentro il torace") scoperto da Laennec, un formidabile mezzo diagnostico in grado di indagare *l'invisibile*, attraverso un oggetto fluorescente chiamato *criptoscopio*, lo "strumento che osserva le cose nascoste". Lo sviluppo delle tecniche radiologiche negli anni successivi fu impressionante anche grazie alla realizzazione nel 1912 da parte di Coolidge di un particolare tipo di tubo a raggi X, dello stesso tipo di quelli ancor oggi utilizzati, sia pure con importanti aggiornamenti tecnici.



W. Roentgen

Il tubo di Coolidge è schematicamente da un'ampolla di vetro, nella è praticato il vuoto spinto e nella ; si trovano due elettrodi, un catodo anodo (o anticatodo), quest'ultimo da un metallo ad alto numero atomico (ad esempio, tungsteno); nelle vicinanze del catodo si trova un filamento, riscaldato, libera elettroni. Nella i seguente è riportato uno schema



Schema di un tubo a raggi X

Gli elettroni liberati dal filamento riscaldato vengono attratti dall'anticatodo (che è l'elettrodo positivo): l'emissione dei raggi X è dovuta all'interazione degli elettroni (i raggi catodici studiati da Roentgen) con gli atomi dell'anticatodo. All'epoca della realizzazione di Coolidge era già stata dimostrata da M. Von Laue la natura fisica dei raggi X: sono *onde elettromagnetiche*, fisicamente dello stesso tipo della luce visibile, caratterizzate da una diversa lunghezza d'onda, estremamente piccola (dell'ordine di 10^{-10} m).

Poche settimane dopo la scoperta dei raggi X da parte di Roentgen, il fisico francese Henri Becquerel, ricercando una relazione tra i raggi X appena scoperti e i fenomeni di fluorescenza indotti su sali di uranio, scopriva il fenomeno della *radioattività naturale* e avviava il mondo scientifico dell'epoca alla scoperta della costituzione intima della materia.

Becquerel aveva scoperto che alcuni minerali di uranio, esposti al Sole, diventavano fluorescenti e pertanto pensò che avrebbero potuto emettere anch'essi raggi X o radiazioni simili. Egli allora, dopo aver esposto alla luce del Sole i minerali di uranio, li poneva su una lastra fotografica protetta dall'involucro di carta nera, per vedere se riuscivano ad impressionarla. E in effetti, quando andava a sviluppare la lastra, vi trovava l'impronta scura del minerale col quale era stata a contatto.

Avvenne però che in una giornata di cattivo tempo, Becquerel non potendo continuare gli esperimenti, riponesse ogni cosa nel cassetto in attesa che su Parigi tornasse il Sole. Quando, successivamente, il fisico francese andò ad utilizzare le lastre fotografiche che aveva custodito nel tavolo del laboratorio insieme ai minerali di uranio, si accorse che presentavano macchie scure come se fossero già state usate.

Fu così che Becquerel scoprì, casualmente, che i minerali di uranio emettevano radiazioni anche se non erano stati esposti preventivamente ai raggi del Sole, e che quindi la proprietà di irradiare doveva dipendere da caratteristiche insite nella sostanza stessa e non da fattori esterni.



Henri Becquerel

Tra il 1898 e il 1902 Pierre Curie e la moglie Marie Sklodowska scoprirono altri elementi (tra i quali il radio) in grado di presentare il fenomeno della radioattività, dimostrando quindi che questo non è esclusivamente caratteristico dell'uranio.



I coniugi Curie

Nel 1934 Irene Curie (figlia dei Curie) e il marito Frederic Joliot scoprirono il fenomeno della *radioattività artificiale*, cioè la possibilità di produrre artificialmente elementi radioattivi non presenti in natura e aprirono la strada alla scoperta di un grande numero di isotopi radioattivi artificiali (oggi sono centinaia gli isotopi radioattivi producibili artificialmente). Proprio lo stesso Becquerel, pochi anni dopo la scoperta della radioattività naturale, doveva accorgersi che le radiazioni scoperte da lui e da Roentgen producono effetti sugli organismi viventi: nasceva quindi da una parte la radioterapia, una nuova disciplina della medicina basata sullo sfruttamento terapeutico degli effetti biologici delle radiazioni, dall'altra la radioprotezione, cioè la disciplina che tratta della protezione dalle radiazioni.

La radioattività nella storia

- Tratto dalla pubblicazione APAT: "La radioprotezione in Italia (1999) -

- Nel novembre 1895, mentre studia le scariche di corrente nei tubi a vuoto, il tedesco Wilhelm Conrad Rontgen osserva che ogni volta che la corrente fluisce nel tubo sono emesse radiazioni invisibili che chiama raggi X. Egli nota che queste radiazioni possono attraversare moderati spessori di materia e sono fermate da alcune sostanze più facilmente che da altre. Entro breve tempo, nel febbraio 1896, ad opera di E. Frost, i raggi X sono utilizzati in medicina per la diagnosi radiografica.
- Il 1° marzo 1896 il ricercatore francese Antoine-Henri Becquerel verifica che la peblenda - un minerale di uranio - può causare l'annerimento delle lastre fotografiche anche in assenza di luce, e scopre in tal modo la radioattività naturale. Nel 1899 lo scienziato inglese Ernest Rutherford identifica due tipi di radiazione emessi dalla peblenda, e li chiama raggi alfa e raggi beta. Nel 1900 il francese Paul Villard trova fra le emissioni della peblenda un terzo tipo di radiazione, che battezza raggi gamma.
- Nel 1896 l'americano Thomas Edison riferisce di danni agli occhi causati dai raggi X. N. Testa mette in guardia gli sperimentatori sulla necessità di evitare la permanenza in prossimità dei tubi a raggi X durante il loro funzionamento. Il dottor D.W. Gage pubblica un articolo nel quale descrive alcuni danni provocati dai raggi X: caduta dei capelli e lesioni cutanee.
- Nel dicembre 1898 Pierre Curie e Maria Sklodowska, trattando diverse tonnellate di peblenda, riescono ad isolare e ad estrarre meno di un grammo di un nuovo elemento - il radio - cui attribuiscono la radioattività emessa dalla peblenda. Henry Becquerel ne riceve in dono una piccola quantità, che ripone in una tasca. Giunto nel proprio laboratorio si accorge di avere la pelle ustionata in corrispondenza della tasca.
- Nel 1910 il padre gesuita Theodor Wulf effettua misure di radioattività a livello del suolo e sulla cima della torre Eiffel, scoprendo che la radiazione cresce con l'elevazione. Egli formula l'ipotesi che la radiazione ambientale abbia una componente di origine cosmica, e propone di effettuare misure ad alta quota utilizzando i palloni aerostatici. Attuando il suo suggerimento Victor Hess scopre nel 1912 i raggi cosmici.
- Nei primi anni Dieci i ciarlatani entrano nel "business" radioattivo. L'U.S. Patent Office rilascia un gran numero di brevetti per apparecchiature, sostanze e tecniche di cura "miracolose". Nel 1912 è brevettato il "Revigorator", una pozione a base di minerali di radio. Nello stesso anno si registra il decesso di un paziente che per curare l'artrite si sottoponeva a iniezioni di radio-226. Nel 1925 W.Bailey commercializza il "Radithor", una pozione a base di radio contro le disfunzioni sessuali. Nel 1932 l'industriale e *playboy* e miliardario E. Byers muore in seguito all'assunzione di Radithor.
- Nel 1915 la *British Rontgen Society* propone i primi standard per la protezione dei lavoratori e della popolazione dagli effetti indesiderati delle radiazioni. Si tratta di un sistema di controlli volontari che agiscono sulla schermatura delle sorgenti, sulla limitazione delle ore lavorative e su regolari controlli sanitari. L'assenza di unità di misura standard e di dosimetri impedisce l'adozione di precisi limiti di dose.

- Durante la prima guerra mondiale è esposto alla radioattività un elevato numero di lavoratrici impiegate nella costruzione di strumenti a quadrante luminoso. Nel 1920 l'uso di vernici fluorescenti a base di sostanze radioattive si estende senza particolari controlli all'industria civile dell'orologeria. Nel 1925 il fisiologo Martland rileva nei lavoratori coinvolti stati di anemia e patologie ossee.
- Nel 1925 inizia l'utilizzazione su larga scala della radioterapia per la cura del cancro. Negli anni successivi vengono perfezionate e descritte nelle pubblicazioni mediche e scientifiche apparecchiature e metodiche. Nel 1927, ad opera di H.Muller, appaiono i primi studi sugli effetti genetici delle radiazioni negli animale (moscerini), mentre nessun effetto genetico sull'uomo è stato evidenziato a tutt'oggi (vedasi gli studi epidemiologici più importanti che sono quelli condotti sui sopravvissuti di *Hiroshima e Nagasaki*).
- Nel 1927 un medico di Boston, Herman Blumgart, fa uso per la prima volta di traccianti radioattivi per la diagnosi di stati patologici del cuore e dell'apparato cardiocircolatorio.
- Nel 1928 si tiene il primo congresso *dell'International Committee on X-ray and Radium Protection*, organismo dal quale trarrà successivamente origine l'International Commission for Radiological Protection (ICRP). Sono pubblicati i primi standard internazionali per la protezione dalle radiazioni.
- Nel 1932 Chadwick, interpretando precedenti risultati sperimentali ottenuti da Irène Curie e Frederic Joliot, stabilisce l'esistenza di una nuova particella elementare, il neutrone, che si viene ad aggiungere alle uniche due precedentemente identificate, l'elettrone e il protone.
- Nel 1934 Irène Curie e Frederic Joliot, bombardando con particelle alfa un foglio di alluminio, producono il primo isotopo radioattivo artificiale: il fosforo-30. Lo stesso anno Enrico Fermi dimostra che è possibile produrre isotopi radioattivi in grande quantità utilizzando come proiettili i neutroni in luogo delle particelle alfa. Pur essendosi imbattuto durante questi studi, nella fissione nucleare, Fermi non se ne rende conto, e avvia con la sua équipe un'intensa attività sperimentale finalizzata alla produzione di isotopi radioattivi.
- Nel 1938 Otto Hanh, F. Strassmann e Lize Meinter scoprono che bombardando l'uranio con neutroni lenti si può produrre la scissione del nucleo in due o più frammenti radioattivi, con liberazione di neutroni e di energia: a questo particolare tipo di reazione viene dato il nome di fissione nucleare.
- Il 2 dicembre 1942 a Chicago un'equipe guidata da Enrico Fermi realizza la "pila" di uranio e grafite CP-1, con la quale dimostra la possibilità di indurre e sostenere in modo controllato la reazione di fissione a catena. Nasce in tal modo il primo prototipo di reattore nucleare

IL SISTEMA DELLA RADIOPROTEZIONE AMBIENTALE IN ITALIA

L'esistenza di un sistema di radioprotezione nazionale efficiente, affidabile, e trasparente è ormai una condizione irrinunciabile di ogni paese industriale, affinché le attività a rischio radiologico possano essere svolte nel rispetto dei principi basilari della normativa in tema di tutela della salute dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente. L'urgenza di questo compito ha avuto un impulso decisivo a seguito dell'incidente di Chernobyl (1986).

La chiusura delle centrali nucleari e delle installazioni del ciclo del combustibile nucleare non ha attenuato in Italia la suddetta esigenza, che permane intatta in considerazione della necessità di gestire l'eredità del nucleare pregresso, dell'estensivo sviluppo dell'uso delle radiazioni in diversi settori industriali, alimentari, medico sanitari e della ricerca ed infine della necessità di assicurare un dispositivo adeguato a fronteggiare il traffico illecito di materiali nucleari e rifiuti radioattivi e le possibili situazioni di emergenza che potrebbero derivare da incidenti nucleari di portata transfrontaliera o da possibili attentati con materiali radioattivi.

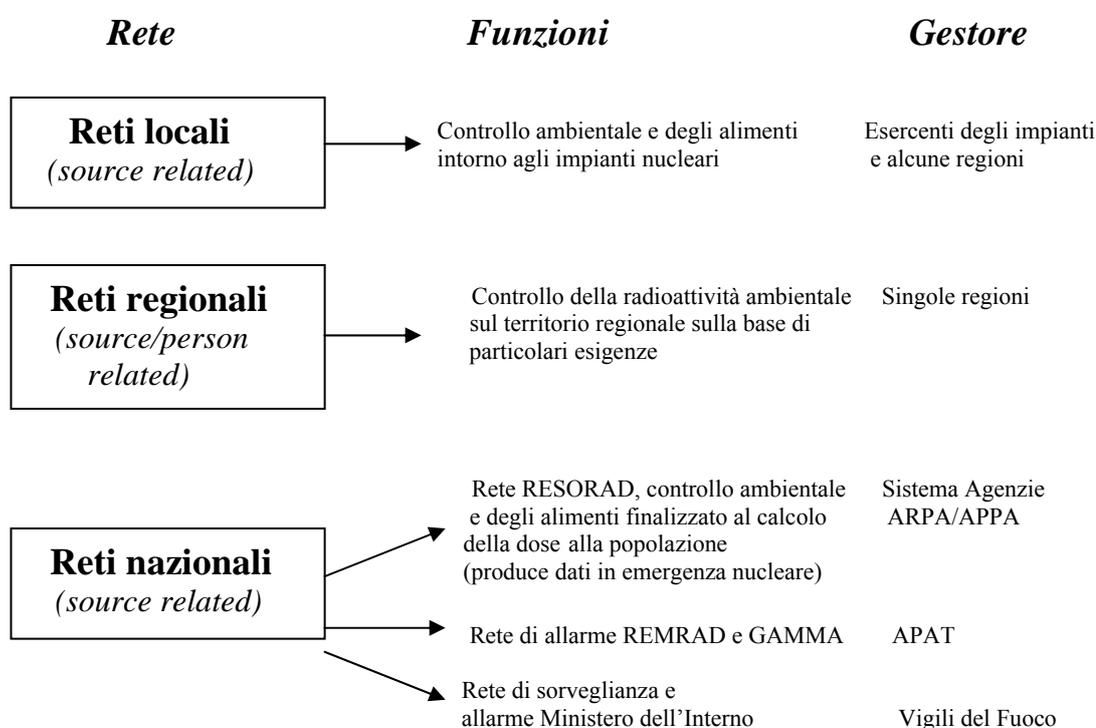
A fronte di quelle che sono vere e proprie sfide tecnologiche e gestionali, perché il sistema di radioprotezione possa offrire ai lavoratori, alla popolazione e all'ambiente garanzie di efficienza ed affidabilità ai fini del controllo e della minimizzazione dei rischi è necessario che esso sia correttamente strutturato, unitario (pur nell'articolazione delle competenze), autorevole sul piano tecnico-scientifico e trasparente sul piano dell'informazione.

Il sistema dei controlli sulla radioattività ambientale ha subito nel corso degli ultimi anni significativi mutamenti da un lato dall'evoluzione della normativa italiana ed europea di riferimento, dall'altro dalle innovazioni introdotte nel nostro paese in materia di tutela ambientale tra cui spicca in prima linea l'istituzione del sistema agenziale ARPA/APPA (Agenzie Regionale per la Protezione dell'Ambiente/Agenzie Provinciali per la Protezione dell'Ambiente, unica eccezione italiana a queste sigle è l'Agenzia Abruzzese che è stata denominata ARTA poiché la sigla ARPA era già in uso). Ciò ha determinato la necessità di una parziale riorganizzazione (ancora non del tutto conclusa) del sistema di controlli della radioattività ambientale.

Il controllo sulla radioattività ambientale è regolato, nel nostro paese, dal Decreto Legislativo n.230 del 17 marzo 1995 e sue successive modifiche e integrazioni (D.L. 241/2000, D.L. 257/2000, D.L. 151/2000, L. n.39 del 1/3/2002). Il Ministero dell'Ambiente esercita il controllo sull'ambiente, mentre il Ministero della Salute esercita il controllo sugli alimenti riguardanti l'uomo e gli animali.

Così come evidenziato nello schema seguente il controllo della radioattività si attua attraverso reti strutturate su tre diversi livelli

- **Reti locali** (source related) attraverso le quali si esercita il controllo ambientale e degli alimenti intorno agli impianti nucleari. Esse sono gestite dagli esercenti ed eventualmente anche dalle Regioni.
- **Reti regionali** (source related/person related) di controllo dei livelli di radioattività sul territorio regionale, gestite in autonomia dalle singole regioni, secondo le direttive impartite dal Ministero della Salute e dell’Ambiente, e con criteri dipendenti dalle particolari esigenze di monitoraggio.
- **Reti nazionali** (person related), con compiti di allarme e di monitoraggio:
 - Reti di allarme e vigilanza APAT (RAMRAD e GAMMA) per il rilevamento della radioattività in aria.
 - Rete di allarme e vigilanza del Ministero dell’Interno, gestita dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco.
 - Rete di controllo della radioattività ambientale **rete RESORAD costituita dai laboratori regionali delle ARPA/APPA** e dagli istituti, enti ed organismi idoneamente attrezzati. Essa ha tra i compiti principali quello di fornire un quadro rappresentativo e generale della situazione italiana ai fini della valutazione della dose alla popolazione. Inoltre tutte le strutture della rete RESORAD sono deputate a fornire tutti i dati al centro di controllo CEVAD (gestito da APAT) a seguito di emergenze radiologiche.



La rete RESORAD

Gli obiettivi principali del sistema delle reti nazionali sono i seguenti:

- seguire l'andamento spazio-temporale delle concentrazioni dei radioelementi di origine antropica nelle matrici dei diversi comparti ambientali sull'intero territorio nazionale;
- fornire un set di dati radiometrici rappresentativo per la valutazione della dose ricevuta dalla popolazione italiana, anche a seguito di eventi incidentali;
- rilevare fenomeni di accumulo dei radionuclidi a lunga vita media nei diversi comparti ambientali;
- individuare prontamente anomalie derivanti da eventi, verificatesi anche al di fuori del territorio nazionale, che comportino contaminazione;
- informare periodicamente la popolazione e le istituzioni preposte sull'attività svolta "fotografando" lo stato radiometrico dell'ambiente a livello nazionale.

Nella seguente tabella riportiamo schematicamente il programma RESORAD di campionamento delle matrici ambientali (attualmente in fase di aggiornamento) rappresentative dei principali comparti ambientali e di alcune componenti della dieta italiana al fine di stimare la dose annuale assorbita dall'organismo umano. Le frequenze di campionamento tengono conto dei tempi di accumulo della radioattività nei vari comparti ambientali e dei limiti di rivelabilità della misura.

Matrice	Frequenza delle misure	Frequenza delle misure	Principali radionuclidi	Misure del CRR Arta-Abruzzo
Particolato atmosferico	Giornaliera	Mensile	Beta totale, Cs-137, Be-7	Cs-137, Be-7
Deposizioni umide e secche	Mensile	Mensile	Cs-137, Be-7, Sr-90	Cs-137, Be-7
Acqua potabile *	Semestrale	Semestrale	Cs-137, Sr-90	Cs-137
Matrici dell'ambiente acquatico	Semestrale	Semestrale	Cs-137, Sr-90	Cs-137
Carni	Mensile	Trimestrale	Cs-137	Cs-137
Pesci	Semestrale	Semestrale	Cs-137	Cs-137
Cereali e derivati	Stagionale	Stagionale	Cs-137, Sr-90	Cs-137
Pasta	Trimestrale	Trimestrale	Cs-137	Cs-137
Vegetali	Stagionale	Stagionale	Cs-137, Sr-90	Cs-137
Frutta	Stagionale	Stagionale	Cs-137	Cs-137
Latte	Mensile	Mensile	Cs-137, Sr-90	Cs-137

* Non sono state ancora elaborate (in quanto ancora in fase di discussione) le procedure e le misure previste ai sensi della direttiva del Consiglio 98/83/CE del 3/11/98 sulla qualità delle acque destinate al consumo umano, recepita in Italia dal D.L. 31/2001

La sigla CRR è l'abbreviazione dell'acronimo CRRA (Centro Regionale di Riferimento per la Radioattività Ambientale).

Come si vede dalla tabella il CRR Arta-Abruzzo riesce quasi completamente a svolgere il programma APAT, sono esclusi il Beta-totale e lo Sr-90 in quanto il nostro Centro non ha né la strumentazione né il personale idoneo per tali misure molto specialistiche e impegnative, che solo poche regioni italiane hanno. Inoltre il CRR svolge attività di controllo delle acque reflue ospedaliere del presidio di Pescara e di alcuni altri presidi della regione, nonché analisi su richiesta di privati.

Riepilogando l'Arta-Abruzzo svolge la sua attività di monitoraggio nel rispetto del programma regionale che prevede i seguenti campionamenti nei due comparti:

- **AMBIENTE**
- **ALIMENTI**
(al fine di poter conoscere la dose individuale assorbita),

inoltre svolge:

- analisi per privati (a pagamento);
- controlli sulle acque reflue ospedaliere;
- partecipa a campagne di interconfronto promosse dall'APAT al fine di coordinare, testare e verificare l'omogeneità dei processi di misura a livello nazionale (nel 2004 abbiamo partecipato con buoni risultati all'interconfronto "Simulazione di un filtro con radioisotopi incogniti" mentre attualmente stiamo partecipando all'interconfronto "Radon");
- dal 2004 è stato avviato il Progetto "Zonizzazione da Radon" che prevede il posizionamento di 3000 dosimetri nelle abitazioni della regione, il loro ritiro dopo un anno di esposizione, la misura di concentrazione da Radon e l'elaborazione e la stesura dei dati.

Inoltre nella previsione di un potenziamento di risorse umane del CRR è prevista la costituzione di un catasto delle sorgenti radioattive della nostra regione e l'avviamento di un programma di sorveglianza fisica e controlli sul territorio.

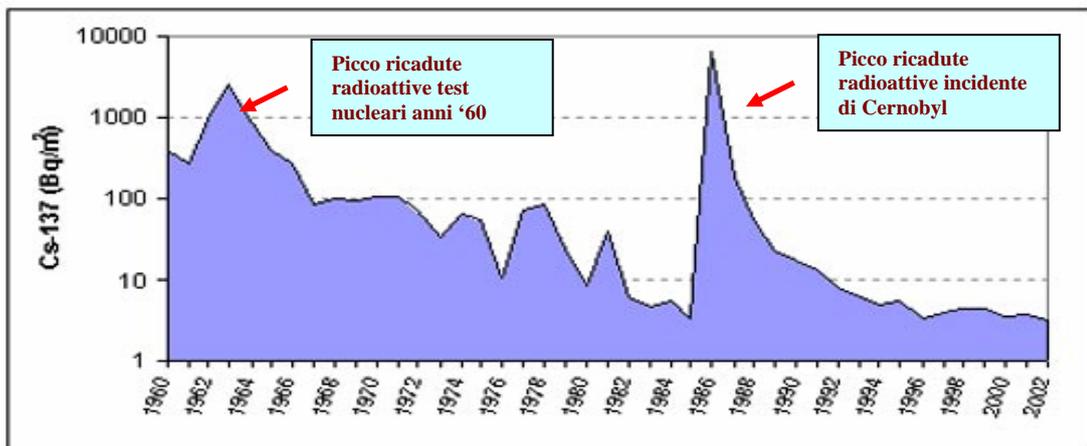
Concludendo questo aspetto possiamo dire che le matrici considerate comprendono in ogni caso tutte quelle espressamente indicate dalla Raccomandazione della Commissione Europea dell'8 giugno 2000 (aria, particolato atmosferico, acque superficiali, acque potabili, latte e dieta mista).

I dati annualmente prodotti dal nostro CRR vengono inviati all'APAT, alla quale è affidato il compito della raccolta dei dati radiometrici della rete, che successivamente li trasmette alla Commissione Europea e precisamente alla banca dati REM del Joint Research Centre di Ispra (VA).

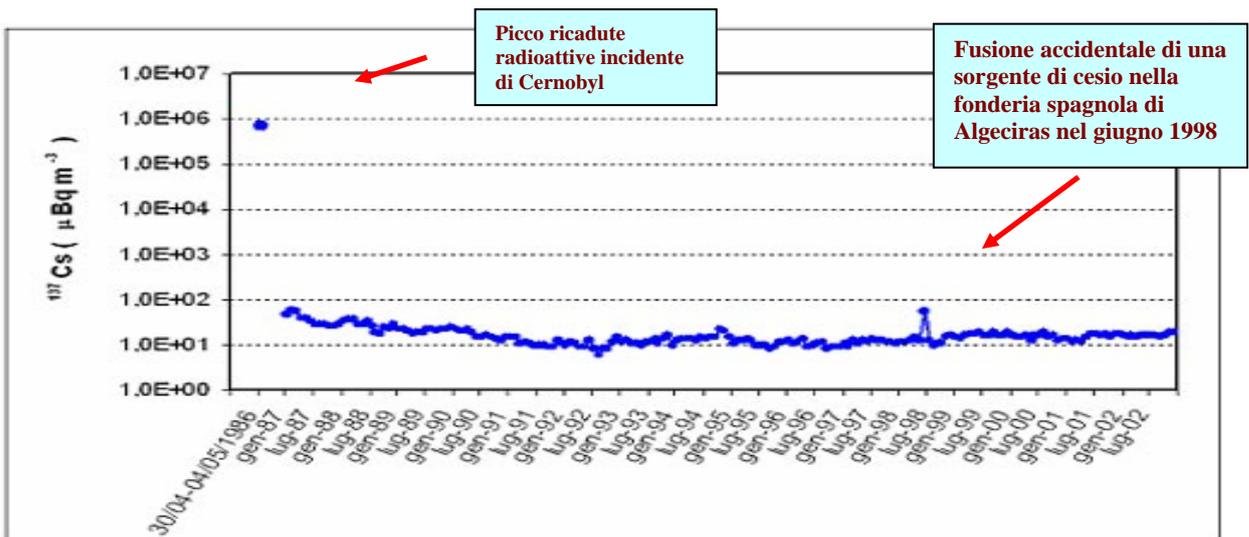
A puro titolo esemplificativo della potenza operativa della rete APAT mostriamo due grafici dell'andamento dell'attività del radioisotopo artificiale più importante il Cs-137 in due matrici fondamentali quali le deposizioni umide e secche e il particolato atmosferico: si evidenzia come i valori relativamente alti degli anni '60 (a causa degli esperimenti atomici in atmosfera – si consideri che negli anni compresi fra il 1952 ed il 1962 si è avuto un totale di 520 esplosioni di ordigni a fissione o fusione termonucleare per una potenza complessiva di 545 megaton-) e del picco del 1986 (incidente di Cernobyl) siano ormai “decantati” e si può dire che i valori di radioattività artificiale nell'aria sono molto bassi, quasi sempre inferiori al limite di rivelabilità strumentale.

Inoltre si evidenzia come nel grafico del particolato si noti un piccolo picco nel 1998 che si è scoperto causato da una fusione accidentale di una sorgente di Cs-137 in una fonderia spagnola, da notare che questo incidente sarebbe passato probabilmente inosservato senza le misure della rete APAT.

Deposizioni umide e secche (fallout) dal 1960 al 2002 –media italiana-



Particolato atmosferico dal 1986 al 2002 – media italiana –



Grafici: fonte APAT

Rapporto attività del Centro Regionale di Riferimento della Radioattività Ambientale ARTA-Abruzzo

A cosa serve un Centro di controllo della Radioattività?

Serve a sorvegliare i livelli di contaminazione radioattiva antropica dell'aria che respiriamo e dei cibi che mangiamo, nonché a stimare la dose assorbita dalla popolazione abruzzese. In caso di emergenza radiologica produce misure che permetteranno agli organi preposti di elaborare le necessarie strategie di contenimento volte alla protezione della salute della popolazione e dell'ambiente.

Il presente rapporto relativo agli anni 2003-2004-2005 presenta i risultati delle analisi effettuate dal CRR Arta-Abruzzo di Pescara sulla contaminazione radioattiva dell'ambiente e degli alimenti in base al programma regionale di controllo della radioattività, approvato annualmente dalla Regione Abruzzo.

La scelta delle matrici, le modalità di campionamento e la frequenza delle analisi sono state definite tenendo in particolare conto la dieta considerata significativa per la popolazione abruzzese, l'attitudine all'accumulo ed al trasferimento degli elementi radioattivi nelle diverse matrici ambientali e alimentari nonché la loro significatività statistica.

Il programma riportato nella seguente tabella è quindi volto a rilevare la contaminazione del territorio regionale, degli alimenti più significativi in esso prodotti ed a stimare la dose efficace impegnata da ingestione e inalazione per la popolazione abruzzese.

Programma regionale 2005 di campionamento per il controllo della Radioattività.
 Tipologia degli alimenti e quantità di esami da effettuarsi a cura dell'ARTA e dell'IZS.
 (BURA del 29 giugno 2005 n. 71 Speciale)

	CRR Arta – Abruzzo di Pescara	Istituto Zooprofilattico Sperimentale di Teramo
Alimenti	Numero esami	Numero esami
Latte vaccino	12	-
Latte in polvere	1	-
Carne bovina	8	8
Carne suina	2	4
Carne di pollo	2	2
Lattuga	1	3
Patate	-	1
Frutta fresca	4	12
Grano duro	2	2
Grano tenero	2	2
Farina di grano tenero	8	4
Pasta alimentare	4+4	-4+4
Omogeneizzati	1	-
Pastina per neonati	-	1
Particolato atmosferico	365	-
Deposizione al suolo	12	-
Molluschi	-	4
Funghi	4	8
TOTALE	432	59

Aggiornamento del Programma proposto dal CRR per l'anno 2006

Matrice	N° campioni/anno	Quantità di ogni campione	Frequenza Campionamento
Latte vaccino fresco	12	2 L	mensile
Latte in polvere	1	2 L	annuale
Carne suina	4	3-4 Kg (muscolo tagliato a pezzetti)	trimestrale
Carne bovina	4	3-4 Kg (muscolo tagliato a pezzetti)	trimestrale
Carne avicola	4	3-4 Kg (muscolo tagliato a pezzetti)	trimestrale
Grano duro	4	2 Kg	trimestrale
Grano tenero	4	2 Kg	trimestrale
Farina di grano tenero	2	2 Kg	semestrale
Pasta alimentare	4	2 Kg De Cecco + 2 Kg Del Verde	trimestrale
Omogeneizzati	2	2 vasetti	semestrale
Funghi selvatici	1	2 Kg	semestrale
Pane locale	2	2 Kg	semestrale
Pesce di mare (orate, merluzzo, sogliole)	2	2 Kg	semestrale
Formaggio(pecorino abruzzese)	2	2 Kg	semestrale
Frutta fresca	4	2 Kg	trimestrale
Miele locale	2	2 Kg	semestrale
Vino locale	2	2 L	semestrale
Lattuga	1	2 Kg	annuale
Deposizione umida al suolo	12 (ARTA)		mensile
Particolato atmosferico	365 (ARTA)		giornaliero
Acqua potabile	2 (ARTA)	2 L	semestrale

Tutti i campioni vengono prelevati dalle varie ASL della regione.

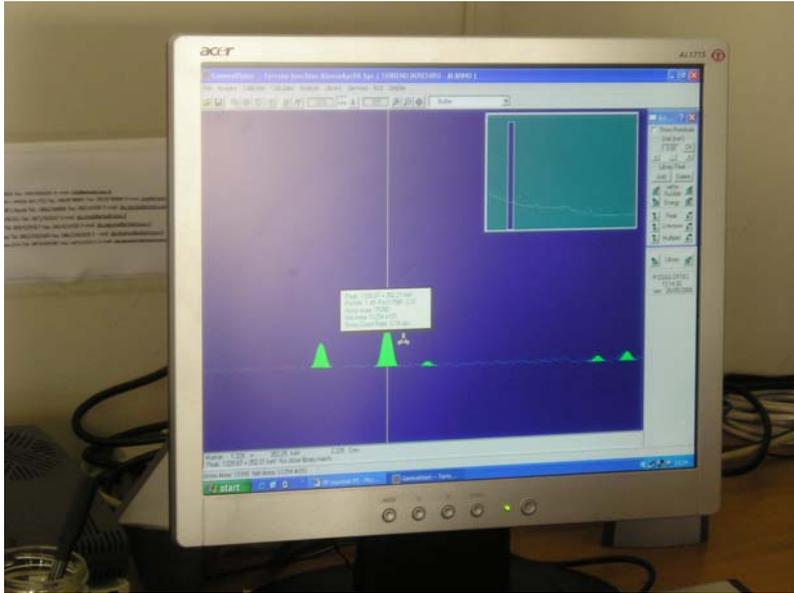
Alcune foto del CRR
Arta-Abruzzo
Dipartimento di Pescara
Settore Fisico-Ambientale
Via Marconi, 51



IL Responsabile del Settore Fisico-Ambientale Dr. Sandro D'Ostilio controlla la ricarica di azoto liquido nel Dewar. (Foto Piero Pellegrini,2006)



Il rivelatore al Germanio Ortec (Foto Piero Pellegrini,2006)



La catena spettroscopica ha come interfaccia finale il Computer che elabora con apposito programma (Gamma Vision) i dati della misura. (Foto Piero Pellegrini,2006)



I due rivelatori: l' Ortec a sinistra e il Silena a destra (Foto Piero Pellegrini,2006)



Il filtro viene depositato all'interno della pompa aspirante per l'esame del particolato atmosferico (Foto Piero Pellegrini, 2006)



Le vasche sul terrazzo del Dipartimento ARTA di Pescara per la raccolta delle deposizioni umide e secche, su un'asuperficie di 2 m² (Foto Piero Pellegrini, 2006)

Risultati misure

Tutti i risultati sono frutto di analisi di spettrometria gamma effettuati con i nostri due rivelatori a stato solido:

- l' "Ortec" che utilizza un sensore al Germanio iperpuro di tipo p (V= + 2500 volt) con efficienza relativa del 28.5%, (**volume sensibile 137 cm³**; sup. della finestra 23 cm²; risoluzione a 1.3 MeV di 1.80 keV);
- e il "Silena" che utilizza un sensore al Germanio iperpuro di tipo n (V= - 3000 volt) con efficienza relativa del 38%; **volume sensibile 156 cm³**; sup. della finestra 26.86 cm²; risoluzione a 1.3 MeV di 1.77 keV).

I valori delle nostre misure sono espressi in unità SI e le relative incertezze sono riferiti ad un livello di confidenza del 99.5% (3 σ).

Nel calcolare le medie, i dati inferiori al limite di rivelabilità (MAR) sono stati assunti pari al limite stesso.

Sia nelle matrici ambientali che alimentari i radionuclidi artificiali ricercati sono quelli che indicano la presenza di un incidente nucleare, in particolare il Cs-137, il Cs-134 e lo I-131.

Particolato atmosferico

Le analisi del particolato atmosferico vengono effettuate utilizzando appositi filtri su cui si deposita il particolato in sospensione nell'aria che viene aspirata da una pompa impostata ad un "tiraggio" di 60 m³ al giorno. Il sito della misura è il terrazzo del Dipartimento ARTA di Pescara (Lat. 42° 27' 45'' Long. 14° 13' 06''), i prelievi e le analisi vengono eseguite giornalmente (esclusi i giorni non lavorativi), inoltre viene fatta la misura sulla raccolta mensile di tutti i filtri (pacchetto filtri mensile). I filtri utilizzati sono circolari di cellulosa, con diametro di 4.7 cm.. La misura giornaliera viene fatta iniziare un'ora dopo il prelievo al fine di far decadere la radioattività di origine naturale dovuta a radionuclidi con un breve tempo di dimezzamento ed inoltre il tempo di acquisizione della misura è come minimo di 2 ore sul filtro giornaliero mentre è di circa 24 ore per il pacchetto filtri mensile.

Deposizioni al suolo (fall-out)

I campioni si ottengono raccogliendo mensilmente il materiale depositatosi nelle vasche sia per ricaduta “secca” che “umida” (cioè a causa delle piogge). Le vasche vengono svuotate e l’acqua viene raccolta e portata e secco ed il residuo così ottenuto viene analizzato in quantità fissa di 4 g.

Le vasche di polietilene con superficie totale di 2 m² sono ubicate sul terrazzo del Dipartimento ARTA di Pescara (Lat. 42° 27’ 45’’ Long. 14° 13’ 06’’ ; altezza sul livello del mare: 15 m).

Ai fini di un confronto con la quantità di sostanze raccolte si danno anche i valori della piovosità annuale sulla città di Pescara.

Latte

I controlli sono stati eseguiti su campioni di ditte locali prelevati dal comune di Spoltore.

Formaggio (solo 2005)

dal 2005 si è inserito nel set di matrici alimentari anche il formaggio locale per meglio calcolare l’apporto alla dieta.

Carni

Analisi su campioni compositi trimestrali prelevati nei macelli della provincia di Pescara e Chieti.

Cereali

Le produzioni annuali di grano duro e tenero prelevati nelle province della regione confermano i valori di Cs-137 inferiori al limite di rivelabilità.

Pasta e pane

I controlli sui campioni trimestrali della pasta delle due ditte locali più importanti “De Cecco e “Del Verde” confermano livelli pressoché costantemente inferiori ai limiti di rivelabilità.

Prodotti ortofrutticoli

Nel corso dell’anno sono stati analizzati campioni di diverse specie di ortaggi e frutta coltivate nella nostra regione e prelevati nelle province di maggiore produzione. I livelli di contaminazione da Cs-137 confermano valori inferiori al limite di rivelabilità.

Prodotti per l’infanzia

I controlli eseguito hanno mostrato l’assenza di contaminazione da Cs-137.

Tutti i valori delle matrici alimentari si sono mantenuti inferiori alla MAR (minima attività rivelabile), ad eccezione delle due analisi sul pesce del 2005.

Durante il 2003 sono state eseguite complessivamente n. 309 misure di spettrometria gamma così ripartite:

<i>MATRICE</i>	numero misure	Cs-137 valore min.	Cs-137 valore max	<i>Cs-137 valore medio</i>	unità di misura
<i>Particolato atmosferico</i>	270	0,0001	0,0026	<i>0,0005</i>	Bq/m ³
<i>Pacchetto filtri mese</i>	11	0,0102	0,0203	<i>0,0150</i>	mBq/m ³
<i>Fallout</i>	11	0,0450	0,2081	<i>0,0695</i>	Bq/m ²
<i>Alimenti</i>	17	0,0340	0,2082	<i>0,0865</i>	Bq/Kg

I valori del radionuclide naturale Be-7 risultano invece sempre rivelabili e compresi fra i valori di 0,2 e 0,5 mBq/m³.

Durante il 2004 sono state eseguite complessivamente n. 294 misure di spettrometria gamma così ripartite:

MATRICE	numero misure	Cs-137 valore min.	Cs-137 valore max	Cs-137 valore medio	unità di misura
<i>Particolato atmosferico</i>	249	0,0001	0,0182	0,0006	Bq/m3
<i>Pacchetto filtri mese</i>	11	0,0180	0,0424	0,0205	mBq/m3
<i>Fallout</i>	12	0,0535	0,3470	0,1550	Bq/m2
<i>Alimenti</i>	22	0,0247	0,2340	0,1290	Bq/Kg

I valori del radionuclide naturale Be-7 risultano invece sempre rivelabili e compresi fra i valori di 2 e 6 mBq/m3.

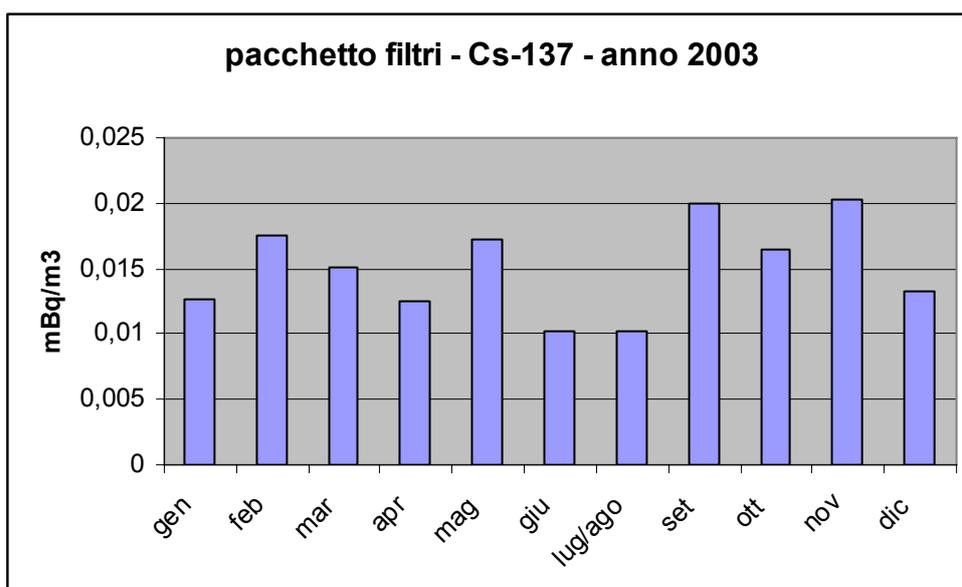
Durante il 2005 sono state eseguite complessivamente n. 283 misure di spettrometria gamma così ripartite:

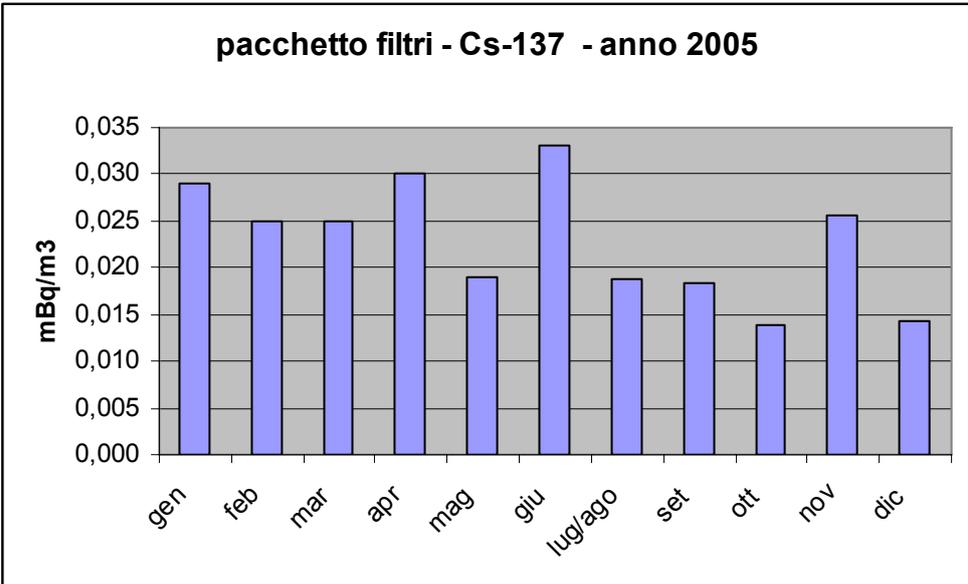
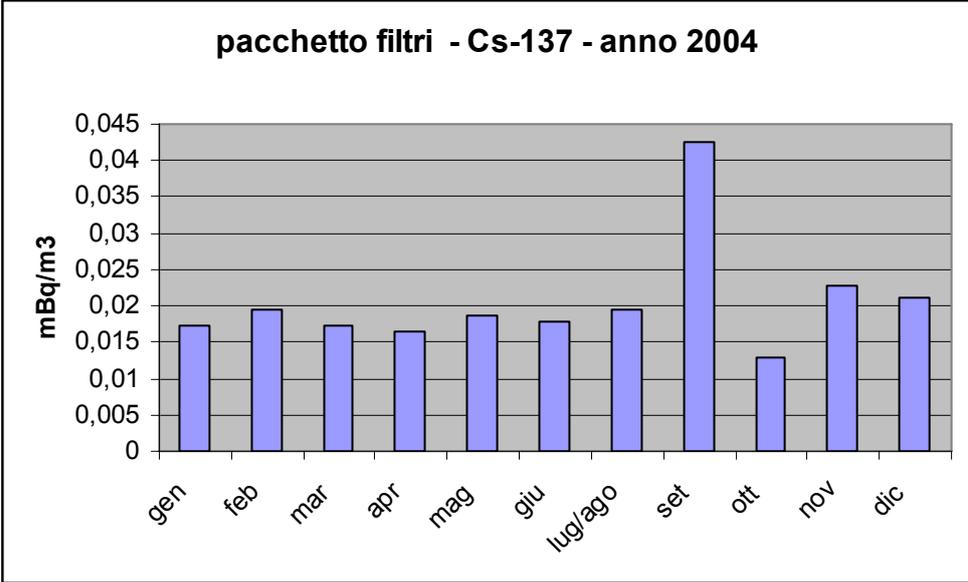
MATRICE	numero misure	Cs-137 valore min.	Cs-137 valore max	Cs-137 valore medio	unità di misura
<i>Particolato atmosferico</i>	210	0,00001	0,0017	0,0004	Bq/m3
<i>Pacchetto filtri mese</i>	11	0,0290	0,0330	0,0230	mBq/m3
<i>Fallout</i>	11	0,0650	0,1890	0,1350	Bq/m2
<i>Alimenti</i>	51	0,1290	7,7500	0,3941	Bq/Kg

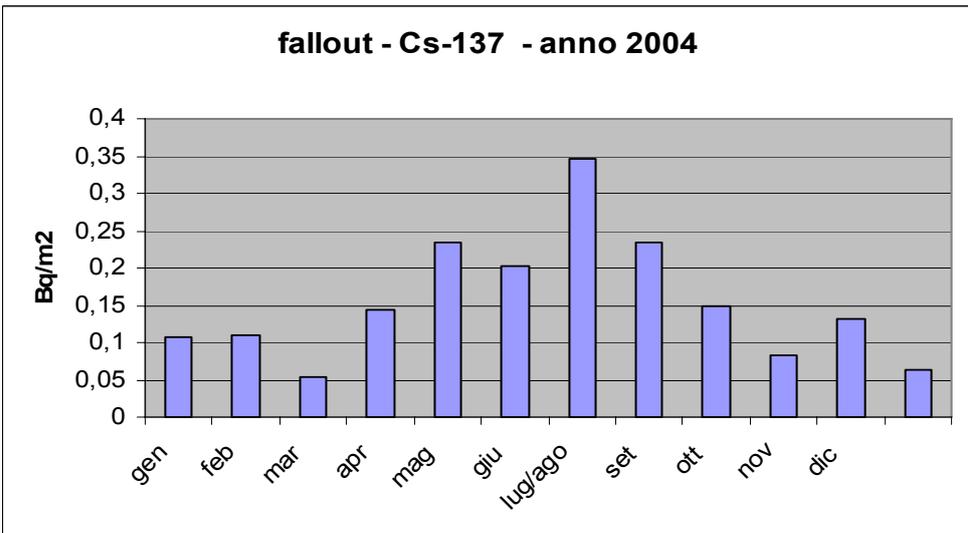
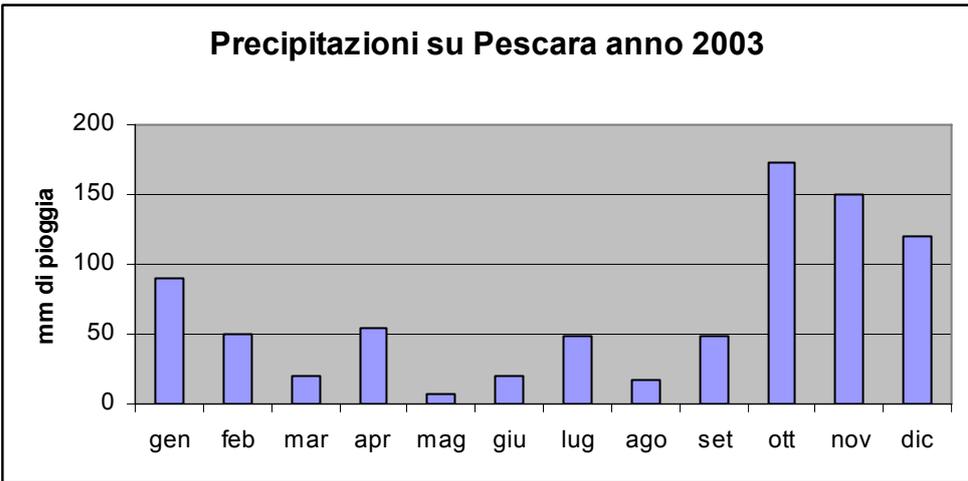
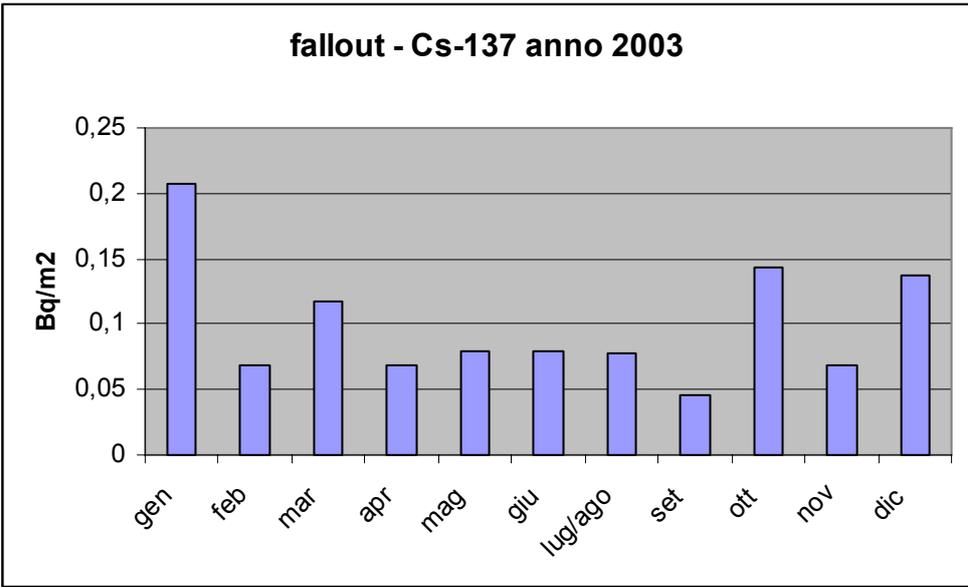
I valori del radionuclide naturale Be-7 risultano invece sempre rivelabili e compresi fra i valori di 2 e 9 mBq/m³.

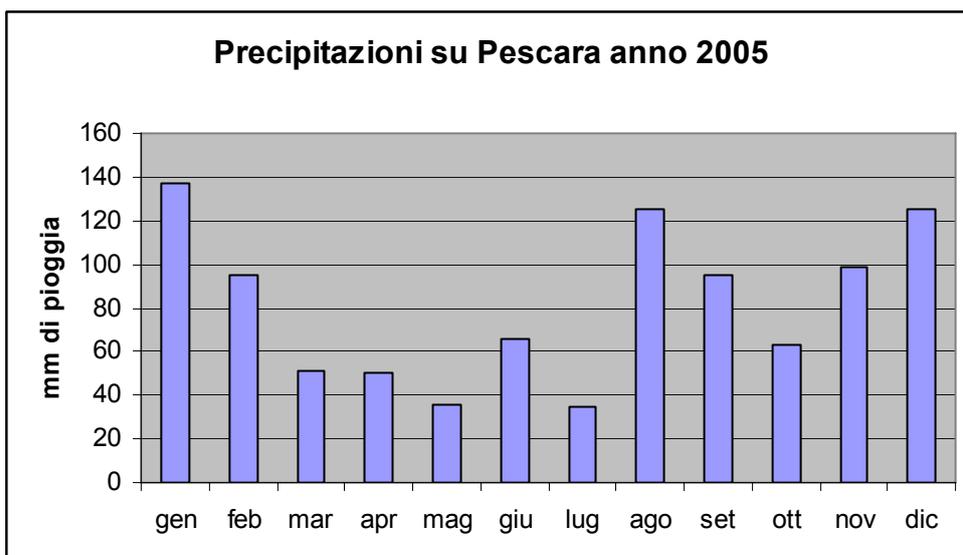
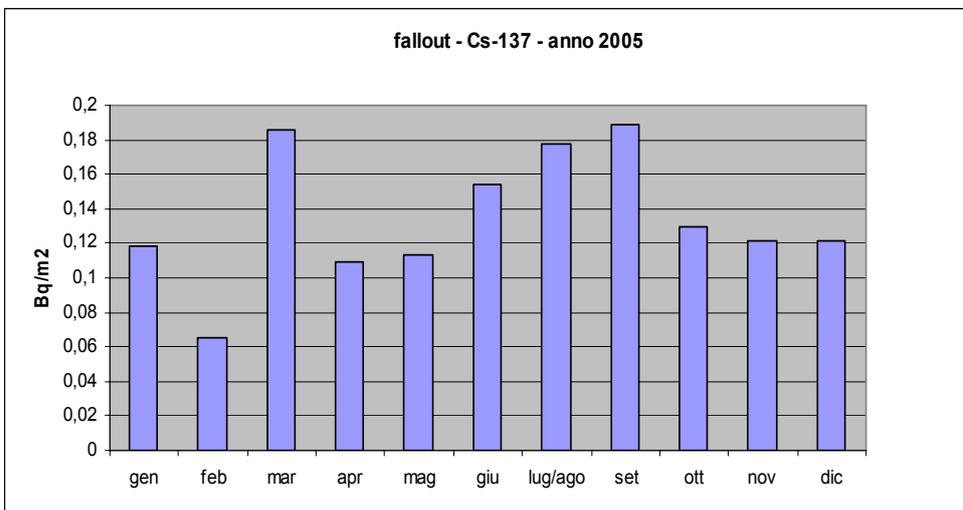
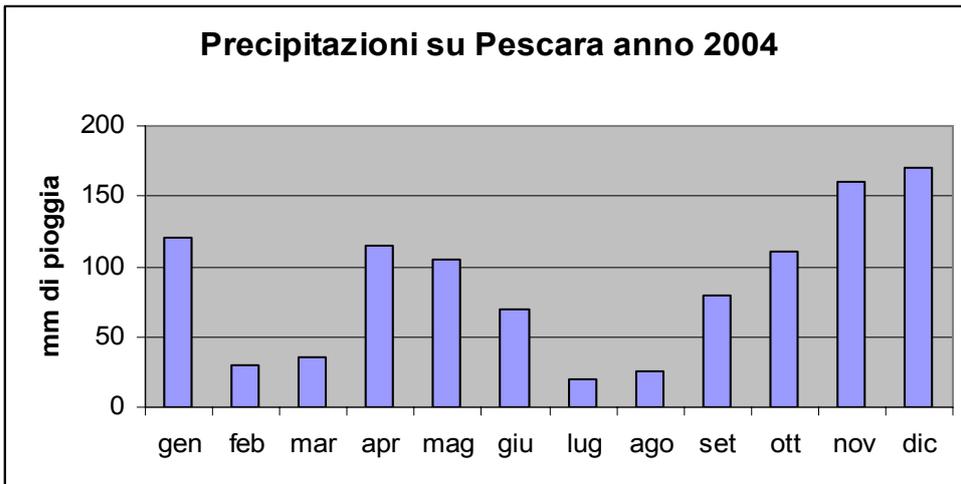
N.B. Si noti come i valori delle attività (MAR) dei pacchetti filtri mese siano inferiori a quelli del filtro singolo, ciò a causa del maggior tempo di acquisizione della misura, (infatti la MAR è -entro certi limiti- inversamente proporzionale al tempo di acquisizione), e del fatto che nel pacchetto filtri la quantità di materiale del campione è maggiore rispetto al filtro singolo (la MAR è ovviamente inversamente proporzionale alla quantità di materiale esaminato in quanto esprimiamo le misure in rapporto ai volumi o alle masse).

Grafici e tabelle

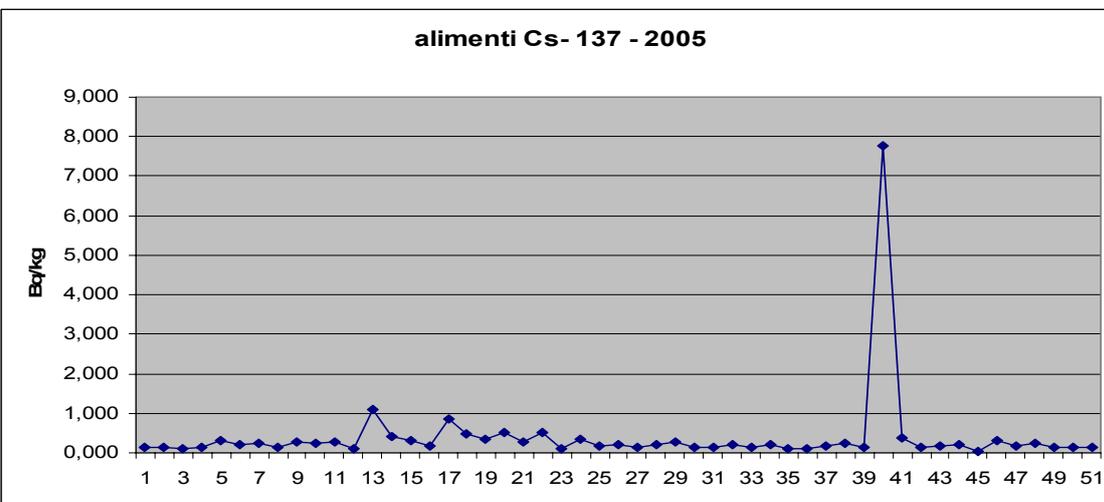
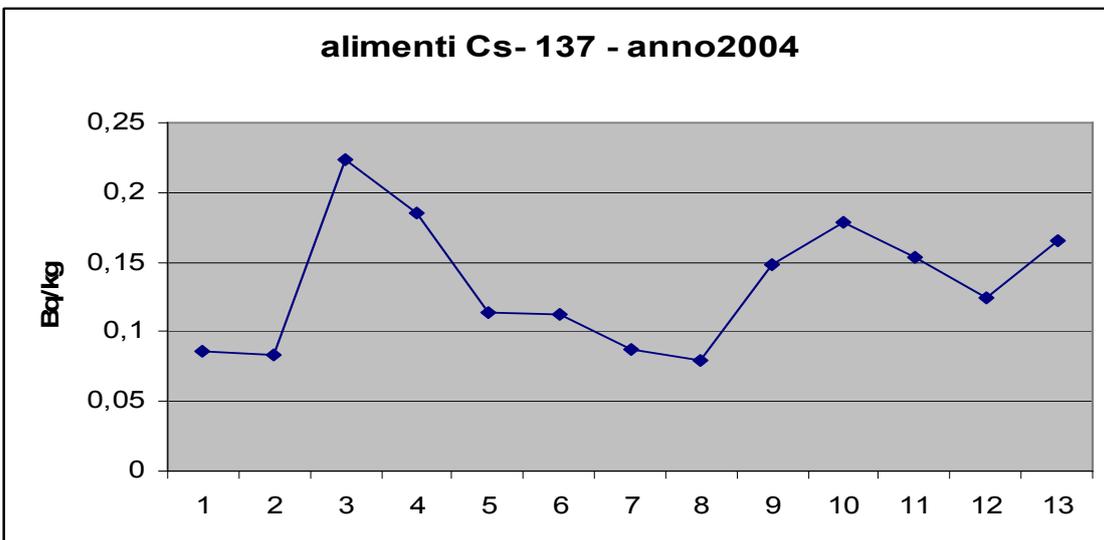
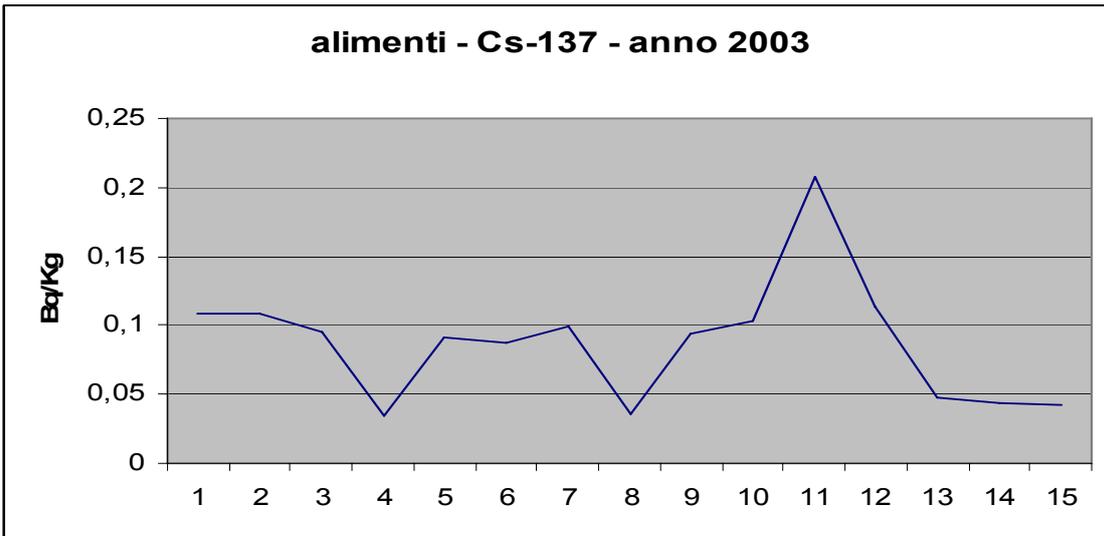








I dati sulle precipitazioni sono stati gentilmente forniti dal Centro Agrometeorologico Regionale di Scerni (CH)



D.L. n. 31 del 02/02/2001 (Tutela delle acque)

Il 25 dicembre 2003 è entrato in vigore il D.Lgs n. 31 del 02/02/2001, integrato e modificato dal D.Lgs n. 27 del 02/02/2002 ("Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano"). Tale decreto attua la Direttiva comunitaria, che ha abrogato la precedente direttiva 80/778/CEE recepita a suo tempo dal DPR 236/88. Il nuovo decreto, che ha la finalità di tutelare la salute pubblica garantendo "Acque salubri e pulite", introduce nella normativa italiana un notevole numero di innovazioni, sia di principio, sia operative.

Uno degli aspetti maggiormente rilevante riguarda il punto di rispetto delle conformità parametriche; mentre nella normativa precedente tale punto corrispondeva al contatore dell'utente, con il Decreto 31/2001 la conformità stessa è estesa anche ai rubinetti.

Altre novità riguardano l'introduzione di nuovi parametri chimici e microbiologici o di limiti più ristrettivi per alcune sostanze, quali il piombo, l'arsenico e altre ancora.

L'aspetto più innovativo del Decreto, e che riguarda l'aspetto radiometrico, è l'introduzione dei parametri di radioattività, riportati nella parte C dell'Allegato I, e precisamente "Trizio" e "Dose totale indicativa", i cui "valori di parametro" vengono rispettivamente determinati in 100 Bq/L e 0.1 mSv/anno (nella stima di dose devono essere esclusi i contributi di ^3H , ^{40}K e prodotti di decadimento del radon).

In una nota viene suggerito che la Regione "può non effettuare controlli sull'acqua potabile relativamente al trizio ed alla radioattività al fine di stabilire la dose totale indicativa quando sia stato accertato che, sulla base di altri controlli, i livelli di trizio o della dose indicativa calcolata sono ben al di sotto del valore di parametro".

Calcolo della dose assorbita da radioattività di origine antropica

Concentrazioni di riferimento

Il Decreto Legislativo 230/1995 e s.m.i. – “Attuazione delle direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 92/3/Euratom in materia di radiazioni ionizzanti” – costituisce il riferimento normativo per la protezione della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti.

La grandezza fisica su cui vengono posti dei valori limite è l'equivalente di dose efficace E , dato dalla somma delle dosi efficaci ricevute per esposizione esterna e impegnate per inalazione e ingestione:

$$E = E_{\text{est}} + \sum_j h(g)_{j,\text{ing}} J_{j,\text{ing}} + \sum_j h(g)_{j,\text{ina}} J_{j,\text{ina}}$$

dove E_{est} è la dose efficace derivante da esposizione esterna (Sv);
 $h(g)_{j,\text{ing}}$ e $h(g)_{j,\text{ina}}$ appresentano la dose efficace impegnata per unità di introduzione del radionuclide j (Sv/Bq) rispettivamente ingerito o inalato da un individuo appartenente al gruppo di età pertinente g (<1 anno, 1-2-anni, 7-12 anni, 12-17 anni, >17anni) –tabelle IV-4 e IV-3 all. IV D.L. 241/2000;
 $J_{j,\text{ing}}$ e $J_{j,\text{ina}}$ rappresentano rispettivamente l'introduzione tramite ingestione o tramite inalazione del radionuclidi j (Bq).

La sommatoria è estesa a tutti i radionuclidi con esclusione di quelli naturalmente presenti nel corpo umano, nella crosta terrestre non perturbata e nell'aria (radiazione cosmica), ovviamente sono altresì esclusi i contributi alla dose della esposizione per scopi medici (diagnostici o terapeutici).

Il limite di dose efficace per gli individui della popolazione è stabilito in 1 mSv/anno.

Si ribadisce come i valori fissati dalla norma (Sv) non sono direttamente confrontabili con i valori delle misure (Bq).

- la dose efficace E è la quantificazione del rischio dovuto all'esposizione a radiazioni ionizzanti;
- la concentrazione è invece un dato "grezzo", che può essere considerato soltanto come punto di partenza per la valutazione della dose (si veda quanto detto nella "Scheda di approfondimenti 1").

Dose da esposizione esterna

Per la valutazione della dose da esposizione esterna si consideri la contaminazione uniforme del suolo da parte del radionuclide j: utilizzando i coefficienti di dose adeguati (EPA-402-R-93-081)

È possibile ricavare delle **concentrazioni di riferimento** per la contaminazione del suolo (Bq/kg) che comportino il raggiungimento del limite di dose efficace di 1 mSv/anno.

Concentrazioni di riferimento R _j in Bq/kg	
E _{limite} = 1 mSv/anno	
	Suolo
g	tutte
Cs-134	3,9 x 10 ⁵
Cs-137	1,0 x 10 ⁶
Co-60	2,3 x 10 ⁵

Ciò significa che se ad esempio avessimo una contaminazione al suolo del solo Cs-137, esso dovrebbe avere un valore di attività pari a 3,9 x 10⁵ Bq/kg per arrivare a determinare una dose annua di 1 mSv.

Nel caso in cui si dovesse riscontrare la contaminazione del suolo da parte del solo radionuclide j dovrà essere rispettata, per tutte le classi di età g, la condizione:

$$C_j < R_j$$

dove C_j è la concentrazione misurata e R_j è la concentrazione di riferimento.

Nel caso in cui si dovesse riscontrare la contaminazione da parte di più radionuclidi dovrà essere verificata la condizione seguente;

$$\sum_j C_j / R_j < 1$$

La sommatoria è estesa a tutti i radionuclidi contaminanti j. In questo modo avremo che per la miscela considerata le concentrazioni che rispettano la relazione precedente saranno sempre inferiori alle concentrazioni di riferimento Rj.

Dose da ingestione

Per il calcolo della dose da ingestione occorre ipotizzare la composizione della dieta media di un individuo tipo della nostra regione, a tal uopo ci siamo avvalsi dei dati ISTAT – gentilmente forniti dal centro ISTAT di Pescara- riportati nella seguente tabella:

DATI ISTAT	
Consumi alimentari delle famiglie	
Regione Abruzzo	
Anno 1996	
(quantità medie mensili pro-capite in Kg)	
Pane	5,50
Pasta	2,90
Carne bovina	1,42
Pollame	1,04
Altre carni	0,80
Pesce	1,26
Olio di oliva e di semi	1,50
Latte	6,00
Formaggi	1,23
Uova	n. 11
Frutta fresa e secca	7,70
Zucchero	1,28
Caffè, tè e surrogati	0,41
Acqua minerale	7,30
Vino	3,00

Se si considera la contaminazione di una sola matrice alimentare m da parte del solo radionuclide j si possono ricavare delle concentrazioni di riferimento (Bq/kg) che comportano il raggiungimento del limite di dose efficace di 1 mSv/anno per gli individui del gruppo considerato.

Concentrazioni di riferimento $R(g)_{j,m}$ in Bq/kg				
$E_{\text{limite}} = 1 \text{ mSv/anno}$				
	Latte	Pesce	Ortaggi	Acqua potabile
g	> 17 anni	> 17 anni	> 17 anni	> 17 anni
Cs-134	$6,6 \times 10^2$	$1,4 \times 10^3$	$2,9 \times 10^2$	$2,4 \times 10^1$
Cs-137	$9,6 \times 10^2$	$2,1 \times 10^3$	$4,2 \times 10^2$	$3,5 \times 10^1$
Co-60	$3,7 \times 10^3$	$8,1 \times 10^3$	$1,6 \times 10^3$	$1,3 \times 10^2$

Dove per semplicità abbiamo considerato solo la classe di età $g > 17$ anni.

Nel caso in cui si dovesse riscontrare la contaminazione della sola matrice alimentare m da parte del solo radionuclide j dovrà essere rispettata, per ogni classe di età g , la condizione:

$$C_{j,m} < R(g)_{j,m}$$

Dove $C_{j,m}$ è la concentrazione misurata e $R(g)_{j,m}$ è la concentrazione di riferimento per la classe di età considerata. Nel caso in cui si dovesse avere una contaminazione da diverse matrici alimentari da parte di più radionuclidi dovrà essere rispettata la seguente condizione (da considerarsi sempre per ogni classe di età):

$$\sum_{j,m} C_{j,m} / R(g)_{j,m} < 1$$

La sommatoria è estesa a tutte le matrici contaminate m ed a tutti i radionuclidi contaminanti j . In questo modo per la miscela di contaminanti le cui concentrazioni soddisfano la relazione precedente saremo sicuri che avranno valori di concentrazioni inferiori a quelle di riferimento $R(g)_{j,m}$.

È utile qui ricordare che in seguito all'incidente di Cernobyl del 1986 il Consiglio delle Comunità Europee ha intrapreso delle misure di cautela al fine di prevenire eventuali conseguenze sulla salute umana. In particolare il Reg. CEE n. 737/1990, tuttora in vigore, fissa il valore limite di concentrazione per la somma delle attività del Cs-134 e del Cs-137 in:

- 370 Bq/kg per i prodotti lattiero-caseari ed i prodotti destinati all'alimentazione dei lattanti
- 600 Bq/kg per tutti gli altri prodotti destinati all'alimentazione umana.

Dose da inalazione

Per la valutazione della dose da inalazione occorre stimare il volume di aria inalato in un anno da un individuo tipo, a tal uopo ci serviamo della valutazione ICRP 66,1994 che suggerisce il valore di 8103 m³ di aria inalata all'anno.

Utilizzando i coefficienti $h(g)_j$, inappropriati (modalità di assorbimento più svantaggiosa) è possibile determinare delle concentrazioni di riferimento (Bq/m³) per la contaminazione del particolato atmosferico che comportano il raggiungimento del limite di dose efficace di 1 mSv/anno.

Concentrazioni di riferimento $R(g)_j$, in Bq/m ³	
$E_{\text{limite}} = 1 \text{ mSv/anno}$	
Particolato atmosferico	
g	> 17 anni
Cs-134	6,2
Cs-137	3,2
I-131	17

Anche qui per semplicità si è considerato solo la classe età adulta.

Nel caso in cui si dovesse riscontrare la contaminazione del particolato atmosferico da parte del solo radionuclide j dovrà essere rispettata, per ogni classe di età, la condizione:

$$C_j < R(g)_j$$

dove C_j è la concentrazione misurata e $R(g)_j$ è la concentrazione di riferimento per la classe considerata.

Nel caso in cui si dovesse riscontrare la contaminazione da parte di più radionuclidi dovrà essere rispettata la condizione seguente (sempre per ogni classe di età):

$$\sum_j C_j / R(g)_j < 1$$

La sommatoria è estesa a tutti i radionuclidi contaminanti j . In questo modo per una miscela di contaminanti le concentrazioni che soddisfano la relazione precedente saranno sempre inferiori alle concentrazioni di riferimento.

Considerando infine i contributi alla dose efficace da esposizione esterna, da ingestione e da inalazione da parte di diversi contaminanti e in diverse matrici alimentari, la relazione che garantisce il non raggiungimento del valore limite di 1 mSv/anno è

$$(\sum_j C_j / R_j)_{E \text{ esterna}} + (\sum_{j,m} C_{j,m} / R(g)_{j,m})_{E \text{ ingestione}} + (\sum_j C_j / R(g)_j)_{E \text{ inalazione}} < 1$$

Risultati del calcolo della dose per inalazione e ingestione

Il nostro Centro Regionale elabora un piano di misure sia per quanto riguarda matrici ambientali che alimentari, è quindi possibile procedere al calcolo della dose assorbita da un individuo tipo della nostra regione sia per l'inalazione che l'ingestione, invece non avendo dati di radioattività del suolo non sarà possibile procedere al calcolo della dose da esposizione esterna.

Si deve tener presente che i risultati delle analisi sono espressi come concentrazioni di attività per singolo radionuclidi riferite alla massa (Bq/kg), al volume (Bq/m³) o alla superficie (Bq/m²). La sensibilità delle misure viene indicata con l'acronimo MAR (Minima Attività Rivelabile), tale grandezza rappresenta la minima quantità di radioattività che l'apparato di misura è in grado di rilevare. Nel caso in cui non si riveli contaminazione da parte di un certo radionuclidi verrà comunque considerata la MAR come limite superiore per la concentrazione del radionuclide stesso.

Le misure su campioni alimentari vengono eseguite trattando il campione stesso come per il consumo, privandoli delle parti non eduli, e le concentrazioni sono così riferite al peso fresco.

Calcolo Dose per inalazione anno 2005

Ipotesi per quanto riguarda
il volume di aria inalato in un anno
- ICRP 66,1994 -

Volume medi inalati (m ³ /anno)			
Età	<1anno	7-12anni	>17anni
Volume	1044	5585	8103

Particolato atmosferico

Radioisotopo	Attività unitaria(1) misurata (Bq/m ³)	quantità inalata in un anno (m ³)	attività inalata Bq/anno	coeff. di conv. h(g) Sv/Bq (3)	Dose ingerita μSv/anno
Cs-137	0,00041	8103	3,3222	3,9x10(-8)	0,129
Cs-134	0,00061	8103	4,9428	2,0x10(-8)	0,010
I-131	0,00036	8103	2,9171	1,6x10(-9)	0,005

Totale radioattività artificiale accumulata in un anno nel corpo per inalazione	0,14 μSv
------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------

- (1) Avendo più misure di particolato si è calcolata la media
(2) Per motivi protezionistici si è utilizzato il valore più sfavorevole di h pari a 3,9x10⁻⁸ per il Cs-137
2,0x10⁻⁸ per il Cs-134 e 1,6 x 10⁻⁹ per lo I-131
(pag. 105 della G.U. n.104/L - D.L.241/2000)

Per l'anno 2005 quindi il valore di dose gamma inalato dovuto ai tre radionuclidi artificiali più importanti e rappresentativi è di **0,14 μSv**.

Calcolo dose annuale per la dieta anno 2005

Alimento	radioisotopo	Attività unitaria(1)	Quantità ingerita(2)	Attività (ingerita)
		misurata(Bq/Kg)	Kg (o L) per anno	Bq
Pane	Cs-137	0,186	65,88	12,25
	Cs-134	0,189	65,88	12,45
	I-131	0,265	65,88	17,46
	Co-60	0,137	65,88	9,03
Pasta	Cs-137	0,168	34,80	5,85
	Cs-134	0,164	34,80	5,71
	I-131	0,306	34,80	10,65
	Co-60	0,322	34,80	11,20
Carne bovina	Cs-137	0,223	17,04	3,80
	Cs-134	0,176	17,04	3,00
	I-131	0,232	17,04	3,95
	Co-60	0,313	17,04	5,33
Carne suina	Cs-137	0,233	9,48	2,21
	Cs-134	0,224	9,48	2,12
	I-131	0,440	9,48	4,17
	Co-60	0,313	9,48	2,97
Carne di pollo	Cs-137	0,236	12,48	2,95
	Cs-134	0,212	12,48	2,65
	I-131	0,217	12,48	2,71
	Co-60	0,322	12,48	4,02
Pesce	Cs-137	4,070	15,12	61,54
	Cs-134	0,173	15,12	2,62
	I-131	0,259	15,12	3,92
	Co-60	0,125	15,12	1,89
Latte (L)	Cs-137	0,171	76,80	13,13
	Cs-134	0,155	76,80	11,90
	I-131	0,189	76,80	14,52
	Co-60	0,243	76,80	18,66
Formaggi	Cs-137	0,165	14,64	2,42
	Cs-134	0,136	14,64	1,99
	I-131	0,205	14,64	3,00
	Co-60	0,816	14,64	11,95
Frutta fresca	Cs-137	0,181	92,40	16,72
	Cs-134	0,188	92,40	17,37
	I-131	0,361	92,40	33,36
	Co-60	0,188	92,40	17,37
Vino (L)	Cs-137	0,129	32,40	4,18
	Cs-134	0,105	32,40	3,40
	I-131	0,165	32,40	5,35
	Co-60	0,125	32,40	4,05

	Attività ingerita Bq/anno	coeff. di conv. h(g) Sv/Bq (3)	Dose ingerita μSv/anno
Totale Cs-137	125,05	$1,3 * 10^{(-8)}$	1,63
Totale Cs-134	63,21	$1,9 * 10^{(-8)}$	1,20
Totale I-131	99,09	$2,2 * 10^{(-8)}$	2,18
Totale Co-60	86,47	$3,4 * 10^{(-9)}$	0,30

Totale radioattività artificiale accumulata in un anno nel corpo, proveniente dalla dieta	5,31 μSv
------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------

- (1) Nel caso di alimenti con più misure si è calcolata la media
(2) Dati ISTAT 1996
(3) Vedi Tab. IV.4 (pag.122) della G.U. N.140/L DL n.241/2000

Per l'anno 2005 il valore di dose gamma ingerito dalla dieta dovuto ai quattro radionuclidi artificiali più importanti e rappresentativi è di **5,31 μSv**.

La valutazione finale delle analisi dei dati relativi alle misure effettuate negli anni 2003-2004-2005 permette di affermare che lo stato radiologico dell'ambiente abruzzese è rimasto sostanzialmente invariato rispetto agli anni precedenti attestandosi su livelli di assoluta sicurezza per quanto riguarda il rischio alla salute umana da radiazioni ionizzanti.

La dose di origine antropica è quindi qualche millesimo di quella di origine naturale che è in Italia di 3.4 mSv/anno (vedi scheda di approfondimento 4).

N.B. 1mSv (un millisievert) = 10^{-3} Sv
1 μSv (un microsievert) = 10^{-6} Sv

In conclusione si può dire che nella nostra regione non emergono situazioni di criticità per l'ambiente e per la popolazione

LE BASI E I PRINCIPI DELLA RADIOPROTEZIONE

- tratto dalla pubblicazione APAT: "La radioprotezione in Italia" (1999) -

Le basi scientifiche e i principi cardine

La radioprotezione è la disciplina applicata alla protezione dell'uomo e dell'ambiente dagli effetti dannosi delle radiazioni ionizzanti, una disciplina che si estrinseca in una serie di concetti, raccomandazioni, requisiti, tecnologie e modalità operative volti a proteggere la popolazione (individui in generale, lavoratori, soggetti sottoposti a pratiche mediche di diagnosi e cura facenti uso delle radiazioni ionizzanti). La protezione dagli effetti delle radiazioni si fonda a livello generale sull'isolamento delle sorgenti radioattive dall'ambiente e dal contatto con l'uomo, e a livello particolare sull'adozione di pratiche, comportamenti, soluzioni progettuali, costruttive e tecnologiche atti a ridurre l'esposizione individuale e collettiva della popolazione in misura appropriata. La determinazione dei criteri e delle procedure da applicare a questo scopo è oggetto di studio da parte di numerosi organismi nazionali e internazionali, fra i quali il più autorevole è la *International Commission for Radiological Protection (ICRP)*, una commissione scientifica autonoma fondata nel 1928 della quale fanno parte alcuni dei massimi esperti internazionali del settore. In seguito ad una approfondita e permanente analisi di tutti gli studi scientifici condotti in sede internazionale, l'ICRP emana periodicamente una serie di raccomandazioni la cui indiscussa autorevolezza è dimostrata dal fatto che dette indicazioni sono puntualmente recepite nella normativa internazionale e nazionale sulla radioprotezione.

L'assunzione fondamentale sulla quale si basano le raccomandazioni dell'ICRP è che non esiste dose per quanto piccola alla quale non sia associato un rischio. Poiché, d'altra parte, non avrebbe senso cercare di ridurre a zero le dosi individuali - in quanto esiste sempre almeno la dose derivante dal fondo naturale, che oltretutto può variare ampiamente dall'una all'altra zona della Terra, come si è visto - l'ICRP non si può limitare a fissare semplici limiti di esposizione, il cui rispetto non potrebbe comunque soddisfare le esigenze di protezione, dal momento che non potrebbe né escludere la possibilità di danni stocastici, ancorché non rilevabili neanche su base statistica, né garantire che la loro incidenza sia ridotta in misura ragionevole. Di qui discende la necessità di un sistema di protezione radiologica complesso, che secondo l'impostazione dell'ICRP è basato su tre principi generali: il *principio di giustificazione*, il *principio di ottimizzazione* e, solo in ultima istanza, il *principio di limitazione del rischio individuale*.

Il principio di giustificazione

Il principio di giustificazione è lo stesso che si applica - consciamente o inconsciamente - a tutti i rischi derivanti da qualsiasi attività umana. Esso stabilisce che l'esposizione dell'individuo e della popolazione a dosi aggiuntive di radiazione è giustificabile solo se i benefici derivanti dalle pratiche che generano le dosi aggiuntive sono superiori all'insieme degli effetti negativi statisticamente prevedibili. Qualunque esposizione deve essere perciò subordinata a una valutazione comparativa che tenga conto di tutti gli aspetti implicati (tecnici, sanitari, economici, sociali, ...) e che ne valuti tutte le possibili conseguenze. L'esposizione potrà essere considerata ammissibile solo se può essere formulato un giudizio di prevalenza dei benefici sugli effetti negativi. Ad esempio, la diagnostica a raggi X, pur esponendo il soggetto a dosi di radiazione talvolta elevate, ha ricadute positive (la possibilità di diagnosticare stati patologici e quindi di curarli) tali da rendere accettabile il rischio radiologico aggiuntivo cui si espongono il paziente e gli operatori sanitari. Una determinata diagnostica a raggi X non potrà comunque essere ritenuta giustificabile se i rischi radiologici ad essa connessi superano gli eventuali benefici sanitari.

// principio di ottimizzazione

Il principio di ottimizzazione stabilisce che - una volta comprovata la giustificazione - l'esposizione della popolazione deve essere mantenuta la più bassa ragionevolmente ottenibile (principio ALARA = *as low as reasonably achievable*) tenendo conto di fattori sanitari, economici e sociali. Tornando all'esempio della radiografia, il principio ALARA si traduce nella circostanza che l'apparecchiatura, la metodica e le procedure utilizzate devono essere sempre tali da minimizzare le dosi al paziente ed agli operatori sanitari, oppure che, se il quesito diagnostico può trovare una risposta soddisfacente tramite una differente metodica, si dovrà dare la preferenza alla tecnica non radiologica, a patto naturalmente che la scelta non comporti oneri irragionevoli. In altri termini, anche quando una dose aggiuntiva è ammessa sulla base del principio di giustificazione, essa deve essere ridotta al minimo, pur senza spingere le misure di protezione a livelli ai quali gli oneri aggiuntivi (tecnici, economici e sociali) non sarebbero più giustificati dalla ulteriore riduzione di un rischio già a livelli evanescenti.

Il principio di limitazione del rischio individuale

Il principio di limitazione del rischio individuale si pone a valle dei due principi precedenti e afferma che le dosi individuali, anche se ammissibili sulla base dei principi di giustificazione e di ottimizzazione, non devono comunque eccedere specifici limiti determinati in modo tale da garantire che i rischi per la salute del singolo individuo non raggiungano livelli giudicati inaccettabili. Il principio di limitazione del rischio individuale si estrinseca con la definizione di limiti di dose che, date le premesse di partenza e in particolare l'ipotesi di linearità senza soglia, comportano necessariamente un bilancio comparato fra il rischio radiologico e i rischi di diversa origine comunemente accettati dalla comunità nella vita sociale e nelle attività lavorative.

La determinazione dei limiti di dose

Le valutazioni volte alla determinazione dei limiti di dose sono svolte dalla ICRP sulla base di approfondite analisi comparative fra il rischio - sull'arco dell'intera vita - di danno biologico associato all'assunzione di una determinata dose e i rischi sociali e individuali cui sono esposti gli individui della popolazione nella vita normale e nelle attività lavorative.

Le informazioni dirette sui danni biologici causati dalle radiazioni sono ottenuti con riferimento specifico alle alte dosi. In particolare, la principale base di riferimento per la valutazione è costituita tuttora dagli effetti osservati nelle popolazioni esposte ai bombardamenti atomici di Hiroshima e Nagasaki. A questi studi si aggiungono quelli condotti su alcune popolazioni esposte accidentalmente agli effetti di esplosioni nucleari nell'atmosfera tra gli anni Cinquanta e Sessanta, e altri derivanti dall'osservazione di pazienti trattati con irradiazioni terapeutiche o dal monitoraggio dei lavoratori esposti nelle attività di estrazione di minerali radioattivi. Ma la massima parte dei dati disponibili è tuttora riferibile alle alte dosi e alle alte intensità di dose. Dal momento che le dosi e le intensità che interessano le applicazioni pratiche della radioattività sono di gran lunga inferiori, per valutare i corrispondenti effetti gli esperti hanno adottato l'ipotesi di proporzionalità lineare fra dosi ed effetti, un'ipotesi che, sulla base delle evidenze scientifiche esistenti, porta - come si è già visto - a sovrastimare gli effetti delle basse dosi, e quindi agisce in senso cautelativo sulle misure di protezione.

La Commissione procede all'emanazione e alla continua revisione (aggiornata sulla base delle nuove conoscenze radiobiologiche) dei limiti di dose, determinando i valori cui corrispondono rischi non dissimili da quelli che contraddistinguono le condizioni di vita e di lavoro comunemente considerate soddisfacenti. In altri termini, si considera ammissibile una dose di radiazione cui è associato un rischio potenziale di malattia o di decesso (valore statistico calcolato) analogo a quello associato agli altri fattori di rischio

(valori statistici reali) cui un individuo è normalmente esposto e che di fatto normalmente accetta (si tratta di parametri a consuntivo). Ciò fa sì, ad esempio, che i limiti di dose per i lavoratori siano maggiori di quelli per gli individui della popolazione, in quanto normalmente i rischi associati alle attività lavorative sono superiori a quelli associati alla vita quotidiana lontano dai posti di lavoro (tabella 13).

- Tabella Limiti di dose in aggiunta al fondo naturale e alle pratiche mediche. (Fonte: ICRP, Digs. 230/95)

Categoria di persone	Limiti di dose
Individui della popolazione in generale	
- dose efficace	1 mSv/anno
- dose equivalente al cristallino	15 mSv/anno
- dose equivalente alla pelle	50 mSv/anno
- dose equivalente a mani, avambracci, piedi, caviglie	50 mSWanno
Lavoratori esposti	
- dose efficace	100 mSv in 5 anni, con massimo di 50 mSv/anno nel periodo
- dose equivalente al cristallino	150 mSv/anno
- dose equivalente alla pelle	500 mSv/anno
- dose equivalente a mani, avambracci, piedi, caviglie	500 mSv/anno

Per definizione, i predetti limiti vanno confrontati con la somma delle dosi provenienti da tutte le sorgenti di esposizione, con l'esclusione di due termini: il fondo naturale e le dosi di carattere medico-sanitario (diagnosi e terapia).

Significato dei limiti di dose e dosi "ammissibili"

I limiti di dose fissati dalla ICRP (vedi tabella) vanno interpretati come strumenti per assicurare una protezione adeguata anche a livello individuale. In presenza di un rischio che per definizione si considera sempre non-nullo, i soli principi di giustificazione ed ottimizzazione potrebbero infatti non essere sufficienti a garantire una sufficiente accettabilità sul piano personale, considerate soprattutto la diversa distribuzione dei rischi derivanti da una pratica rispetto a quella dei corrispondenti benefici.

È importante ribadire che i limiti fissati dalla ICRP e recepiti dalle normative nazionali, pur avendo funzioni di tutela dei lavoratori e degli individui della popolazione, non indicano una demarcazione tra dosi "ammissibili", secondo una locuzione ormai datata ma ancora spesso utilizzata benché fuorviante, e dosi "non ammissibili" in quanto legate a soglie di danno. In altri termini, affermazioni del tipo "sopra il limite (la dose ammissibile) c'è danno, sotto no" sono del tutto errate. I limiti di dose hanno invece soprattutto il carattere di livelli operativi da tener presenti come strumenti di ulteriore garanzia personale e come tali recepiti nelle norme positive. In questo senso, se si

verifica occasionalmente l'esposizione di uno o più individui a dosi superiori ai limiti corrispondenti, questa circostanza deve essere valutata soprattutto come un indice dell'insufficienza delle misure preventive e non necessariamente come un indice di danno biologico. La ICRP ha infatti chiarito espressamente che i lavoratori coinvolti dalle applicazioni delle radiazioni e gli individui della popolazione in genere possono occasionalmente ricevere dosi anche multiple rispetto ai limiti di dose senza che ciò comporti certezza di danni biologici.

D'altra parte il ruolo primario per la limitazione dei rischi da radiazioni per le attività già "giustificate" è demandato a una corretta ottimizzazione della protezione, che comporta di norma l'adozione di criteri di progetto, di sistemi di protezione e procedure operative tali da contenere le dosi individuali entro valori sostanzialmente minori dei predetti limiti.

La radioprotezione operativa

Gli strumenti

Il quadro di riferimento concettuale e metodologico proposto dalla ICRP costituisce la base sulla quale le organizzazioni intergovernative internazionali - come la *International Atomic Energy Agency* dell'ONU (I-AEA), la *Nuclear Energy Agency* dell'OCSE (NEA), la *Food and Agriculture Organisation* dell'ONU (FAO), la *International Labour Organisation* (ILO), la *World Health Organisation* (WHO) e la Commissione Europea - sviluppano i criteri guida della radioprotezione con riferimento alle diverse applicazioni (energia nucleare, applicazioni mediche, esposizione alla radioattività naturale, ecc). Le linee guida così emanate sono quindi trasferite nelle normative e nelle regolamentazioni internazionali e nazionali.

Attraverso un continuo processo di adeguamento finalizzato a conseguire obiettivi sempre più avanzati di tutela della popolazione, dei lavoratori e dell'ambiente, la radioprotezione ha sviluppato nel tempo molteplici strumenti, divenuti sempre più efficaci ed elaborati, che si raggruppano in tre grandi categorie:

- gli strumenti concettuali, dati dai principi fondamentali che stanno alla base della materia radioprotezionistica e definiscono la cosiddetta *radioprotezione generale*. Si tratta in particolare dei principi di giustificazione, ottimizzazione e limitazione già ricordati;
- gli strumenti tecnici, dati dall'insieme delle pratiche di intervento (schermature, sistemi di sconfinamento statico e dinamico dei radioisotopi, mezzi di protezione personale, procedure di collaudo o d'intervento, tecniche di misura delle radiazioni, dosimetria, ecc.) che coinvolgono le scienze fisiche, le scienze biologiche e naturali, la medicina e la sanità pubblica, l'ingegneria, l'organizzazione del lavoro e le scienze ambientali;
- gli strumenti normativi, che coinvolgono l'elaborazione e l'aggiornamento di norme che comprendono direttive comunitarie, raccomandazioni, leggi nazionali, guide e norme tecniche, regolamenti, prescrizioni autorizzative, istruzioni e procedure operative;
- i controlli e le verifiche ispettive.

Nel loro insieme, queste tre ultime categorie di strumenti definiscono la *radioprotezione operativa*, che ha affinato enormemente nel tempo le proprie metodiche, a partire da quelle elementari degli anni Trenta, aventi per oggetto la protezione dalle sorgenti di raggi X contro il rischio dei soli danni deterministici allora conosciuti, fino al complesso sistema di protezione da tutte le fonti naturali e artificiali messo a punto dall'ICRP con la pubblicazione n. 60 (1990) e recepito in tutte le principali normative nazionali e internazionali.

L'organizzazione

In tutti i paesi sviluppati, i concetti fondamentali della radioprotezione sono implementati attraverso un efficace sistema che include leggi e normative, un efficiente sistema di controllo e un complesso ben strutturato di esperti, laboratori e attrezzature specializzate.

L'obiettivo di fondo di questa infrastruttura complessiva è quello di applicare estesamente il principio di ottimizzazione (ALARA). A tal fine il primo compito è quello di assicurare che i temi della protezione e della sicurezza ricevano la necessaria attenzione da parte di quanti hanno responsabilità a tutti i livelli, dal governo ai rappresentanti politici, dai manager ai lavoratori, dal sistema dell'informazione al largo pubblico, sviluppando la sensibilità e condizionando il comportamento dei singoli. Questa attitudine - e i comportamenti che ne derivano - sono usualmente chiamati "cultura della sicurezza", e costituiscono il presupposto fondamentale per l'esistenza di un efficace sistema di radioprotezione.

A valle dello sviluppo di una adeguata cultura della sicurezza, l'implementazione delle pratiche radioprotezionistiche è basata su un sistema di laboratori, attrezzature di misura e metodi di indagine (tecniche di misura, modelli ambientali, metodi di controllo e modellizzazione, hardware, software, ecc.) che costituiscono complessivamente la tecnologia della radioprotezione. Questi strumenti sono soggetti a continuo miglioramento sulla base degli avanzamenti che interessano i settori tecnologici, scientifici e industriali correlati. La radioprotezione è infatti una disciplina dinamica, la cui continua evoluzione è fondata sul progresso delle conoscenze scientifiche e sulla messa a punto di nuove metodiche e di nuovi strumenti tecnologici.

Le strategie operative

Le strategie operative proprie della radioprotezione sono finalizzate a

- conoscere e caratterizzare con idonee campagne di misura le sorgenti radioattive naturali e artificiali;

- introdurre e mantenere idonee misure di protezione individuale per i lavoratori e per gli individui della popolazione potenzialmente a rischio di esposizione;
- introdurre e diffondere idonee misure di protezione collettiva per la popolazione potenzialmente a rischio di esposizione e per l'ambiente.

L'intervento operativo della radioprotezione si attua a diversi livelli, che riguardano da un lato il monitoraggio dell'ambiente e della popolazione e dall'altro la sorveglianza degli impianti, delle apparecchiature e dei lavoratori potenzialmente esposti. I principali livelli operativi sono i seguenti:

- acquisizione dei parametri ambientali necessari per garantire il monitoraggio continuo delle condizioni dell'ambiente e dell'esposizione della popolazione;
- emanazione di specifiche per la progettazione di impianti e apparecchiature che possono comunque essere fonte di esposizione;
- verifica delle condizioni di sicurezza di impianti e apparecchiature in fase di realizzazione e di collaudo, con l'obiettivo di minimizzare il rischio per i lavoratori e la popolazione;
- controllo periodico della sussistenza delle condizioni di sicurezza di impianti e apparecchiature durante tutta la loro vita utile;
- delimitazione e sorveglianza delle zone ad accesso controllato, con definizione e applicazione degli accorgimenti da adottare per accedervi e permanervi;
- monitoraggio individuale dei lavoratori e delle persone in genere potenzialmente a rischio di esposizione alle radiazioni;
- massima diffusione della cultura della sicurezza e dell'informazione, allo scopo di

sensibilizzare e orientare il comportamento dei decisori, dei lavoratori e del pubblico in condizioni normali e di emergenza.

Le aree di intervento

La radioprotezione operativa estrinseca la propria azione in favore della sicurezza intervenendo in una serie di aree specifiche, ciascuna caratterizzata da diverse problematiche e peculiarità. Queste aree sono identificate e individuate seguendo un percorso verticale che va dalla singola applicazione all'impatto che questa ha sui lavoratori che vi sono coinvolti e sulla popolazione in generale e sull'ambiente. All'interno di questo percorso ne viene seguito un secondo orizzontale, di tipo gerarchico e organizzativo, finalizzato a identificare univocamente le responsabilità e a indicare i comportamenti di ciascun soggetto.

- Progettazione degli impianti e delle attrezzature. Il livello della progettazione degli impianti e delle attrezzature è quello che opera più vicino alla sorgente, ed è quindi quello nel quale possono essere adottati gli accorgimenti più efficaci ai fini della minimizzazione dell'impatto sanitario e ambientale. La radioprotezione interviene con prassi operative specifiche in fase di selezione dei siti, disposizione degli impianti, progettazione dei sistemi e delle attrezzature, adozione di schermi e sistemi di protezione, gestione dei rifiuti radioattivi, monitoraggio e controllo degli accessi.
- Organizzazione e gestione. Quello organizzativo e amministrativo costituisce il livello gerarchicamente più elevato nel quale intervengono le pratiche della radioprotezione operativa. Si tratta in questo caso di integrare la struttura gestionale di ogni organizzazione coinvolta nell'uso di sorgenti (sostanze e materiali radioattivi o macchine radiogene) con le strutture interne e con le prassi operative necessarie per applicare estesamente e in modo univoco e affidabile i principi base della radioprotezione.
- Informazione e formazione. A valle degli accorgimenti di tipo strutturale (progettazione) e gestionale (organizzazione) volti a minimizzare l'impatto delle applicazioni delle radiazioni ionizzanti, esiste la sfera dei comportamenti individuali, che devono anzitutto fondarsi sulla consapevolezza dei singoli, e quindi su un intenso programma di informazione e formazione. Lo scopo è quello di fare in modo che i singoli (lavoratori, pubblico) assumano sistematicamente comportamenti individuali e collettivi idonei a minimizzare il rischio di esposizione.
- Limitazione e controllo dell'esposizione dei lavoratori. Una volta assicurati gli strumenti strutturali e organizzativi, e una volta indotti i giusti comportamenti individuali e collettivi, il livello di intervento della radioprotezione si trasferisce al controllo e alla limitazione dell'esposizione, attraverso l'uso estensivo di accorgimenti operativi (delimitazione delle aree, controllo degli accessi), tecniche e dispositivi di limitazione dell'esposizione (schermi mobili, sistemi di confinamento dinamico - cappe, scatole a guanti ecc. - equipaggiamenti protettivi, sistemi di monitoraggio e di allarme) e tecniche di controllo delle dosi (dosimetria esterna e interna).
- Limitazione e controllo dei rifiuti radioattivi. Nell'economia generale della radioprotezione si dedica un'attenzione particolare alla produzione e alla gestione dei rifiuti radioattivi, che costituiscono forse uno dei principali veicoli attraverso il quale l'esposizione alla radioattività può interessare i lavoratori e soprattutto il pubblico. In quest'area si adottano sistematicamente accorgimenti atti a limitare la quantità di rifiuti prodotti, a ridurre il volume e a facilitare idonei interventi di condizionamento e stabilizzazione, per evitare che i rifiuti possano entrare in contatto con la biosfera.
- Limitazione e controllo dell'esposizione del pubblico. Lungo il percorso che parte dall'applicazione, questo è il livello di intervento più prossimo alla popolazione in generale. Obiettivo della radioprotezione operativa è in questo caso quello di

assicurare (attraverso il monitoraggio degli effluenti e idonee misure esterne) che l'esposizione del pubblico sia il più possibile ridotta, e che comunque resti costantemente al di sotto dei limiti previsti dalla normativa e dalla licenza di esercizio dell'impianto o dell'attrezzatura in armonia col principio ALARA.

- Pianificazione e gestione delle emergenze. In ogni installazione e da ogni apparecchiatura che facciano uso di sostanze radioattive in quantità non trascurabili possono scaturire condizioni di emergenza con potenziali conseguenze all'interno di un impianto (emergenza interna) o all'esterno di esso (emergenza esterna). A questi eventi è necessario prepararsi predisponendo strategie organiche di risposta e piani operativi di emergenza che tengano conto di ogni aspetto.

Predisposizione e gestione della strumentazione. L'implementazione di un programma operativo di radioprotezione si fonda necessariamente sulla disponibilità, sulla corretta disposizione e sull'efficienza di un complesso sistema di strumenti e apparecchiature di sorveglianza e di misura, che richiede intensi programmi di selezione, installazione, controllo, calibrazione, manutenzione e verifica di efficienza

Scheda di approfondimento 1

Cos'è la radioattività?

Introduzione

Si definisce radioattività la proprietà che hanno gli atomi di alcuni elementi di emettere spontaneamente radiazioni ionizzanti.

La radioattività non è stata inventata dall'uomo, anzi, al contrario, l'uomo è esposto alla radioattività fin dal momento della sua apparizione sulla Terra.

Solo recentemente (circa 100 anni fa), con i lavori dello scienziato francese Henry Becquerel, l'uomo ha scoperto l'esistenza della radioattività.

Fin dalla formazione della Terra, circa cinque miliardi di anni fa, la materia era formata da atomi stabili non radioattivi e atomi instabili radioattivi. Col trascorrere dei millenni, la maggior parte degli elementi radioattivi, attraverso il processo di decadimento, hanno cessato di essere tali.

Tuttavia, esistono ancora oggi in natura alcuni isotopi radioattivi, e non è cessato l'apporto esterno di radioattività prodotto dal bombardamento di raggi cosmici a cui siamo tuttora sottoposti. Ecco perché tutto quello che ci circonda è "naturalmente" radioattivo.

Dall'alba dei tempi fino ad oggi, gli esseri viventi sono perciò immersi in un vero e proprio bagno di radioattività:

Un chilogrammo di granito ha una radioattività naturale di circa 1000 Becquerel

Un litro di latte ha una radioattività naturale di circa 80 Becquerel

Un litro di acqua di mare ha una radioattività naturale di circa 10 Becquerel

Un individuo di 70 kg ha una radioattività dell'ordine di 8000 Becquerel, causata dalla presenza, nel corpo umano, di isotopi radioattivi naturali (in gran parte, potassio-40)

Atomi

La materia che ci circonda (aria, acqua, terra, oggetti, esseri viventi, eccetera) è costituita da atomi, che a loro volta consistono in un nucleo estremamente piccolo (dimensione approssimativa: un milione di miliardi di volte meno di un metro), di carica positiva, circondato da una nuvola di elettroni di carica negativa.

All'interno dell'atomo, il nucleo è costituito da protoni carichi positivamente e da neutroni privi di carica e perciò neutri (come dice il loro stesso nome).

Negli atomi, il numero di protoni (carichi positivamente) è uguale al numero di elettroni (carichi negativamente), così che l'atomo è elettricamente neutro.

Il numero totale di protoni nel nucleo (e quindi di elettroni nella nuvola esterna), chiamato numero atomico, determina di quale elemento chimico si tratta: così ad esempio l'elemento chimico con 8 protoni è l'ossigeno, quello con 26 protoni è il ferro, quello con 79 protoni è l'oro, quello con 92 protoni è l'uranio.

Come abbiamo visto, nel nucleo, oltre ai protoni, sono presenti anche i neutroni: la somma del numero totale di protoni più il numero totale di neutroni determina il numero di massa.

Isotopi

Un elemento chimico, oltre al numero fisso di protoni che lo caratterizza, può avere un numero variabile di neutroni: in tal caso si identificano diversi isotopi di uno stesso elemento.

Ad esempio: il ferro presente in natura è costituito da 4 isotopi, tutti con 26 protoni ma ognuno con 28, 30, 31 e 32 neutroni rispettivamente.

Gli isotopi sono identificati dal nome dell'elemento e dal numero di massa (esempio: ferro-54, ferro-56, ecc.).

In natura esistono circa 90 elementi (dall'idrogeno, il più leggero, all'uranio, il più pesante) e circa 270 isotopi. Tra gli elementi, una ventina sono costituiti da un unico isotopo (come ad esempio il sodio, il cobalto, l'arsenico e l'oro), gli altri hanno almeno due isotopi (ad esempio: il cloro ne ha due, lo zinco ne ha cinque, lo stagno ne ha dieci).

Oltre agli isotopi da sempre presenti in natura (isotopi naturali), esistono oggi un gran numero di isotopi artificiali, cioè prodotti dall'uomo. Esempi di isotopi artificiali sono il cobalto-60 (27 protoni, 33 neutroni), usato in radioterapia e in gammagrafia, il plutonio-239 (94 protoni, 145 neutroni), usato come combustibile nelle centrali nucleari.

In totale vi sono 340 isotopi naturali e 1100 artificiali, per un totale di 1440 nuclei differenti noti.

Origine della radioattività

Gli isotopi presenti in natura sono quasi tutti stabili. Tuttavia, alcuni isotopi naturali, e quasi tutti gli isotopi artificiali, presentano nuclei instabili, a causa di un eccesso di protoni e/o di neutroni. Tale instabilità provoca la trasformazione spontanea in altri isotopi, e questa trasformazione si accompagna con l'emissione di radiazioni ionizzanti per cui essi sono chiamati isotopi radioattivi, o anche radioisotopi, o anche radionuclidi.

La trasformazione di un atomo radioattivo porta alla produzione di un altro atomo, che può essere anch'esso radioattivo oppure stabile. Essa è chiamata disintegrazione o decadimento.

Tale trasformazione, a seconda dei casi, può completarsi in tempi estremamente brevi o estremamente lunghi. Una misura di tale tempo è data dal tempo di dimezzamento, o tempo di vita media, che esprime il tempo alla fine del quale la metà degli atomi radioattivi inizialmente presenti ha subito una trasformazione spontanea.

Ad esempio il radioisotopo artificiale tecnezio-99m (molto usato in medicina) ha un tempo di dimezzamento di 6 ore (dopo 6 ore la sua radioattività si è ridotta della metà); il radioisotopo artificiale iodio-131 ha un tempo di dimezzamento di 8 giorni; il radioisotopo naturale potassio-40 ha un tempo di dimezzamento di 1,3 miliardi di anni, mentre il Cs-137 (indicatore di incidenti nucleari) ha un tempo di dimezzamento di 30 anni.

Dopo dieci tempi di dimezzamento, la radioattività di un radioisotopo è mille volte minore di quella iniziale.

I differenti tipi di radioattività

I differenti tipi di radioattività sono:

- Radioattività alfa
- Radioattività beta
- Radioattività gamma

Ciascun tipo di radioattività ha un proprio "potere penetrante" e "modalità di schermatura"

Radioattività alfa

Atomi nei cui nuclei sono contenute quantità eccessive di protoni e neutroni emettono di solito una radiazione alfa, costituita da un nucleo di elio (due protoni + due neutroni), e avente due cariche positive. Tale disintegrazione porta alla formazione di un isotopo di altro elemento chimico, avente numero atomico diminuito di due unità e numero di massa diminuito di quattro unità.

Esempio: l'uranio 238 (92 protoni + 146 neutroni) emette radioattività alfa trasformandosi in torio-234 (90 protoni + 144 neutroni), con un tempo di dimezzamento di 4,5 miliardi di anni.

Le radiazioni alfa, per la loro natura, sono poco penetranti e possono essere completamente bloccate da un semplice foglio di carta. Range di emissione: da circa 4 a 9 MeV

Radioattività beta

Atomi nei cui nuclei sono contenute quantità eccessive di neutroni emettono di solito una radiazione beta, costituita da un elettrone. In particolare, uno dei neutroni del nucleo si disintegra in un protone e in un elettrone, che viene emesso. Tale disintegrazione porta alla formazione di un isotopo di altro elemento chimico, avente numero atomico aumentato di una unità (il protone in più) e numero di massa invariato (il protone si è sostituito al neutrone).

Esempio: il cobalto-60 (27 protoni + 33 neutroni) emette radioattività beta trasformandosi in nichel-60 (28 protoni + 32 neutroni), con un tempo di dimezzamento di 5,3 anni.

Le radiazioni beta sono più penetranti di quelle alfa, ma possono essere completamente bloccate da piccoli spessori di materiali metallici (ad esempio, pochi millimetri di alluminio).

Range di emissione: da qualche keV a 4 MeV,

Radioattività gamma

La radiazione gamma è una onda elettromagnetica come la luce o i raggi X, ma assai più energetica.

Le radiazioni alfa e beta sono invece di tipo corpuscolare e dotate di carica (positiva le alfa, negativa le beta).

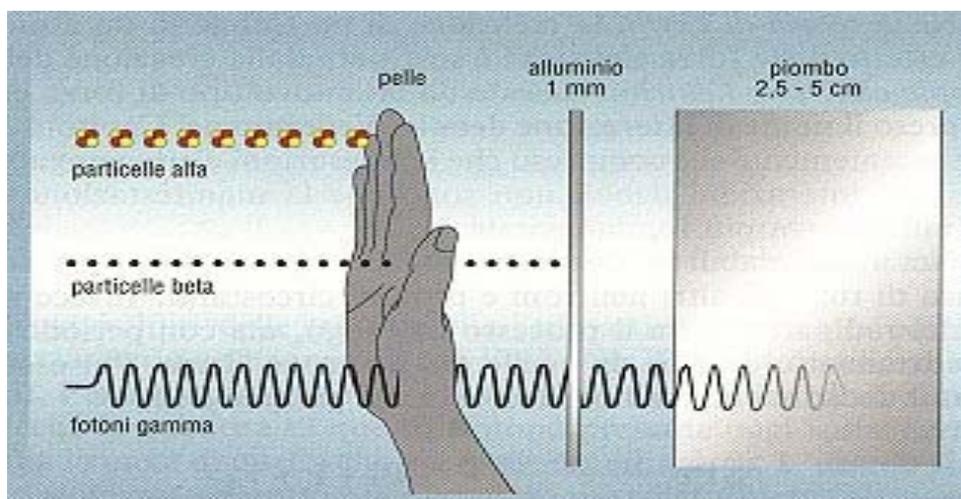
La radiazione gamma accompagna solitamente una radiazione alfa o una radiazione beta. Infatti, dopo l'emissione alfa o beta, il nucleo è ancora eccitato perché i suoi protoni e neutroni non hanno ancora raggiunto la nuova situazione di equilibrio: di conseguenza, il nucleo si libera rapidamente del surplus di energia attraverso l'emissione di una radiazione gamma.

Esempio: il cobalto-60 si trasforma per disintegrazione beta in nichel-60, che raggiunge il suo stato di equilibrio emettendo una radiazione gamma.

Al contrario delle radiazioni alfa e beta, le radiazioni gamma sono molto penetranti, e per bloccarle occorrono rilevanti spessori di materiali ad elevata densità come il piombo.

Range di emissione energetico: da circa 10keV a oltre 10 MeV.

La seguente figura illustra il differente potere penetrante delle radiazioni



Il concetto di dose

Le radiazioni prodotte dai radioisotopi interagiscono con la materia con cui vengono a contatto, trasferendovi energia.

Tale apporto di energia, negli organismi viventi, produce una ionizzazione delle molecole: da qui la definizione di radiazioni ionizzanti.

La dose di energia assorbita dalla materia caratterizza questo trasferimento di energia.

Gli effetti possono essere irrilevanti o più o meno dannosi, a seconda della dose di radiazioni ricevuta e del tipo delle radiazioni stesse.

Per meglio chiarire l'importanza della dose assorbita, un esempio noto a tutti è quello delle radiazioni ultraviolette dei raggi solari, che, per l'uomo, a piccole dosi sono innocue, ma per esposizioni eccessivamente prolungate possono provocare colpi di sole o bruciature della pelle.

La misura della dose

Definizioni

ATTIVITA'

Con il termine "Attività" di una sostanza radioattiva si intende il numero di nuclei di questa sostanza che si disintegrano nell'unità di tempo.

UNITA' DI MISURA DELLA RADIOATTIVITA':

una vecchia unità di misura dell'attività è il Curie (Ci):

1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ disintegrazioni al secondo

ora sostituita nel Sistema Internazionale (S.I.) dal Bequerel (Bq)

1 Bq = 1 disintegrazione/sec.

DOSE ASSORBITA

La grandezza "**Dose assorbita**" D rappresenta l'energia depositata dalla radiazione nel materiale irradiato per unità di massa.

UNITA' DI MISURA

la più antica è il "RAD"

1 RAD = 100 erg/grammo

Attualmente nel S.I. si usa il "GRAY" (Gy):

1 Gy = 1 J/kg

1 Gy = 100 RAD

DOSE EQUIVALENTE e DOSE EFFICACE

L'effetto delle radiazioni su un organo e su un tessuto è dipendente dal tipo e dalla qualità del campo di radiazioni esterno, oppure dal tipo e dalla qualità delle radiazioni emesse da un radionuclide depositato all'interno dell'organismo.

Perciò si è introdotto il fattore di ponderazione della radiazione w_R , che permette di introdurre una nuova grandezza, la dose equivalente HT legata alla dose assorbita DT,R nel tessuto T a causa della radiazione R:

dose equivalente : $HT = w_R * (DT,R)$

Per elettroni, raggi X e raggi gamma $w_R = 1$ per tutte le energie

Per neutroni e protoni w_R da 5 a 20, a seconda dell'energia delle particelle

Per le particelle alfa $w_R = 20$

Infine si deve tenere conto anche della diversa sensibilità dei vari tessuti e organi alla radiazione; è per questo che viene introdotto il concetto di

dose efficace : $E = HT * w_T$

I valori del fattore di ponderazione w_T per i diversi organi o tessuti sono i seguenti:

Gonadi 0,20; Midollo osseo (rosso) 0,12; Polmone (vie respiratorie toraciche) 0,12; Stomaco 0,12, ecc.

Se consideriamo il corpo nella sua interezza w_T vale 1

Pertanto parlare di dose, dose equivalente e dose efficace è la stessa cosa se consideriamo il corpo umano globalmente e abbiamo a che fare solamente con fotoni X o gamma.

UNITA' DI MISURA

Le unità di misura della dose equivalente e della dose efficace sono:

1 Rem = 100 erg/grammo (grandezza fuori dal SI)

che nel Sistema Internazionale è stata sostituita dal Sievert (Sv):

1 Sv = 1 J/kg

da cui

1 Sv = 100 Rem

N.B. Una sorgente di una certa attività con un certo numero di Becquerel può emettere oltre a fotoni anche particelle alfa, beta, neutroni etc che comunque contribuiscono diversamente dai fotoni all'esposizione totale prodotta dalla sorgente.

Per cui l'esposizione totale è legata al numero totale di emissioni e al tipo di radiazione emesso dalla sorgente, mentre l'attività è legata solo al numero totale di emissioni di particelle.

Perciò non c'è una relazione generale tra il l'attività (Bq) e la dose (Sv).

Per i singoli radionuclidi o le loro miscele si possono però derivare relazioni tra attività ed esposizione, se si sanno tutti i particolari sulla sua forma chimica, le modalità di esposizione (p.e. inalazione, ingestione, esposizione esterna) e le condizioni all'intorno (p.e. pressione atmosferica, presenza di polveri).

Di uso più comune è il sottomultiplo millisievert (mSv), pari a un millesimo di Sv.

Ad esempio, come riportato nella seguente tabella, una radiografia al torace comporta l'assorbimento di una dose di circa 0,14 millisievert (mSv).

Alcuni dati dosimetrici relativi ad esami medici con raggi X:

Radiografia del torace 0,14 mSv

Radiografia dell'addome 1,1 mSv

Radiografia del tubo digerente 4,1 ÷ 7,2 mSv

Colecistografia 1,5 mSv

Urografia 3,1 mSv

Mammografia 1,0 mSv

C) L'esposizione dell'uomo alle radiazioni

L'uomo può essere esposto alla radioattività in due modi:

- per esposizione esterna, che avviene quando l'individuo si trova sulla traiettoria delle radiazioni emesse da una sorgente radioattiva situata all'esterno dell'organismo; si parla, in questo caso, di irradiazione
- per esposizione interna, che si verifica quando la sorgente radioattiva si trova all'interno dell'organismo, a causa di inalazione per respirazione, e/o ingestione, ovvero per introduzione attraverso una ferita; si parla, in questo caso, di contaminazione interna

L'esposizione esterna cessa quando l'individuo si allontana dalla sorgente ovvero vengono interposti opportuni schermi tra sorgente e individuo. Le radiazioni alfa, beta e gamma da esposizione esterna non fanno diventare radioattiva la materia che le assorbe.

L'esposizione interna cessa quando i radioisotopi respirati o ingeriti o introdotti attraverso ferite sono completamente rimossi dall'organismo (ad esempio: con l'urina, le feci, ecc.).

D) L'esposizione alle radiazioni naturali

Per poter considerare nella giusta luce gli effetti della radioattività sull'uomo, è necessario anzitutto prendere in considerazione l'esposizione alle radiazioni naturali. A tale "bagno di radioattività", in cui l'uomo è immerso fin dalla sua origine, gli organismi viventi si sono da tempo adattati.

La dose annualmente assorbita da ogni individuo della popolazione mondiale per effetto della radioattività naturale è mediamente di 2,4 mSv/anno.

Sorgente	Esposizione esterna(mSv/anno)	Esposizione interna(mSv/anno)	Totale(mSv/anno)
Raggi cosmici	0,36		0,36
Potassio-40	0,15	0,18	0,33
Uranio-238 e radioisotopi associati	0,10	1,24	1,34
Torio-232 e radioisotopi associati	0,16	0,18	0,34

Alla radioattività naturale contribuiscono una componente terrestre e una componente extraterrestre.

La componente terrestre è dovuta ai radionuclidi presenti nei materiali della crosta terrestre (rocce, minerali), come: il potassio-40, l'uranio naturale, il torio e i radionuclidi ad essi associati. Tra questi ultimi, particolare importanza riveste il radon, prodotto gassoso che offre il maggiore contributo alla radioattività naturale.

La componente extraterrestre è costituita dai raggi cosmici, i cui effetti sono tanto più rilevanti quanto più ci si allontana dalla superficie terrestre, e quindi dalla protezione dell'atmosfera. Ad esempio, in un volo in aereo, l'effetto dei raggi cosmici è circa 100 volte maggiore di una zona al livello del mare.

E) Effetti biologici delle radiazioni ionizzanti

Da quando l'uomo ha scoperto la radioattività, le proprietà di vari radioisotopi sono state sfruttate per impieghi pacifici e purtroppo, talvolta anche a scopi bellici.

Ciò ha determinato, da una parte, lo studio degli effetti sull'uomo di dosi di radiazioni anche elevate, e dall'altra, lo sviluppo di principi e strumenti per una efficace protezione dalle radiazioni ionizzanti (radioprotezione).

In termini molto generali, gli effetti delle radiazioni ionizzanti sull'uomo possono distinguersi in effetti immediati (detti anche deterministici) ed effetti a lungo termine (detti anche stocastici).

Gli effetti immediati sono quelli che, al di sopra di un certo valore di dose, si manifestano indistintamente a tutti coloro che sono stati irradiati, entro un tempo di solito assai breve (non più di qualche giorno o qualche settimana), e per cui la gravità dei danni aumenta con l'aumentare della dose.

Nella tabella qui sotto riportata è indicata la stima nell'individuo adulto della soglia di dose per effetti deterministici:

¹ NA indica "Non Applicabile", in quanto la soglia dipende dall'intensità di dose più che dalla dose totale
² Opacità lenticolari appena osservabili.

<i>Tessuto</i>	<i>Effetto</i>	<i>Soglia di dose</i> <i>Equivalente di dose totale ricevuto in una singola breve esposizione (Sv)</i>
Testicoli	Sterilità temporanea Sterilità permanente	0,15 3,5
Ovaie	Sterilità	2,5 ÷ 6,0
Cristallino	Opacità osservabili Deficit visivo	0,5 ÷ 2,0 5,0
Midollo osseo	Depressione dell'emopoiesi Aplasia mortale	0,5 1,5

Ad esempio: una esposizione superiore a 1 Gray comporta, come conseguenze, vomito e netta modificazione della formula del sangue; una esposizione superiore a 5 Gray può provocare il decesso per danno al tessuto emopoietico se il soggetto non è sottoposto a cure adeguate. I suddetti valori si riferiscono a una esposizione omogenea a tutto il corpo. Nel caso della radioterapia dei tumori, si arriva a somministrare dosi molto più elevate, anche oltre 40 Gray, ma concentrate limitatamente ed esclusivamente al tumore da distruggere.

Nella seguente tabella vengono riportati i valori di rischio per una assunzione di dose concentrata nel tempo:

<i>Dose (Sv)</i>	<i>Effetto</i>
<i>< 0,25</i>	<i>nessuno</i>
<i>0,25 – 1</i>	<i>lievi alterazioni del sangue, nessun sintomo</i>
<i>1 - 2</i>	<i>notevoli alterazioni del sangue, nausea, emorragie intestinali</i>
<i>2 - 3</i>	<i>gravi emorragie, stato di prostrazione, bassa mortalità</i>
<i>3 - 8</i>	<i>morte dal 30% al 60% dei casi</i>
<i>> 8</i>	<i>morte nel 100% dei casi</i>

:

L'esposizione a dosi più o meno elevate di radiazioni ionizzanti può avere effetti a lungo termine che possono provocare cancro o leucemia. Tali effetti si manifestano in modo aleatorio, che non si può predire in modo certo per ciascuna persona sottoposta alle radiazioni.

In questi casi, si parla di probabilità di accadimento, che cresce o diminuisce a seconda dell'entità più o meno rilevante della dose assorbita. La stima di tale probabilità è ricavata dai dati sperimentali (epidemiologia) ottenuti osservando le conseguenze dell'esposizione alle radiazioni su persone o gruppi di persone (ad esempio: i giapponesi sopravvissuti alle esplosioni nucleari di Hiroshima e Nagasaki; i lavoratori e le popolazioni limitrofe esposti alle conseguenze di incidenti in installazioni nucleari).

Si è potuto così stabilire che la probabilità di insorgenza di cancro o leucemia è elevata per alte dosi, mentre è assai limitata per basse dosi.

Il limite massimo di dose stabilito dalla legge italiana per le persone del pubblico è 1 mSv/anno al di sopra della dose naturale di radiazioni.

Secondo gli studi sugli effetti a lungo termine, questa dose corrisponde ad una probabilità di sviluppo di un cancro o leucemia mortale pari a 1 / 100.000 .

F) La radioprotezione

Una volta conosciute le conseguenze dannose che l'esposizione alle radiazioni ionizzanti può provocare, è stato necessario provvedere alla predisposizione di adeguate misure di protezione. E' nata così la radioprotezione, ossia un insieme di misure destinate a garantire la protezione dalle radiazioni ionizzanti dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente.

Le regole più elementari della radioprotezione sono le seguenti:

- allontanarsi dalla sorgente di radiazioni, in quanto l'intensità delle radiazioni diminuisce con la distanza (ad esempio: le installazioni nucleari sono circondate da una "zona di rispetto" che impedisce l'insediamento di attività umane nelle immediate vicinanze);
- interporre uno o più dispositivi di schermatura tra la sorgente e le persone (ad esempio, nelle installazioni nucleari, la protezione dei lavoratori e dell'ambiente circostante è assicurata da una serie di schermi costituiti da spessori o muri di piombo, di acciaio, di cemento, di materiali speciali);
- ridurre al minimo la durata di esposizione alle radiazioni.

Queste regole sono peraltro simili a quelle da prendere a riferimento per proteggersi dai raggi solari (ad esempio: l'utilizzazione di creme speciali che fungono da schermo e limitano l'esposizione).

Oltre che da norme elementari di buona pratica, la radioprotezione è regolata da una severa normativa di legge. Negli Stati dell'Unione Europea, ciascuno Stato Membro è obbligato a inserire nella propria legislazione le specifiche Direttive Euratom, periodicamente aggiornate secondo i più rigorosi standards internazionali.

In Italia, la legislazione fondamentale sulla radioprotezione è contenuta nel Decreto Legislativo n. 230 del 1995, recentemente aggiornato ed integrato dal Decreto Legislativo n. 241 del 2000.

I principi ispiratori di tale legge, come di tutte le analoghe leggi dei Paesi dell'Unione Europea, sono i seguenti:

- Principio della Giustificazione dell'attività (*Le attività che comportano rischi di esposizione alle radiazioni ionizzanti devono essere preventivamente giustificate e periodicamente riconsiderate alla luce dei benefici che da esse derivano*)
- Principio dell'Ottimizzazione della protezione (*Le esposizioni alle radiazioni ionizzanti debbono essere mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali*)
- Principio della Limitazione delle dosi (*La somma delle dosi ricevute non deve superare i limiti prescritti*)

In relazione a quest'ultimo enunciato, la legge italiana prescrive che non si debbano superare i seguenti limiti:

Per i "lavoratori esposti" (lavoratori impegnati in attività che prevedono l'uso o la manipolazione di radioisotopi) al massimo 20 millisievert/anno in più rispetto alla radiazione naturale (pari, come abbiamo visto, a 2,4 millisievert/anno)

Per tutti gli altri individui della popolazione:

al massimo 1 millisievert/anno in più rispetto alla radiazione naturale (pari, come abbiamo visto, a 2,4 millisievert/anno).

I criteri di radioprotezione che devono essere rispettati oggi per la costruzione di una nuova installazione nucleare impongono che la dose che tale nuovo insediamento determina per la popolazione circostante debba essere contenuta entro una piccola frazione rispetto al limite di legge (pari, come già visto, a 1 millisievert/anno in più rispetto alla radiazione naturale).

Scheda di approfondimento 2

L' uomo, le radiazioni corpuscolari ed elettromagnetiche, le radiazioni ionizzanti

Il termine **radiazione** è usato in fisica per descrivere fenomeni apparentemente assai diversi tra loro, come l'emissione di luce visibile da una lampada, di radioonde da un circuito elettrico, di raggi infrarossi da un corpo incandescente, di raggi X da una macchina radiogena e così via. **La caratteristica peculiare comune a tutti questi fenomeni è il trasferimento di energia da un punto a un altro dello spazio senza che vi sia il movimento di corpi macroscopici e senza il supporto di un mezzo materiale.** Quando la propagazione di energia avviene secondo queste modalità si dice che si è in presenza di radiazione.

Il suono emesso dalle casse di uno stereo non è una radiazione, bensì un'onda sonora che ha bisogno dell'aria per propagarsi. A livelli normali, il suono non si può considerare dannoso per la salute, mentre a livelli molto elevati può generare danni al sistema uditivo.

Si suole distinguere le radiazioni in corpuscolari ed elettromagnetiche, sulla base del loro comportamento prevalente:

- le radiazioni corpuscolari sono costituite da particelle sub-atomiche che si spostano con velocità assai elevate, spesso prossime a quelle della luce,
- le radiazioni elettromagnetiche si propagano nel vuoto con la velocità della luce e sono classificate in modo differente a seconda della loro energia.

Si dice che una radiazione è ionizzante quando è in grado di produrre, in modo diretto o indiretto, la ionizzazione degli atomi e delle molecole del mezzo attraversato (la ionizzazione è un processo mediante il quale gli atomi acquistano, o perdono, elettroni, diventando quindi elettricamente carichi). L'energia occorrente per ionizzare l'atomo è di circa 12 eV cioè dal lontano ultravioletto in poi.

Per quanto precedentemente descritto si può dedurre che il processo di ionizzazione porta necessariamente ad alterazioni degli atomi, almeno in via transitoria, e può in tal modo produrre modificazioni nella struttura delle molecole che li contengono. Se le molecole alterate sono situate in una cellula vivente, essa stessa può risultare danneggiata.

Esiste la possibilità che la dose assorbita durante un'irradiazione (cioè l'energia assorbita per unità di massa) abbia degli effetti sul corpo umano; gli effetti sul singolo individuo esposto alle radiazioni si manifestano se si supera una certa quantità di dose (effetti a soglia), che nel caso, per esempio di un esame radiologico, non viene di norma nemmeno lontanamente raggiunta, neanche con esami ripetuti moltissime volte. Esistono poi gli effetti casuali, che sono indipendenti dalla dose, e che potrebbero manifestarsi su chiunque venga esposto alle radiazioni ionizzanti.

Al fine di renderci conto dell'effettivo rischio a seguito di un'esposizione a radiazioni ionizzanti soffermiamoci sull'esame radiografico. Questa è una procedura molto comune. In Italia, il numero di esami radiologici in un anno è stato stimato essere dell'ordine di 100 milioni, questo equivale ad affermare che in media ciascun italiano si sottopone a due esami radiologici all'anno. Per rendersi conto delle minime probabilità di subire un danno a seguito di una o più radiografie è sufficiente evidenziare quanto sia più rischioso compiere le proprie attività quotidiane; ad esempio fare circa 200 radiografie al torace all'anno accorcia la vita:

- 100 volte di meno di essere alcolista,
- 63 volte di meno di essere fumatore,

- 8 volte di meno di guidare l'automobile,
- 3 volte di meno di respirare aria inquinata.

Nel caso di donne in stato di gravidanza si preferisce, per quel periodo, evitare esami radiologici alla zona del torace e del bacino. Infatti, la probabilità di danni casuali sul feto è maggiore che sull'adulto, in quanto i tessuti e gli organi in formazione sono più sensibili alle radiazioni degli organi già formati. Inoltre le prime settimane di gestazione sono le più a rischio per eventuali malformazioni. Ciò non significa assolutamente che i danni si manifestino per forza, ma se è possibile evitare di sottoporsi a un esame radiologico all'addome o al torace proprio in quel periodo è meglio. Se si tratta invece di una frattura a una mano o a una gamba è possibile sottoporsi all'esame; è compito del personale fornire i necessari sistemi per proteggere l'addome dalle radiazioni. Il miglior modo di proteggersi dai raggi X è evitare radiografie inutili, ma un sospetto di malattia giustifica sempre un'indagine approfondita, anche radiologica.

È necessario notare tuttavia che l'uomo, fin dal suo apparire sulla Terra, è stato costantemente esposto alle radiazioni ionizzanti di origine naturale, che sono state l'unica fonte d'irradiazione fino a poco meno di un secolo fa. Ancora oggi, nonostante l'ampio impiego a scopo medico, e non solo, delle radiazioni, la radioattività naturale continua a essere il maggior contributo alla dose ricevuta dalla popolazione ed è assai probabile che questo si verifichi anche in futuro.

In natura esistono infatti nuclei radioattivi (radionuclidi) di elementi chimici che, essendo instabili, si trasformano (decadono) in uno o più nuclei, generalmente più stabili, emettendo radiazione elettromagnetica oppure particelle cariche di diversa energia a seconda del tipo di nucleo.

La radioattività naturale si divide in una componente di origine terrestre e in una di origine extraterrestre. La prima è dovuta ai radionuclidi presenti nei materiali inorganici della crosta terrestre (rocce e minerali). La concentrazione di materiale radioattivo dipende dalla conformazione geologica delle diverse aree; inoltre numerosi materiali da costruzione emettono quantità relativamente modeste di radiazioni. Anche le acque contengono nuclei radioattivi, a causa sia delle piogge, che trasportano le sostanze radioattive dell'aria, sia delle acque di drenaggio che convogliano nei bacini idrici le sostanze presenti nelle rocce e nel suolo.

La componente extraterrestre alla radioattività naturale è dovuta essenzialmente ai raggi cosmici, particelle cariche che provengono dallo spazio interstellare e interagiscono con l'atmosfera originando altre particelle secondarie, anche se per la maggior parte i raggi cosmici primari vengono assorbiti nello strato più alto dell'atmosfera. Inoltre alle alte quote il loro flusso è comunque maggiore che sul livello del mare.

Lo studio epidemiologico è lo strumento valutativo dello stato di salute di una popolazione, studio che può limitarsi alla semplice descrizione numerica, temporale e geografica (epidemiologia descrittiva) o anche alla valutazione sistematica del sospetto di correlazione dello stato di salute con la presenza di un agente responsabile (epidemiologia analitica). **Quest'ultima è pertanto la disciplina medica che studia la distribuzione delle malattie non solo infettive, come un tempo, ma, oggi soprattutto, anche croniche e degenerative. Forse in nessuna altra branca della salute umana sono stati condotti tanti studi di epidemiologia analitica come nel caso degli esposti a radiazioni ionizzanti** il cui risultato rappresenta l'elemento più importante per la impostazione dottrinale della radioprotezione.

Seguendo allora l'indirizzo epidemiologico analitico, sono stati condotti studi tipo coorte e tipo caso-controllo per cercare di ottenere delle correlazioni non solo causali, ma anche quantitative tra esposizione a radiazioni e incidenza o mortalità oncologica. Le più importanti serie epidemiologiche studiate sono:

- sopravvissuti giapponesi alle esplosioni nucleari,
- pazienti irradiati per fluoroscopia,
- pazienti irradiati per spondilite,
- pazienti irradiati per tinea capitis,
- pazienti trattati con radio per TBC,
- minatori esposti ad alte concentrazioni di radon,
- pittori di quadranti di orologio, etc.

Tra queste, **quella più significativa, rappresentativa ed attendibile dal punto di vista statistico è tuttavia quella dei sopravvissuti alle esplosioni nucleari della seconda guerra mondiale.** E' a questa coorte pertanto che, in prima istanza, fanno riferimento tutti quegli organismi che eseguono valutazioni sul legame quantitativo tra rischio oncogeno ed esposizione, come l'UNSCEAR (il Comitato scientifico delle Nazioni Unite sugli effetti delle radiazioni atomiche), il NIH (l'Istituto nazionale di sanità degli Stati Uniti), il BEIR (la Commissione scientifica per le radiazioni dell'Accademia Nazionale delle Scienze degli Stati Uniti), l'ICRP (la Commissione internazionale per le protezioni radiologiche). **A corredo e a conferma scientifica del legame causale tra radiazioni e tumore vi sono anche i numerosi studi in vitro e tutta la sperimentazione radiobiologica.** Dall'insieme dei vari studi è stato possibile dedurre delle valutazioni quantitative di mortalità oncogena in funzione di dosi medio-alte (maggiori di alcune decine di milliSievert). Diversa è invece la situazione per quanto riguarda esposizioni a dosi basse in corrispondenza alle quali, non solo non è possibile inferire delle correlazioni quantitative, ma neanche correlazioni causali. Infatti, per mancanza di effetti chiaramente ed univocamente correlabili alle dosi, le indagini e gli studi effettuati non sono riusciti a fornirci indicazioni statisticamente significative di un aumento del rischio oncogeno tra gli esposti.

Al riguardo, vale la pena citare il documento UNSCEAR 2000 secondo il quale "Il numero dei tumori solidi associati con l'esposizione alle radiazioni non è sufficiente per permettere una analisi dettagliata della risposta in dose per molti siti o tipi specifici di tumori. Per tutti i tumori solidi raggruppati la relazione della curva dose-risposta è lineare fino a circa 3 Sv, mentre la curva dose-risposta per la leucemia viene meglio descritta da una funzione lineare-quadratica. Rischi statisticamente significativi per il cancro nel "Life Span Study" (l'Organismo nippo-americano oggi denominato Radiation Effects Research Foundation (RERF), che studia gli effetti delle esplosioni nucleari giapponesi) vengono rilevati per dosi all'organo superiori a circa 100 mSv". Ciò risulterebbe ancora più vero per la leucemia per la quale i risultati dello stesso Life Span Study indicano un rischio relativo inferiore a 1 al di sotto di 20 mSv. Questo risultato di assenza di evidenze di aumento del rischio oncogeno alle basse dosi viene confermato dal raffronto delle statistiche oncogene tra popolazioni soggette a fondi ben diversi di radiazioni.

Mentre nel caso degli effetti stocastici somatici si è potuto far riferimento anche alla epidemiologia analitica, nel caso degli effetti genetici si può far ricorso solo alla radiobiologia sperimentale animale. Müller lavorò per 10 anni prima di poter dimostrare nel 1927 che i raggi X producono realmente mutazioni nella *Drosophila melanogaster*. Sull'azione mutagena delle radiazioni evidenziata sul moscerino della frutta, organismo caratterizzato da solo 4 cromosomi, da intensa capacità riproduttiva e da una veloce successione generazionale, si è impostata una imponente ricerca che ancora oggi conduce ad importanti risultati scientifici. In particolare è stato rilevato che vi è un aumento delle mutazioni trasmesse ai discendenti, che questo aumento è collegato in modo lineare alla dose assorbita dai genitori (siamo sempre a dosi elevate), che l'intensità di radiazione ed il frazionamento della dose sono ininfluenti nella determinazione dell'effetto e che il danno genetico presente nei figli non può essere riparato. Gli stessi esperimenti radiobiologici condotti su altre specie animali hanno confermato l'effetto mutageno sulle cellule germinali e la conseguente trasmissione di tali mutazioni ai discendenti.

Come già detto, non è stato possibile sinora rilevare con metodi epidemiologici un eccesso di malattie ereditarie nella progenie umana di soggetti esposti alle radiazioni ionizzanti rispetto alla progenie di soggetti non esposti. Lo studio radioepidemiologico più importante è stato quello sui discendenti dei sopravvissuti di Hiroshima e Nagasaki, nel corso del quale è stato effettuato un confronto tra 30.000 bambini di cui almeno uno dei genitori era stato irradiato e 40.000 bambini i cui genitori non erano stati irradiati. Nessuna differenza statisticamente significativa è apparsa tra i due gruppi per quanto concerne lo sviluppo psicofisico, le malformazioni

di origine genetica ed alcuni indicatori di natura citogenetica e biochimica. I risultati dell'indagine epidemiologica pubblicati nel 1981 sono stati confermati nel 1988. Altre indagini condotte su popolazioni umane, per quanto di minore rilevanza, non hanno analogamente evidenziato alcun aumento di effetti genetici.

Allora, ed è qui un punto molto importante perché sta alla base della impostazione filosofica della radioprotezione, ci si pone in una prospettiva di cautela e si introduce l'ipotesi che quel rapporto di linearità, che è stato riscontrato alle dosi medio-alte tra incidenza neoplastica e dose, possa essere estrapolato anche alle piccole dosi fino a dose zero, senza quindi una soglia al di sotto della quale considerare assenti gli effetti neoplastici. Una prospettiva, questa, di cautela, in quanto è ben evidente, come del resto già evidenziato più sopra, che l'organismo ha delle risorse reattive alla noxa con le quali cerca di opporsi al danno o di ripristinare le condizioni "quo ante"; risorse rappresentate da vari meccanismi di protezione, di riparazione e di eliminazione degli effetti elementari prodotti dalla radiazione.

Analogamente, a dosi elevate le radiazioni ionizzanti possono produrre danni ereditari.

Infatti, come accennato, i dati sperimentali su piante ed animali, notevolmente numerosi, ottenuti in condizioni di irradiazione perfettamente definite (dose e rateo di dose), indicano che tali danni possono di fatto insorgere. Per quanto analoghi effetti non siano stati dimostrati a tutt'oggi nella specie umana, tuttavia, sempre per i fini della radioprotezione e nello spirito del principio di cautela, in analogia a quanto si registra nella sperimentazione animale, si assume che anche nell'uomo si possano avere effetti genetici e, anche in questo caso, si suppone che l'incidenza di effetti, calcolata per estrapolazione dalle sperimentazioni sugli animali, sia correlata linearmente con la dose e sia estrapolabile fino a dose zero.

Scheda di approfondimento 3

Le applicazioni della radioattività

Le attività umane e le applicazioni che implicano l'uso diretto o indiretto della radioattività sono innumerevoli. Le più significative riguardano la medicina, la produzione di energia, la ricerca scientifica e tecnologica, l'industria in senso lato, l'agricoltura e l'industria alimentare, la geologia e la prospezione mineraria, le applicazioni ambientali e l'archeologia.

La produzione di energia elettronucleare

I reattori nucleari sono basati sulla reazione di fissione nucleare a catena indotta da neutroni nell'uranio-235 e nel plutonio-239. **Da questa reazione si sviluppano notevoli quantità di calore, che è utilizzato per produrre (direttamente o indirettamente) vapore e, attraverso l'espansione di questo nelle turbine di un gruppo turbo-alternatore, energia elettrica.**

Durante il funzionamento del reattore si generano nel combustibile ingenti quantitativi di radioattività. Per questo motivo tutte le attività che hanno luogo all'interno di una centrale nucleare sono soggette a un rigoroso controllo e all'osservanza di stringenti pratiche di sicurezza. In seguito alle decisioni di politica energetica assunte dal Governo e dal Parlamento, l'Italia ha rinunciato alla produzione elettronucleare, e ha deciso la dismissione delle centrali e lo smantellamento degli impianti del ciclo del combustibile esistenti sul territorio nazionale. Lo sfruttamento dell'energia nucleare prosegue tuttavia in numerosi paesi, alcuni molto vicini all'Italia. Alla fine del 1997 erano in funzione 437 centrali in 32 paesi, per una potenza installata complessiva di 352.000 MWe. L'energia nucleare fornisce attualmente il 17% dell'elettricità prodotta nel mondo, contributo che sale al 25% nella media dei paesi OCSE e al 35% nella media dei paesi dell'Unione Europea, con valori locali anche molto elevati (78% in Francia, 60% in Belgio, 46% in Svezia, 41% in Svizzera, 32% in Germania, 30% in Finlandia, 29% in Spagna e 28% nel Regno Unito). Anche nel decennio successivo al disastro di Chernobyl la potenza nucleare in funzione nel mondo è cresciuta del 40%, passando da 250.000 a 352.000 MWe e portando a 437 il numero delle centrali in funzione in 32 paesi del mondo.

Le applicazioni mediche

Le applicazioni mediche delle radiazioni appartengono a due categorie fondamentali: la **radiodiagnostica** e la **radioterapia**.

L'uso delle radiazioni nella diagnostica va dalla comune radiografia a raggi X, alla tomografia assiale computerizzata, alla scintigrafia con impiego di traccianti radioattivi, fino a tecniche di minor impatto generale ma di indubbio interesse clinico, come le analisi RIA in vitro e la MOC.

Attraverso le diverse tecniche è possibile osservare l'interno dell'organismo umano e i particolari dei diversi organi con livelli di accuratezza e di dettaglio molto elevati, con la possibilità di effettuare diagnosi estremamente accurate di stati patologici altrimenti non verificabili senza intervenire chirurgicamente.

La radioterapia, che sfrutta la capacità delle radiazioni di distruggere i tessuti patologici, è ampiamente utilizzata soprattutto per la cura del cancro. L'ONU stima che nei paesi sviluppati circa il 2 per mille della popolazione sia sottoposta annualmente a pratiche di questo tipo, il che, in un paese con 50 milioni di abitanti, corrisponde in media al trattamento di 100 mila pazienti ogni anno. Negli ultimi anni si sono perfezionate tecniche radioterapeutiche molto accurate basate sull'attivazione di sostanze aventi la proprietà di concentrarsi nei tessuti patologici (ad esempio, boroterapia). Le cellule cancerose vengono in tal modo irradiate selettivamente e dall'interno, interessando in minima parte i tessuti circostanti.

Le applicazioni agrobiologiche

L'uso delle radiazioni ha permesso lo studio e lo sviluppo di nuove tecniche antiparassitarie e di fertilizzazione che sono oggi estesamente impiegate in agricoltura e nella prevenzione sanitaria.

La liberazione di insetti precedentemente sterilizzati con le radiazioni (tecnica dell' insetto sterile) consente ad esempio un efficace controllo delle mosche e di altri parassiti, minimizzando contemporaneamente l'uso - e l'impatto ambientale - di antiparassitari e insetticidi chimici.

Le radiazioni sono estesamente applicate anche nell'industria agroalimentare sottoponendo a irraggiamento le derrate per la distruzione di insetti, muffe e batteri responsabili del loro deperimento o per finalità antigerminative.

Le tecniche di fertilizzazione si sono notevolmente affinate nell'ultimo decennio attraverso l'impiego di matrici a rilascio controllato. L'uso di traccianti radioattivi mescolati al fertilizzante consente di seguirne il processo di assorbimento e di metabolizzazione da parte dei vegetali e di quantificarne il rilascio, per evitare poi, nella concreta applicazione di pieno campo, l'impiego di dosi eccessive di sostanze chimiche, minimizzando in tal modo i problemi di contaminazione dell'ambiente.

Le applicazioni industriali

Le radiazioni sono impiegate in moltissimi settori industriali per gli scopi più diversi.

Un'applicazione molto diffusa riguarda l'impiego di intensi fasci di raggi X e raggi γ per radiografare componenti meccanici, per assicurare la qualità delle fusioni e delle saldature e per verificare l'integrità di componenti impiantistici di elevato spessore rilevanti ai fini della sicurezza.

Una diversa categoria di applicazioni è quella dei sistemi di misura e di analisi on-line attraverso l'emissione di radiazioni beta e attraverso l'attivazione neutronica. Emettitori di particelle beta sono diffusamente utilizzati nell'industria cartaria per la misurazione dello spessore dei fogli di carta durante il processo di fabbricazione. Sorgenti di neutroni sono utilizzate presso gli impianti termoelettrici per quantificare in tempo reale il contenuto di silicio, ferro, alluminio, zolfo e calcio del carbone, onde valutare preventivamente l'emissione di inquinanti conseguente alla combustione. Traccianti γ dispersi nell'olio di lubrificazione dei motori di nuova progettazione e costruzione consentono, nella fase di ingegnerizzazione, di quantificarne sul banco di prova il consumo di olio attraverso la rilevazione dei traccianti nei gas di scarico.

Una diversa categoria di applicazioni riguarda la tecnologia dei materiali, dove le radiazioni sono impiegate per modificarne opportunamente le caratteristiche superficiali e di massa. Il flusso neutronico prodotto da un reattore nucleare può servire a produrre materiali semiconduttori per l'industria elettronica o ad alimentare processi di radiografia neutronica. L'irraggiamento con intensi fasci di ioni può conferire ai materiali proprietà superficiali diverse da quelle di massa.

Un'altra categoria di applicazioni è legata all'impiego degli acceleratori di particelle. Gli intensi fasci di radiazioni con essi prodotti possono servire a indurre trasformazioni dei materiali irradiati.

Tipiche sono le applicazioni alla produzione di materiali polimerici usati per la produzione di isolanti elettrici, nastri adesivi, floppy-disc, pneumatici e lenti a contatto.

Una delle applicazioni più comuni è infine la sterilizzazione di materiali sanitari e presidi chirurgici mediante impianti di sterilizzazione con sorgenti radioisotopiche o acceleratori di elettroni.

Le applicazioni ambientali

Le radiazioni hanno un campo di applicazione molto proficuo nello studio e nella protezione dell'ambiente.

L'uso dei traccianti radioattivi consente di monitorare la dispersione e la diffusione degli inquinanti. Mescolando ai combustibili piccole quantità di traccianti è possibile verificare l'efficienza dei sistemi di captazione delle ceneri e di depurazione dei fumi. Le radiazioni, così come per le derrate alimentari, trovano anche impiego nella sterilizzazione dei fanghi di risulta degli impianti di depurazione.

L'uso dei traccianti consente inoltre di studiare la mappatura delle falde acquifere e delle risorse idriche sotterranee, di analizzare e misurare l'accumulo dei sedimenti sul fondo marino, di seguire il corso delle correnti oceaniche e atmosferiche e di misurare il tasso di accumulo dei ghiacci nelle calotte polari.

Archeologia e datazione

In archeologia le radiazioni sono alla base di due importanti tecniche di datazione.

L'età di un reperto di origine organica (vegetale o animale) può essere facilmente determinata misurando il suo contenuto in carbonio-14. Gli organismi viventi, infatti, assumono e metabolizzano carbonio dall'ambiente finché sono in vita; in tal modo in essi il carbonio è ripartito fra due isotopi naturali (carbonio-12 e carbonio-14) nello stesso rapporto (costante) esistente nell'ambiente. Dopo la morte dell'organismo l'assunzione di carbonio ($^{12}+^{14}$) cessa, e il carbonio-14 precedentemente metabolizzato decade lentamente con un tempo di dimezzamento di 5.568 anni, mentre il carbonio-12 è stabile. La misura della percentuale residua di carbonio-14 permette di risalire all'età di un reperto.

Una diversa tecnica di datazione, denominata termoluminescenza, è utilizzata per determinare l'età dei manufatti ceramici. In essi sono infatti inglobati al momento della produzione diversi radioisotopi naturali contenuti nelle argille. I successivi processi di decadimento determinano l'imprigionamento di parte dell'energia delle radiazioni emesse nei cristalli minerali contenuti nell'argilla. Questa energia si manifesta con la comparsa di una debole luminescenza all'atto del riscaldamento del manufatto. La quantità di energia luminosa liberata è proporzionale al tempo trascorso dal momento della cottura del manufatto.

Geologia e prospezione mineraria

La geologia e la prospezione mineraria sono due settori nei quali le radiazioni trovano applicazioni di notevole interesse. La presenza di radioisotopi a vita lunga nei minerali consente di datare con buona approssimazione le formazioni geologiche, ricavando informazioni preziose per la ricerca di minerali. La stratigrafia per attivazione neutronica è invece una tecnica molto utilizzata nell'industria petrolifera per determinare la composizione degli strati geologici attraversati da una perforazione di sondaggio. Facendo scorrere lungo la perforazione una sorgente di neutroni e misurando successivamente la "risposta" dei materiali irradiati si ricavano infatti informazioni molto dettagliate sulla composizione degli strati attraversati.

Applicazioni relative alla sicurezza

Le radiazioni trovano un campo di impiego significativo in alcune applicazioni relative alla sicurezza. **Molto diffuso è ad esempio il controllo del contenuto dei bagagli negli aeroporti**, effettuato con stazioni radiografiche che impiegano raggi X a bassa intensità.

Un'altra applicazione molto diffusa soprattutto all'estero è rappresentata dai rivelatori di fumo degli impianti antincendio a camera di ionizzazione, basati sull'impiego di emettitori alfa. Essendo dotate di carica elettrica, le particelle alfa chiudono il circuito fra due elettrodi separati da una sottile intercapedine d'aria. In presenza di fumo le particelle alfa vengono arrestate dalle sostanze in sospensione e il circuito si interrompe, facendo entrare in funzione i segnali di allarme e l'impianto antincendio.

L'analisi per attivazione neutronica è utilizzata in medicina legale per determinare la presenza in un campione di parecchi elementi, fra i quali l'arsenico.

Ricerca scientifica e tecnologica

Quella della ricerca scientifica e tecnologica costituisce un'area di estesa applicazione della radioattività e delle radiazioni ionizzanti, sia come argomento di studio sia come strumento di indagine.

I fenomeni e le reazioni nucleari sono argomento di studio nella fisica nucleare e subnucleare fondamentale, con particolare riferimento alle ricerche sulla composizione intima della materia (nelle quali si fa uso estensivo di acceleratori e rivelatori di grandi dimensioni) e alle ricerche sull'utilizzazione dell'energia

nucleare (sistemi a fissione e a fusione).

Ma la radioattività è impiegata estesamente anche come strumento di indagine. Alcuni esempi sono stati già citati a proposito delle applicazioni descritte in precedenza. In generale, l'uso di traccianti radioattivi consente di studiare nel dettaglio i meccanismi che presiedono ai processi chimici, chimico-fisici e biologici seguendo strumentalmente gli spostamenti e le successive combinazioni di atomi e molecole opportunamente "marcati".

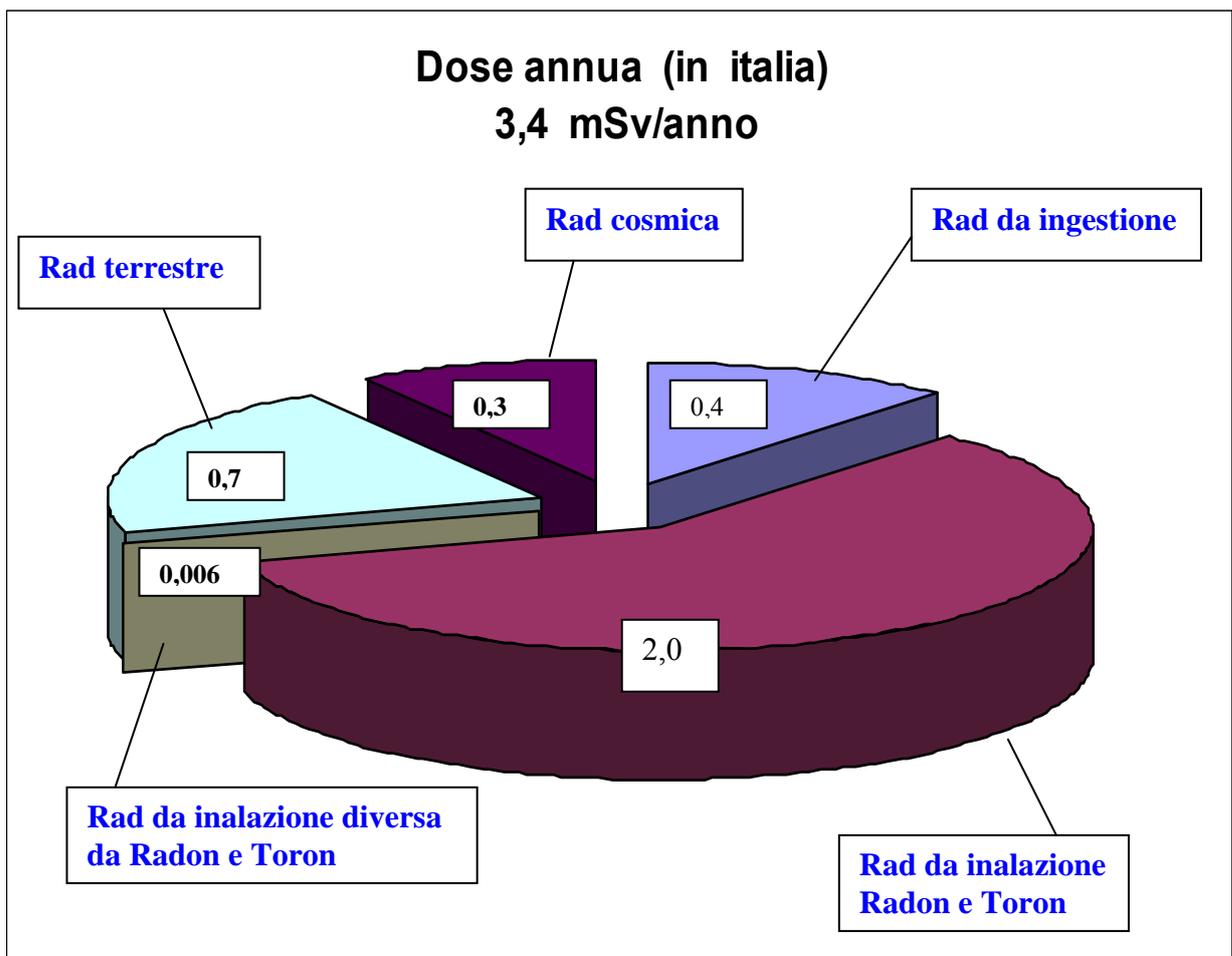
Numerosi fenomeni indotti da raggi X o da elettroni accelerati fino ad energie comprese tra alcune decine ed alcune centinaia di keV sono impiegati in strumentazione impiegata per analisi soprattutto nel campo della struttura dei materiali (microscopia elettronica o a raggi X, diffrazione, analisi per fluorescenza, ecc.).

Scheda di approfondimento 4

Il fondo naturale di radiazione ionizzante

- tratto dalla pubblicazione ANPA : “ Scienza e ambiente” (2002) -

Da sempre l'umanità è soggetta all'azione delle radiazioni ionizzanti che sono presenti nell'ambiente naturale, alle quali si dà il nome di "fondo naturale di radiazioni". Per la loro presenza l'uomo riceve mediamente una dose di 2.4 mSv/a con oscillazioni notevoli da punto a punto del globo terrestre, fino a valori anche venti volte circa più alti di quello medio. Grande variabilità del fondo è anche presente nel nostro Paese. Il valor medio valutato per la popolazione italiana come vedremo nel dettaglio è di 3.4 mSv. Questo valore indubbiamente deve costituire un indice di riferimento cui guardare per eventuali raffronti nelle valutazioni di rischio.



Le sorgenti naturali di esposizione vengono suddivise, in ragione della loro provenienza e natura, in: radiazione cosmica (galattica e solare), radiazione cosmogenica e radiazione primordiale. La radiazione proveniente dalla nostra galassia e dagli spazi intergalattici è quella più energetica con valori compresi tra 10^8 e 10^{20} eV, la cui costituzione è indicata nella tabella 1.

Protoni	Particelle alfa	Elettroni	Nuclei pesanti
86.2	10.8	2	1

La radiazione solare, che è ciclica nella sua intensità con periodi undecennali, è essenzialmente costituita da protoni di energia per lo più inferiore a 100 MeV. Il campo magnetico terrestre funge da parziale schermo di questa radiazione che comunque, raggiungendo l'atmosfera, dà luogo a cascate di altre radiazioni, tra cui muoni, elettroni, gamma e neutroni, alle quali è principalmente dovuta la dose ricevuta al suolo.

La dose della radiazione cosmica, oltre che con l'altezza sul livello del mare, varia anche con la latitudine, e, mediamente, alla latitudine di 50° essa è di circa 270 microSv/a e di 80 microSv/a rispettivamente per la radiazione direttamente ionizzante e per la radiazione neutronica.

La radiazione cosmica è anche responsabile della radiazione cosmogenica, in quanto i neutroni secondariamente prodotti dalla radiazione cosmica attivano i nuclidi stabili rendendoli radioattivi. Tra questi quelli più importanti per la dose sono il trizio, il carbonio-14 e il sodio-22 che hanno anche un ruolo metabolico nell'organismo umano. Si stima che la dose annua sia ripartita come in Tab. 2

¹⁴ C	²² Na	³ H	⁷ Be	Totale
12	0,15	0,01	0,03	~12,2 (15)

I radionuclidi primordiali sono quelli che hanno un periodo di dimezzamento dell'ordine dell'età del sistema solare (e i loro figli), e pertanto si trovano sulla Terra fin dalla sua formazione. I principali sono riportati in tab. 3. La distribuzione estremamente variabile nelle varie regioni terrestri di questi radionuclidi comporta agli abitanti dosi notevolmente diverse; così ad esempio, per alcune regioni ad alto fondo, la dose assorbita in aria è di 790 o 35 o 5 mSv/a rispettivamente in alcune regioni del Brasile (Guarapari), in alcune regioni dell'India (Kerala) e ad Orvieto in Italia.

	T _{1/2} (a)	Dose assorbita in aria (nGy/h)
Torio-232 (e figli serie 4n)	1,405.1010	18
Uranio-238 (e figli serie 4n+1)	4,47.109	16
Uranio-235 (e figli serie 4n+2)	7,038.108	-
Potassio-40	1,28.109	17
Rubidio-87	4,75.1010	-

Analoga disparità di esposizione si può rilevare per quanto riguarda il radon, la cui concentrazione indoor dipende oltre che dalla regione, dal materiale e dalle tecniche di costruzione delle abitazioni e anche dalle caratteristiche climatiche delle zone. Nella tabella 4 sono riportate alcuni valori delle concentrazioni di radon indoor rilevati in alcune abitazioni.

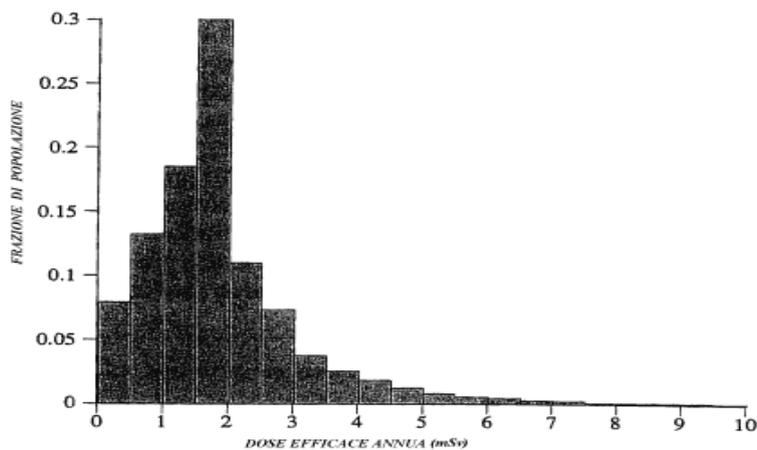
Tab.4: Concentrazione di radon nelle abitazioni di alcuni paesi (Bq/m ³)		
	Valore medio	Valore massimo
Canada	34	1720
Kazakistan	10	6000
Finlandia	120	20000
Repubblica Ceca	140	20000
Italia	75	1040
Spagna	86	15400

Se si assume il valore di conversione esposizione-dose efficace proposto dall'UNSCEAR:

$$1 \text{ Bq h}^{-1}\text{m}^{-3} = 9 \text{ nSv},$$

nel caso del valore massimo di esposizione sopra indicato (in Svezia) e per una permanenza indoor di 10 ore al giorno si avrebbe una dose efficace giornaliera di 7.6 mSv e quindi una dose equivalente al polmone di 63 mSv al giorno.

Distribuzione della dose efficace annua da fondo naturale



Secondo un recente lavoro di F. Bochicchio e S. Risica (ISS), la media nazionale italiana è probabilmente compresa tra 70 e 75 Bq/m³. Considerando che il valore medio mondiale stimato dall'UNSCEAR è di 40 Bq/m³, mentre le medie nazionali di altri Paesi vanno da circa 10 Bq/m³, (Australia, Cipro, Egitto) a oltre 100 Bq/m³, (Finlandia, Svezia, Rep. Ceca, Estonia), la media italiana può considerarsi medio alta. La dose efficace media per la popolazione italiana dovuta all'esposizione al radon nell'aria interna alle abitazioni viene stimata in 1.9 mSv/a, di cui 1.8 mSv/a per l'irraggiamento polmonare e 0,1 mSv/a per l'irraggiamento ad altri organi. A parte le grandi differenze che si possono riscontrare da regione a regione della terra (Figura 1), per quanto riguarda le varie componenti che concorrono a determinare la dose totale, il valore medio dalle varie fonti naturali alla popolazione è sostanzialmente identico a quello che l'UNSCEAR aveva già valutato nel 1988, e che viene riportato nella tabella seguente.

Per quanto riguarda in particolare l'irraggiamento esterno, nel nostro Paese è stata condotta una indagine nazionale dal CNEN negli anni passati che ha portato a rilevare i valori di esposizione gamma annui medi riportati nella tabella seguente:

Aosta	0,49
L'Aquila	0,82
Milano	0,82
Napoli	2,13
Palermo	0,90
Perugia	0,86
Reggio Calabria	1,28
Roma	1,58
Torino	0,86

Concludendo, la dose media totale della popolazione italiana dovuta a esposizione a radiazioni ionizzanti di origine naturale è stimabile, sulla base dei dati attualmente a disposizione, in circa 3.4 mSv/a, di cui 1.8 mSv/a e 0.5 mSv/a dovuti rispettivamente al radon in aria ed alla radiazione gamma nelle abitazioni. I corrispondenti valori medi mondiali sono di 2.4 mSv/a, 1.1 mSv/a e 0.4 mSv/a.

Alla dose media totale cui la popolazione italiana è esposta a causa delle radiazioni ionizzanti di origine naturale, si aggiunge il contributo delle sorgenti antropiche rappresentate essenzialmente dall'impiego delle radiazioni ionizzanti nelle pratiche medico-diagnostiche, e in minor misura anche dal fall-out degli esperimenti nucleari in atmosfera, alla produzione di energia con combustibili fossili, etc. Il contributo medio annuo da queste fonti è stato stimato in 1.1 mSv/a.

APPENDICE

Gli organismi di riferimento della radioprotezione

Gli operatori internazionali

- ***International Commission for Radiological Protection (ICRP)***. Commissione scientifica indipendente formata dai massimi esperti internazionali nel campo della radioprotezione. Fondata nel 1928 sotto altra denominazione per decisione del Secondo congresso di radiologia, nel 1950 fu rifinalizzata e assunse l'attuale denominazione. La Commissione pubblicò il suo primo rapporto nel 1928, mentre il primo rapporto della serie attuale (pubblicazione n. 1) risale al 1961. L'autorevolezza della Commissione è confermata dal ruolo determinante svolto dalle sue raccomandazioni per la definizione di tutte le normative nazionali e internazionali.
- ***United Nations Scientific Committee on the Effects of the Atomic Radiation (UNSCEAR)***. Comitato permanente di esperti internazionali istituito dall'ONU nel 1955 con il compito di studiare i livelli, gli effetti e i rischi delle radiazioni ionizzanti. Il Comitato raccoglie e sottopone a revisione critica le conoscenze sulla radioattività ambientale e sugli effetti delle radiazioni, pubblicando approfonditi rapporti all'Assemblea generale dell'ONU.
- ***NEA Committee on Radiation Protection and Public Health (CRPPH)***. Comitato tecnico-scientifico istituito presso l'Agenzia nucleare (*NEA, Nuclear Energy Agency*, fondata nel 1958) dell'OCSE (l'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico, che raggruppa i 25 paesi più sviluppati del mondo) con lo scopo di sviluppare e diffondere la cultura della radioprotezione nei paesi membri attraverso la cooperazione internazionale.
- ***International Atomic Energy Agency (IAEA)***. Agenzia specializzata dell'ONU (Organizzazione delle Nazioni Unite) istituita per promuovere e controllare a livello internazionale lo sviluppo delle applicazioni pacifiche dell'energia nucleare. Ad essa è anche attribuito il compito di sorvegliare l'attuazione delle norme del Trattato di Non Proliferazione nucleare (TNP) attraverso un'intensa e continua attività di monitoraggio e controllo delle installazioni e degli impianti nucleari di tutto il mondo.
- ***World Health Organisation (WHO)***. Agenzia specializzata istituita dall'ONU con compiti che riguardano, a livello internazionale, la promozione e la tutela della salute.
- ***International Labour Onice (ILO)***. Agenzia specializzata istituita dall'ONU con compiti che riguardano, a livello mondiale, il controllo e il mantenimento delle condizioni di sicurezza delle attività lavorative.

Gli operatori nazionali

- Ministero dell'Industria
- Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA)
- Ministero dell'Ambiente
- Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA)
- Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (ARPA)
- Ministero della Protezione Civile
- Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
- Ministero della Sanità
- Istituto Superiore di Sanità (ISS)
- Istituto superiore per la prevenzione e per la sicurezza del lavoro (ISPESL)
- Aziende Sanitarie Locali (ASL)
- Ministero del lavoro
- Ispettorato Provinciale del Lavoro

Le convenzioni internazionali

La dimensione internazionale del problema della radioprotezione è universalmente riconosciuta, e ha dato luogo negli ultimi vent'anni (soprattutto dopo il disastro di Chernobyl) alla definizione di numerose convenzioni e trattati che sono stati ratificati e recepiti (o in via di recepimento) in tutte le normative nazionali, ecco i più recenti:

- *Convention on Early Notification of a Nuclear Accident* (1986). Obbliga gli stati aderenti, ospitanti impianti e attività a rischio di contaminazione radioattiva, a dare tempestiva comunicazione di ogni evento che comporti o possa comportare liberazione di sostanze radioattive e contaminazione transfrontaliera.
- *Convention on Assistance in the Case of Nuclear Accident or Radiological Emergency* (1986). Obbliga gli stati aderenti a partecipare attivamente con il loro diretto contributo operativo a riportare sotto controllo eventuali emergenze radiologiche, allo scopo di minimizzarne le conseguenze e di proteggere la salute dei cittadini, la proprietà privata e l'ambiente.
- *Convention on Nuclear Safety* (1994). Obbliga gli stati aderenti che dispongono di impianti e installazioni nucleari ad assumere in sede nazionale e a rendicontare in sede internazionale (IAEA) tutte le misure legislative, regolamentari e tecniche necessarie per garantire la sicurezza delle installazioni e il controllo di eventuali condizioni di emergenza.
- *Convention on the Safety of Spent Fuel and of the Radioactive Waste Management* (1997). Obbliga gli stati aderenti ad assumere in sede nazionale e a rendicontare in sede internazionale (IAEA) tutte le misure legislative, regolamentari e tecniche

necessarie per garantire la sicurezza del combustibile nucleare irraggiato e dei rifiuti radioattivi.

Gli obblighi previsti dalle convenzioni internazionali sono stati tradotti anche in sede europea in una serie di regolamenti e direttive già recepite o in via di recepimento nei paesi membri. Sulla base delle competenze contemplate dal trattato istitutivo della Comunità Europea dell'Energia Atomica (CEEA o Euratom) del 25 marzo 1957, il Consiglio d'Europa e la Commissione Europea stabiliscono regolamenti e direttive, prendono decisioni e formulano raccomandazioni o pareri. L'art. 161 del trattato illustra il significato dei diversi strumenti legislativi europei:

- Il regolamento ha portata generale, è obbligatorio in tutti i suoi elementi e direttamente applicabile in ciascuno degli stati membri.
- La direttiva vincola lo stato membro cui è rivolta per quanto riguarda il risultato da raggiungere, salva restando la competenza degli organi nazionali in merito alla forma e ai mezzi di attuazione.
- La decisione è obbligatoria in tutti i suoi elementi per i destinatari ad essa designati.
- Le raccomandazioni e i pareri non sono vincolanti.

I riferimenti normativi

Principali indicazioni e raccomandazioni a livello internazionale ed europeo

- Raccomandazione della Commissione del 21 febbraio 1990 sulla tutela della popolazione contro l'esposizione al radon in ambienti chiusi (90/143/Euratom) GU n. L 80 del 27 Marzo 1990, p. 26.
- IAEA "International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for Safety of adiation Sources", Safety Series n. 115 IAEA, Vienna, 1996.
- Radioprotezione No 88: Raccomandazioni per l'attuazione del titolo VII della Direttiva europea che stabilisce le norme fondamentali, riguardante un aumento significativo dell'esposizione dovuta alle sorgenti di adiazioni naturali, Lussemburgo 1997.
- Comunicazione della Commissione riguardante l'applicazione della 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. Documento OM(98)87 def. del 23 febbraio 1998

Principali normative vincolanti a livello europeo

- Trattato Istitutivo della Comunità Europea dell'Energia Atomica (CEEA o Euratom) del 25 marzo 1957.
- 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 alle radiazioni ionizzanti (GU n. L 159 del 29/6/1996 pag. 1).
- Direttiva del Consiglio 97/43/EURATOM del 30 giugno 1997, riguardante la protezione sanitaria delle ersone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti in connessione ad esposizioni mediche e che abroga a direttiva 84/466/Euratom (GU n. L 180 del 9/7/1997 pag. 22).

Principali norme Italiane

Decreto Legislativo 17 marzo 1995 n. 230 "Attuazione delle Direttive Euratom 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641, e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti". SO alla GURI n. 136 del 13/6/1995 n. 74. Nel D.Lgs. 230/95 è prevista l'emanazione di 40 diversi decreti ministeriali o DPCM di attuazione; alcuni di essi, principalmente di competenza del Ministero della Sanità, sono stati già emanati.

Decreto Legislativo 17 marzo 2000, n. 241 (*Attuazione delle direttive EURATOM nn. 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti*)

D.lg. 257/2001 "Disposizioni integrative e correttive del D.lg. 241/2000"

D.lg. 151/2001 "Testo unico delle disposizioni legislative in materia di tutela e sostegno della maternità e della paternità, a norma dell'art. 15 della L. 53/2000"

Legge 1 marzo 2002, n.39 "Disposizioni per l'adempimento di obblighi derivanti dall'appartenenza dell'Italia alle Comunità Europee – Legge comunitaria 2001"

Legge 19/1/1998 n. 10 "Ratifica ed esecuzione della convenzione sulla sicurezza nucleare, fatta a Vienna il 20 Settembre 1994" (GU n. 28 del 4/2/1998).

Trattato che istituisce la Comunità europea dell'energia atomica (EURATOM) (firmato a Roma il 25 marzo 1957) sito internet: <http://europa.eu.int/abc/obj/treatis/it/ittoc38.htm>

Direttiva 98/83CE del Consiglio del 3 novembre 1988 concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano

D.lg. n.31 del 2 febbraio 2001 "Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano

DECRETO MINISTERIALE 13 luglio 1990, n. 449 (*Regolamento concernente le modalità di tenuta della documentazione relativa alla sorveglianza fisica e medica della protezione dalle radiazioni ionizzanti e la sorveglianza medica dei lavoratori esposti al rischio di tali radiazioni*)

MINISTERO LAVORO circolare 20 novembre 1991, n. 151 (*Modalità applicative del D.M. 13 luglio 1990, n.449*)

DECRETO PRESIDENTE REPUBBLICA 13 aprile 1994, n. 336 (*Regolamento recante le nuove tabelle delle malattie professionali nell'industria e nell'agricoltura*)

DECRETO LEGISLATIVO 19 dicembre 1994, n. 758 (*Modificazioni alla disciplina sanzionata in materia di lavoro*)

DECRETO LEGISLATIVO 25 novembre 1996, n. 645 (*Recepimento della direttiva 92/85/CEE concernente il miglioramento della sicurezza e della salute sul lavoro delle lavoratrici gestanti, puerpere o in periodo di allattamento*)

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.

La radioprotezione in Internet

Internet costituisce una fonte preziosa di contatto e documentazione sulla radioprotezione e sull'attività degli organismi nazionali e internazionali coinvolti nella radioprotezione. Una guida bibliografica particolarmente approfondita è reperibile presso il sito <http://www.radscice.com/dowd.html>. Si riportano di seguito alcuni dei riferimenti ivi proposti.

Operatori nazionali e internazionali

International Atomic Energy
Agency (ONU)
<http://www.iaea.or.at/>

World Health
Organization (ONU)
<http://www.who.ch/>

International Commission for Radiological
Protection (ICRP)
<http://www.who.ch/programmes/ina/ngo/ngo-44.htm>

United Kingdom National Radiation
Protection Board
<http://www.nrp.org.uk/>

United States National Council on Radiation Protection
and Measurement <http://www.ncrp.com/>

RadEFX, Radiation Health Effects Research Resource (Baylor
College of Medicine) <http://radefx.bcm.tmc.edu/default.htm>

Radiation and Health Physics (University of Michigan Student Chapter of the
Health Physics Society) <http://www.sph.umich.edu/group/eih/UMSCHPS/>

American Academy of
Health Physics
<http://phantom.ehs.uiuc.edu/~aahp/>

American Association of Physicists
in Medicine <http://www.aapm.org/>

American Society of Radiologic
Technologists
<http://www.asrt.org/>

Canadian Radiation
Protection Association
<http://www.safety.ubc.ca/crpa>

European
Nuclear Society

<http://www.aey.ch/ens/>

Health
Physics
Society
<http://www2.hps.org/hps/>

International Radiation
Protection Association
<http://www.tue.nl/sbd/irpa/irpahome.htm>

International Society of Radiographers and Radiological
Technologists <http://www.isrrt.org/>

National Registry of Radiation Protection
Technologists <http://www.nrrpt.org/>

Society of
Nuclear
Medicine
<http://www.snm.org/>

The American
Nuclear Society
<http://www.ans.org/>

The Radiological Society of
North America
<http://www.rsna.org/>

Agenzie governative statunitensi

Department of Energy
Home Page
<http://www.doe.gov/>

Environmental
Protection Agency
<http://www.epa.gov/>

Food and Drug
Administration Home Page
<http://www.fda.gov/>

FDA Center for Devices and
Radiological Health
<http://www.fda.gov/cdrh/cdrhhome.html>

Occupational Safety & Health
Administration
<http://www.osha.gov/>

United States Nuclear Regulatory
Commission <http://www.nrc.gov/>

Publicazioni

<http://www.tue.nl/sbd/irpa/icrp.htm>

<http://www.iaea.or.at/worldatom/>

<http://www.iaea.or.at/worldatom/inforesource/bulletin/>

Radiation Research, the official journal of the Radiation
Research Society <http://www.cjp.com/radres>

University of Michigan's Student Chapter of the Health Physics Society.
Natural Radioactivity [http://www.sph.
umich.edu/group/eih/UMSCHPS/natural.htm](http://www.sph.umich.edu/group/eih/UMSCHPS/natural.htm)

IAEA Bulletin 39/1 - Radiation and the environment: Assessing effects on
plants and animals.
<http://www.iaea.or.at/worldatom/inforesource/bulletin/bull391/linsley.html>

NEA, Radiation Protection Today and
Tomorrow
<http://www.nea.fr/html/rp/rp.html>

FDA, Food and Drug Administration. Center for Devices and
Radiological Health. <http://www.fda.gov/cdrh/>

Studi su Chernobyl

International Consortium for Research on the Health
Effects of Radiation
<http://radefx.bcm.tmc.edu/icrher/icrher.htm>

Kurchatov Institute's Project
"Polyn"
[http://polyn.net.kiae.su/polyn/
manifest.html](http://polyn.net.kiae.su/polyn/manifest.html)

IAEA, Ten Years after Chernobyl: What do we really
know?
[http://www.iaea.or.at/worldatom/inforesource/other/chem
oten/index.html](http://www.iaea.or.at/worldatom/inforesource/other/chemoten/index.html)

Studi su Hiroshima e Nagasaki

Radiation Effects Research
Foundation
[http://www.rerf.or.jp/eigo/experhp/
rerfhome.htm](http://www.rerf.or.jp/eigo/experhp/rerfhome.htm)

Per quanto riguarda il “Progetto di Zonizzazione Regionale da Radon” esso sarà oggetto di una prossima pubblicazione.