"El documento original contiene páginas en mal estado"

FIGURA 3.1 Trayectoria de las pariculas alfa (a) y beta (b) en x medio.

Las partículas beta, así denominadas para indicar el origen nuclear, son eléctrones (beta menos) y positrónes (beta más). Estos últimos son particulas identicas al electrón, excepto en la señal de la carga eléctrica, que es positiva. Una partícula beta es más penetrante, produce una densidad de ionización menor y posee un alcance mayor que una particula alfa de la misma energía.El alcance de una particula beta de 3 MeV es, respectivamente, 1260, 1,50 y 0,56 cm en el aire, en el tejido humano y en el aluminio.En virtud de su pequeña masa, la trayectoria de las particulas beta es desordenada. La figura 3.1 ilustra la trayectoria y la densidad de ionización de las paticulas alfa y beta.

Las partículas beta emitidas por el Potasio-40, Estroncio-90 y Cesio-137 pueden penetrar solamente cerca de 0,5 cm en el tejido humano. Para blindar las particulas beta se puede utilizar una placa de aluminio de pocos milimetros de espesor.

Los neutrones son partículas sin carga y no producen ionización directamente, transfiriendo energía para otras particulas que, a su vez pueden ionizar. Los neutrónes son penetrantres y pueden ser blindados con materiales ricos en hidrógeno, por ejemplo la parafina y el agua. Los neutrónes son encontrados en abundancia en las inmediaciones de los elementos de combustión, en el interior de los reactores nucleares.

RADIACION ELECTROMAGNETICA.

Las ondas electromagnéticas están constituidas de campos eléctricos y magnéticos oscilantes (perpendiculares entre sí) que se propagan en el vacio con velocidad constante, igual a 300 mil km /s.

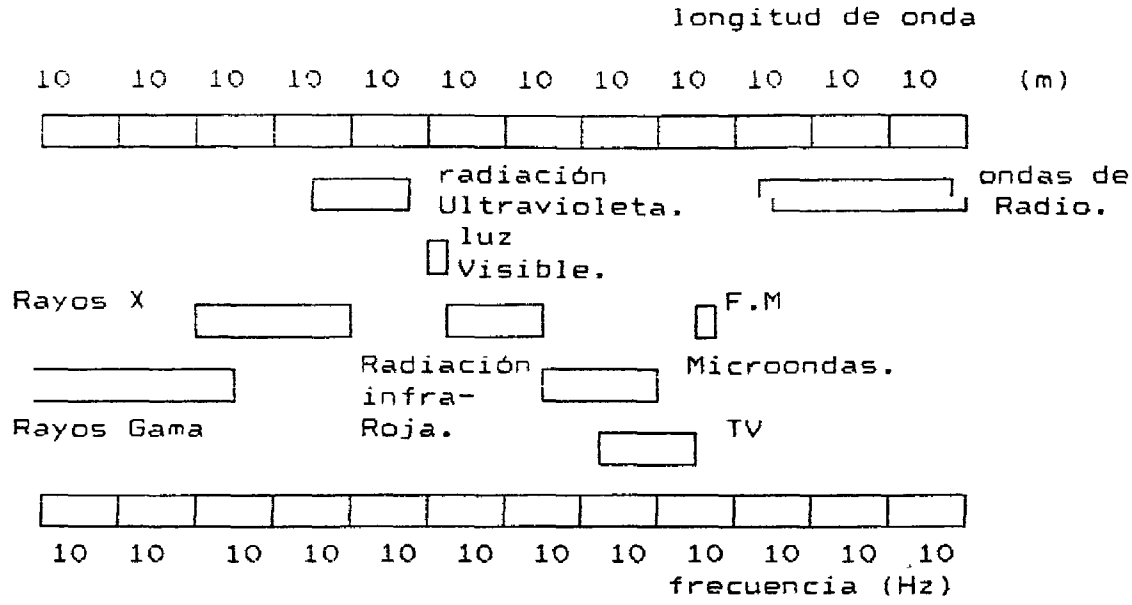

FIGURA.3.2 Espectro de ondas electromágneticas.

es igual a la velocidad de la luz. Son ejemplos de ondas electromágneticas las ondas de radio, de Tv, microondas, radiación infra-roja, luz visible, radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamas. La diferencia consiste entre si por la diferencia de frecuencia y por la longitud de onda. La figura 3.2 muestra el espectro de onda electromágnetica.

La energia de una onda electromágnetica es cuantificada, esto significa, que ella puede asumir valores discretos. En la interacción de la radiación electromágnetica con la materia, la absorción y la emisión de energía solo ocurren en cantidades discretas de energía denominadas quanta o fótons. La energía E de un fotón es representada por:

$$E = hf$$

dónde h es una constante universal llamada constante de Planck y vale $4,14 * 10$ eV * s y f es la frecuencia de la onda electromágnetica. La energía de una onda electromágnetica es considerada como un fotón de esa onda, esto significa la energia de una onda electromágnetica es de 1 MeV, cuando la energia de un fotón de esa onda es de 1 MeV. Siendo la energía de un fotón directamente proporcional a la frecuencia de la onda electromágnetica, cuando mayor la frecuencia de la onda, mayor será la energía de sus fotones. Por lo tanto los ejemplos de las ondas electromágneticas que fueron citados en orden crescíente de frecuencia, está también en orden crescíente de energía sus fotones, mostrando que los fotones de los rayos X y gama son los más energéticos. Estos son los fotones que interesan en este texto, pues son ionizantes.

Los rayos X y los rayos gama son diferentes solamente en su origen, por que los rayos gama provienen del núcleo atómico o de la aniquilación de partículas, en cambio que los rayos X tienen su origen fuera del núcleo. Un núcleo inestable puede pasar a otro más estable, liberando energía en forma de radiación gama. La mayor parte de los elementos radioactivos emiten rayos gama. Por otro lado, cuando electrones rápidos chocan con ciertos materiales, parte de su energía, o toda ella, es convertida en fotones de rayos X, en este caso se denomina radiación de ..... Esto ocurre con los tubos de rayos X utilizados, por ejemplo, para sacar radiografías. Podemos mencionar, que la emisión de radiación X término cuando el tubo es desconectado de la red eléctrica, ya que es imposible impedir la emisión de radiación de una fuente radioactiva.

INTERACCION DE LA RADIACION X O GAMA CON LA MATERIA.

En la interacción entre un fotón de rayos X o gama y la materia son emitidos o creados electrónes o positrónes que ionizan los átomos del medio. Entre los principales mecanismos de interación podemos citar el efecto fotoeléctrico, o efecto Compton y la producción de pares. El efecto fotoeléctrico el fotón incidente es totalmente absorvido, con la transferencia de su energia a un electrón orbital en las camadas más internas, lanzadandolo.

En efecto Compton, el fotón de los rayos X o gama, es desviado por un eléctron de las órbitas externas, transfiriendo a ese eléctron parte de su energia.
En este proceso el foton no es absorvido, y por lo tanto, continua actuando con otros eléctrones. La producción del par eléctron-positrón ocurre cuando la energía del fotón incidente fuera mayor que la suma de las masas de reposo de esas partículas, o sea mayor que 1.02 MeV. La probabilidad de que ocurra uno de esos tipos de interacción depende de la energía del fotón de rayos X o gama y de número atómico del medio.

ATENUACION DE LOS RAYOS X O GAMA.

Un fotón de rayos X o gama puede perder toda o casi toda la energia en una unica interaccion y la distancia que el recorre

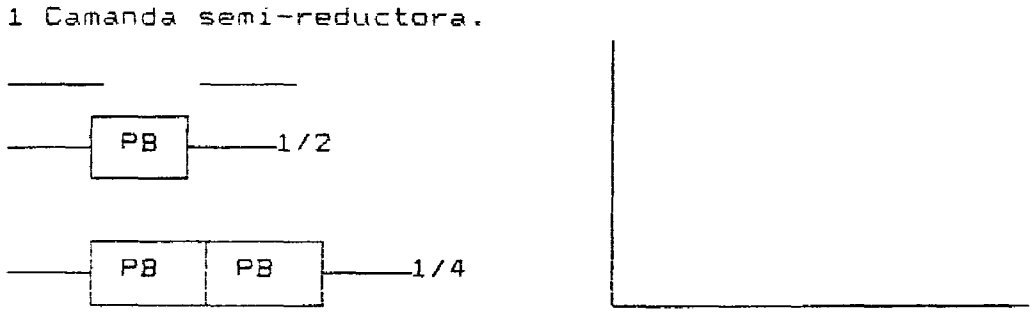

FIGURA. 3.3 Atenuación de la radiación gama de Cesio-137 por el Plomo.

antes de áctuar ella no puede ser prevista. Entretanto, podemos preveer una distancia en la cuál este tiene 50 % de posibilidad de áctuar. Esa distancia es denominada camada semi-reductora. El espesor de un material igual a de la camada semi-reductora reduce la intensidad de la radiación gama que atraviesa ese material a la mitad. La camada semi-reductora para los rayos gama de 0,662 MeV emitidos por el Cesio-137 es de 0,64 cm para el plomo, 3,5 para el aluminio y 7,9 cm para el tejido humano. La disminución de la intensidad de la radiación gama del Cesio-137 al atravezar placas de plomo puede ser observada en la FIGURA 3.3. Es interesante observar que la intensidad de la radiación disminuye a la mitad del valor anterior cada vez que atraviesa un material con espesor correspondiente a la de una camada semi-reductora.

Los rayos X y los rayos gama poseen un alto poder de penetración. Cuanto mayor la energía, mayor el poder de penetración pudiendo atravesar todo el cuerpo humano. Materiales densos como el plomo, el concreto,el acero o el hierro pueden ser utilizdo para el blindado.

CONTAMINACION E IRRADIACION.

Tanto los rayos X como los rayos gama a los cuales comunmente podemos estar expuestos, no tornan radioactivos a los materiales o a los seres humanos irradiados. Sinembargo, si una persona ingiere, inhala o sufre contaminación con radionuclideos,ahí si ésa persana..

queda radiactiva, o mejor, ella misma se torna una fuente radiactiva . Todas las personas contaminadas son también irradiadas una vez que están con los átomos radioactivos dentro o afuera de su cuerpo. Por otro lado ni todas las personas irradiadas son contaminadas, o sea, ellas pueden no estar contaminada pero pueden estar sujetas a radiación emitida por átomos radiactivos de una persona o de un local contaminado, dependiendo de la proximidad.

Los alimentos irradiados, para fines de esterilización, con los rayos gama emitidos por una fuente de Cesio-137 o Cobalto-60, no se tornan radioactivos. Porén, los alimentos contaminados por el polvo radioactivo,o aquellos que recibieron nutrientes radioactivos vía raiz, son radioactivos.

En el accidente de Goiania, cerca de 250 personas fueron contaminadas internamente o externamente, esto significa que entraron en contacto directo con átomos de Cesio-137, ingiriendo o inhalando, en el primer caso, y tocando en el segundo. En verdad, la contaminación comenzó con un número mucho menor de personas, que fueron pasando los átomos de Cesio-137 a otras, através del apretón de manos, por ejemplo. La persona que llevó el pedazo de material fuente, en el ómnibus, hasta el Centro de Vigilancia Sanitaria, contaminó el propio centro, el ómnibus,las personas y los objetos que ella tocó. Un número mayor de individuos no contaminados fueron irradiados en Goiania, o sea no tenian átomos de Cesio-137 en la piel, no los habian ingerido o inhalado, pero estaban cerca de las personas o objetos contaminados.

En el accidente de Chernobyl, prácticamente todo el suelo Europeo fue contaminado, sabiendo que el grado de contaminación varió de local para local, dependiendo de la dirección del viento, de la cantidad de las lluvias locales etc.

GRANDEZAS Y UNIDADES
DE FISICA DE LAS RADIACIONES.

Longitud, masa, tiempo, fuerza, energía y carga eléctrica son ejemplos de Grandezas Físicas y sus unidades en el Sistema Internacional son, respectivamente: Metro (m), gramo (g),segundo (s), newton (N), joule (J), y coulomb (C). El electrón-Volts (eV), es una unidad de energia fuera del Sistema Internacional, pero aceptada para uso uso con el Sistema Internacional, sin restricciones de plazo, siendo que:

$$1 \text{ Ev} = 1{,}602 * 10 \text{ J}$$

Los prefijos que indican los múltiplos y los submúltiplos de las unidades en el Sistema Internacional están en la lista en la Tabla 4.1.

A partir del conocimiento de que las radiaciones tienen la capacidad de destruir tumores, surgió la necesidad de especificarlas y medirlas. A medida que los conocimientos se fueron acumulando nuevas grandezas se fueron introduciendo.

submúltiplos.			múltiplos.		
10	atto	(a)	10	deca	(da)
10	femto	(f)	10	hecto	(h)
10	pico	(p)	10	quilo	(k)
10	nano	(n)	10	mega	(M)
10	micro	(u)	10	giga	(G)
10	mili	(m)	10	tera	(T)
10	centi	(c)	10	peta	(P)
10	deci	(d)	10	exa	(E)

TABLA 4.1 Prefijos para uso con el Sistema Internacional de unidades.

EXPOSICION.

La primera grandeza a ser introducida en la área especifica de la Física fue la exposición, en 1928, que fue definida de una forma muy confusa. Solamente en 1962 fue conseguido eliminar la confusión después de varias tentativas de refinición durante todos estos años. Basicamente, la exposición es una grandeza que caracteriza el haz de rayos X y gama y mide la cantidad de carga eléctrica producida por ionización, en el aire, por esa radiación, por unidad de masa en el aire. La unidad de exposición inicialmente adoptada fue el roentgen (R). Entretanto, existe una recomendación para subtituir esa unidad, a partir de 1985, el Sistema Internacional, denomina el coulomb por kilogramo (C/kg), siendo que 1 R = 2,58 * 10 C/kg. Una exposición tipica para una radiografia de abdomen es de 0,15 m C/kg (milésimo de coulomb por kilo), que corresponde a 0,6 R.

DOSIS ABSORBIDA.

Como la exposición fue definida en términos de ionización en el aire, no era adecuado para medir la cantidad de radiación absorbida por una parte del cuerpo, no sirve, por ejemplo, en la radioterapia. Asi,en 1950, se introdujo una nueva grandeza, la dosis absorbida, que es la energia média cedida por la radiación ionizante, es la matéria por unidad de masa de esa matéria. Esa grandeza es definida para cualquier tipo de radiación ionizante y para

cualquier medio, al contrario de la exposición, que es definida solamente para los rayos X y gama en un dado medio, en el aire. Su unidad de medición es el RAD, fue definida de tal forma que una exposición a radiación X o gama de 1 R resultara en una dosis absorbida por el tejido suave, aproximadamente 1 rad, es 1 rad = 0,01 J /kg. En cambio, a partir de 1975 fue recomendado la sustitución del rad por una nueva unidad en el Sistema Internacional (7), el gray (Gy), siendo que 1Gy = 1 J/Kg = 100 rad. En la radioterapia, una dosis típica absorbida por el tumor es de 2 Gy (200 rad) por aplicación.

DOSIS EQUIVALENTE.

Para una misma dosis absorbida, el efecto biológico podrá ser mayor o menor, dependiendo del tipo de radiación. Considerando este hecho, fue introducido, en 1962, una grandeza especial para fines de protección radiológica, que es calculada multiplicando la dosis absorbida por un factor numérico, dimensional, denominado factor de calidad. Ese factor considera que cuanto mayor el número de ionizaciones producidas por unidad de longitud, tanto mayor será el daño. Para protones, neutrones, particulas alfa y los iones más pesados se recomienda el uso del valor 25 para el factor de calidad (8), para los rayos beta emitidos por el tritio se recomienda el valor 2 y para los rayos X, gama y electrónes con energía superior a 0,030 MeV, que és el tipo de radiación a la que más comunmente nos exponemos, al valor 1. De esa forma se lleva en cuenta que una particula alfa dificilmente atravieza la piel, esta provoca un daño 25 veces mayor que es un fotón de rayos X, para una misma dosis absorbida, se esta fuera emitida en el interior del cuerpo. Esa grandeza fue denominada " dosis equivalent" en inglés, y traducida para el castellano como dosis equivalente, en vez de equivalente de dosis. La unidad adoptada para esa grandeza a partir de 1979, el Sistema Internacional, en subtitución al rem, siendo 1 Sv= (1Gy) (factor de calidad), y el siervert (Sv), siendo 1 Sv =(1Gy)(factor de calidad) = 1 J/kg = 100 rem. La dosis equivalente anual a la que una persona esta sometida, debido a la radiación natural, en media del orden de 1 mSv =100 mrem.

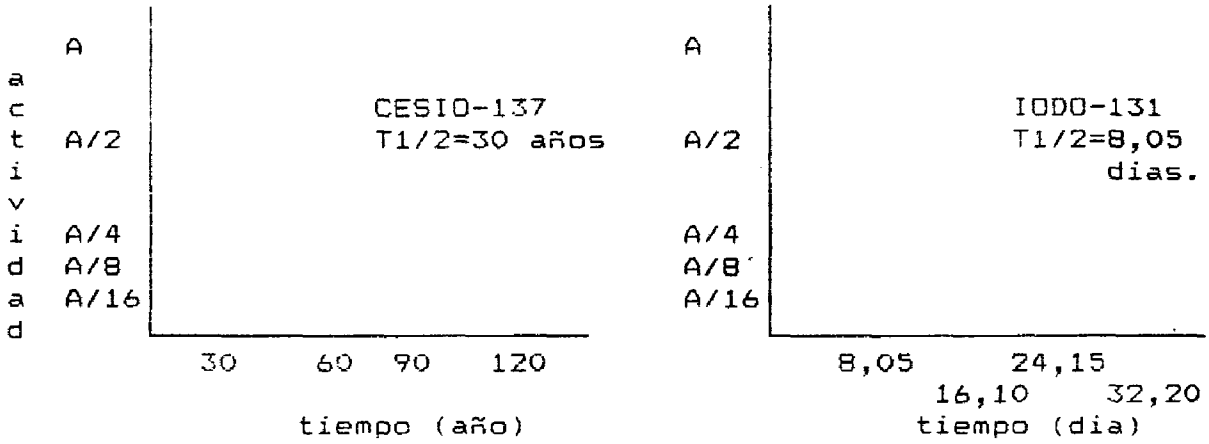

FIGURA 4.1 Disminución de la actividad de una fuente radioactiva de Cesio-137 (a) y de Iodo-131 (b) con tiempo T1/2 es la media-vida física.

ACTIVIDAD.

La actividad de una muestra radioactiva és el número de desintegraciones nucleares de sus átomos, en una unidad de tiempo. La actividad de una fuente radioactiva disminuye por la mitad del valor anterior después de cada media-vida física. Este tipo de disminucion és denominado decaimiento exponencial.

Las figuras 4.1 a y 4.1 b muestran respectivamente, la disminución de la actividad de una fuente de Cesio-137 y Iodo-131, con él tiempo.

La unidad de actividad en el Sistema Internacional es él becquerel, el cuál su abreviación es Bq y su plural es becquerels, siendo que 1 Bq es igual a la desintegración por segundo. El Bq fue introduzido en substitución a la unidad anterior, el curie, abreviado Ci, que fue definido como siendo la actividad de 1g de radio: 1 Ci = 3,7 *10 desintegraciones por segundo. Por lo tanto, la relación entre el Ci y el Bq es: 1 Ci = 3,7 * 10 Bq.

La ventaja de las unidades antiguas es que, para las radiaciones que más comunmente el ser humano está expuesto, o sea,

rayos X, gama y eléctrones, 1 R es aproximadamente igual a 1rad que, por su vez, es practicamente igual a 1rem. Por otro lado, las nuevas unidades en el Sistema Internacional facilitan mucho los cálculos.

En álgunos países que se utilizan unidades como el pié, la libra, púlgada, grado Fahrenheit etc.,existe la recomendación para ser utilizadas las unidades del Sistema Internacional,a partir del momento que fueron adoptadas en libros didácticos, sean encontrado dificultades para la aceptación por la comunidad en general y la científica. Después del accidente de Chernobyl quedó claro que varios autores de todos los países continuaban utilizando en sus artículos y reportajes las unidades antíguas de medidas de radiación y muchos otros las nuevas. En éste texto, en algunas ocaciones utilizamos las unidades antíguas, exactamente como lo hicieran los autores citados, y en la mayoría de los casos las tranformamos en las unidades nuevas. La Tabla 4.2 trae en resumen las grandezas más importantes de la Física de las radiaciones, conjuntamente con las unidades introduzidas inicialmente y las nuevas en el Sistema Internacional.

Tabla 4.2 Algunas grandezas y unidades de Física de las radiaciones y sus relaciones.

grandezas.	unidad antigua	unidad nueva en el Sistema Internacinal.
exposición	roentgen (R)	coulomb/kilogramo (C/kg) 1 R = 2,58 * 10 C/kg
dosis absorvida	rad	gray (Gy) 1 rad =0,01 Gy =0,01 J/kg
dosis equivalente	rem	sievert (Sv) 1 rem = 0,01 Sv = 0,01 J/kg
actividad	curie (Ci)	becquerel (Bq) 1 Ci =3,7 *10 Bq =3,7 * 10 S

RADIACION EN LA NATURALEZA.

Es posible imaginar que en nuestro cuerpo, a cada minuto, cerca de un cuarto de millón de átomos se está desintegrando, emitiendo radiación ? Esto es exáctamente lo que ocurre.

Toda la vida en nuestro planeta esta expuesta a la radiación natural. Nuestros antepasados estaban expuestos a ella, y nosotros también, queramos o nó.

Cuando nuestro cuerpo es expuesto a radiación de afuera para adentro, decimos que la exposición es externa, y en el caso contrario, interna.

EXPOSICION EXTERNA.

Gran parte de la radiación a la que estamos sometidos se deve a la exposición externa, el cuál cerca de la mitad se debe a la radiación cósmica y la otra mitad, a radionuclídeos naturales.

La radiación cosmica primaria proviene del espacio interestelar y en el techo de la atmósfera es constituida por protónes (85%), partículas alfa (41%) y núcleos de número atómico entre 3 y 26(1%).

Estas partículas son extremanente energéticas, poseen una energía média de 10 GeV y en su interacción con núcleos atómicos de atmósfera producen otras partículas. De esa forma, al nivel de mar, cerca de 75% de la radiación cósmica está constituida de múons que resultan del decaimiento de los mésons pí. El restante está constituido ecencialmente por eléctrones y fotones. Como el campo magnético desvía las partículas cargadas, la intensidad de la radiación cósmica es mínima en la región del ecuador y máxima en los polos, debido al campo magnético terrestre. Además de eso, como la atmósfera atenua la radiación cósmica, su intensidad es mayor a medida que aumenta la altitud. La intensidad de la radiación cósmica a 2000 y 3000 m de altitud es, respectivamente, cerca de dos a tres veces mayor que a nivel del mar.

Por lo tanto, la intensidad de la radiación cósmica varía de local para local, dependiendo de la altitud y la latitud, además parece haberse mantenido constante durante millones de años, para un determinado local de la tierra. La dosis equivalente debida a la radiación cósmica en las personas que viven en altitudes de 0 a 200 m és del órden de 0,27 mSv al año. En altitudes de 200 a 1800 m, varía de 0,28 a 0,52 mSv al año. Es interesante anotar que una persona está sujeta a una dosis equivalente extra debido a la radiación cósmica de 0,025 mSv al viajar durante 5 horas en avión a reacción.

La cantidad de radiación gama proveniente de radionuclídeos naturales existentes en la corteza terrestre y que contribuye para la exposición externa, también varía mucho de local para local. Las mayores anormalidades en las concentraciones de minerales radioactivos en el suelo, han sido encontradas en las arenas monazíticas de las playas de Guarapari, en las minas de Uranio y Torio en la región de Pozos de Caldas, y en depósitos de arenas monazíticos en el estado de Kerala, en la India. En algunas calles de Guarapari, los niveles de radiación llegan a ser 10 veces arriba de la radiación "normal" existente en la naturaleza. Las personas que viven en casas de concreto están más próximas a la radiación que las que viven en casas de madera. Asi el valor de la dosis equivalente anual debido a la radioactividad terrestre natural, depende del local de la Tierra que varía de 0,28 hásta 8,00 mSv, siendo la média de 0,40 mSv

EXPOSICION INTERNA.

La exposición interna se debe a radionuclídeos que son inhalados o ingeridos y que contribuye con una dósis equivalente anual médida de 0,18 mSv. De los trés isótopos del potácio existentes en la naturaleza, solamente el Potácio-40 con una abundancia relativa de 0,0118 %es radiáctivo. El es el responsable por 0,17 mSv de dosis equivalente interna anual média. Al media-vida biológica es de 58 días. El Potácio está localizado en los músculos del cuerpo humano, en una concentración de 2g por cada kilo de músculo. La áctividad del Potácio-40 en una persona de 70 kg, es del órden de 3,700 Bq, ésto significa que a cada segundo ocurren 3,700 desintegraciones nucleares. Esta es la explicación de la primera frase de éste capítulo. El Potácio, en conjunto con el Sodio, tiene un papel muy importante en la transmisión en los impulsos nerviosos del organismo. Dé esta forma él constituye un eleménto esencial en la alimentación diária, éste eleménto se encuéntra en él frijol, verduras frescas, en la leche etc. El consumo diário de Potácio para un adulto varía de 1,4 a 6,5g. Para los bebés que solamente se alimentan de leche, ésta última es la única fuente de Potácio. En cada litro de leche de vaca exíste, en media, cerca de 1,4g de Potácio, del cual 0,0118% es Potácio-40 radioáctivo, y su áctividad correspondiente es de 44 Bq. Esto significa que la leche es naturalmente radioactiva, con una media de 44 Bq por litro, debido exclusivamente al Potácio-40. Entre los alimentos que presentan mayor actividad de Potácio-40 se puede citar la espinaca cruda, con 240 Bq/kg, zanahoria cruda, papas y la bananas,con 120 Bq /kg. El restante de los 0,01 mSv de las dosis equivalente interna anual es debido principalmente al Carbono-14 y al gas radonio.

Es interesante citar que en algunos alimentos concentran más algún tipo de radionuclídeos que otros. Es el caso de la castaña del Pará, planta que posee tendencia a concentrar el radio. La actividad máxima encontrada en la castaña del Pará (2) es debida al radio-226 y el radio-228 que es de 520 Bq /kg. La concentración de radio en la castaña del Pará llega a ser 1.000 veces superior a la encontrada en la dieta alimenticia media americana. Además de ésto la castaña del Pará contiene Potácio-40, siendo su actividad del órden de 200 Bq /kg.

RADIACION ARTIFICIAL.

El ser humano también está expuesto a la radiación artificial proveniente de artefáctos producidos por él propio, además de la exposición a la radiación natural. La contribución más importante proviene de los rayos X utilizados para fines de diagnóstico. Con el desarrollo de los equipos radiológicos, un examen radiológico adecuadamente prescrito puede ser realizado con seguridad absoluta en beneficio del paciente, a pesar de los efectos dañinos de los rayos X. Vale la pena resaltar que, las radiaciones que la comunidad está normalmente expuesta, esta es la única que puede ser disminuida, si el caso lo amérita, o mantenida al mínimo y si los equipos tienen un buen control de calidad, los técnicos fueran bien entrenados, responsables y con conocimientos de protección radiológica.

Otra fuente de radiación artificial,es el polvo radioactivo resultado de pruebas o accidentes nucleares. La primera prueba de explosión nuclear ocurrió en 1945. Los eleméntos radioactivos liberados en la atmósfera se depositaron en el suelo y de ésta manera entraron en la cadena alimenticia. Cerca de 500 pruebas nucleares fueron realizadas en el hemisferio norte hasta 1963, cuando se firmó un acuerdo entre los Estados Unidos, Gran Bretaña, y la Unión Sovietica, para que no se realicen pruebas nucleares al aire libre. Como Francia y China no participaron de este acuerdo, ellos explotaron algunas bombas después de esa fecha, pero en número mucho menor. Así, el acúmulado del Estroncio-90 en el suelo debido al polvo radioactivo aumentó de 5 a 10 veces en el hemisferio norte, y de 1,5 a 3 veces en el hemisferio sur a partir de 1954.

Como el acuerdo fue firmado por las superpoténcias en 1963 nada no había constancia sobre las pruebas subterraneas, los Estados Unidos pasaron a realizar ese tipo de pruebas, hasta 1971, ya se habían efectuado por lo menos 220 detonaciones en el subsuelo. Felizmente, en este tipo de pruebas la liberación de radionuclídeos en la atmósfera es baja. En 1974, las superpoténcias se comprometieron a no detonar en el subsuelo artefáctos nucleares con potencia superior a 150 kt (kt = kilotonelada). Dos años después, en 1976, un nuevo acuerdo limitó en 150 kt las explosiones subterráneas con fines pacíficos como militares.

La Tabla 5.1 muestra, en resúmen, la dosis equivalente anual media (H) debido a la radiación de fondo, natural y artificial.

Tabla 5.1 Dosis equivalente anual media debida a la radiación natural y artificial.

radiación natural	dosis equivalente. (mSv)
radiación cósmica.	0,44
radiación gama externa.	0,44
radiación interna (potácio-40, carbono-14 radonio etc)	0,18
	1,02
radiación artificial.	0,73
polvo radiactiva (pruebas nucleares)	0,04
otros.	0,21
	0,98
total.....	2,00

PROTECCION RADIACION.

Luego después del descubrimiento de los rayos X, álgunos médicos que habian tomado radiografías de sus propios cráneos, por simple curiosidad, notaron una caída acéntuada de cabello y lo relacionaron con el hecho de la exposición a la radiación. A finales de 1896, existían muchas reportajes sobre el aparecimiento de quemaduras en la piel expuesta a los rayos X, creando así mucha polémica. Basta recordar que cerca de 30 años atrás, quién sujetaba el film de los rayos X para tomar una radiografía de diente era el propio dentista, que no creía en los efectos dañinos de la radiación. Solamente cuando las manos de muchos dentistas comenzaron a presentar radiodermitis, en ese momento dejaron de sujetar los filmes.

Para esclarecer si de hecho la radiación provocaba daños,en finales de 1896, ELIHU THOMSON, expuso su dedo meñique izquierdo durante media hora por día, a un haz directo de rayos X, utilizando una distancia entre el tubo y la piel menor a 3 cm. Después de una semana comenzó a sentir dolores y notó una inflamación y como consecuencia la formación de ampollas en el dedo expuesto. Thomson concluyó que la exposición a los rayos X, sin considerar cierto límite, podría causar serios problemas. Desde entonces, los científicos percibieron la necesidad de establecer técnicas de medida de la radiación y normas de protección contra los efectos dañinos.

El principal item de la agenda del Primer Congreso Internacional de Radiología en Londres, en 1925, fue el tema principal sobre las unidades y normas de trabajo con rayos X. En ése congreso se creó la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (ICRU), teniendo como principal objetivo el estudio y la publicación de las recomendaciones a ser aceptadas internacionalmente sobre: (a) grandezas e unidades de radiación y radioactividad; (b) procedimientos adecuados para medidas y aplicación de esas grandezas en radiologia clinica y radiologia; (c) colecta de datos físicos necesarios para la aplicación de esos procedimientos, cuyo uso determinará la uniformidad de los relatos. Desde 1955, esa comisión mantiene relación oficial con otros órganos, entre ellos la Organización Mundial de la Salud.

En el segundo Congreso Internacional de Radiologia realizado en Estocolmo, en 1928, fue fundada la Comisión Internacional de Protección Radiologica (ICRP), con la misión principal, de dar las guías generales para el uso de radiación y establecer límites máximos permitidos de radiación para los trabajadores y el público en general.

Estas comisiones se vienen reuniendo generalmente cada 3 años, con interrupción durante la Segunda Guerra Mundial. En general, cada país posee un órgano que hace adecuaciones en las normas internacionales para poder adoptarlas.

En Brasil, el CNEN, es el responsable por la legislación y normatización para la utilización de la radiación. El CNEN elaboró las "Normas Basicas de Protección Radiológicas" (10), que rigen la utilización de la radiación en el país, fueron publicadas en el Diario Oficial de la Unión el 19 de Septiembre de 1973.

Las recomendaciones de los limites máximos permitidos de la radiación sufrieron diversas modificaciones con el pasar de los años. La Tabla 6.1 (11 y 12) presenta las recomendaciones hechas por las diversas comisiones y adoptadas por los diferentes países, desde 1924. En la tercera columna de la tabla, los números y las unidades aparecen tal cual la recomendación habia sido hecha en los años indicados en la primera columna. Estas recomendaciones fueron normalizadas, para términos de comparación, utilizándo el mSv y el año respectivamente, para las unidades de dosis equivalente y el tiempo, éstas se encuentran en la cuarta columna.

Se observa que existió una reducción gradual en los limites recomendados con el paso de los años. Esto se debe que hacia mediados de la década del 1940, el principal propósito de la protección radiológica era

Tabla 6.1 Recomendaciones sobre los límites permitidos de radiación para los trabajadores.

año	país	recomendación	recomendación (mSv/año)
1924	Francia	4.000 R/año	40.000
1924	Gran Bretaña	0,7 R/dia	2.520
1925	ICRU *	0,1 dosis eritema**/año	500-1.000
1925	Suecia	0,1 dosis eritema/año	500-1.000
1934	ICRP***	0,2 R/dia	730
1934	Gran Bretaña	1,0 R/semana	530
1935	NCRP****	0,1 R/dia	360
1947	Gran Bretania	0,5 R/semana	260
1947	NCRP	0,3 R/semana	150
1950	ICRP	0,3 R/semana	150
1956	ICRP	5 rem/año	50
1957	NCRP	5 rem/año	50
1973	CNEN	5 rem/año	50
1977	ICRP	50 mSv/año*****	50

* ICRP = Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación
** Dosis eritema y la dosis que causa quemaduras leves en la piel.
*** ICRP = Comisión Internacional de Protección Radiológica.
**** NCRP = Comité Nacional de Protección Radiológica.
***** Considerando irradiación en todo el cuerpo, para efectos estocásticos (ver definición en el iten Recomendaciones de Protección Radiológica)

el de proteger los trabajadores contra los efectos agudos de la radiación que se deben a las altas dosis. A partir de entonces, a medida que los conocimientos sobre los efectos genéticos, que se deben a dosis más bajas, fueron aumentando,y están siendo enviados en consideración las recomendaciones.Las recomendaciones presentados por el Comité Nacional de Protección Radiológica (NCRP) en los Estados Unidos.en 1947,consideraron los resultados de experiencias con animales en el Proyecto Manhattan. El Comité esclarecia que el límite fue rebajado no por causa de las evidencias positivas de daños por la acoción del valor anterior,pero considerando que existen muchas incertidumbres, pocos datos e información disponible. Se consideró la opinión científica y la filosofía de riesgo.

RECOMENDACIONES DE PROTECCION RADIOLOGICA.

Las últimas recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica están en el ICRP-26, del 17 de Enero de 1977 cuyos items más importantes a continuación y sus principales objetivos en la protección radiológica se presentan a continuación:

1. Proteger los individuos, sus descendientes y la humanidad contra todos los efectos dañinos de la radiación;
2. Evitar que ocurran efectos no estocásticos, o sea, aquellos para los cuáles la gravedad del efecto está en función de la dosis y para los cuáles existe dosis limiar; se cree en el aparecimiento de efectos no estocásticos solamente para las dosis arriba de valor dado. Son ejemplos la inducción a la catarata y los daños no malignos en la piel;
3 Limitar la probabilidad de que ocurran efectos estocásticos niveles aceptábles. Los efectos estocásticos son aquellos en que la probabilidad de ocurrir, fue considerada en función linear de la dosis limiar, o sea, cualquier dosis, por menor que sea, tiene una probabilidad de inducir al daño.Son ejemplos los efectos hereditarios y el carcinógesis.

El ICRP-26 especifica que cualquier exposición a la radiación debe ser justificada con algún beneficio líquido él que debe ser obedecido el principio ALARA, sigla de "as low as reasonably achievable" (tán bajo cuanto razonablemente accesible) llevando en consideración factores ecónomicos y sociales. La aceptación de una operación que envuelve la exposición a la radiación se debe determinar por criterio del análisis del costo monetario, del daño a la salud y del beneficio.

Hasta 1960 una de las principales preocupaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica eran los efectos hereditários que pueden ser provocados por la radiación de bajo nivel; hoy, lo que mas preocupa son los riesgos de inducción al cancer en varios organos del cuerpo, sin olvidar los efectos hereditários. La Comision Internacional de Protección Radiológica calificó esos riesgos y estableció los límites máximos permitidos con la filosofia que los riesgos para los trabajadores con radiación sean tan bajos y que las indústrias sean consideradas altámente seguras,

en los cuáles el número anual de muertes por accidentes de trabajo sea de 1 en 10 mil trabajadores.

Los riesgos, para todos los efectos, y los riesgos de muerte por inducción del cancer, se calcula utilizando la siguiente ecuación:

riesgo (muerte) = factor de riesgo * dosis equivalente.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica reconoce que los factores de riesgo que ésta estableció llevando en cuenta las estadísticas de los resultados del seguimiento acumulado durante varios años, principálmente de los sobrevivientes de los bombardeos a dos ciudades japonesas, dependiendo del sexo y la edad, y los números presentados en la Tabla 6.2 son aproximados y están sujetos a estudio.

Con los datos de la Tabla 6.2 es posible cálcular el número de muertes por leucemia, por ejemplo, en una población de 1 millón de personas, debido a la radiación de fondo de 1 mSv al año en la médula ósea. Aplicando la fórmula, la tendencia de riesgo de muerte por leucemia es:

riesgo(muerte) = (0,0020 riesgo/Sv) * (0,001Sv)=2*10

Para una población de 1 millón de personas,el número de muertes por año es obtenido multiplicando 1 millón por 2*10 , que el resutado és 2.

Tabla 6.2 Factor de riesgo para mortalidad y factor de peso.

tejido o órgano	factor de riesgo (riesgo/Sv)	factor de peso* Wt
gonadas**	0,0040	0,25
mamas	0,0025	0,15
médula ósea (leucemia)	0,0020	0,12
pulmón	0,0020	0,12
tiroide	0,0005	0,03
huesos	0,0005	0,03
resto	0,0050	0,30
riesgo total	0,0165	1,00

* Los factores de peso son factores de riesgo normalizados, considerando el factor de peso igual a 1,00 para el riesgo total de 0,0165.

** Efecto hereditario en las dos primeras generaciones.

En la ciudad de Ontario (14), Canadá, por ejemplo,con 1 millón de habitantes, mueren 70 personas por año de leucemia. El resultado de los cálculos sugiere,entonces, que 68 muertes son causadas por otros factores que la radiación de fondo, es la responsable solamente por 2 muertes.

LIMITES MAXIMOS PERMITIDOS.

Las recomendaciones hechas por la Comisión Internacional de Protección Radiológica en la publicación ICRP-26 a los trabajadores son:

1. Para evitar la ocurrencia de los efectos no estocásticos: ningún tejido debe recibir más de 500 mSv al año, con ecepsión del cristalino, para el cuál la comisión recomienda el limite máximo permitido anual de 150 mSv para evitar la formación de la catarata.

2. Para limitar el aparecimiento de los efectos estocásticos: la dosis equivalente anual debe ser inferior a 50 mSv en caso de irradiación uniforme del cuerpo en su totalidad.

En el caso de irradiación en algunas partes del cuerpo,se tiene que tomar en consideración los factores de peso Wt representados en la Tabla 6.2, que son obténidos dividiendo el factor de riesgo de cada tejido por el riesgo total. La suma de la dosis equivalente para cada organo o tejido es multiplicado por el respectivo factor de peso debe ser menor o igual a50 mSv, esto es <50 mSv. Pero si solaménte la médula ósea fuera irradiada, la dosis equivalente máxima permitida anual Ht para la médula se obtiene de:

$$Ht * 0,12 = 50 \text{ mSv}$$
$$Ht = 417 \text{ mSv}$$

Por otro lado, si solamente la tiroide fuese irradiada,el limite máximo permitido anual, cálculado de la misma forma para la tiroide, es de 1.667 mSv, que es un valor razonablemente alto.

En este caso la limitación está hecha por la recomendación de 500 mSv al año para evitar los efectos no estocásticos.

Es importante recordar que en esos límites máximos permitidos no están incluidos las dosis equivalentes debido a la radiación natural y las exposiciones médicas.

Tomando en cuenta los límites máximos permitidos de las dosis equivalentes anuales para los trabajadores con relación, es interesante cálcular el riesgo total:

$$\text{riesgo total} = 0{,}0165 * 0{,}050 = 0{,}00083$$

que está muy próximo a 0,001, significando 1 muerte en 1.000 trabajadores, y no en 10 mil como se pretendía en el ICRP-26. La explica-ción de la comisión es que un análisis estadístico de daños de monitoreos de personal* acumulados durante 20 años muestra que efectivamente, la dosis equivalente anual a que los trabajadores con radiación están sujetos es inferior a un décimo del límite máximo permitido. Surge la pregunta: por que no bajar ese límite definitivamente para 5 mSv al año?. Esto implica costo tan alto que no se justifica el beneficio, porque el espesor de las paredes de las instalaciones en dónde existe radiación, en uso, tendrían que ser aumentadas, con la atenuación de que la radiación X o gama es una función exponencial, y si un dia se decide disminuirla para un valor próximo a cero, las paredes de las instalaciones deberán terner un espesor casi infinito.

La comisión hace también recomendaciones para aquellos individuos que son personas que viven en las inmediaciones de las instalaciones nucleares:

> El nivel máximo permitido de radiación recomendado para los individuos del vecindario es 10 veces inferior a de los trabajadores con radiación, según publicación ICRP-26.

---

* Los trabajadores con radiación, por las normas internacionales y por el CNEN, debe tener en su poder, durante sus horas de trabajo, detectores de radiación denominados dosímetros para monitoreo personal. Estos dosímetros son filmes o cristales termoluminuciantes y se acostumbra a medir la dosis acumulada durante un mes.

En marzo de 1985, la Comisión Internacional de Protección Radiológica, reunida en París, efectuó algunas revisiones y aprobó la siguiente recomendación para el límite máximo permitido para la población:

> 1 mSv al año y mantener los 5 mSv al año solamente para situaciones especificas.

EL LIMITE TODAVIA PUEDE SER DISMINUIDO.

Los factores de riesgo que están especificados en el ICPR-26 fueron establecidos en base, principalmente, en los casos de Cancer entre los sobrevivientes de las dos explosiones de dos bombas atómicas en Japón, evaluando la dosis para cada caso. Investigaciones recientes (15 ,16) muestran que esos factores no eran los reales por causa de los errores de evaluación de las dosis, siendo en realidad, de 2 a 15 veces mayores. Esa cuestión fue analizáda por un conjunto binacional US-Japón Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, que después de 6 años de estudios, publicó a mediados de 1987 el "Final Report,Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima,Japan,1987"

Las mayores diferencias entre la nueva dosimetría y la anterior son las personas de Hiroshima. Lo que todo indica, la hunedad relativa local, en el día del bombardeo, estába alta, causando una fuerte atenuacion de los neutrónes emitidos, el cuál el número parece ser mucho menor que el originalmente estimado. Así, la proporcion de los neutrónes para los rayos gama incidentes, en las personas en Hiroshima, evaluada en 1965, parece ser drásticamente diferente a lo real. Hoy se puede concluir que la dosis de neutrones es solamente 10 % del valor inicialmente previsto, y por lo tanto, las dosis equivalentes medias en las víctimas fueron efectivamente mucho menores, una vez que el factor de calidad de los neutrones fue considerado como 10* y para los rayos gama,1. En consecuencia los efectos de los rayos gama en los seres humanos son mucho más serios de lo que se suponía anteriormente.

---

* Valor recomendado para el factor de calidad para neutrónes, en la epoca.

Con ésto muchos científicos están enviando pedidos a la Comisión Internacional de Protección Radiológica para que sea hecha una revisión inmediata en sus recomendaciones. En septiembre de 1987, esa comisión se reunió en COMO, Itália, para analizar la cuestión. Contra todas las expectativas se decidió mantener las recomendaciones del ICRP-26, afirmando que, una vez que existe el principio ALARA, los factores de riesgo no son tan importantes. En verdad, ellos prorrogaron la decisión para 1 o 2 años, de esta forma se esperan resultados más concretos. En Inglaterra, en noviembre de 1987, el National Radiological Protection Board decidió en su guia interina reducir el límite de radiación para los trabajadores de 50 mSv al año para menos de 1/3, o sea,para 15 mSv al año.

Una nueva técnica revolucionaria de dosimetria biológica, (17) talvéz venga a auxiliar en la resolución de ésta cuestión en los próximos años. Esta técnica fue desarrollada por científicos del Lawrence Livermore Laboratory y explora el hecho que los eritrocitos (células rojas de la sangre) tienen dos versiones de proteina deniminada glicoforina A, en la membrana de las células. Una versión es la glicoforina GPA (M)que se diferencia ligeramente en su estructura en la segunda versión, conocida como GPA (N). Cada una de esas proteinas tiene un gene que las codifica. La radiación dagnifica los genes responsables por el GPA (M) de una célula y de todas de éstas descienden no poseen este tipo de protéina en su membrana celular. Los científicos del Lawrence Livermore Laboratory desarrollaron una técnica para marcar y contar las células que poseen GPA(M) y GPA(N). Estos pusieron en práctica la técnica en la sangre de los sobrevivientes de Hiroshima y Chernobyl, se afirma que há funcionado bien. Un hecho muy importánte es que ese tipo de daño es permanente, pudiendo ser detectado después de 40 años, como es el caso de los sobrevivientes de Hiroshima, que no es posible con el análisis de las deformaciones cromósomicas que el cuerpo tiende a reparar con el tiempo.

PRECAUCIONES.

Todos debemos tomar muchas precauciones al manipular con radiación, principalmente los trabajadores, para limitar los riesgos y prevenir accidentes.

Para evitar la contaminación interna las siguientes precauciones deben ser tomadas por trabajadores con radiación:

* Usar máscaras para no inhalar gases radioactivos;

* No usar la pipeta con la boca, no colocar los dedos en la boca, y no fumar en los locales de trabajo;

* Lavar las manos siempre que es necesario, con agua abundante y jabón;

* Utilizar guantes y ropas especiales, pués algunos productos pueden ser absorvidos por el organismo através de la piel.

Para disminuir exposiciones externas tres factores deben ser tomádos en consideración:

* Permanecer el tiempo mínimo posible próximo a la fuente radioactiva;

* Trabajar a máxima distancia de la fuente;

* Usar blindajes adecuados, para atenuar la radiación al máximo.

Las recomendaciones, en verdad, son todas triviales. Entre tanto, como la radiación no es sentida ni vista por las personas, éstas pierden el miedo y es ahí que comienzan los problemas de contaminación e irradiacion.