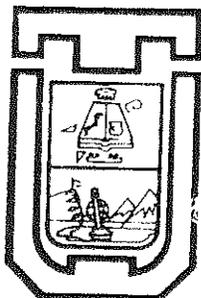


9.24767

**UNIVERSIDAD DE TARAPACA
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPTO. DE BIOLOGIA**



1462

**MANUAL DE PROTECCION
RADIOLOGICA**

T.M. Lic. CARLOS UBEDA de la CERDA



**ARICA – CHILE
2003**



INDICE

	<i>Páginas</i>
□ <i>Introducción.</i>	
□ <i>Capítulo I Fundamentos Físicos.</i>	
□ <i>Estructura del Átomo</i>	<i>01</i>
□ <i>Electrones</i>	<i>01</i>
□ <i>Nucleido</i>	<i>02</i>
□ <i>Unidades de Medida</i>	<i>03</i>
□ <i>Defecto de Masa</i>	<i>05</i>
□ <i>Unidades de Energía en Física Atómica</i>	<i>05</i>
□ <i>Capítulo II Rayos x.</i>	
□ <i>Descubrimiento de los Rayos x</i>	<i>06</i>
□ <i>Rayos x</i>	<i>08</i>
□ <i>Fotón</i>	<i>08</i>
□ <i>Mecanismos de Producción de los Rayos x</i>	<i>09</i>
□ <i>Espectro de Energía de los Rayos x</i>	<i>10</i>
□ <i>Propiedades de los Rayos x</i>	<i>11</i>
□ <i>Capítulo III Radiactividad.</i>	
□ <i>Radiactividad</i>	<i>12</i>
□ <i>Historia</i>	<i>12</i>
□ <i>Decaimiento Radiactivo</i>	<i>14</i>
□ <i>Período</i>	<i>15</i>
□ <i>Vida Media</i>	<i>15</i>
□ <i>Formas de Decaimiento</i>	<i>16</i>
□ <i>Formas de Desexcitación</i>	<i>18</i>
□ <i>Capítulo IV Interacción de la Radiación con la Materia.</i>	
□ <i>Generalidades</i>	<i>19</i>
□ <i>Interacción de Partículas α</i>	<i>19</i>
□ <i>Ionización Específica</i>	<i>20</i>
□ <i>Poder de Frenado</i>	<i>21</i>
□ <i>Interacción de las Partículas β</i>	<i>21</i>
□ <i>Interacción de la Radiación Electromagnética con la Materia</i>	<i>24</i>
□ <i>Efecto Fotoeléctrico</i>	<i>24</i>
□ <i>Efecto Compton</i>	<i>25</i>
□ <i>Formación de Pares</i>	<i>26</i>
□ <i>Capítulo V Magnitudes Radiológicas.</i>	
□ <i>Introducción</i>	<i>28</i>
□ <i>Dosis Absorbida (consideraciones generales)</i>	<i>28</i>
□ <i>Dosis Absorbida</i>	<i>30</i>
□ <i>Calidad de un Haz de Fotones</i>	<i>32</i>
□ <i>Magnitudes Aplicadas en Protección Radiológica</i>	<i>33</i>



INDICE

□	Capítulo VI Radiobiología.	
□	Introducción	36
□	Transferencia Lineal de Energía y Eficacia Biológica Relativa	38
□	Concepto General de Radiosensibilidad	39
□	Escala de Radiosensibilidad Celular y sus Leyes	40
□	El Ciclo Celular	41
□	Radiosensibilidad Hística	41
□	Radiobiología Celular	42
□	Efectos de las Radiaciones Ionizantes sobre el ADN y los Cromosomas	42
□	Efectos de la Radiaciones Ionizantes sobre los Tejidos	45
□	Efecto de las Radiaciones Ionizantes sobre el Embrión y el Feto	48
□	Efecto de las Radiaciones Ionizantes sobre el Organismo en su Conjunto	50
□	Capítulo VII Detección de las Radiaciones Ionizantes.	
□	Fundamentos Físicos	53
□	La Detección de la Radiación Ionizante	54
□	Distinción entre Detectores, Contadores Espectrómetros y Dosímetros	54
□	Rendimiento de la Detección	55
□	Cámaras de Ionización	55
□	Contadores Geiger	56
□	Detectores de Centelleo	57
□	Dosímetros	58
□	Capítulo VIII Sistema de Protección Radiológico.	
□	Introducción	61
□	Conceptos Básicos	61
□	Requerimientos del Sistema de Protección Radiológico	62
□	Clasificación de los Límites	63
□	Capítulo IX Técnicas de Protección Contra las Radiaciones Ionizantes.	
□	Introducción	65
□	Consideraciones Importantes para la Evaluación de un Blindaje	67
□	Absorción o Frenado de las Partículas α	68
□	Absorción o Frenado de las Partículas β	69
□	Radiación de Frenado	70
□	Consideraciones para la Absorción de las Partículas α y β	71
□	Atenuación de la Radiación Electromagnética gamma y x	71
□	Coefficiente de Atenuación Lineal y Energía de la Radiación Gamma	72
□	Capa Semireductora y Decireductora	73
□	Ejercicios	73
□	Bibliografía.	



INTRODUCCIÓN

El presente texto de estudio, pretende entregar nociones básicas en diversos temas relacionados con el conocimiento y manejo seguro de fuentes emisoras de Radiaciones Ionizantes, lo que se conoce como "Protección Radiológica". Para lograr esto, se desarrollan las siguientes materias:

- Fundamentos Físicos.*
- Rayos x.*
- Radiactividad.*
- Interacción de la Radiación con la materia.*
- Magnitudes Radiológicas.*
- Radiobiología.*
- Detección de las Radiaciones Ionizantes.*
- Sistema de Protección Radiológica.*
- Técnicas de Protección contra las Radiaciones Ionizantes.*

A pesar de su simpleza, este manual puede ser de gran utilidad para estudiantes, profesionales y toda persona que se relacione con las Radiaciones Ionizantes.



ESTRUCTURA DEL ÁTOMO

Las partículas que componen el átomo se hallan dispuestos del mismo modo general en todos los átomos. El núcleo está formado por las partículas: protones y neutrones, formando entre ellas un grupo muy compacto, que ambas poseen carga positiva debido a los protones. En el exterior del núcleo, en la corteza existe el electrón, con carga negativa, a una distancia relativamente grande. Los electrones se encontrarán en el átomo en igual número que los protones en el núcleo. (Fig. 1)

ELECTRONES

Los electrones se encuentran girando alrededor del núcleo, de manera que la fuerza de atracción electrostática queda compensada por la fuerza centrífuga de giro, de forma análoga, a lo que sucede con la rotación de los planetas alrededor del sol.

Los electrones que constituyen la corteza del átomo, describen órbitas a grandes distancias con relación a su tamaño. Las órbitas que alcanzan son del orden de 10 veces mayores que el volumen nuclear. La casi totalidad de la masa atómica se encuentra en el núcleo, alcanzando una densidad altísima del orden de 10 Kgs/cm^3 .

Los electrones en el átomo no se encuentran en órbitas de radio arbitrario, existiendo ciertas órbitas permitidas, en las cuales el movimiento electrónico resulta estable, contando a partir de la más próxima al núcleo. Las siguientes órbitas se conocen como capas, teniendo a su vez varios subniveles. Las capas se las designa con las letras K, L, M, N, O, P, Q, contadas del núcleo hacia la periferia.

A cada órbita corresponde un nivel energético o energía de ligadura de los electrones de dicha órbita al resto del átomo. Las órbitas más cercanas al núcleo corresponden a los niveles de energía más bajos. En los átomos pesados, las órbitas de la capa K están muy próximas al núcleo y sus electrones se hallan fuertemente atraídos por el campo electrostático de la carga positiva nuclear.

Los electrones se encuentran ligados en sus órbitas en estado de energía negativa, por ello, para arrancar un electrón de un átomo se requiere aportar la denominada energía de enlace, con ella se separa un electrón, quedando el resto del átomo ionizado.

Normalmente, los electrones al encontrarse en el átomo suelen estar en las órbitas más próximas al núcleo; pero, mediante aportación de energía los átomos pueden excitarse y así desplazarse los electrones a órbitas más extensas, sin por ello llegar a formar iones. Un átomo cuando está excitado es energéticamente inestable y el electrón perturbado retornará en un tiempo breve a su órbita estable, emitiendo energía en forma de radiación electromagnética.

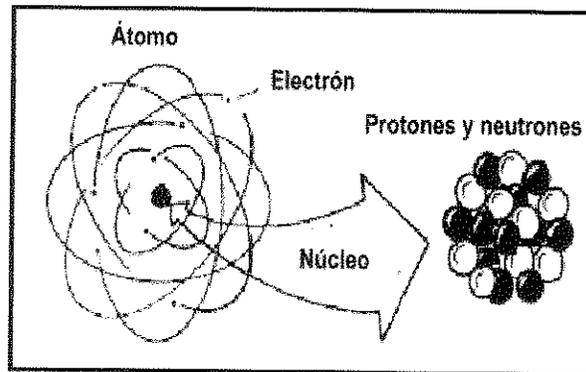


Fig. 1. Esquema del átomo

Las masas del protón y del neutrón son aproximadamente iguales, siendo la masa de cada una de ellas alrededor de 1.840 mayor que la de un electrón. Por tanto, toda la masa del átomo se encuentra prácticamente concentrada en el núcleo. El fotón es de masa nula.

- *El Electrón* : Es una partícula de carga negativa.
- *El Protón* : Cargado positivamente.
- *El Neutrón* : Es de carácter neutro.
- *El Fotón* : Es de carga nula.

Los átomos, normalmente se encuentran en estado eléctrico neutro, o sea, con el mismo número de protones en el núcleo que de electrones en la periferia.

El número de estas partículas de una u otra clase es el que se define como *NÚMERO ATÓMICO*, característico de cada elemento y simbolizado con la letra *Z*.

Todos los átomos con el mismo número atómico tienen las mismas propiedades químicas.

El *NÚMERO MÁSCICO*, simbolizado con la letra *A*, es el número total de protones y neutrones.

NUCLEIDO

Es toda especie atómica caracterizada por el número de protones, número de neutrones y contenido de energía en el núcleo, o bien por el número atómico, número másico o masa atómica. Para ser considerado como un nucleido efectivo, debe poseer una vida, generalmente mayor de 10 segundos.



Capítulo I Fundamentos Físicos.

Nucleido, también sirve para denominar la especie nuclear. La gran mayoría de los elementos naturales están constituidos por una mezcla de isótopos en proporción bien definida. Así, mientras sólo existen 92 elementos químicos naturales, existen más de 1.000 nucleidos distintos.

Por ello, vamos a definir los diferentes 4 tipos de nucleidos:

- **Isótopos** : Nucleidos con el mismo número atómico Z , pero con distinto número másico A ,
- **Isóbaros** : Nucleidos con igual número másico A , pero distinto número atómico Z
- **Isótonos** : Nucleidos con igual número de neutrones, pero con distinto número atómico Z y número másico A .
- **Isómeros** : Nucleidos que tienen que tienen igual número de protones y neutrones, pero se diferencia en su nivel energético.

Existen dos tipos de isótopos: los estables y los radiactivos.

UNIDADES DE MEDIDA

Unidades de Masa atómica o uma, fue creada para poder trabajar a un nivel nuclear, ya que el tamaño de las partículas nucleares así lo determinaron.

- 1 uma = Se define como la 1/12 parte de la masa de un átomo de Carbono. $^{12}_6\text{C}$. Entonces cuanto vale un átomo completo de carbono expresado en uma = 12 uma. Este valor es por acuerdo.
- 1uma = ¿A cuantos gramos corresponde ? . Es decir relacionamos el micromundo, con el macromundo.

Razonamiento :

- Concepto Particula-Gramo, es decir el peso de una partícula = Mol.
- 1 Mol = N_0 partículas. $N_0 = 6,022 \times 10^{23}$ átomos.
- 1 partícula = 1 uma.
- 1mol = 1g
- N_0 partículas = 1 g.



Capítulo I Fundamentos Físicos.

- 1 partícula = $1g/N_0$.
- 1 uma = $1g/N_0$.
- 1 uma = $1,66 \times 10^{-27}$ Kg. $1,66 \times 10^{-24}$ gr.

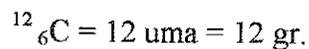
Sabiendo que:

- $E = mc^2$
- $E = 1,66 \times 10^{-27}$ Kg. $\times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2$
- $E = 1,49 \times 10^{-10}$ Joule.
- Debemos transformarlo a electrón-volt, que es la energía necesaria para mover un electrón en un campo eléctrico de 1 volt, en sentido contrario al campo.
- Sería 1 electrón \times 1 volt.
- La carga de 1 electrón es $1,60 \times 10^{-19}$ Coulomb. Volt = Joule/Coulomb.
- $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$ Joule.
- 931250000 eV ó 931,25 Mev.

De esta forma tenemos:

- Un electrón pesa $9,108 \times 10^{-31}$ Kg. 0.00055 uma.
- Un protón pesa $1,6734 \times 10^{-27}$ Kg. 1,00727 uma.
- Un neutrón pesa $1,6747 \times 10^{-27}$ Kg. 1,00866 uma.

Existe otra forma de expresar la masa atómica y es el concepto. Peso-átomo –gramo que es numéricamente igual al peso atómico.





Capítulo I Fundamentos Físicos.

DEFECTO DE MASA

Nosotros sabemos que la masa atómica de un átomo de carbono sería 12 uma. Ahora bien si descomponemos el átomo y sumamos sus nucleones y electrones. Sería:

- 6 protones = 1,00727 uma = 6,04362 uma. Total = 12,09888 uma.
- 6 neutrones = 1,00866 uma = 6,05196 uma.
- 6 electrones = 0,00055 uma = 0,00330 uma.

Existe por tanto una diferencia de uma . 12,09888 uma.- 12,0000 uma

- Existe un Δm de 0.09888 uma.
- Esta diferencia se puede entender gracias a la teoría de la relatividad y en la equivalencia entre masa y energía
- Se ocupa la equivalencia entre uma y energía .
- 1 uma = 931,25 Mev
- 0.09888 uma = x Mev. ; x = 92,05 Mev.
- Esta diferencia de masa se conoce como DEFECTO DE MASA, y se explica como esa masa se transforma en energía de unión de los nucleones específicamente. Son las fuerzas nucleares.
- ¿ Cual será la energía de unión del núcleo por cada nucleón?
- $92,05/12 = 7,67$ Mev por nucleón.

UNIDADES DE ENERGÍA EN FÍSICA ATÓMICA

- **Electrón voltio** : Se la energía necesaria para ionizar un átomo o la energía cinética que adquiere un electrón entre dos puntos cuya diferencia de potencial (d.d.p), es de 1 voltio.
- **Kiloelectrón-voltio** : Se abrevia Kev y se expresa 1 Kev = 10^3 eV.
- **Megaelectrón-voltio** : Se abrevia Mev y se expresa 1 Mev = 10^6 eV.
- **Gigaelectrón-voltio** : Se abrevia Gev y se expresa 1 Gev = 10^9 eV.



DESCUBRIMIENTO DE LOS RAYOS X

Universidad de Würzburg, Baviera, Alemania, noviembre de 1895. El físico Wilhem Konrad Roentgen (Fig.2), termina su período como rector y se dispone a realizar una investigación científica acerca de la naturaleza de los rayos catódicos. Desde tiempo atrás se tenía la inquietud que estos rayos eran la clave para comprender la electricidad. Rontgen sabe de las experiencias de su colega Philipp Lenard con la extracción de rayos catódicos del tubo donde se generan a través de una muy delgada ventana de aluminio, pero ¿cómo se comportan estos rayos fuera del tubo, en el aire? ¿Qué tan lejos llegan? ¿Qué efectos tienen? .

Viernes 8 de noviembre de 1895. Laboratorio de Roentgen. Sobre su mesa de trabajo está el carrete de inducción, carrete de Rühmkorff, conectado a las baterías y listo para operar. De los bornes del carrete de inducción salen los alambres a los electrodos del tubo de rayos catódicos, donde tiene ya un buen vacío de 10^{-3} a 10^{-4} mm Hg, que ha alcanzado con la bomba de mercurio de Sprengel. Alrededor del tubo de rayos catódicos coloca una cartulina negra, que envuelve completamente al tubo sin dejar ranura. Acaba de cerrar el interruptor y activa así el carrete de inducción, cuando su vista capta un resplandor que viene de una placa fluorescente, que por casualidad está sobre su mesa de trabajo. El resplandor es visible pues el laboratorio está oscuro. Cierra las ventanas del laboratorio y ya en plena oscuridad la fluorescencia es más notoria. La fluorescencia es la respuesta del platinocianuro de bario de la placa a la luz que incide sobre ella: recibe luz y emite entonces un resplandor característico.

Observa que el resplandor continúa sin que la luz incida sobre la placa, en plena oscuridad. Esto es algo raro ¿qué es lo que excita al material de la placa fluorescente? ¿Es el resplandor producto de la activación del carrete de inducción sobre el tubo de rayos catódicos? Al conectar y desconectar varias veces este carrete confirma que en efecto la fluorescencia observada en la placa es una respuesta a la actividad del tubo de rayos catódicos. Pero el tubo está completamente cubierto por la cartulina negra y entonces ¿no hay posibilidad de envío de luz a la placa? Así Roentgen concluye que tiene que haber un agente desconocido, que al partir del tubo de rayos catódicos, atraviesa la cartulina y llega hasta la placa y activa en ella su fluorescencia. Al ubicar la placa a varios metros de distancia del tubo, todavía se presenta el resplandor. Entonces su alcance es apreciable. Ensayo con varios tipos de cubiertas: papel, libros, madera, para ubicar materiales como obstáculo entre el tubo y la placa pero el resplandor persiste, aunque su intensidad disminuye al aumentar la densidad o el espesor del material.

Se sucede el momento más glorioso de su vida, cuando pone su propia mano entre el tubo y la placa y ¡cuál no sería su sorpresa cuando en la placa fluorescente observa no la sombra normal de su mano, sino Claramente los huesos Roentgen es así, la primera persona que puede ver el interior del cuerpo sin tener que abrirlo quirúrgicamente.

Al continuar su trabajo experimental ha descubierto que los efectos de estos rayos especiales se pueden también registrar y con mayor claridad, en placas fotográficas. Invita



Capítulo II Rayos x.

a su esposa Bertha y le pide que ponga la mano, con anillos y pulseras, entre el tubo de rayos catódicos y la placa fotográfica (Fig.3). El resultado es la fotografía, hoy llamada radiografía, que le dará más tarde la vuelta al mundo.

Tras siete semanas de trabajo aislado en su laboratorio, Roentgen comunica al mundo su descubrimiento, y envía a la Sociedad de Física Médica de Würzburg el 28 de diciembre de 1895 un artículo titulado "Sobre un nuevo tipo de rayos, una comunicación preliminar."

Cuando le preguntaron qué pensaba de su magno descubrimiento, Roentgen respondió : "No pienso, investigo," pues consideraba que la ciencia no pertenecía sólo a los científicos. Al juzgar que sus descubrimientos pertenecían a la humanidad y no debían verse limitados por patentes, licencias o contratos de monopolios, renunció a la posibilidad de hacerse rico; no exigió derechos de autor por sus primeras imágenes radiográficas ni aceptó un título de nobleza que le ofrecieron y donó a la Universidad de Würzburg la dotación económica del Premio Nobel que le concedieron en 1901. Su generosidad contribuyó sin duda a la rápida difusión del nuevo descubrimiento y preparó el terreno para el extraordinario desarrollo ulterior del diagnóstico por imagen.

Al hablar de ese agente activo que produjo la fluorescencia y que pasaba a través de la cartulina negra que envolvía al tubo de rayos catódicos, lo llamó Rayos X: x por ser desconocidos, "rayos" por la formación regular de sombras de los objetos ubicados entre el tubo y la pantalla fluorescente y también por las fotografías de este agente con la cámara de agujero; es decir, ese agente se propagaba en línea recta en todas las direcciones.

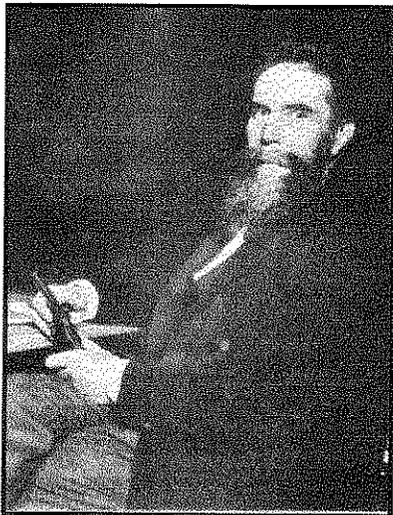


Fig. 2. Roentgen



Fig. 3. Primera Radiografía



RAYOS X

Son ondas electromagnéticas, todas ellas están constituidas por campos eléctricos y magnéticos variables, perpendiculares entre sí. Las ondas electromagnéticas son ondas transversales. Las ondas electromagnéticas son ondas que se propagan en el vacío. Con una velocidad en el vacío de 3 m/s.

La radiación electromagnética tiene naturaleza de partículas, viniendo dada por la teoría de los cuantos. Einstein postuló en 1905 que la radiación se propagaba en forma de cuantos de radiación o fotones con esta energía. En esta teoría se supone, por consiguiente, que la radiación electromagnética tiene naturaleza de partícula por cuanto la considera como partículas a los fotones (sin masa).

La radiación electromagnética tiene una naturaleza dualista, debiendo considerarse tanto como un movimiento ondulatorio como un fenómeno de partículas.

Los Rayos x, la radiación gamma y la luz son ondas electromagnéticas, que tienen en común su velocidad de propagación en el vacío y se diferencian por su longitud de onda. Así pues, la radiación gamma abarca longitudes de onda desde 10^{-14} a 10^{-10} m, los Rayos X desde 6.10 m. a 10 y la luz de 3.8×10 .

La relación entre la velocidad de propagación y la longitud de onda coincide con la frecuencia de la radiación electromagnética y la energía de los índices con la frecuencia de la radiación electromagnética y la energía de los fotones que la componen es directamente proporcional a su frecuencia por lo que la radiación gamma es más energética que los rayos X y éstos a su vez más que la luz, lo que hace que produzcan efectos distintos al interactuar con la materia.

FOTÓN

Partícula fundamental del campo electromagnético (sin masa). Hacia el año 1900 empezaron a estudiarse ciertos fenómenos provocados por radiaciones luminosas y que no podían ser explicados por la teoría electromagnética de la luz. Uno de tales fenómenos era el llamado efecto fotoeléctrico, consistente en la emisión de electrones por las superficies de los metales al ser iluminados por un rayo de luz. A los electrones así emitidos se les suele llamar fotoelectrones. Cuando los electrones desplazados de sus órbitas vuelven a sus órbitas normales, se libera la energía correspondiente mediante la emisión de fotones de radiación electromagnética.



MECANISMOS DE PRODUCCIÓN DE RAYOS X

1. *Bremsstrahlung o radiación de frenado*

Es el resultado de la "colisión" o interacción entre un electrón con alta velocidad y un núcleo. El fenómeno es el siguiente. El electrón acelerado que pasa cerca de un núcleo puede ser "deflectado" o desviado de su trayectoria original por las fuerzas de atracción coulombianas de atracción y pierden energía como radiación electromagnética. Fenómeno predicho por Maxwell en su teoría general sobre radiaciones electromagnéticas. De acuerdo a esta teoría, la energía se propaga en el espacio por campos electromagnéticos. Como un electrón con sus campos electromagnéticos asociados pasa por la vecindad de un núcleo, este sufre una fuerte desviación y una consecuente desaceleración con lo cual pierde energía cinética. Esa energía se transforma en radiación electromagnética es decir Rayos x.

Así, un electrón podrá tener una o más interacciones en el material pudiendo resultar en una parcial o total pérdida de la energía del electrón. El fotón bremsstrahlung resultante puede tener cualquier energía respecto a la energía inicial del electrón.

La dirección de emisión de los fotones bremsstrahlung depende de la energía de los electrones incidentes. (Fig.4).

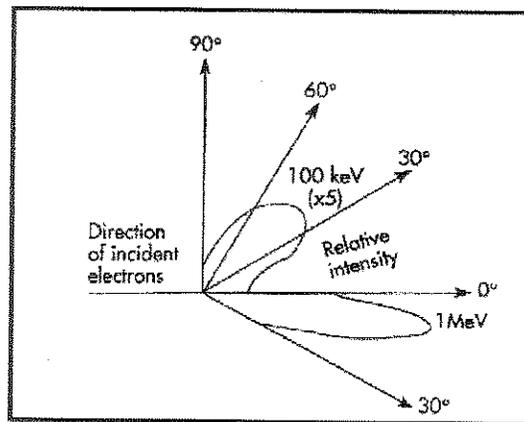


Fig. 4. Dirección del haz de Rayos x

2. *Radiación Característica.*

Se define como expresión de los niveles de energía de un átomo cualquiera. Cuando un electrón con energía cinética E_0 podría interactuar con los átomos del blanco eyectando un electrón orbital, especialmente de las capas electrónicas más internas, es decir, capas K,L,M. Esto deja al átomo ionizado. El electrón original debe tener una energía cinética igual o superior a la energía de ligado del electrón que arranca. Como se crea un hueco en una de las capas, por ejemplo en la capa K. Un electrón de las capas superiores(puede ser



Capítulo II Rayos x.

de cualquier capa), baja a ocupar el espacio producido, ya que , esta situación es muy antinatural.

La diferencia de energías de ligado entre la capa K y la capa que viene el electrón, es eliminada o es radiada en forma de radiación electromagnética. Esta es la radiación característica , ya que, es propia de cada elemento. Ejemplo: átomo de Wolframio, el cual tiene 74 electrones orbitales.

ESPECTRO DE ENERGÍAS DE LOS RAYOS X

Los Rayos x producidos en una máquina son heterogéneos en cuanto a su energía. El espectro de energías muestra una distribución continua de energías para los fotones de frenado, superpuestos a ellos los fotones característicos cuyo espectro es discreto.

La máxima energía fotónica posible, se da cuando el electrón incidente es bruscamente frenado y pierde toda su energía. Esta situación es poco probable y considerando la filtración inherente dada por el mismo blanco y la ampolla de vidrio del tubo vemos que la intensidad relativa de estos llega a cero.

Sin embargo hay un aumento rápido y pronunciado en la intensidad, a medida que aparecen fotones menos energéticos para luego ir disminuyendo paulatinamente. La intensidad teórica relativa de un haz de rayos x será proporcional a la primera potencia de Z, la ecuación es la siguiente:

$$I = CZ(E_{\max} - E).$$

Donde:

- E_{\max} = Máxima energía con que puede producirse un fotón y que será igual a la energía del electrón incidente.
- I = Es la intensidad de fotones con energía E .
- Z = Es el número atómico del blanco.
- C = Es una constante de proporcionalidad.



Capítulo II Rayos x.

PROPIEDADES PRINCIPALES DE LOS RAYOS X

1. Poder de Penetración.

El gran poder de penetración de los Rayos x puede expresarse de otra manera. Puede decirse también que la intensidad de un haz de Rayos x queda atenuado.

Esta atenuación depende de:

- Naturaleza de la sustancia.
- Densidad de la sustancia.
- Espesor de la misma.
- Calidad de la radiación.

2. Efecto Luminiscente:

Capacidad que tienen ciertos elementos que al interactuar con los Rayos x, emiten luz.

3. Efecto Fotográfico:

Lo mismo que los fotones luminosos, los fotones x pueden actuar sobre una emulsión fotográfica de tal modo que después del revelado y fijado aparezca un ennegrecimiento.

4. Efecto de Ionización de Gases:

Es la capacidad de arrancar electrones orbitales, dejando a los átomos del gas cargado positivamente, formando un par de iones.

5. Efectos Biológicos:

Producto del traspaso de energía desde la radiación a los medios biológicos, es que se alteran macromoléculas, y estas modificaciones se manifiestan en los seres vivos.



Capítulo III Radiactividad.

RADIATIVIDAD

Es la emisión espontánea de energía a través de partículas o fotones gamma, cuando un nucleido es inestable, esta liberación de energía se realiza a través del proceso de Decaimiento Radiactivo.

HISTORIA

El 20 de Enero de 1896, en la Academia de París, Henri Poincaré dio a conocer el descubrimiento de W. C. Roentgen y mostró al mundo las primeras radiografías.

Dijo: "La fuente de los Rayos X, parece ser la mancha fluorescente producida por el impacto del flujo catódico sobre la pared de vidrio del tubo generador". "Valdría la pena investigar si la fluorescencia de los cristales no está acompañada por la radiación x".

Así Henri Becquerel comienza a investigar este fenómeno. Para sus experimentos usó algunos cristales fluorescentes como el sulfato doble de Uranio y Potasio.

El 24 de Febrero comunica a la Academia que: "Los rayos emitidos por la sal de Uranio expuesta a la luz solar impresionan (a través de una gruesa envoltura de papel), una placa fotográfica".

Aparentemente Poincaré tenía razón, ya que, el 26 de Febrero, Becquerel debió interrumpir sus experiencias ya que ese día amaneció nublado y no salió el sol en todo el día. Como tenía todo preparado para la experiencia, Becquerel guardó las sales de Uranio y la placa fotográfica en un cajón. Sorpresa, al revelar la placa, esta estaba velada. No intervino ni el sol ni ninguna fluorescencia visible. Siguió investigando y se dio cuenta que fueran o no fluorescentes las sales, o aunque fuera Uranio puro, los misteriosos rayos seguían presentes. Así se descubrieron los Rayos Uránicos ó Rayos Becquerel. (Fig.5).

Este descubrimiento atrajo la atención de Pierre Curie quién junto a su esposa Marie Curie, se preguntaron. ¿No habrá otros elementos que emitan rayos similares a los del Uranio?.

En 1898, M. Curie encontró que el Torio también emitía los rayos Becquerel, ya que ionizaban el aire.

Sin embargo encontró que dos minerales del Uranio: la Pechblenda (óxido de Uranio) y la Chalcólita (fosfato doble de Cobre y Uranio) eran fuentes de radiación más abundante que el mismo Uranio. ¿No habrá en esos minerales otros elementos más activos que el Uranio y el Torio? Así se inicia la búsqueda de esas sustancias a partir de la Pechblenda.



Capítulo III Radiactividad.

Primero descubrieron el Polonium y meses después del Radium. Pero en cantidades infinitesimales. Para lograr una mayor cantidad, por cristalización fraccionada obtuvieron 3 décimas de gramo de Cloruro de Radium a partir de una tonelada de Pechblenda.

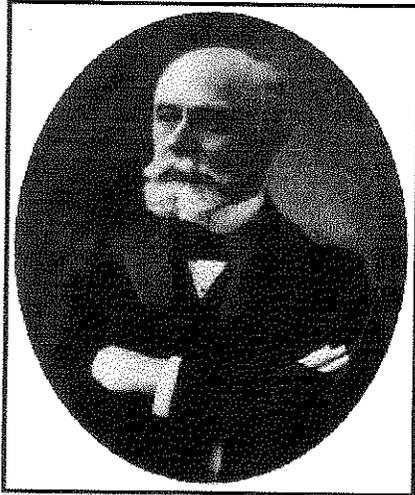


Fig. 5. Becquerel

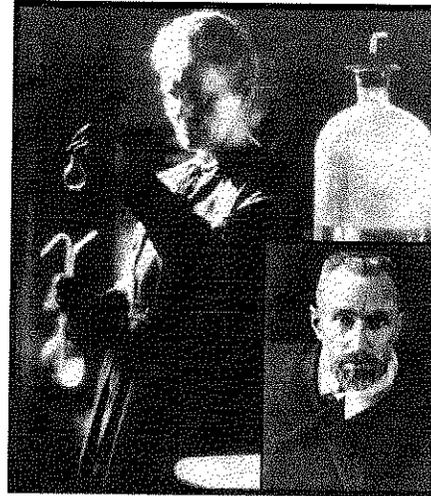


Fig. 6. Matrimonio Curie

En 1899, Rutherford hizo pasar la radiación de Uranio a través de hojas metálicas de diferentes espesores y demostró que una parte de la radiación es más rápidamente absorbida que la otra. Concluyó entonces que habían dos tipos de rayos; a los primeros, más absorbidos los llamó rayos alfa y los segundos, más penetrantes, rayos beta.

En 1900, Paul Villard descubrió un tercer haz de radiación, mucho más penetrante que los beta y no desviados por campos magnéticos o eléctricos y los llamó Rayos Gamma.

Estos rayos Gamma tenían propiedades similares a los Rayos x de Roentgen: ionizar gases, excitar la fluorescencia de cristales e impresionar emulsiones fotográficas.

En 1912, Laue demostró que los Rayos x eran ondas electromagnéticas de alta frecuencia y como consecuencia de las perturbaciones que la expulsión de los electrones (rayos beta) provocan en el átomo, la radiación gamma tiene una causa similar a la de los Rayos x, producidos en los tubos de Crookes. Las longitudes de onda de los rayos gamma, mucho más pequeñas que las de los Rayos x, fueron medidas por Compton y otros.



DECAIMIENTO RADIATIVO

El proceso de decaimiento radiactivo está relacionado con las fuerzas nucleares involucradas. Entre los protones (cargados positivamente) existe una fuerte repulsión, sin embargo también están presentes grandes fuerzas de atracción nuclear entre los neutrones y los protones, los que le dan la forma al núcleo atómico. Se sabe que la fuerza entre nucleones depende de la distancia entre ellos y que sólo son efectivas a muy corta distancia.

Para núcleos grandes (pesados), las fuerzas de atracción nuclear pueden resultar relativamente débiles en comparación con las fuerzas eléctricas de repulsión de los protones en los lados opuestos del núcleo. Así los grandes núcleos son menos estables que los pequeños. Porque los neutrones interactúan sólo a través de la fuerza nuclear atractiva, se les puede considerar como partículas estabilizadoras del núcleo.

Por ejemplo, en un núcleo liviano sólo se requieren igual número de neutrones y de protones para permanecer estable, pero en un núcleo más pesado, el número de neutrones puede llegar a ser 1,5 veces mayor que el de protones con el fin de contrarrestar las fuerzas eléctricas de repulsión Coulombianas que ejercen los protones.

En estos núcleos pesados, se produce entonces un desequilibrio en las cantidades de los componentes del núcleo, generando un núcleo inestable. Estos núcleos emitirán partículas (se dice que decaen) procurando la estabilidad del mismo.

La Constante de Decaimiento de un núcleo radiactivo, se define como la fracción del total de átomos que decaen por unidad de tiempo y se denota por el símbolo λ .

(1)

$$\lambda = [\ln 2 / T_{1/2}]$$

El proceso de decaimiento radiactivo se puede describir matemáticamente como sigue:

- si N_0 núcleos radiactivos están presentes inicialmente en un ejemplo particular, el número de núcleos radiactivos que quedan (N), pasado un tiempo t , está dado por la ecuación:

(2)

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

La *Actividad* (A) de un radioelemento se define como el número total de desintegraciones por unidad de tiempo-intervalo y está dada por la siguiente relación:

$$A = N / t = \lambda \cdot N$$

→

$$A = \lambda \cdot N$$



Capítulo III Radiactividad.

La constante de Decaimiento (ecuación 1), puede expresarse en términos de Actividad:

(3)
$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

La unidad de la Actividad de un radionucleido es el *Curie* (Ci). Así se tiene que:

- 1 Ci = 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo (dps).
- 1 Bq = 1 desintegración por segundo.

PERÍODO O PERÍODO DE SEMI-DESINTEGRACIÓN

El período ($T_{1/2}$) de un radioelemento corresponde al tiempo t , requerido para que el número de átomos en un ejemplo particular, decaiga a la mitad, a partir de un tiempo inicial t_0 . El $T_{1/2}$ se relaciona con la constante de decaimiento (λ) según la siguiente ecuación:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

VIDA MEDIA

La vida media (T_a) de un radionucleido se relaciona con la constante de decaimiento y su $T_{1/2}$ por la siguiente relación:

$$T_a = (1 / \lambda) = 1.44 \cdot T_{1/2}$$

La vida media corresponde al tiempo promedio que le toma a un núcleo del radioelemento en desintegrarse, es decir, el promedio de vida que tiene un núcleo del radioelemento antes de decaer.

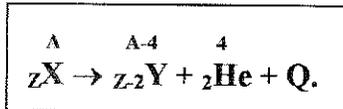


Capítulo III Radiactividad.

FORMAS DE DECAIMIENTO

1. Emisión de Partículas alfa:

- Una partícula alfa corresponde a un átomo de helio ${}_2^4\text{H}$.
- Esta partícula esta cargada positivamente.
- La energía que presentan las partículas alfa es de espectro discreto, que va, de los 4 a 10 Mev.

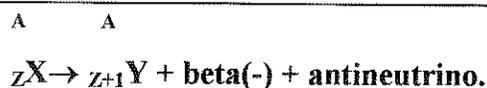
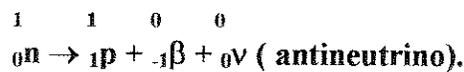


- Ejemplo: ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$.

2. Emisión de partículas Beta:

- Esta forma de emisión se caracteriza por la eyección de un electrón positivo o negativo.
- Como en el núcleo no existen electrones, estos se forman por la transformación de un neutrón en protón o viceversa.
- El neutrino como el antineutrino ,son partículas sin masa y sin carga que se mueven a la velocidad de la luz.
- Fueron creados por consideraciones teóricas, para igualar las energías a ambos lados de la ecuación.
- El espectro de las desintegraciones Beta es continua, va de los 0.17 a 4 Mev.

3. Emisión de partículas Beta (-):

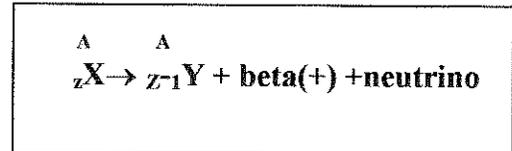
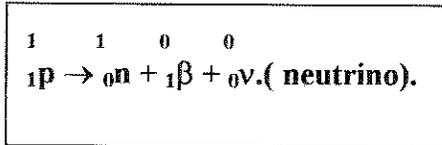




Capítulo III Radiactividad.

- Ejemplo: ${}_{15}^{32}\text{P} \rightarrow {}_{16}^{32}\text{S} + {}_1^0\beta + {}_0^0\nu$.

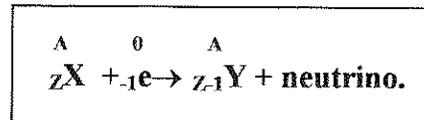
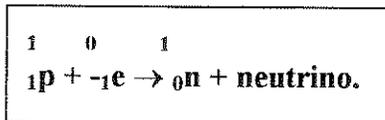
4. Emisión de partículas Beta (+):



- Ejemplo: ${}_{11}^{23}\text{Na} \rightarrow {}_{10}^{23}\text{Ne} + {}_1^0\beta + {}_0^0\nu. (\text{neutrino}).$

5. Captura electrónica:

- Proceso que consiste en que el núcleo captura a un electrón de las órbitas mas cercanas.
- El electrón se une a un protón para producir a un neutrón, con la emisión de un neutrino. Es pues, un proceso con las mismas consecuencias que la emisión Beta (+).



- Como al irse un electrón de la capa K, por ejemplo al núcleo, se produce un hueco en la órbita del átomo, al ser ocupada esa vacante por un electrón de capas superiores se produce la emisión de fotón x característico. Este fotón puede ser absorbido por los electrones del mismo átomo, eyectándose un nuevo electrón (electrón Auger). Este proceso se puede describir como un efecto fotoeléctrico interno.



FORMAS DE DESEXITACIÓN

1. Emisión espontánea de fotones gamma.

2. Conversión interna:

- El exceso de energía nuclear pasa directamente a un electrón orbital, el cual es eyectado del átomo.
- Este proceso también se puede considerar como un efecto fotoeléctrico interno, ya que el rayo gamma que escapa del núcleo interactúa con un electrón orbital del mismo átomo.
- También se produce Rayos x característicos, por la ocupación de electrones de capas superiores a las órbitas que se quedaron vacías por la eyección de sus electrones.

3. Transición Isomérica:

- En la mayoría de las transformaciones radiactivas, los núcleos pierden el exceso de energía inmediatamente en forma de fotones gamma o conversión interna. Sin embargo, en algunos casos el estado de excitación persiste en el tiempo, en este caso se dice que el núcleo está en estado metaestable.
- El átomo metaestable es un Isómero del átomo final.
- Ejemplo: ${}_{43}^{99}\text{Tc}$ y ${}_{43}^{99\text{m}}\text{Tc}$. Su $T_{1/2}$ es de 6 horas.



Capítulo IV Interacción de la Radiación con la Materia.

GENERALIDADES

La radiación ionizante, como hemos visto, puede estar compuesta tanto por partículas cargadas (partículas alfa, partículas beta) como por partículas sin carga como son los neutrones. Además se cuentan las emisiones de energía pura (ondas electromagnéticas de alta frecuencia) como lo son los Rayos x y los Rayos Gamma, los cuales carecen de masa y de carga. En general se denominan partículas directamente ionizantes a las emisiones particuladas y partículas indirectamente ionizantes a las emisiones de carácter puramente energético (fotones).

INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS α

Las partículas alfa son las menos penetrantes de todas las radiaciones. Su alcance en el aire es apenas de unos pocos centímetros, mientras que en el tejido vivo es sólo de algunos micrones. Estas partículas, constituidas por dos protones y dos neutrones, poseen una masa de aproximadamente 6000 veces superior a la de un electrón y por lo tanto, a igual energía cinética, las partículas alfa presentan una velocidad mucho menor. Esto unido al hecho que poseen doble carga positiva, le confieren a las partículas alfa una gran probabilidad de interacción con el medio.

Al pasar cerca de un átomo neutro, las partículas alfa ejercen una fuerza atractiva sobre los electrones (que tienen carga opuesta) mas débilmente ligados al átomo, arrancándolos de su orbital. Es así como éstas provocan la ionización o excitación de los átomos. Estas fuerzas electrostáticas entre electrones y partículas alfa, van frenando a estas últimas hasta que pierden su energía cinética y finalmente capturan dos electrones libres, transformándose en un átomo neutro de helio.

La radiación alfa emitida por un determinado radioisótopo es monoenergético, es decir que posee un espectro discreto de energía. Por lo tanto, todas las partículas alfa emitidas por un determinado radioisótopo tienen igual energía y por tanto igual probabilidad de interacción y igual alcance.

En la figura 7 se muestra como la intensidad de la radiación alfa se mantiene constante hasta que de pronto son rápidamente frenadas y absorbidas en su totalidad casi simultáneamente.

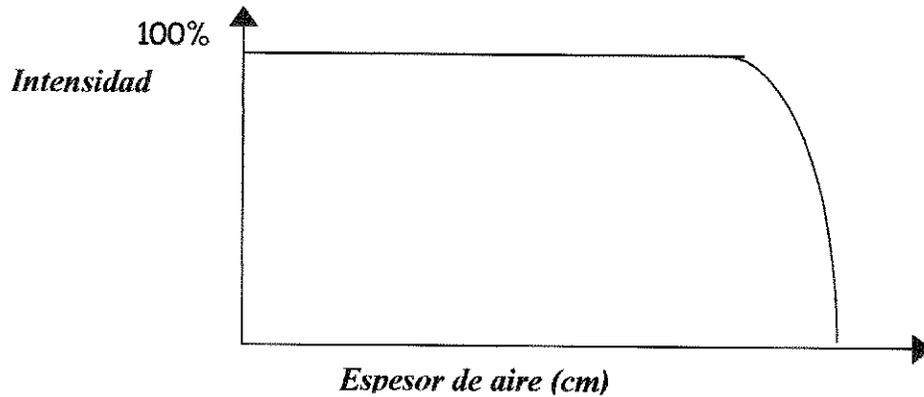


Fig. 7. Alcance relativo de partículas Alfa en el aire.

El alcance de las partículas alfa en un sólido puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$RS = \frac{3.2 \times 10^{-4} Ra \sqrt{A}}{\rho}$$

donde:

- Ra = alcance relativo en el aire
- A = número másico del sólido
- ρ = Densidad del sólido

IONIZACION ESPECIFICA

La ionización específica de las partículas alfa es muy alta y puede variar entre 5000 y 80000 pares iónicos por centímetro de recorrido. A medida que las partículas alfa avanzan en el aire, su velocidad disminuye, aumentando su ionización específica, llegando a alcanzar su valor máximo al final de su recorrido (según curva de Bragg). (Fig.8).

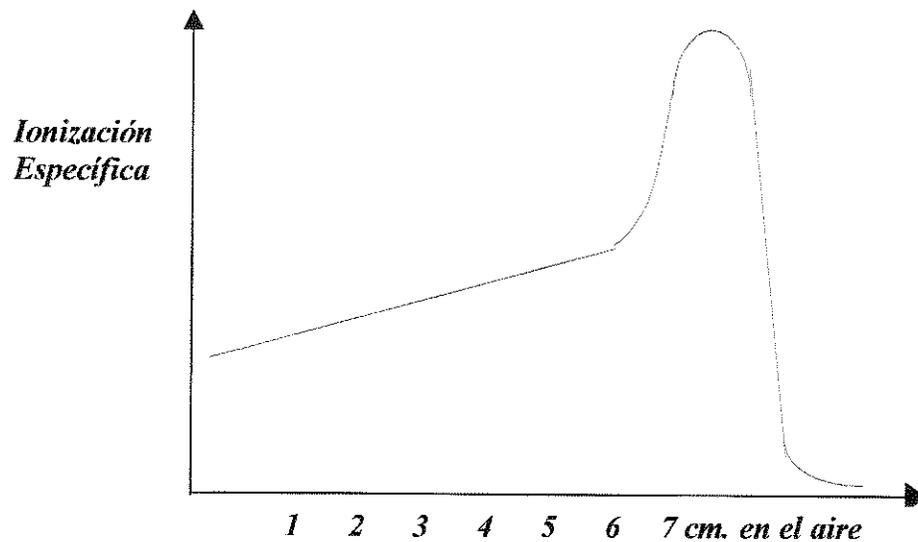


Fig. 8. Ionización Específica de las Partículas Alfa en el aire.

PODER DE FRENADO

El poder de frenado de un emisor Alfa puede corresponder a la fracción del alcance de las partículas alfa en un absorbente respecto del alcance en el aire. Puede calcularse según la relación:

$$\text{Poder de frenado} = \frac{\text{alcance de partículas } \alpha \text{ en el aire}}{\text{alcance partículas } \alpha \text{ en el absorbente}}$$

INTERACCIÓN DE LAS PARTÍCULAS β

Las partículas beta poseen mucha menor masa que las partículas alfa y por lo tanto a igual energía cinética, tienen mayor velocidad. Como además poseen sólo una carga eléctrica negativa, su probabilidad de interacción es menor y por tanto su penetración en la materia es mayor.

Al aproximarse una partícula beta a un electrón orbital, los campos eléctricos de ambos interactúan y el electrón orbital puede pasar a otra órbita más externa o desligarse de su núcleo, dejando el átomo ionizado o excitado. El electrón expulsado puede recibir suficiente energía como para comportarse como una partícula beta y producir ionizaciones secundarias.



Capítulo IV Interacción de la Radiación con la Materia.

Debido a su reducida masa, las partículas beta (β^-), ve alterada su trayectoria en cada interacción con los electrones orbitales que encuentra a su paso, lo que resulta en una trayectoria muy tortuosa y difícil de predecir.

La radiación beta emitida por un radioisótopo no es monoenergética sino que las energías de las partículas son muy variadas y conforman un espectro continuo de energías. Por esto, es que el alcance de las partículas beta no será el mismo para todas ellas sino que diferirá según el componente energético de las mismas. En la figura 9 se muestra como la intensidad de un haz de radiación beta disminuye a medida que aumenta el espesor del material absorbente.

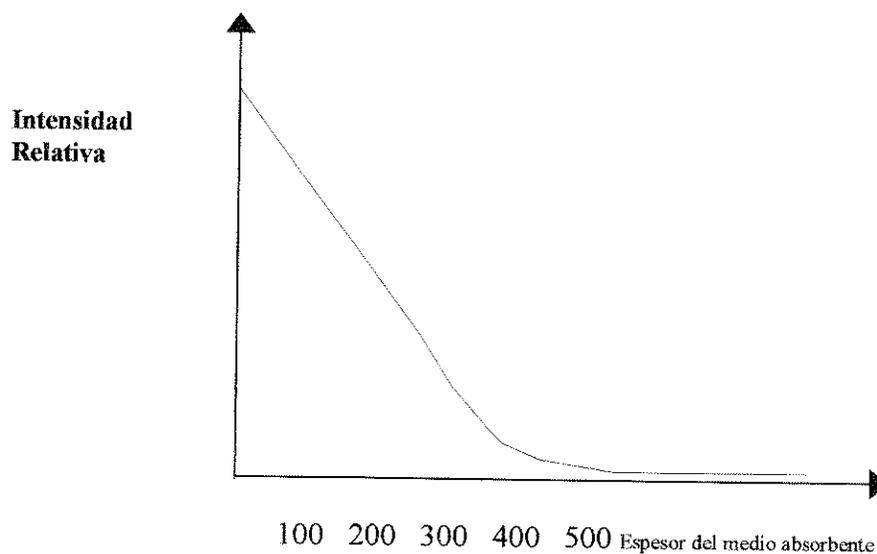


Fig. 9. Absorción de las Partículas Beta según el espesor másico del absorbente.

Por estas razones es que las partículas beta no poseen un alcance preciso como lo tienen las partículas alfa. Sin embargo es posible establecer un espesor de absorbente mas o menos definido, capaz de reducir a casi cero la ionización producida por estas partículas, excepto la radiación Bremsstrahlung.

La absorción es prácticamente independiente del número atómico (z) del material absorbente, pero sí es función de su densidad, por lo que es conveniente expresar la atenuación en función del producto espesor x densidad :

$$\text{Espesor másico} = X \cdot \rho \text{ (cm x g/cm}^3\text{)} = \text{(g / cm}^2\text{)}$$



Capítulo IV Interacción de la Radiación con la Materia.

Esta es una forma de expresar el espesor teniendo en cuenta la densidad. Así pueden sumarse espesores de distintos materiales de diversos números atómicos y densidades.

El alcance máximo de las partículas beta es función de su energía máxima y de la densidad del material con el que interactúa y resulta ser más ó menos lineal entre los 0.8 y 3.0 Mev.

Así el espesor ($R \cdot \rho$) puede expresarse por la siguiente relación:

$$R \cdot \rho \text{ (g / cm}^2\text{)} = 0.54 \cdot E_{\text{max}} \text{ (MeV)} - 0.15$$

Donde:

- R = alcance de la partícula beta
- ρ = densidad del material absorbente

Por ejemplo, se requiere estimar el alcance máximo de un haz de rayos beta, con una energía máxima de 3.0 Mev, en el hormigón cuya densidad es de 2.8 (g/cm^3).

De la ecuación anterior se desprende que el valor máximo de $R \cdot \rho$ es de 1.47 (g/cm^2):

$$R \cdot \rho = 0.54 \cdot 3.0 \text{ (Mev)} - 0.15 = 1.47 \text{ (g / cm}^2\text{)}$$

Luego, como ρ vale 2.8 (g / cm^3), entonces:

$$R = 0.53 \text{ cm.}$$



Capítulo IV Interacción de la Radiación con la Materia.

INTERACCIÓN DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA CON LA MATERIA RAYOS X y GAMMA.

Como ya vimos anteriormente, la radiación electromagnética no posee ni masa ni carga eléctrica como la radiación particulada (partículas alfa y beta), lo que le confiere a la radiación electromagnética una muy baja probabilidad de interacción con la materia y por ende una gran capacidad de penetración.

Los procesos por los cuales la radiación electromagnética cede su energía a los átomos de la materia y como se provoca su ionización, dependen de varios factores o efectos y cuyos mecanismos discutiremos a continuación.

EFFECTO FOTOELÉCTRICO

Se denomina así al proceso por el cual la energía de un fotón es entregada completamente a un electrón orbital de las capas mas internas del átomo o más fuertemente ligados. (Fig.10).

Parte de la energía del fotón es usada en desprender al electrón de su órbita y el resto es adquirida por el electrón como energía cinética, lo que le permite ser eyectado con gran velocidad desde el átomo.

Así, $E_{\text{electrón}} = E_{\text{fotón}} - E_{\text{ionización}}$, donde $E_{\text{ionización}} = E_{\text{ligado}} + E_{\text{cinética del electrón}}$.

El electrón expulsado del átomo disipa su energía en sucesivas excitaciones e ionizaciones secundarias a su paso por la materia.

La probabilidad de ocurrencia de este efecto se denota como τ (tau).

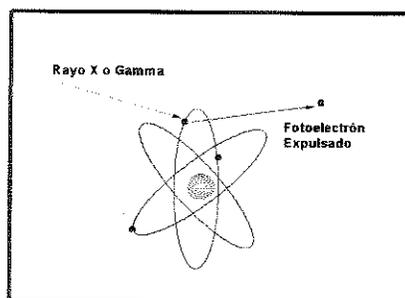


Fig. 10. Efecto Fotoeléctrico.



Capítulo IV Interacción de la Radiación con la Materia.

Este proceso es muy dependiente de la energía de la radiación incidente y del número atómico del material con el que interactúa. La absorción de energía por unidad de masa de dicho material es aproximadamente proporcional a:

$$1/E^3 \text{ y a } Z^3$$

Mientras más cercana es la energía de los fotones a la energía de ionización, más probable es la ocurrencia del efecto fotoeléctrico. Es decir que este efecto aparece con mayor probabilidad en haces de radiación X con energías bajas.

EFECTO COMPTON

A medida que la energía de los fotones aumenta, la probabilidad de que puedan ceder toda su energía a un electrón orbital disminuye. Cuando un fotón cede parte de su energía al orbital quedándose con el remanente se dice que estamos en presencia del efecto Compton. El átomo resulta ionizado y el electrón es eyectado de éste con cierta energía cinética, el cual provocará ionizaciones secundarias. El fotón incidente, continúa su trayectoria pero con menor energía y con un cambio en su dirección de incidencia. (Fig.11).

El balance energético queda así:

$$E_{\text{fotón incidente}} = E_{\text{ionización}} + E_{\text{electrón}} + E_{\text{fotón desviado}}$$

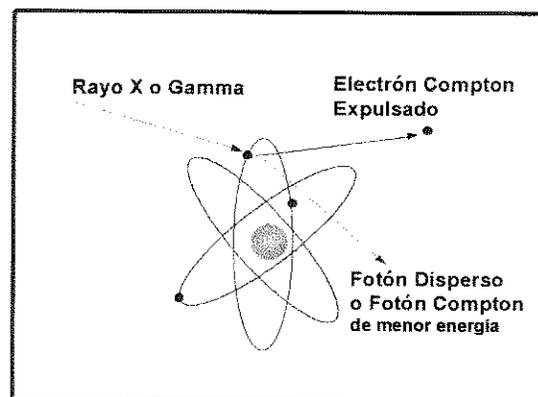


Fig. 11. Esquema del Efecto Compton

El hecho de que la energía de la radiación incidente disminuya, nos indica que al dispersarse, ésta aumenta su longitud de onda y por lo tanto disminuye su frecuencia.

Cuando la radiación electromagnética interactúa con la materia a través del efecto Compton se produce la absorción y la dispersión parcial de la energía que transporta. Así, la



Capítulo IV Interacción de la Radiación con la Materia.

atenuación de la intensidad de un haz de radiación, en la dirección de su trayectoria inicial resulta ser la suma de dos procesos: la verdadera absorción de energía por parte del material y la dispersión de energía que se produce simultáneamente .

$$E_{\text{atenuada}} = E_{\text{absorbida}} + E_{\text{dispersada}}$$

Este efecto es menos dependiente de la energía de la radiación que el efecto fotoeléctrico, si bien la probabilidad de la interacción Compton disminuye a energías altas. También es prácticamente independiente del número atómico del material y la absorción y atenuación de energía por unidad de masa resultan ser aproximadamente iguales para todas las sustancias.

La probabilidad de ocurrencia del efecto Compton se denota con la letra griega σ (sigma).

FORMACIÓN DE PARES

Cuando los fotones poseen suficiente energía (más de 1.02 Mev) la radiación electromagnética puede convertirse en materia como resultado de su interacción con el campo eléctrico del núcleo. Un fotón se convierte en dos partículas: un electrón (e^-) y un positrón (e^+); cada una de las cuales posee una masa cuyo equivalente energético es de 0.51 MeV, por lo cual los fotones deben poseer una energía superior al doble para dar lugar a la formación de pares.

La energía en exceso de 1.02 Mev es adquirida por el electrón y el positrón como energía cinética y estas partículas excitan e ionizan los átomos que encuentran en su camino. Finalmente el positrón, una vez que a perdido su energía cinética, se combina con un electrón convirtiéndose en dos fotones de 0.51 Mev cada uno, que son emitidos en direcciones opuestas. (Fig.12).

Como consecuencia de este proceso la radiación electromagnética incidente es absorbida y además dispersada, con la diferencia, con respecto al efecto Compton, que la dispersión no ocurre en la misma zona de incidencia sino a cierta distancia dada por el recorrido de los positrones antes de recombinarse.

La probabilidad de ocurrencia del fenómeno de formación de pares es comúnmente descrito por la letra griega Π (pi).



Capítulo IV Interacción de la Radiación con la Materia.

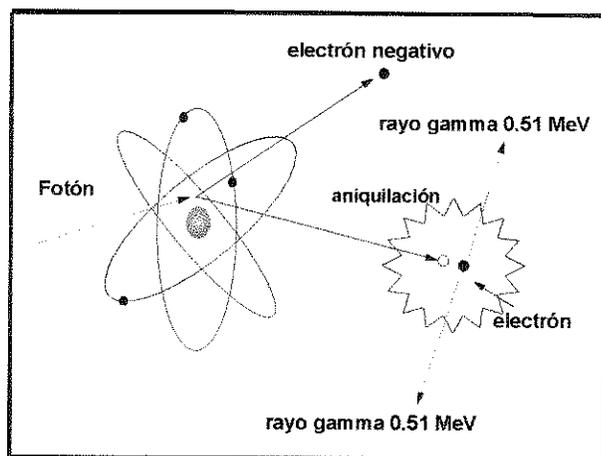


Fig. 12 . Esquema formación de pares y posterior aniquilación del positrón

La posibilidad de interacción por formación de pares aumenta con energías mayores y la absorción y atenuación de energía por unidad de masa se incrementan aproximadamente con la primera potencia del número atómico del material absorbente.



Capítulo V Magnitudes Radiológicas.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de establecer normas de protección contra los efectos biológicos perjudiciales, producidos por las radiaciones ionizantes, se hizo patente a los pocos meses del descubrimiento de los Rayos x por Roentgen en 1895 y el comienzo del trabajo con elementos radiactivos en 1896.

Como consecuencia del trabajo con radiaciones ionizantes, algunos operadores en este campo, comenzaron a manifestar algunos efectos nocivos. El análisis de síntomas patológicos de un conjunto de radiólogos, permitió establecer en 1922 que la incidencia de cáncer en este grupo de trabajo, era significativamente, más alta respecto a otros médicos, circunstancia ésta que demostró la peligrosidad de las radiaciones ionizantes y la necesidad de establecer normas específicas de radioprotección, con la introducción de nuevas magnitudes radiológicas, así como sus correspondientes unidades.

La normativa internacional que inició la normalización de las magnitudes y unidades en el campo de la Metrología, tuvo su arranque cuando en 1875, 17 países firmaron la Convención del Metro y se creó la oficina internacional de Pesos y Medidas (BIPM).

En 1925, se creó la Comisión Internacional de Medidas y Unidades Radiológicas (ICRU), cuya misión más importante se centra en hacer recomendaciones respecto a:

- Magnitudes y unidades de radiación y radiactividad.
- Métodos de medida y campos de aplicación en Radiobiología y Radiología Clínica.
- Datos y constantes físicas requeridas para la aplicación de estos procedimientos.

De 1953 a 1962 la ICRU estableció las definiciones de las magnitudes: dosis absorbida, exposición, dosis equivalente y actividad, y sus correspondientes unidades especiales: Rad, Renguenio, Rem y Curio. En mayo de 1975 a propuesta de la ICRU, la BIMP adoptó como unidades SI el Bequerelio y el Gray, abriéndose un período de 10 años para la adopción definitiva de las nuevas unidades.

DOSIS ABSORBIDA. CONSIDERACIONES GENERALES

La CIUMR ha definido la EXPOSICIÓN (simbolizada por **X**), como la razón:

$$X = \Delta Q / \Delta m$$

donde ΔQ (léase delta q) “ es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo (+ ó -) producida en el aire cuando todos los electrones liberados por los fotones en el aire cuya masa Δm (léase delta m) quedan completamente frenados en el aire” .



Capítulo V Magnitudes Radiológicas.

La unidad de Exposición es el C / kg de aire, aunque todavía se continúa utilizando la unidad especial Roentgen (R), la que se ha definido como:

$$1 \text{ R} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ Coulombs / kg de aire (stp)}$$

La sigla (stp), indica condiciones normales o estándar de temperatura y presión atmosférica. Usualmente corresponden a 20 °C y 750 mm de Hg respectivamente.

¿Por qué 1 R es igual a esa cantidad de C / kg de aire?

Como $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg de aire es equivalente a 1 unidad electrostática de carga (esu) por cada cc de aire seco a STP, tenemos que:

$$1 \text{ R} = \frac{1 \text{ esu}}{\text{cm}^3 \text{ aire (STP)}} = \frac{33,3 \times 10^{-10} \text{ C}}{\text{cm}^3 \text{ aire (STP)}} = \frac{2,082 \times 10^9 \text{ pares de iones}}{\text{cm}^3 \text{ aire (STP)}}$$

$$= 773,4 \frac{\text{esu}}{\text{gr de aire}} = 1,610 \times 10^{12} \frac{\text{pares de iones}}{\text{gr de aire}}$$

Cuando los Rayos x o Gamma pasan a través del aire, se producen fotoelectrones y electrones Compton o pares de electrones que se ponen en movimiento. Estos electrones de alta velocidad, corpúsculos o partículas directamente ionizantes, como son llamadas, producen ionización en su trayectoria. O sea que al pasar a través del aire, estas partículas van removiendo los electrones externos de los átomos, dejando igual número de cargas positivas y negativas. Estas podrían volver a recombinarse, por atracción mutua. Sin embargo al estar en un campo eléctrico, producido por una batería, las cargas positivas serán repelidas por la placa positiva y serán atraídas por la placa negativa. Así, los iones producidos por la radiación ionizante aparecerán como una corriente eléctrica en un galvanómetro (fig.13). Después de una irradiación, se producirá un número definido de iones, los que generarán una cierta corriente en el galvanómetro, cuya magnitud se relaciona con un cierto valor de exposición.

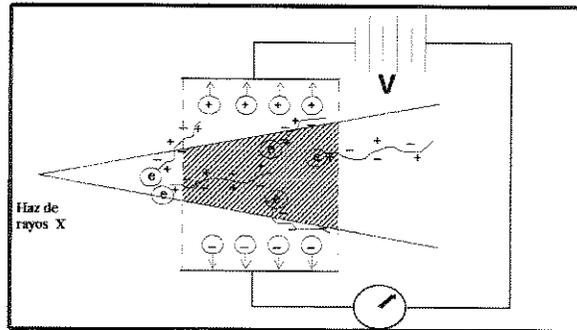


Figura 13 . Diagrama ilustrando el equilibrio electrónico, en una cámara de ionización no hermética.

En el pasado, el roentgen se usó de dos formas: 1) como una medición de la radiación que emerge desde una máquina y 2) como una medición de la energía absorbida por un paciente. Bajo ciertas circunstancias estos dos conceptos son compatibles, pero especialmente cuando hablamos de energías por sobre los 3 Mev, estos conceptos no son aplicables. Además, el concepto de roentgen se ha definido, inicialmente sólo para radiaciones electromagnéticas (fotones), sin que se pudiera aplicar a partículas tales como electrones, protones y neutrones. Hasta el día de hoy se mantiene la costumbre de referirse a exposición, medida en R, cuando se habla de rayos X o Gamma, en el aire. Por esto y para tener en cuenta la cantidad de energía entregada al tejido vivo es que se definió una nueva unidad de dosis de radiación: el Rad, establecido en el año 1956.

Así el roentgen es la unidad de Exposición (X) y el Rad es la unidad de dosis Absorbida.

DOSIS ABSORBIDA

Dado que el Rad es una unidad de dosis bastante pequeña, es posible utilizar algunos múltiplos de éste, como el Gray (Gy).

$$1 \text{ Rad} = 0.01 \text{ Gy}$$

Entonces, la cantidad de energía absorbida por unidad de masa de un material irradiado, se define como:

$$D = \frac{d\varepsilon}{d_m}$$

Donde $d\varepsilon$ es la energía media impartida por la radiación ionizante a una materia de masa d_m . El valor de la dosis absorbida puede especificarse para cualquier medio y para cualquier tipo de radiación ionizante, sea ésta corpuscular o de origen electromagnético.



Capítulo V Magnitudes Radiológicas.

La unidad utilizada para especificar la dosis absorbida es el J / kg , y el nombre especial que recibe es el Gray (Gy).

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J / kg} = 100 \text{ rad}$$

La tasa de dosis absorbida está definida por:

- $D = dD / dt$; donde dt corresponde a un tiempo de irradiación.

La unidad de tasa de dosis absorbida es el J / kg·s

$$1 \text{ Gy / s} = 1 \text{ J / kg·s}$$

Cuando se trabaja con partículas indirectamente ionizantes, como los fotones, es conveniente describir la energía liberada por ellas al interactuar con la materia. Esta magnitud radiológica Kerma (Kinetic Energy released per unit Mass), energía cinética liberada en el material, expresada a veces por unidad de masa, viene dada por el cociente:

$$K = dE_{tr} / d_m ;$$

Donde dE_{tr} es la suma de las energías cinéticas de todas las partículas cargadas liberadas por las interacciones de las partículas ionizantes no cargadas en una masa d_m .

La unidad usada para la magnitud Kerma es el J / kg, y su nombre especial es el Gray (Gy). La magnitud Kerma, que puede referirse a cualquier medio material, está estrechamente relacionada con la magnitud exposición, que como vimos mas arriba, se acostumbra aplicar sólo a fotones que interactúan con el aire.

Por tanto, la exposición, según ya fue definida, equivale en términos de ionización, al Kerma en aire, con la diferencia de que ΔQ no incluye la ionización producida por la absorción de la radiación de frenado (bremsstrahlung) emitida por los electrones.

Para determinar la dosis absorbida en haces de fotones o electrones es necesario conocer ciertos parámetros como los coeficientes de absorción de fotones y los poderes de frenado de electrones, entre otros, pero éstos mismos están fuera del alcance de este curso.



Capítulo V Magnitudes Radiológicas.

CALIDAD DE UN HAZ DE FOTONES

Se entiende por calidad del haz de radiación, la energía del haz, expresado en unidades de HVL (Half Value Layer) o capa hemi-reductora.

Por tanto el HVL es el espesor (expresado en mm.), de un material absorbente, necesario para atenuar a la mitad la intensidad del haz de radiación incidente.

Este valor se puede deducir de la siguiente ecuación exponencial:

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

Donde:

- μ , es el coeficiente de atenuación lineal.

Al despejar x (espesor del absorbente, expresado en cm) y disminuir N a la mitad, nos queda:

$$x = \ln 2 / \mu$$

**MAGNITUDES DE APLICACIÓN EN PROTECCIÓN RADIOLÓGICA****1. Dosis equivalente (H_T).**

A iguales dosis de radiaciones, de diferentes “calidades”, pueden producir efectos biológicos que difieren en severidad o en la probabilidad de que ocurra tal efecto. Para tener en cuenta la microdistribución de la energía depositada, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICPR), ha definido la magnitud de Dosis Equivalente (H_T), la que se obtiene a partir de la dosis media en un órgano o tejido (D_T) y un factor de ponderación (W_T) que depende del tipo y energía de la radiación.

$$H_{T,R} = W_R \times D_{T,R}$$

Donde:

- $D_{T,R}$ es la dosis promedio (en un órgano o tejido) de la radiación R en el tejido u órgano T y $W_{T,R}$ es el factor de radiación.

Los valores de W_R , dependen de la forma en que la energía es depositada por la radiación ionizante y como se distribuye ésta en los blancos de la célula.

W_R es adimensional y por lo tanto la unidad en el S.I. (sistema internacional de unidades) de la dosis equivalente es la misma que para Dosis Absorbida:

$$J / kg$$

y el nombre especial que recibe es el Sievert (Sv). La antigua unidad era el rem.

- $1 J / kg = 1 Sv$
- $1 Sv = 100 Rem$

Cuando un campo de irradiación está compuesto por varios tipos de radiación, con diferentes valores de W_R , la dosis equivalente debe ser la sumatoria de las dosis absorbidas multiplicadas cada una por su propio factor de ponderación (calidad).

$$H_{T,R} = \sum W_R \cdot D_{T,R}$$

Los valores de W_R están dados en la tabla 1.

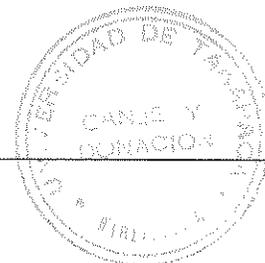




TABLA I
Valores de W_R para diferentes tipos de radiaciones.

<i>TIPO E INTERVALO DE ENERGÍA</i>	<i>FACTOR DE PONDERACIÓN (W_R)</i>
Fotones X y γ , de todas las energías	1
Electrones y muones de todas las energías	1
Neutrones de:	
< 10 keV	5
> 10 keV a 100 keV	10
> 100 keV a 2 MeV	20
> 2 MeV a 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protones de más de 2 MeV	5
Partículas α , fragmentos de fisión y núcleos pesados.	20

2. Dosis efectiva (E) y factores de ponderación de órgano (W_T).

La relación entre la probabilidad de ocurrencia de efectos biológicos y la dosis equivalente, varía dependiendo del órgano que se esté irradiando, por lo que se definió otra magnitud radiológica, derivada de la dosis equivalente, para indicar la combinación de diferentes dosis para varios tejidos diferentes.

El factor de ponderación usado aquí se llama factor de ponderación de órgano, W_T . La dosis equivalente ponderada recibe el nombre de Dosis Efectiva, E .

La dosis efectiva es entonces, la suma de las dosis equivalentes en tejido u órgano, multiplicada cada una por el factor de ponderación del tejido u órgano correspondiente:

$$E = \sum W_T \cdot H_T$$

Donde:

- H_T es la dosis equivalente en el tejido u órgano T.
- W_T es el factor para los tejidos T.



Capítulo V Magnitudes Radiológicas.

Así:

$$E = \sum W_R \sum W_T \cdot D_{T,R} = \sum W_T \sum W_R \cdot D_{T,R}$$

Donde:

- $D_{T,R}$ es la dosis absorbida media en el órgano o tejido T, producida por la radiación R.
- Como W_T es adimensional, las unidades son las mismas que para la dosis equivalente, o sea:
 - J / kg (en el S.I.).
 - Unidad especial: Sv.
 - Unidad tradicional: Rem .

TABLA 2
Valores de W_T para diferentes tipos de radiaciones.

TEJIDO U ORGANO	FACTOR DE PONDERACIÓN (W_T)
Gónadas	0.20
Médula ósea	0.12
Colon	0.12
Pulmón	0.12
Estómago	0.12
Vejiga	0.05
Mama	0.05
Hígado	0.05
Esófago	0.05
Tiroides	0.05
Piel	0.01
Superficie ósea	0.01
Resto	0.05 ^{2,3}



INTRODUCCIÓN

El estudio de los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes comenzó a tomar interés al utilizarlas sobre el ser humano. La observación de los efectos biológicos que se desprendieron de las primeras aplicaciones empíricas de las radiaciones ionizantes y el hecho de que su utilidad clínica originara un profuso empleo de las mismas fueron los resortes que pusieron en marcha el estudio razonado de estos efectos. Este es el inicio o nacimiento de la radiobiología. Posteriormente se observó la aparición de alteraciones vatrogénicas y efectos colaterales: radiodermitis, eritemas, cataratas, etc. Más tarde este interés se incrementó con la trágica experiencia de los desastres atómicos, en los que se pudo observar el resultado de la exposición a elevadas dosis de radiaciones ionizantes. Así pues, el conocimiento de las lesiones producidas por radiaciones hacia necesario estudiar la forma de que, sin perder su utilidad, fueran lo menos lesivas posible.

Dos grandes razones han impulsado a profundizar en la investigación de los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes:

- Poder utilizarlas de forma segura en todas las aplicaciones médicas o industriales que las requieran, lo que constituye el principio básico de la radioprotección.
- Poder emplearlas de forma efectiva en el tratamiento del cáncer, lesionando lo menos posible el tejido sano, es decir, la base fundamental de la radioterapia.

Los efectos de las radiaciones ionizantes sobre la materia viva son el resultado final de las interacciones físicas (ionización y excitación) de los fotones o las partículas con los átomos que la componen. El efecto biológico final dependerá de la cadena de interacciones físicas, transformaciones químicas, alteraciones de macromoléculas, etc., que puedan lesionar en mayor o menor proporción las funciones o la propia vida de la célula. Todos los eslabones de esta cadena son fenómenos esencialmente aleatorios, regidos por probabilidades. Incluso una vez producida una alteración a cualquier nivel, ésta tiene una cierta probabilidad de no manifestarse.

Las radiaciones ionizantes actúan de forma no selectiva, no existiendo ningún componente celular por el que presenten una apetencia especial, lo cual constituye un fenómeno aleatorio adicional.

Las manifestaciones y efectos de las radiaciones ionizantes, los cuadros anatomopatológicos y clínicos que producen, son inespecíficos y no se diferencian en nada de los producidos por otros agentes físicos.

La acción de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos presenta por tanto tres características principales: es aleatoria, no selectiva e inespecífica.



Capítulo VI Radiobiología.

Los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos pueden clasificarse desde puntos de vista diferentes:

1. Según el tiempo de aparición:

- a) Efectos precoces: Aparecen minutos u horas después de haberse producido la exposición a las radiaciones ionizantes (eritema cutáneo, náuseas, vómitos, etc.).
- b) Efectos tardíos: Se manifiestan meses o años después de la exposición a las radiaciones ionizantes (radiodermatitis crónica, mutaciones genéticas, cáncer radioinducido, etc.)

2. Desde el punto de vista biológico:

- a) Efectos somático: Sólo se manifiestan en el individuo que ha sido sometido a la exposición de radiaciones ionizantes (eritemas, osteonecrosis, etc.).
- b) Efectos genéticos: No se manifiestan en el individuo sino en su descendencia, al lesionarse las células germinales del primero. El ejemplo clásico son las mutaciones genéticas.

3. Según la dependencia de la dosis:

- a) Efectos estocásticos: Son absolutamente aleatorios, probabilísticos, pudiendo aparecer tras la exposición a pequeñas dosis de radiaciones ionizantes. No necesitan una "dosis umbral" para producirse. Un solo fotón o una sola partícula bastaría para producir un efecto estocástico, aunque, al aumentar la dosis, aumenta la probabilidad de aparición de estos efectos, que suelen ser de tipo tardío (cáncer radioinducido).
- b) Efectos no estocásticos: Necesitan una "dosis umbral" para producirse, por debajo de la cual la probabilidad de aparición es extremadamente baja. Suelen ser, fundamentalmente, efectos precoces (eritema cutáneo, aplasia medular, etc.).



TRANSFERENCIA LINEAL DE ENERGÍA Y EFICACIA BIOLÓGICA RELATIVA.

Las radiaciones, tanto corpusculares como no corpusculares, producen, al interaccionar con la materia, principalmente fenómenos de ionización y excitación, según la importancia de la energía cedida al medio. Esta importancia aparece determinada por la distribución espacial de energía desde el punto donde incide la radiación y a lo largo de su trayectoria. En un principio, la radiación que compone el haz primario cede parte de su energía al medio, produciéndose las primeras ionizaciones y excitaciones. La fracción restante continúa su trayectoria cediendo energía más adelante, mediante nuevas ionizaciones y excitaciones. A su vez, los electrones resultantes de las ionizaciones ceden su energía al medio. Esta cadena de hechos se sucede hasta que la radiación es totalmente absorbida por el medio o hasta que sale de él.

El estudio de la cesión de energía a lo largo de la trayectoria del haz determina una importante característica de las radiaciones desde el punto de vista radiobiológico. Es lo que se conoce como transferencia lineal de energía o LET (linear energy transfer). Habitualmente se expresa en kev/u, como energía depositada por unidad de trayecto recorrido por la radiación.

Las radiaciones electromagnéticas (Rayos x y gamma), al no tener masa, tienen un gran poder de penetración y las interacciones se producen muy espaciadas unas de otras, por lo que presentan una baja LET. Por el contrario, las radiaciones corpusculares (partículas α , neutrones, etc.), que tienen masa y/o carga apreciable, poseen una mayor probabilidad de interaccionar con los átomos del medio. Este tipo de radiación, que pierde energía rápidamente produciendo muchas ionizaciones en poca distancia, es radiación de LET alta.

Dosis iguales de radiaciones de distinta LET producirán distinto grado de efecto o respuesta biológica, debido a la diferente tasa de cesión de energía al medio. Las radiaciones de alta LET producirán mayor respuesta biológica. La energía se deposita en un espacio menor, afectando a un número menor de blancos (moléculas, células, etc.), pero con una mayor intensidad, lo que se traduce en un mayor número de lesiones.

Pese a la relación con la LET de la radiación, la respuesta biológica no es una función exacta, ni predecible, del depósito de energía consecuente con la interacción con el medio. La respuesta radica en que los fenómenos biológicos están regidos por leyes biológicas, que son mucho más aleatorias que las físicas.

Para disponer de un patrón comparativo de la eficacia biológica de las radiaciones de distinta LET se introdujo el concepto de eficacia biológica relativa (EBR). La EBR compara la dosis necesaria de un tipo de radiación para producir un efecto determinado, con la dosis de una radiación estándar necesaria para producir el mismo efecto.

$$\text{EBR} = \frac{\text{Dosis de Rx de 250 kev para producir un efecto (cGy)}}{\text{Dosis de otra radiación para producir mismo efecto (cGy)}}$$



Capítulo VI Radiobiología.

La radiación estándar considerada son los Rayos x de 250 kev, porque era la de uso más común cuando se adoptó el concepto de EBR. Actualmente se continuo utilizando el mismo concepto, con la misma radiación tipo, para comparar con ella las restantes radiaciones conocidas. Para llevar a cabo dicha comparación, la administración de las radiaciones debe hacerse en las mismas condiciones. Es importante, además, señalar que la EBR se define sobre dosis absorbida y no sobre dosis de exposición.

La EBR se refiere siempre a un hecho biológico específico (opacificación del cristalino, descamación de la piel, etc.), de tal manera que, para una misma radiación, la EBR será diferente según el efecto biológico que se estudie.

La relación entre LET y EBR depende del efecto biológico considerado. En aquellos sistemas donde una sola ionización es suficiente para producir el efecto biológico (inactivación de ciertos virus o enzimas), la EBR es máxima para radiaciones de baja LET y decrece continuamente a medida que la LET aumenta, pues cuanto menor es el volumen donde se deposita la energía, hay más ionizaciones que posibilidades de obtener respuesta. Se podría decir que se desperdicia radiación. Por el contrario, cuando se necesitan varias interacciones para producir un efecto (muerte celular en los mamíferos), La EBR aumenta hasta alcanzar un máximo entre los 100 y los 200 kev/u. a partir de lo cual, a medida que la LET aumenta la EBR disminuye.

La realidad es aún más compleja, ya que, a medida que la radiación se propaga a través de la materia, perdiendo su energía, su LET aumenta después de cada interacción hasta que la radiación se extingue, por lo que su EBR irá modificándose progresivamente.

La relación entre LET y EBR depende, además, de otros factores, como el entorno químico de la célula en el momento de la irradiación y la tasa de dosis, que es la expresión de la velocidad con que se realizan las interacciones.

CONCEPTO GENERAL DE RADIOSENSIBILIDAD

La radiosensibilidad es un término que expresa la magnitud de respuesta de las estructuras biológicas, provocada por las radiaciones ionizantes. De esta forma, un elemento biológico es más radiosensible cuando mayor es su respuesta a una dosis determinada de radiación. Tomando el concepto desde otro ángulo, un elemento biológico es más radiosensible cuando necesita menos dosis de radiación para alcanzar un efecto determinado. En ambos casos, el concepto opuesto a radiosensibilidad es radiorresistencia.

No existe célula ni tejido, normal o patológico, radiorresistente de manera absoluta, pues si se aumenta ilimitadamente la dosis de radiación, siempre puede alcanzarse su destrucción. Administrando dosis mínimas en órganos o tejidos, se apreciarán diferentes grados de alteraciones morfológicas y/o funcionales según las líneas celulares de que se trate.



Capítulo VI Radiobiología.

ESCALA DE RADIOSENSIBILIDAD CELULAR Y SUS LEYES

Las células presentan diferente grado de sensibilidad según su estirpe. Tomando como punto de referencia la muerte celular pueden clasificarse en cinco grupos, de mayor a menor radiosensibilidad:

- Muy radiosensibles: linfocitos, eritroblastos, espermatogonias.
- Relativamente radiosensibles: células de la granulosa, mielocitos, células de las criptas intestinales, células basales de la epidermis.
- Sensibilidad intermedia: células endoteliales, células de las glándulas gástricas, osteoblastos, condroblastos, espermatoцитos, espermátidas.
- Relativamente radiorresistentes: granulocitos, osteocitos, espermatozoides, eritrocitos.
- Muy radiorresistentes: fibroocitos, condrocitos, células musculares, células de los nervios.

La radiosensibilidad celular está regida por una serie de determinantes, que han sido estudiados experimentalmente y extrapolados a todas las células del organismo enunciándose unas leyes biológicas, siendo las más importantes la ley de Bergonie y Tribondeau y la ley de Ancel y Vitemberg. Aunque ambas leyes expresan la radiosensibilidad utilizando términos diferentes, las dos conceden una gran importancia a la actividad mitótica.

LEY DE BERGONIE Y TRIBONDEAU

Basándose en sus observaciones sobre la irradiación de poblaciones de células testiculares, Bergonie y Tribondeau establecen, en función de la actividad mitótica y la diferenciación celular, los siguientes puntos:

- Una célula es tanto más radiosensible cuanto mayor sea su actividad reproductiva (actividad mitótica).
- Una célula es tanto más radiosensible cuanto más largo sea porvenir de división, es decir, cuantas más divisiones deba cumplir en el futuro (porvenir carioquinético).
- Una célula es tanto más radiosensible cuanto menos diferenciadas estén sus funciones.



Capítulo VI Radiobiología.

LEY DE ANCEL Y VITEMBERG

En 1925 AnceI y Vitemberg modifican la ley anterior. En esencia vienen a decir que la susceptibilidad de toda célula a experimentar lesiones por radiaciones es la misma, pero el tiempo que tardan en aparecer las lesiones inducidas varia según los distintos tipos de células.

Los factores que influyen sobre el tiempo que tardan en aparecer las lesiones radioinducidas son:

- El estrés biológico que actúa sobre la célula. Es importante recordar que la actividad reproductiva representa un estrés biológico considerable.
- Las condiciones en que se encuentra la célula en el período pre y post-irradiación.

EL CICLO CELULAR.

La situación de la célula en el momento en que se produce la irradiación es un factor biológico que influye notablemente en la radiosensibilidad. Se ha podido estudiar experimentalmente, empleando poblaciones celulares sincrónicas (en la misma fase del ciclo celular), la respuesta de las células en las distintas fases del ciclo. A partir de los resultados obtenidos, se ha podido establecer que las células presentan más radiosensibilidad en la fase G₂ y en M, son menos sensibles en G₁, y menos sensibles aún en la fase S, durante la síntesis del ADN. De esta forma suele considerarse la fase M la más radiosensible y la fase S a más radorresistente.

RADIOSENSIBILIDAD HÍSTICA.

Aunque la radiosensibilidad de un tejido es similar a la de las células que lo constituyen, no es una expresión directa de la misma, a lo cual contribuyen diversos factores.

Un tejido u órgano esta constituido por dos compartimentos: parénquima y estroma. El parénquima es el compartimento que contiene las células características del tejido en cuestión. La complejidad del funcionamiento de un tejido implica que en todo momento coexisten en él células en actividad mitótica, en reposo, y con buena o mala oxigenación, factores que, como se describe más adelante, le hacen tener una radiosensibilidad diferente. Además, un tejido puede estar integrado por distintos tipos de células, cada uno con mayor o menor sensibilidad intrínseca. Por otro lado, el comportamiento de la estroma esta formado por tejido conjuntivo y vasos, y presenta una radiosensibilidad diferente a la del parénquima.



Capítulo VI Radiobiología.

Puede extraerse como conclusión que existen dos tipos de factores que afectan la radiosensibilidad histórica:

Factores intrínsecos:

- Número de células diferenciadas e indiferenciadas.
- Duración del ciclo de las distintas células constituyentes.
- Radiosensibilidad de la célula madre o precursora.
- Capacidad de reparación de la célula.

Factores extrínsecos:

- Vascularización, que determina el estado de oxigenación celular.
- Estado de los tejidos vecinos, lo que influye en la capacidad de reparación.

RADIOBIOLOGÍA CELULAR

Las interacciones de las radiaciones ionizantes pueden traducirse en alteraciones en la bioquímica celular, cadenas de hidratos de carbono, cambios estructurales en las proteínas, modificaciones en la actividad de enzimas, que a su vez repercuten en alteraciones de la membrana celular, las mitocondrias y los demás organelos de la célula, pero es acerca de las acciones de las radiaciones sobre los elementos del núcleo, donde se han realizado más estudios en profundidad y acumulado los más amplios conocimientos.

EFFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES SOBRE EL ADN Y LOS CROMOSOMAS.

La lesión de las moléculas de ADN desempeña un papel primordial entre los efectos radiobiológicos. De igual forma, los mecanismos de reparación del ADN son esenciales, pues de la falta de reparación o de la reparación anómala del ADN alterado, provienen lesiones importantes como: muerte celular, incapacidad de reproducción, o mutaciones.

La secuencia de nucleótidos en el ADN es el soporte de la información genética. Cada nucleótido está identificado por las bases púricas o pirimidínicas (adenina, guanina, citosina y timina) que hacen de puente entre las dos cadenas de la doble hélice de que se compone el ADN. La molécula de ADN constituye la composición de un cromosoma desde un extremo



Capítulo VI Radiobiología.

al otro, de forma que la integridad funcional de un cromosoma está ligada a la continuidad de la molécula de ADN.

Las radiaciones pueden entrañar diferentes tipos de lesiones para las moléculas de ADN, según el componente de éstas que sea afectado. Las lesiones mejor conocidas son:

1. Las roturas de cadena (simples o dobles).
2. La alteración de las bases.
3. La destrucción de los azúcares y los puentes.
4. La formación de dímeros.
5. Lesiones voluminosas o lesiones múltiples locales.

Las roturas de cadenas son las lesiones más frecuentes in vitro; se sabe que el efecto indirecto desempeña un papel preponderante en su producción, especialmente por la acción de los radicales OH*. Las roturas pueden ser simples, cuando se rompe sólo una de las dos cadenas, o dobles, cuando se fragmentan las dos cadenas en una zona relativamente próxima (menos de tres nucleótidos de distancia). El número de roturas simples crece proporcionalmente con la dosis, mientras que la relación de número de roturas dobles no está muy clara para las células de los mamíferos. Una dosis de radiación X de 1 a 1,5 Gy provoca del orden de 1.000 roturas simples y unas 50-100 dobles por célula, es decir, una rotura doble por cada 10-20 simples

Las bases pueden ser parcialmente destruidas o modificadas químicamente. Los radicales formados por efecto indirecto reaccionan con las bases teniendo especial importancia la hidroxilación de éstas. El orden decreciente de radiosensibilidad es: timina, citosina, adenina, guanina.

La desoxirribosa puede alterarse por oxidación, sufriendo a continuación hidroxilación y liberación de la base, acompañándose de una rotura del enlace fosfodiéster.

Otra lesión posible es la formación de puentes o "cross link", que puede ser: intracadena, cuando se unen dos partes de una misma cadena, intercadenas, cuando se unen las dos cadenas, o entre moléculas de ADN y proteínas.

Bajo la acción de las radiaciones ionizantes pueden asimismo unirse las bases adyacentes de una misma cadena, formando un dímero. La consecuencia más importante de la formación de dímeros es que éstos pueden interrumpir la replicación del ADN. Los dímeros timina-timina son los más frecuentes y estables y parecen tener mucha relación con la carcinogénesis de la luz solar, ya que los rayos ultravioleta tienen también capacidad de formar dímeros.



Capítulo VI Radiobiología.

Las lesiones múltiples consisten en numerosas lesiones locales sobre diversas estructuras, cadenas, bases, puentes, etc. Constituyen lesiones voluminosas, con frecuencia irreparables. Suelen producirse por radiaciones de alta LET, lo que contribuye al carácter irreversible de las lesiones por ese tipo de radiación.

Dependiendo del lugar de afectación del ADN, las lesiones tendrán mayor o menor importancia biológica. Existen lesiones negligibles, sin repercusión funcional, que sólo modifican la distancia entre las bases. En cambio la pérdida o sustitución de una base o las roturas de la cadena de ADN provocan una alteración en la secuencia de bases, que es precisamente el código de almacenamiento y transmisión de información genética. Este tipo de lesión se considera un tipo de mutación, y puede tener consecuencias graves según la importancia de la información genética alterada.

Los cambios inducidos en el ADN se reflejan en los cromosomas si no son reparados, pero también son importantes los cambios estructurales (roturas) producidos por la radiación directa sobre los cromosomas.

Las alteraciones estructurales en un cromosoma pueden producirse por ionización directa de átomos integrantes del cromosoma (acción directa), o bien por reacción con los productos de la radiólisis del agua (acción indirecta). En ambos casos el resultado es el mismo: la rotura del cromosoma en dos o más fragmentos. Estos fragmentos pueden unirse en ocasiones, reparándose la rotura, o permanecer como tales, produciéndose cromosomas anómalos. Los cambios estructurales importantes que se producen en los cromosomas se denominan aberraciones, lesiones o anomalías.

De una forma esquemática, las radiaciones pueden producir:

- Rotura simple en un cromosoma o cromátida.
- Roturas múltiples en un cromosoma o cromátida.
- Adhesión o apelotonamiento de cromosomas.

Las consecuencias generales de estos cambios estructurales pueden ser: restitución sin lesión, lesión del cromosoma por defecto (fragmentación, etc.) o por exceso (reagrupación, poliploidías, etc.).

En todo caso, una lesión cromosómica de este tipo, que repercutiría en la célula y su porvenir cariocinético, tendrá diferente significación según el tipo de célula afectada: somática o germinal. En ambos casos la lesión será más o menos grave, pero en las células somáticas sólo revisten importancia para el individuo irradiado, mientras que los cromosomas alterados de las células germinales pueden transmitirse y tener consecuencia sobre toda la especie.



EFFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES SOBRE LOS TEJIDOS.

Cuando solo se irradia una porción del organismo, se requieren dosis elevadas para producir lesiones considerables. En general se produce la muerte celular, que si es intensa conduce a la atrofia del órgano o tejido en cuestión. Cada tipo de tejido tendrá una respuesta diferente en función de su radiosensibilidad, y la expresión histopatológica, clínica, etc., en que se traduzcan sus lesiones.

Piel

La piel es, exceptuando los casos de ingestión o inhalación de sustancias radiactivas, la primera barrera que el organismo pone a las radiaciones ionizantes. Por ello, las cutáneas son las más frecuentes de todas las reacciones histopatológicas radioinducidas.

Las células de la capa basal, al ser las más indiferenciadas y con una alta tasa de división, son las más radiosensibles. Además, su posición superficial hace que puedan ser alcanzadas por radiaciones muy poco energéticas, incluso del rango de la radiación ultravioleta.

Los efectos de las radiaciones ionizantes sobre la piel se conocen muy bien, pues antes del advenimiento de la radioterapia de supervoltaje, se empleaban en radioterapia Rayos x de 200-300 kev. Este tipo de terapia, con Rayos x poco penetrantes, producía eritema, descamación y depilación, lo cual limitaba su empleo, puesto que la dosimetría dependía sobre todo de la tolerancia del paciente. Tanto es así que se hablaba en términos de dosis eritema, dosis descamación y dosis depilación.

El eritema obedece a una vasodilatación de los capilares de la dermis, y se puede producir tras una dosis única de 3 a 10 Gy.

Este eritema es moderado y suele aparecer entre el primer y segundo día de la irradiación. El eritema producido por estas dosis suele curar sin dejar secuelas. Tras un eritema importante se produce hiperpigmentación, debida principalmente a un incremento de la síntesis de melamina. El grado de pigmentación varía de una región a otra en el mismo individuo, y de unos sujetos a otros.

Dosis superiores a los 10 Gy producirán un eritema importante seguido de descamación. Se trata de la radiodermatitis seca, y se produce por el incremento de división de las células muertas. Con dosis superiores se destruye una mayor cantidad de células basales y todas las células de estratos más superficiales se cornifican, descaman y caen, quedando la dermis expuesta, rezumando un líquido seroso. Esta fase se denomina radiodermatitis húmeda.

Con dosis únicas superiores a los 25 Gy se puede producir una radionecrosis aguda, por grandes lesiones vasculares y de tejido conectivo, que evoluciona como una úlcera tórpida durante algunos meses.



EFFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES SOBRE LOS TEJIDOS.

Cuando solo se irradia una porción del organismo, se requieren dosis elevadas para producir lesiones considerables. En general se produce la muerte celular, que si es intensa conduce a la atrofia del órgano o tejido en cuestión. Cada tipo de tejido tendrá una respuesta diferente en función de su radiosensibilidad, y la expresión histopatológica, clínica, etc., en que se traduzcan sus lesiones.

Piel

La piel es, exceptuando los casos de ingestión o inhalación de sustancias radiactivas, la primera barrera que el organismo pone a las radiaciones ionizantes. Por ello, las cutáneas son las más frecuentes de todas las reacciones histopatológicas radioinducidas.

Las células de la capa basal, al ser las más indiferenciadas y con una alta tasa de división, son las más radiosensibles. Además, su posición superficial hace que puedan ser alcanzadas por radiaciones muy poco energéticas, incluso del rango de la radiación ultravioleta.

Los efectos de las radiaciones ionizantes sobre la piel se conocen muy bien, pues antes del advenimiento de la radioterapia de supervoltaje, se empleaban en radioterapia Rayos x de 200-300 kev. Este tipo de terapia, con Rayos x poco penetrantes, producía eritema, descamación y depilación, lo cual limitaba su empleo, puesto que la dosimetría dependía sobre todo de la tolerancia del paciente. Tanto es así que se hablaba en términos de dosis eritema, dosis descamación y dosis depilación.

El eritema obedece a una vasodilatación de los capilares de la dermis, y se puede producir tras una dosis única de 3 a 10 Gy.

Este eritema es moderado y suele aparecer entre el primer y segundo día de la irradiación. El eritema producido por estas dosis suele curar sin dejar secuelas. Tras un eritema importante se produce hiperpigmentación, debida principalmente a un incremento de la síntesis de melamina. El grado de pigmentación varia de una región a otra en el mismo individuo, y de unos sujetos a otros.

Dosis superiores a los 10 Gy producirán un eritema importante seguido de descamación. Se trata de la radiodermatitis seca, y se produce por el incremento de división de las células muertas. Con dosis superiores se destruye una mayor cantidad de células basales y todas las células de estratos más superficiales se cornifican, descaman y caen, quedando la dermis expuesta, rezumando un líquido seroso. Esta fase se denomina radiodermatitis húmeda.

Con dosis únicas superiores a los 25 Gy se puede producir una radionecrosis aguda, por grandes lesiones vasculares y de tejido conectivo, que evoluciona como una úlcera tórpida durante algunos meses.



Capítulo VI Radiobiología.

Las lesiones moderadas permiten una curación sin o con escasas secuelas. La repitelización tiene lugar a las 6-8 semanas, con una piel delgada que adquiere su apariencia normal a los 2-3 meses.

Los folículos pilosos, como órganos de crecimiento son: radiosensibles, siendo la depilación otra respuesta cutánea a la acción de las radiaciones ionizantes. Durante mucho tiempo se emplearon radiaciones x de poca energía (10 a 20 kev) en el tratamiento de ciertas afecciones del cabello como las tiñas. Aunque la tiña desaparecía, se observó la aparición de alopecia temporales, de semanas e incluso meses de duración.

Una dosis baja de irradiación produce una disminución temporal en el índice de crecimiento piloso, tanto en diámetro como en longitud. Después de la depilación, el pelo puede volver a crecer, pero suele hacerlo con cambios en la forma e incluso en la coloración. Con dosis moderadas (las mismas que son necesarias para producir descamación seca) puede aparecer una alopecia temporal, mientras que una dosis suficientemente elevada puede conllevar una alopecia permanente.

Las glándulas sudoríparas y sebáceas son relativamente radiorresistentes. Las dosis moderadas producen cambios poco importantes, que se expresan como sequedad de piel. A dosis elevadas se produce atrofia y destrucción completa de las glándulas.

Hasta aquí se han descrito los efectos precoces de las radiaciones ionizantes sobre la piel. Los efectos tardíos incluyen la aparición de piel atrófica, despigmentada, con ulceraciones y fibrosis profunda. La epidermis queda seca debido a la reducción de la actividad secretora de las glándulas sebáceas y sudoríparas. La existencia de hiperplasia subendotelial en los vasos sanguíneos conduce a la presencia de telangiectasias.

Cuando se realizan exposiciones repetidas durante mucho tiempo a dosis bajas de radiación, se puede abocar a la instauración de un cuadro de radiodermatitis crónica, en el que la piel puede llegar a ser hipertrófica o atrófica. La piel hiperqueratosis, es más frágil y quebradiza que la normal, con pliegues exagerados y depilación parcial o total. La piel atrófica muestra una epidermis adelgazada, escamosa, muy sensible a lesiones por traumatismos mínimos e infecciones, las cuales pueden conducir a necrosis.

En algunos casos se produce ulceración de la piel, la cual una vez establecida es muy difícil de curar, debido a la pobre vascularización y a la existencia de un tejido conectivo dañado.

La radiodermatitis crónica se correlaciona con un aumento de la incidencia de cánceres cutáneos, especialmente epitelomas espinocelulares.



MEDULA ÓSEA Y SANGRE PERIFÉRICA

En el adulto hay dos tipos de médula ósea, la roja y la amarilla. La médula ósea roja es la única capaz de formar elementos sanguíneos que luego pasan a la circulación. Sin embargo, ante una pérdida importante de médula roja, la amarilla puede transformarse haciéndose mucho más rica en células parenquimatosas.

Las células parenquimatosas de la médula ósea están constituidas por las células madres pluripotenciales, además de todos los precursores de los elementos sanguíneos y una serie de células sanguíneas que todavía no han pasado a la circulación.

Estas distintas estirpes celulares presentan diferente radiosensibilidad. Las células más radiosensibles son los eritroblastos, las segundas en radiosensibilidad son los mielocitos y las más radiorresistentes los megacariocitos. Las diferencias de sensibilidad se manifiestan en forma de disminución del número de células madre. Los eritroblastos son los primeros que empiezan a disminuir, recuperando su nivel normal una semana después de recibir una dosis moderada de radiación. Los mielocitos disminuyen en el mismo período de tiempo pero necesitan de 2 a 6 semanas para recuperarse. Los megacariocitos disminuyen después de una a dos semanas tras la irradiación, necesitando de 2 a 6 semanas para recuperarse.

Las lesiones de las células madre de la médula ósea se reflejan en sangre periférica cuando las células maduras circulantes mueren y deben ser sustituidas por las células lesionadas por las radiaciones ionizantes. En este fenómeno influyen dos factores: la sensibilidad de la célula madre y la duración de cada familia de células en sangre periférica.

A excepción de los linfocitos, las células en sangre periférica son radiorresistentes, dado que son células diferenciadas y especializadas.

La disminución de células circulantes tiene las repercusiones consiguientes para la salud del individuo, según las respectivas funciones de las células correspondientes: aumento del riesgo de infecciones, anemia, coagulopatias, etc.

TESTÍCULOS

Los testículos constituyen un órgano de radiosensibilidad elevada. Contienen tanto células diferenciadas y radiorresistentes (los espermatozoides maduros) como células indiferenciadas, que se dividen rápidamente, y por tanto radiosensibles (las espermatogonias). Esta última población celular es la responsable de la sensibilidad de la gónada.

El primer efecto observable tras la irradiación es la lesión y despoblación de espermatogonias, lo que se traduce a la larga en una despoblación de espermatozoides maduros. Este proceso, llamado depleción de maduración, es el responsable de que, tras un intervalo de tiempo de fertilidad atribuible a la resistencia de los espermatozoides maduros,



Capítulo VI Radiobiología.

se produzca una esterilidad temporal o permanente, según la dosis administrada. Una dosis de 5-6 Gy puede producir esterilidad permanente, mientras que una dosis de 2,5 Gy produce esterilidad temporal (aproximadamente de unos 12 meses de duración).

El riesgo de irradiación a dosis inferiores no lo constituye la esterilidad sino la posibilidad de producir aberraciones cromosómicas, que se podrán transmitir a generaciones siguientes. Al ser un fenómeno estocástico no existe dosis umbral. Este será el determinante de que se extremen las medidas de radioprotección en las gónadas (tanto masculinas como femeninas) incluso a dosis bajas, como las empleadas en radiodiagnóstico y medicina nuclear.

OVARIOS

A diferencia de lo que ocurre en el varón, las células germinales en la mujer no están dividiéndose constantemente, sino que lo hacen de forma cíclica. Tras irradiar los ovarios con dosis moderadas existe un período de fertilidad, debido a la presencia de folículos maduros (relativamente resistentes); más tarde sobreviene una esterilidad debida a la lesión de los folículos intermedios (muy radiosensibles), pudiendo recuperarse la fertilidad por evolución de los folículos pequeños (muy resistentes).

Los efectos y las dosis necesarias para producir esterilidad en las mujeres están en función de la edad. La irradiación del ovario en edades tempranas puede conducir a una reducción de su tamaño (atrofia) por muerte de las células germinales que, si es bilateral, conduce a esterilidad permanente. A partir de la pubertad, la irradiación puede conducir a una supresión total o temporal de la fertilidad en los términos explicados con anterioridad o bien a alteraciones en la menstruación sin llegar a producir esterilidad. En general, dosis superiores a 6 Gy producen esterilidad en la mujer.

Por otro lado existe la posibilidad de producir aberraciones cromosómicas y mutaciones genéticas transmisibles a la descendencia, tal y como se ha comentado en el apartado anterior.

EFFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES SOBRE EL EMBRIÓN Y EL FETO

Los efectos generales de las radiaciones sobre el embrión y el feto pueden resumirse en:

1. Efectos letales, que implican la inviabilidad del embrión o el feto.
 2. Anomalías congénitas, que se manifiestan en el nacimiento.
 3. Efectos tardíos, que no son visibles en el nacimiento, sino que se manifiestan más tarde.
-



Capítulo VI Radiobiología.

Los efectos pueden ser inducidos por mutaciones en el óvulo o el espermatozoide progenitores (efectos genéticos) o bien por exposición del embrión o el feto a las radiaciones (efectos congénitos).

En este capítulo se expondrán los efectos congénitos letales o que se manifiesten en el nacimiento.

La experimentación animal ha permitido que se realicen numerosos estudios sistemáticos sobre los efectos de las radiaciones ionizantes en el embrión en desarrollo, obteniéndose gran cantidad de información sobre este tema. La información directa de irradiación de embriones humanos proviene de los supervivientes de las bombas atómicas, irradiaciones accidentales, profesionales, diagnósticas y terapéuticas a pacientes embarazadas. De los datos disponibles puede extraerse una serie de conclusiones generales.

El embrión y el feto son más radiosensibles que el organismo en cualquier otra fase de la vida, lo que concuerda con las leyes generales de radiosensibilidad, en cuanto a indiferenciación, actividad mitótica, porvenir cariocinético, etc.

El primer trimestre de gestación es más radiosensible en términos de letalidad e inducción de anomalías congénitas, debido a la abundancia de células madre de los diferentes sistemas. A medida que avanza el desarrollo hacia el segundo y tercer trimestre, el feto se va haciendo más radiorresistente, necesitando dosis superiores para que se produzcan lesiones.

La experimentación animal muestra un período especialmente sensible, el de la implantación, que en el humano se corresponde con las dos primeras semanas de embarazo. Sin embargo, en un plazo tan corto no se conoce, a veces ni se sospecha, el embarazo, pudiendo producirse un aborto por reabsorción, sin manifestaciones o con señales mínimas. Por este motivo esta primera etapa es difícil de valorar con precisión en la experiencia humana. Sólo se cuenta con la extrapolación de la experimentación animal.

La fase más radiosensible observada en el feto humano está comprendida entre la segunda y la sexta semana de gestación. La máxima variedad de anomalías se encuentra entre los días 21 y 36 del embarazo.

La mayoría de las malformaciones congénitas radioinducidas están relacionadas con el SNC (microcefalia, retraso mental, lesiones en los órganos de los sentidos, etc.). Las lesiones del esqueleto tienen un período más sensible en torno a la vigésima semana.

Aunque la irradiación en el segundo y tercer trimestre produce un número bajo de anomalías, pueden presentarse anomalías más discretas y trastornos funcionales (esterilidad, alteraciones en la médula ósea, etc.).



Capítulo VI Radiobiología.

EFFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES SOBRE EL ORGANISMO EN SU CONJUNTO

Los efectos de la radiaciones ionizantes sobre el organismo considerado en su totalidad son de diversa índole, y dependen de la dosis y de la parte del organismo irradiado, tanto cuantitativamente (zonas más o menos extensas) como cualitativamente (órganos o sistemas más o menos sensibles). La situación más extrema es la irradiación total y la muerte del individuo.

CONCEPTO DE IRRADIACIÓN TOTAL Y DOSIS LETAL

La irradiación total es la irradiación de todo el organismo, pudiendo tener lugar con fines terapéuticos (p.ej., para obtener supresión de la inmunidad) o bien de forma indeseable (accidentes, guerras, etc.). La irradiación total causa alteraciones distintas en las diferentes partes del organismo, ya que la sensibilidad de sus elementos constituyentes es también diferente. Sin embargo, la respuesta orgánica se traduce en variaciones generales, ya que el organismo es un "todo" y, como tal, responde a la agresión de una, varias o todas sus partes.

Se denomina dosis letal a aquella capaz de matar al organismo que la recibe. Sin embargo, los mamíferos (y en general todas las especies) muestran variaciones individuales en la supervivencia, y también variaciones en el tiempo que son capaces de sobrevivir. Por esta razón, la dosis letal suele expresarse con dos indicativos que determinan: a) el porcentaje de individuos del grupo sometido a radiaciones que ha muerto y, b) el tiempo en que se ha producido esta muerte. Así, por ejemplo, la dosis letal necesaria para matar al 50% de una población en un período de 30 días, se expresa como DL 50/30. De la misma manera se puede definir la DL 50/5, DL 50/10 u otra cualquiera, pero la más usada es la DL 50/30.

En el hombre no está bien determinada la DL 50/30 por razones obvias, pero en base a los accidentados atómicos conocidos y por correlación con otras especies se sitúa entre 3,5 y 4,5 Gy.

SÍNDROME DE IRRADIACIÓN TOTAL

Si se construye una curva que relacione el tiempo de supervivencia con la dosis aplicada en distintas especies de mamíferos expuestos a radiaciones ionizantes, se obtiene una curva similar a la de la figura 10. En ella puede observarse que al aumentar la dosis disminuye el tiempo de supervivencia. Con una dosis de 2 Gy se produce la muerte en un porcentaje de animales relativamente pequeño, si se aumenta la dosis éste disminuye hasta llegar a una dosis de 10Gy. Entre 10 y 100 Gy el tiempo de supervivencia no parece depender de la dosis, manteniéndose estable, y a partir de los 100 Gy el tiempo de supervivencia medio vuelve a disminuir conforme aumenta la dosis.



Capítulo VI Radiobiología.

En la práctica se suelen definir los síndromes según su cronopatología. Esto permite en el hombre relacionar directamente todos los síntomas que presente, sean debidos al sistema que fuere, siendo de mucha más utilidad para el tratamiento. Así se definen los síndromes hiperagudo, agudo y crónico.

SÍNDROME HIPERAGUDO

Se llama síndrome hiperagudo al conjunto de alteraciones patológicas que se producen tras la irradiación masiva en mamíferos. Suele ocurrir con dosis superiores a 120 Gy. La muerte tiene lugar en pocos minutos, siguiendo una cronopatología muy rápida: ataxia, letargia, convulsiones y coma. La causa principal de estas alteraciones nerviosas parece ser el aumento de la potasemia. El funcionamiento de la bomba de sodio se altera, apareciendo un aumento de la captación celular de sodio en compensación por la pérdida de potasio intracelular.

SÍNDROME AGUDO

El síndrome agudo se desarrolla en el hombre tras la irradiación total con dosis de 1 a 4 Gy. Fundamentalmente se caracteriza por tres tipos de síntomas:

- Nervioso
- Digestivos
- Hemáticos

Los pródromos aparecen entre la primera y segunda hora tras la irradiación, en forma de náusea y vómitos. Su intensidad es proporcional a la dosis recibida. Más tarde pueden diferenciarse tres estadios, con las siguientes manifestaciones.

- **Estadio I** : Enrojecimiento, descamación y ulceraciones de la mucosa bucal y faríngea con sequedad, intensa inflamación, dolor amigdalino y disfagia. Enteritis con diarrea, que en los primeros días es signo de mal pronóstico. Síntomas digestivos, con especial gravedad en el intestino delgado, cuya mucosa es rica en estructuras linfáticas y glándulas muy radiosensibles. La lesión se traduce en descamación, caída de epitelio y ulceraciones. Se produce una abolición de la absorción intestinal que conlleva un déficit nutricional. La enteritis junto con la diarrea inducen una pérdida de plasma y electrolitos, con el consiguiente desequilibrio hidrosalino. Se pierde la barrera natural, permitiéndose el paso de productos tóxicos y bacterias del intestino al torrente circulatorio, pudiendo ocasionar una sepsis grave.



Capítulo VI Radiobiología.

Si la dosis ha sido suficientemente intensa, hacia los siete días aparece síntomas generales decaimiento, fiebre y hemorragia.

- **Estadio II :** Si las dosis son menores o no se ha producido la muerte, el sujeto pasa a este segundo estadio, comprendido entre el final de la primera semana y el comienzo de la segunda. Se instaura síntomas sanguíneos, con depleción de las tres series por lesión de los órganos hematopoyéticos. Pueden encontrarse lesiones vasculares que, junto con la trombocitopenia y alteración de la coagulación, favorecen la aparición de hemorragias. Como consecuencia de la linfopenia pueden aparecer infecciones y sepsis graves. El cuadro es grave, y si la dosis ha sido suficientemente alta la consecuencia será la muerte del individuo, con un cuadro que se caracteriza por: sepsis, anemia, cuadro enterítico acompañado de hipertermia.
- **Estadio III :** Los casos de supervivencia después de la segunda semana, si las dosis fueron lo suficientemente bajas y han transcurrido sin manifestaciones patológicas, entran dentro de este tercer estadio, cuyos signos son: comienzo de la depilación, malestar general, infecciones localizadas en boca y faringe, tal vez enteritis, alguna hemorragia y fiebre ligera. En sangre periférica puede detectarse leucopenia y depleción pasajera en la médula ósea.

SÍNDROME CRÓNICO

Este síndrome se presenta cuando un individuo es sometido repetidas veces a exposiciones, con dosis pequeñas, durante un largo período de tiempo.

En general se encontrará un síndrome clínico proporcional a la dosis acumuladas, en el que se presentarán los siguientes cuadros: disminución de la fertilidad y esterilidad, depilación, morbilidad especial, alteraciones en el balance endocrino, nefrosclerosis y acortamiento de la vida media.



DETECCIÓN DE LA RADIACIÓN. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA DETECCIÓN

En el campo de las radiaciones ionizantes, el hombre ha ideado procedimientos y aparatos para detectar, medir y analizar las mencionadas radiaciones a fin de prevenir sus posibles efectos perjudiciales. Una sustancia que recibe radiación ionizante, absorbe una dosis de radiación. Pero, solamente parte de la radiación que interacciona con la sustancia que atraviesa, entregará energía a ese substrato. El efecto de esta absorción de energía puede ser distinto.

1. Efecto físico de la radiación.
2. Efecto químico de la radiación.
3. Efecto biológico de la radiación

Estos tres tipos de efectos de las radiaciones ionizantes en la sustancia o en el tejido vivo, producen alteraciones físicas, químicas o biológicas, en virtud de la energía aportada por la radiación.

Una alteración física, puede ser, la subida de temperatura, la ionización o la emisión de luz visible. Una alteración química puede ser, el ennegrecimiento de la película fotográfica o el cambio de color de los cristales.

Para evidenciar la radiación ionizante, tenemos que hacer mensurable un efecto colateral. Cuando la radiación ionizante atraviesa un gas, se forman pares de iones, porque la radiación desprende electrones de los átomos del gas. La radiación no durará más de un tiempo corto, a causa de las fuerzas de atracción entre las cargas eléctricas de distinto signo. El número de átomos que se formen, dependerá de la dosis, y frecuentemente también, del tipo de radiación y de su energía. Cuando una radiación atraviesa un gas provoca la ionización de una parte de sus átomos, y la liberación de iones positivos y electrones.

El gas que antes se comportaba como aislante eléctrico, pasa a ser parcialmente conductor. Midiendo la corriente eléctrica que por él circula, en determinadas condiciones, puede deducirse la intensidad de la radiación que lo atraviesa. De una manera parecida, la radiación provoca, al atravesar ciertos sólidos transparentes, excitación de una fracción de los átomos de la sustancia atravesada, los cuales se desexcitan inmediatamente emitiendo fotones luminosos. La medida de la luz permite medir y analizar la radiación que la provocó.

Las radiaciones pueden atravesar la envoltura que protege de la luz ordinaria a una película fotográfica y ennegrecerla. Midiendo después la intensidad de dicho ennegrecimiento se puede deducir la dosis de radiación que ha alcanzado a la película fotográfica.



Capítulo VII Detección de las Radiaciones Ionizantes.

LA DETECCIÓN DE LA RADIACIÓN IONIZANTE

Los detectores son unos dispositivos capaces de acusar la existencia de radiación y medirla, aprovechando los diversos efectos que ésta produce al interaccionar con la materia.

1. Ionización de los gases.
2. Excitación de luminiscencia en sólidos.
3. Disociación de la materia (ennegrecimiento de placas fotográficas ó producción de reacciones químicas).

La base del funcionamiento de un detector se debe a que la energía cedida por la radiación ionizante, produce ciertos efectos en el detector que pueden convertirse en magnitudes medibles; por ejemplo, la liberación de cargas eléctricas, la emisión de luz producida por excitación atómica o la disociación, produciendo alteraciones en la constitución de la materia (ennegrecimiento de placas fotográficas).

En general, se suele distinguir entre detectores, meros contadores de partículas ó fotones que alcanzan el dispositivo y espectrómetros, donde además de la información de presencia que da el detector, se mide la energía de la radiación incidente. Cuando interaccionan las radiaciones ionizantes con la materia, uno de los efectos más usuales es la producción de carga eléctrica, si estas cargas pueden ser combinadas con un dispositivo, y luego se le aplica una diferencia de potencial d.d.p. entre sus extremos, lograremos provocar una corriente eléctrica, que según la d.d.p. dará una proporcionalidad con la exposición a la radiaciones ionizantes.

DISTINCIÓN ENTRE DETECTORES, CONTADORES ESPECTRÓMETROS Y DOSÍMETROS

1. Un detector es un instrumento muy sensible que detecta la presencia de radiaciones aunque esta sean mínimas, la precisión de su medida, en general se ve disminuida por su gran sensibilidad.
2. Un espectrómetro es un instrumento capaz de hacer determinaciones cualitativas y cuantitativas sobre haces de radiación procedentes de fuentes radiactivas, puede identificar isótopos así como construir espectros de radiación de tubos del Rayos x.
3. El dosímetro es un sistema que registra, de forma fiel la dosis, según la finalidad y la fiabilidad buscada; se emplean diferentes tipos que en dosimetría personal los distinguimos TLD, película, pluma, etc.



RENDIMIENTO DE LA DETECCIÓN

El rendimiento de la detección es la relación que une la radiactividad ó emisión radiactiva real con la que indica el instrumento, esta relación depende de múltiples factores.

CÁMARAS DE IONIZACIÓN

Una cámara de ionización consiste en un recinto cerrado lleno de un gas, que puede ser aire, en donde se encuentran dos electrodos entre los que se aplica una tensión eléctrica, generalmente del orden de un centenar de voltios. (Fig. 14).

El gas que lleva el detector es aislante en normalmente, ninguna corriente eléctrica circulará entre los electrodos. Pero, según se ha visto, el paso de una radiación nuclear provocará una ionización de dicho gas, y el campo eléctrico existente en la cámara pondrá en movimiento las cargas liberadas de cada signo hacia el electrodo del signo contrario. De esta forma, se originarán en el detector corrientes o impulsos eléctricos que pueden ser medidos exteriormente, que revelan la presencia de la radiación incidente, y que pueden llegar a indicar, en determinadas condiciones, la naturaleza y energía de dicha radiación.

La cámara es de forma cilíndrica y la pared exterior, generalmente metálica o metalizada por su superficie interna. La pared exterior de la cámara no debe ser muy gruesa a fin de que pueda ser atravesada por la radiación a detectar. En los aparatos portátiles de esta clase, la tensión que se aplica a la cámara es obtenida a partir de unas baterías de pilas ordinarias que alimentan a un circuito transistorizado, el cual genera el centenar o varios centenares de voltios que necesita la cámara para funcionar adecuadamente.

Por otra parte, como la corriente generada en la cámara es generalmente muy pequeña para que pueda ser medida por un instrumento ordinario, se le amplifica previamente, mediante un circuito electrónico alimentado por las mismas pilas ya citadas. El instrumento de medida que se definirán en R/hora o Rad/hora.

El aparato proporciona así directamente la medida de la intensidad de radiación que en cada momento alcanza a la cámara. Para ello, el aparato fue calibrado por el fabricante, o en un laboratorio adecuado, utilizando fuentes de radiación conocidas. Dicha calibración deberá repetirse con cierta periodicidad y siempre que el aparato haya sufrido alguna separación o modificación importante.

Muchos aparatos portátiles de medida de radiación se entregan acompañados de una pastilla conteniendo material débilmente radiactivo, la cual, colocada en una posición determinada respecto a la cámara, provoca en ella un nivel de radiación conocido, lo que permite determinar si el aparato mide correctamente. Las cámaras de ionización se clasifican, atendiendo a la forma de los electrodos, en planas ó cilíndricas según estén dotadas de electrodos plano paralelo ó cilíndricos. La parte exterior de la cámara no debe ser muy gruesa a fin de que pueda ser atravesada por la radiación que se quiere detectar.

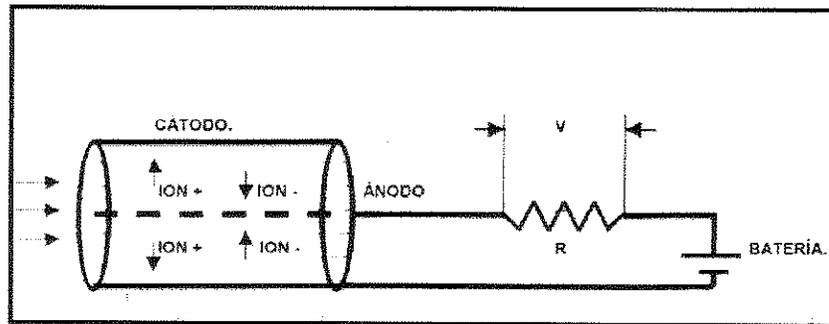


Fig.14 Esquema Cámara de Ionización

Por su forma de operar también se dividen en cámaras de corriente y cámaras de impulso. Una cámara de corriente es aquella que la exposición medida es el resultado de la corriente que se provoca al ionizarse el gas que contiene.

La cámara de impulso se basa en medir la carga eléctrica acumulada, con un dispositivo que combina un condensador y un discriminador, cuando este impulso alcanza una altura adecuada a través del correspondiente circuito eléctrico es medido. En las cámaras de impulsos se detecta el efecto de cada radiación individualmente, por lo que resultan adecuadas para conocer la energía y la distribución espectral de las radiaciones medidas.

CONTADORES GEIGER

La corriente entregada por una cámara de ionización en respuesta a las radiaciones es generalmente muy débil. Por ello, y pese a su posterior amplificación por dispositivos electrónicos, los detectores basados en tales cámaras no pueden ser muy sensibles y resultan incapaces de medir niveles de radiación muy bajos. Se puede aumentar considerablemente la sensibilidad de la medida del cilindro exterior de la cámara y del electrodo central, llenándola de una mezcla de gases apropiada.

Queda entonces, convertida la cámara de ionización, en un llamado contador Geiger, el cual, aplicándole una tensión algo más elevada que la que se aplica a la cámara, responde a la radiación nuclear con corrientes mucho más intensas que las entregadas por ésta última. Los equipos detectores de radiación en tubo Geiger resultan así mucho más sensibles que los basados en cámaras de ionización y más adecuados, para niveles bajos de radiación. En cambio, las cámaras de ionización suelen constituir equipos más precisos, pues proporcionan medidas menos dependientes de la energía de la radiación que los tubos Geiger.



DETECTORES DE CENTELLEO

Cuando las radiaciones nucleares atraviesan ciertos cristales transparentes o ciertos plásticos o líquidos fluorescentes, provocan la emisión en ellos de luz visible. Para niveles bajos de radiación dicha luz es muy débil, prácticamente invisible al ojo humano, pero puede ser percibida por una célula fotoeléctrica, dispositivo en el que la luz, al incidir sobre una superficie apropiada, provoca la emisión de los electrones y con ello la aparición de una débil corriente eléctrica.

Se constituye así un llamado detector de centelleo que consta, según lo dicho, de dos partes fundamentales:

- La sustancia fluorescente en la que tiene lugar la conversión de la energía de las radiaciones nucleares en energía luminosa.
- La célula fotoeléctrica que convierte los impulsos luminosos en impulsos de corriente eléctrica.

De la indicación de estos últimos se deduce la intensidad de radiación que llega a la sustancia fluorescente. La célula fotoeléctrica es del tipo llamado fotomultiplicador, en el que los electrones liberados por la luz se multiplican al chocar sucesivamente con diversos electrodos metálicos conectados a potenciales eléctricos cada vez mayores. En cada uno de estos choques un electrón libera varios nuevos electrones, formándose una avalancha creciente de cargas eléctricas y, por tanto, un impulso más intenso de corriente. Todo el conjunto está protegido de la luz ambiente mediante una envoltura opaca. Debido a ello, los detectores de centelleo son aún más sensibles que los detectores Geiger. (Fig. 15).

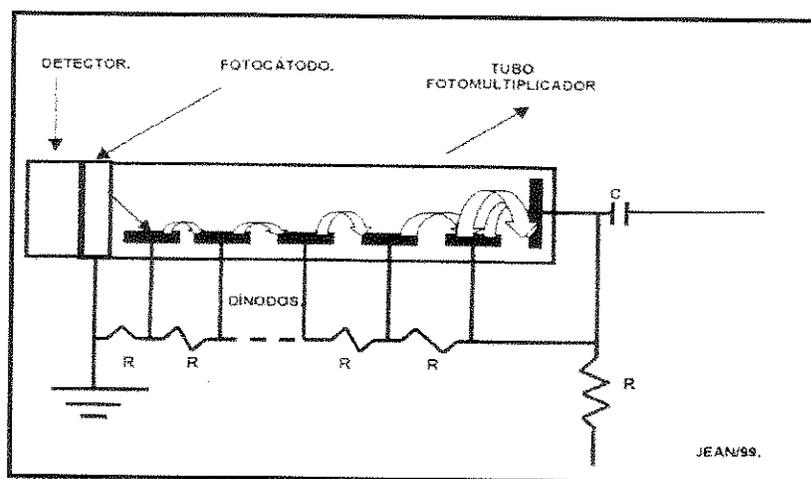


Fig.15 Esquema detector de centelleo



DOSÍMETROS

1. Dosímetros de Termoluminiscencia

Se llama termoluminiscencia a la tensión de luz que exhiben ciertas sustancias al ser calentadas a una determinada temperatura, si previamente han sido expuestas a las radiaciones ionizantes. Las radiaciones ionizantes al atravesar ciertos materiales ceden parte de su energía produciendo fenómenos de excitación. La peculiaridad de los materiales utilizados en la dosimetría por termoluminiscencia, también llamada TLD, es que la desexcitación con la consiguiente emisión de luz no se produce de forma inmediata, necesitando un aporte energético en forma de calor para que ésta se produzca.

La intensidad de luz emitida está directamente relacionada con la dosis de radiación recibida por el material, por lo que dichos materiales son utilizados como dosímetros. En un dosímetro práctico solamente se emplean materiales en los cuales la relación entre dosis de rayos y luminosidad sea lineal.

Con dependencia de que la señal TL debe ser proporcional a la dosis, es deseable que el dosímetro sea de gran sensibilidad y equivalente al tejido blando, en la referente a la absorción. Además, la señal TL no deberá debilitarse en forma sensible con el paso del tiempo. El material que cumple mejor estos requisitos es el LiF. Es una combinación especial de alta sensibilidad y pequeña magnitud, y puede cubrir una amplia serie de dosis lo que determina que pueda ser usado para una amplia serie de cometidos dosimétricos.

La termoluminiscencia consiste en medir la intensidad luminosa o la cantidad total de luz emitida. Para registrar las curvas TL se requiere un equipo de calentamiento del dosímetro, y un detector de la luz emitida. El detector es un tubo fotomultiplicador, que transforma la intensidad luminosa en una intensidad proporcional de corriente. Los materiales más utilizados en TLD son ciertos cristales, entre los que cabe destacar el fluoruro de litio (LiF) y el fluoruro de calcio (Ca F₂). Estos cristales van adosados en un portadosímetros que se sujeta a la ropa de trabajo del profesional.

- ***Ventajas e inconvenientes de este tipo de dosimetría***

Los dosímetros por termoluminiscencia resultan más precisos que los de película fotográfica. Ello, unido a que pueden ser borrados y utilizadas de nuevo, repetidamente, hace que su uso esté extendido. Como inconveniente indicaremos que no pueden archivarse con un historial dosimétrico como ocurre en los de película fotográfica.



DOSÍMETRO DE PELÍCULA FOTOGRÁFICA

La película puede ser utilizada para determinar la dosis absorbida y el ennegrecimiento. La emulsión contiene pequeños cristales de bromuro de plata.

Cuando estos absorben energía radiante, desprenden algunos electrones que se mueven a través de las redes del cristal, y atraen iones de plata positivos. La carga se neutraliza y surgirá un conjunto de átomos de plata que forman la imagen latente. Tras el revelado, los iones de plata, que produce el ennegrecimiento de la película. (Fig. 16).

Los cristales de bromuro de plata no activados se disuelven en el fijador. El ennegrecimiento aumenta con la dosis; la película puede ser utilizada para determinar dosis de irradiación beta, gamma, X y neutrones. El ennegrecimiento de la emulsión frente a la dosis de exposición, sigue una respuesta del tipo logarítmico, existiendo un fondo natural del dosímetro, dependiente del tipo de película, proceso de revelado, forma de uso, etc. Para conocer la relación ennegrecimiento/dosis de exposición hay que hacer una calibración previa de la película irradiándola con dosis preestablecidas en condiciones fijas.

- ***Fases de utilización de los dosímetros fotográficos***

Una vez expuesto el dosímetro, hay que proceder a su revelado, este proceso es muy importante, pues de él dependerá la precisión de la medida; así pues, hay que vigilar las condiciones de revelado, estado de los líquidos, temperatura de los mismos, condiciones ambientales y de almacenamiento de la película, esto de las fundas de la película, etc. El ennegrecimiento de la película se medirá mediante un sensintómetro, que previamente calibrado, dará lecturas equivalentes a dosis de exposición.

- ***Ventajas e inconvenientes de este tipo de dosimetría***

La gran ventaja del uso de estos dosímetros es que pueden ser archivados el tiempo necesario. Inconvenientes se podrían enumerar, desde su sensibilidad a la luz, revelado costoso y menos exacto que los de TLD. Distintos tipos de filtros y su importancia.- Estos dosímetros poseen una serie de filtros absorbentes adecuados, de materiales tales como plástico, estaño, cadmio ó plomo, que van a permitir la identificación y diferenciación de radiación de energías diferentes, radiación beta, gamma, x y neutrones térmicos, cuyas diferentes dosis pueden ser medidas.

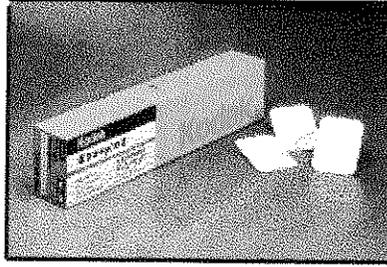


Fig. 16 Dosímetros Fotográficos.

DOSÍMETROS PERSONALES

Así como los aparatos anteriormente descritos miden en todo momento la intensidad o nivel de radiación existente en la zona donde se encuentran, existen también otros dispositivos, llamados dosímetros, que miden las dosis totales recibidas durante intervalos relativamente largos, de varias horas, días o semanas. Estos dispositivos son ligeros y sencillos y suelen llevar constantemente prendidos en la ropa de trabajo, por lo que se acostumbra a llamarlos dosímetros personales. Pueden ser de tres tipos:

1. Dosímetros de cámara de ionización
2. Dosímetros de película fotográfica
3. Dosímetros de termoluminiscencia.



Capítulo VIII Sistema de Protección Radiológica.

INTRODUCCIÓN

La radiación natural proveniente de las diversas fuentes que se conocen, varía de un lugar a otro y hasta el momento, el efecto que produce sobre el hombre, no se ha podido relacionar con algún tipo de efecto sobre la salud. Luego no se sabe si con estos niveles de dosis, o no se producen efectos nocivos o la frecuencia de aparición es tan baja que no es detectable estadísticamente.

El descubrimiento de los Rayos x y la radioactividad, causaron riesgos no previstos para la salud de las personas, pero además importantes beneficios para el hombre. Fue necesario que estas nuevas fuentes de radiación, comenzarán a producir daños para que se introdujeran medidas de protección.

En 1928, se creó la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), La cual publicó sus primeras recomendaciones en el año 1931. Las recomendaciones publicadas periódicamente por la ICRP., han sido incorporadas en las “Normas básicas de seguridad en materia de Protección Radiológica” del OIEA., y Normas Básicas de Seguridad, también en muchos países, en la legislación nacional, actualmente se usan las “ Normas Básicas Internacionales de Seguridad”.

En general, el objetivo de la protección radiológica es proteger al hombre contra los efectos nocivos de la radiación, específicamente de los efectos determinísticos y limitación de los efectos estocásticos a niveles considerables, permitiendo las prácticas importantes que involucren exposición a las radiaciones. Los aspectos de protección al medio no se consideran, pues se supone que si el hombre está bien protegido las demás especies vivientes también lo estarán.

CONCEPTOS BÁSICOS

1. Cambio : Algo que se modifica, en forma perjudicial o no.
2. Daño : Representa algún grado de cambio negativo.
3. Perjuicio : Se refiere a efectos nocivos clínicamente observables que se manifiestan en el individuo o en su descendencia.
4. Detrimento : Medida del perjuicio total que experimenta con el tiempo un grupo expuesto y su descendencia como consecuencia de la radiación.



REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE PROTECCION RADIOLOGICA

Para alcanzar los objetivos de la protección radiológica se ha recomendado el uso de un Sistema de Protección Radiológica compuesto por los siguientes requerimientos.

1. Justificación de la Práctica:

Ninguna práctica que origine exposición humana a las radiaciones debe ser autorizada, salvo que su introducción produzca un beneficio neto positivo, aún tomando en cuenta el detrimento por radiación resultante. La justificación de una práctica o de una operación que impliquen exposición a la radiación podría ser aceptada solamente si se considera que habría una ventaja neta global debido a la ejecución de ellas. Las autoridades pertinentes necesitan asegurar que el detrimento total, originado por una práctica propuesta, es adecuadamente bajo con respecto al beneficio esperado de tal práctica.

Idealmente podría usarse un análisis costo-beneficio para tomar este tipo de decisiones básicas referentes a la introducción de prácticas que involucran exposiciones a radiación.

El beneficio neto debido a la introducción de una práctica que involucra irradiación puede ser considerado como:

$$B = V - (P + X + Y)$$

Donde:

- B = Beneficio neto.
- V = Beneficio bruto.
- P = Costo básico de producción, excluyendo la protección radiológica y el detrimento.
- X = Costo para alcanzar el nivel de protección radiológica seleccionado.
- Y = Costo asignado al detrimento de la operación.

La exposición no puede ser justificada si B, es negativo, y se vuelve crecientemente justificable para valores positivos crecientes de B. En la práctica la existencia de costos y beneficios intangibles hace que el análisis sea subjetivo en muchos casos.



Capítulo VIII Sistema de Protección Radiológica.

2. Optimización de la protección radiológica:

Todas las exposiciones deberán ser mantenidas “tan bajas como sea razonablemente alcanzable”, es lo que se conoce como el criterio ALARA o TBCRA. Este requerimiento implica que el detrimento originado por una práctica debería ser reducido, por medidas de protección, a un valor tal que posteriores reducciones fueran menos importantes que el esfuerzo adicional requerido para obtenerlas.

La optimización de la protección radiológica implica un análisis costo-beneficio diferencial para maximizar el beneficio neto, y en el cual la variable independiente es la dosis equivalente colectiva S debida a la práctica.

3. Límites de dosis:

Este concepto se expresa como:

- Magnitud de referencia que no puede ser sobrepasada.
- Es la frontera de una región prohibida.
- Cualquier valor por debajo de esa frontera no está automáticamente permitido.
- Valores por sobre esa frontera están absolutamente prohibidos.

CLASIFICACIÓN DE LOS LÍMITES

1. Límites Primarios:

Son aquellos que corresponden a los valores establecidos por el sistema de limitación de dosis para dosis equivalente y dosis efectiva, es decir 500 mSv/año y 50 mSv/año para profesionales expuestos y de 5 mSv/año para el público.

2. Límites Secundarios:

Son los que se utilizan cuando no es posible aplicar directamente los límites primarios de dosis, y que pueden expresarse en función de límites anuales de irradiación externa, ingestión o inhalación, dependiendo si la exposición es externa o interna respectivamente.

3. Límites Derivados:

Estos son límites que se relacionan con los primarios por medio de un modelo determinado.



Capítulo VIII Sistema de Protección Radiológica.

4. Límites Autorizados:

Estos son valores límites de dosis o de incorporación, que fija la autoridad en materias de protección radiológica, para su aplicación en una instalación específica y que en general deben ser inferiores a los límites primarios, secundarios o derivados según en función de que se les fije.

TABLA 3
Límites Operacionales

<i>PERIODO</i>	<i>mSievert</i>	<i>mrem</i>
Anual	50	5000
Hora (2000 x año)	0.025	2.5
Diario (8 horas/día)	0.200	20
Semanal (5 días/sem)	1	100
Mensual (4 sem./mes)	4	400



INTRODUCCIÓN

El gran desarrollo y utilización alcanzado por las radiaciones ionizantes, en todos los campos de la Ciencia, Técnica e Industria, y los posibles efectos a la salud causados por éstas, ha hecho que se limiten los riesgos asociados a su utilización, para lo cual se han reglamentado procedimientos y valores límites de dosis tanto para los Trabajadores Profesionalmente Expuestos como para Público en general. Para cumplir con estos requerimientos técnicos y legales, es necesario adoptar criterios y técnicas adecuadas de protección contra las radiaciones ionizantes. Estas técnicas y criterios son los que a continuación se detallan.

Las técnicas de protección utilizadas contra las radiaciones, deberán garantizar que las dosis se mantengan siempre, por debajo de los límites que se han establecido previamente. Eso se logra con una adecuada educación y hábitos perfectamente conformados por que de la persona que están vinculadas o trabajan en la instalación, y lo más importante, por las condiciones de diseño que se deben cumplir para con la instalación, se debe considerar siempre, para disminuir las dosis resultantes, los siguientes parámetros:

1. Distancia fuente-operador.
2. Tiempo de exposición
3. Barreras blindantes.

De estos tres parámetros, sólo dos son inherentes al diseño de la instalación, y son los que permiten mantener las dosis por debajo de los límites recomendados, estos son distancia y barreras blindantes. El tiempo no depende de la instalación, sino más bien, del uso que se haga de ella.

Por otra parte, estrictamente sólo uno es intrínseco al diseño de la instalación; el blindaje, los otros dos, quedan condicionados al uso correcto o no de la facilidades de la instalación y al hábito y costumbres de los trabajadores. Luego, es muy importante dejar la menor cantidad posible de variables libradas a los usuarios de la instalación para fines de Protección Radiológica, pues cuanto menos de éstas existan, más seguridad en el uso de las radiaciones ionizantes habrá.

En el caso del parámetro distancia, es necesario recordar que la intensidad de las radiaciones disminuye con el inverso del cuadrado de la distancia, de tal manera que mientras más distante se esté de la fuente radiactiva, menor será la dosis recibida por el operador. El enunciado anterior se representa por la siguiente relación.

Para el parámetro tiempo, debemos considerar la demora de las personas que van a estar sometidas a un cierto nivel de intensidad de dosis para realizar su trabajo, lógicamente, cuanto menos sea el tiempo empleado en la operación, menor será la dosis recibida por el



Capítulo IX Técnicas de Protección contra las Radiaciones Ionizantes.

trabajador. Por esto, es muy importante que los trabajadores estén muy bien entrenados y conozcan muy bien las operaciones que tengan que realizar en zonas donde estén expuestos a las radiaciones ionizantes; todo esto con el objeto de permanecer el menor tiempo posible y así minimizar las dosis recibidas.

En muchos casos, una adecuada combinación de estos dos parámetros (Distancia-Tiempo), bastará para proporcionar una protección adecuada. Al alejarse de la fuente lo suficiente, los niveles de radiación disminuyen rápidamente, permitiendo estadías más prolongadas. Contrariamente, si se consigue acortar el tiempo de ejecución de la operación, será posible efectuarla a menor distancia, aún cuando los niveles de dosis sean superiores.

En la práctica, sin embargo, se presentan circunstancias en las que estos parámetros por sí solos no bastan para conseguir las condiciones adecuadas de trabajo, ya sea porque a la máxima distancia practicable, los niveles de radiación siguen siendo altos, o bien porque la operación tenga que efectuarse necesariamente a una distancia menor. En este caso, es preciso hacer uso de tercer parámetro mencionado anteriormente, es decir, barreras blindantes, el que consiste en interponer entre la fuente y el operador, un espesor suficiente de algún material absorbente de la radiación, en donde al atravesar la materia, la radiación sufre una disminución en su intensidad, la que se denomina atenuación en el caso de radiación gamma, y absorción o frenado, en el caso de partículas alfa o beta.

Según sea el tipo y la energía de la radiación, habrá que utilizar distintos tipos y espesores de materiales, para un blindaje adecuado.

En forma ilustrativa podemos ver en la figura 17 el poder de penetración de las partículas alfa, beta y radiación x y gamma. Para detener partículas alfa basta una hoja de papel; para los beta algunos milímetros de algún material más denso que el papel (Madera, Plástico), etc.) pero de bajo Número Atómico (Z). En cambio para un blindaje adecuado para la radiación electromagnética ionizante, es preciso emplear materiales mucho más densos, tales como, Hormigón, Fierro, Plomo, etc.

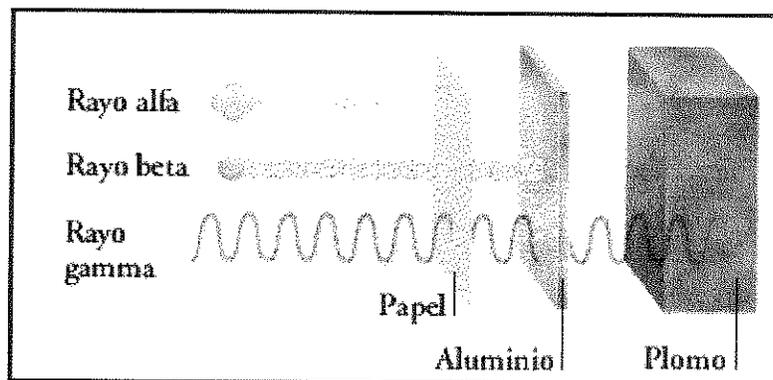


Fig.17. Esquema diferentes materiales absorbentes y atenuantes.



Capítulo IX Técnicas de Protección contra las Radiaciones Ionizantes.

Existen además otros mecanismos de protección más específicos, que se deben tener en cuenta. Tal es el caso de la ventilación, la que se utiliza para controlar la concentración de material radiactivo en el aire de los ambientes de trabajo. El confinamiento, que consiste en enclaustrar la fuente, utilizando cajas de guantes, celdas estancas, etc. La ley de decaimiento radiactivo, la que nos permite por ejemplo; un manejo adecuado de los desechos radiactivos.

CONSIDERACIONES IMPORTANTES PARA LA EVALUACION DE UN BLINDAJE.

Cada vez que se decida el uso de un blindaje para protegerse de las radiaciones ionizantes, se debe tener en cuenta las diversas variables tales como:

- Características de la fuente a blindar (tipo de emisor, actividad, energía de las emisiones).
- Distancia entre la fuente y el operador.
- Categoría de las personas a proteger, ya que esto determina el Límite de la tasa de dosis al otro lado del blindaje que se aceptará.
- Tener presente siempre, la Constante Específica Gamma y Espesor Semirreductor, tanto para radiación x y gamma.

Otro aspecto importante en la consideración de un blindaje, es el tener presente siempre la radiación que llegará a la zona a proteger, la que puede ser:

- Directa o Primaria.
- Indirecta o Secundaria.

Una fuente sin blindaje por ejemplo, emite isotrópicamente radiación primaria en todas las direcciones, pero habitualmente la fuente emisora está confinada en una carcasa o cabezal adecuado (Fuente de Cobalto-Terapia) y solamente durante cierto tiempo (Tiempo de uso), irradia direccionalmente, haciéndolo sólo en una dirección prefijada.

Es importante destacar que la radiación que escapa por el blindaje del equipo genera tasas de dosis bajas, en conclusión, en este tipo de equipos el tiempo real de irradiación o tiempo de uso, depende de la carga de trabajo. En Radioterapia, depende de la cantidad de pacientes y del tiempo durante el cual se irradia a cada uno de ellos, en el día o semana. La magnitud que se considera, es siempre la Tasa de Dosis por hora, día o semana, o bien la dosis integrada en cierto tiempo (Usualmente una semana), la que se compara con el límite recomendado.



ABSORCIÓN O FRENADO DE PARTÍCULAS α .

Midiendo la ionización específica producida en el aire por partículas alfa de una fuente determinada a diversas distancias de la fuente, se obtiene una curva de forma característica, denominada Curva de Bragg, (Fig. 8). Se observa que la ionización específica aumenta con la distancia a la fuente, lentamente al principio y luego rápidamente; tras pasar por un máximo, cae bruscamente a cero. Este fenómeno se explica como sigue; los valores crecientes de la ionización específica teniendo en cuenta que la partícula alfa, al ir recorriendo su trayectoria produciendo pares iónicos, ya perdiendo energía y por tanto velocidad de modo constante.

Como al reducirse la velocidad de la partícula, aumenta la ionización específica, ésta aumentará, por consiguiente, al aumentar la distancia a la fuente. Obsérvese que hacia el final de su trayectoria la partícula alfa se mueve con relativa lentitud, y es entonces cuando la ionización específica alcanza su valor máximo. Pasado cierto punto, la energía de la partícula ha quedado tan reducida, que captura primero un electrón y luego otro, convirtiéndose así en un átomo de Helio, incapaz ya, de producir ionización. Esto explica el descenso brusco de la ionización específica que se observa en la gráfica de la figura 8. Es muy interesante el hecho de que ésta disminución sea bastante brusca y no gradual; en efecto, ello implica que toda las partículas alfa de una fuente determinada poseen prácticamente la misma energía, y por ello todas dejan de producir ionización tras haber recorrido la misma distancia. Estrictamente hablando si, si toda las partículas alfa se comportasen exactamente igual, la porción final de la curva sería rigurosamente vertical, pero pequeñas diferencias existentes, dan lugar a una ligera pendiente. La distancia extrapolada, representada por R, a la cual las partículas alfa de una fuente determinada dejan de producir ionización, recibe el nombre de alcance de las partículas en el medio considerado.

El alcance de las partículas alfa, en el aire o en otro material, depende de la naturaleza de la fuente, puesto que de ella depende la Energía de las partículas. Existe proporcionalidad inversa entre el período de un radioisótopo y la energía, y por tanto, el alcance de las partículas alfa que emite, esto significa que, cuanto más corto es el período, mayor es el alcance de las partículas alfa, ver tabla 4.

TABLA 4

RADIONUCLEIDO	PERÍODO (año)	ENERGÍA (Mev)	ALCANCE AIRE (cm)
Torio ₂₃₂	1.39×10^{10}	4	2.5
Uranio ₂₃₅	7.13×10^9	4.4 y 4.6	2.9 y 3.1
Uranio ₂₃₃	1.62×10^5	4.8	3.3
Plutonio ₂₃₅	2.41×10^4	5.1	3.6



Capítulo IX Técnicas de Protección contra las Radiaciones Ionizantes.

En materiales absorbentes más densos que el aire, la ionización específica es generalmente mayor, a causa de la mayor concentración de átomos, por consiguiente, el alcance de las partículas alfa de determinada energía es menor en estos absorbentes que en el aire. El poder de frenado o absorción de un absorbente, es la magnitud que mejor define el alcance, independiente de la energía de las partículas alfa.

El poder de frenado del agua vale alrededor de 1000, el del Aluminio 1600, y el del Plomo 5000. El papel y los tejidos vivos tienen más o menos el mismo poder de frenado que el Aluminio 1600, y el del Plomo 5000. El papel y los tejidos vivos tienen más o menos el mismo poder de frenado que el Agua, es decir, alrededor de 1000 veces.

A modo de ejemplo, una partícula que tenga en el aire un alcance de 5 cm, que ya es un valor bastante alto, tendría en papel o en tejido vivo un alcance del orden de 0,005 cm, por lo tanto, una hoja de papel ordinario, con un espesor aproximado de 0,1 mm, puede detener prácticamente todas las partículas alfa de origen radiactivo.

ABSORCION O FRENADO DE PARTICULAS β

En su paso a través de la materia, las partículas beta comparten con las alfa, ciertas características comunes, por ejemplo, la producción de pares iónicos en el aire a razón de unos 34 eV (Electrón-Volt) por par, pero existen algunas diferencias importantes. En primer lugar, la menor masa de las partículas beta significa, como antes hemos visto, que la ionización específica es inferior a la producida por una partícula alfa de la misma energía.

Por otra parte, las partículas alfa procedentes de una misma fuente poseen todas la misma energía o bien se distribuyen en dos o tres grupos energéticos perfectamente definidos. En cambio, las partículas beta presentan una distribución continua de energías, es decir, un espectro energético continuo, hasta un valor máximo preciso característico de cada fuente que emite partículas beta.

En caso de las partículas alfa, como su masa es relativamente grande, no experimentan cambios notables de dirección en su paso a través de la materia. Dicho de otro modo, la mayor de ellas recorren trayectorias rectilíneas, lo que hace que su alcance quede bastante bien definido para una energía determinada, en cambio las partículas beta están sometidas a un efecto de dispersión considerable, lo que ocasiona cambios frecuentes en su dirección, como consecuencia de las interacciones electrostáticas que realizan con núcleos atómicos y electrones y por tanto, tras haber atravesado el mismo espesor de un determinado absorbente, las partículas, lo cual significa que han recorrido, en realidad, trayectorias de diferente longitud.

Las partículas beta no poseen un alcance preciso, en el mismo sentido que lo tienen las partículas alfa, No obstante, es posible determinar un espesor de absorbente más o menos definido, capaz de reducir casi a cero la ionización producida por estas partículas,



Capítulo IX Técnicas de Protección contra las Radiaciones Ionizantes.

exceptuando la radiación de bremsstrahlung. En tabla 5, figuran los alcances aproximados en aire de partículas beta de diferentes energías máximas.

TABLA 5

<i>ENERGÍA (Mev)</i>	<i>ALCANCE (m)</i>
0.1	0.11
0.5	1.5
1.0	3.7
2.0	8.5
3.0	13.0

La fuentes radiactivas que emiten partículas Beta, lo hacen conformando un espectro continuo de energía máxima. Esta energía característica determina el alcance máximo de la partícula beta en el absorbente y permite calcular un blindaje adecuado con bastante precisión.

Como resultado de este comportamiento, puede admitirse que el espesor de absorción es en primera aproximación, independiente de la naturaleza del material absorbente. Esta aproximación se basa en la hipótesis de que el alcance lineal de la partícula beta en cualquier medio, es inversamente proporcional a la densidad de éste. Así pues, para calcular el alcance lineal aproximado en cualquier material, sólo se necesita conocer su densidad.

RADIACION DE FRENADO (BREMSSTRALHUNG)

Prescindiendo del hecho que los Rayos x poseen ordinariamente energías más bajas, es decir, longitudes de onda algo mayores, la diferencia esencial entre los rayos gamma y los X, es que estos últimos se producen fuera del núcleo atómico. Los Rayos x característicos, que como su nombre lo indica, posee energías y longitudes de onda bien definidas, características del elemento de que se trate, se producen por transiciones entre los niveles electrónicos del átomo. Estas radiaciones sin embargo, tienen poca importancia para lo que ahora nos preocupa.

Mayor interés radiológico ofrece la radiación x continua, denominada Bremsstrahlung, literalmente "Radiación de Frenado", que se produce cuando los electrones (Partículas beta) de gran velocidad pierden su energía al atravesar la materia. En general la fracción de energía cinética del electrón, que se convierte en radiación de frenado, es tanto mayor, cuanto más alta es la energía del electrón y cuanto más elevado es el número atómico del elemento con el que interacciona. La energía de los Rayos x resultantes, cubre un amplio intervalo; el máximo del espectro se encuentra muy próximo a la energía máxima de los



Capítulo IX Técnicas de Protección contra las Radiaciones Ionizantes.

electrones, pero la energía media es mucho menor. La consideración de este fenómeno se presentará en detalle en blindaje para radiación electromagnética.

CONSIDERACIONES PARA LA ABSORCIÓN O FRENADO DE PARTICULAS α Y β

Para fuentes emisoras alfa o beta, hay que tener en cuenta el "Rango", de cada una de ellas. Sólo será posible la irradiación, si estamos a una distancia inferior a dicho rango.

Las partículas beta, pueden ser frenadas o absorbidas en su totalidad, mediante la interposición de un material de densidad y espesor adecuados; el blindaje para este tipo de radiación tiene por finalidad frenar, incluso, las partículas de mayor energía, logrando la absorción total. Un blindaje para radiación beta, puede ser calculado a partir del rango, al igual que el caso de las partículas alfa.

En definitiva, se podría concluir, que las partículas alfa y beta pueden ser frenadas o absorbidas en forma completa con un cálculo rápido y simple. En el caso de la radiación beta, este propósito se obtiene a partir de una gráfica única. Esto diferencia fundamentalmente a los blindajes para partículas alfa y beta, de los blindajes para radiación gamma y x, de los que sólo puede esperarse una "Atenuación" parcial, ya que siempre pasará una fracción de la radiación electromagnética incidente en el material.

Para la evaluación de un blindaje adecuado para radiación alfa, se debe tener presente que ésta no representa un problema de irradiación, ya que su alcance es muy pequeño, sino más bien, es necesario no olvidar que una incorporación de alguna sustancia radiactiva que emita este tipo de partículas, significaría una dosis considerable en el interior de nuestro organismo, es decir, las partículas alfa no nos ofrecen un problema de irradiación, sino más bien de contaminación interna.

En el caso de blindaje para partículas beta, es necesario tener presente siempre la generación de radiación de frenado, al interaccionar éstas con la materia. Este fenómeno depende de la energía de la partícula incidente y del número atómico del material (Z) utilizando como absorbente, es por esto que en algunos casos es necesario un cálculo de un blindaje adicional debido a la radiación generada por este fenómeno. Esta situación se considera en acápite pertinente para blindar radiación gamma y x.

Como ya hemos visto, los radionúclidos emisores beta emiten partículas con diferentes energías, conformando un espectro continuo, del cual es característica fundamental su energía máxima. Esta energía máxima determina el alcance máximo llamado Rango, de las partículas beta dentro del material, y por tanto permite calcular el espesor del mismo, con bastante precisión

Como se ha explicado anteriormente, para una energía dada de una partícula beta, el producto del espesor necesario de cierto material multiplicado por la densidad de éste, es



Capítulo IX Técnicas de Protección contra las Radiaciones Ionizantes.

prácticamente constante, sin importar el material; esto permite expresar el alcance de la partícula, como el producto (p.x) necesario para detenerla completamente, independiente del material que se use. De este modo la densidad del material que se decida emplear, permitirá calcular el espesor necesario del mismo.

Dicha fórmula se explicada en la página 23.

ATENUACION DE RADIACION ELECTROMAGNETICA GAMMA Y X.

Cuando la radiación gamma atraviesa la materia, la desaparición de fotones hace que su intensidad decaiga en forma exponencial. La razón es la siguiente; en un punto cualquiera del medio, la pérdida de fotones que se produce en una espesor diferencial de absorbentes dx , es proporcional a la intensidad de la radiación en dicho punto y al espesor atravesado por ésta, es decir

$$dI = \mu I \cdot dx$$

Siendo I , la intensidad de la radiación, expresada en función de cualquier tipo de magnitud radiológica. La constante de proporcionalidad se expresa en cm^{-1} , recibe el nombre de Coeficiente de Atenuación lineal (descrito en la página 32).

Una consecuencia del carácter exponencial de la atenuación de rayos gamma, es que si bien, la cantidad de radiación absorbida por un determinado espesor de material, es proporcional a la intensidad inicial; la fracción absorbida es independiente de su intensidad. Así por ejemplo; se necesita el mismo espesor de absorbente para reducir la intensidad de un haz de radiación gamma, del 1 al 0,1% de su valor inicial, que para reducir del 100 al 10%. Otra consecuencia es que, teóricamente, se necesita un espesor infinito de material para absorber completamente la radiación gamma, es decir, para hacer $I_x = 0$. Sin embargo, en los casos que se presentan en la práctica, por ejemplo; en blindajes radiológicos, se consigue reducir la intensidad inicial de la radiación, a valores casi insignificantes, con espesores finitos.

COEFICIENTE DE ATENUACION LINEAL Y ENERGIA DE LA RADIACION GAMMA.

El Coeficiente de Atenuación Lineal es función de la energía de la radiación gamma, puesto que, como se ha visto, todas las formas de interacción de ésta radiación gamma, puesto que, como se ha visto, todas las formas de interacción de ésta radiación con la materia, dependen de la energía. El Coeficiente de Atenuación con la materia, dependen de la energía. El Coeficiente de Atenuación Lineal (cm^{-1}), puede determinarse a partir del Coeficiente de Atenuación Másico (cm^2/gr) y la densidad (gr/cm^3), del medio a utilizar



Capítulo IX Técnicas de Protección contra las Radiaciones Ionizantes.

como blindaje. En el presente apunte estos valores se encuentran tabulados en función de la energía y del material como blindaje.

CAPA SEMIREDUCTORA Y DECIREDUCTORA (HVL Y TVL).

Como se explica en la página 32, es el espesor de material interpuesto entre fuente y punto de medición, que reduce la intensidad de la radiación a la mitad del valor original y se le simboliza como $X_{1/2}$. En el caso de la capa decireductora, ésta se define como el espesor necesario para reducir la intensidad de la radiación a la décima parte del valor sin blindaje.

Para un determinado material y una radiación monoenergética, el semiespesor se mantiene constante para el caso de radiación gamma (Interponiendo 1 semiespesor, la intensidad baja a la mitad; con 2 baja a 1/4). En cambio, para radiación x, de espectro continuo, el semiespesor aumenta a medida que aumenta el filtrado, ya que con espesores pequeños y filtrado escaso se atenúan mucho las componentes de baja energía, lográndose con pocos milímetros de plomo disminuir la intensidad generada por todas las componentes originales a la mitad; el espectro filtrado por este primer espesor, tiene mayor proporción de energía altas, por lo que el espesor necesario para reducir la intensidad de radiación del nuevo haz a la mitad, será mayor que el primero. Para Rayor x, el semiespesor dependerá del filtrado del haz, es decir, del blindaje previo.

EJERCICIOS

1. Relación entre Semiespesor y Coeficiente de Atenuación Lineal

Se tiene una fuente radiactiva de Cs-137 que genera una Tasa de Exposición en un determinado punto, de 2000 mR/h. Calcular usando HVL y TVL, el espesor de Hierro necesario para reducir la Tasa de Exposición a 2,5 Mr/h después del blindaje.

Datos:

- HVL Fe = 1,6 cm.
- TVL Fe = 5,4 cm.

Desarrollo:

Con 1 TVL = 5,4 cm Fe = 200 mR/h.
Con 1 TVL = 5,4 cm Fe = 20 mR/h.
Con 1 HVL = 1,6 cm Fe = 10 mR/h.
Con 1 HVL = 1,6 cm Fe = 5 mR/h.



Capítulo IX Técnicas de Protección contra las Radiaciones Ionizantes.

Con 1 HVL = 1,6 cm Fe = 2,5 mR/h.

En suma, se tiene que el espesor de Fe necesario para reducir la Tasa de Exposición a 2,5 mR/h, es de 2 TVL+3HVL, es decir, 15,6 cm de Fe.

2. Ecuación de la Atenuación.

Se tiene una fuente radiactiva de Co_{60} que genera una Tasa de Exposición en un determinado punto, de 9000 mR/h. Calcular usando ecuación de la atenuación, el espesor de Hierro necesario para reducir la Tasa de Exposición a 20 mR/h después del blindaje.

Datos:

- $\mu_1 = 0.6552$

Desarrollo:

- $I_F = I_1 \times e^{-\mu_1 x}$

- $x = \ln \left(\frac{9000}{20} \right)$
0.6552

- $x = 9.3 \text{ cm}$

3. Gráfica de Transmisión.

Cuando sólo se dispone con los valores de los coeficientes, se emplea para el cálculo de un blindaje el producto $\mu_1 x$. Para simplificar los cálculos en la práctica, se han graficado los productos $\exp. -\mu_1 x$ o sea, la transmisión a través de un espesor x de un material de coeficiente de atenuación lineal μ_1 . Estos gráficos difieren para cada radionúclido de acuerdo a su espectro de energía y al material utilizado como blindaje, ver gráficas adjuntas.

La transmisión expresada en ordenadas como tanto por uno, es la relación entre la intensidad de radiación emergente y la incidente, por lo tanto, basta con calcular la relación entre la intensidad de radiación deseada I , y la que habría sin blindaje I_0 , obteniéndose finalmente la transmisión deseada. Esta transmisión se representa por la letra K y se calcula por la siguiente relación:

$$K = \frac{I}{I_0}$$



Capítulo IX Técnicas de Protección contra las Radiaciones Ionizantes.

Esta ecuación puede ser expresada en función de cualquier magnitud Radiológica. En consecuencia, para una determinada fuente se calcula el K deseado y se ingresa a la gráfica correspondiente, se ubica de acuerdo al material utilizado como blindaje y al radionúclido que se trate y se lee directamente en abscisas el espesor x necesario.

La gráficas adjuntas a este apunte, permite calcular espesores de blindaje de Plomo para unidades de Rayos x, en función de distintos valores de kvp de tubos.

EJERCICIO

Se tiene una fuente radiactiva de Co-60, y en un punto determinado se miden 1250 mR/h. Usando gráficas de transmisión, calcular el espesor de Plomo necesario para reducir la Tasa de Exposición a 2,5 mR/h después del blindaje.

Se calcula el valor del K y luego se ingrese con este valor a la gráfica correspondiente, es decir:

$$\bullet \quad K = \frac{I}{I_0} = \frac{X}{X_0} = \frac{2,5 \text{ Mr/h.}}{1250 \text{ mR/h.}} = 2 \times 10^{-3} = 0,002.$$

En consecuencia, el espesor de Plomo necesario para reducir la Tasa de Exposición al valor requerido, es de 12 cm.

OBSERVACIONES IMPORTANTES.

1. En general, para cálculos de blindaje se emplean comúnmente las fórmulas señaladas en este apunte.
2. Las fuentes no puntuales en primera aproximación, pueden tratarse como varias fuentes puntuales superpuestas, ubicadas en sus correspondientes centros de gravedad cuidando que la distancia del observador a la fuente sea alrededor de cinco (5) a diez (10) veces el tamaño de ésta.



GRÁFICO 1
ESPESORES DE CONCRETO PARA DISTINTOS RADIOISÓTOPOS

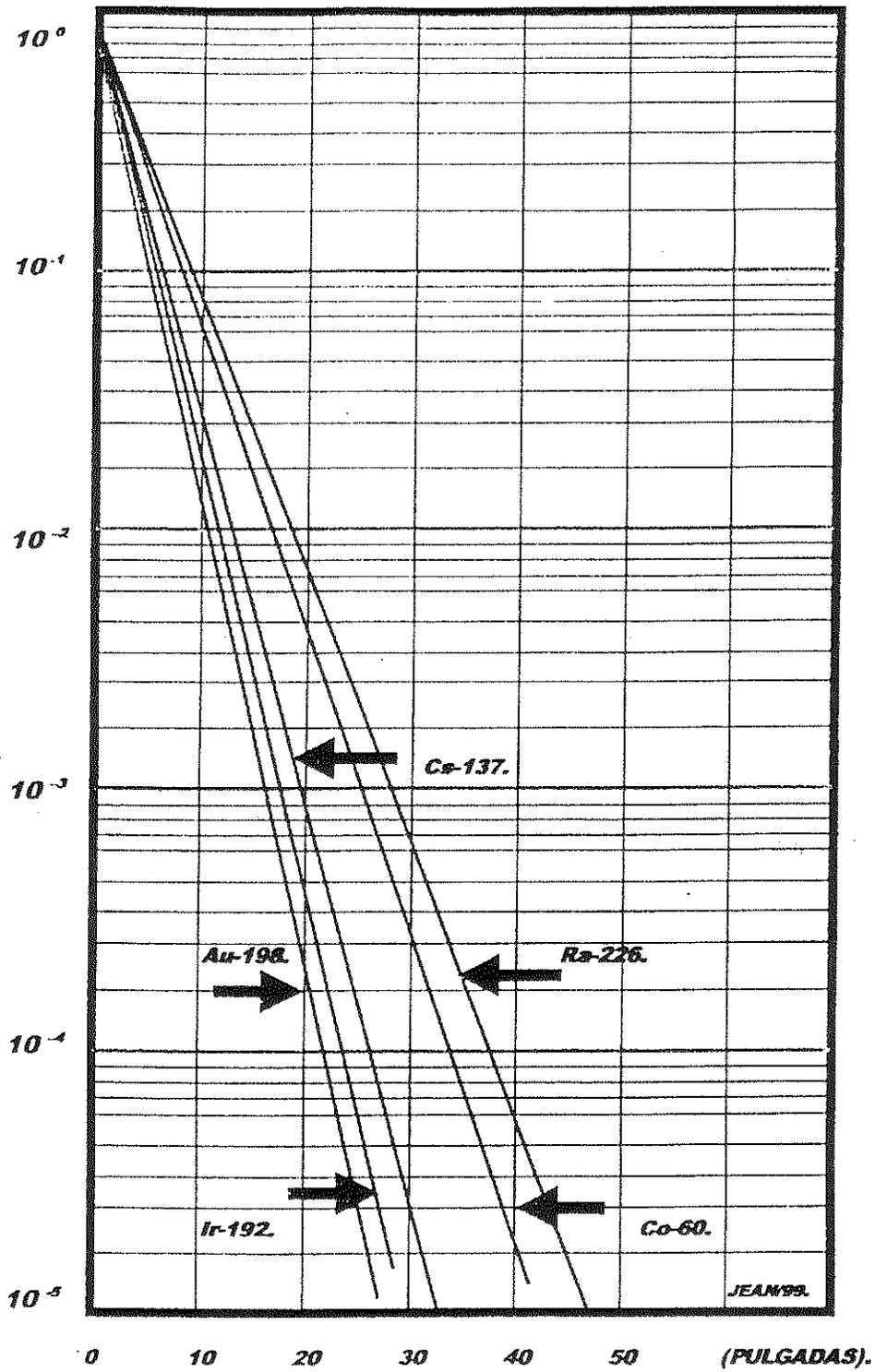




GRÁFICO 2
ESPEORES DE HIERRO PARA DISTINTOS RADIOISÓTOPOS

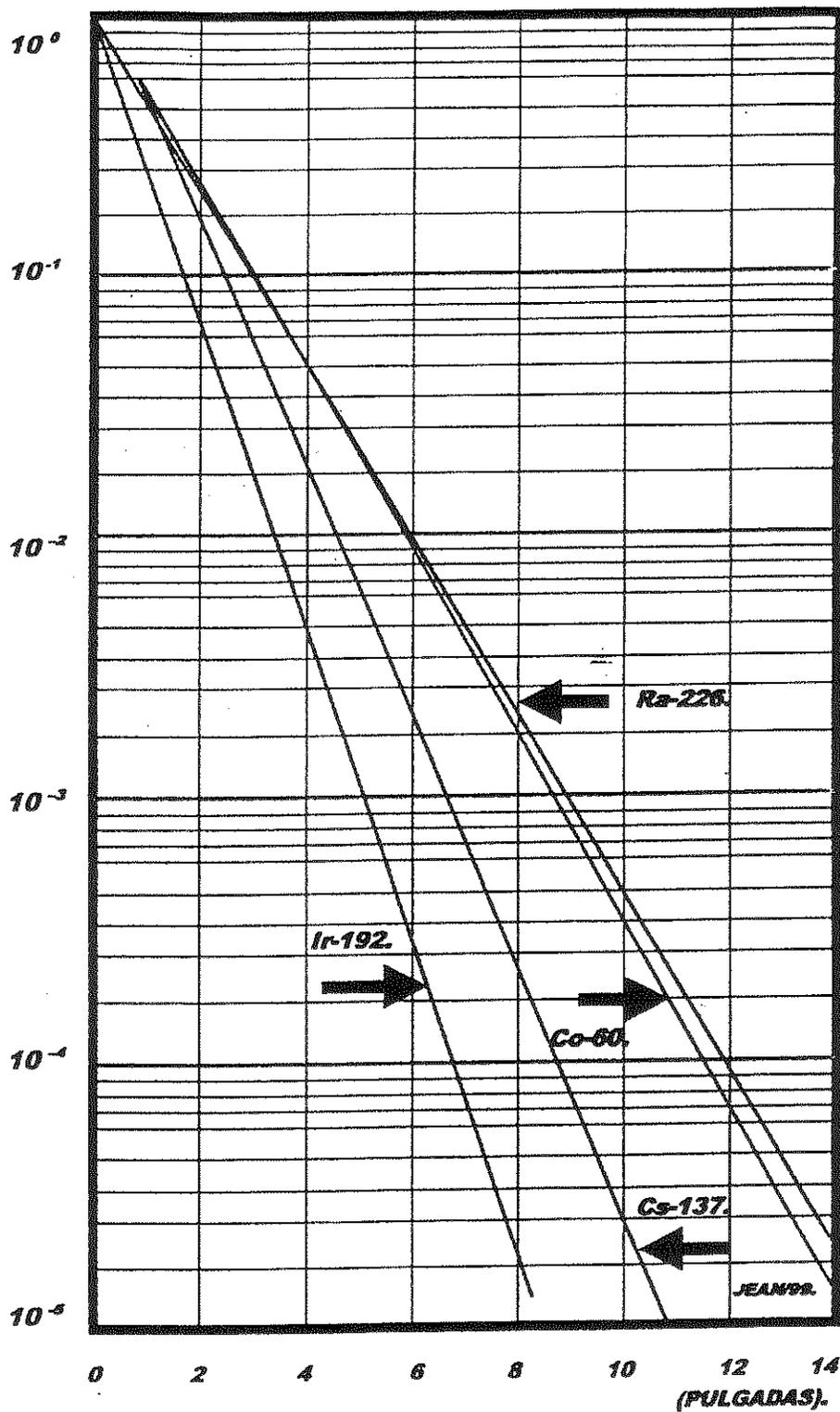




GRÁFICO 3
ESPEORES DE PLOMO PARA DISTINTOS RADIOISÓTOPOS

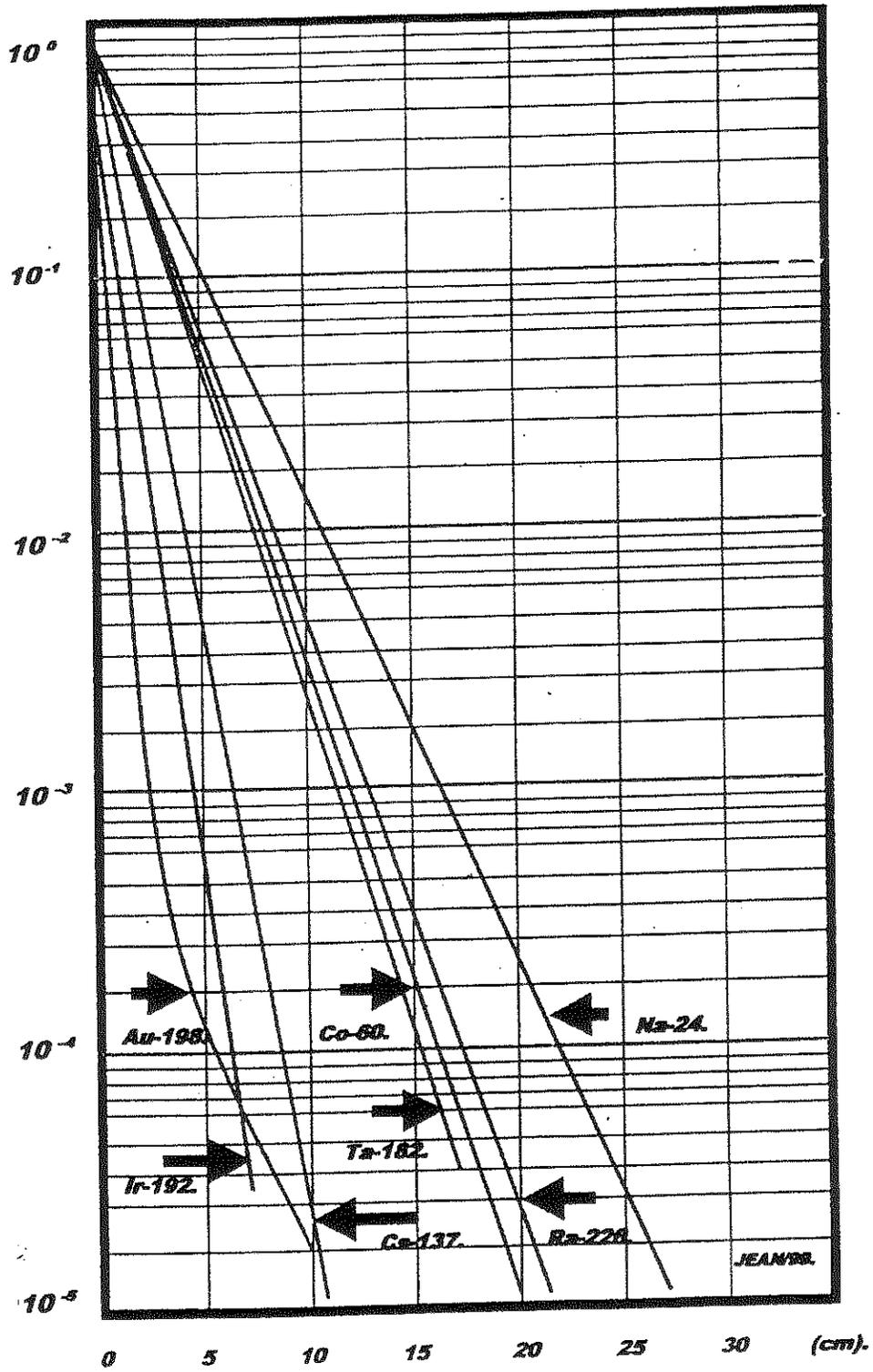
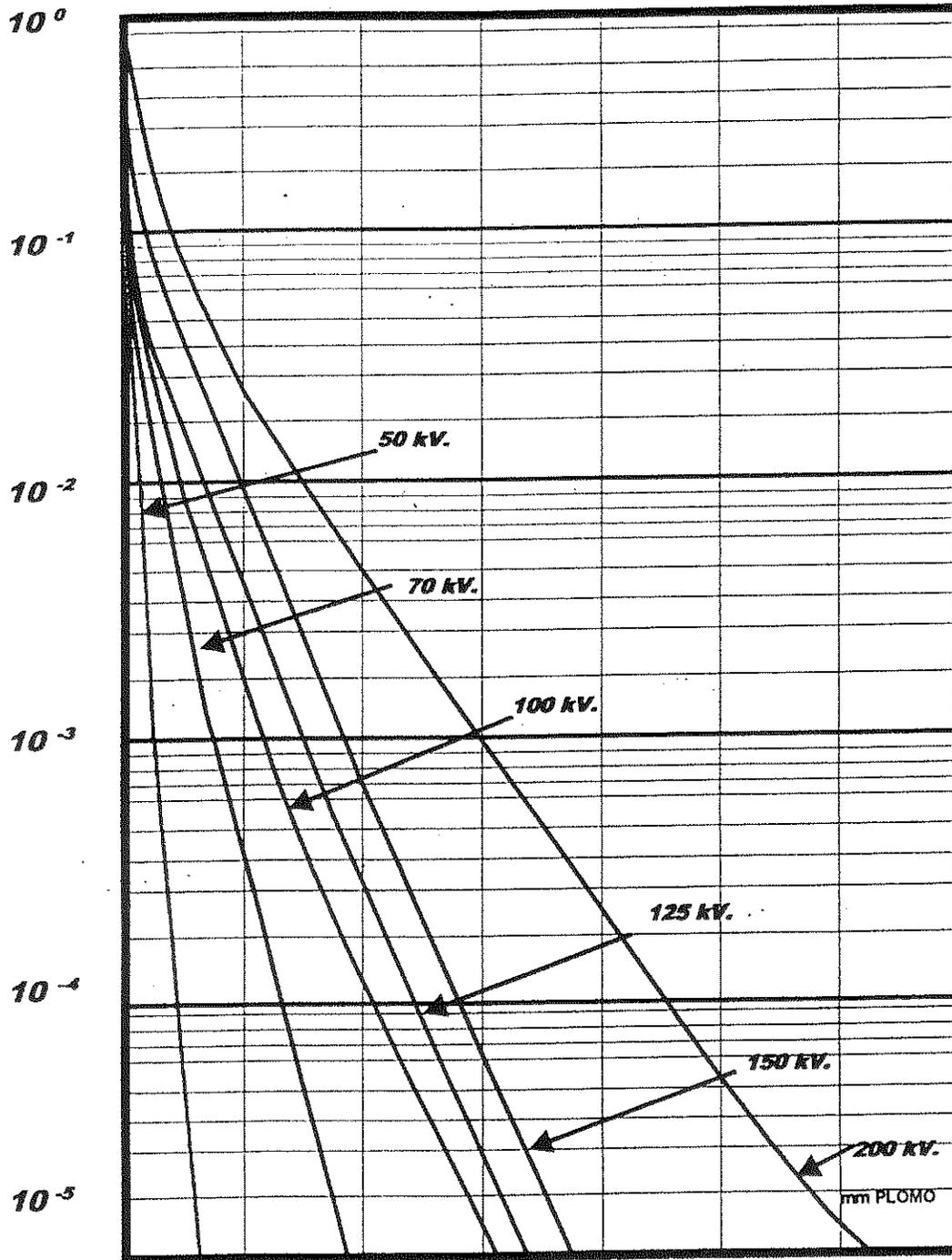




GRÁFICO 4
ESPESORES DE PLOMO PARA DISTINTOS KV DE TUBOS DE RAYOS X.





Capítulo IX. Técnicas de Protección contra las Radiaciones Ionizantes.

Los gráficos 1,2,3,4. Representan los factores de transmisión K

TABLA 6
HVL

<i>RADIOELEMENTO</i>	<i>PLOMO (cm)</i>	<i>FIERRO (cm)</i>	<i>CONCRETO (cm)</i>
<i>Cesio137</i>	<i>0.65</i>	<i>1.60</i>	<i>4.90</i>
<i>Iridio192</i>	<i>0.55</i>	<i>1.30</i>	<i>4.30</i>
<i>Cobalto60</i>	<i>1.10</i>	<i>2.00</i>	<i>6.30</i>

TABLA 7
TVL

<i>RADIOELEMENTO</i>	<i>PLOMO (cm)</i>	<i>FIERRO (cm)</i>	<i>CONCRETO (cm)</i>
<i>Cesio137</i>	<i>2.20</i>	<i>5.40</i>	<i>16.3</i>
<i>Iridio192</i>	<i>1.90</i>	<i>4.30</i>	<i>14.0</i>
<i>Cobalto60</i>	<i>4.00</i>	<i>6.70</i>	<i>20.3</i>

TABLA 8
HVL Para equipos de Rayos x

<i>MATERIAL</i>	<i>50 Kv</i>	<i>70 Kv</i>	<i>100 Kv</i>	<i>125 Kv</i>	<i>200 Kv</i>	<i>250 Kv</i>	<i>300 Kv</i>	<i>400 Kv</i>
<i>Plomo (cm)</i>	<i>0.05</i>	<i>0.18</i>	<i>0.24</i>	<i>0.27</i>	<i>0.50</i>	<i>0.08</i>	<i>1.30</i>	<i>2.20</i>
<i>Concreto (cm)</i>	<i>0.51</i>	<i>1.27</i>	<i>1.80</i>	<i>2.00</i>	<i>2.50</i>	<i>2.80</i>	<i>3.00</i>	<i>3.30</i>



BIBLIOGRAFÍA

- *Conceptos Básicos sobre Radiaciones Ionizantes y Protección Radiológica.*
 - *Eduardo Labbé*

 - *The Physics of Radiology.*
 - *Harold Elford Johns.*

 - *Manual de Radiología para Técnicos.*
 - *Stewart C. Bushong.*

 - *Técnica de la Radiología Médica.*
 - *G.J. Van Der Plaats.*

 - *An Introduction to Radiation Oncology Physics.*
 - *Robert Stanton.*
 - *Donna Stinson.*

 - *Apuntes Curso de Protección Radiológica Operacional.*
 - *Comisión Chilena De Energía Nuclear.*

 - *Apuntes Curso de Protección Radiológica.*
 - *Sergio Galaz Leiva*
-