

Ordine Provinciale di Roma dei Medici Chirurghi e degli Odontoiatri

## Corso di Formazione e Aggiornamento per la Tutela della Salute dei Lavoratori

# RADIAZIONI IONIZZANTI

Roberto Moccaldi

Coordinatore Medicina del Lavoro e Radioprotezione Medica – CNR  
Segretario Nazionale AIRM

### STRUTTURA DELLA MATERIA

Per comprendere compiutamente i meccanismi attraverso i quali le radiazioni ionizzanti possono determinare effetti negativi sulla salute degli esseri viventi è necessario far riferimento ad alcuni elementi di base della fisica atomica e nucleare.

A tal fine si ricorderà che l'atomo è la parte più piccola di un elemento che mantiene inalterate le caratteristiche chimiche dell'elemento stesso o è la parte più piccola di materia che non può essere ulteriormente suddivisa mediante reazioni di tipo chimico, mentre può essere ulteriormente frazionata e suddivisa con metodi fisici (in particolare mediante somministrazione di energia). Ai nostri fini la rappresentazione più semplice che può esser fatta dell'atomo è quella proposta da Rutherford e Bohr che prevede una struttura analoga ad un sistema solare in miniatura, con al centro un nucleo (costituito da protoni, carichi positivamente e neutroni) ed in periferia tanti pianeti carichi negativamente, gli elettroni, che ruotano attorno al nucleo su orbite ben determinate contrassegnate dalle lettere: K, L, M...

Ad ogni orbita corrisponde una energia ben precisa dell'elettrone (*livello quantico fondamentale*); se all'elettrone viene fornita energia dall'esterno, l'elettrone passa a ruotare su un'altra orbita (*eccitazione*), ma ritorna dopo un po' di tempo a ruotare nell'orbita primitiva emettendo l'energia assorbita sotto forma di onda elettromagnetica (*emissione elettronica*). Un atomo, dal punto di vista elettrico è neutro, in quanto il numero di protoni del nucleo (cioè la loro carica elettrica positiva) è bilanciato dal numero di elettroni (cioè dalla somma delle loro cariche elettriche negative). Se a un elettrone viene fornita dall'esterno energia in quantità sufficientemente elevata, esso può essere definitivamente allontanato dall'atomo cui apparteneva: questo fenomeno va sotto il nome di *ionizzazione* e l'atomo, restato privo dell'elettrone, si chiama *ione*.

Al centro dell'atomo si trova il nucleo, che costituisce oggetto di studio della fisica nucleare. Esso è costituito da protoni e neutroni confinati in uno spazio piccolissimo (sfera dell'ordine di  $10^{-13}$  cm). Il numero di protoni caratterizza la specie chimica: in natura esistono 92 elementi chimici ciascuno caratterizzato da un numero di protoni (indicato con Z e denominato numero atomico) che varia da 1 (idrogeno) a 92 (uranio). Le proprietà chimiche dell'atomo dipendono quindi dal numero atomico.

Il protone (p) contiene una unità di carica elettrica positiva ed ha massa pari a  $1,7 \cdot 10^{-27}$  kg. L'elettrone (e) possiede una unità di carica elettrica negativa e la sua massa è pari a 1/1840 della massa del protone.

Il neutrone (n) è una particella elettricamente neutra e di massa pari a quella del protone.

La massa totale dell'atomo è data dal numero dei protoni più quello dei neutroni. Tale somma costituisce il numero di massa (A).

In genere si adopera la seguente nomenclatura abbreviata, nella quale X è il simbolo dell'elemento:



Gli atomi che hanno lo stesso numero di protoni possono possedere un diverso numero di neutroni. Questi atomi hanno le stesse caratteristiche chimiche ed occupano lo stesso posto nella tavola periodica degli elementi, ma presentano caratteristiche fisiche diverse e vengono denominati *isotopi*.

## LA RADIOATTIVITA'

Il nucleo atomico mantiene stabile la sua configurazione a mezzo di forze attrattive che agiscono solo a brevissima distanza; d'altra parte nel nucleo agisce anche la forza repulsiva dovuta alla concentrazione della carica elettrica positiva dei protoni. Tra queste due forze contrastanti si stabilisce una condizione di equilibrio che mantiene stabile la compagine nucleare. In queste condizioni di stabilità il nucleo si trova in una situazione di minimo energetico. Se per una causa qualsiasi questo equilibrio viene alterato per eccesso, il nucleo cessa di essere stabile e tende a "smaltire" l'eccesso energetico andando incontro a modificazioni che si risolvono con emissione spontanea del "surplus" di energia. Questo fenomeno di trasformazione nucleare, finalizzato al ritorno alla posizione di minimo energetico e che si manifesta con l'emissione di particelle corpuscolari o di onde elettromagnetiche, va sotto il nome di *radioattività* o di *decadimento radioattivo*. Il fenomeno della radioattività può essere naturale (se presente a causa di fenomeni indipendenti dall'attività umana) o *artificiale* (se dovuta all'intervento dell'uomo). La specie nucleare che emette radiazioni viene denominata *radionuclide*.

La radioattività naturale scoperta da Becquerel e Curie alla fine del secolo scorso consiste nella trasmutazione spontanea di alcune specie atomiche in altre attraverso il decadimento radioattivo. Il fenomeno si riscontra per lo più negli elementi di alto numero atomico (elementi pesanti), ma si può riscontrare anche in elementi leggeri (a basso numero atomico) come per esempio nel caso dell'isotopo dell'idrogeno denominato trizio. Un isotopo instabile come il trizio, che emette radiazioni, viene denominato *radioisotopo*.

L'attività di un radionuclide indica la velocità alla quale la sostanza radioattiva decade e si esprime con il numero di disintegrazioni che avvengono nell'unità di tempo (dis/s); l'attività di una disintegrazione al secondo è presa come unità di misura dell'attività e viene denominata becquerel (Bq).

Viene definito *tempo di dimezzamento* o *periodo di dimezzamento* ed è indicato con  $T$ , il tempo necessario perché il numero di atomi radioattivi si riduca alla metà di quelli presenti inizialmente. Vi sono radionuclidi che hanno periodi di dimezzamento di frazioni di secondo ed altri che raggiungono i miliardi di anni.

## LE RADIAZIONI

La radiazione è il trasferimento nello spazio di energia trasportata da onde o da particelle. Nel campo specifico di nostro interesse la radiazione è un flusso di energia elettromagnetica o di particelle, generato da processi fisici che si producono nell'atomo o nel nucleo atomico. La radiazione associata a particelle dotate di massa viene detta *radiazione corpuscolata* e comprende la radiazione *alfa* e *beta*, mentre quella trasferita con onde viene denominata *radiazione elettromagnetica* e comprende i raggi *X* e i raggi *gamma*. L'energia trasportata viene ceduta in tutto o in parte quando la radiazione incontra la materia.

Radiazioni ionizzanti sono quelle che hanno la capacità energetica di rimuovere un elettrone orbitale dall'atomo colpito. Non tutte le radiazioni hanno un contenuto energetico in grado di produrre ionizzazione. In relazione a tale aspetto le radiazioni vengono suddivise in: *radiazioni ionizzanti* (RI) e *radiazioni non ionizzanti* (NIR). Nel caso specifico ci interessano solo le prime e cioè quelle radiazioni cui è associata una energia superiore a quella minima necessaria per strappare l'elettrone dall'atomo. La radiazione può allontanare l'elettrone dall'atomo in maniera diretta oppure in modo mediato dalla generazione di altra radiazione come nel caso dei neutroni. Si parla rispettivamente di radiazione *direttamente ionizzante* e di radiazione *indirettamente ionizzante*.

Le radiazioni in grado di produrre la ionizzazione, più comunemente presenti nelle attività umane, sono: le radiazioni non corpuscolate X e  $\gamma$  e le radiazioni corpuscolate alfa, beta, protoni e neutroni.

- Le radiazioni X e  $\gamma$  sono entrambe radiazioni elettromagnetiche prive di carica e di massa; mentre i raggi X derivano dalla emissione elettronica a seguito di transizioni dell'elettrone nelle orbite più interne dell'atomo, la radiazione  $\gamma$  proviene dal nucleo atomico nel procedimento di decadimento radioattivo ed in genere ha una lunghezza d'onda minore rispetto alla radiazione X.

- Le radiazioni  $\alpha$  sono costituite da nuclei di elio con massa 4 e carica 2 e provengono dal decadimento radioattivo di radioisotopi di elevato numero atomico e costituiscono circa il 4% della radiazione cosmica.

- Le radiazioni  $\beta$  sono elettroni provenienti dal nucleo atomico a seguito di processi di decadimento radioattivo.

- Il protone è il principale costituente della radiazione cosmica presente al di fuori dell'atmosfera terrestre.

- La radiazione neutronica è presente attorno ai reattori nucleari e nella radiazione cosmica presente nell'atmosfera terrestre.

I vari tipi di radiazioni ora individuate interagiscono con la materia cedendole la loro energia. L'entità e le modalità di cessione dell'energia sono collegate con il tipo e con le caratteristiche energetiche della radiazione incidente. Merita qui ricordare che la radiazione  $\alpha$  cede rapidamente la sua energia entro percorsi molto brevi, per cui produce un alto numero di ioni per unità di percorso, analogamente il protone ed il neutrone (quest'ultimo mediante le particelle cariche da esso prodotte); la radiazione  $\beta$  disperde la sua energia in percorsi maggiori, mentre la radiazione elettromagnetica

cede la sua energia in percorsi molto più lunghi. Il numero di ioni prodotti dalla radiazione ionizzante per unità di percorso nella materia, si definisce ionizzazione specifica ed il suo equivalente energetico costituisce il *LET* o '*Linear Energy Transfer*' (*trasferimento lineare d'energia*); esso corrisponde alla quantità di energia trasferita alla materia per unità di percorso e viene normalmente misurato in keV/μ. Radiazioni ad alto LET sono le particelle α ed i protoni, mentre sono radiazioni a basso LET i raggi β. I neutroni ed i fotoni (X, γ), che sono radiazioni indirettamente ionizzanti, cedendo la loro energia a particelle cariche danno a loro volta luogo a radiazioni di alto o basso LET.

A titolo indicativo nella tabellina seguente viene riportato il percorso in aria e nei tessuti delle radiazioni α, β e γ di pari energia (1 MeV): (poiché la radiazione γ non viene completamente assorbita, in tabella è riportato il percorso che riduce del 90% l'energia della radiazione).

Tab.1  
*Distanze medie percorse dai vari tipi di radiazioni di 1 MeV*

Tipo di radiazione	Percorso in aria	Percorso nel tessuto
α	0,7 cm	0,006 cm
β	2,32 m	0,43 cm
γ	12,58 m	1,51 cm

Sia i raggi X che la radioattività possono esser prodotti artificialmente dall'uomo bombardando la materia principalmente con elettroni o con neutroni. La produzione dei raggi X si verifica nei tubi a raggi catodici, mentre la produzione di radioattività artificiale si ottiene soprattutto nei reattori nucleari.

### GRANDEZZE ED UNITA' DI MISURA

Le radiazioni sono entità fisiche e pertanto, sia pur indirettamente attraverso l'energia ad esse associata o agli ioni che producono attraversando la materia, sono misurabili. Il criterio di misura più usato per il passato era proprio la ionizzazione e cioè la carica elettrica che la radiazione produce nella materia; questo criterio di misura è impiegato per la misura dell' "*esposizione*", una grandezza legata appunto al numero di ioni prodotti in aria dalla radiazione; oggi però si preferisce misurare l'energia che la radiazione deposita nella materia con cui interagisce.

Unità di misura dell'energia nel sistema internazionale è il joule (J). In radioprotezione la grandezza fondamentale è rappresentata dalla quantità di energia assorbita dalla unità di massa interessata dalla radiazione: questa grandezza si chiama "*dose assorbita*" e viene misurata dal numero di joule assorbiti da un chilogrammo di materia. Alla misura espressa in joule per chilogrammo (J/kg) viene assegnato il nome di gray (simbolo Gy). Poiché questa unità di misura è grande rispetto alle dosi normalmente assorbite nelle attività umane si impiegano suoi sottomultipli ed in particolare il milligray (mGy) pari ad un millesimo di gray.

A proposito della capacità di produrre ioni per unità di percorso, si è visto che le radiazioni si comportano in maniera diversa; pertanto in relazione a questa loro caratteristica ai vari tipi di radiazioni sono stati assegnati degli indici diversi, detti *fattori di ponderazione della radiazione*; detti fattori sono valutati relativamente alla radiazione X alla quale è stato assegnato il valore 1. E' stata introdotta pertanto una nuova grandezza, detta *dose equivalente* (paragonabile alla grandezza definita nel Decreto legislativo 230/95 come *equivalente di dose*) che esprime la diversa capacità di cedere energia e che ha come unità di misura il sievert (Sv). Pertanto, in modo semplificato, la dose equivalente misurata in sievert è data dalla dose assorbita misurata in gray moltiplicata per il fattore di ponderazione specifico per quel tipo di radiazione. Così, essendo 20 il fattore di ponderazione della radiazione α, una dose assorbita di 1Gy corrisponde ad una dose equivalente di 20 Sv per questa radiazione.

Ma se la materia interessata dalla radiazione è un tessuto vivente, allora anche il tessuto risponde in maniera diversa a secondo della sua natura; per questo ad ogni tessuto dell'organismo umano è stato assegnato un indice diverso, legato alla particolare suscettibilità alle radiazioni di quel tessuto, con riferimento specifico agli effetti stocastici, rapportato all'organismo in toto,. L'indice assegnato ai vari tessuti e organi prende il nome di *fattore di ponderazione tissutale*. E' stata pertanto introdotta una ulteriore grandezza che prende il nome di *dose efficace* (che dal punto di vista pratico corrisponde in linea di massima con l'*equivalente di dose efficace* del Decreto legislativo 230/95) misurata in sievert, il cui valore si ottiene moltiplicando la dose equivalente per lo specifico fattore di ponderazione relativo al tessuto o all'organo esposto. Così ad esempio se un tessuto ha un fattore di ponderazione 0,12 ed ha ricevuto una dose equivalente di 0,1Sv, la corrispondente dose efficace è di 0,012 Sv.

Molto spesso nelle situazioni operative tornano utili le stesse grandezze ora considerate riferite al tempo. Si hanno così i *ratei* o *tassi* o, meglio, *intensità* delle varie grandezze riferite all'ora come unità di tempo.

Un campo di misura particolarmente complesso è quello relativo alla valutazione della dose dovuta a sorgenti di radiazioni presenti all'interno dell'organismo. Queste situazioni si possono verificare a seguito dell'ingestione o della

inalazione di sostanze contaminate da materiale radioattivo: si parla in tal caso di *contaminazione interna*. La radioattività presente nell'organismo vi permane per un tempo più o meno lungo in relazione alle caratteristiche chimiche e fisiche della sostanza ed in relazione al metabolismo ed alle caratteristiche degli organi interessati. Per queste particolari situazioni è stata introdotta una ulteriore grandezza denominata *dose* (equivalente o efficace) *impegnata* che tiene conto della deposizione di energia dal momento dell'introduzione fino a quando il radionuclide non sarà completamente eliminato dall'organismo o non sarà decaduto. Questa permanenza del radionuclide nell'organismo viene assunto convenzionalmente in 70 anni.

Una unità di misura che merita ricordare in quanto di riscontro molto frequente nel campo che ci interessa, è l'elettronvolt (eV). Questa unità di misura è riferita all'energia posseduta dalle singole particelle o dai fotoni costituenti la radiazione. Da un punto di vista concettuale l'elettronvolt, rappresenta l'energia acquistata da un elettrone quando si sposta tra due punti tra i quali la differenza di potenziale è di un volt. Multipli dell'elettronvolt sono: keV (1000 eV); MeV (1.000.000 eV), ecc.

## **ESPOSIZIONE DELL'UOMO**

L'organismo umano è esposto inevitabilmente a sorgenti di radiazioni da sempre presenti sulla terra e per questo denominate *radiazioni naturali*; ma il progresso, la ricerca scientifica e le applicazioni conseguenti hanno portato a realizzare fonti radianti o sostanze radioattive artificiali. Pertanto, per motivi occupazionali o per finalità le più varie gli individui possono trovarsi esposti anche alle *radiazioni artificiali*. Sia le une che le altre possono interessare l'individuo sia dall'esterno che dall'interno, dando luogo quindi alle due modalità di esposizione sopra ricordate

### **1 ) L'irradiazione naturale.**

Da sempre l'uomo è esposto alle radiazioni naturali, che costituiscono la fonte preponderante di irradiazione per tutta la specie umana. Probabilmente le radiazioni contribuiscono al processo di evoluzione delle specie viventi. Sebbene tutti siano esposti, non tutti però sono esposti alla stessa maniera. Vi sono individui più esposti solo per il fatto di vivere in regioni particolarmente radioattive, o per il modo particolare di vivere. La radiazione naturale viene suddivisa a seconda delle fonti di provenienza in:

- radiazione primordiale,
- radiazione cosmica,
- radiazione cosmogenica.

La radiazione primordiale è dovuta ai radionuclidi presenti sulla crosta terrestre, che hanno lunghi periodi di dimezzamento (età della terra) o che provengono dal decadimento dei medesimi. Tra questi vi sono il  $^{40}_{19}\text{K}$ , il  $^{87}_{37}\text{Rb}$ , il  $^{238}_{92}\text{U}$ , il  $^{232}_{90}\text{Th}$ . Tra i radionuclidi che derivano dal decadimento di questi ultimi, il radon ha particolare importanza ai fini dell'irradiazione interna in quanto, essendo un radionuclide in forma gassosa, viene inalato, irradiando così l'apparato respiratorio. Il sottosuolo e molti materiali da costruzione liberano questo gas anche nell'ambiente domestico. Una sua concentrazione nell'aria di 200 Bq/m<sup>3</sup> comporta una dose efficace annua di circa 3 mSv. Vi sono regioni terrestri dove l'abbondanza dei radionuclidi primordiali è molto più elevata che altrove, per cui la dose sia da irradiazione esterna che interna alla popolazione ivi residente risulta molto più alta della media. La dose efficace media annua dovuta alla radiazione primordiale è di circa 2 mSv.

La radiazione cosmica proviene sia dagli spazi intergalattici, che dal sole ed è costituita prevalentemente da protoni e da particelle  $\alpha$  di energia estremamente elevata (fino a  $10^{20}$  eV). Questa radiazione primaria colpisce violentemente le molecole di aria dell'atmosfera, determinando una valanga di altre particelle che costituiscono la radiazione secondaria. Nella radiazione secondaria sono presenti anche neutroni. La radiazione secondaria dopo ulteriori urti raggiunge il suolo irradiando quindi la popolazione dall'esterno. L'intensità di questa radiazione è massima a circa 20 km di altezza e quindi via via si attenua raggiungendo il suolo. Ad esempio, il flusso di neutroni al suolo è di circa 50 neutroni per metro quadrato all'ora. Al livello del suolo la dose efficace media annua dovuta alla radiazione cosmica è di circa 0,36 mSv. A 10 km di altezza l'intensità di dose efficace è di circa 7  $\mu\text{Sv/h}$ .

La radiazione cosmogenica è quella proveniente da nuclidi divenuti radioattivi a seguito della cattura da parte dei loro nuclei dei neutroni presenti nella radiazione cosmica secondaria. Quelli che interessano l'esposizione dell'uomo sono per lo più radionuclidi leggeri quali il tritio ed il carbonio-14 che, entrando nel ciclo biologico, vanno ad interessare il metabolismo umano dando luogo quindi a contaminazione interna. La radiazione cosmogenica, con una dose efficace annua di circa 0,015 mSv, contribuisce per una frazione minima all'esposizione della popolazione.

Secondo le stime più recenti la popolazione mondiale è in media esposta ad una dose efficace annua di circa 2,4 mSv (Tab. 2). Il termine che viene impiegato per indicare le dosi derivanti dalle sorgenti naturali è quello di *fondo naturale* di radiazione. Il fondo non è eguale in tutte le regioni della terra: vi sono delle regioni nelle quali la popolazione riceve più di 20 volte il valore medio, cioè oltre 50 mSv all'anno.

Tab. 2  
*Dose efficace annua da fondo naturale (mSv/y)*

<i>Sorgente</i>	<i>Irradiazione esterna</i>	<i>Irradiazione interna</i>	<i>Totale</i>
Raggi cosmici			
Direttamente ionizzanti	0,300	-	0,300
Neutroni	0,055	-	0,055
Radionuclidi cosmogenici H <sup>3</sup> , C <sup>14</sup> , Na <sup>24</sup>	-	0,015	0,015
Radionuclidi primordiali			
K <sup>40</sup> , Rb <sup>87</sup>	0,150	0,186	0,386
Serie dell'U <sup>238</sup>	0,100	1,200	1,300
Serie del Th <sup>232</sup>	0,160	0,180	0,340
Totale (arrotondato)	0,800	1,600	2,400

## 2) L'irradiazione artificiale.

In questo secolo l'uomo è riuscito ad applicare le radiazioni ionizzanti in numerosi campi d'interesse ed ad usare in modo pacifico la potenza dell'atomo in numerose attività con indubbio vantaggio per tutta l'umanità. Per cui le occasioni di esposizione per l'uomo sono aumentate a causa di:

- a) impieghi medici (radiodiagnostica, radioterapia, medicina nucleare),
- b) impieghi energetici (reattori e ciclo del combustibile)
- c) impieghi industriali (radiografie, indicatori di livello, produzione di fertilizzanti, di coloranti....)
- d) produzione di beni di consumo (televisione, tubi catodici, quadranti luminescenti, rivelatori di fumo,...)
- e) trivellazioni del terreno, attività estrattive meccanizzate (dispersione della radioattività della crosta terrestre),
- f) viaggi aerei a quote sempre più alte.

Ma l'esposizione media della popolazione è anche aumentata a seguito degli impieghi bellici dell'atomo, soprattutto per i test nucleari in aria degli anni '50 e '60. Questi hanno dato luogo alla diffusione di sostanze radioattive nell'atmosfera, sostanze che sono ricadute (*fallout*) contaminando l'ambiente.

Le dosi individuali derivanti dalle sorgenti di radiazioni artificiali variano entro intervalli di valori molto ampi; la popolazione dei paesi industriali nel suo complesso riceve mediamente delle dosi notevolmente più basse del fondo e pari ad un valore dell'ordine del 20-30% del fondo stesso per le attività indicate (circa 0.4 mSv/anno).

Solo una parte di coloro che lavorano nelle attività sopra ricordate ricevono delle dosi efficaci annue superiori alla dose del fondo naturale. Negli anni passati, prima degli anni '50 e '60, detti lavoratori potevano raggiungere valori di dose anche centinaia o migliaia di volte superiori a quelle del fondo naturale, ma oggi i livelli di esposizione occupazionali raramente, salvo situazioni eccezionali e di emergenza, raggiungono la decina di volte il fondo naturale.

La fonte di esposizione artificiale più rilevante è comunque quella che riceviamo a seguito dell'impiego medico delle radiazioni (Tab. 3).

Tab. 3  
*Dose efficace in mSv al paziente in procedure radiodiagnostiche e medico-nucleari*

<b>Esami RX</b>	Dose efficace	<b>Esami Medicina Nucleare</b>	Dose efficace
Torace (p.a.)	0.04	Renale sequenziale ( <sup>99</sup> Tc-DTPA)	1.6
Cranio (2p)	0.1	Tiroidea ( <sup>99</sup> TcO <sub>4</sub> )	1.8
Rachide dorsale	1.1	Epatobiliare ( <sup>99</sup> Tc-IDA)	3.3
Diretta addome	1.4	Osteoarticolare ( <sup>99</sup> Tc-MDP)	4.4
Rachide lombare	2.2	Miocardia ( <sup>99</sup> Tc-MIBI)	8.3
Urografia	4.6	Immunoscintigrafia ( <sup>99</sup> Tc-MoAb)	17
Pasto baritato (diger.sup.)	4.6	Surrenale ( <sup>75</sup> Se-colesterolo)	18
Clisma opaco	8.7	PET ( <sup>18</sup> F-FDG)	7.4
		“Indicatori positivi”	
TC addome superiore	3.7	<sup>67</sup> Gallio	20
TC torace	6.9	<sup>111</sup> In-octreotide	23
TC addome inferiore	7.1	<sup>201</sup> Tallio	25

### **PROTEZIONE FISICA DALLE RADIAZIONI**

Si è visto sopra che vi sono due modalità di irraggiamento dell'organismo a seconda se la sorgente sia esterna o interna all'organismo stesso. Nel caso che la sorgente sia esterna, si può ricavare, con un semplice modello fisico-geometrico, la legge che consente di valutare l'esposizione. Si può così vedere, cosa del resto intuibile e anche verificabile sperimentalmente, che questa esposizione:

- è tanto più bassa quanto più è grande la distanza tra sorgente e individuo,
- è tanto minore quanto minore è il tempo di permanenza nelle zone con radiazioni,
- può essere ridotta a valori bassi a mezzo dell'interposizione di schermi,

Le norme operative per la protezione nelle attività con sola esposizione esterna discendono pertanto da queste fondamentali e basilari osservazioni.

Nel caso che la sorgente possa penetrare all'interno dell'organismo i criteri di prevenzione primari sono evidentemente quelli di impedire o limitare tale introduzione. Ad esempio i divieti di bere, mangiare o fumare negli ambienti con contaminazione radioattiva o l'impiego di maschere e guanti protettivi seguono questo criterio. Analogamente nel caso di situazioni postincidentali, l'impiego di filtri a protezione delle vie aeree, il lavaggio della cute (integra o soprattutto con lesioni) oppure, successivamente, la messa al bando di alimenti e bevande contaminate hanno lo scopo di evitare o limitare l'introduzione di radioattività nell'organismo. Una volta invece che la sorgente è penetrata nell'organismo, le misure da adottare sono quelle di rimuovere il più rapidamente possibile la sorgente dall'organismo stesso, in pratica la somministrazione mirata di farmaci che limitano l'incorporazione e/o accelerano l'eliminazione dei radionuclidi introdotti.

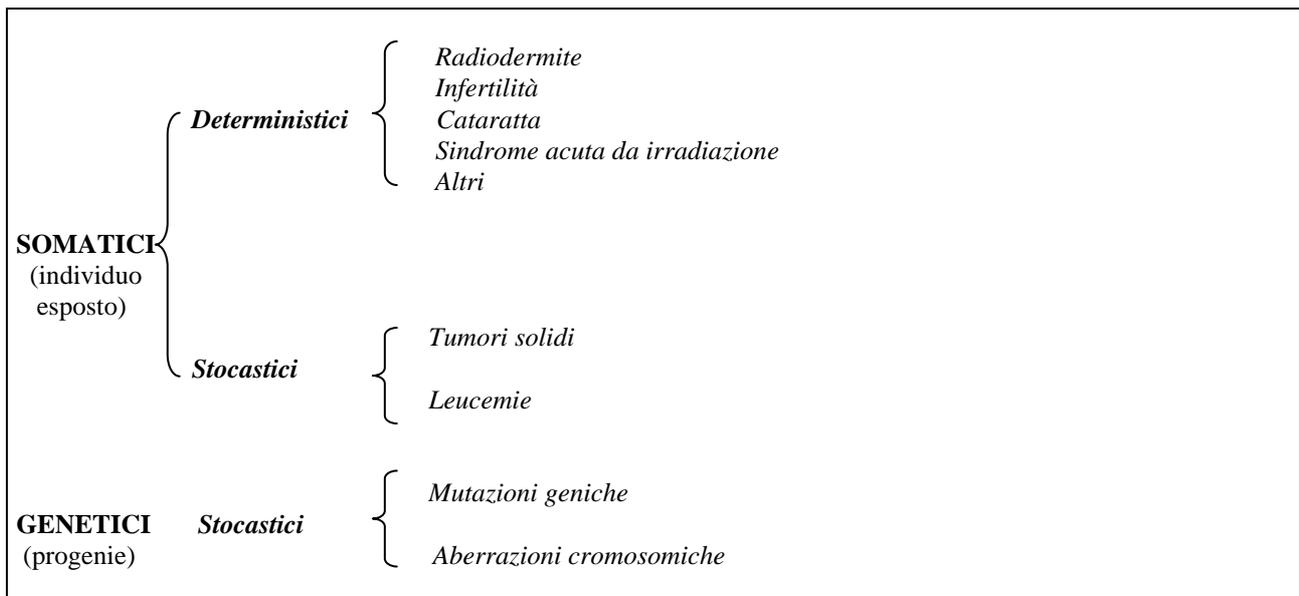
## EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

I danni prodotti dalle radiazioni ionizzanti sull'uomo possono essere distinti in tre categorie principali (Tab. 4) :

- a) danni somatici deterministici;
- b) danni somatici stocastici;
- c) danni genetici stocastici.

Tab. 4

*Classificazione dei danni da radiazioni ionizzanti*



### **Danni somatici deterministici**

Questo tipo di danno, che trova nella morte cellulare la causa prima della sua comparsa, comprende quello la cui frequenza e la cui gravità variano con la dose e per il quale è individuabile una dose-soglia. In particolare, i danni deterministici hanno in comune le seguenti caratteristiche:

- 1) compaiono soltanto al superamento di una dose-soglia caratteristica di ogni effetto;
- 2) il superamento della dose-soglia comporta l'insorgenza dell'effetto in tutti gli irradiati, sia pure nell'ambito della variabilità individuale; il valore della dose-soglia è anche funzione di altri parametri, ad esempio della distribuzione temporale della dose (in caso di esposizioni protratte la soglia si eleva secondo un "fattore di protrazione");
- 3) la relazione dose effetto non è lineare, ma ha un andamento sigmoide;
- 4) il periodo di latenza è solitamente breve (qualche giorno o qualche settimana); in alcuni casi l'insorgenza è tardiva (qualche mese, alcuni anni);
- 5) la gravità delle manifestazioni cliniche, spesso relativamente specifiche, aumenta con l'aumentare della dose. Entro certi limiti gli effetti sono reversibili.

Di grande importanza radioprotezionistica sono al riguardo i valori soglia per i danni deterministici a carico di alcuni organi per l'esposizione singola di breve durata e per l'esposizione protratta e frazionata, sia annuale che totale (Tab.5).

Tab. 5

*Soglie indicative di dose per alcuni danni deterministici nell'adulto (ICRP 41/84 e 60/90)*  
(N.A. indica "non applicabile" in quanto la soglia dipende dall'intensità di dose più che dalla dose totale)

Tessuto ed effetto	Esposizione acuta (in Sy)	Esposizioni fortemente frazionate o protratte (in Sy)	Esposizioni fortemente frazionate o protratte per molti anni (in Gy/y)
<b>Testicoli</b>			
- Sterilità temporanea	0,15	N.A.	0,4
- Sterilità permanente	3,5-6,0	N.A.	2,0
<b>Ovaie</b>			
Sterilità	2,5 – 6,0	6,0	> 0,2
<b>Cristallino</b>			
- Opacità appena osservabili	0,5 – 2,0	5,0	> 0,1
- Deficit visivo (cataratta)	5,0	> 8,0	> 0,15
<b>Midollo osseo</b>			
-Depressione dell'emopoiesi	0,5	N.A.	> 0,4
- Aplasia mortale	1,5	N.A.	> 1

Oltre alle sedi indicate nella Tabella, anche per le *radiolesioni cutanee* causate da esposizione acuta alle radiazioni ionizzanti è possibile descrivere un quadro clinico che comprenda i vari tipi di alterazione cutanea radioindotta con le relative dosi-soglia e gli andamenti evolutivi. Ad esempio, le dosi soglia per i primi effetti (eritema, epilazione) sono individuati per dosi di almeno 3-4 Gy.

Per quanto riguarda l'irradiazione frazionata della cute, merita precisare in via indicativa che le dosi-soglia per ulcerazioni e fibrosi cutanee a 5 anni dal trattamento radioterapico con raggi X o radiazioni  $\gamma$  (campo 100 cm<sup>2</sup>) sono state stimate come segue:

- dose che causa l'effetto in 1-5% dei pazienti: 55 Gy;
- dose che causa l'effetto in 25-50% dei pazienti: 70 Gy.

Nell'irradiazione cronica della pelle (soprattutto in corrispondenza delle mani) l'esperienza clinica, acquisita soprattutto nella "fase eroica" della radiologia, ha dimostrato che sono necessarie dosi di qualche decimo di gray alla settimana e per lunghi periodi (molti mesi, anni) per causare una radiodermite cronica ("cute del radiologo").

Questa radiolesione cutanea è caratterizzata da cute secca e sottile, con verruche, ispessimenti irregolari dello strato corneo (ipercheratosi), dilatazione dei capillari venosi (telangiectasie), alterazioni delle unghie (onicopatia), stentata riparazione delle piccole ferite cutanee. In una frazione dei casi dopo molti anni può comparire un tumore (epitelioma) nell'ambito delle suddette alterazioni cutanee.

Un ulteriore riferimento a livello cutaneo è rappresentato dal fatto che alterazioni delle arteriole e venule dello strato inferiore della pelle (vasi dermici), sono svelabili, in assenza di segni clinici a carico della cute, con metodi diagnostici microscopici (capillaroscopia) soltanto per esposizioni a dosi dell'ordine di 10 - 30 Gy di radiazioni di basso LET accumulate in un periodo di 8 - 25 anni.

Qualora l'irradiazione acuta avvenga al corpo intero o a larga parte di esso (irradiazione globale), viene a determinarsi, per dosi sufficientemente elevate, la cosiddetta *sindrome acuta da irradiazione*.

Questa sindrome è caratterizzata da tre forme cliniche (ematologica, gastrointestinale e neurologica) progressivamente ingravescenti che sopravvivono in funzione delle rispettive dosi-soglia (Tab. 6). Significato di rilievo deve essere attribuito alle dosi che determinano morte nel 5% dei casi (DL<sub>50%</sub>) o nel 100% dei casi (DL<sub>100%</sub>).

Tab. 6

*Dosi di comparsa e valutazioni prognostiche delle tre forme di sindrome acuta da irradiazione*

• <b>Forma ematologica</b>	0,25 Gy Sopravvivenza virtualmente certa
	1 Gy soglia della sindrome ematologica (ospedalizzazione)
	2 Gy sopravvivenza probabile
	2,5 – 5 Gy sopravvivenza possibile (4,5 Gy DL <sub>50%</sub> )
	>6 Gy sopravvivenza virtualmente impossibile
• <b>Forma gastrointestinale</b>	6 – 7 Gy (DL <sub>100%</sub> )
• <b>Forma neurologica</b>	10 Gy

Nella prima fase della sindrome acuta da irradiazione, particolare attenzione va rivolta all'insorgenza di sintomi prodromici, quali nausea e vomito: la brevità della latenza, l'intensità e la persistenza dei sintomi sono indicative della gravità della prognosi. Il vomito dovuto ad irradiazione compare in genere tra i 20 minuti e le 3 ore dopo l'esposizione. Qualora i sintomi dovessero insorgere oltre le prime 5-6 ore dall'esposizione è poco probabile che siano di natura radiopatologica.

In fase precoce possono comparire anche arrossamento degli occhi (iperemia congiuntivale) per dosi di 1,5 Gy ed oltre, e arrossamento cutaneo (eritema cutaneo), spesso fugace, per dosi di 5 Gy ed oltre.

La diminuzione delle cellule linfocitarie nel sangue circolante (linfopenia) rappresenta un indicatore particolarmente significativo della gravità dell'irradiazione (< 1000/ml= forma grave; < 100/ml= forma probabilmente letale)

L'improvviso e breve aumento delle cellule granulocitarie nel sangue circolante (punta ipergranulocitaria) osservabile nelle prime 24-36 ore, per quanto utile sul piano diagnostico, non riveste la stessa importanza clinico-dosimetrica della linfopenia.

Nel periodo di stato della forma *ematologica* (cioè nella fase conclamata della malattia) il quadro clinico è dominato da stato febbrile, infezioni ( sostanzialmente sostenute dalla neutropenia) ed emorragie (per la piastrinopenia).

Nella forma *gastrointestinale* prevalgono vomito, diarrea, squilibrio elettrolitico, febbre ed emorragie digestive. Nella forma *neurologica* sono presenti offuscamento della coscienza (obnubilamento del sensorio), disorientamento, convulsioni.

Le *opacità del cristallino* indotte dalle radiazioni ionizzanti rappresentano un tipico effetto deterministico tardivo (la latenza è in genere di alcuni anni per dosi non elevate). Merita precisare al riguardo che viene chiamata *cataratta* una qualsiasi opacità del cristallino sufficiente a provocare una diminuzione della vista.

Si ricorda che il tipo di cataratta normalmente attribuita alle radiazioni ionizzanti (varietà corticale subcapsulare posteriore) può essere causata anche da molti altri fattori quali radiazioni infrarosse, radiofrequenze, ultrasuoni, sorgenti luminose di alta intensità, elettrocuzione, fattori chimici e farmacologici (per es. dinitrofenolo, naftalene, cortisonici, ecc.) e non rappresenta quindi un quadro clinico patognomonico.

### **Danni somatici stocastici**

Indagini radiobiologiche ed epidemiologiche estese hanno dimostrato al di là di ogni dubbio l'esistenza di una correlazione tra esposizione alle radiazioni ed induzione oncogena. Numerose sono le serie epidemiologiche studiate, in particolare è necessario citare quella dei pittori di quadranti luminosi, dei minatori esposti al radon, dei pazienti affetti da spondilite anchilosante o dei bambini con tinea capitis trattati con radiazioni, dei radiologi americani ed inglesi e, soprattutto, dei sopravvissuti giapponesi alle esplosioni nucleari di Hiroshima e Nagasaki. Questi ultimi rappresentano tutt'oggi il gruppo più studiato e dal quale sono provenuti i più attendibili risultati anche in merito alla correlazione quantitativa tra dose e probabilità di induzione oncogena.

I meccanismi alla base della comparsa di una neoplasia sono certamente molto complessi e tali da non poter essere trattati in questa sede. Inoltre, anche per quanto riguarda le ipotesi circa i meccanismi del danno genetico indotto dalle radiazioni (singolo o doppio "urto") oppure il tipo di lesioni al DNA (rottture di catene singole e rottture di catene doppie) esistono ancora alcuni problemi interpretativi che sono tuttora oggetto di ricerca.

In ogni caso, l'effetto finale è rappresentato dalla comparsa, in termini di eccesso di rischio, di neoplasie (leucemie e tumori solidi), effetto a cui in radioprotezione è stato assegnata la denominazione di danno stocastico in quanto colpisce a caso gli esposti. In questa patologia soltanto la probabilità d'accadimento, e ovviamente non la gravità, è funzione della dose.

Danni di questo tipo hanno in particolare le seguenti caratteristiche (Tab. 8):

- a) sono a carattere probabilistico;
- b) sono distribuiti casualmente nella popolazione esposta;
- c) sono dimostrati dalla sperimentazione radiobiologica e dall'evidenza epidemiologica a dosi elevate (associazione causale statistica);
- d) la probabilità di comparsa aumenta con l'aumentare della dose;
- e) si manifestano dopo anni, talora decenni, dall'irradiazione;
- f) non mostrano gradualità di manifestazione con la dose ricevuta, ma sono del tipo "tutto o niente", quale che sia la dose;
- g) sono indistinguibili dai tumori indotti da altri cancerogeni.
- h) non richiedono il superamento di un valore-soglia di dose per la loro comparsa (ipotesi cautelativa ammessa per i soli gli scopi preventivi della radioprotezione);

Come precisato al punto h), per i danni stocastici è ammessa in radioprotezione in via cautelativa una relazione dose-effetto di tipo lineare con estrapolazione passante per l'origine delle coordinate (assenza di soglia).

L'elaborazione della relazione dose-effetto è avvenuta nel corso degli anni sulla base di osservazioni epidemiologiche che riguardano esposizioni a dosi medio-alte (sopravvissuti giapponesi alle esplosioni atomiche, pazienti sottoposti ad irradiazioni per scopi medici, esposizioni lavorative).

I dati epidemiologici sono abbastanza numerosi per le alte dosi, sono piuttosto rari per le dosi medie e mancano per le piccole dosi (*zona muta*, dosi inferiori a circa 0,2 Gy).

L'assenza di evidenza epidemiologica alle basse dosi può essere correlata alla possibile inesistenza degli effetti radioindotti, oppure al "mascheramento" degli stessi che, pur presenti, non sono individuabili perché confusi nelle fluttuazioni statistiche dell'incidenza "naturale" o "spontanea" dei tumori.

Pertanto, per i soli fini della radioprotezione, in particolare per definire i criteri di applicazione ed i relativi limiti delle misure preventive da adottare (esaminate successivamente nel paragrafo sulla dottrina della Radioprotezione) la stima del rischio di ammalare di leucemia o di altri tumori radioinducibili viene abitualmente effettuata estrapolando linearmente i dati delle alte alle basse dosi.

L'ultima stima del rischio connesso con l'esposizione alle radiazioni ionizzanti, come detto, è stata elaborata prevalentemente sulla base degli studi epidemiologici eseguiti sui sopravvissuti giapponesi alle esplosioni atomiche di Hiroshima e Nagasaki. Questa stima porta a ritenere che, sempre per i soli fini della radioprotezione, debba essere considerata una probabilità di incorrere in un tumore mortale pari a 5 casi ogni 100 persone del pubblico esposte alla dose di 1 sievert, e di 4 casi ogni 100 lavoratori esposti alla stessa dose (coefficienti di probabilità di morte pari rispettivamente a  $5 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$  per il pubblico e  **$4 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$  per i lavoratori** – ICRP 60).

La risposta stocastica all'irradiazione non è immediata, ma come accennato, è necessario considerare un periodo minimo di risposta clinicamente silente (latenza), seguito da un periodo a rischio, in cui è attesa la comparsa dei tumori radioindotti.

Per tutte le forme di leucemia (esclusa la leucemia linfatica cronica per la quale manca la dimostrazione radioepidemiologica) e per il cancro osseo i dati epidemiologici indicano che l'incidenza ha un andamento temporale ad onda con inizio dopo circa 2 anni dall'esposizione e con un picco dopo 5 - 8 anni, seguito da un lento decremento fino al ritorno verso i valori dell'incidenza "naturale" entro 30 anni o meno dall'irradiazione.

Per il tumore della tiroide (prevalentemente papillare) è stato osservato, in seguito all'incidente di Chernobyl, un inizio dopo 3-4 anni ed un tempo di latenza medio di 7 anni nella popolazione tra 0 e 11 anni, tempi almeno dimezzati rispetto a quelli osservati in passato dopo irradiazioni terapeutiche.

Per le restanti "sedi" tumorali è stato stabilito un tempo minimo di risposta (latenza) di 5 anni seguito da un graduale e lento incremento della probabilità di comparsa fino a 10 anni e da un incremento costante, sempre in termini probabilistici, nel periodo successivo. Il periodo a rischio deve essere cautelativamente considerato esteso a tutta la comune durata della vita.

Un ultimo aspetto che va considerato è che non tutti gli individui reagiscono alla stessa maniera nei confronti della noxa radiogena. Certamente la caratteristica preminente degli effetti delle radiazioni ionizzanti a basse dosi ha evidentemente a che vedere con la variabilità individuale che può facilitare o contrastare l'insorgenza del tumore. Questa diversa suscettibilità individuale all'induzione oncogena dipende da vari elementi tra cui i più importanti sono quelli di natura ereditaria. Di questo aspetto pertanto si dovrà tenere particolare conto in vista per esempio di una attività lavorativa comportante esposizione alle radiazioni ionizzanti.

## **Danni genetici**

L'azione mutagena delle radiazioni fu evidenziata nel 1927 sul moscerino della frutta, organismi caratterizzati da solo 4 cromosomi, da intensa capacità riproduttiva e da una veloce successione generazionale; su di loro 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, 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.

Di contro 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 fatto evidenziare effetti genetici alla prima generazione.

Per quanto non sia stato dimostrato a tutt'oggi nella specie umana che le radiazioni ionizzanti possono produrre danni ereditari, tuttavia, 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.

Il rischio genetico nell'uomo viene pertanto calcolato per estrapolazione partendo dalle sperimentazioni sugli animali da laboratorio. In base a tale criterio, per i fini della radioprotezione, si assume che in tutte le generazioni future vi sia la probabilità di comparsa di effetti genetici di 1,33 ogni 100 nati vivi per ogni sievert di radiazione ricevuta dai genitori. Si suppone altresì che vi sia una correlazione lineare e senza soglia tra comparsa di tali effetti e dose ricevuta dai genitori.

## **Irradiazione in utero (embrione e feto)**

L'embrione e il feto sono sensibili alle radiazioni ionizzanti e, come avviene anche nell'esposizione agli altri agenti fisici e ad agenti chimici, questa sensibilità è variabile in funzione dello stadio di sviluppo.

*Prima dell'impianto dell'embrione* (nella specie umana al 9° giorno dalla fecondazione) gli effetti di una irradiazione sono del tipo "tutto-o-nulla". Questi effetti possono determinare infatti la morte dell'embrione (questo evento può passare inosservato) o, in alternativa, non avere conseguenze sullo sviluppo e sulla sopravvivenza postnatale che possono quindi risultare del tutto normali (nello stadio di pre-impianto la morte di una o di alcune cellule, non ancora differenziate, può non essere grave).

*Nel periodo di morfogenesi*, compreso tra il 9° giorno e la fine del 2° mese di gravidanza, si formano gli abbozzi dei vari organi e tessuti. In corrispondenza della fase di differenziazione e di organizzazione di ciascun tessuto è presente una elevata radiosensibilità e in questa fase l'irradiazione può indurre più facilmente la comparsa di malformazioni (teratogenesi).

*Durante la fase fetale* (dall'inizio del 3° mese fino al termine della gravidanza) la frequenza e la gravità delle malformazioni diminuiscono, mentre risulta rilevante il rischio di uno sviluppo difettoso delle funzioni superiori del sistema nervoso centrale, che resta radiosensibile per una buona parte di questo periodo. L'insieme delle osservazioni sull'uomo, e precisamente i dati di Hiroshima e Nagasaki, mostrerebbero che la sensibilità alle radiazioni ionizzanti del cervello del feto è massima tra l'8<sup>a</sup> e la 15<sup>a</sup> settimana dal concepimento. Durante questo periodo, i neuroblasti si moltiplicano in maniera esponenziale e migrano nella sede corticale definitiva. Una irradiazione può interferire con questi complessi meccanismi evolutivi e quindi determinare deficit cognitivi. La sensibilità del sistema nervoso è minore di circa 4 volte tra la 16<sup>a</sup> e la 25<sup>a</sup> settimana dal concepimento ed è trascurabile o assente prima dell'8<sup>a</sup> settimana e dopo la 25<sup>a</sup> settimana.

In breve, malgrado che la sensibilità dell'embrione e del feto all'irradiazione sia sempre presente (in gradi molto variabili) durante tutto il periodo di gestazione, lavori scientifici recenti confermano che il danno principale può essere il ritardo mentale.

Nell'uomo la soglia degli effetti di natura deterministica sull'organogenesi (malformazioni), calcolata sulla base dei dati ottenuti sugli animali da esperimento, è stata stimata intorno 0,1 Gy. Per quanto riguarda il ritardo mentale, non dovrebbe essere apprezzabile alcun effetto sul quoziente di intelligenza per dosi dell'ordine di 0,1 Sv.

Nel periodo compreso tra la terza settimana dal concepimento e la fine della gestazione appare probabile che l'esposizione alle radiazioni possa determinare effetti stocastici che si esprimono come aumento della probabilità di neoplasie (soprattutto leucemie) in epoca post-natale. I dati disponibili, provenienti soprattutto da studi sulle madri sottoposte ad esami radiodiagnostici in gravidanza, non sono univoci e sussistono notevoli incertezze interpretative. Alcuni di questi studi disponibili, non confermati dai dati di Hiroshima e Nagasaki, dimostrerebbero un aumento di circa il 40% (RR 1.4) della probabilità di comparsa di leucemie in bambini nati da madri esposte in gravidanza a dosi addominali di alcune decine di millisievert. Altri studi, metodologicamente migliori, suggeriscono però che tale rischio sia più basso.

In ogni caso tutte queste indicazioni rappresentano un determinante elemento che spinge verso l'adozione di criteri estremamente cautelativi nell'esposizione, sia per motivi lavorativi che per motivi sanitari, delle donne in gravidanza.

### **LA DOTTRINA DI RADIOPROTEZIONE**

Si è detto più sopra che per i fini della radioprotezione si assume che anche dosi basse e prossime allo zero possano determinare degli effetti di tipo stocastico. Su questa supposizione è stata impostata la filosofia di radioprotezione a partire dagli anni '70. Si è pertanto iniziato con il dichiarare la lotta al rischio indebito, per passare al così detto principio *ALARA* (acronimo dalle parole inglesi *As Low As Readily Achievable*) secondo cui la dose deve essere mantenuta tanto bassa quanto è concretamente ottenibile tenendo conto degli aspetti economici e sociali, e giungere infine al *Sistema di protezione radiologica* basato su tre principi fondamentali:

- giustificazione delle attività comportanti esposizione alle radiazioni (*principio di giustificazione*),
- ottimizzazione della protezione al fine di ottenere il massimo vantaggio (*principio di ottimizzazione*),
- rispetto dei limiti di dose individuale (*principio di limitazione*).

Questi principi che sono andati affermandosi e perfezionandosi gradatamente nel corso degli anni, si sono oggi imposti anche all'attenzione del legislatore che li ha introdotti in testa (art.2) al Decreto Legislativo 230/95, che detta le norme di prevenzione e protezione nell'impiego delle radiazioni ionizzanti nel nostro Paese. I tre principi vengono così enunciati nel Decreto citato:

- a) i tipi di attività che comportano esposizione alle radiazioni ionizzanti debbono essere preventivamente giustificati e periodicamente riconsiderati alla luce dei benefici che da essi derivano;
- b) le esposizioni alle radiazioni ionizzanti debbono essere mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali;
- c) la somma delle dosi ricevute e impegnate non deve superare i limiti prescritti.

Mentre il procedimento di giustificazione è essenzialmente finalizzato ad orientare nelle diverse scelte ed ha pertanto il significato di ausilio decisionale politico-valutativo nelle opzioni iniziali, gli altri due principi hanno un interesse concreto nelle attività operative quotidiane. Il principio di ottimizzazione è lo strumento che consente di contemperare le esigenze di produzione con quelle della prevenzione, portando a valori di dose per la popolazione e per i lavoratori di norma assai più bassi dei limiti stabiliti dal terzo principio. Il principio di limitazione rappresenta lo spartiacque tra l'inaccettabilità e la tollerabilità di un valore di dose al di sotto del quale si collocano i valori accettabili dopo l'applicazione del principio di ottimizzazione.

Come noto, tali limiti non hanno il significato di un limite invalicabile di dose, dal momento che il superamento di tali limiti in certe particolari condizioni è consentito, e dal momento che sono cautelativamente fissati ad almeno un ordine di grandezza inferiore rispetto alle soglie di induzione di effetto conosciute. Nella tabella 7 sono riportati per i lavoratori e la popolazione i limiti in questione.

Tab. 7  
Limiti di dose

<b>Lavoratori</b>	<b>Limiti</b>
Dose efficace (ora: Equivalente di dose efficace)	20 mSv/anno
Dose equivalente	150 mSv/anno al cristallino. 500 mSv/anno alla pelle (dose media su 1 cm <sup>2</sup> ). 500 mSv/anno alle estremità (mani, avambracci, caviglie, piedi).
<b>Popolazione</b>	<b>Limiti</b>
Dose efficace	1 mSv/anno
Dose equivalente	15 mSv/anno al cristallino. 50 mSv/anno alla pelle. 50 mSv/anno alle estremità.

Oltre che sui tre principi sopra brevemente illustrati, la radioprotezione è fondata anche su tre strumenti operativi previsti espressamente dalla legislazione:

- la sorveglianza fisica,
- la sorveglianza medica,
- la vigilanza.

In queste note vengono trattati solo alcuni aspetti relativi alla sorveglianza medica.

### **Sorveglianza medica della radioprotezione**

La sorveglianza medica deve intendersi finalizzata:

- alla analisi dei rischi individuali connessi alla attività lavorativa;
- alla verifica della compatibilità dello stato di salute del lavoratore, valutato opportunamente, con le specifiche condizioni di lavoro;
- alla diagnosi (precoce) di una malattia professionale o presunta tale, anche attraverso il confronto con i suddetti dati di riferimento, ed all'attuazione dei relativi interventi medico-legali;
- alla messa in atto degli interventi diagnostici e terapeutici a seguito di situazioni lavorative incidentali che abbiano comportato una esposizione esterna o una contaminazione interna rilevanti (la normativa in vigore individua questa soglia per dosi efficaci superiori a 20 mSv);

In conformità al D.Lgs. 230/95 scopo primario della sorveglianza medica dei lavoratori radioesposti è appunto la *valutazione dello stato generale di salute* confrontato con le *condizioni di lavoro* che possono incidere, sotto il profilo sanitario, *sull'idoneità al lavoro specifico*. Essa viene affidata esclusivamente al medico autorizzato (medico competente che ha superato uno specifico esame nazionale) per gli esposti di categoria A e al medico autorizzato o al medico competente per gli esposti di categoria B.

Le attività da porre in atto (direttamente o indirettamente) che la legislazione pone in carico al medico radioprotezionista sono:

- le visite mediche (preventiva, periodica, straordinaria, eccezionale);
- gli accertamenti integrativi (laboratoristici e strumentali);
- le visite specialistiche;
- i giudizi di idoneità, valutativi dello stato di salute e della compatibilità lavorativa in presenza del rischio specifico da radiazioni ionizzanti.
- gli atti di natura medico-legale.

Al riguardo va precisato che fare medicina del lavoro vuol dire, tra l'altro, mantenere e promuovere la salute delle persone sane che lavorano attraverso criteri e procedimenti sanitari che possono essere diversi da quelli seguiti nella

medicina clinico-assistenziale. Quest'ultima infatti ha come punto di partenza sintomi o segni morbosi e come scopo finale il recupero della salute in coloro che l'hanno perduta. Gli strumenti di cui sopra sono invece mirati alla precoce evidenziazione di alterazioni dello stato di salute, già presenti o subentranti, connesse (o meno) con l'attività lavorativa, onde prevenire o limitare, con una diagnosi precoce, ulteriori conseguenze sanitarie. A tal fine, come per qualunque altro rischio lavorativo, accanto al profilo diagnostico di base dello stato generale di salute del lavoratore è necessario individuare, attraverso una valutazione della *radiopatologia attesa*, gli ulteriori aspetti clinici coerenti con la sorveglianza medica della radioprotezione.

In relazione a ciò il medico deve pertanto confrontarsi con i due grandi capitoli della radiopatologia in precedenza definiti: danni deterministici (graduati a soglia) e i danni stocastici (probabilistici).

Per i primi è possibile attuare una prevenzione totale, mantenendo le dosi a livelli inferiori alla dose soglia; per i secondi, avendo ammesso ai fini della radioprotezione una relazione di causalità lineare senza soglia tra probabilità di manifestazione dell'effetto e dose, si può ipotizzare soltanto la limitazione della probabilità.

Nella scelta degli accertamenti diagnostici (e dei relativi tempi di effettuazione) per i danni deterministici non si può prescindere dal confronto tra dati dosimetrici comunemente osservati (molto spesso ben al di sotto dei limiti di dose previsti dalla normativa) e le specifiche soglie di dose riportati nella già riportata tabella 7.

Da tale confronto appare evidente la scarsa probabilità di insorgenza, nelle comuni condizioni di esposizione professionale, di eventuali danni deterministici, in quanto questi sono connessi al superamento di soglie di dose di entità elevata. In ogni caso in tale evenienza, ed anche nella sola ipotesi di sospetta esposizione ad alti livelli di dose, deve essere attuata da parte del medico autorizzato la sorveglianza medica eccezionale.

Da quanto detto si evince che, date le dosi normalmente in gioco nelle attività lavorative attuali, le esposizioni in grado di dar luogo ad effetti deterministici sono estremamente improbabili. Il problema centrale della sorveglianza medica della radioprotezione è rappresentato quindi oggi dal danno stocastico. Poiché, come detto, tale danno (leucemie e tumori solidi) è aspecifico, a comparsa casuale e tardiva nella popolazione esposta, ne consegue che il medico dovrà confrontarsi non soltanto con gli ipotetici casi di tumore in eccesso dovuti all'irradiazione professionale, ma di fatto con i tumori cosiddetti "spontanei" o "naturali", che si presentano nella comune popolazione, i cui tassi di mortalità sono valutati intorno al 26-28%, ma i cui tassi di incidenza sono decisamente maggiori (in relazione di parametri quali il sito e l'istotipo del tumore, la disponibilità e la efficacia di strumenti per la diagnosi precoce e per il trattamento terapeutico).

A questo punto, e per le finalità esplicitate, è necessario per il medico radioprotezionista definire i criteri di impostazione del protocollo di sorveglianza medica orientata in senso oncopreventivo, che dovrà permettere di controllare efficacemente lavoratori esposti, per motivi professionali, a r.i., tra i quali è lecito attendersi, in normali condizioni lavorative, frequenze di osservazioni pari, se non addirittura inferiori (healthy worker effect), a quelle della popolazione generale dello stesso sesso e fascia di età. E' necessario quindi rispondere alle domande "per quali neoplasie", "con quali strumenti diagnostici", ma anche "su chi ed in che modo" fare oncoprevenzione secondaria, al fine di "giustificare" la applicazione di tali protocolli in questo specifico ambito lavorativo.

In questa valutazione devono certamente essere considerati tutti gli elementi scientifici a disposizione, ma non può evidentemente essere trascurata una realistica valutazione, in termini di rapporto costo-beneficio, dei vantaggi che possano derivare dalla applicazione di tali protocolli, in relazione soprattutto alla incidenza "naturale" (talora numericamente molto limitata) di alcune neoplasie.

In ultimo non sono da trascurare le "preoccupazioni giudiziarie" del Medico radioprotezionista circa la qualità del suo operato (in particolare nella scelta dei protocolli sanitari), che dovrà essere valutato in rapporto ad una scala di valori che divide una attività parsimoniosa ma sufficiente da una inutile se non addirittura omissiva.

Alla luce di quanto detto, appare ragionevole un approccio al problema che si basi su fondamenti scientifici quanto più solidi e provati, ma non tralasci di considerare le reali opportunità operative.

Per quanto riguarda tale protocollo, il programma dovrà quindi essere mirato allo studio dei siti di maggiore interesse oncologico, secondo le priorità indicate nelle scale di radioinducibilità dei tumori che sono state elaborate da vari organismi scientifici internazionali (ICRP, UNSCEAR, BEIR) (tab.8). Tale scelta dovrà però essere necessariamente confrontata con la valutazione di incidenza e mortalità per le varie forme di neoplasia nelle diverse sedi geografiche.

Per quanto riguarda i lavoratori esposti, particolare attenzione (in termini di priorità operative) dovrà essere rivolta ai soggetti che, sulla base della storia anamnestica personale e familiare e dello stato clinico (in futuro anche sul riconoscimento di una predisposizione genetica) possono essere considerati a maggiore probabilità di sviluppo di una neoplasia in quanto rientrano in gruppi a maggior rischio (se esistenti) per le forme tumorali radioinducibili.

Nella scelta dei test di screening da praticare, infine, dovranno essere considerati gli aspetti legati alla loro sensibilità e specificità per le forme iniziali, alla invasività, al beneficio prognostico derivante dalla diagnosi precoce, ai loro costi.

Tab. 8

Coefficienti di probabilità di morte ( $10^{-4}$  Sv<sup>-1</sup>) su tutta la durata della vita in una popolazione di tutte le età a causa di tumori mortali specifici dopo esposizione a basse dosi (ICRP 60/90)

<i>Sito</i>	Coefficiente
Stomaco	110
Polmone	85
Colon	85
Midollo osseo	50
Vescica	30
Esofago	30
Mammella	20
Fegato	15
Ovaio	10
Tiroide	8
Superfici osse	5
Cute	2
Altri tessuti	50

L'insieme degli accertamenti complementari per la sorveglianza medica può essere pertanto così schematizzato:

- protocollo diagnostico di base (informazioni minime significative al fine di valutare l'efficienza di organi ed apparati e la normalità dei metabolismi);
- accertamenti mirati per i danni deterministici sulla base di un realistico confronto tra i dati dosimetrici osservati e soglia di dose dei danni considerati;
- screening di tipo oncopreventivo (scala di priorità in rapporto ai coefficienti di rischio di radioinduzione dei tumori, predisposizione, radiosensibilità individuale, confronti con incidenza/mortalità "spontanea", criteri di scelta dei test di screening);
- esami di approfondimento per le malattie di specifica rilevanza radiopatologica (con invio degli altri casi al medico curante).
- esami di monitoraggio radiotossicologico laddove esista un rischio di contaminazione radioattiva;

Nella pratica operativa particolare attenzione dovrà essere rivolta alla presenza delle seguenti condizioni:

- eventuale esposizione concomitante ad altri agenti genotossici (agenti di natura chimica, virale, farmacologica, etc.);
- lesioni precancerose o condizioni neoplastiche in fase precoce (suscettibili di essere attivate o aggravate dalle radiazioni ionizzanti);
- condizioni patologiche suscettibili di aumentare l'assorbimento di sostanze radioattive o di ridurre l'efficacia dei meccanismi fisiologici di depurazione o escrezione, con esclusivo riferimento alle esposizioni ragionevolmente ipotizzabili nello specifico contesto lavorativo;
- condizioni patologiche che potrebbero ostacolare o ridurre l'efficacia di indagini diagnostiche o di trattamenti terapeutici, in caso di contaminazioni e/o di irradiazioni accidentali, con esclusivo riferimento agli incidenti ragionevolmente ipotizzabili nello specifico contesto lavorativo;
- preesistenza di condizioni patologiche a carico dei tessuti, organi o sistemi che potrebbero in seguito essere attribuite con ragionevole probabilità all'attività lavorativa con radiazioni ionizzanti, sempre tenuto conto dell'effettiva esposizione.

In tale contesto, la sorveglianza medica della radioprotezione dev'essere fondata sui principi e sui metodi della medicina del lavoro applicati al rischio specifico, tenuto conto delle sue modalità e dei mezzi di protezione ambientale e personale, cioè delle concrete situazioni di esposizione lavorativa che si realizzano nei singoli casi.

In condizioni di lavoro normale, restando cioè al di fuori di possibili esposizioni accidentali che richiedono interventi diagnostico-terapeutici e valutativi del tutto particolari e plurispecialistici, al medico autorizzato e/o competente spetta il compito di *personalizzare la radioprotezione* assicurando a ciascun individuo, nella sua peculiarità clinica e lavorativa, un adeguato grado di protezione.

## **Aspetti operativi della Sorveglianza medica**

### **Il Documento Sanitario Personale**

Il D.Lgs 241/00 ha modificato il vecchio modello del Documento Sanitario Personale (DSP), di cui al DM 449/91, con l'obbligo di registrazione di una serie di nuove informazioni. La novità sostanziale è però contenuta nella impostazione che viene data a tale documento che, nelle intenzioni ministeriali, dovrebbe soddisfare le esigenze documentali previste dalla normativa relativa sia alla sorveglianza medica della radioprotezione (D.Lgs 230/95-241/00), sia alla sorveglianza sanitaria per gli altri rischi professionali (D.Lgs 626/94-242/96). Da tale impostazione discendono infatti le informazioni richieste circa la esposizione ad altri fattori di rischio, ma soprattutto la possibilità di esprimere un doppio giudizio di idoneità utilizzando la stessa documentazione.

Sono alcuni anni ormai che si è raggiunta una sostanziale unanimità di opinioni circa la necessità di unificare le attività di sorveglianza sanitaria, poiché l'uomo (lavoratore) è unico e non può essere scomposto in termini di idoneità a rischi diversi. In tal senso vengono accolti con favore gli sforzi che il legislatore ha voluto produrre per avviare il processo di integrazione della documentazione relativa alla sorveglianza sanitaria per il rischio R.I e per gli altri rischi. Tale processo incontra però, nelle differenze delle vigenti normative, un importante ostacolo che rende complessa, allo stato attuale, la attuazione degli indirizzi resi espliciti nella stesura dell'allegato XI del D.Lgs 241/00.

In primo luogo, non appare praticabile la ipotesi, peraltro ribadita nella circolare n.5/2001 del Ministero del Lavoro e della Previdenza Sociale del 8.1.2001, dell'utilizzo promiscuo del medesimo DSP da parte di due medici diversi (medico incaricato della RP e medico competente), e ciò per numerosi motivi, alcuni dei quali sono:

1. la responsabilità della istituzione, tenuta, aggiornamento e conservazione del DSP (art.90 comma 1- arresto fino ad 1 mese o ammenda da 0.5 a 3 ML). Essendo infatti il Medico RP responsabile del DSP, sarebbe compito del MC richiedere, quando necessario, il suddetto documento al medico RP. Ma anche il MC è parimenti responsabile della istituzione, aggiornamento e custodia della cartella sanitaria e di rischio di sua competenza (art.17, comma 1 lett.d) del D.Lgs 626/94- arresto fino a 2 mesi o ammenda da 1 a 6 ML). Non sarebbe quindi chiara la attribuzione di responsabilità, soprattutto in caso di manomissione o di smarrimento del documento, ipotesi da non trascurare nel caso di frequenti trasferimenti dello stesso.
2. la gestione pratica della documentazione. Non esistono "parti di propria competenza" da compilare (Circolare citata) se si esclude la sezione dedicata ai giudizi di idoneità; i due medici dovrebbero compilare quindi le varie sezioni "anamnesi", "esame obiettivo" etc. nella stesso spazio ad esse dedicato, in particolare nella visita preventiva, con i problemi che è oltremodo facile intuire.
3. la riservatezza dei dati (citata più volte nei D.Lgs di interesse, oltre che nella L.675/96). Il DSP, infatti, dovrebbe essere trasmesso da un medico all'altro più volte nell'arco dell'anno, con possibilità che non vengano rispettati i vincoli della riservatezza più volte invocati.

Emerge quindi che, allo stato attuale, il DSP potrebbe costituire l'unico documento sanitario solo quando gli incarichi di medico RP e di MC siano ricoperti dalla medesima persona.

Anche a questo caso, però, è bene segnalare la presenza di differenze normative nella gestione della documentazione sanitaria che rendono complessa anche tale operazione. Tali differenze sono riportate schematicamente nel seguente riquadro:

### **DIFFERENZE DI GESTIONE DELLA DOCUMENTAZIONE SANITARIA**

#### **Denominazione ed istituzione:**

**230/95-241/2000:** Documento sanitario personale (art.90), obbligo del Medico RP, sanzionato con l'arresto fino a 1 mese o con ammenda da L.500.000 a 3 ML)

**626/94-242/96:** Cartella sanitaria e di rischio (art. 17 comma 1 lett.d), obbligo del MC, sanzionato con l'arresto fino a 2 mesi o con ammenda da 1 a 6 ML)

#### **Conservazione della documentazione sanitaria**

(dalla cessazione della esposizione fino alla risoluzione del rapporto di lavoro )

**230/95-241/2000:** E' obbligo del Medico RP, attuata per almeno 30 anni dalla cessazione della esposizione (e fino a 75 anni del lavoratore)-(art. 90 comma 3 - arresto fino 1 mese o ammenda da 0.5 a 3 ML).

**626/94-242/96:** cancerogeni e biologici (gruppo 3 e 4):. Obbligo del DL (da 10 e fino a 40 anni per agenti biologici - art.87 comma 4, per 40 anni per cancerogeni - art. 70 comma 3). Presuppone la trasmissione da parte del MC (non espressamente indicata)

Negli altri casi la conservazione rimane obbligo del DL (art.4 comma 8 –ammenda 1-6 ML) per un periodo illimitato (per assimilazione alle cartelle cliniche, ai sensi dell'art 30 DPR 1409/63 e Circolare MS n.61 del 19.12.86), sempre previa trasmissione da parte del MC (non espressamente indicata).

#### **Trasmissione all'ISPESL**

(alla cessazione del rapporto di lavoro)

**230/95-241/2000:** obbligo del Medico RP (art.90 comma 4 – arresto fino 1 mese o ammenda da 0.5 a 3 ML), entro 6 mesi.

**626/94-242/96:** rischi biologico (gruppo 3 e 4 - artt.70 comma 2), cancerogeno (87, comma 3) e chimici (art.72 undecies comma 3): obbligo del DL, previa trasmissione da parte del MC (non espressamente indicata). Non ancora specificati i termini entro i quali effettuarla. Non prevista per rischi diversi da quelli citati.

#### **Consegna copia documentazione sanitaria al lavoratore**

(alla cessazione del rapporto di lavoro)

**230/95-241/2000:** legata all'ultima visita; in ogni caso obbligo del Medico RP (art.90 comma 2 - arresto fino 1 mese o ammenda da 0.5 a 3 ML) Possibilità dell'invio postale (circolare M.Lavoro)

**626/94-242/96:** sempre obbligo del DL (art.4 comma 8 –ammenda 1-6 ML), ovviamente previa trasmissione da parte del MC (non espressamente indicata)

#### **Espressione del giudizio di Idoneità**

**230/95-241/2000:** alla esposizione alle radiazioni ionizzanti (art.84 ed 85, nonché allegato XI, modello C)

**626/94-242/96:** alla mansione specifica (art.16 comma 2) l'allegato XI, modello C indica invece la idoneità alla esposizione ai fattori di rischio.

**Altre difformità:** Visita alla cessazione del rapporto di lavoro, Informazioni su accertamenti successivi:, Prosecuzione sorveglianza san., Notifica cessazione rapporto di lavoro, categorie giudizi di idoneità.

Notevoli appaiono le difficoltà di gestione della documentazione sanitaria in caso di utilizzo dello stesso modello da parte dello stesso medico, a partire dalla diversa denominazione. Alcune di queste difficoltà (ad es. l'obbligo della trasmissione del documento dal Medico RP contemporaneamente all'ISPESL ed al DL) potrebbero essere superate attraverso una attenta organizzazione nella gestione delle attività di radioprotezione, sebbene alcuni passaggi, come ad esempio l'invio di uno stesso documento sanitario ad archivi diversi (ad es. R.I., chimici e cancerogeni) dovrebbero prevedere analoghe organizzazioni anche nelle strutture che gestiscono tali archivi (ISPESL), allo stato attuale non note.

In ultimo, da un punto di vista strettamente giuridico, dall'articolato contenuto nell'allegato XI (art. 8.1 " .....valido anche per i casi di esposizione contemporanea a radiazioni ionizzanti e ad altri fattori di rischio") non si evince l'obbligo di usare un unico documento sanitario per la sorveglianza medica (o sanitaria) in caso di contemporanea esposizione, quanto piuttosto l'autorizzazione all'uso.

Inoltre, sebbene l'art. 90, comma 5 del D.Lgs 230/95 individui il decreto nel quale sarà indicato il modello del documento sanitario personale anche per i casi di esposizione contemporanea ad altri fattori di rischio, del quale si rimane in attesa, l'adozione di tale modello non può (e non deve) essere in contrasto con legislazioni preesistenti (D.Lgs 626/94) che interessano campi diversi.

E' evidente quindi che l'utilizzo dello stesso documento per esposizioni diverse per ora è sostanzialmente impraticabile, e potrebbe far incorrere il medico incaricato (sia esso MC o MA) ed il datore di lavoro in importanti sanzioni.

In conseguenza di ciò non sembra motivo di particolare preoccupazione la presenza dei due giudizi. Il problema viene a cadere con la necessaria adozione di due documenti diversi.

Partendo infatti dal presupposto che il D.Lgs 230/95 riguarda esclusivamente le radiazioni ionizzanti, e quindi la sorveglianza medica deve essere orientata verso i soli rischi da R.I, appare chiaro che la sezione dedicata al giudizio di idoneità agli altri rischi non è di pertinenza del Medico incaricato RP.

In primo luogo, al medico in questione non è richiesta la formulazione di un giudizio di idoneità per rischi diversi da quelli indicati dalle norme che regolano lo specifico settore. In secondo luogo, se la conoscenza degli altri rischi (e la compilazione della sezione relativa, che dovrebbe essere molto articolata) è utile per la possibilità di effetti additivi/sinergici di tali rischi con le R.I., altrettanto non può dirsi per il giudizio di idoneità alla esposizione ai suddetti altri rischi; la conoscenza di tale giudizio, infatti, non comporterebbe sostanziali modifiche nella attività preventiva del medico incaricato RP. In ultimo, in relazione alla trasmissione del giudizio di idoneità, è noto che non esiste per il MC un obbligo alla trasmissione del giudizio di idoneità al Medico RP, né tantomeno esiste l'obbligo della trasmissione di tale giudizio al datore di lavoro ed al lavoratore, se non nei casi di idoneità parziale o inidoneità (art.17 comma 3 D.Lgs 626/94).

Si ricorda infine, come già specificato precedentemente, che la formulazione del giudizio per altri rischi nell'all.XI è difforme da quella indicata nell'art.16 del D.Lgs 626/94 (idoneità alla mansione specifica) e quindi non sembrerebbe comunque idonea a sostituirla.

In conclusione, non esistendo obblighi di compilazione di tutte le sezioni indicate nel modello del DSP, poiché tale obbligo formale, secondo alcuni individuabile nel punto 8.3 dell'all.XI, non può riguardare atti esplicitamente non richiesti dalla legge al medico incaricato RP dai quali il suddetto medico non trae benefici professionali neanche indirettamente, atti infine per i quali non ricorrono, sempre a norma di legge, obblighi di trasmissione, non sembrano esserci ostacoli nell'apporre una barra sullo spazio dedicato al giudizio di idoneità alla esposizione agli altri fattori di rischio da parte del Medico incaricato RP.

### **La PC (probability of causation)**

Per concludere questi brevi cenni sugli aspetti operativi legati alla sorveglianza medica, vanno ricordati anche i risvolti di questa nel campo medico-legale. In caso di comparsa di malattia neoplastica, il MA si trova nella condizione di dover rispondere (o tentare di rispondere) alla domanda: la malattia è stata causata dal lavoro svolto?

Quasi sempre, di fronte a tale quesito, il medico si rende conto di non possedere sufficienti elementi per esprimere un giudizio, e le formule (che spesso si leggono anche nelle perizie dei CTU e che diventano poi parte integrante delle sentenze) sono spesso orientate verso l'assunto che "non si può escludere e quindi si ammette l'ipotesi causale".

In questo caso, certamente in virtù delle caratteristiche di questo peculiare fattore di rischio, sono stati studiati modelli che tentano, su basi rigorosamente scientifiche, di dare una risposta a tale quesito attraverso criteri valutativi probabilistici. In particolare, è stato sviluppato il metodo cosiddetto della P.C. (Probability of Causation), nato nel 1985 dal NIH (USA) che, in estrema sintesi, stima la verosimiglianza che un tumore insorto in un esposto a r.i. sia correlabile con l'esposizione stessa.

Tale metodologia, già applicata nel diritto americano, si basa certamente sulla accettazione dell'ipotesi lineare senza soglia, ma il criterio generale adottato è quello della "miglior stima" ovvero del "miglior giudizio scientifico possibile" e non già quello conservativo del limite superiore, proprio degli standard di radioprotezione. Tutto l'impianto si fonda sulla elaborazione di dati radiobiologici ed epidemiologici in modo che, attraverso modelli matematici, sia possibile correlare in maniera quantitativa tali effetti con l'esposizione, attraverso coefficienti di rischio specifici per sesso, età alla esposizione, periodo di latenza, età alla diagnosi, consentendo così di effettuare valutazioni "personalizzate" del rischio e fornendo pertanto una chiave interpretativa "a posteriori" per risalire ad una possibile associazione causale di una patologia neoplastica.

Attraverso i processi di calcolo, il sistema esprime quindi, in termini di probabilità di causa, una stima percentuale. Maggiore sarà tale valore, maggiore sarà la probabilità che il tumore osservato possa riconoscere tra le sue cause determinanti le radiazioni ionizzanti. La PC pertanto è una sorta di valore indicativo della forza del legame (causale) tra esposizione pregressa e patologia riscontrata, e rappresenta certamente oggi il più valido strumento di ausilio al medico autorizzato per una più corretta valutazione del nesso di causalità e quindi per la giustificazione della trasmissione (o della omissione di trasmissione) dei referti e delle comunicazioni che rientrano tra gli obblighi dei medici radioprotezionisti.