

INFORMACION Y CAPACITACION
SOBRE EMERGENCIAS NUCLEARES

personal sanitario



Ministerio del Interior
Dirección General de Protección Civil

INDICE

	<u>Página</u>
TEMA - 1. PRINCIPIOS BASICOS DE LA FISICA ATOMICA Y NUCLEAR	1
La estructura de la materia	1
Núcleos y reacciones nucleares. La radiactividad	2
Interacción de la radiación con la materia	8
TEMA - 2. CONCEPTOS BASICOS SOBRE UNA CENTRAL NUCLEAR ..	11
Descripción de una central nuclear	11
Tipos de reactores nucleares	14
Radiactividad en una central nuclear. Residuos radiactivos y efluentes líquidos y gaseosos	21
Seguridad de una central nuclear	24
TEMA - 3. CONCEPTOS BASICOS EN PROTECCION RADIOLOGICA ...	33
Definición de magnitudes y unidades utilizadas en protección radiológica ...	33
El sistema de limitación de dosis recomendado por el C.I.P.R.	39
Límites de dosis	40
TEMA - 4. DETECCION Y MEDIDA DE LA RADIACION	41
Detectores de la radiación	41
TEMA - 5. ASPECTOS SANITARIOS DEL ACCIDENTE NUCLEAR	48
Introducción	48
Principios generales	48
La toma de decisiones	50
Evaluación de la exposición	52
Evaluación de los efectos de la exposición	53
La elección de las contramedidas	56
Efectos psicosociológicos	65
TEMA - 6. EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES SOBRE EL ORGANISMO HUMANO	67
Generalidades	67
Efectos a corto plazo	67
Efectos retardados	73

TEMA - 7. INCORPORACIÓN DE RADIONUCLEIDOS AL ORGANISMO HUMANO	83
Introducción	83
Características generales	83
Vías de contaminación interna	83
Distribución de radionucleidos a partir de la sangre	85
Eliminación	85
Organos preferentes de deposición de los radionucleidos	86
TEMA - 8. ATENCION AL PACIENTE IRRADIADO	87
Introducción	87
Atención al paciente irradiado	87
Anexo	98
TEMA - 9. ATENCION AL PACIENTE CONTAMINADO	102
Introducción	102
Contaminación externa	102
Contaminación interna	109
Referencias	113
Anexo - 1	114
Anexo - 2	129
Anexo - 3	130
TEMA - 10. EL PERSONAL SANITARIO ANTE UNA EMERGENCIA NUCLEAR	133
Introducción	133
Plan de emergencia interior	133
El máximo accidente previsible	134
Plan de emergencia exterior	136
Interfase	137
Notificación de la emergencia	137
Niveles de intervención	140
Fases y situaciones de emergencia	141
Zonas de planificación	143
Categorías, fases y situaciones	145
Medidas de protección	146
Esquema general del plan de emergencia provincial	147
Organización del grupo sanitario	148
Anexos	154

TEMA - 1. PRINCIPIOS BASICOS DE LA FISICA ATOMICA Y NUCLEAR

LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA

Elementos que la componen

El aire, el agua, la piedra, los metales y todos los cuerpos de la naturaleza están compuestos por átomos. A cada átomo diferente le corresponde un "elemento natural": hidrógeno, oxígeno, carbono, hierro, etc. Del hidrógeno al uranio, hay 90 elementos naturales. Los átomos se agrupan entre ellos formando las moléculas, por ejemplo el agua está formada por moléculas que tienen dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno.

El átomo es similar a un sistema solar en el que los electrones, lo mismo que los planetas, están girando en distintas órbitas alrededor del núcleo, el sol. (Figura 1.1.).

El átomo está formado por tres clases de partículas:

- Los protones: partículas que poseen una carga eléctrica positiva.
- Los neutrones: partículas que no tienen carga eléctrica; protones y neutrones tienen prácticamente la misma masa.
- Los electrones: partículas que tienen una carga eléctrica negativa igual en valor absoluto a la del protón; tienen una masa unas 2.000 veces menor que la de protones y neutrones (figura 1.2.).

Los protones y los neutrones constituyen el núcleo de los átomos. Los electrones giran alrededor del núcleo a gran velocidad. El número de electrones es igual al número de protones. Por tanto, el átomo es eléctricamente neutro.

El diámetro del átomo es del orden de 10.000 veces más grande que el diámetro del núcleo en el que se halla concentrada prácticamente toda la masa.

Existen otras partículas elementales además del protón, el neutrón y el electrón, pero éstas *no intervienen directamente en los procesos de fisión del núcleo.*

Elementos químicos e isótopos

Un átomo está definido por el número de protones y neutrones que constituyen su núcleo.

Las propiedades químicas de un átomo dependen del número y de la disposición de los electrones que giran en la corteza. Por tanto, dependen del número de protones del núcleo que recibe la denominación de *Número atómico*. Todos los átomos que tienen el mismo Número atómico poseen las mismas propiedades químicas, incluso aunque no tengan el mismo número de neutrones y pertenecen al mismo elemento químico designado por un mismo símbolo (ejemplos: H para el hidrógeno, C para el carbono, O para el oxígeno, Fe para el hierro, U para el uranio, etc.). Hay 90 elementos químicos naturales y 15 artificiales (por ejemplo, el plutonio).

En la Tabla Periódica de los elementos, éstos están ordenados en filas por números atómicos crecientes consecutivos mientras que en las columnas se encuentran los elementos que tienen la misma estructura de las capas electrónicas alrededor del núcleo, lo que les confiere propiedades químicas análogas. (Figura 1.3.).

Los átomos que tienen el mismo número de protones y un número diferente de neutrones se denominan *isótopos*. El número de protones más neutrones se denomina *Número másico*. Las propiedades físicas de los isótopos de un mismo elemento son diferentes, lo mismo que sus propiedades nucleares.

Hay 325 isótopos naturales (siempre presentes en las mismas proporciones en el mismo elemento) y casi 1.200 isótopos artificiales. Simbólicamente, cada isótopo se representa por el símbolo del elemento correspondiente al que van asociados el número másico y el atómico. Por ejemplo, los tres isótopos del hidrógeno son el hidrógeno (1 H), el deuterio (2 H) y el tritio (3 H).

NUCLEOS Y REACCIONES NUCLEARES. LA RADIOACTIVIDAD

Los núcleos están formados por un conjunto de nucleones (protones y neutrones). Los nucleones se mantienen unidos en el núcleo mediante las fuerzas nucleares. Estas son casi un millón de veces más grandes que las fuerzas interatómicas e intermoleculares —de origen electromagnético— que ligan a los electrones en átomos y moléculas.

Los núcleos presentes en la naturaleza son estables en su gran mayoría. Sólo los más pesados manifiestan una inestabilidad espontánea (radiactividad natural). Hay núcleos isótopos de los núcleos estables que son inestables porque su estructura nuclear (protones más neutrones) no está suficientemente ligada, debido a una falta de cohesión entre los nucleones, y sufren una transformación espontánea; se dice que son radiactivos.

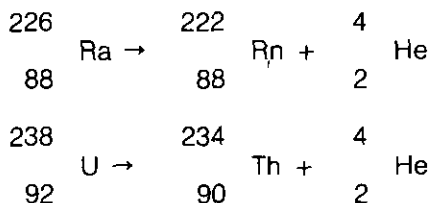
La radiactividad es un fenómeno puramente nuclear, totalmente independiente de los electrones que giran alrededor del núcleo. Es un fenómeno espontáneo (que se produce sin intervención exterior) e imprevisible a nivel individual: es un fenómeno estadístico. Esta transformación del núcleo para alcanzar un estado estable puede seguir caminos diferentes.

Tipos de radiación (figura 1.4.)

Como resultado de la desintegración, el núcleo inicial inestable se transforma en uno o en un grupo de partículas. Estas partículas emitidas son las que se conocen con el nombre de radiación.

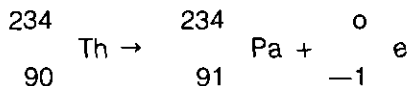
a) Radiación alfa (α)

La partícula emitida (α) es un núcleo de helio, formado por dos protones y dos neutrones. Por ejemplo:



b) Radiación beta (β)

La partícula emitida es un electrón. Por ejemplo, el Torio-234, cuyo núcleo es muy rico en neutrones, se transforma en Protactinio-234. Un neutrón se transforma en un protón y el núcleo emite un electrón:



Inversamente, un núcleo rico en protones puede emitir un positrón (electrón positivo) pero este tipo de radiactividad es menos frecuente. Por ejemplo, el Sodio-22, cuyo núcleo tiene un exceso de protones, se transforma en Neón-22.

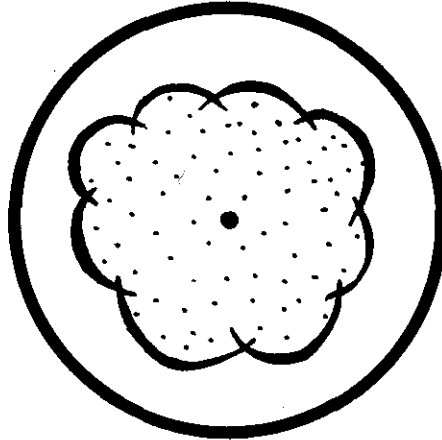


FIGURA 1.1.

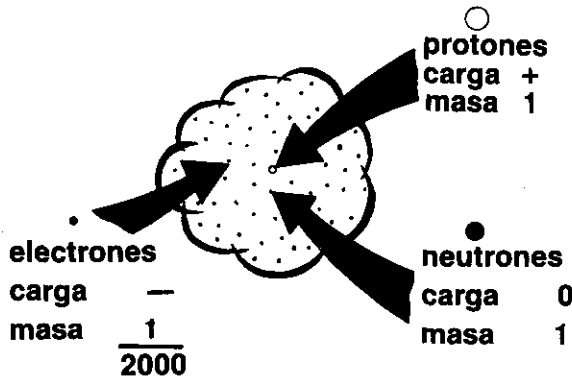
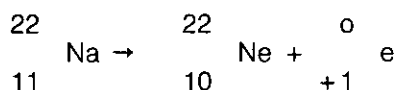


FIGURA 1.2.

Grupo IA																VIA															
1 H																2 He															
3 Li 4 Be																5 B 6 C 7 N 8 O 9 F 10 Ne															
11 Na 12 Mg																13 Al 14 Si 15 P 16 S 17 Cl 18 Ar															
19 K 20 Ca 21 Sc 22 Ti 23 V 24 Cr 25 Mn 26 Fe 27 Co 28 Ni 29 Cu 30 Zn 31 Ga 32 Ge 33 As 34 Se 35 Br 36 Kr																37 Rb 38 Sr 39 Y 40 Zr 41 Nb 42 Mo 43 Tc 44 Ru 45 Rh 46 Pd 47 Ag 48 Cd 49 In 50 Sn 51 Sb 52 Te 53 I 54 Xe															
55 Cs 56 Ba 57 La 72 Hf 73 Ta 74 W 75 Re 76 Os 77 Ir 78 Pt 79 Au 80 Hg 81 Tl 82 Pb 83 Bi 84 Po 85 At 86 Rn																87 Fr 88 Ra 89 Ac															
Tabla periódica de los elementos																															
58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr				

FIGURA 1.3.



c) Radiación gamma

Generalmente, los núcleos producidos por la desintegración alfa o beta de otro núcleo, se hallan en un estado excitado. El número de nucleones que los constituyen es correcto, pero tienen un exceso de energía. El núcleo se libera de esta energía emitiendo energía bajo la forma de un fotón o radiación gamma. Este fotón es de la misma naturaleza que la luz o los rayos X.

Cuando la radiactividad proviene de elementos que existen en la naturaleza, se habla de radiactividad natural. Pero artificialmente, pueden crearse numerosos elementos radiactivos bombardeando elementos naturales con partículas producidas en un reactor nuclear o emitidas por fuentes radiactivas; tales elementos radiactivos aparecen en grandes cantidades como productos de fisión en los reactores nucleares. La radiactividad que ellos generan se denomina radiactividad artificial. Ambos tipos de radiactividad son de la misma naturaleza, esto es, dan lugar a la emisión de rayos alfa, beta y gamma.

Leyes de la desintegración radiactiva

La radiactividad obedece a la siguiente ley:

"El número de desintegraciones por unidad de tiempo es proporcional al número de átomos radiactivos presentes".

La constante de proporcionalidad entre los que están presentes y los que desaparecen en la unidad de tiempo es la llamada constante de desintegración radiactiva que se denota con la letra griega lambda minúscula, λ .

Se define el período de semidesintegración como el tiempo que debe transcurrir para que el número inicial de átomos radiactivos se reduzca a la mitad. Los períodos varían entre miles de años y milésimas de segundo.

La disminución del número de átomos radiactivos con el tiempo sigue una ley exponencial que corresponde a la siguiente expresión:

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

siendo N_0 el número inicial de átomos radiactivos, N el número de ellos presentes al cabo del tiempo t y λ la constante de desintegración.

Como la actividad, o número de desintegraciones por unidad de tiempo que se producen en una sustancia considerada, es proporcional en cada momento al número de átomos radiactivos presentes se tendrá también:

$$A = \lambda N \quad \text{y} \quad A_0 = \lambda N_0$$

$$\text{luego } A = A_0 e^{-\lambda t}$$

siendo A_0 la actividad inicial y A la actividad al cabo del tiempo t (figura 1.5).

La fisión

La fisión del núcleo es una desintegración particular por la cual un núcleo se escinde en otros dos (figura 1.6.).

La fisión espontánea es posible, pero es muy rara entre los núcleos existentes en la naturaleza; sin embargo, es muy importante para los núcleos pesados obtenidos artificialmente. Por el contrario, se puede obtener bastante fácilmente la fisión de los núcleos pesados

Tipos de radiación

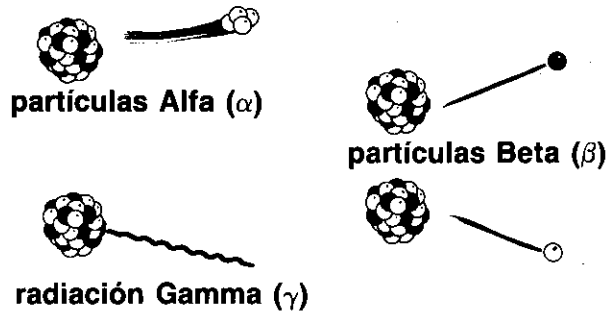


FIGURA 1.4.

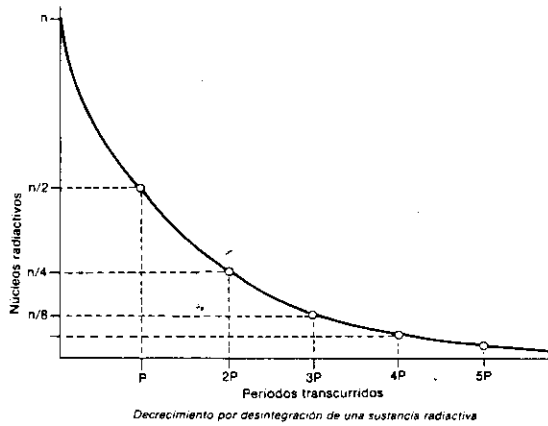


FIGURA 1.5.

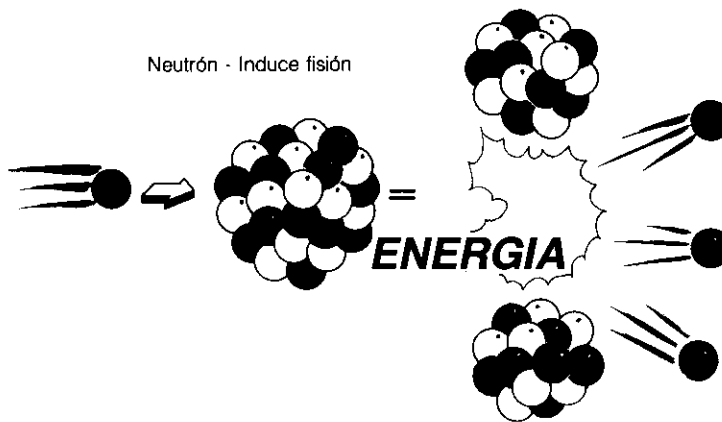


FIGURA 1.6.

naturales o artificiales bombardeándolos con neutrones. Estos isótopos, llamados fisionables, son los isótopos del uranio y del torio para los elementos naturales y diversos isótopos, en particular los de plutonio, para los elementos artificiales. El más comúnmente empleado es el isótopo del uranio, Uranio-235.

La fisión del núcleo se produce cuando la absorción de un neutrón por un núcleo pesado crea un nuevo núcleo en el que la estructura protones-neutrones es muy inestable: el nuevo núcleo se rompe en dos núcleos cuyas masas son del orden de la mitad de la inicial.

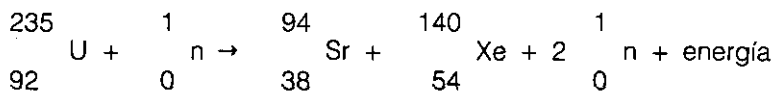
Los nucleones que constituyen el núcleo están unidos entre ellos por las fuerzas nucleares, que impiden la acción de las fuerzas de repulsión entre los protones. Existe entre los nucleones una energía de enlace que asegura la cohesión del núcleo: es la energía que sería necesario suministrar al núcleo para separar las partículas que lo componen. Esta energía es equivalente al llamado defecto de masa que se constata experimentalmente: la masa de un núcleo es siempre inferior a la suma de sus constituyentes si éstos estuvieran libres.

El defecto de masa no es el mismo para todos los núcleos: es relativamente pequeño para los núcleos ligeros como el hidrógeno y máximo para los núcleos de masa intermedia como el hierro y es de nuevo más pequeño para los núcleos pesados como el uranio.

Como consecuencia, cuando un núcleo pesado se rompe en dos, se pasa de un núcleo "medianamente" unido a dos "fuertemente" unidos. Se produce la liberación de cierta cantidad de energía puesto que sería necesario suministrar más energía para configurar estos dos nuevos núcleos que para constituir el inicial.

La primera característica de la fisión nuclear es que va acompañada de una liberación de energía: la energía nuclear. Esta energía se manifiesta fundamentalmente como energía cinética de los dos fragmentos de fisión, que son siempre radiactivos y cuya emisión se acompaña de la emisión de 2 ó 3 neutrones. La radiactividad de los productos de fisión consiste en una compleja emisión de radiaciones beta y gamma.

La cantidad total de energía liberada por la fisión de todos los núcleos de 1 gramo de U-235 es igual a 2.000 J. Esta energía es igual a la que se libera por la combustión completa de 2,5 toneladas de carbón.



Reacción en cadena y criticidad

Los neutrones liberados por la reacción de fisión pueden provocar a su vez la fisión de otros núcleos de uranio y la liberación de más neutrones y así sucesivamente. Esto es lo que se denomina reacción en cadena (figura 1.7.). Cuando esta reacción en cadena es capaz de automantenerse, de modo estacionario, se dice que el sistema es crítico o ha alcanzado la criticidad.

No todos los núcleos de uranio sufren fisión con la misma facilidad. En la naturaleza hay 3 isótopos del uranio (234, 235 y 238) que contienen todos 92 protones y 142, 143 y 146 neutrones respectivamente. En el uranio natural estos tres isótopos están mezclados en proporciones invariables: 0,0058% de U-234, 0,71% de U-235 y 99,28% de U-238. Si se considera una masa de uranio, los neutrones pueden producir fisiones pero también pueden ser absorbidos por el uranio, sobre todo el U-238, o escapar sin producir fisión.

La cantidad mínima de U-235 necesaria para mantener la reacción en cadena se denomina masa crítica. Para masas menores que la crítica, muchos neutrones escapan sin

producir fisión. A medida que se incrementa la masa de U-235 escapa una fracción más pequeña de neutrones y al alcanzar la masa crítica es posible la reacción automantenida.

Obviamente, la masa no es el único factor que influye en la criticidad. A medida que aumenta la densidad del material, decrece la distancia interatómica e incrementa la probabilidad de que un neutrón interactúe con un núcleo.

Las impurezas presentes en el material fisionable representan centros de absorción de los neutrones que tienen el mismo efecto de pérdida que la fuga de neutrones. A medida que decrece el área de la superficie del combustible proporcionalmente a su volumen, hay menos oportunidades de que los neutrones escapen del conjunto. Si se transforma un plano en un cubo y éste en una esfera, el área de la superficie se hace cada vez más pequeña mientras que el volumen permanece constante. La distancia promedio que debe viajar un neutrón para escapar se incrementa, y por lo tanto, aumenta la probabilidad de que sea absorbido el neutrón y produzca la fisión. Si además, se rodea la masa con un reflector de neutrones, la criticidad se alcanza con menos masa. Cada material fisionable requiere una masa crítica diferente para mantener una reacción en cadena.

La bomba atómica está constituida por una masa crítica en la que, es tan rápida la propagación de la reacción en cadena que da lugar a una explosión, liberándose de este modo, una cantidad muy grande de energía. La reacción en cadena es divergente (el número de neutrones aumenta continuamente) y el crecimiento del número de fisiones es tan rápido que tiene por resultado una explosión de toda la materia fisionable.

El reactor nuclear está constituido por una masa crítica en la que, mediante el control del número de neutrones en el núcleo del mismo, se obtiene una liberación continua y fijada de antemano de la energía nuclear.

La liberación de la energía de fisión se manifiesta por una liberación de calor. La energía cinética de los productos de fisión se pierde por múltiples choques con los átomos de alrededor, produciendo una agitación media mayor de estos átomos lo que se traduce globalmente en una elevación de la temperatura de la masa crítica y una liberación de calor.

Materiales físi les y fértiles

Los núcleos capaces de experimentar la fisión reciben el nombre de fisionables y de ellos, los que son capaces de fisionarse por interacción con neutrones lentos se llaman físi les. Los neutrones rápidos, producidos directamente en la fisión, tienen una velocidad del orden de 20.000 km/s. A estas velocidades, los neutrones son difícilmente capturados por los núcleos físi les y no pueden producir una reacción en cadena nada más que en medios fuertemente enriquecidos en U-235 o Pu-239. Es el caso de los reactores rápidos.

Si los neutrones se propagan en un medio, en el que chocan con los núcleos sin ser capturados, se moderan y finalmente, tienen una velocidad del orden de 2.000 m/s. Son los neutrones lentos o térmicos, muy eficaces en la fisión del U-235, que mantienen la reacción en cadena en los reactores térmicos. Para moderar eficazmente los neutrones, se utilizan los núcleos ligeros por lo que el grafito muy puro y el agua pesada son dos buenos moderadores. El agua ligera puede servir pero bajo la condición de utilizar uranio enriquecido con U-235, porque el hidrógeno captura bastante fácilmente los neutrones.

La captura de los neutrones por el U-238 es un fenómeno no deseado ya que aumenta las proporciones de la mínima masa crítica. Los núcleos que capturan un neutrón se transforman en radiactivos. Después de dos transformaciones sucesivas, el U-239 ($238 + 1$ neutrón) se transforma en Pu-239. El Pu-239 es un núcleo físi l.

Los isótopos, tales como el U-238, que crean nuevos materiales físi les por absorción de neutrones, se denominan isótopos fértiles.

INTERACCION DE LA RADIACION CON LA MATERIA

Rayos alfa

Los rayos alfa, son partículas cargadas (2 veces la carga del electrón) que tienen una gran masa (del orden de la masa de 4 protones), y pierden toda su energía en muy poco recorrido, pudiendo ser frenadas por una hoja de papel o en el caso del cuerpo humano, por la capa externa de la piel formada por células muertas.

La pérdida de energía que experimentan estas partículas a su paso por la materia, es debida a las interacciones electromagnéticas con los átomos del medio. Esto puede producir una ionización si son arrancados los electrones de los átomos del medio, o excitación si hay movimiento de electrones entre las capas de los átomos del medio material atravesado.

Como consecuencia, podemos decir que los rayos alfa no revisten peligro de cara al exterior del cuerpo humano, puesto que son frenados por la piel, pero presentan un serio problema si el material emisor penetra en el interior del organismo, debido a la ionización específica tan grande, que puede dar lugar a daños intensos muy localizados.

Al no presentar riesgo de irradiación externa, no será necesario situar materiales absorbentes entre las fuentes emisoras alfa y las personas (blindar), pero sí será necesario manipular con cuidado dichas fuentes para evitar su entrada en el cuerpo humano por ingestión, inhalación o a través de heridas (figura 1.8.).

Rayos beta

Los rayos beta, son partículas cargadas que interaccionan con los electrones de los átomos de la materia, creando ionizaciones de una forma muy similar a la de las partículas alfa. Sin embargo, como su masa es muchísimo más pequeña, la ionización específica es mucho menor y, en consecuencia, su penetración más alta.

PENETRACION

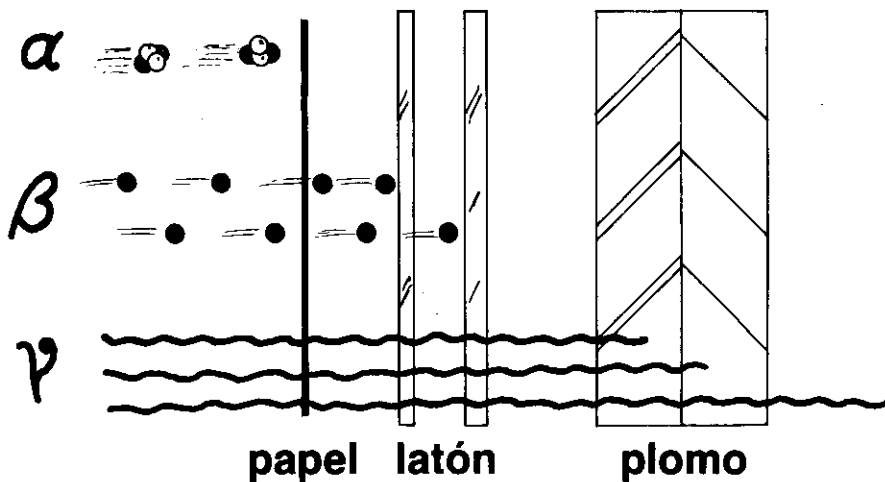


FIGURA 1.8.

Las partículas beta de mayor energía, pueden llegar a interactuar con el núcleo del átomo, produciendo una emisión de rayos X, denominada radiación de frenado. Este tipo de radiación varía con el Número atómico, Z, del elemento con el que interactúan las partículas beta. Por tanto para elementos de alto Z se producirá gran cantidad de radiación de frenado y viceversa.

Por lo tanto, ya vemos que las partículas beta pueden presentar un problema de irradiación externa, y en consecuencia, será necesario blindarlas. El mejor blindaje será un material de número atómico bajo, debido a la radiación de frenado. Por ello se utilizan principalmente el aluminio (figura 1.8.) y plásticos. En lo referente a la irradiación interna, el daño es menor que el producido por la radiación alfa, debido a su más baja ionización específica.

Rayos gamma

Los rayos gamma son radiaciones electromagnéticas como son la luz visible, los rayos infrarrojos y las ondas ultravioletas, pero con mayor energía. Son emitidos por el núcleo del átomo.

Al contrario de la radiación alfa y beta, los rayos gamma, al interactuar con la materia, arrancan electrones de la corteza atómica y producen una pequeña cantidad de ionización específica primaria. Estos electrones, animados de una cierta energía cinética, producen ionización de los átomos adyacentes, al interactuar con éstos, dando lugar a la ionización secundaria que es la que juega un papel primordial en dicha interacción.

Debido a su poca capacidad de ionización específica, los rayos gamma tienen grandes alcances en aire y pueden presentar un riesgo apreciable a grandes distancias de la fuente emisora (figura 1.8.).

Para protegerse de este tipo de radiación se utilizan blindajes de materiales pesados como el Plomo y el Hormigón y se define espesor de semirreducción, al espesor necesario de un material para reducir a la mitad la intensidad de radiación gamma. Así, para un rayo gamma de 1 MeV de energía el espesor de semirreducción del plomo es de 8,6 mm.

Como consecuencia, debido al gran poder de penetración de los rayos gamma, pueden atravesar el cuerpo humano, y desprender energía en cualquier punto, presentando un riesgo de irradiación externa mayor que las partículas alfa y beta. Sin embargo, el riesgo de irradiación interna es menor que para las partículas alfa y beta, debido a su menor ionización específica.

Neutrones

La radiación neutrónica, como su propio nombre indica, está constituida por neutrones. Como hemos visto, son partículas sin carga eléctrica y con una masa muy aproximada a la del protón.

Los neutrones son producidos, principalmente en reacciones nucleares. Las fuentes comunes de neutrones son:

Reacciones: Bombardeando un elemento (blanco) con una partícula.

Reactores: En los reactores se produce el fenómeno de la fisión provocada.

Fisiones espontáneas: Hay materiales que sufren fisiones espontáneas, como el Plutonio-238, Californio-252.

Atendiendo a la energía, podemos clasificar los neutrones de la siguiente forma:

- Térmicos (energía media 0,025 ev.)

- * Intermedios (energía entre 0,5 ev. y 10 KeV.)
- * Rápidos (energía entre 10 KeV. y 10 MeV.)
- * Relativistas (energía mayor de 10 MeV.)

Los neutrones, al interactuar con la materia, pierden su energía fundamentalmente por choques con los núcleos de los átomos, hasta que llegan a la situación de térmicos y son absorbidos por un núcleo.

Al igual que la radiación gamma, los neutrones son peligrosos cuando se trata irradiación externa, mientras que no se consideran importantes para la irradiación interna, ya que es bastante improbable ingerir una fuente de neutrones.

La elección del mejor blindaje para atenuar un haz de neutrones implicaría el siguiente proceso:

En primer lugar, se necesitaría un material con alto contenido en hidrógeno para reducir la energía de los neutrones mediante choques elásticos. Los mejores materiales son parafina o agua. Una vez que los neutrones han alcanzado la categoría de térmicos, se necesitará un material que los absorba. El mejor material es el cadmio.

El proceso de absorción neutrónica da lugar a emisiones de rayos gamma. Por lo tanto, es aconsejable colocar, a continuación, un blindaje de plomo para atenuar dicha radiación.

Sin embargo, el blindaje más comúnmente utilizado para la protección de los neutrones es el hormigón, y especialmente el llamado hormigón pesado, denominado así debido a que los minerales que lo componen pertenecen a átomos pesados como el Hierro, el Bario, etc.

El hormigón que en su composición tiene un alto contenido en agua, lo que actúa como un eficiente moderador, y que, como hemos dicho, el contenido en núcleos pesados le otorga propiedades de absorbente de neutrones cumple las dos condiciones antes citadas lo que unido a su bajo costo y uso común lo hacen muy útil para el propósito de blindaje neutrónico.

TEMA - 2. CONCEPTOS BASICOS SOBRE UNA CENTRAL NUCLEAR. SU SEGURIDAD

DESCRIPCION DE UNA CENTRAL NUCLEAR

Una central nuclear es esencialmente un dispositivo que transforma la energía liberada en el proceso de fisión en energía eléctrica.

En el reactor nuclear se produce la fisión y los fragmentos de la misma ceden su energía cinética al medio, como energía calorífica, que es transferida a la turbina mediante vapor de agua. Este al expandirse convierte la energía calorífica en energía mecánica que, a través de un eje, arrastra un alternador eléctrico, donde se genera la electricidad. (Figura 2.1.).

Una central nuclear es una instalación en la que puede iniciarse, mantenerse y controlarse una reacción de fisión nuclear en cadena. Necesita, pues, disponer de un recipiente adecuado, una cierta cantidad de material fisible, un fluido refrigerante para extraer el calor generado y los adecuados mecanismos de control y seguridad.

Para unas determinadas condiciones del reactor, el ritmo de fisiones es proporcional a la población neutrónica en cada momento. Si ésta se mantiene constante el reactor se dice que está en estado crítico.

Si la producción de neutrones es superior a las pérdidas, el reactor está supercrítico. En caso contrario se dice que el reactor está subcrítico.

El control de la potencia generada en el reactor, es decir el control del ritmo de fisiones producido, puede hacerse, como se ha indicado antes, controlando el número de neutrones presente en el reactor.

Esto se consigue introduciendo en el reactor un material absorbente de neutrones que puede estar disuelto en el refrigerante o contenido en las llamadas barras de control o cambiando la cantidad de refrigerante-moderador líquido.

Componentes de un reactor nuclear

— Combustible

Los reactores térmicos actuales utilizan uranio como combustible nuclear. En cualquiera de ellos se trata de una mezcla de los isótopos U-238 y U-235 con diferentes porcentajes (enriquecimientos) de este último. A medida que la instalación va cumpliendo su ciclo de funcionamiento, el U-238 inmerso en el intenso flujo de neutrones del reactor, se va convirtiendo en Pu-239 que se fisiona también.

Algunos reactores utilizan como combustible el uranio natural cuya concentración en U-235 es muy baja (0,7%) por lo que para mantener la reacción en cadena autosostenida se requiere que los restantes componentes del reactor absorban el menor número posible de neutrones. Otros reactores utilizan como combustible uranio que previamente se ha enriquecido en el isótopo U-235 hasta valores aproximados al 3% - 4%. Este último caso comprende a la mayoría de las centrales nucleares de nuestro país.

El uranio puede utilizarse en tres formas físico-químicas diferentes, metal, óxido o carburo. La elección se hace en función de diferentes propiedades: comportamiento térmico, resistencia a las radiaciones, conducción del calor, etc.

Los reactores térmicos suelen utilizar óxido de uranio, UO₂, en forma de pastillas o barras encerradas en vainas herméticas para impedir su contacto directo con el refrigerante o moderador. Actualmente en Francia hay un proyecto para sustituir parte de las recargas de los PWR por combustible de óxidos mixtos (UO₂ - Pu O₂), llamado en forma abreviada MOX (Mixed Oxide).

Una característica esencial del combustible nuclear es su transformación y su evolución en el curso de su irradiación. Hay que tener en cuenta dos fenómenos:

* La captura de los neutrones por los núcleos fértiles origina nuevos núcleos fisibles: el U-238 se transforma en U-239. El Pu-239, captura a su vez neutrones, produce Pu-240 (fértil), Pu-241 (físil) y Pu-242. La producción de Pu-239 permite prolongar considerablemente la presencia de los elementos combustibles en el reactor.

* La fisión de los núcleos fisionables da origen a los productos de fisión bajo la forma de isótopos radiactivos. Ciertos productos de fisión juegan un papel importante en los reactores, tales como el Xe-135 o el Sm-149 que capturan muy fácilmente los neutrones y actúan como "venenos neutrónicos".

— *Moderador*

La misión del moderador es la de reducir la energía de los neutrones desde el nivel en que son emitidos en la fisión hasta el nivel de equilibrio térmico con el medio.

Esta reducción se realiza mediante reacciones de dispersión, por lo que el moderador ideal debe cumplir las siguientes condiciones:

* Que tenga alta probabilidad de provocar reacciones de dispersión y baja probabilidad de capturar neutrones.

* Que tenga peso atómico ligero para que la pérdida de energía del neutrón en cada colisión sea la mayor posible.

* Que tenga una elevada densidad atómica y sea compatible con otros materiales del reactor.

No existen muchos elementos que cumplan estas condiciones. En la práctica se utiliza generalmente el hidrógeno, en forma de agua ligera, que tiene muy buenas características para la moderación de los neutrones pero tiene una sección eficaz de captura neutrónica relativamente alta por lo que no puede utilizarse en reactores de uranio natural. En este caso debe utilizarse el deuterio (agua pesada) o el carbono en forma de grafito.

Pero, mientras que los reactores moderados con grafito o agua pesada pueden funcionar con uranio natural, los reactores moderados con agua ligera necesitan uranio enriquecido para compensar la pérdida de neutrones por captura en el moderador.

Los reactores rápidos, cuyo combustible se fisiona con neutrones de alta energía, no utilizan moderador.

— *El refrigerante*

La energía desarrollada por la reacción de fisión se manifiesta en forma de calor que es necesario extraer de la vasija del reactor por lo que debe preverse un sistema de refrigeración adecuado. Su función básica consiste en transportar el calor desde el núcleo hasta una serie de instalaciones auxiliares donde será aprovechado en la generación de energía útil.

El refrigerante debe ser:

* Suficientemente estable químicamente en presencia de reacciones nucleares.

* Capturar el menor número de neutrones posible.

* Tener una capacidad y una conductividad caloríficas elevadas.

* No corroer ni la vaina del combustible, ni los otros constituyentes del reactor.

Según el diseño de la instalación el refrigerante puede ser líquido o gaseoso.

En los reactores térmicos el refrigerante, líquido o gaseoso, debe circular a presión. Esta puede variar entre 30 kg/cm² y 150 kg/cm², lo que tiene como consecuencia que la vasija del reactor debe soportar esta presión, lo mismo que el intercambiador de calor y las conducciones.

En los reactores de grafito, el refrigerante es gaseoso: gas carbónico, si la temperatura no es demasiado alta, o helio a alta temperatura.

En los reactores de agua ligera, ésta sirve a la vez como moderador y como refrigerante. Sin embargo, en los reactores de agua pesada, las funciones del moderador y del refrigerante están separadas.

El refrigerante más utilizado en los reactores rápidos es el sodio líquido. La circulación en el núcleo alrededor del combustible está asegurada por bombas y se hace prácticamente sin presión.

La potencia teórica de un reactor nuclear está limitada sólo por la capacidad de su refrigerante para disipar el calor del núcleo. El combustible en sí, podría proporcionar una potencia virtualmente ilimitada, pero en la práctica, si se sobrepasa la capacidad del circuito de refrigeración, el calor de fisión fundiría los elementos combustibles causando un daño gravísimo a la instalación. Gran parte de los sistemas de seguridad de la instalación están diseñados para impedir que esto suceda, aún en breves períodos de tiempo.

— *Elementos de control*

Este dispositivo sirve para mantener la reacción en cadena en un nivel determinado y para pararla si se detecta una situación anormal. Está formado por barras de material absorbente de neutrones (boro, cadmio). En la parada del reactor, estas barras se introducen en el núcleo del reactor.

Esquemáticamente pueden distinguirse dos tipos de barras: las barras de control y las barras de seguridad. El control normal de la reacción en cadena se obtiene introduciendo más o menos las barras de control en el núcleo del reactor. Las barras de seguridad se utilizan para detener la reacción nuclear en caso de incidente, y están dispuestas de tal forma que penetran en el núcleo en un tiempo muy corto. En ciertos casos, se prevé igualmente la introducción de dispositivos suplementarios de seguridad para detener la reacción en cadena (inyección de boro, etc.).

Otro dispositivo importante para el control de un reactor es la instalación de detectores de ruptura de vainas. Los elementos combustibles están encerrados en vainas metálicas para evitar que los productos de fisión radiactivos se expandan en el circuito de refrigeración. Estas vainas son susceptibles de romperse bajo la acción del calor y de las radiaciones.

— *Barreras de protección*

Todos los componentes que constituyen el reactor se albergan en un gran recipiente o vasija por cuyo interior circula el refrigerante. El combustible y las barras de control, así como el moderador cuando es sólido, están sostenidos por estructuras internas apropiadas. La vasija es de paredes metálicas y está rodeada a su vez por un gran espesor de hormigón u otro material similar. La pared metálica protege al resto de los materiales contra las radiaciones, mientras que el hormigón constituye una barrera de defensa de tipo biológico para impedir que el nivel de radiactividad fuera del reactor supere los límites admisibles.

Como resumen de lo anteriormente expuesto, los componentes de un reactor nuclear típico pueden describirse así:

El combustible en forma de pastillas se encuentra contenido en las vainas formando las barras de combustible. Un conjunto de barras forma un elemento combustible. El conjunto de elementos constituye el núcleo del reactor.

Entre las barras de combustible se encuentra el moderador que en la mayoría de los casos (todos los reactores de agua p. ej.) hace también el papel de refrigerante circulando a lo largo de los elementos combustibles. Existen barras de control que contienen absorbentes de neutrones y que pueden desplazarse en el interior del núcleo para controlar el número de neutrones. Para absorber la energía de la radiación liberada en la fisión, se rodea el núcleo de una envoltura metálica - blindaje térmico - que transforma gran parte de la energía radiante en calor. Este blindaje térmico está refrigerado por el propio refrigerante del reactor. Todo el conjunto se encuentra contenido en la vasija nuclear o recipiente de presión que a su vez está rodeado de un grueso blindaje biológico que absorbe las radiaciones que pudieran escapar de ella.

Por último, el recinto de contención que encierra la vasija nuclear y algunos otros componentes esenciales, tales como el sistema de refrigeración y otros sistemas auxiliares, y está diseñado para mantener su hermeticidad en las condiciones de accidente más severas.

TIPOS DE REACTORES NUCLEARES

En la actualidad, existen varios tipos de reactores que permiten producir electricidad como se ve en el cuadro siguiente:

	Moderador	Refrigerante	Combustible	Denominación
Neutrones térmicos	Grafito	CO ₂	Uranio natural	UNGG (Francia y España).
Neutrones térmicos	Grafito	CO ₂	Uranio natural UO ₂ enriquecido	Magnox (G.B.) AGR (G.B.)
Neutrones térmicos	Grafito	Helio	UO ₂ enriquecido o carburo de uranio.	HTR (EE.UU., RFA).
Neutrones térmicos	Grafito	Agua en ebullición	Aleación U metálico.	RBMK (URSS)
Neutrones térmicos	Agua pesada	Agua pesada	UO ₂ natural	HWR (Canadá, Suecia, India, RFA, G.B., Japón).
		Agua a presión	UO ₂ enriquecido	ATR (Canadá, G.B., Japón).
Neutrones térmicos	Agua ligera	Agua en ebullición	UO ₂ enriquecido	PWR (EE.UU., RFA, Suecia, Japón, España).
		Agua a presión	UO ₂	PWR (EE.UU., URSS, RFA, Suecia, Francia, España).
Neutrones rápidos	Baja moderación	Sodio líquido	UO ₂ - Pu O ₂	RNR (Francia, RFA, Italia, G.B., URSS, EE.UU., Japón, India).

Los reactores de neutrones térmicos se distinguen por el tipo de refrigerante y por el material fisionable utilizado como combustible.

La técnica de los reactores PWR va a la cabeza con el 53% de las centrales, frente al 35% de las BWR, el 6% del tipo de la de Chernobyl (RBMK), el 5% de "grafito-gas" (moderador grafito y refrigerante un gas) y de reactores de agua pesada, y finalmente el 0,8% de reactores de neutrones rápidos.

La situación de las centrales nucleares españolas se refleja en los siguientes cuadros:

CENTRALES EN OPERACION	ENTRADA EN FUNCION	POTENCIA	TECNOLOGIA	TIPO
José Cabrera (Zorita)	1968	160 MW	Westinghouse	PWR
Santa María de Garoña	1971	440 MW	General Electric	BWR
Vandellós I	1972	480 MW	SFAC	GCR
Almaraz I	1981	930 MW	Westinghouse	PWR
Ascó I	1983	930 MW	Westinghouse	PWR
Almaraz	1984	930 MW	Westinghouse	PWR
Cofrentes	1984	975 MW	General Electric	BWR
Ascó	1985	930 MW	Westinghouse	PWR
Vandellós II	1988	982 MW	Westinghouse	PWR
Trillo I	1988	1.041 MW	KWU	PWR

CENTRALES EN MORATORIA	POTENCIA	TECNOLOGIA	TIPO
Vandellós I y II	1.950 MW	General Electric	RWR
Trillo	1.032 MW	KWU	BWR
Lemoniz I y II	1.860 MW	Westinghouse	PWR

Centrales de agua a presión (PWR)

Una central PWR responde al esquema dibujado en la figura 2.1., en el que se distinguen dos partes perfectamente diferenciadas, el circuito primario y el secundario.

La energía de fisión que se manifiesta en forma de calor es transferida a un circuito cerrado de agua primaria que se mantiene a gran presión para evitar su ebullición. Este agua del circuito primario cede su calor en los generadores de vapor al circuito secundario produciéndose vapor saturado que se expandiona en la turbina generando electricidad en el alternador. Seguidamente, se describen brevemente los detalles esenciales de ambos circuitos.

ESQUEMA DE UNA CENTRAL NUCLEAR CON REACTOR DE URANIO ENRIQUECIDO Y AGUA A PRESION

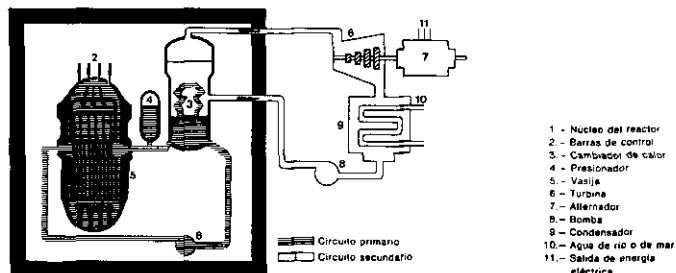


FIGURA 2.1.

Circuito primario

El circuito primario, denominado también sistema generador de vapor, consta fundamentalmente de:

- Vasija del reactor con sus elementos internos
- * Uno o más lazos de refrigeración
- * Un presionador

Los lazos de refrigeración están conectados en paralelo con el reactor y cada uno de ellos cuenta con un generador de vapor y una bomba. El sistema completo de generación de vapor contiene un único presionador. El circuito es cerrado y se dice que estos reactores funcionan en ciclo indirecto.

— Vasija de presión

El componente más importante del sistema de refrigeración es la vasija de presión, que aloja en su interior los elementos combustibles que componen el núcleo, las estructuras de soporte del mismo, los haces de barras de control, el blindaje térmico y otros elementos directamente relacionados con el núcleo.

La vasija es un cilindro de eje vertical, cerrado en sus dos bases por cubiertas semiesféricas, de las cuales la inferior es fija y la superior desmontable. El material de la vasija suele ser acero con bajo contenido de carbono, o aleaciones especiales resistentes a la rotura frágil, recubierta en las partes en contacto con el refrigerante, con una lámina de acero inoxidable.

La presión en la vasija es del orden de 150 kg/cm^2 lo que permite alcanzar temperaturas de $320 \text{ }^\circ\text{C}$ sin que se produzca ebullición.

- * Elementos combustibles

El combustible que forma el núcleo es de óxido de uranio ligeramente enriquecido, dispuesto en forma de pastillas cilíndricas sinterizadas. Estas pastillas se encuentran en el interior de un tubo, cuyo material es de Zircaloy-4, denominado varilla. (Figura 2.2.).

Un conjunto cuadrado de varillas de combustible estructuralmente unidas unas a otras constituye un elemento combustible. En ciertas posiciones de este conjunto cuadrado no existen varillas de combustible y en su lugar se colocan los tubos-guía de las barras de control y el tubo-guía de la instrumentación interna. No todos los elementos llevan haces de barras de control. Cierta número de elementos llevan fuentes de neutrones o barras de veneno consumible o simplemente agua. (Figura 2.3.).

- * Barras de control

Los haces de barras de control se usan durante los arranques, los cambios de carga, y para controlar pequeños cambios transitorios en la reactividad.

Los elementos componentes de un haz de barras de control son unas varillas cilíndricas que contienen el elemento absorbente de neutrones.

— Sistema de refrigeración

Se entiende por tal, la parte del circuito primario que hace posible la generación de vapor a partir del calor generado por fisión en el núcleo. Entre los componentes que lo forman destaca el generador de vapor.

En el generador, modelo Westinghouse, se pueden distinguir dos partes, una de evaporación y otra de secado del vapor, la primera consiste en un cambiador de calor de tubos en forma de U, por cuyo interior circula el agua del circuito primario, cediendo su calor

a través de las paredes de los tubos al agua del circuito secundario convirtiéndola en vapor, el cual pasa a la parte superior, donde es secado por los separadores y sale por la tobera de vapor para ser utilizado en la turbina. La vasija es de acero al carbono y los tubos de Inconel.

El sistema de refrigeración está formado por varios lazos. Cada lazo lleva un generador de vapor.

— Presionador

El presionador mantiene la presión del sistema de refrigeración del reactor en estado estacionario y atenúa los cambios de la misma en los transitorios. También contribuye en el mantenimiento de la cantidad de agua total del circuito primario, introduciendo o extrayendo agua del mismo en combinación con otros sistemas.

Circuito secundario

Puede considerarse como el de una central térmica convencional, en la que se ha sustituido la caldera de vapor por el generador de vapor.

El vapor sale de los generadores de vapor y pasa a los cuerpos de alta presión de la turbina. A continuación pasa a los cuerpos de baja presión de la turbina y de aquí al condensador desde donde vuelve al generador de vapor.

Edificio de contención

El recinto de contención es una estructura de hormigón armado, generalmente de forma cilíndrica, con un casquete esférico en la parte superior y una placa plana como cimienta. La parte cilíndrica está pretensada por un sistema de tensado que consiste en varios haces de tirantes horizontales y verticales. La cúpula tiene un sistema de tensado de dos direcciones. La placa de cimentación está reforzada con acero de alta resistencia.

En el modelo KWU (Trillo) la contención es esférica y presenta un esquema de contención doble, una interior de acero y otra exterior de hormigón pretensado.

Dentro del recinto se encuentran el reactor, los generadores de vapor, el presurizador, los circuitos de refrigeración, las bombas de refrigerante y parte de los sistemas auxiliares y de seguridad.

Centrales de agua en ebullición (BWR)

Una central BWR de ciclo directo responde al esquema reflejado en la figura 2.2.

En dicho esquema puede apreciarse que el agua circula a través del núcleo del reactor produciendo vapor que es separado del agua de recirculación, secado en la parte superior de la vasija y dirigido hacia el elemento turbina-generador. Aquí también se distingue entre sistema primario y sistema secundario.

Sistema primario

Se considera como tal al sistema de suministro de vapor, que está formado por la vasija del reactor y componentes internos, el sistema de recirculación, la tubería de agua de alimentación desde la válvula de aislamiento exterior a la contención y la tubería de vapor hasta la válvula de aislamiento exterior a la contención. A continuación se describen cada uno de los componentes:

— Vasija de presión

La vasija del reactor tiene forma cilíndrica rematada por dos casquetes semiesféricos, de los cuales el superior es desmontable. Está construida de acero al carbono y recubierta de acero inoxidable excepto el casquete superior. Aloja en su interior los elementos

combustibles que componen el núcleo, las estructuras de soporte del mismo, las barras de control, la envuelta que rodea al núcleo, los separadores de vapor situados sobre el núcleo y los secadores de vapor situados a su vez sobre los anteriores y que permiten obtener vapor saturado sin agua de arrastre.

La presión en la vasija es del orden de 70 kg/cm² lo que corresponde a una temperatura de vapor de 300 °C.

* Elementos combustibles

Igual que en el caso de las centrales PWR, el combustible que forma el núcleo es dióxido de uranio ligeramente enriquecido dispuesto en varillas cerradas de Zircaloy-2. (Figura 2.3.). Se ensamblan en conjuntos de varillas y se alojan en un canal formando así lo que se denomina elemento combustible.

Algunas de las varillas de que consta un elemento combustible, no llevan pastillas y están abiertas en ambos extremos para permitir la circulación del refrigerante.

* Barras de control

Las barras de control tienen una sección cruciforme. El material absorbente es carbono de boro compactado en el interior de tubos de acero inoxidable. Las barras de control se introducen en el núcleo por la parte inferior del reactor, lo que impide el que las barras de control puedan ser introducidas simplemente por gravedad, por lo que debe diseñarse un sistema que asegure la inserción de las barras en el núcleo con una gran fiabilidad cuando ello sea necesario.

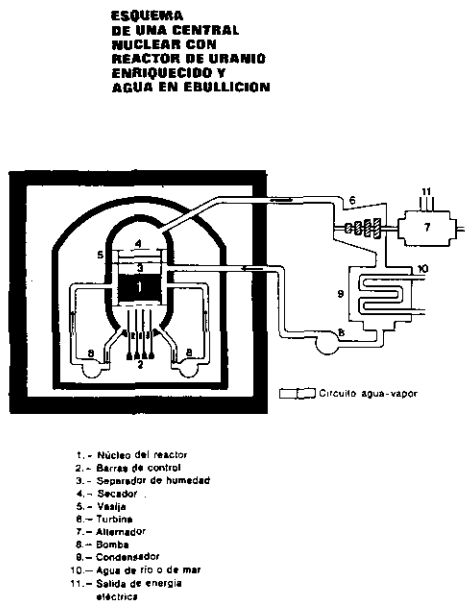


FIGURA 2.2.

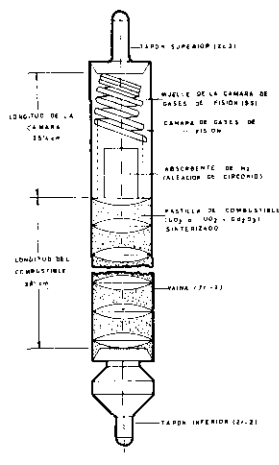


FIGURA 2.3.

- Separadores y secadores de vapor

El separador de vapor es la primera y más importante etapa de eliminación de humedad del vapor que asciende por la vasija. Los separadores de vapor suelen ser del tipo ciclónico, ya que poseen unos álabes fijos que imprimen a la mezcla agua-vapor un movimiento de rotación proyectando el líquido, más denso, hacia las paredes por el efecto de la fuerza centrífuga. El líquido separado es drenado retornando a la aspiración de las bombas de chorro, mientras que el vapor aún húmedo asciende hacia el secador de vapor.

El secador de vapor realiza la última etapa de eliminación de humedad, incrementando la calidad del vapor.

Son del tipo laberíntico, ya que poseen unos paneles que fuerzan al vapor a realizar cambios bruscos de dirección, que debido a la fuerza centrífuga y a la gravedad dirige la humedad al exterior donde es recogida en unas bandejas colectoras.

— Sistema de recirculación

La misión de este sistema es aumentar el caudal de recirculación en el núcleo. Consiste en dos lazos situados en el exterior de la vasija del reactor, conteniendo cada uno de ellos una bomba de recirculación, válvulas, un paso en derivación y en el interior de la vasija, las bombas de chorro.

El sistema de recirculación puede controlar la potencia generada en el núcleo entre amplios márgenes.

Edificio de contención

La estructura del edificio, incluye el blindaje, la contención propiamente dicha, el pozo seco, el pedestal de la vasija, las paredes de blindaje del reactor y una losa de hormigón reforzado que sirve de apoyo al edificio, la cámara de supresión toroidal (mod. Mark I), o la piscina de supresión de presión (mod. Mark III) y el túnel de vapor. (Figura 2.9).

El edificio de blindaje es un recinto de hormigón reforzado que encierra totalmente a una contención hermética de acero.

El pozo seco es un recinto en forma de bombilla (Mark I) o cilindro (Mark III) de hormigón reforzado, con una cubierta circular removible. Los componentes más importantes incluidos dentro del pozo seco son la vasija de presión, el sistema de recirculación, las líneas de vapor principal y otras estructuras necesarias para controlar el reactor.

Centrales de grafito-gas (CGG)

Una central de grafito-gas responde al siguiente esquema representado en la figura 2.4.

En él se distinguen dos circuitos, el primario de CO₂ y el secundario de agua. El calor extraído por el gas es cedido al agua a través de intercambiadores de calor, situados debajo del núcleo, produciéndose vapor saturado que se expansiona en la turbina generando electricidad en el alternador.

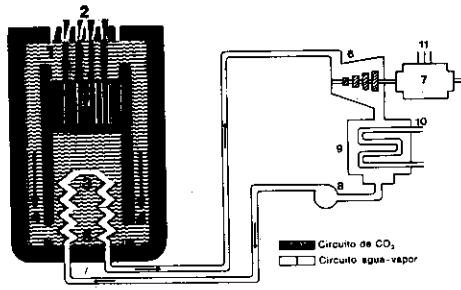
Circuito primario

El circuito primario consta de:

- Reactor
- Intercambiadores de calor

Todo el conjunto, reactor e intercambiadores de calor están alojados en el interior de un cajón de hormigón pretensado que constituye el recinto de contención. (Figura 2.5.).

**ESQUEMA
DE UNA CENTRAL
NUCLEAR CON
REACTOR DE URANIO
NATURAL**



- 1.- Núcleo del reactor
- 2.- Barras de control
- 3.- Cambiador de calor
- 4.- Soplante
- 5.- Recipiente de contención
- 6.- Turbina
- 7.- Alternador
- 8.- Bomba
- 9.- Condensador
- 10.- Agua de río o de mar
- 11.- Salida de energía eléctrica

FIGURA 2.4.

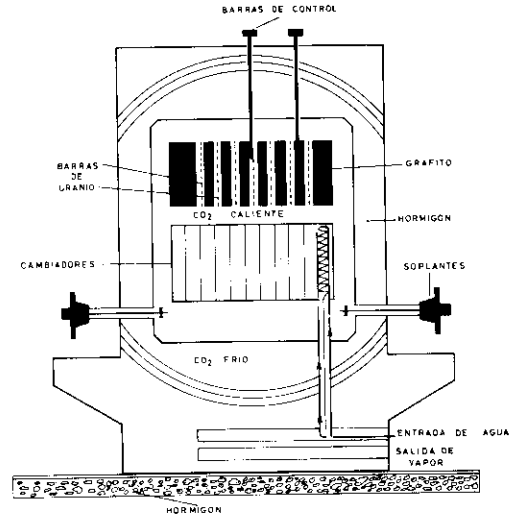


FIGURA 2.5.

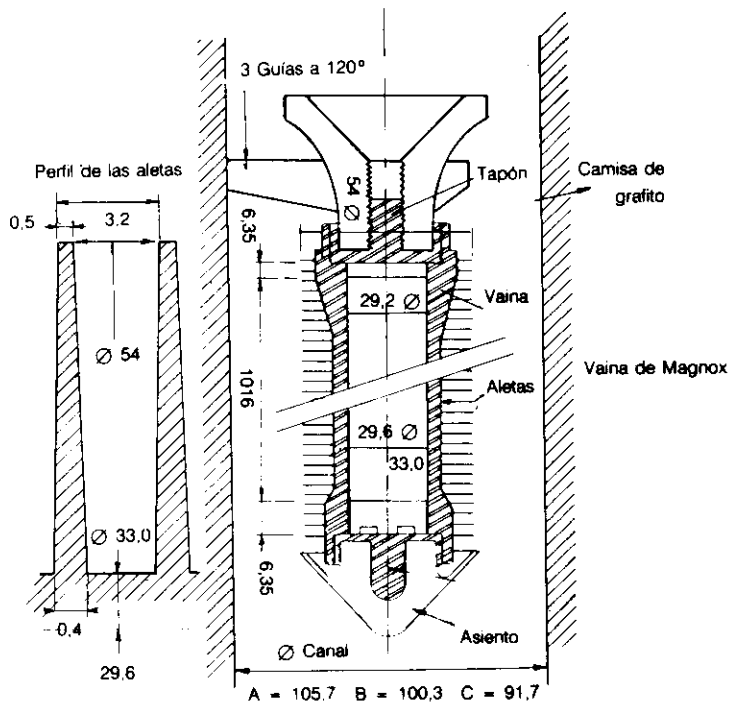


FIGURA 2.6.

— Reactor

Este aloja en su interior los elementos combustibles, el moderador, el refrigerante y las barras de control.

* El núcleo

Este se presenta en forma de un apilamiento de "bloques" de grafito hexagonal. Cada bloque posee una parte central hueca en la cual va alojado el combustible, que es de uranio natural en forma metálica. Como todos los bloques, excepto los del reflector, tienen el hueco en la misma posición, al colocarse apilados coinciden sus huecos y se forma un tubo hueco o canal vertical. En cada canal se alojan 6 barras de uranio que dejan libre una corona circular por la que discurre el CO₂. Además, en cada canal hay también un dispositivo de detección de deterioro de la vaina.

• Combustible

El elemento combustible que se introduce en el reactor recibe el nombre de "cartucho". Este está constituido por el combustible propiamente dicho, en forma de tubo de uranio natural, rodeado por una vaina de una aleación de magnesio y zirconio, provista de aletas para permitir una eficacia mejor del fluido de refrigeración. (Figura 2.6.). En general, el cartucho está soportado por una "camisa de grafito" (tubo cilíndrico). El gas refrigerante circula entre el cartucho y la camisa y por el interior del cartucho.

Este tipo de reactores está provisto de un "dispositivo principal de manutención" de carga-descarga que permite el cambio de elementos combustibles aún con el reactor en marcha, para ello se acopla una gran máquina a los pozos de manutención.

* Elementos de control

El control del reactor se efectúa por medio de barras de acero al boro, revestidas de una capa de acero inoxidable, suspendidas por cables de acero también inoxidable.

— Sistema de refrigeración

El gas anhídrido carbónico es el fluido de refrigeración del núcleo y el medio de transporte del calor en él producido hacia el circuito de los intercambiadores principales (generadores de vapor). La circulación forzada de este gas es mantenida por cuatro grandes grupos turbo-soplantes. La temperatura del gas es de 225 °C a la entrada y 400 °C a la salida y su presión de trabajo del orden de 30 kg/cm².

Los intercambiadores están situados bajo la superficie soporte del núcleo del reactor.

Circuito secundario

Puede considerarse como el de una central térmica convencional. El vapor producido sale de los generadores de vapor y pasa a los cuerpos de alta presión de la turbina. A continuación pasa a los cuerpos de baja presión de la turbina y de aquí al condensador desde donde vuelve al generador de vapor.

RADIATIVIDAD EN UNA CENTRAL NUCLEAR, RESIDUOS RADIATIVOS Y EFLUENTES LIQUIDOS Y GASEOSOS.

Productos de fisión y de activación

Una central nuclear en funcionamiento emite al ambiente cierta cantidad de sustancias radiactivas en forma de gas, de aerosoles y de líquidos. La naturaleza y la cantidad de estas emisiones varía con el tipo del reactor considerado y estas emisiones son controladas y autorizadas por el Consejo de Seguridad Nuclear.

La presencia de elementos radiactivos en las emisiones de una central provienen de la contaminación del circuito de refrigeración. Esta contaminación puede deberse a la fuga de materiales radiactivos del combustible por rotura de las vainas, su difusión a través de la vaina, la formación de nuevos elementos, productos de activación o de corrosión.

El paso de las sustancias radiactivas desde el circuito de refrigeración al exterior del reactor se produce a causa de la necesidad de purificar o renovar el refrigerante, o por fugas incontroladas.

Los problemas más importantes están relacionados con la formación de productos de fisión, de plutonio y de transuránidos en el seno del combustible durante su estancia en el reactor, así como la formación de productos de activación por la acción de los neutrones sobre los materiales estructurales del reactor:

— El plutonio y otros elementos transuránidos se forman por capturas a partir del Uranio-238:

Plutonio 239, 240, 241, 241

Americio 241, 243

Curio 242, 244

Estos elementos que quedan en el combustible irradiado son esencialmente emisores de radiación alfa y tienen períodos de semidesintegración muy grandes.

— Los productos de fisión son de naturaleza muy variable, son esencialmente emisores beta y gamma, con períodos de semidesintegración muy diferentes. Los principales son los siguientes:

<u>Radionucleido</u>	<u>Período de semidesintegración</u>
H-3	12 años
Kr-85	10,7 años
Sr-90	28 años
Zr-95	65 días
Ru-106	1 año
I-129	$1,6 \times 10^7$ años
I-131	8 días
Xe-133	5,2 días
Cs-137	30 años
Ce-144	285 días
Pm-147	2,6 años

— Los productos de activación provienen de la acción de los neutrones, en primer lugar sobre ciertos constituyentes del material de la vaina (acero inoxidable, magnesio, aluminio y zircaloy), en segundo lugar sobre el refrigerante y las impurezas que él contiene y en tercer lugar sobre el moderador y los diversos elementos constituyentes del reactor. Una parte de estos productos de activación quedan en los elementos estructurales del reactor hasta que sean sustituidos o hasta que el reactor sea demolido y la otra parte pasa a los residuos o a las emisiones. Los principales radioisótopos originados de este modo son los siguientes:

<u>Radionucleido</u>	<u>Período de semidesintegración</u>
H-3 (a partir de Li-6)	12 años
Ar-41 (a partir de Ar-40)	1,8 horas
Mn-54 (a partir de Fe-54)	300 días

Fe-55 (a partir de Fe-54)	2,9 años
Co-60 (a partir de Co-59)	5,2 años
Cu-64 (a partir de Cu-63)	12,8 horas
Ni-65 (a partir de Ni-64)	2,6 horas
Cr-51 (a partir de Cr-50)	27 días
Zr-95 (a partir de Zr-94)	65 días

Sistema de tratamiento de residuos radiactivos

El tratamiento de los residuos radiactivos tiene como objetivo reducir el volumen de los mismos y acondicionarlos en una forma apta para su almacenamiento o emisión controlada al exterior.

Tratamiento de residuos gaseosos

Es preciso distinguir por una parte los productos radiactivos que se presentan en forma gaseosa (Yodos y gases nobles, principalmente) y por otra el aire procedente de orígenes diversos que contiene cierta cantidad de polvos radiactivos en suspensión en forma de aerosoles.

La extracción de estos aerosoles se obtiene mediante filtración.

La retención de los radionucleidos en forma gaseosa se efectúa por adsorción, extracción o difusión. El yodo, por ejemplo, se adsorbe sobre carbón activo u otra materia porosa impregnada de sales de plata, mientras que el Kriptón (gas noble) puede extraerse a baja temperatura por el Freón-12 (este procedimiento no se utiliza industrialmente). El Xenón se hace pasar por carbón activo refrigerado con nitrógeno líquido para su retención.

Tratamiento de líquidos

Se utilizan tres métodos fundamentalmente, la coprecipitación, el intercambiador de iones y la evaporación, con lo que finalmente se obtiene un residuo sólido.

— La coprecipitación se aplica para líquidos con grandes cantidades de sales en suspensión. El precipitado formado se trata como residuo sólido.

— La evaporación permite obtener factores de descontaminación mayores que los de la coprecipitación pero a un coste mayor.

— El intercambio de iones es una técnica basada en la propiedad que tienen ciertas resinas artificiales de fijar unos iones y eluir otros en la solución. A su vez los intercambiadores de iones se “regeneran” mediante ácidos o bases. Con esta técnica se consiguen altas tasas de descontaminación.

Estos tratamientos conducen a un residuo (lodos de filtración, concentrados de evaporación, etc.) en el que está concentrada la radiactividad del efluente. Este residuo debe transformarse en sustancias sólidas que ofrezcan la máxima resistencia a la acción de los agentes naturales tales como las aguas subterráneas, agua del mar, etc.

Estos lodos o concentrados se mezclan con agregados y cemento para ser embidonados.

Tratamiento de residuos sólidos

En los reactores nucleares, además de los combustibles irradiados, los residuos sólidos están constituidos por las resinas y los filtros utilizados en el tratamiento del agua del circuito primario, por las piezas no reutilizables o no descontaminables que provienen de los mantenimientos o reparaciones en el núcleo y por los residuos del tratamiento de los efluentes líquidos.

Los residuos necesitan una selección previa siguiendo varios criterios: baja y media actividad, residuos sólidos comprensibles o no, combustibles o incombustibles, etc.

Los métodos más utilizados son la compresión y la incineración. Este último posee problemas de depuración de los gases y de corrosión. Los residuos comprimidos y las cenizas de incineración son posteriormente embidonados.

Sistema de vigilancia de la radiactividad

Tipos de sistemas

El sistema de vigilancia de la radiactividad tiene como objetivo fundamental comprobar que los niveles de radiactividad coinciden con los previstos en el proyecto, que en todo caso han de encontrarse dentro de los niveles tolerados. La superación de tales valores será una clara indicación de una circunstancia accidental, que puede ser corregida, automática o manualmente, previa la correspondiente alarma.

El sistema de vigilancia de una central nuclear puede ser dividido en tres subsistemas:

- *Subsistema de vigilancia de procesos.*
- *Subsistema de vigilancia de áreas.*
- *Subsistema de vigilancia ambiental.*

El primero tiene como objetivo el control del funcionamiento de la central, el segundo la protección del personal laboral de la misma y el tercero la protección del público. Todos dan una señal automática que permite tomar las medidas oportunas al equipo de la instalación.

Tales medidas van desde la interrupción del funcionamiento de parte o toda la planta, en el caso más grave, o la evacuación parcial o total de la misma.

SEGURIDAD DE UNA CENTRAL NUCLEAR

La seguridad de una instalación es su aptitud para no producir daños materiales o corporales al medio ambiente, al personal de la explotación o a la población.

En términos probabilísticos, se define seguridad como la probabilidad de que no se produzca ningún accidente, que ponga la salud de los trabajadores o de la población en peligro, durante el tiempo de funcionamiento de la instalación.

La seguridad del reactor y de la central reposa en primer lugar sobre las propiedades físicas del combustible, rodeado o no de un moderador y un refrigerante. A lo largo del funcionamiento de la central, el combustible se empobrece en materia fisible (p. ej. U-235) y se enriquece en nuevos núcleos pesados (p. ej. Pu) y en productos de fisión, la mayoría sólidos y algunos gaseosos. Estos productos de fisión son muy peligrosos y en ningún caso deben escapar al ambiente.

El combustible utilizado deberá mantener su integridad, que constituye una barrera para los productos de fisión, en un cierto intervalo de condiciones físicas, especialmente de temperatura.

Además del combustible, y para impedir y controlar la migración de los productos radiactivos, el sistema, basándose en el llamado principio de "defensa a ultranza", dispone de "múltiples barreras" que son:

- *La primera barrera.* Es la vaina que rodea al combustible. Es un estuche metálico estanco. Retiene los productos de fisión y los núcleos pesados producidos en el combustible durante el funcionamiento del reactor. La vaina evita un contacto directo entre el refrigerante y el combustible. Esta barrera funciona a temperaturas elevadas y está sometida a fuertes presiones debidas a la presencia de los productos de fisión gaseosos.

— *La segunda barrera.* Es la barrera de presión constituida por el contorno del circuito primario que contiene el refrigerante. Según su naturaleza, este refrigerante puede activarse o no al pasar por el núcleo; por otra parte, puede contener productos de fisión y fragmentos de combustible en el caso de fuga o ruptura de la vaina. Por esta razón es necesario que este circuito sea cerrado para impedir todo contacto físico entre el refrigerante y el exterior.

— *La tercera barrera.* Es el recinto de contención. Está generalmente constituida por un recinto estanco de hormigón. Puede asegurar una protección contra la radiación del núcleo y contener toda fuga del primario.

Hay que señalar que para los reactores de grafito-gas, el cajón hermético constituye la segunda y la tercera barrera; para los reactores BWR, la tercera barrera no encierra el circuito primario en su conjunto ya que éste atraviesa el recinto de contención para ir a la turbina.

El análisis de seguridad impuesto por los organismos de control consiste en primer lugar en asegurar la validez de cada una de las barreras y su funcionamiento correcto en condiciones normales de operación y en caso de accidente. Para ello es necesario protegerlas y vigilarlas constantemente. A tal fin se establecen dos nuevos niveles de seguridad, uno técnico y otro administrativo.

El nivel técnico está constituido por elementos de protección y control que vigilan constantemente la evolución de los distintos parámetros de la instalación, y los corrigen automáticamente, sin permitir que se alcancen los valores que podrían poner en peligro la integridad de las barreras de contención.

El nivel administrativo está constituido por un cuerpo de requisitos técnicos, normas, códigos y reglamentos que imponen las distintas escalas jerárquicas a fin de garantizar, hasta límites razonables, que todos los aspectos técnicos y de explotación de la central se han considerado y se están poniendo en práctica de forma adecuada.

Estos tres niveles de seguridad revelan la redundancia y precauciones que se toman y que constituye la expresión más genérica de la aplicación del concepto de seguridad a ultranza, es decir seguridad por encima de todo.

La seguridad nuclear en los reactores PWR y BWR

El sistema de defensa de este tipo de reactores se caracteriza por la existencia de tres barreras ya citadas:

- La vaina
- El circuito primario
- El recinto de contención

Accidentes

Los accidentes que se pueden producir son de diferentes órdenes de gravedad. La primera categoría es la de los accidentes de funcionamiento que pueden interrumpir (incluso durante largo tiempo) la marcha del reactor, sin causar daños ni a los trabajadores, ni a la población.

La segunda categoría se refiere a los accidentes que pueden inducir la ruptura de una o varias barreras y, como consecuencia, la liberación de materiales radiactivos.

Uno de los objetivos principales de los estudios de seguridad es, en este caso, asegurar la integridad de las barreras antes citadas.

En caso de accidente, la integridad de la mayoría o totalidad de las vainas y del circuito primario depende fundamentalmente de que aseguremos la refrigeración del combustible. Los accidentes considerados como capaces de degradar esta refrigeración son los llamados accidentes de pérdida de refrigerante y accidentes de pérdida de presión.

— Accidentes de pérdida de refrigerante

La pérdida del refrigerante puede tener varios orígenes:

- * Taponamiento de uno o varios subcanales
- * Disminución o cese del caudal de refrigerante
- * Pérdida de refrigerante por ruptura del circuito primario

El taponamiento puede ser provocado por depósitos (de corrosión por ejemplo), por de formaciones de los elementos combustibles o por cuerpos extraños.

La disminución o cese del caudal de refrigeración puede provenir de la parada de una o varias bombas del circuito primario. Las consecuencias serían un aumento rápido de la temperatura de la vaina.

La pérdida del agua de refrigeración por ruptura del circuito primario es un accidente mucho más grave que necesita dispositivos de refrigeración de seguridad para limitar el deterioro de la vaina y evitar la fusión del núcleo.

— Accidentes de pérdida de presión

Pueden producirse a causa de:

- * La ruptura de la vasija, de una tubería de entrada o de una tubería de salida del primario
- * La ruptura de una tubería de uno de los circuitos próximos al primario.
- * Fallo de uno o varios elementos del conjunto del sistema de refrigeración.

La ruptura de la vasija puede ser consecuencia de causas externas tales como un sacudido, un sismo, impactos externos o una acumulación de errores humanos graves. Entre las causas relacionadas con la concepción, construcción y explotación de la instalación están un defecto de fabricación, un defecto menor que evoluciona durante el funcionamiento por erosión, corrosión, o vibraciones o el empleo de materiales demasiado frágiles frente a la irradiación de neutrones.

— EI LOCA

La ruptura del circuito primario conduce a la pérdida de refrigerante, lo que tiene como consecuencia un aumento de la temperatura de las vainas y del combustible a causa de calor residual debido a la radiactividad del combustible. Un accidente de este tipo, LOC (Loss of Coolant Accident), necesita dispositivos de refrigeración de seguridad que deben inundar el núcleo suficientemente pronto para limitar el deterioro de las vainas.

La seguridad nuclear en los reactores de uranio natural, grafito-gas

Características intrínsecas de seguridad

El sistema de seguridad implica la existencia de dos barreras de protección entre el combustible radiactivo y el exterior: la vaina del combustible y el límite del circuito primario.

El gran tamaño de los núcleos de estos reactores favorece la seguridad por la inercia térmica de la gran masa de grafito y por la gran dispersión de la materia fisible. Los sistemas más recientes (Vandellós I) son del tipo INTEGRADO, es decir, que el núcleo y los intercambiadores del calor están situados juntos en el "cajón" (de hormigón pretensado). La concepción "integrado" aumenta la seguridad.

La baja presión de trabajo del refrigerante gaseoso es también una característica que favorece la seguridad, sin embargo, la vulnerabilidad del combustible metálico es muy grande y un accidente sin repercusiones en el exterior puede hacer el reactor inutilizable durante varios meses o definitivamente.

El gran tamaño de los núcleos implica inestabilidades espaciales de potencia, lo que se resuelve con el empleo de numerosas barras de control.

Los accidentes

— Accidente de pérdida de presión

Este es el accidente de referencia y puede producirse por varias causas:

* La ruptura de una tubería principal (diámetro de 40 cm.). En este caso la pérdida de presión es lenta debido principalmente a la acción de los restrictores de caudal en las canalizaciones de CO₂. Se estima que en el reactor, si han actuado las barras de control de parada, lo que aquí se considera siempre posible dado su gran número, la refrigeración estará asegurada.

* Pérdida de presión de un canal por pérdida del tapón superior. En este caso, si el flujo de gas va de abajo hacia arriba, algunos de los cartuchos pueden salir y prenderse fuego con el correspondiente riesgo de fusión y oxidación del uranio, sobre todo si los cartuchos atraviesan el cajón. Por ello, en estas centrales se ha dispuesto un doble tapón superior.

— Accidente por falta de refrigeración

* La pérdida total de impulsión del gas se considera como altamente improbable, siempre que se tomen todas las precauciones. Pero estudiando las posibles consecuencias se pueden tomar las medidas correctoras adecuadas para evitar la fusión del combustible que puede producirse al cabo de 5 minutos, si esto llegara a ocurrir.

* Otro elemento importante para producir una pérdida de refrigeración puede ser el fallo del Dispositivo Principal de Manutención (DPM). Esta máquina de carga y descarga opera con el reactor en marcha o en parada. Su control es completamente automático. Pero está previsto su control manual de emergencia en caso de fallo del automatismo. El canal en el que se está realizando la manutención debe ser refrigerado por el CO₂ del propio reactor y el que se impulsa desde la máquina de manutención (DPM).

Las salvaguardias tecnológicas

El nombre de salvaguardias tecnológicas engloba una serie de sistemas que tienen como misión llevar a la central a una situación segura en caso de accidentes, en los que pueden resultar dañados los elementos combustibles del núcleo.

Asimismo, evitan la degradación de las barreras que están diseñadas para contener los productos radiactivos que resultan del proceso de fisión y minimizan o impiden el escape de dichos productos al medio ambiente.

Salvaguardias de la refrigeración de emergencia

Estas salvaguardias se diseñan e instalan para hacer frente a los accidentes con pérdida de refrigerante, de modo que no se produzca la rotura catastrófica de la primera barrera de contención, la vaina del combustible. Su concepción ha de basarse en uno de los accidentes base de proyecto. En el caso particular de la familia de los reactores de agua ligera se hace la hipótesis de que se rompe la tubería del sistema de refrigeración del núcleo en el lugar donde puede causar más daño, como se indica en la figura 2.7. No se considera por demasiado improbable la rotura catastrófica de la propia vasija del reactor, que traería consecuencias peores, de modo que las salvaguardias de refrigeración ac-

tuales no podrían hacer frente a tal suceso. Dada su misión, el conjunto de sistemas que constituyen las salvaguardias de refrigeración recibe el nombre de sistema de refrigeración de emergencia.

Una vez postulada la rotura, instantánea, tipo guillotina, en el lugar definido, el sistema se despresuriza rápidamente, como se indica en la figura 2.13. Al principio, el núcleo del reactor se enfría a causa del mayor caudal de refrigerante a su través, pero posteriormente, cuando el inventario de refrigerante es pequeño, empieza un período de calentamiento del combustible que de no atajarse traería como consecuencia la fusión del núcleo. Antes de terminar la descarga del fluido original ha de comenzar la inyección del fluido de emergencia capaz de extraer el calor residual.

— Reactores de agua a presión

En los reactores de agua a presión el sistema de refrigeración de emergencia, que se indica esquemáticamente en la figura 2.14., se subdivide en los tres subsistemas siguientes:

Subsistema de inyección a alta presión.

Subsistema de inyección por acumulador.

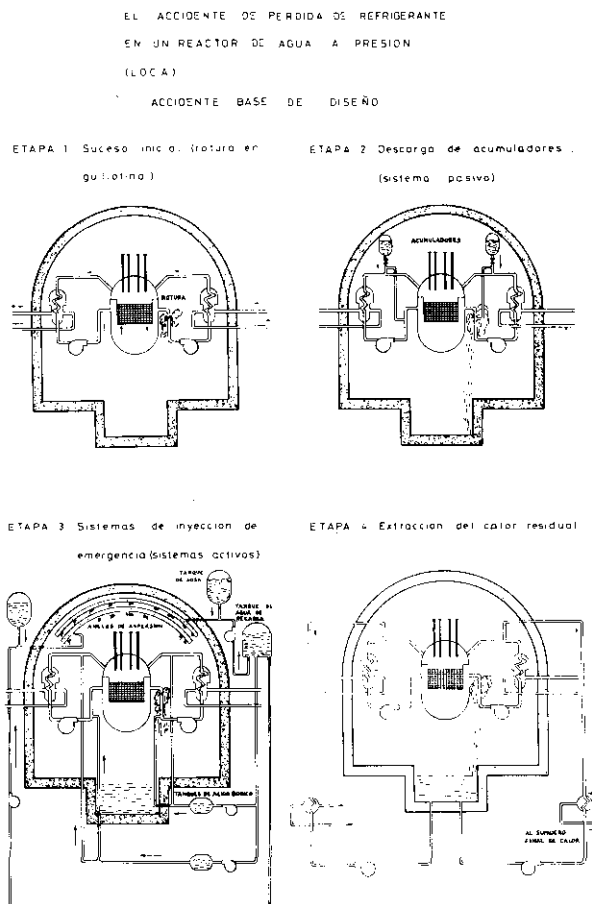


FIGURA 2.7.

Subsistema de inyección a baja presión.

El subsistema de inyección por acumuladores consta de una serie de tanques a presión conectados con los lazos de recirculación del reactor mediante válvulas que se abren automáticamente en cuanto la presión del refrigerante disminuye por debajo de un cierto valor preestablecido. El hecho de que se trate de un sistema pasivo, garantiza, mejor que en el caso de la inyección mediante bombas, la entrada de agua en el circuito en el momento oportuno, de modo que se prevee que sea el primero en actuar.

El subsistema de inyección a alta presión, que es el siguiente en actuar, consta, de varias bombas con elevada presión de descarga, una de las cuales es suficiente para llevar a cabo la misión encomendada. Dichas bombas, toman agua de un tanque de elevada capacidad. Dichas bombas inyectan el agua en el sistema primario, arrastrando previamente ácido bórico para evitar que el reactor se haga crítico por entrada de agua fría. De esta forma, el agua que descarga en la tubería rota se pierde a través de la rotura, el que llega a través de los otros lazos de refrigeración penetra en el núcleo y evita o mitiga la elevación de temperatura.

Finalmente, el subsistema de inyección a baja presión consta, por lo general, de bombas centrífugas de baja presión de descarga, una de las cuales es suficiente para realizar la misión encomendada. En caso de actuación, toman agua del sumidero de la contención, donde se ha descargado el refrigerante original que escapó a través de la rotura, y que se hizo condensar posteriormente con las salvaguardias de la contención. También se habrá acumulado allí el agua descargada por los acumuladores y por el sistema de inyección a alta presión. Estas bombas devuelven el agua a cada uno de los lazos de recirculación, haciéndola pasar previamente a través de intercambiadores de calor que la refrigeran. De esta manera queda garantizada la extracción del calor residual.

— Reactores de agua en ebullición

En el caso de los reactores de agua en ebullición los sistemas son análogos.

En la figura 2.9., se representa de forma esquemática el sistema normalmente utilizado, cuyos subsistemas, por orden cronológico de actuación prevista, son:

- * Subsistema de aspersión del núcleo a alta presión.
- * Subsistema de descompresión automática del reactor.
- * Subsistema de aspersión del núcleo a baja presión.
- * Subsistema de inyección de refrigerante a baja presión.

El subsistema de aspersión del núcleo a alta presión consiste en un dispositivo de duchas servido por una bomba de alta presión que aspira del depósito de almacenamiento de condensado o del pozo de supresión.

El subsistema de descompresión automática del reactor actúa cuando los sistemas de refrigeración de alta presión no son capaces de mantener el nivel de agua adecuado en el núcleo. Conduce el vapor de la vasija al pozo de supresión, permitiendo actuar a los sistemas de baja presión.

El subsistema de aspersión del núcleo a baja presión, consta de una tubería con toberas para el rociado del agua de refrigeración, esta tubería está servida por una bomba que aspira del pozo de supresión.

El subsistema de inyección de refrigerante a baja presión utiliza las bombas centrífugas del sistema de evacuación del calor residual, así como sus cambiadores de calor, establece, pues, un circuito cerrado que permite la evacuación del calor en los mencionados cambiadores.

Salvaguardias de la contención

Las salvaguardias de la contención tienen como misión fundamental la de proteger integridad y hermeticidad de la tercera barrera de contención, aún en el caso de que se hayan roto las dos barreras precedentes. Como en los casos anteriores, las soluciones utilizadas dependen del tipo de reactor; si bien dentro de un mismo tipo puede haber diferencias apreciables de acuerdo con los criterios del proyectista.

En los reactores de la familia de agua ligera el accidente base de diseño para este tipo de salvaguardias es también el accidente con pérdida de refrigerante por rotura súbita del lazo de recirculación. Cuando esto tiene lugar pasan al recinto de contención la masa de refrigerante, que se habrá vaporizado, así como la energía en él contenida, salvo la necesaria para la evaporación, aumentando así la presión y la temperatura.

Aparte de lo anterior, pasarán también a dicha atmósfera el hidrógeno generado en las posibles reacciones metal-agua o en la radiólisis del agua, así como otros gases no condensables que se pudieran desprender.

Se trata, por tanto, de reducir la presión y la temperatura del recinto, así como la de controlar el contenido en hidrógeno, previniendo explosiones o deflagraciones que provocarían ondas de presión y más acumulación de energía.

Para reducir drásticamente la presión, en el caso de los reactores de la familia de agua ligera, se comprende que resultará muy eficaz condensar el vapor. A tal fin, se establece una aspersión de agua fría, que partiendo de la parte superior del recinto de contención barra todo el espacio libre, condensando el vapor y relajando la presión y la temperatura.

En realidad, la condensación del vapor es un método tan eficaz de relajación de la presión que hay algunos sistemas especialmente diseñados para hacer uso de este efecto de forma pasiva e inmediata. Este es el caso de los sistemas de contención que utiliza General Electric para albergar los reactores de agua en ebullición, también lo utilizan los reactores alemanes y suecos de este tipo.

Consideración aparte merece el control de hidrógeno, que adquirió una relevancia especial en el caso del accidente de la Central de la Isla de las Tres Millas (TMI-2). Para controlar este gas se pueden utilizar dos procedimientos, cuya idoneidad depende del grado de contaminación radiactiva de la atmósfera encerrada en el recinto.

En el caso de que el recinto no se encuentre contaminado, es entonces posible eliminar al exterior los gases del mismo. En este caso, el control del hidrógeno puede hacerse fácilmente disponiendo en la parte superior del recinto de ventiladores que impidan acumulación del hidrógeno en las partes altas del sistema, tendencia del gas a causa de su menor densidad. El gas se hace después salir al exterior purgando el sistema.

En el caso de que la atmósfera encerrada en el recinto de contención se encuentre contaminada de forma que la purga resultase inaceptable, como de hecho ocurrió en la central TMI-2, se puede controlar el contenido en hidrógeno recirculando los gases a través de un recombinador de hidrógeno y oxígeno, de modo que los gases cargados de hidrógeno que se toman del recinto se devuelven al mismo sin este componente, con lo que el recinto va perdiendo el hidrógeno. Esta operación demostró ser muy eficaz en las condiciones reales creadas por el accidente en la central TMI-2, una vez superadas las primeras dificultades de instalación del recombinador.

Otros sistemas de eliminación del hidrógeno del aire de la contención se han desarrollado en la actualidad.

Salvaguardias de limitación de las consecuencias

En este grupo se incluyen aquellas salvaguardias cuya misión principal consiste en retener los productos radiactivos en el caso de que se hayan puesto en libertad como consecuencia de la rotura de las dos primeras barreras. Existen muchas posibles soluciones a este problema, que dependerán del tipo de reactor a proteger.

En la figura 2.11., se indica uno de los sistemas más utilizados para este fin en los reactores de la familia del agua ligera. Consta en esencia de un sistema de recirculación de la atmósfera encerrada por el recinto de contención, de modo que al recircular los gases allí contenidos se retienen los productos radiactivos, con lo que la atmósfera se va purificando. La retención se hace en filtros de alta eficacia y en filtros de carbón activo que tienen la propiedad de retener fácilmente el yodo. Estos sistemas son múltiples, a veces se utilizan hasta cuatro, aunque teóricamente uno sólo es capaz de realizar la misión encomendada. El paso de estos gases por un intercambiador de calor permite la refrigeración del aire de la contención.

Los reactores nucleares y la bomba atómica

Con frecuencia se escucha esta pregunta:

¿Puede explotar un reactor nuclear lo mismo que una bomba atómica?

De un modo tajante diremos que NO, pero para demostrarlo vamos a ver como ambos sistemas funcionan según criterios distintos. En efecto los tres factores que modifican la criticidad de una cierta cantidad de material fisible son: LA DENSIDAD, LA CONCENTRACION O PUREZA y LA GEOMETRIA DEL MATERIAL. Por ello, un explosivo nuclear deberá ser de alta densidad de núcleos físis, con un alto grado de pureza y con condiciones geométricas adecuadas.

En efecto, el enriquecimiento de material fisible en una bomba es superior al 90% mientras que en los reactores comerciales es inferior al 4%.

En cuanto a la densidad, la disposición del material en la bomba, en los diseños más sencillos, es de dos semiesferas que se unen íntimamente por la acción de un explosivo que impulsa a una junto a la otra.

Y, finalmente, la disposición geométrica, en forma cilíndrica alargada, del combustible nuclear hace que sea mucho mayor la fuga de neutrones que en una compacta, y suficientemente grande, esfera de material fisible como ocurre en la bomba.

En los reactores de neutrones térmicos, ya sean de agua ligera o de grafito-gas, puede haber determinadas condiciones en las que se acelera la reacción en cadena. Esta aceleración produce un aumento de la potencia liberada por el combustible, y por tanto un aumento de su temperatura, el combustible se deteriora y se funde sin que se produzca una reacción comparable a una explosión nuclear. El combustible fundido puede juntarse de nuevo pero como está compacto, lejos de su configuración óptima con respecto al moderador y como la cantidad de materia fisible es pequeña frente a la masa total, se está lejos de la situación crítica y la reacción en cadena automantenida no se produce. No hay ninguna reacción nuclear comparable a la explosión de una bomba atómica.

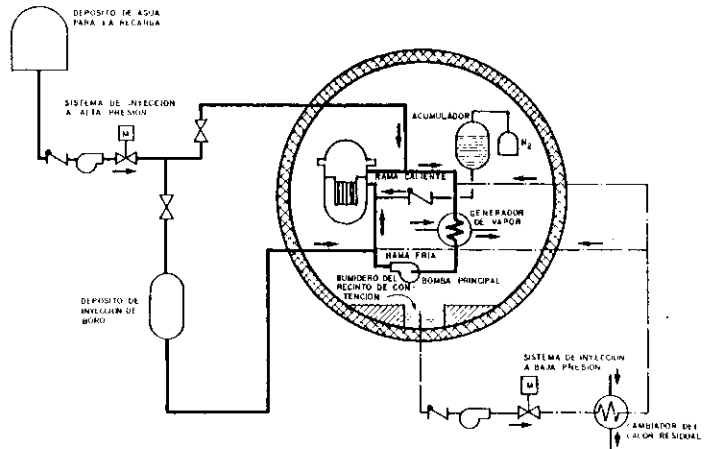


FIGURA 2.8.

SISTEMA INTEGRADO DE REFRIGERACION DE EMERGENCIA DEL NUCLEO DE UN REACTOR DE AGUA A PRESION.

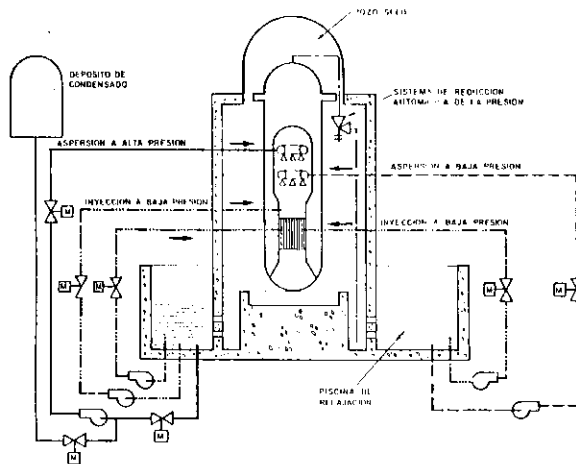


FIGURA 2.10.

SISTEMA INTEGRADO DE REFRIGERACION DE EMERGENCIA DE UN REACTOR DE AGUA EN EBULLICION MODELO RBWR/RB.

SISTEMA DE DEPURACION POR VENTILACION

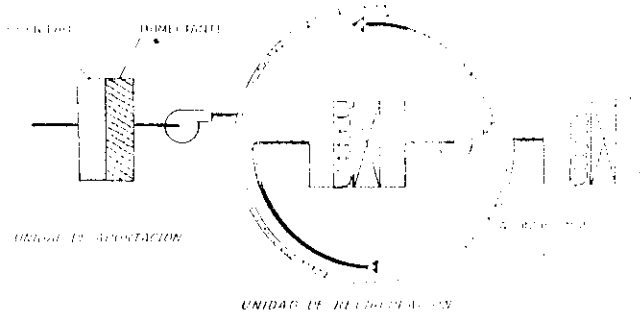


FIGURA 2.11.

UNIDAD DE REFRIGERACION

TEMA - 3. CONCEPTOS BASICOS EN PROTECCION RADIOLOGICA

DEFINICION DE MAGNITUDES Y UNIDADES UTILIZADAS EN PROTECCION RADIOLOGICA.

En este apartado se exponen por orden alfabético los significados de las palabras o grupos de palabras, específicos de la Protección Radiológica, que se usan en el texto y para los que tiene interés precisar su significado.

Términos físicos. Magnitudes y Unidades

Actividad (A)

Cociente de dN por dt , donde dN es el número de transformaciones nucleares espontáneas que se producen en una cantidad de un radionucleído durante el tiempo dt :

$$A = dN/dt.$$

La unidad de actividad en el Sistema Internacional es el Bequerelio (Bq):

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$$

El Curio también es una unidad de actividad:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Bq} = 2,7027 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

Bequerelio

Véase su definición en Actividad.

Dosis absorbida (D)

Es el cociente entre $d\bar{\epsilon}$ y dm donde $d\bar{\epsilon}$ es la energía media impartida por la radiación ionizante a la materia en un elemento de volumen y dm la masa de materia contenida en dicho volumen. La unidad de dosis absorbida, en el Sistema Internacional, es el Gray (Gy) que equivale a 1 J/kg.

Otra unidad de dosis absorbida es el rad (1 Gy = 100 rad)

Gray

Véase la definición en Dosis Absorbida.

Términos Radiológicos y Operativos

Absorción

Incorporación de material radiactivo a través de la piel.

Accidente

Acontecimiento imprevisto que provoca daños a una instalación o una perturbación para la buena marcha de esta instalación y que es susceptible de acarrear, para una o varias personas, una dosis superior a los límites de dosis.

Alara

Acronimo de la expresión inglesa "as low as reasonably achievable" (tan bajo como razonablemente pueda alcanzarse), concepto que significa que el diseño y uso de las fuentes

radiactivas, y las prácticas correspondientes, deben ser tales que se tenga la seguridad de que las exposiciones se reducen al valor más bajo que sea razonablemente conseguible, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales.

Autoridad competente

Autoridad designada o reconocida de otro modo por un Gobierno para fines determinados en relación con la Protección Radiológica y/o la Seguridad Nuclear.

Concentración de actividad

Para un material radiactivo es la actividad por unidad de masa o por unidad de volumen.

Contaminación Radiactiva

Es la presencia indeseada de sustancias radiactivas en una materia, una superficie, un medio cualquiera o en una persona.

En el caso particular del organismo humano, esta contaminación puede ser externa o cutánea, cuando se ha depositado en la superficie exterior, o interna cuando los radionucleidos han penetrado en el organismo por cualquier vía (inhalación, ingestión o percutánea, etc.).

Descontaminación

La eliminación de contaminantes radiactivos con la finalidad de reducir el nivel de radiactividad residual existente en los materiales, las personas o el medio ambiente.

Dosímetro

Dispositivo, instrumento o sistema que puede utilizarse para medir o evaluar cualquier magnitud que pueda estar relacionada con la determinación de la dosis absorbida o equivalente.

Dosis

Ver Dosis equivalente.

Dosis colectiva (S)

La dosis colectiva para una población o un grupo viene dada por el sumatorio:

$$S = \sum_i H_i P_i$$

donde H_i es la media de las dosis globales o de las dosis a un órgano dado en los P_i miembros del i -ésimo grupo de la población o del grupo.

Dosis equivalente (H)

Es el producto de la dosis absorbida (D) por el factor de calidad (Q) y factores modificantes (N), que tienen en cuenta las características de la radiación y la distribución de los radionucleidos. Cuando se utiliza el término "dosis" se trata siempre de dosis equivalente.

La unidad de dosis equivalente en el Sistema Internacional es el Sievert (Sv),

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/Kg} \text{ (si } Q = N = 1)$$

Otra unidad de dosis equivalente es el rem: $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$;

$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$.

Dosis efectiva (HE)

Es la suma ponderada de las dosis (equivalentes), medias, recibidas en los distintos órganos o tejidos.

Su valor viene dado por la expresión:

$$HE = \sum_T W_T \cdot H_T$$

donde:

W_T = Es el factor de ponderación para el órgano o tejido T, que representa la proporción del riesgo estocástico resultante de la irradiación del órgano ó tejido "T".

H_T = Es la dosis equivalente recibida por el tejido T.

Los valores de los factores de ponderación W_T son:

TEJIDOS	W_T
Gónadas	0,25
Mama	0,15
Médula ósea roja	0,12
Pulmón	0,12
Tiroides	0,03
Hueso (superficie ósea)	0,03
Resto del organismo (1)	0,30

(1) Para determinar la contribución del resto del organismo, se evaluará la dosis media para los cinco órganos o tejidos más expuestos del resto del organismo (con exclusión del cristalino, piel, manos, antebrazos, pies y tobillos), utilizando para cada uno de ellos un factor de ponderación de 0,06. Se ignorará entonces la irradiación de los otros órganos y tejidos.

Dosis equivalente individual en profundidad $H_p(d)$

Es la dosis equivalente, en tejido blando, por debajo de un punto especificado sobre el cuerpo, y a una profundidad d, que resulte apropiado para radiación muy penetrante.

Dosis equivalente individual en superficie $H_s(d)$

Es la dosis equivalente, en tejido blando, por debajo de un punto especificado sobre el cuerpo, y a una profundidad d, que resulte apropiado para radiación poco penetrante.

Dosis interna integrada

Es la dosis que será recibida en cincuenta años en un órgano o tejido, como consecuencia de la incorporación de uno o varios radionucleidos.

Dosis genética

Es la dosis que, si fuera efectivamente recibida por cada individuo de una población dada, desde su concepción hasta la edad media de procreación (30 años), implicaría la misma carga genética para la población en su conjunto, que las dosis realmente recibidas por los individuos de esta población.

Detrimento

Es la esperanza matemática del daño (perjuicio para la salud y otros efectos) resultante de la exposición de individuos o grupos de personas de una población humana a una fuente de radiación, teniendo en cuenta no sólo la probabilidad sino también la gravedad de cada tipo de efecto nocivo.

Dosis umbral

Cantidad de radiación que es necesaria para producir un efecto particular en al menos un porcentaje significativo de individuos expuestos.

Efectos biológicos estocásticos

Son los que se caracterizan por una relación dosis-efecto de naturaleza probabilística. Propiedades de estos efectos biológicos estocásticos son la carencia de dosis umbral y ser siempre graves una vez producidos.

Efectos biológicos no estocásticos

Son los que se caracterizan por una relación de causalidad determinista entre la dosis y el efecto. Únicamente se manifiestan cuando la dosis recibida alcanza o sobrepasa un determinado valor (dosis umbral) y su gravedad depende de la dosis recibida.

Emergencia radiológica o nuclear

Ocurrencia de sucesos que pueden conducir a un accidente nuclear si las salvaguardias tecnológicas no funcionan apropiadamente o si se produjesen errores en la operación de la instalación; o aquella situación en que se espera o se produce una elevación anormal en el nivel de radiación (o grado de contaminación) en algún lugar del territorio nacional.

Entidad explotadora

Compañía pública o privada autorizada por el Ministerio de Industria y Energía para explotar u operar una instalación según el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas.

Explotación

Conjunto de actividades conducentes a lograr la finalidad para la que se ha construido una instalación dentro de los límites y condiciones señalados en las Especificaciones Técnicas.

Exposición

Es la acción y efecto de someter a las personas a las radiaciones ionizantes.

Exposición accidental

Es aquella de carácter fortuito e involuntario en la que se sobrepasa alguno de los límites anuales de dosis, fijados para las personas profesionalmente expuestas.

Exposición continua

Es la exposición externa permanente cuya tasa puede variar con el tiempo, o exposición interna resultante de una incorporación permanente cuya intensidad puede variar en el tiempo.

Exposición externa

Es la exposición del organismo a fuentes de radiación exteriores a él.

Exposición global

Es la exposición considerada como homogénea en el cuerpo entero.

Exposición interna

Es la exposición del organismo a fuentes de radiación interiores a él.

Exposición médica

Es la exposición de individuos a causa de su examen médico o de su tratamiento por medio de radiaciones.

Exposición parcial

Es la exposición localizada esencialmente sobre una parte del organismo o sobre uno o varios órganos o tejidos o exposición del cuerpo entero considerada como no homogénea.

Exposición total

Es la suma de las exposiciones externa e interna.

Exposición única

Es la exposición externa de corta duración o exposición interna resultante de una incorporación de radionucleidos en corto tiempo.

Fase y Situación de Emergencia Nuclear

A efectos del Plan de Emergencia Exterior, aquella que se corresponde con un cierto nivel de dosis (esperado o real) a consecuencia de un accidente nuclear y en un área determinada dentro de las zonas de planificación.

Fondo radiactivo natural

Está constituido por el conjunto de radiaciones ionizantes que provienen de fuentes naturales terrestres o cósmicas. (En la medida en que la exposición que de ellas resulte no se vea aumentada de manera significativa por la acción humana).

Grupos críticos

Conjunto de personas que reciben una dosis superior a la del resto de la población debido bien a su ubicación, bien a su metabolismo, bien a su edad, o bien a su forma o hábitos de vida. Se incluyen, a efectos sanitarios todo tipo de impedidos que necesiten del apoyo de otras personas para su atención personal.

Incorporación

Es la actividad que penetra en el organismo desde el medio exterior.

Ingestión

Incorporación de material radiactivo por vía oral.

Inhalación

Incorporación de material radiactivo por vía respiratoria.

Límite de dosis

Son los límites, fijados en el Reglamento de Protección Radiológica contra Radiaciones Ionizantes, (RPSRI), para las dosis resultantes de la exposición de las personas profesionalmente expuestas, de los aprendices y estudiantes y de los miembros del público, no teniendo en cuenta las dosis resultantes del fondo radiactivo natural y de la exposición sufrida como consecuencia de exámenes y tratamientos médicos. Los límites de dosis se aplican a la suma de la dosis recibida por exposición externa durante el período considerado y de la dosis interna integrada resultante de la incorporación de radionucleidos, durante el mismo período.

Límite de incorporación anual (LIA)

Es la actividad, que introducida en el organismo, ocasiona para un individuo dado, una dosis interna integrada igual al límite de dosis anual apropiado fijado en el RPSRI.

Límite derivado de concentración de un radionucleido en el aire inhalado (LDCA)

Es la concentración media anual en el aire inhalado expresado en unidades de actividad por unidad de volumen que de ser inhalada por el hombre patrón durante un año laboral de 2.000 horas da lugar a una incorporación igual al límite de incorporación anual.

Material radiactivo

Es todo aquel que contiene sustancias que emiten radiaciones ionizantes.

Medidas protectoras o de protección

Aquellas que tomadas en base a los niveles de intervención justifican el riesgo radiológico que se evita a la población que pueda quedar afectada por un accidente nuclear.

Miembro del público

Cualquier individuo de la población considerado aisladamente, con exclusión explícita de las personas profesionalmente expuestas durante sus horas de trabajo habitual.

Nivel de referencia

Un nivel de referencia es un valor, de una cierta magnitud física, que sirve para decidir la conducta a seguir cuando se supera dicho valor o se prevé que va a superarse. Bajo ningún concepto se puede considerar como un límite.

Los niveles de referencia más frecuentemente utilizados son: nivel de registro, nivel de investigación y nivel de intervención.

Nivel de registro

Un nivel de registro es el nivel de referencia al que le corresponde como acción anotar y archivar los resultados.

Nivel de investigación

Es un nivel de referencia que justifica una investigación de los hechos y circunstancias que determinaron la superación del valor.

Nivel de intervención

Es un nivel de referencia, que cuando se prevea que se va a superar, o cuando ya se haya superado, condiciona el realizar determinadas acciones preventivas o correctivas, según el caso, para paliar o eliminar los riesgos o los daños que puede suponer.

En particular, se entiende por tales en un Plan de Emergencia los valores de dosis establecidos por la autoridad que deberán ser tenidos en cuenta por el Dtor. del Plan en la adopción de medidas de protección.

Nube radiactiva

Conjunto de gases, vapores y partículas en suspensión que contiene el material radiactivo procedente de un accidente nuclear. Se dispersa en el aire según las condiciones atmosféricas reinantes.

Persona profesionalmente expuesta

Es aquella persona que, por las circunstancias en que se desarrolla su trabajo, bien sea de modo habitual, bien sea de modo ocasional, está sometida a un riesgo de exposición a las radiaciones ionizantes susceptible de entrañar dosis anuales superiores a un décimo de los límites de dosis anuales fijados para los trabajadores.

Población en su conjunto

Toda la población comprendiendo los profesionalmente expuestos y los miembros del público.

Radiaciones ionizantes

Son las radiaciones compuestas de fotones o de partículas capaces de producir iones directa o indirectamente.

Radiotoxicidad

Es la toxicidad debida a las radiaciones ionizantes emitidas por un radionucleido incorporado y por sus descendientes; la radiotoxicidad no sólo depende de sus características radiactivas, sino también de su estado físico-químico, e igualmente del metabolismo del elemento en el organismo o en un determinado órgano.

Riesgo

A los fines de Protección Radiológica, la probabilidad de que un individuo determinado experimente un efecto estocástico nocivo dado, como resultado de una exposición a la radiación.

Sievert

Veáse su definición en Dosis Equivalente.

Vigilancia radiológica

La medición de la radiación o de la radiactividad por razones relacionadas con la evaluación o el control de la exposición a una radiación o un material radiactivo, y la interpretación de tales mediciones.

EL SISTEMA DE LIMITACION DE DOSIS RECOMENDADO POR LA C.I.P.R.

La C.I.P.R., (Comisión Internacional de Protección Radiológica) es un organismo formado por especialistas en Protección Radiológica de distintos países y que goza de un gran prestigio internacional, lo que hace que sus recomendaciones sean seguidas en gran medida. En lo que se refiere al título que encabeza este párrafo, la Comisión ha recomendado un sistema de limitación de dosis cuyas características principales son las siguientes.

- a) No debe ponerse en práctica algo que no introduzca un beneficio neto positivo.
- b) Todas las exposiciones deben mantenerse tan bajas como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta factores económicos y sociales (principio ALARA).
- c) La dosis equivalente individual no excederá los límites recomendados, para cada caso determinado por la Comisión.

LIMITES DE DOSIS Y NIVELES DE REFERENCIA

Los conceptos de límites de dosis y niveles de referencia han sido definidos anteriormente. En este punto se van a incluir los límites de dosis vigentes, según aparecen en el actual Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes publicado en el Boletín Oficial del Estado (8 de Octubre de 1982), en forma de Real Decreto y modificado parcialmente en la misma forma el 15 de Enero de 1988 y una clasificación de los niveles de referencia.

Límites de dosis vigentes

Los límites se aplican a la suma de las dosis equivalentes resultantes de la exposición externa durante un año y a la dosis equivalente para toda la vida resultante de la incorporación de radionucléidos durante este año.

En el caso de exposición profesional, la dosis equivalente resultante de la incorporación durante un año, se considerará como la dosis interna integrada.

— Límites anuales de dosis para las personas profesionalmente expuestas.

* Exposición total y homogénea

El límite anual de dosis para la totalidad del organismo a cualquier período de doce meses consecutivos, es 50 mSv (5 rems).

* Exposición parcial

En el caso de exposición total no homogénea o parcial del organismo los límites son:

1. El límite anual de dosis efectiva, referido a cualquier período de doce meses consecutivos, es de 50 mSv (5 rems).
2. El límite anual de dosis para el cristalino es de 150 mSv (15 rems).
 - 1. El límite anual de dosis para la piel es de 500 mSv (50 rems). Cuando la exposición resulte de una contaminación radiactiva cutánea, este límite se aplica a la dosis media sobre una superficie de 100 cm², en la región que reciba la dosis más alta.
 - 2. El límite anual de dosis para las manos, antebrazos, pie y tobillos es de 500 mSv (50 rems).
5. El límite anual para cualquier otro órgano o tejido considerado individualmente es de 500 mSv (50 rems).

* Límites especiales

1. Menores de 18 años

En el caso excepcional de que una persona, menor de 18 años y mayor de 16, esté sometida al riesgo de exposición a las radiaciones ionizantes, como aprendiz o estudiante, los límites anuales de dosis son los tres décimos de los límites anuales de dosis para las personas profesionalmente expuestas.

2. Mujeres

Para las mujeres en condiciones de procrear, la dosis en el abdomen no debe sobrepasar 13 mSv (1,3 rem) en un trimestre.

— Límites anuales de dosis para los miembros del público

Los límites anuales de dosis para los miembros del público, en lo que se refiere a exposición tanto total como parcial, se establecen como la décima parte de los límites anuales de las personas profesionalmente expuestas.

TEMA - 4. DETECCION Y MEDIDA DE LA RADIACION

DETECTORES DE LA RADIACION

El trabajo y utilización de radiaciones, su presencia en cierto tipo de actividades del hombre y el posible peligro que supone para nosotros, ya que son indetectables para los sentidos, hace necesaria la existencia de equipos destinados a medir, de alguna forma física, la presencia de la radiación y darnos una evaluación de la misma, que pueda sernos útil para conocer el posible riesgo y evitar el peligro.

Así se tienen los distintos tipos de detectores que nos permiten mantener una vigilancia sobre los campos de radiación para que, en todo momento, podamos cuantificar la radiación existente en una zona.

Los equipos de detección se basan en la interacción de la radiación con la materia.

Midiendo dicha interacción, podremos conocer la cantidad de radiación. Generalmente la electrónica asociada al conjunto detector nos transforma dicha interacción en magnitudes eléctricas, fácilmente medibles.

En este capítulo, vamos a estudiar los principios de funcionamiento de los diversos tipos de detectores utilizados en Protección Radiológica.

Detectores de ionización gaseosa (Figura 4.1.)

La *ionización gaseosa* es uno de los más simples y antiguos medios de detección de la radiación. Se basa en la medida de la carga eléctrica que producen los iones formados en un gas de llenado de una cámara al ser atravesada por la radiación.

El proceso seguido es el siguiente:

- La radiación entra en la cámara e ioniza el gas de llenado, formándose pares de iones.
- La aplicación de un voltaje a las paredes crea un campo eléctrico en la cámara que orienta los pares de iones hacia los respectivos electrodos.
- Variando la tensión aplicada, la cámara puede trabajar en condiciones diferentes y puede denominarse, según el caso:

Cámara de ionización.

Contador proporcional.

Detector Geiger-Müller.

Que tienen distintos comportamiento frente a las radiaciones.

Detectores de centelleo

Materiales luminiscentes son aquellos que son capaces de emitir luz sin elevar su temperatura al ser "excitados" por una fuente exterior de energía.

Cuando la radiación ionizante pasa a través de la sustancia luminiscente e interacciona, el material absorbe la energía de la radiación produciendo excitación electrónica.

La sustancia luminiscente inmediatamente se desexcita emitiendo luz visible.

La luz emitida es directamente proporcional a la energía total de excitación de los electrones, y, por lo tanto, directamente proporcional a la energía total absorbida en la sustancia luminiscente.

La luz emitida alcanza un componente del detector, llamado fotocátodo, convirtiéndola en señal luminosa en eléctrica, que se amplifica en un fotomultiplicador.

Todo este fenómeno se produce de una forma tan rápida que la señal eléctrica detectada es un impulso de corriente por cada interacción de la radiación.

Los fotoelectrones son acelerados y multiplicados por una serie de estados de amplificación llamados dinodos.

La señal de salida resultante es un impulso de corriente directamente proporcional a la cantidad de energía absorbida en la sustancia luminiscente.

— Materiales luminiscentes

Los materiales luminiscentes comúnmente empleados están en estado sólido o líquido. Los más comunes son:

* NaI (Tl). (Yoduro sódico con trazas de talio). El más usado en la detección de ray gamma.

* ZnS. (Sulfuro de zinc con trazas de plata). En polvo para detección de partículas alfa.

— Centelleadores plásticos (terfenilo en polietileno). Se utiliza para la detección de radiación beta en presencia de gamma.

— Centelleadores líquidos, que se usan en la detección de muestras líquidas (análisis de aguas). La muestra se mezcla con el centelleador, consiguiendo así una gran detección de radiación beta y alfa.

Detectores de semiconductor (Figura 4.3.)

Un semiconductor es un material cuya capacidad para conducir la corriente eléctrica intermedia entre la de los conductores (hierro, cobre, plata, etc.) y la de los aislantes (materiales plásticos principalmente). Un metal conduce la corriente porque sus electrones pueden moverse libremente. Un aislante no conduce porque sus electrones no poseen ninguna movilidad. Los electrones de un semiconductor tienen una movilidad intermedia que puede variar con ciertos factores como por ejemplo la irradiación. Cuando un material semiconductor (en estado sólido) se irradia se liberan electrones que sometidos a un voltaje adecuado, producen una corriente eléctrica que no aparecería en ausencia de la radiación. (Véase la similitud entre este detector y una cámara de ionización gaseosa). La corriente eléctrica producida es proporcional a la radiación incidente.

Los materiales más usados son el Germanio y el Silicio.

Los detectores de silicio se utilizan para partículas alfa, así como para electrones. Los de germanio se utilizan para radiación gamma.

Dosímetros personales

Todas las personas profesionalmente expuestas llevan normalmente un dosímetro personal para medir las dosis de radiación recibidas.

Hasta ahora se han usado fundamentalmente dos tipos de dosímetros, los de película fotográfica y las cámaras de ionización de bolsillo. Actualmente, hay un interés creciente por los dosímetros termoluminiscentes y por los digitales.

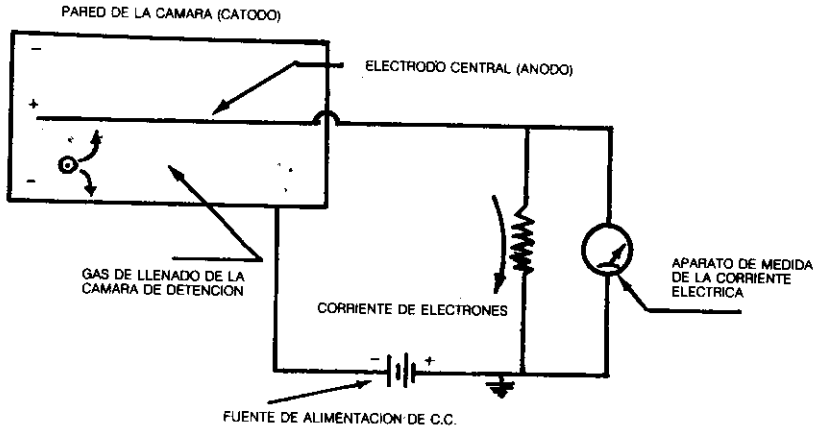


FIGURA 4.1.

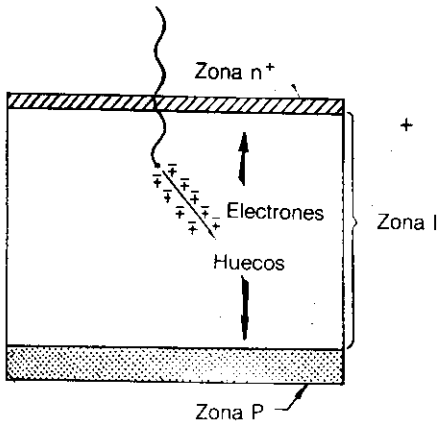


FIGURA 4.3.



FIGURA 4.4.

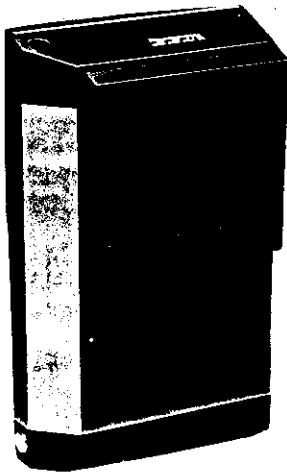
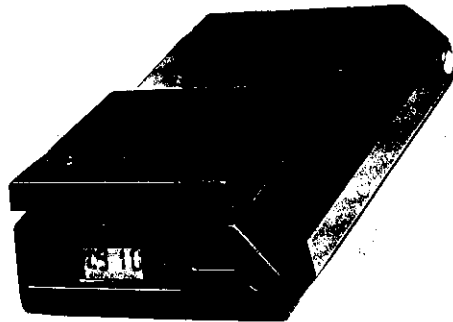


FIGURA 4.5.



Dosímetros de lectura indirecta

— Dosímetros de película

En este tipo de dosímetros, la radiación ionizante interacciona con la película causando un cambio fotoquímico que produce el ennegrecimiento de la misma.

El ennegrecimiento de la película depende de la exposición total a la radiación.

El ennegrecimiento se mide usando un densitómetro óptico. Este instrumento mide la fracción de la luz que se transmite a través del ennegrecimiento de la película.

El tipo y energía de la radiación se distingue usando filtros de plomo, aluminio y plástico que se interponen a la radiación.

Pueden medirse dosis comprendidas entre 0,1 mGy y 10 Gy de radiación gamma.

— Dosímetros de termoluminiscencia (TLD) (figura 4.4.)

Al igual que los materiales luminiscentes, los materiales termoluminiscentes absorben la energía de la radiación en forma de excitación electrónica. Sin embargo, los materiales TLD liberan la energía almacenada en forma de luz solamente cuando son calentados a altas temperaturas. Así, los materiales TLD se pueden usar para ir acumulando la dosis recibida sobre un largo intervalo de tiempo.

Cuando se quiera medir la dosis, el material TLD se monta en un dispositivo óptico, se calienta y se mide la luz emitida por medio de un fotomultiplicador. Como la energía absorbida en el material está directamente relacionada con la dosis absorbida debida a la radiación, la carga total recolectada en el fotocatodo estará relacionada con la dosis total.

Un detector TLD puede volverse a utilizar después de un proceso de borrado.

En la figura 4.6., pueden verse los dosímetros fuera de sus cápsulas de almacenamiento y en la figura 4.7., puede verse el despiece total de un dosímetro de este tipo.

Los materiales termoluminiscentes que más se usan en dosimetría son:

LiF (Fluoruro de Litio) y CaF₂ (Fluoruro de Calcio).

Dosímetros de lectura directa

— Cámaras de ionización de bolsillo

Los dosímetros de lectura directa, como su propio nombre indica, permiten una lectura inmediata y directa, sin necesidad de ningún equipo adicional, de la dosis que el dosímetro ha registrado hasta ese momento desde que ha sido expuesto.

Los más clásicos de estos dosímetros son los dosímetros tipo pluma, denominados así por su parecido con una pluma estilográfica.

Básicamente, se trata de una pequeña cámara cilíndrica que en su interior tiene un condensador cargado que se va descargando a medida que incide la radiación en él e ioniza el gas de la cámara. La descarga queda registrada en una escala que puede leerse en cualquier momento.

Los dosímetros de lectura directa no son muy precisos ya que las lecturas pueden verse afectadas por la suciedad, la electricidad estática, la humedad y el manejo brusco. Tienen el inconveniente de que los valores máximos de dosis que pueden registrar no suelen ser muy altos. Poseen la ventaja de la inmediatez y facilidad de lectura.

— Dosímetros digitales (figura 4.5.)

Los dosímetros digitales usan generalmente un tubo Geiger-Müller (G.M.) como detector de radiación. En los dosímetros digitales, la salida del tubo se conecta a un circuito de

estado sólido que suministra una lectura digital de la dosis o tasa de radiación gamma. Una señal acústica avisa al portador del dosímetro que se ha superado el umbral de alarma.

Otros equipos de vigilancia personal

Además de los dosímetros personales, que dan la dosis acumulada durante un período de tiempo, otro aspecto importante del chequeo personal es la vigilancia de los individuos que salen de una zona en la que pueden haberse contaminado con material radiactivo. Estos equipos están formados por contadores proporcionales asociados a una escala de medida.

Para llevar a cabo la vigilancia del personal, se pasa la sonda que contiene el detector por todas las partes del cuerpo para detectar la posible presencia de radiactividad. Otros equipos comúnmente utilizados para la vigilancia personal, localizados en las zonas de salida de áreas contaminadas, son los contadores de pies y manos y los pórticos. Estos equipos están formados por un número variable de sondas (de 6 a 30) (figuras 4.6. y 4.7.).

La vigilancia de la contaminación personal interna se realiza con los contadores de radiactividad corporal. Estos equipos van provistos de detectores de NaI (figura 4.8.).

Equipos fijos y portátiles de detección de la radiación

Para la vigilancia de áreas, por ejemplo, los equipos comúnmente utilizados son la cámara de ionización, si los niveles de radiación son altos, y los detectores G.M. y de centelleo si los niveles son bajos. Los contadores proporcionales se utilizan para la detección de neutrones para la medida de la contaminación superficial y para la medida de radiación beta-gamma.

Equipos fijos

Los equipos fijos para radiación gamma y de neutrones se instalan en aquellos puntos en los que pueda haber tales radiaciones. Como regla general, o las cámaras de ionización o los detectores Geiger se utilizan para determinar la radiación gamma. Para medir neutrones térmicos los equipos más utilizados son los contadores proporcionales que utilizan trifluoruro de boro como gas de llenado (figura 4.9.).

Los equipos fijos se utilizan también para determinar la contaminación radiactiva ambiental en diferentes lugares de la planta. El aire pasa continuamente (mediante una bomba) a una tasa uniforme a través de un papel de filtro y se mide la actividad beta y gamma del filtro o con un G.M. o con un detector de centelleo. El filtro puede ser fijo o móvil.

Equipos portátiles

Los equipos portátiles se utilizan para detectar la contaminación de superficies y equipos, de zonas en las que hay trabajadores, y vigilar operaciones en las que se manejan materiales radiactivos.

— Detectores beta-gamma (figuras 4.10., 4.11.)

Los equipos que más se usan para niveles bajos de radiación beta y gamma (menores de $50 \mu\text{Gy/h}$) son los detectores G.M. y los contadores proporcionales. Se utilizan en operaciones de descontaminación y para la vigilancia del personal, ropas, equipos de protección, etc., donde una indicación cualitativa de la actividad es todo lo requerido.

Para niveles muy bajos de radiación gamma (hasta $50 \mu\text{Gy/h}$) se utilizan los detectores de centelleo diseñados para ser insensibles a partículas beta. Para niveles de radiación beta y gamma por encima de $50 \mu\text{Gy/h}$, se utilizan las cámaras de ionización tanto para medidas cualitativas como cuantitativas. Estas cámaras van provistas de una ventana delgada que permite la entrada de radiación gamma y beta y otra gruesa que elimina casi todas las partículas beta.

— Detectores de partículas alfa

Los equipos más utilizados para detectar partículas alfa son las cámaras de ionización con una ventana muy delgada, para que puedan atravesarla las partículas alfa, los detectores de centelleo de sulfuro de zinc y los contadores proporcionales.

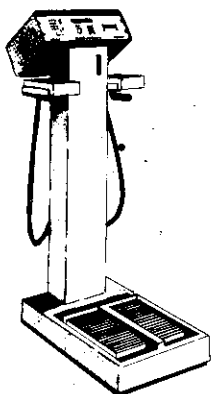


FIGURA 4.6.



FIGURA 4.7.

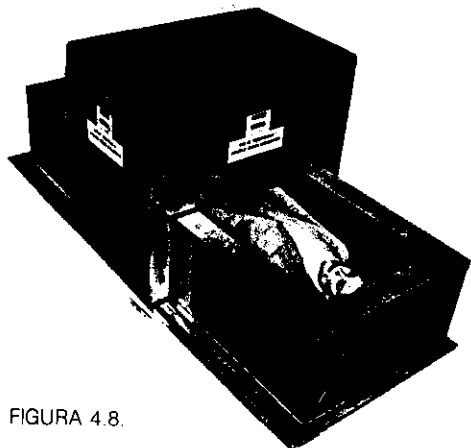


FIGURA 4.8.

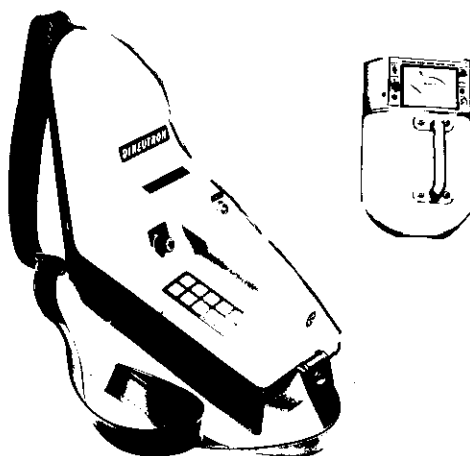


FIGURA 4.9.

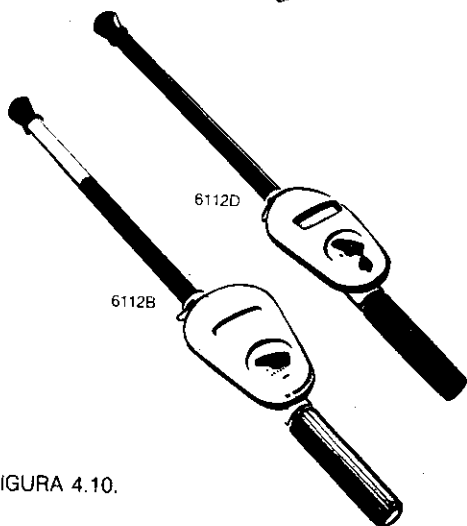


FIGURA 4.10.

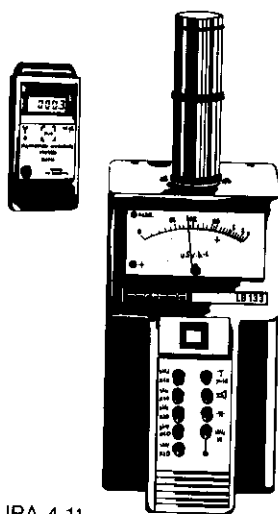


FIGURA 4.11.

TEMA - 5. ASPECTOS SANITARIOS DEL ACCIDENTE NUCLEAR

INTRODUCCION

Un accidente nuclear, capaz de incidir sobre la salud y seguridad de la población, es aquél que da lugar a una emisión incontrolada de radiactividad. Esta emisión, que puede afectar a la población residente en las proximidades de la instalación, es el agente causa del riesgo para las personas y los bienes. Puesto que tal emisión es impredecible, pero no imposible, debemos realizar una planificación previa ante tal eventualidad. Estos planes son los denominados planes de emergencia. En tales planes, se deberá dar cuenta de los medios existentes que permitan: realizar la puesta en marcha de unas contramedidas y unos procedimientos de recuperación, que permitan la vuelta a la normalidad.

Principios básicos de la planificación

De acuerdo con la C.I.P.R., los principios en que debe basarse la planificación de las emergencias son:

- a) Deberían evitarse efectos no estocásticos severos mediante la introducción de contramedidas para limitar la dosis individual a niveles inferiores a los umbrales de estos efectos
- b) El riesgo de efectos estocásticos debería ser limitado introduciendo contramedidas que produzcan un beneficio neto positivo para los individuos implicados.
- c) La incidencia total de los efectos estocásticos debería ser limitada, todo lo razonable mente posible que se pueda, mediante la reducción de la dosis colectiva.

PRINCIPIOS GENERALES

El objetivo del Plan de Emergencia

El objetivo principal de un Plan de Emergencia no es otro que reducir el detrimento ocasionado a los miembros individuales del público por la emisión potencial o real de materiales radiactivos hacia el exterior de la instalación nuclear.

Esta reducción se llevará a cabo tomando una serie de medidas remediales o contramedidas, que pueden tener su propio coste en términos de riesgos sanitarios y costos sociales y que estarán justificadas si se obtiene un beneficio neto positivo de la reducción en exposición a la radiación y en riesgo resultante en costos sociales.

De lo dicho anteriormente, se desprende que una medida adecuada en un caso, puede ser totalmente inadecuada en otro, y además, una medida de cuyo resultado no obtenemos un beneficio positivo claro no deberá ser utilizada puesto que, de un modo genérico, cualquier medida a emplear implica un costo en sí misma.

Plan de Emergencia y medidas a tomar

No podemos emplear las contramedidas adecuadas a cada situación sin una coordinación correcta entre ellas, sin una velocidad en su aplicación que permita obtener la mayor eficiencia en su aplicación, sin unos medios que permitan una evaluación, inicial y apropiada a la situación y sin unos medios que sean capaces de ejecutar dichas contramedidas.

En conclusión, todas las medidas de protección, sanitarias o no, que puedan tomarse en un accidente, deberían formar parte de un completo Plan de Emergencia. Este Plan de Emergencia, fundamentado en los principios antes citados, debería basarse en el estudio de las emisiones radiactivas procedentes del accidente. No obstante, el plan deberá

ser lo suficientemente flexible para permitir su adaptación a la situación real, puesto que esta suele ser distinta del accidente teóricamente previsto.

De modo que, se ve como evidente la existencia de un plan, con sus correspondientes procedimientos escritos, que opere en la propia instalación donde comienza el accidente, y en nuestro país tal plan es el llamado Plan de Emergencia Interior, del cual es responsable la instalación, y otro que opere fuera de la misma, con sus correspondientes procedimientos escritos, éste es el llamado Plan de Emergencia Exterior, del cual es responsable Protección Civil, y ambos forman el Plan de Emergencia Integrado.

Cualquier accidente producido en una instalación nuclear puede ser dividido en fases sucesivas, que dependen de varios criterios: cronológicos, según la magnitud de los riesgos a la población, según los tipos de contramedidas, que pueden tomarse, especiales, etc.

Desde un punto de vista cronológico el accidente puede dividirse en tres períodos o fases:

— Fase inicial, que va desde el comienzo de la posibilidad de emisión a las primeras horas después de su comienzo.

— Fase intermedia, que comienza a las pocas horas del inicio del accidente y puede durar uno o más días. En esta fase se presume que ya se ha producido en la fase anterior la mayor parte de la emisión y la radiactividad está normalmente en el terreno.

— Fase final, en la que, se toman las decisiones relacionadas con la vuelta a la normalidad, y que puede extenderse durante un largo período de tiempo.

Las medidas de dosis significativas, esto es, la dosimetría a utilizar como indicador, es la que está más fácilmente relacionada con los efectos a predecir o con las medidas a tomar.

Para los efectos no estocásticos, la magnitud que permite una descripción más adecuada del riesgo es la Dosis Absorbida de irradiación global o de la parte expuesta.

Para los efectos estocásticos del individuo, la Dosis Equivalente es una descripción satisfactoria, una vez que los niveles de dosis han alcanzado el punto en que se considera la aplicación de contramedidas.

Estas son las magnitudes más adecuadas para las fases inicial e intermedia.

Para la evaluación de las medidas a aplicar en la fase final, la magnitud de interés es la Dosis Colectiva. La evaluación de tales dosis colectivas se hará en áreas limitadas, tales como aquellas en las que se aplicarán contramedidas del tipo de descontaminación de terrenos y edificios.

Niveles de intervención

Los puntos en los que han de tomarse las medidas en cada fase temporal reciben el nombre de niveles de intervención. La magnitud a considerar para establecer los niveles de intervención es la Dosis Proyectada (que es la dosis (absorbida, equivalente, colectiva) que se recibiría si no fuesen tomadas las contramedidas) y tal dosis proyectada es la recibida por el grupo crítico (conjunto de personas que reciben una dosis superior a la del resto de la población, debido a su ubicación, metabolismo, edad, forma o hábitos de vida. A efectos sanitarios se incluye en éstas todo tipo de impedidos o enfermos que necesiten apoyo de otras personas para su atención personal). Pueden obtenerse valores derivados de los anteriores expresados como, por ejemplo, concentración de actividad en agua o alimentos, concentración de actividad en aire, etc. y que permitan una operatividad mayor.

La información a la población

La OMS recomienda que la población sea informada de la existencia y aspectos básicos del Plan, y de las instrucciones claras y sencillas que éste prevé sean impartidas a la po-

blación. Si se informa a la población local, dice la OMS, esta puede, en general, reaccionar mejor lógicamente cuando se enfrenta a un suceso peligroso.

Si un accidente se produce es necesario que la información al público sea lo más rápida posible, de modo que puedan tomarse, inmediatamente, las medidas de mayor urgencia. Por lo tanto, debería darse tan pronto como sea posible, al público implicado en cualquier contramedida, una explicación lo más extensa posible de las acciones tomadas por su protección.

LA TOMA DE DECISIONES

La decisión de realización de las distintas contramedidas es según la fase del accidente en que nos encontremos.

Fase inicial

En esta fase hay intervalos temporales de particular importancia:

- El período entre el instante de la detección del accidente, en la instalación y el instante del comienzo de la emisión radiactiva al medio ambiente.
- El período de alerta que es el período entre el conocimiento de un accidente inminente, que tiene el potencial de una exposición del público fuera del emplazamiento, y la emisión.
- La duración de la emisión.

El intervalo de tiempo entre la detección del comienzo de la secuencia del accidente y la emisión del material radiactivo, es muy importante; si es corto, no podrán tomarse contramedidas; si es largo, tendremos un período de tiempo en el que podremos tomar contramedidas de carácter preventivo.

En este período, son vitales los parámetros meteorológicos y la evaluación rápida de la posible emisión. Si tenemos una buena evaluación, las medidas a aplicar básicamente serán la evacuación total o de grupos críticos, el confinamiento en sus domicilios y la profilaxis radiactiva. Pueden realizarse también medidas de otro tipo como el control de la presión lo que permite una supervisión eficaz de la zona afectada.

Cuando se produce la emisión de material radiactivo al exterior, hay una serie de parámetros que deben conocerse para permitir una toma de decisiones correcta. Tales son: la duración posible de la emisión, la velocidad de la emisión (lenta o rápida), si ésta es controlada, su composición fisicoquímica y las condiciones meteorológicas. Si la emisión es lenta, pueden producirse cambios de viento en dirección y velocidad que habrán de ser tenidos en cuenta, pues podrían producirse cambios en los valores de las dosis que pueden afectar a grupos de personas distintas de los inicialmente previstos. También es interesante, saber si la emisión será avisada o no. Además de estos parámetros hay dos parámetros que incidirán especialmente en las dosis potenciales al público (dosis proyectadas): la altura de emisión, dependerá de que la fuente de emisión esté bien definida (por ej.: chimenea de la instalación) o no, y la flotabilidad del penacho, depende de la temperatura del mismo.

Conocidos estos parámetros, los riesgos principales a tener en cuenta en esta fase inicial desde el punto de vista radiológico, son el riesgo de irradiación externa directa debida a la instalación, la irradiación externa directa debida al penacho, a las deposiciones potenciales sobre el terreno, sobre las ropas, piel, etc. y riesgo de contaminación interna por inhalación del material radiactivo del penacho (o procedente del penacho).

La información básica en esta fase inicial es la procedente de la instalación nuclear, de modo que, en el Plan de Emergencia de la instalación deberá tenerse prevista la notificación a las autoridades de evaluación y toma de decisiones, de toda la información necesaria.

Esta comunicación deberá mantenerse durante todo el accidente. La información suministrada no sólo incluirá los parámetros y datos técnicos, sino también, las incidencias debidas al desarrollo del accidente en la propia instalación, y que puedan ser de interés para la dirección del Plan de Emergencia.

Fase intermedia

Esta fase cubre el período de tiempo que transcurre entre las primeras pocas horas después del comienzo de la emisión, y puede durar uno o más días. En esta fase, se supone que la mayoría de la emisión ya se ha producido, a menos que se produzcan otras emisiones imprevistas y adicionales con lo que no estaríamos de un modo completo en esta fase, cuya característica principal diferenciadora de la anterior es que la radiactividad, que inicialmente estaba en el aire (penacho), está ahora, en su mayor parte sobre el terreno, contaminándose así todo el ecosistema.

En esta segunda fase, los métodos de vigilancia ambiental estarán, total o casi totalmente y de un modo gradual, ya disponibles. Estos resultados, junto con las predicciones de futuras emisiones, nos confirmarán o modificarán las contramedidas implantadas y, nos indicarán la conveniencia o no de nuevas contramedidas.

Durante esta fase intermedia, la población puede verse sometida a varios riesgos radiológicos: irradiación externa debido a la contaminación de las superficies (suelos, paredes, tejados, piel, vestidos, etc.), contaminación interna procedente de la ingestión de agua y alimentos contaminados directa o indirectamente, y de la inhalación del material radiactivo resuspendido de las áreas contaminadas, tales como la tierra, las carreteras y los edificios.

Como hemos dicho, la base de toma de decisiones en esta fase es la vigilancia radiológica ambiental. En las zonas en que el riesgo de irradiación externa por contaminación superficial sea muy elevado (tales zonas estarán normalmente muy próximas a la planta o en aquellos lugares en que la lluvia haya depositado demasiado material radiactivo (deposición húmeda)) podría ser necesaria una rápida evacuación si las tasas de dosis fueran muy altas. A niveles más bajos de dosis, habrá más tiempo para establecer las tasas de dosis y las dosis proyectadas (durante toda la vida esperada), teniendo en cuenta las medidas de descontaminación posible y el efecto natural de la erosión debida a los agentes atmosféricos, antes de decidir si hay necesidad de reubicar grupos de población para evitar mayores exposiciones. En esta fase también debe considerarse la introducción de restricciones en la venta y consumo de alimentos producidos en áreas contaminadas. Las decisiones se basarán en la facilidad de asegurar suministros alternativos de alimentos y agua. Si tales suministros alternativos son seguros, es previsible que sean pequeñas las resistencias a la prohibición del uso de tales alimentos, y que supongan además, un gran logro para la tranquilidad pública.

Las medidas aplicadas en esta fase pueden tener el ámbito geográfico y demográfico de las de la fase anterior, y lo mismo diremos de las de la fase siguiente.

Fase final

En la fase final, los problemas de toma de decisiones están asociados con el retorno a la normalidad. Esta fase puede durar desde unas semanas a varios años después del accidente.

El riesgo para la población se centra básicamente en el consumo de alimentos contaminados y en la irradiación externa debida al medio ambiente contaminado. Los parámetros a evaluar son los procedentes de la vigilancia ambiental, que pueden usarse para, mediante una relajación progresiva de las contramedidas tomadas en las fases anteriores, alcanzar una situación de normalidad.

En esta fase, que recibe también el nombre de fase de recuperación, las medidas protectoras (sanitarias y socioeconómicas) mantenidas o tomadas se basarán en consideraciones distintas de las utilizadas en las fases anteriores. Por ejemplo, en la primera fase las magnitudes significativas son las dosis individuales proyectadas, que pueden ser recibidas si no se toman las medidas. En esta fase inicial, los miembros del público, para los que puede ser necesario tomar contramedidas rápidas, suelen presentarse en grupos relativamente pequeños y bien definidos, y aunque el principal aporte a las dosis colectivas proyectadas puede deberse a dosis de bajo nivel de grandes colectivos, que viven más lejos de la central nuclear, puede que tomar medidas al respecto sea indeseable o impracticable. Sin embargo, en esta fase final o de recuperación, las magnitudes a evaluar que permitan establecer los criterios de dosis individual, que sean la base de la toma de decisiones mediante el análisis costo-beneficio, son cantidades de dosis como la dosis colectiva. De modo que las tasas de dosis y la esperanza de vida de las personas que retornen y recomiencen sus vidas en las zonas contaminadas debieran ser tenidas en cuenta, así como, la efectividad de las medidas de descontaminación y la importancia de las actividades a desarrollar en dichas áreas.

EVALUACION DE LA EXPOSICION

Vías de exposición

Las principales vías de exposición son:

- 1) Exposición externa debida al material radiactivo del penacho: la radiación gamma debida a gases nobles, yodos y productos de fisión en forma de partículas, da lugar a una dosis por irradiación externa a todo el cuerpo.
- 2) Exposición interna debida a inhalación de la radiactividad del penacho: la dosis depende de la composición físico-química del penacho.
- 3) Exposición externa debida a la deposición en el suelo de la actividad del penacho.
- 4) Exposición interna por inhalación de los radionucleidos resuspendidos de la actividad depositada anteriormente en el suelo.
- 5) Exposición interna por ingestión de agua y alimentos contaminados.

Podemos asignar su importancia en relación con las distintas fases, así las vías 1.^a, 2.^a y 3.^a son más importantes en la primera fase, la 1.^a, 2.^a, 3.^a y 4.^a lo son en la siguiente fase y la 4.^a y 5.^a lo son en la fase final. Pero la importancia relativa puede depender de muchos factores físico-químicos, condiciones meteorológicas, mecanismos de transferencia en los suelos, etc.

Niveles de exposición

Las evaluaciones teóricas de la exposición, esto es la predicción de dosis debidas al accidente se basa en dos métodos complementarios, el primero es un cálculo teórico de la cantidad y naturaleza de la emisión radiactiva durante la fase inicial del accidente, mientras que el segundo utiliza los resultados de las medidas tomadas en la instalación hechas en los instantes iniciales de la emisión al medio ambiente.

En el primer caso, conocidos los datos iniciales de la instalación que incluyen datos sobre la naturaleza de la emisión (véase Tabla 5.1.) y datos meteorológicos, se calculan las dosis mediante la utilización de modelos atmosféricos e hidrológicos de dispersión de los contaminantes. Tales dosis rápidamente estimadas son los parámetros imprescindibles para permitir la toma de decisión.

Tan pronto como comienza la emisión, es posible vigilar los niveles de actividad ambiental en el entorno de la instalación. Los resultados obtenidos confirmarán o modificarán las hipótesis teóricas en las evaluaciones teóricas antes citadas y realizadas en la fase inicial de accidente. Las muestras del plan de vigilancia ambiental comprenden desde toma de muestras del penacho, dosimetría en puntos dados a lo largo de la ruta del mismo, en la fase inicial, pasando por el muestreo de contaminación en el terreno, las aguas, las personas, y la medida de la tasa de dosis, así como el análisis de todas estas muestras. Este muestreo se extiende a los alimentos de origen vegetal y animal, obteniendo muestras antes y después de la aplicación de las contramedidas para hacer posible una evaluación del detrimento a la población.

EVALUACION DE LOS EFECTOS DE LA EXPOSICION

Como veremos en el capítulo siguiente hay tres tipos de efectos que deben ser considerados: efectos somáticos tempranos y crónicos, efectos somáticos retardados y efectos genéticos.

La radiación puede producir efectos inmediatos o retardados según el nivel de la dosis. Los efectos inmediatos resultantes de una irradiación aguda a altas dosis aparecen a unos días o semanas de la exposición. En cambio, los efectos retardados pueden aparecer muchos años después de la exposición. Puede haber varios efectos a largo plazo sobre una población expuesta a la radiación, tales efectos incluyen la incidencia de enfermedades neoplásicas, fatales o no, y de nódulos tiroideos benignos. También hay la probabilidad de desarrollos fetales anormales y anomalías hereditarias.

La CIPR ha clasificado los efectos para la salud en dos categorías: estocásticos y no estocásticos. Aunque tales efectos serán expuestos en el capítulo siguiente, de forma detallada es importante advertir que las características que los diferencian es que para los estocásticos no hay un valor de dosis umbral y su probabilidad aumenta con la dosis, mientras que para los no estocásticos hay un valor umbral de dosis por debajo del cual no se producen tales efectos y que la severidad de ese efecto es proporcional a la dosis.

Después de un accidente nuclear grave, pudieran observarse dosis suficientemente elevadas para producir efectos no estocásticos. Tales dosis serían debidas a exposición externa al penacho y a depósitos en el terreno y/o a exposición interna por inhalación de materiales radiactivos.

Con objeto de evitar estos efectos no estocásticos deberán, al menos durante la fase inicial del accidente, tomarse las decisiones de ejecución de contramedidas adecuadas.

Efectos no estocásticos

Los efectos no estocásticos en caso de accidentes son los de medio y corto plazo. Pueden aparecer en cualquier órgano o tejido irradiado. El tipo de respuesta biológica y la dosis umbral depende del órgano o tejido. Los órganos o tejidos principales que pueden ser afectados por riesgos no estocásticos son: médula ósea, pulmón, tiroides y piel. Como se verá el daño radiológico a la médula ósea podría ser probablemente el efecto de mayor importancia dado el inventario de radionucleidos que pueden ser probablemente emitidos en caso de un accidente de un reactor de agua ligera. Otros efectos que pueden aparecer son, efectos sobre el tracto gastrointestinal, muerte prenatal, hipotiroidismo, esterilidad temporal, cataratas y retraso en el crecimiento.

Puesto que los efectos no estocásticos son observados únicamente a altas dosis recibidas a tasas elevadas, esto ocurrirá únicamente después de accidentes severos y personas que vivan en la vecindad inmediata de la central pueden ser afectadas. evaluar la importancia del factor tiempo en la duración de la exposición pueden usar los datos utilizados en radioterapia sobre fraccionamiento de la exposición. La magnitud dosimétrica para estimar el riesgo no estocástico es la dosis absorbida.

Si la exposición es global, esto es, a cuerpo entero, la prognosis está directamente relacionada con la dosis recibida por el sistema hematopoyético (médula ósea) que veremos es uno de los tejidos más sensibles. La dosis capaz de producir la muerte en el 50% de los individuos expuestos en 60 días ($DL_{50/60}$ d) sin tratamiento médico se ha estimado entre 3 y 5 Gy, cuando la dosis es uniforme. Para una única exposición global el riesgo de mortalidad comienza alrededor de los 2 Gy; la DL_{90} está en los 5 Gy puesto que no hay tratamiento ni otras complicaciones. Alrededor de la DL_{50} los síntomas clínicos son siempre severos; la prognosis se basa principalmente en el tiempo de aparición de los síntomas clínicos y en la seriedad y rapidez de aparición de los trastornos sanguíneos. Víctimas de accidentes de irradiación han sobrevivido después de exposición a valores superiores al $DL_{50/60}$ d, pero sólo cuando han sido tratadas intensivamente.

El pulmón es el órgano más sensible del torax. A pesar de sus grandes reservas funcionales, sus tejidos tienen una probabilidad muy baja de regeneración después de una dosis elevada de células. Se ha estimado una dosis umbral para daño no mortal de unos 5 Gy, y que la dosis de 50% de probabilidad fatal es de 10 Gy. En todos los casos las curvas efecto-dosis muestran pendientes agudas. Neumonía por radiación aparece semanas o meses después de la exposición. Es este un fenómeno complejo, que incluye edema, muerte celular, descamación, exudado de fibrina en los alveolos, engrosamiento fibroso de los septum pulmonares y cambios proliferativos de los capilares sanguíneos. El principal efecto no fatal que aparece es la fibrosis pulmonar, que resulta principalmente del daño y respuesta de la vascularidad fina (capilares, arteriolas y vénulas) y de tejidos conectivos.

Después de un accidente nuclear, la exposición del pulmón puede considerarse casi uniforme a través del órgano completo. El estado funcional del pulmón también contribuye a la marcada variabilidad en el desarrollo de lesiones agudas.

El riesgo de muerte debido a la exposición del pulmón se supone que comienza a nivel próximo a los 15 Gy a todo el órgano, la respuesta del 50% es alrededor de los 20 Gy.

El tiroides no es considerado un órgano especialmente sensible a los efectos agudos de la radiación. Cuando los isótopos de yodo son inhalados o ingeridos se acumulan rápidamente en el tiroides y son metabolizados como compuestos orgánicos de yodo que pueden residir en el órgano bastante tiempo como para producir un daño local.

La ablación total de la glándula en un período corto (dos semanas) se consigue con dosis de unos 300 Gy, que puede alcanzarse con una incorporación única de unas pocas decenas de MBq/g del órgano. Dosis de irradiación externa del tiroides de aproximadamente 10 Gy son necesarias para inducir el hipotiroidismo. El mixoedema puede aparecer con dosis de unos 30 Gy.

Después de un accidente nuclear la piel puede ser expuesta, directa o indirectamente a los depósitos del penacho, depositados sobre la piel y los vestidos, o a depósitos de actividad en el terreno. La piel puede ser únicamente de modo parcial si está protegida con la ropa. Para dosis entre 3 y 8 Gy aparece el eritema; cuando la dosis es fraccionada aparece para dosis de 50 Gy en seis semanas. La radiodermatitis exudativa aparece con dosis de 12 a 20 Gy.

La dosis DL50 para embriones varía según el estado de gestación, menor de 1 Gy el primer día de gestación, 2 Gy después de un mes y de 3 a 4 Gy en las últimas etapas. No hay evidencia de efectos teratogénicos para dosis agudas inferiores a 100 mGy durante el primer período de gestación.

Efectos estocásticos

Estos efectos pueden ser somáticos o genéticos. Los cánceres y la leucemia son los efectos estocásticos somáticos para los que se obtiene el factor de riesgo de los estudios epidemiológicos humanos (supervivientes de Hiroshima y Nagasaki, enfermos tratados de espondilitis anquilosante, pintores de esferas luminosas). Los factores de riesgo recomendados por el CIPR que se ven en la tabla siguiente dan el riesgo de cánceres y leucemias fatales, y el riesgo de efectos hereditarios para las dos primeras generaciones después de la del individuo expuesto.

TABLA - 5.2.

Factores de riesgo recomendados por la CIPR (Publicación 26)

Tejido en riesgo	Riesgo (por Gy)
Gónadas	4 x 10 ⁻³
Mama	2,5 x 10 ⁻³
Médula ósea roja	2 x 10 ⁻³
Pulmón	2 x 10 ⁻³
Tiroides	0,5 x 10 ⁻³
Hueso	0,5 x 10 ⁻³
Resto del organismo	5 x 10 ⁻³
TOTAL	1,65 x 10⁻²

Pero estos factores han sido definidos para fines de Protección Radiológica en condiciones de exposición encontradas en operaciones normales y son promedios sobre todas las edades y los dos sexos por lo que realmente pueden ser sustancialmente mayores en algunos grupos de edad y según el sexo. Por ejemplo, el riesgo de cáncer de tiroides parece ser 2 ó 3 veces mayor en la mujer que en el hombre y también es mayor el cáncer de mama sobre todo en mujeres jóvenes. También es probable que el riesgo de cáncer fatal aproximadamente dos o más veces mayor que la media en caso de irradiación "in utero" y en la etapa inicial de la niñez.

De modo que desde el punto de vista de los riesgos estocásticos, en caso de accidente nuclear, los principales órganos a considerar son el pulmón y el tiroides, seguidos de la médula ósea roja y del hueso.

Los factores de riesgo son conocidos para los cánceres fatales pero para expresar el detrimento total a la salud es necesario evaluar la incidencia de los cánceres no fatales.

Es interesante hacer notar que del grupo de personas con una baja incorporación de yodo tienen una mayor incidencia de cánceres de tiroides que las de incorporación normal.

Para estos efectos estocásticos la dosis equivalente es la magnitud para expresar el riesgo.

LA ELECCION DE LAS CONTRAMEDIDAS

Tipos de contramedidas

Las contramedidas deben ser apropiadas a la naturaleza del riesgo, deben aplicarse en el momento adecuado y deben ser lo suficientemente flexibles para adaptarse a la situación.

Las diez medidas disponibles en caso de accidente son:

- Refugio (o confinamiento)
- Profilaxis radioprotectora
- Protección respiratoria
- Protección del cuerpo (o vestuario de protección)
- Evacuación
- Descontaminación personal
- Reubicación
- Control de accesos
- Control de alimentos
- Descontaminación de áreas

Cada una de estas medidas es especialmente efectiva para una vía de exposición dada y es más aplicable durante una fase temporal dada. Su posible aplicación en relación a la fase de accidente se ve en la tabla siguiente.

TABLA - 5.3.

Intervalo de aplicabilidad de varias contramedidas

Contramedidas	Fase		
	Inicial	Intermedia	Final
Refugio	+	+	—
Profilaxis radioprotectora.	+	±—	
Protección respiratoria.	+	—	—
Protección del cuerpo	±	± +	—
Evacuación	+	+	—
Descontaminación personal.	±	±	±
Reubicación	—	+	+
Control de accesos	±	+	±
Control de alimentos	—	+	+
Descontaminación de áreas.	—	±	+

+ = Aplicable y posiblemente esencial

± = Aplicable

— = No aplicable o de aplicación limitada

Refugio

El refugio implica mantener a la población en sus casas con las puertas y las ventanas cerradas y parados los equipos de ventilación. Las personas deben permanecer preferiblemente en habitaciones o zonas interiores, y se aplicará, si es necesario, protección respiratoria improvisada. Se darán instrucciones de sintonizar y escuchar programas específicos de radio y/o de televisión, para mantener informada a la población. El refugio es una de las medidas más sencillas desde el punto de vista de su realización y su beneficio, e implica un riesgo pequeño si se realiza en períodos cortos.

El refugio es apropiado para la protección de la irradiación externa desde el penacho y desde la deposición en el terreno, así como contra la inhalación de yodos y aerosoles. Esta medida es capaz de reducir las dosis a los distintos órganos de importancia significativa tales como el pulmón, el tiroides y la piel. Es importante, tener en cuenta dos aspectos significativos en esta medida son el blindaje y el control de la ventilación.

El blindaje es proporcionado por los materiales estructurales del edificio y se expresa como un "factor de blindaje" razón entre la dosis recibida dentro del edificio y la dosis fuera, cuanto menor sea este factor mayor es la protección. Es evidente que la bondad del blindaje depende en gran medida del tipo de edificio: en general, los sótanos de cualquier edificio proporcionan una protección mejor contra radiaciones penetrantes. Otro parámetro importante a la hora de calcular la dosis proyectada (sin refugio) es la fracción de tiempo durante lo que está fuera del refugio la población expuesta.

Cuando se utilizan los factores de blindaje, tanto en el caso de la irradiación debido al penacho como a los depósitos sobre el terreno, se utiliza la hipótesis de que el refugio es completo antes de la llegada del penacho y que los individuos permanecen en sus domicilios o alojamientos, bien hasta que ha concluido el paso del penacho o bien hasta que hayan sido reubicados. En este caso, la exposición será evaluada combinando dos factores de reducción: el factor de blindaje a aplicar mientras que los individuos están en el refugio y el factor de blindaje que puede aplicarse mientras que son reubicados (ver el apartado Reubicación). Ejemplos de factores de reducción se ven en la Tabla 5.4.

TABLA - 5.4.

Factores medios de reducción de dosis contra la radiación del penacho y los depósitos, para tipos distintos de edificaciones (OIEA S.S. N.º 45)

TIPO DE EDIFICIO	FACTOR DE REDUCCION	
	PENACHO	DEPOSITOS
Intemperie (a 1 m del suelo).	1	0,7
Casa de madera	0,9	0,4
Casa de madera, sótanos	0,6	0,05
Casa de ladrillo	0,6	0,2
Casa de ladrillo, sótanos	0,4	0,05
Gran edificio (varios pisos)	0,2	0,02
Gran edificio (sótanos)	—	0,01

Si el control de la ventilación es el apropiado, el refugio puede también servir como protección respiratoria. Para que esta sea efectiva, el refugio debe sincronizarse con el paso del penacho. Los beneficios de la restricción en la ventilación pueden estimarse compa-

rando la fracción de dosis evitada y el número de cambios de aire por hora multiplicado por el tiempo de inmersión en el penacho. No parecen irreales factores de protección del orden de 0,1.

Para que esta medida sea utilizada adecuadamente deberán darse instrucciones a la población no sólo de cerrar las ventanas y puertas al exterior, sino también, para que cierren los ventiladores y acondicionadores de aire que introduzcan aire en el edificio, para apagar todos los fuegos, y cerrar los calentadores y apagar la chimenea. Donde se pueda, se reducirá la ventilación aún más, colocando capas de papel o telas mojadas en las rendijas de puertas y ventanas. Este "sellado" introduce un factor adicional de reducción de la dosis por inhalación. Cuando el penacho haya pasado, y esté suficientemente lejos, y no se teman cambios bruscos de la dirección del viento, deberá aconsejarse a aquellas personas que permanezcan en refugio que abran puertas y ventanas y aumenten en lo posible (extractores de humos de las cocinas) la tasa de salida de aire del edificio, con el propósito de sacar de allí rápidamente la actividad que haya podido introducirse en él, al paso del penacho.

Es importante tener en cuenta que los riesgos y daños asociados a esta medida son pequeños siempre que su duración no sea excesiva. El confinamiento duradero (mayor de 12 horas), puede producir problemas sociales, médicos y otros, así como puede dar lugar a estados de ansiedad debido a las, posiblemente inevitables, incertidumbres sobre el paradero de los distintos miembros de las familias.

Si se ha confinado a la población en sus domicilios, es necesario decidir en un corto plazo, cuando puede ser retirada esta medida, sin pérdida de seguridad o si es necesario ejecutar otra contramedida adicional, tal como la evacuación total o parcial.

Profilaxis radiactiva

La prevención del riesgo de irradiación interna es el objetivo de esta medida. La única intervención que parece ser aplicable a toda una población es la administración de yodo estable para bloquear el depósito de yodo radiactivo por el tiroides. Esta medida es efectiva en caso tanto de inhalación como de ingestión de yodos radiactivos, pero en la práctica, se considera esencialmente como una protección contra la inhalación.

Después de un depósito de I-131, la actividad en el tiroides alcanza el 50% del máximo dentro de aproximadamente 6 horas. Por lo tanto es importante administrar las pastillas de yodo tan pronto como sea posible, a pesar de todas las dificultades propias de esta contramedida.

Las dosis que se recomiendan son dosis únicas para adultos de 100 mg de yodo estable, aunque se han propuesto dosis menores. Los compuestos de uso más extendido son el Yoduro de Potasio (IK) y el Yodato de Potasio (IO_3K); 100 mg de yodo corresponden a 130 mg de IK y a 170 mg de IO_3K . Ambos suprimen de un modo rápido y efectivo el depósito de yodo en el tiroides.

Como dijimos una dosis de 130 mg de IK es capaz de suprimir este depósito, pero también lo hacen dosis de 65 mg de IK aunque el tiempo requerido para una efectividad completa es mucho más largo. Sin embargo, se ha demostrado que estas dosis más bajas son efectivas en niños menores de 1 año de edad. El depósito vuelve a la normalidad aproximadamente una semana después de una dosis única de 100 mg de yodo, aunque si se quiere mantener un bloqueo efectivo es necesario suministrar dosis repetidas de unos 50 mg/día (dosis de yoduro de 100 mg/día durante 10 ó 15 días parecen no constituir peligro para adultos, e incluso para los niños). La administración de yodo estable no debe confirmarse sin motivo. Esta medida es válida a corto plazo, y no debería serlo a un plazo más largo puesto que una exposición prolongada a yodo radiactivo no debería producirse.

Son bien conocidas las reacciones adversas al yodo, y al yoduro potásico, y que está presente en numerosos compuestos farmaceuticos y no farmaceuticos. Las reacciones al IK pueden dividirse en dos grupos: efectos tiroideos y no tiroideos. El índice de reacciones adversas ha sido estimado en 1 por 10 millones de personas y 1 por 1 millón de dosis.

Los efectos tiroideos incluyen:

- Bocio con o sin hipotiroidismo, siendo el más significativo el bocio neonatal.
- Hipertiroidismo como una complicación del depósito elevado de yodo en áreas de bocio endémico; agravamiento de tirotoxicosis que puede ser el resultado de administración a pacientes con nódulos tiroideos de microgramos de IK, produciéndose el síndrome de Jod-Basedow.
- Hipotiroidismo, que es algo inusual en pacientes tratados con yodo, aunque se sabe de una ligera incidencia de 2×10^{-3} ; se ha de tener en cuenta que no se ha informado nunca de mixedema clinicamente significativo después de un depósito único de yoduro.

Los efectos colaterales no tiroideos incluyen:

- Reacciones dermatológicas, con gran variedad de erupciones cutáneas, desde sarpullido suave hasta lesiones acneiformes; individuos que sufren de enfermedades dermatológicas tales como, acné, eczema o soriasis pueden mostrar una agudización; todos los casos registrados implican dosis altas de IK, mucho más altas que las recomendadas para el bloqueo del tiroides.
- Reacciones de hipersensibilidad, que incluyen fiebre, artralgia y eosinofilia; deberían ser identificados aquellos individuos que puedan tener tal riesgo.
- Otros efectos tales como paperas de yoduro (hinchazón dolorosa), conjuntivitis, náuseas, vomitos y diarrea.

Estos efectos colaterales se producen en casi todos los casos de administración crónica diaria de yodo, mucho mayor de la recomendada en emergencias radiológicas. Su uso como una contramedida apropiada a corto plazo es válido pero algunos grupos de población requieren una atención especial. Estos grupos son:

- Mujeres embarazadas, puesto que ya están en riesgo y puesto que hay una implicación especial para el feto. Sin embargo, el embarazo no debería ser visto como un problema a la hora de usar dosis únicas de yodo estable.
- Fetos, puesto que parece ser que la incorporación materna del yodo puede conducir a altas concentraciones en el tiroides fetal. Por otra parte, el bloqueo del tiroides es tan efectivo para el feto como para la madre.
- Neonatos, debido a que el depósito de yodo en el tiroides neonatal es significativamente mayor que en el adulto. Además, puesto que el yodo se concentra en la leche materna, la lactancia materna del neonato, puede ser un riesgo mayor de exposición. Según la información disponible en la actualidad no parece, sin embargo, razonable recomendar ninguna alteración del tratamiento con yodo estable, especialmente cuando se considera el alto riesgo de efectos deletéreos, debidos al yodo radiactivo, para el neonato.
- Niños, que pueden tener un riesgo mayor que los adultos puesto que es mayor el depósito por gramo en el tejido y el tejido inmaduro puede ser más susceptible de desarrollar tumores.

Debería ser posible la identificación de individuos susceptibles de sufrir patología severa de este tipo de tratamiento preventivo. Por otra parte, debe ser posible también asegurar

que la población susceptible de recibir una exposición excesiva en el tiroides tuviera acceso a tratamiento con yodo estable. Por lo tanto, y para lograr una efectividad adecuada, es necesaria la planificación de la distribución del yodo estable. Esta planificación debe incluir:

- Procedimientos de distribución rápida del específico empleado para asegurar que los individuos dispongan de él un poco antes de que comience la exposición.
- Previsiones de suministro.
- Modos de información a la población de la conveniencia del consumo y del modo de realizarlo.
- Planes de renovación de los stocks (la "vida útil" del IK es del orden de 2 años, mientras que la del IO_3K es de unos 10 años).

Donde se haya realizado la distribución puede ser necesario dar consejo médico sobre la posibilidad de efectos colaterales, y potenciar la necesidad de mantener contacto médico y proporcionar únicamente una dosis por persona.

Si la evacuación se realiza rápidamente, puede ser innecesario el uso de yodo estable. La evacuación debería ser la medida de mayor efectividad para evitar la exposición del tiroides, y es de particular interés para aquellos grupos de personas de más alto riesgo (grupos críticos: mujeres embarazadas, recién nacidos, etc.). Pero, sólo puede usarse si hay suficiente tiempo de alerta en caso de emisiones de yodo radiactivo, el bloqueo del tiroides proporciona protección sólo contra el yodo radiactivo y es inútil contra la irradiación externa de la glándula. Es necesario sopesarlo respecto a la efectividad y costos de otras contramedidas, tales como, refugio, protección respiratoria y evacuación.

Protección respiratoria

La protección respiratoria puede ser realizada mediante el uso de objetos sencillos tales como pañuelos de tela o de papel, trapos de cocina, toallas, ropas y otros medios que permitan cubrir la boca y las ventanas de la nariz. La eficacia protectora de estos materiales puede ser potenciada humedeciéndolos; por ejemplo, los tejidos secos son menos efectivos en el filtrado de yodo que los tejidos húmedos. Se ha visto que tejidos de algodón que han sido probados para ver su capacidad de filtrado de aerosoles, gases y vapores (incluyendo I_2 y CH_3I) disminuyen la concentración en un factor 10 o más cuando los tamaños de las partículas van desde $0,4 \mu\text{m}$ a $5 \mu\text{m}$ de diámetro. La protección respiratoria debería ser usada por las personas cuando vayan a sus refugios, posiblemente durante el tiempo de estancia en los mismos, si esta medida no es prolongada durante mucho tiempo, y ciertamente durante la evacuación mientras que esté el penacho en el aire.

La utilización de sistemas más sofisticados, tales como máscaras y sistemas de respiración autónomos, si no es posible para el público si puede serlo para grupos especiales implicados en operaciones de emergencia, tales como equipos de rescate, policía, bomberos, quienes deberían estar entrenados en su uso.

Protección del cuerpo

Para evitar la deposición y absorción de materiales radiactivos es necesaria la protección de piel y cabellos. Esto puede hacerse con todo tipo de ropas, incluyendo sombreros, capuchas, impermeables, anoraks, guantes y botas. Debería ser utilizado mientras las personas van hacia los refugios y durante la evacuación de un área contaminada. También debería usarse cuando la evacuación no puede ser evitada y todavía está el penacho en el aire.

El uso de ropa protectora o vestuario de protección más sofisticado debería ser restringido al personal implicado en operaciones de emergencia. Puesto que esto sólo implicará a pequeños grupos especializados, su costo será relativamente pequeño y los riesgos asociados despreciables.

Evacuación

La evacuación es el movimiento urgente de personas para evitar o reducir su exposición. La evacuación es apropiada para la protección contra la exposición externa debida al penacho y a la deposición sobre el terreno y también, contra la exposición interna por inhalación de radionucleidos en el aire. Esta medida es la que implica un mayor quebranto de la normalidad y la más difícil de ejecutar; por lo tanto únicamente debe ser aplicada cuando sea absolutamente necesaria, por ejemplo para evitar la acumulación a corto plazo de dosis que produzcan efectos no estocásticos y, en la medida de lo posible, únicamente para pequeños grupos de personas de la inmediata vecindad de la instalación nuclear. Cuando hay grandes poblaciones próximas a ella, la evacuación se hace más difícil. En cualquier caso, será preparado inicialmente el refugio, lo que permite tener a la población bajo control.

La evacuación es más practicable en la fase inicial del accidente si se realiza con pequeños grupos próximos al emplazamiento y permite una protección completa frente al penacho si hay tiempo de alerta suficiente antes de la emisión. Si la evacuación se realiza en un momento inadecuado podría producirse el paso de las personas a través del penacho (si éste está ya casi en el suelo) y por consiguiente, la exposición de las mismas a dosis superiores a las que habrían sido dadas por la opción de refugio. La evacuación puede ser efectiva en la fase intermedia, si fuera o no introducido el refugio como un método de reducción de la dosis de los depósitos.

La dificultad principal, en el momento de decidir que grupos de población deberían ser o no evacuados y consiste en sopesar los riesgos asociados a la exposición potencial frente al riesgo implicado por la propia evacuación.

El primero implica errores inevitables a causa de las incertidumbres asociadas a la evolución del accidente, a la importancia y naturaleza de las fuentes y a la posible variación de las condiciones meteorológicas (tales como ráfagas de viento y el comienzo de lluvia o nieve). Los parámetros a considerar son variados y de importancia desigual:

- Características del accidente mismo.
- Condiciones sociodemográficas: número de personas a evacuar, su distribución de edades, la presencia y número de disminuidos físicos o psíquicos, enfermos, postrados en cama y la existencia y densidad de instalaciones que presenten dificultades específicas, tales como industrias, hospitales, clínicas de maternidad y asilos de ancianos.
- Condiciones meteorológicas.
- La hora del día en que será dada la alerta.
- Las condiciones geográficas, tales como la existencia o no de carreteras o vías del ferrocarril adecuadas para la evacuación.
- La disponibilidad de centros de reubicación para la población evacuada que debería ser ubicada de un modo geográfico adecuado.

Aunque la experiencia en la evacuación de grandes grupos es limitada, es posible realizar un resumen de la posibilidad y rapidez de su realización. La experiencia de otros países, tales como Norte América (USA, Canadá) sugiere que los riesgos asociados con la evacuación son bajos, aunque esto puede no ser aplicable a la situación de otros países. Se ha visto que es peligroso el uso de datos normales de tráfico por carretera para evaluar los riesgos de evacuación, puesto que las condiciones de conducción y el comportamiento de los conductores son bastante distintos. El riesgo para la salud relacionado con los accidentes de tráfico puede ser minimizado si la evacuación está bien organizada. También tienen que ser considerados otros riesgos para la salud, especialmente los relativos a la evacuación de grupos específicos tales como pacientes de hospitales y clínicas

(incluyendo pacientes con trastornos psiquiátricos) y presos. Las consecuencias socioeconómicas necesitarían ser cuantificadas sobre la base de las condiciones regionales dadas.

Además, si se quiere hacer una evaluación completa de esta medida debe evaluarse también el riesgo propio del retorno de la población a las áreas de las que fue evacuada. Este riesgo parece mucho menor que el asociado a la evacuación, puesto que la vuelta a casa puede hacerse en mejores condiciones, puede realizarse de modo escalonado y bien planificado. La evacuación deberá ser realizada usando transporte público y debe de desanimarse la autoevacuación del público en todo lo posible. La evacuación debería ser bien planificada, sector por sector, para evitar congestiones del tráfico. Muchas personas pueden rehusar a ser evacuadas, lo que producirá confusión. Debe haber un cuidado especial en no separar las familias. Se ha recomendado a veces, que sean evacuados únicamente pequeños grupos de población, tales como mujeres embarazadas, escolares y pacientes de hospitales, siendo el criterio discriminador el riesgo más alto a la radiación. Esta decisión debe ser evitada en lo posible, puesto que menudo dará lugar a la confusión del público y a veces al pánico, y siempre parecerá irracional al público.

Las consideraciones sociales y económicas de la evacuación son muy importantes a la hora de toma de decisiones. Los costos sociales son muy distintos según que los centros de población implicados sean rurales, agrícolas, urbanos, industriales o áreas residenciales.

Otro problema ligado a la decisión de evacuación es la dificultad en la elección de los criterios de reentrada al área evacuada. Es necesario identificar con prontitud las áreas afectadas por deposición residual de bajo nivel en el terreno.

Debería también tenerse muy presente que la reentrada en el área evacuada puede crear grandes problemas psicológicos.

Descontaminación personal

Si se detecta o sospecha una contaminación en la piel es necesaria la descontaminación de la persona afectada. En general, las instalaciones adecuadas para ello son instalaciones de aseo. Si hay un gran número de personas afectadas y no hay aseos suficientes, podría bastar una cuidadosa retirada de las ropas exteriores seguido por el lavado de las manos, la cara y probablemente el cabello. La descontaminación personal puede ser de primera importancia para aquellas personas que estuvieron a la intemperie bajo el penacho, ya que la contaminación de la piel y, especialmente, del cabello puede dar lugar a una dosis elevada. Sin embargo, esta medida no debe ser considerada como una alternativa a ninguna otra contramedida, tal como la evacuación.

Reubicación

Se define reubicación como la remoción progresiva de grupos de personas bajo condiciones de menor urgencia que las requeridas para una evacuación. Se usa cuando la exposición puede conducir a altas dosis acumuladas después de que haya terminado la emisión y hay una irradiación externa debida a los depósitos de material radiactivo sobre el terreno. En caso de accidentes en los que se requiera que tanto la evacuación como la reubicación sean llevadas a cabo en el interior de dos áreas concéntricas, tales medidas deben ser bien coordinadas para garantizar la equidad en la gestión de la salud pública de los dos grupos de personas durante la fase de reentrada.

Esto es especialmente importante por lo que, en la mayoría de los casos, se tardará un cierto tiempo en determinar las áreas afectadas e iniciar la reubicación. La evaluación de dosis de reubicación, tendrá que ser combinada con la de refugio, ya que las poblaciones serán reubicadas después de que hayan estado en refugio.

Control de accesos

Esta medida se realiza para evitar que aumente el número de personas afectadas por el accidente y para minimizar las interferencias en las operaciones de emergencia en las áreas afectadas en la fase inicial del accidente. A largo plazo, el control de accesos puede aún ser necesario si hay áreas de un nivel significativo de contaminación del suelo. Otra ventaja de esta contramedida es que impide el tránsito de artículos, que puedan estar contaminados, a áreas "limpias", lo que puede ocurrir en las últimas fases del accidente. Las dificultades de esta medida son las relativas a su cumplimiento. Para realizarla es muy importante una coordinación de las autoridades responsables.

Control de alimentos

Esta contramedida puede incluir la prohibición o restricción del consumo de ciertos alimentos, tales como leche, vegetales y agua. Después de una emisión atmosférica es improbable que el agua sea contaminada de tal modo que sea necesario prohibir su consumo. Si existen reservorios a cielo abierto (lagos, embalses, etc.) debería comprobarse si su agua es adecuada. Si se usan para consumo animal debe asegurarse que no afecten indirectamente a los seres humanos. Alimentos tales como la leche y productos lácteos pueden ser acondicionados para uso retardado. Los alimentos contaminados no deberían ser diluidos mediante mezcla con alimentos no contaminados, incluso aunque el riesgo asociado con el alimento resultante sea mínimo, pues es improbable que sea aceptado por el consumidor.

En el caso del ganado, la contaminación de su carne y productos lácteos puede ser reducida si son alimentados con pienso almacenado y evitado, lo más rápidamente posible, la contaminación del pasto.

Descontaminación de áreas

La descontaminación de las áreas puede consistir en el lavado o aspiración en carreteras, superficies de edificios y equipos, está bien arado del terreno cultivable, remoción de las capas superficiales de suelo o fijando la contaminación.

Esta contramedida es aplicable normalmente en las últimas etapas del accidente para reducir la irradiación externa de la actividad en el suelo y la irradiación interna de la inhalación de la actividad resuspendida del suelo al aire.

Los problemas asociados a esta contramedida son su elevado costo y la producción de grandes cantidades de residuos radiactivos que tienen que ser evacuados. La descontaminación de edificios y carreteras puede dar lugar a una variedad de problemas difíciles y las condiciones meteorológicas pueden afectar a su eficiencia y realización.

Criterios de elección (Ver Tabla 5.5.)

Los factores que afectan la selección de una contramedida son:

- La fase temporal del accidente en que se toma la selección.
- La magnitud de la emisión.
- La composición de la emisión.
- Las condiciones predominantes en ese momento.
- Las vías de exposición asociadas a cada una de las fuentes.

TABLA - 5.5.

Escenarios más probables y las contramedidas más apropiadas

Fase del accidente	Tipo de emisión	Componente de la emisión	Fuente de exposición	Vía principal de exposición	Riesgo a controlar	Contramedida principal a usar
Inicial	Variable	Variable	Contención del reactor	Irradiación Externa Global	Individual estocástico y no estocástico	Evacuación
Inicial	Inmediata y corta	Gases nobles	Penacho	Irradiación Externa Global	Idem anterior	Refugio (primera prioridad)
Inicial	Inmediata y corta	Yodo	Penacho Deposición en el cuerpo	Irradiación interna por inhalación, irradiación externa e irradiación interna por absorción	Idem anterior	Protección respiratoria, protección personal, refugio, profilaxis, descontaminación personal
Inicial	Inmediata y larga	Gases nobles	Penacho	Irradiación externa	Idem anterior	Refugio. Control de accesos
Inicial	Inmediata y larga	Yodo	Penacho Deposición en el cuerpo	Irradiación interna por inhalación, irradiación externa, irradiación interna por absorción	Idem anterior	Protección respiratoria, protección personal, refugio, profilaxis, evacuación (*), descontaminación personal
Inicial	Retardado y corto	Gases nobles	Potencialmente del penacho	Irradiación externa	Idem anterior	Refugio, control de accesos
Inicial	Idem anterior	Yodos	Idem anterior	Irradiación interna vía inhalación	Idem anterior	Idem anterior más profilaxis y evacuación (*)
Inicial	Retardado y largo	Gases nobles	Idem anterior	Irradiación externa	Idem anterior	Refugio, control de accesos
Inicial	Idem anterior	Yodos	Idem anterior	Irradiación interna vía inhalación	Idem anterior	Refugio, control de accesos, profilaxis, evacuación
Intermedia	Variable	Variable	Contención del reactor	Irradiación externa	Estocástico individual	Refugio, control de accesos
Intermedia	Corta	Yodos	Deposición en el terreno	Irradiación externa	Individual no estocástico	Evacuación (*), reubicación
Intermedia	Corta	Yodos	Cadena alimentaria	Irradiación interna vía ingestión	Individual estocástico	Control de alimentos
Intermedia	Corta	Productos de fisión de período largo	Deposición en el terreno	Irradiación externa	Individual no estocástico	Evacuación (*)
Intermedia	Corta	Productos de fisión de período largo	Deposición en el terreno	Irradiación externa	Individual estocástico	Reubicación

Intermedia	Larga	Gases nobles	Penacho	Irradiación externa	Individual estocástico y no estocástico	Evacuación (*), reubicación
Intermedia	Larga	Yodo	Penacho	Irradiación interna vía inhalación	Idem anterior	Profilaxis, reubicación
Intermedia	Larga	Yodo	Deposición en el terreno	Irradiación externa	Idem anterior	Reubicación
Intermedia	Larga	Yodo	Cadena alimentaria	Irradiación interna vía ingestión	Idem anterior	Control de alimentos
Intermedia	Larga	Productos de fisión de período largo	Penacho	Irradiación interna vía inhalación	Idem anterior	Reubicación
Intermedia	Larga	Productos de fisión de período largo	Deposición en el suelo	Irradiación externa	Idem anterior	Reubicación
Intermedia	Larga	Productos de fisión de período largo	Cadena alimentaria	Irradiación interna vía ingestión y resuspensión	Individual estocástico	Control de alimentos. Reubicación
Final	Corto o largo	Yodo	Cadena alimentaria	Irradiación interna vía ingestión	Estocástico	Control de alimentos
Final	Corto o largo	Productos de fisión de período largo	Deposición en el terreno	Irradiación externa	Estocástico	Descontaminación de áreas
			Cadena alimentaria	Irradiación interna vía ingestión y resuspensión	Estocástico	Control de alimentos, descontaminación de áreas

(*) Sólo a distancias cortas y grupos pequeños

EFFECTOS PSICOSOCIOLOGICOS

La experiencia acumulada sobre este tipo de situaciones sugiere la necesidad de que sean informadas las personas afectadas sobre las medidas de autoprotección. El conocimiento del empleo con éxito de las contramedidas disminuirá la ansiedad y la tensión psicológica. Los médicos, ATS, el personal de rescate y emergencia junto con la población, en especial la de las zonas vecinas a las instalaciones nucleares, debieran ser informados sobre los posibles incidentes nucleares que puedan ser origen de riesgos radiológicos que afecten su salud y seguridad.

Las reacciones psicológicas individuales frente la radiación son parecidas a las que se suceden frente a las mayores enfermedades o peligros. Tales reacciones están relacionadas con:

- La indetectabilidad de la radiación por los sentidos humanos.
- La relación supuesta entre los efectos de las bombas nucleares (incluyendo la onda expansiva y el fuego) con un accidente potencial en una instalación nuclear.
- Las informaciones contradictorias que pueden aparecer en un accidente nuclear, como ocurrió en el accidente de TMI-2 o en el de Chernobil.
- La información inadecuada que dá lugar a que parezcan como irracionales las acciones públicas y que produce una ansiedad individual indebida.

Lo primero que debemos admitir es que, la ansiedad, entre la población del exterior de la instalación nuclear, es una consecuencia sanitaria real de un accidente radiológico, y que tal ansiedad no está relacionada con la magnitud de cualquier emisión o exposición a la radiación. Por lo tanto, este es un aspecto que debe ser tenido en cuenta entre los problemas sanitarios de la emergencia nuclear y su planificación. La propia existencia y específicamente el conocimiento de la misma por la población, del Plan de Emergencia es un elemento preventivo para mitigar la ansiedad del público.

En consecuencia es de importancia primordial la información al público en relación con la situación y operación de las instalaciones nucleares.

Deberá darse una formación y entrenamiento adecuado tanto en el interior de la zona de planificación de la emergencia, como fuera de ella. Los grupos de población a los que debe dirigirse específicamente esta información debería incluir a los profesionales sanitarios, el personal de emergencia, las autoridades públicas y el público en general. Aunque el nivel de la información puede variar, la OMS considera adecuado tratar sobre los métodos de medida de la radiación, los efectos inmediatos y retardados de la radiación, y la naturaleza y eficacia de las contramedidas. Para este cometido, la provisión de medios de formación, libros y folletos, materiales audiovisuales, información autodidáctica, ejercicios de entrenamiento y simulacros, se considera de capital importancia.

En relación con el propio desarrollo del Plan de Emergencia, éste debería incluir medios y métodos para realizar la comunicación de la información al público.

Debería ser posible una respuesta flexible que permita hacerse cargo de situaciones cambiantes.

Es aconsejable tener disponibles medios de ayuda psicológica, especialmente para el personal de emergencia, las poblaciones en centros de evacuación y pacientes con problemas psicológicos anteriores.

En relación con la situación de vuelta a la normalidad debería realizarse una educación intensiva sobre las operaciones específicas de recuperación y sobre el potencial de los efectos sobre la salud que podrían manifestarse más adelante. Desde este momento la gestión de los problemas psicológicos volvería a ser tarea de los centros habituales.

La obtención de datos psicológicos y su análisis debería permitir mejorar nuestro conocimiento sobre el tipo de situaciones.

Finalmente, debemos de exponer uno de los problemas psicológicos más importantes que no es otro que el de la aceptabilidad del público como un problema más a tener en cuenta en las emergencia nucleares.

Este problema podría reducirse si se integra este plan junto con otros esquemas de emergencia que parecen "más normales" como los accidentes industriales, por ejemplo, los que se pueden producir en la industria química y petroquímica.

En relación con este último problema es importante hacer notar en la información mostrada al público que el plan incluye una gran variedad de acciones, desde la más sencilla como quedarse en casa y cerrar las ventanas, hasta la evacuación; pero esto último es muy improbable que se produzca.

TEMA - 6. EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES SOBRE EL ORGANISMO HUMANO

GENERALIDADES

Los efectos de las radiaciones ionizantes sobre el organismo humano son la consecuencia de sus efectos biológicos.

Estos efectos han sido observados desde los primeros años que siguieron al descubrimiento de los Rayos X y de la Radiactividad: desde 1902 a 1907 se registraron 170 casos de lesiones diversas debidas a las radiaciones.

Las manifestaciones patológicas resultantes de una radioexposición son de dos tipos:

— Efectos a corto plazo, no estocásticos, con umbral, reversibles normalmente, y cuya gravedad dependerá de la dosis.

— Efectos retardados, de evolución lenta, aparentemente aleatorios, graves, normalmente no reversibles, su probabilidad de aparición, y no su gravedad, es proporcional a la dosis, finalmente es imposible por razones estadísticas probar, para los efectos retardados, la existencia o no de un umbral; por lo tanto al establecer las normas, la CIPR, prudentemente, escogió la hipótesis pesimista de ausencia de umbral y admitió una relación lineal entre la dosis y el efecto, lo que probablemente conduce a una sobreestimación del riesgo para dosis bajas.

EFECTOS A CORTO PLAZO

Son efectos somáticos, es decir, que únicamente implican al individuo radioexpuesto. Estos efectos son obligados, y reciben el nombre de efectos NO ESTOCÁSTICOS. Las dosis absorbidas se expresan aquí en Grays en el caso de una radioexposición por rayos X o gamma cuya Efectividad Biológica Relativa (E.B.R.) vale la unidad.

Radioexposición externa global con dosis elevadas

Las dosis elevadas (superiores a 1 Gray = 100 rads), impartidas en poco tiempo (de algunos minutos a algunas horas), se manifiestan por el cuadro clínico denominado SÍNDROME DE IRRADIACIÓN AGUDO, (fig. 6.1) que implica:

a) Una fase prodrómica

Cualquiera que sea la forma clínica, existe una reacción inicial caracterizada por las náuseas, vómitos, diarrea, sensación de malestar general, fatiga (astenia). La duración de esta fase no es mayor de unas horas.

b) Un período de latencia

Durante este período, el sujeto radioexpuesto no presenta prácticamente ningún síntoma. La duración de esta fase varía según la dosis y la naturaleza de la forma clínica posterior. Para dosis inferiores a 10 Gy su duración es de 5 a 14 días.

El cuadro clínico típico comporta signos de afectación al sistema hematopoyético, al tracto gastrointestinal y al sistema nervioso que se manifiestan según este orden en función de la dosis absorbida.

c) Un síndrome hematopoyético

Es el resultado de una radioexposición a dosis menores que las necesarias para los otros síndromes.

SINDROME AGUDO DE IRRADIACION

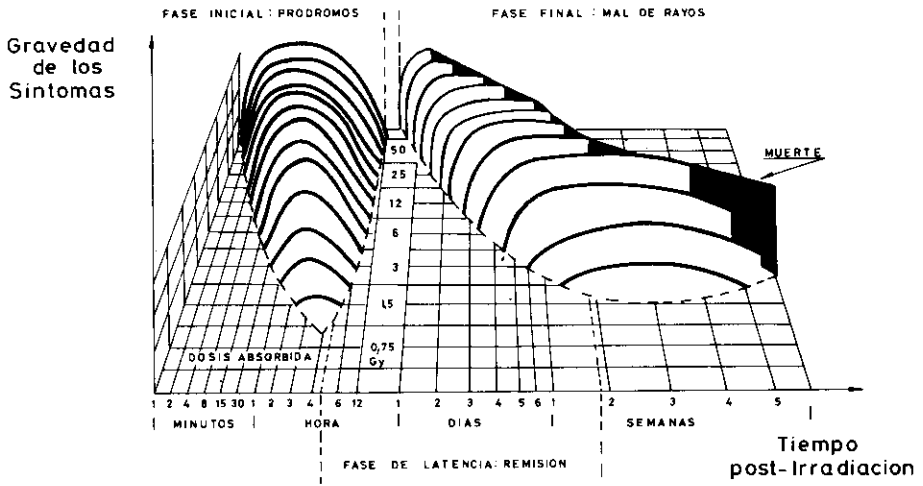


FIGURA 6.1.

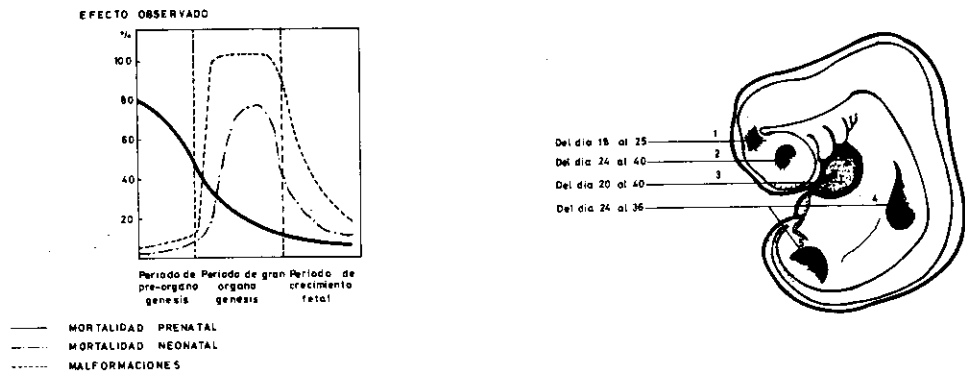


FIGURA 6.2.

FIGURA 6.3.

Es consecuencia de una afectación a la función medular con parada de la producción de células sanguíneas, lo que conduce a una pancitopenia. La linfopenia se produce primero, la leucopenia y la trombopenia después, finalmente la anemia.

Se manifiesta clínicamente por la tendencia hemorrágica, la disminución de resistencia a las infecciones, la anemia. Estos síntomas aparecen entre una semana y media y seis a ocho semanas después de la radioexposición.

d) Un síndrome gastrointestinal

Se observa para dosis más elevadas, del orden de 6 a 7 Gy. Es el resultado de una destrucción de la mucosa intestinal y de lesiones de los pequeños vasos de la submucosa.

Su principio es más precoz que el del síndrome hematopoyético, se manifiesta, después de un período de latencia corto, de algunas horas a una semana, por pérdidas líquidas importantes, como consecuencia de los vómitos, de la diarrea, y de las hemorragias.

Su pronóstico es grave: está casi siempre acompañado de una afectación medular irreversible. La muerte se alcanza en el lapso de 10 a 14 días.

e) Un síndrome pulmonar

Neumopatías intersticiales, son observadas con frecuencia (80% de los casos) en las radioexposiciones corporales totales destinadas a preparar un trasplante de médula ósea, realizado normalmente con dosis de 10 Gy; una protección pulmonar con la ayuda de pantallas de plomo permite reducir la dosis pulmonar a 8 Gy, la disminución de la tasa de dosis en caso de radioexposición única o el fraccionamiento de la dosis, permiten reducir la frecuencia de las neumopatías a únicamente el 10% de los casos.

Las lesiones pulmonares están, en general, por encima de toda terapéutica.

f) Un síndrome nervioso

Aparece en caso de radioexposición a dosis muy elevadas (20 a 30 Gy). El período de latencia es muy corto, desde algunas horas a uno o tres días.

Se caracteriza por un deterioro continuado de la consciencia, convulsiones, alcanzándose el coma y la muerte en el plazo de unas horas a una semana después de la radioexposición.

g) Una afectación del revestimiento cutáneo

Después de una radioexposición a dosis de 5 a 8 Gy de rayos X blandos, se desarrolla, al cabo de unos días o algunas semanas, un eritema.

La tabla 1, indica las principales manifestaciones clínicas observadas en función de las dosis absorbidas.

Radioexposición externa localizada

Las manifestaciones patológicas varían según la región expuesta.

Lesiones del revestimiento cutáneo

Son las lesiones más frecuentes, afectan principalmente a las manos y a los dedos. Estas lesiones están precedidas de un eritema precoz, aparecen en las horas que siguen a la radioexposición y desaparecen después.

En función de la importancia de las dosis absorbidas, se observan diversas manifestaciones patológicas.

a) La caída de los pelos y de los cabellos

El sistema piloso es muy radiosensible y la caída temporal de los pelos y de los cabellos puede ocurrir para dosis de 4 Gy.

TABLA - 1

Efectos de una radioexposición aguda en el adulto sano en función de la dosis

FORMA	DOSIS ABSORBIDA	SINTOMATOLOGIA
Infraclínica	Inferior a 1 Gy	Algún signo clínico en la mayoría de los individuos.
Reacción general ligera	1-2 Grays	Astenia, cansancio físico, náusea, vómitos que aparecen de 3 a 6 h después de la exposición. Sedación completa en 24 h.
Hematopoyética ligera	2-4 Grays	Afectación de la función medular (linfopenia, teucopenia, trombopenia, anemia) que es máxima tres semanas después de la exposición, retorno a la normalidad de 4 a 6 meses.
Hematopoyética grave	4-6 Grays (*) D.L (50) 4-4,5 Gy en el hombre	Afectación muy severa de la función medular.
Gastro-intestinal	6-7 Grays	Diarreas, vómitos, hemorragias.
Pulmonar	8-10 Grays	Hemotipsias, insuficiencia respiratoria.
Cerebral	Superior a 10 Gy	Coma y muerte de 14 a 16 h.

(*) DL(50): dosis que, liberada a una población de la misma edad, da lugar a una mortalidad del 50%.

b) Una radiodermatitis eritematosa

Se manifiesta ocho horas después de la radioexposición, por el enrojecimiento y el dolor de la zona afectada.

Evoluciona rápidamente hacia la curación subsistiendo después con frecuencia una pigmentación duradera. Se observa para dosis de 6 a 12 Grays.

c) Una radiodermatitis exudativa

Aparece también ocho horas después de la radioexposición. La piel se vuelve roja, dolorosa, se forman flictenas (ampollas), como en una quemadura de segundo grado. La evolución es lenta y se alcanza una cicatrización completa en 5 ó 6 semanas. La depilación es definitiva y se observa para dosis de 16 a 20 Grays.

d) Una radiodermatitis con radionecrosis

La radiodermatitis se caracteriza por la precocidad de la aparición del enrojecimiento, del dolor y del prurito posteriores a la radioexposición. Una ulceración que se desarrolla en algunos días, se profundiza progresivamente, no cura jamás, y puede malignizarse. Estas lesiones se observan para dosis superiores a 25 Grays.

Las lesiones oculares

La radioexposición de los ojos entraña, a partir de un umbral de aproximadamente 2 Grays, una afectación de su parte más radiosensible: el cristalino cuya opacificación (cataratas)

progresa tanto más rápidamente cuanto mayor es la dosis absorbida. Para dosis absorbidas más elevadas aparece además una conjuntivitis aguda, de menor gravedad.

Lesiones en las gónadas

Los testículos y los ovarios están entre los órganos más radiosensibles. Sin embargo, la radiosensibilidad de las células germinales masculinas y femeninas es distinta: las células femeninas son menos sensibles que las masculinas.

a) En el varón

La célula madre, las espermatogonias, son las células más radiosensibles. Las células más maduras son menos radiosensibles; de ellas las poco lesionadas continuarán evolucionando normalmente para dar lugar a los espermatozoides capaces de fecundar. Por lo tanto, la esterilidad no aparece nada más que después de un período relativamente largo, cuando los espermatozoides resultantes de las células inmaduras hayan sido agotados (esterilidad diferida).

Una esterilidad transitoria aparece a partir de 0,3 Gy, y puede hacerse definitiva más allá de los 5 Gy.

Las células de función endocrina, poco radiosensibles, permanecen indemnes: esto significa que la radioexposición de las glándulas genitales masculinas no produce castración.

b) En la mujer

La esterilidad aparece inmediatamente por destrucción de los ovocitos. Si la dosis absorbida es débil, la esterilidad puede no ser definitiva.

Las células de la función endocrina están también destruidas: a la esterilidad se suman los trastornos del ciclo menstrual que tienden a la castración.

Dosis de 3 Gy en la mujer producen alteraciones transitorias de la fecundidad. La castración aparece para dosis entre 6 y 8 Gy.

Efectos sobre el desarrollo embrionario

La radioexposición tiene un efecto nocivo sobre el desarrollo del feto, cuya gravedad se explica por el hecho de que los tejidos que componen el embrión sólo tienen un número limitado de células, de tal manera que la muerte de algunas puede dar lugar a daños irreparables.

En la etapa de preimplante, que va desde la fecundación hasta el decimoquinto día, el embrión es poco sensible a la radioexposición. Esto es debido a que en este período el embrión está compuesto por una población de células no diferenciadas capaces de reparar las radiolesiones. Las células afectadas, si son poco numerosas, son reemplazadas por células intactas provenientes de nuevas mitosis de células no lesionadas y el embrión se desarrolla normalmente.

Durante este estadio, la radioexposición no tendrá, por lo tanto, ningún efecto, o, si la dosis es muy elevada, la nidación será impedida y el huevo será expulsado.

En la etapa de la gran organogénesis que va desde el decimoquinto al quincuagésimo día, se produce una cierta diferenciación celular.

Las células lesionadas ya no pueden ser reemplazadas a partir de células intactas, pues éstas, en este estadio, ya están diferenciadas entre ellas. La radioexposición implica anomalías del desarrollo que dependen del estadio alcanzado en la morfogénesis. La radiosensibilidad presenta un máximo entre la tercera y la cuarta semana de gestación y después decrece enseguida hasta la décima semana (fig. 6.2). En razón de la capital importancia para la embriogénesis de las 6 a 7 primeras semanas de gestación, una

radioexposición, incluso a dosis bajas (de 0,1 Gy o sea 10 rads), durante este período, puede ser el origen de malformaciones congénitas.

Existen períodos críticos para los distintos órganos embrionarios (fig. 6.3) que explican las malformaciones observadas en los niños radioexpuestos en el curso de su vida uterina.

Las malformaciones más frecuentes se indican en la Tabla 2; no todas son viables.

Conviene hacer notar la gran sensibilidad de los neuroblastos que están presentes durante toda la gestación y los primeros meses después del nacimiento. En efecto el desarrollo cerebral es sustancialmente más susceptible de insultos teratogénicos que la mayoría de las otras estructuras fetales y embrionarias. Esto es debido a su complejidad estructural, su largo período de desarrollo y la mayor vulnerabilidad de los neuroblastos (menos diferenciados) respecto a la de las neuronas desarrolladas.

TABLA - 2

	Malformaciones mayores
Organo	Maturaleza de las malformaciones
Cerebro	Anencefalia Hidrocefalia Atrofia cerebral Retraso mental
Ojo	Anoftalmia Microfalmia Retinoblastoma
Esqueleto	Enanismo Craneoestenosis (cráneo pequeño) Espina bífida Malformaciones de las extremidades.

Una dosis de 0,1 a 0,2 Grays (10 a 20 rads) pueden afectar a los neuroblastos y ser responsable de varias anomalías (ver Tabla 2).

En el estadio de desarrollo fetal, estadio de simple crecimiento, el embrión es menos sensible (la zona más radiosensible es la correspondiente al sistema nervioso central).

Finalmente hagamos notar que el niño nacido aparentemente sano no está obligatoriamente a salvo de todo daño. Puede presentar manifestaciones patológicas, debidas a los efectos retardados de una radioexposición "in útero".

La protección del feto contra estos riesgos exige, por lo tanto, minimizar la radioexposición entre las mujeres susceptibles de estar en cinta.

Los exámenes radiológicos o radioisotópicos serán practicados, salvo urgencia, durante los DIEZ PRIMEROS DIAS del ciclo menstrual.

Deben siempre utilizarse todos los medios posibles de reducción de las dosis.

— En radiología: utilización de alta tensión, cortos tiempos de exposición, uso de diafragmas, de focalizadores, de protección plomada del abdomen, limitación del número de películas por examen y del número de exámenes.

— En medicina nuclear: limitación de las actividades, elección de radioelementos de corto período efectivo, y uso de emisores gamma puros.

Las exploraciones ultra-sónicas serán preferidas a las exploraciones radiológicas o radioisotópicas para el diagnóstico, la vigilancia del embarazo y el diagnóstico de una patología asociada.

Las exploraciones radiológicas no urgentes deberán diferirse hasta después del parto.

Si se producen radioexposiciones deberá realizarse un estudio dosimétrico tan preciso como sea posible.

En Francia, por ejemplo, la interrupción del embarazo depende de la dosis recibida y del período de embarazo.

Esto puede verse en la Tabla 3.

TABLA - 3

Francia: Conducta a tomar en caso de radioexposición al comienzo del embarazo

Dosis en centigrays (rads) al feto	Tiempo de embarazo	
	Inferior a 10 semanas	Superior a 10 semanas
Inferior a 0,15	No interrumpir el embarazo.	
De 0,5 a 1,5	Discusión según el deseo de la embarazada.	No interrumpir el embarazo.
De 1,5 a 5	Interrumpir el embarazo.	No interrumpir el embarazo, salvo patología asociada.
Superior a 5	Interrupción del embarazo.	

EFFECTOS RETARDADOS

Los efectos retardados son estocásticos. Se distinguen dos tipos:

- Efectos somáticos, que afectan al individuo expuesto.
- Efectos genéticos, que conciernen a su descendencia.

Los efectos somáticos

Generalidades

Los efectos somáticos retardados se producen para valores muy variados de dosis absorbidas.

Pueden aparecer al cabo de meses, o de años, después de la radioexposición.

Son muy diversos y afectan prácticamente a todos los órganos del cuerpo.

Principales efectos somáticos tardíos

Las manifestaciones patológicas consideradas habitualmente como efectos tardíos son:

- Disminución de la duración de la vida
- Carcinogénesis
- Formación de cataratas
- Radiodermatitis crónica

— Disminución de la duración de la vida

Para una exposición próxima a la DL_{50} , cualquiera que sea la especie, la disminución de la duración de la vida puede ser del 20 al 50% de la duración de la vida restante prevista para los animales que no mueren en la fase aguda. Para una misma dosis absorbida, una radioexposición prolongada a baja tasa implica una disminución de la vida mucho más reducida que una radioexposición aguda.

Después de la curación del síndrome de irradiación aguda, se puede observar en el animal un envejecimiento (senescencia) prematuro. Esencialmente, éste sería debido a alteraciones progresivas de los capilares y a una microfibrrosis de los espacios intercelulares.

De hecho, si se tienen en cuenta los efectos de desarrollo del cáncer radioinducido, particularmente en el caso de dosis bajas y bajas tasas de dosis, puede explicarse totalmente el acortamiento de la esperanza de vida sin que nos haga falta la introducción de un efecto no específico particular.

— Carcinogénesis

El origen del cáncer debido a las radiaciones ha sido relacionado, como se indicó en el capítulo anterior con la capacidad mutagénica de este agente físico.

Sin embargo, otros autores postulan que bien por acción directa o por acción indirecta, la radiación puede actuar sobre los mecanismos represores específicos de algún oncogén. La eliminación o la inactivación de tales mecanismos daría lugar a la operatividad de dicho oncogén.

a) Experimentación animal

Se han observado distintos cánceres en animales radioexpuestos.

- * Cánceres pulmonares en ratas con una dosis de 20 Gy sobre un único pulmón.
- * Cáncer en los riñones con una dosis de 8,5 Gy
- * Cáncer en las vías digestivas con una dosis de 6 Gy

b) Estudios clínicos

Se han descrito numerosos cánceres radioinducidos en el hombre.

* Radiocánceres cutáneos

La dosis necesaria para provocar la cancerización cutánea es por lo menos igual a la necesaria para la radiodermatitis crónica.

Como una dosis de ese orden es letal si la radioexposición es generalizada, los cánceres cutáneos no aparecen nada más que en el caso de una radioexposición local importante y después de tiempos de latencia considerables, que van desde doce a cincuenta y seis años después de la exposición a los rayos X o a dosis estimadas de varias decenas de grays.

* Tumores óseos

Estos han sido particularmente estudiados en un grupo de obreras que, en 1920, utilizaban pinturas con contenido en Radio y que tenían la costumbre de afinar su pincel entre sus labios.

Casos de cánceres óseos han sido observados varios años más tarde entre aquellos cuya carga corporal total en radio era superior a $2,22 \times 10^4$ Bq (0,6 μ Ci).

El período de latencia de los cánceres óseos es variable, depende de la dosis y del tipo de radiaciones emitido por el radionucleido, en el caso de los tumores óseos debidos al radio, éste es de quince años.

La fijación ósea de un radionucleido susceptible de ser el origen de un cáncer implica igualmente una radioexposición continua de la médula que puede ser responsable de la aparición de una aplasia o de una leucemia.

En el hombre, no se conocen cánceres óseos debidos a la ingestión de radioelementos naturales.

* Radioleucemias

La acción leucemogénica de las radiaciones depende de numerosos factores y, en particular, de un factor genético.

Esta acción aparece en todas las especies animales y se ha comprobado también en el hombre.

De forma general, las radioleucosis aparecen después de un período de latencia de cinco a diez años, mientras que los cánceres aparecen, en general, a la misma edad que en las personas no radioexpuestas.

El primer caso humano de radioleucemia fué publicado en 1911.

Marie Curie y su hija Irene Joliot-Curie murieron de leucemia.

En 1952, se habían detectado veinticuatro casos de radioleucemia entre los supervivientes de Hiroshima y Nagasaki. A partir de 1948, se ha observado un aumento del número de leucemias. La frecuencia máxima se produjo seis años después de la radioexposición. La distribución espacial era inversamente proporcional a la distancia del hipocentro.

Una encuesta inglesa ha mostrado que la frecuencia de las leucemias en los enfermos tratados con radioterapia para tratar la espondilitis anquilosante era diez veces mayor que en la población normal, y que existía una relación dosis-efecto. La frecuencia es máxima cinco años después de la primera radioexposición.

Estadísticas relativas a las leucemias producidas en 1850 radiólogos, entre los años 1938 y 1952, han mostrado que la frecuencia de éstas era de 61 por cada 100.000, mientras que la frecuencia esperada era de 8 por cada 100.000 habitantes.

Una vasta encuesta realizada en Estados Unidos sobre 36000 enfermos con hipertiroidismo ha mostrado que la frecuencia de las leucemias era un poco más elevada entre los enfermos tratados con Iodo-131 que en el conjunto de la población, pero, sin embargo, no difería de la encontrada entre los enfermos tratados quirúrgicamente.

Ciertos autores han señalado una frecuencia mayor de leucemias en enfermos de policitemia severa tratados con fósforo-32. De hecho, como esta enfermedad, aunque no sea tratada con P-32, puede evolucionar a leucemia, es difícil sacar una conclusión clara.

En general, las radiaciones ionizantes pueden inducir varios tipos de leucemias en el hombre, excepto las leucemias linfoides crónicas. El riesgo es proporcional a la dosis absorbida.

* Cánceres de tiroides

Se ha señalado un aumento de la frecuencia de los cánceres tiroideos entre los supervivientes de Hiroshima y Nagasaki y entre los sujetos radioexpuestos en su infancia para el tratamiento de la hipertrofia del timo.

Se han provocado tumores en el tiroides en los animales mediante la administración de Iodo-131, ya que al ser utilizado en aplicaciones diagnósticas y terapéuticas ha hecho particularmente interesante su estudio.

Una encuesta realizada en 1974 daba nueve casos de cáncer en el tiroides sobre 21.174 enfermos tratados para el hipertiroidismo con Iodo-131, y cincuenta casos sobre 11.732 enfermos tratados quirúrgicamente.

De hecho, no se conoce el proceso real de inducción de cánceres y numerosos factores intervienen en su desarrollo con la misma importancia que las radiaciones ionizantes.

* Tumores pulmonares

Desde el siglo pasado se conoce que los mineros de las minas de uranio presentan una frecuencia elevada de cánceres de pulmón. Esto obedece a la inhalación del Radón y sus descendientes radiactivos.

— Formación de cataratas

La radioexposición de los ojos, por cualquier tipo de radiación ionizante, pero sobre todo por los neutrones, puede dar lugar a la formación de cataratas y éstas pueden aparecer después de un período de latencia variable que va desde seis meses a varios años después de la radioexposición.

La catarata comienza a desarrollarse en el polo posterior del cristalino y la rapidez de su desarrollo depende de la dosis y del tipo de radiación.

— Radiodermatitis crónica

Se caracteriza por alteraciones tardías e irreversibles de la piel. Se observa después de la radioexposición de la piel a dosis elevadas, en radioterapia, o como consecuencia de una dispersión de radiactividad (por ejemplo, de emisores beta) sobre los tegumentos.

Caso particular de dosis bajas

Un estudio realizado durante 16 años ha establecido que la frecuencia de las leucemias entre los supervivientes de Hiroshima era proporcional a la dosis hasta valores de 20 a 49 centigrays (rads).

Una encuesta que se extiende sobre un período que va desde dieciseis a veintinueve años ha mostrado que el riesgo de inducción de un cáncer de tiroides entre los sujetos radioexpuestos en la infancia al nivel de la cabeza y del cuello era proporcional a la dosis recibida por el tiroides hasta dosis absorbidas de 6,5 centigrays.

Se admite que la exposición a 0,1 mSv de 10^6 personas, implicaría la aparición de 125 casos de cánceres mortales. Este valor debe compararse con la frecuencia espontánea de muertes por cáncer en los adultos que es del 20%.

Efectos genéticos

Generalidades

Estos efectos, que afectan a los cromosomas de las células sexuales, afectan a la descendencia del individuo radioexpuesto.

El patrimonio hereditario que cada generación transmite, en el momento de la reproducción a la generación siguiente, está codificado en los núcleos de los óvulos y de los espermatozoides, *bajo la forma de secuencias de unidades de información; cada secuencia relativa a un carácter particular de la especie constituye un gen.*

El destino genético se fija en la fecundación. El desarrollo armonioso del niño que va a nacer exige que haya recibido un programa genético completo. La transmisión de este programa, es decir, de los genes que soportan los caracteres hereditarios, se efectúa en cada generación con una precisión suficientemente grande, lo que explica la estabilidad de las especies vivas durante milenios, y suficientemente débil para explicar la evolución de las especies a una escala más larga.

Se llama mutación al accidente que es el origen de los errores de programación de la información genética. Las malformaciones o enfermedades hereditarias son relativamente

frecuentes. Pueden, en efecto, ser el resultado de diversas agresiones (contaminantes químicos) sin relación con la radioexposición.

Se estima en aproximadamente un 10%, la proporción de niños recién nacidos portadores de anomalías genéticas hereditarias de gravedad variable, que van desde una manifestación no apreciable (la más frecuente) a las predisposiciones a la diabetes, a la hipertensión arterial, a ciertas psicosis y al desarrollo de cánceres, hasta taras en el desarrollo y malformaciones graves.

Mutaciones cromosómicas

Afectan al número y estructura de los cromosomas, como vimos en el capítulo anterior, por lo tanto, pueden ser detectadas por examen microscópico. Estas mutaciones dan lugar a la transmisión de un programa de instrucciones incompleto o alterado.

De mil recién nacidos, cinco tienen anomalías cromosómicas. La anomalía más frecuente (cuatro por mil) es la aneuploidía: un cromosoma en exceso o en defecto. Por ejemplo, los mongólicos, poseen el cromosoma veintiuno tres veces y no dos, como sucede normalmente (Trisomía 21). Ciertos individuos tienen un segundo cromosoma sexual.

Una vez de cada mil, la anomalía es más compleja: consiste en la pérdida y en la adición simultánea de ciertos segmentos cromosómicos.

Estas anomalías cromosómicas y los errores de transmisión de la información genética pueden dar lugar al desarrollo de un aborto espontáneo, o al nacimiento de niños que sufren malformaciones importantes y con una corta esperanza de vida.

Mutaciones génicas

Estas afectan a uno o varios genes. Se caracterizan por modificaciones en la secuencia de los nucleótidos, sin alteración de la estructura de los cromosomas, por lo que no son detectables instantáneamente al microscopio, pero son los responsables químicos de la transmisión de una instrucción o de una serie de instrucciones erróneas o aberrantes.

Mutagénesis radioinducida

El poder mutagénico de las radiaciones ionizantes se conoce desde hace mucho tiempo, desde que en 1927 H.J. Miller obtuvo los primeros mutantes de la mosca del vinagre (*Drosophila Melanogaster*) mediante radioexposición a los rayos X.

— Datos clásicos

Las radiaciones ionizantes, actúan directamente sobre el material genético.

El efecto es proporcional a la dosis: la relación es lineal. Por lo tanto, no hay umbral, lo que significa que cualquier dosis por pequeña que sea es capaz de tener un efecto mutagénico.

El efecto no depende de la distribución de la dosis: una misma dosis tendrá el mismo efecto mutagénico tanto si es aplicable en una única o en varias dosis y cualquiera que sea el intervalo que separa las sucesivas radioexposiciones.

— Datos nuevos

Se ha emitido la hipótesis de que la proporcionalidad dosis-efecto no sería cierta para dosis bajas y que existiría un umbral: la frecuencia de las mutaciones no aumentaría nada más que a partir de una dosis umbral.

Sin embargo, esta hipótesis ha sido generalmente rechazada, al menos en lo que concierne a las células sexuales masculinas, más sensibles a los efectos mutagénicos de las radiaciones ionizantes que las células sexuales femeninas.

La relación dosis-efecto depende de la tasa de dosis: para la misma dosis, una radioexposición fraccionada o prolongada a una tasa de dosis baja es menos peligrosa que una radioexposición aguda.

El número de mutaciones disminuye con el tiempo transcurrido entre la radioexposición y la fecundación. Sobre 155 000 descendientes de ratones hembras radioexpuestos, concebidos en las siete semanas posteriores a la radioexposición, se han observado once mutantes. Sobre 71000 descendientes concebidos después de esta dilación, no se encontró ningún mutante. Estos hechos muestran que el organismo es capaz de reparar las lesiones provocadas por la radioexposición, como se vió en el capítulo anterior.

Hay proporcionalidad entre la frecuencia espontánea y la radioinducida de un gen particular.

— Estudios clínicos con humanos y animales

Desde 1948 a 1954, se siguieron 70.000 embarazos en Hiroshima y Nagasaki. Entre los niños nacidos de padres radioexpuestos, fueron examinados 27000 al nacer y al cabo de nueve meses. No se constató ni un aumento anormal de niños nacidos muertos, ni diferencia de peso o de mortalidad infantil. Sólo fue detectada una reducción estadística del número de niños nacidos de padres radioexpuestos y de niños de madres radioexpuestas.

Las estimaciones del número de mutaciones radioinducidas han sido realizadas a partir de datos obtenidos con ratones y primates, bien por el método directo: medida de la frecuencia de las mutaciones radioinducidas y posterior extrapolación al hombre, o bien por el método indirecto; y en este caso se estiman los valores de las dosis absorbidas que producen un número de mutaciones igual al de mutaciones espontáneas observadas (dosis de duplicación).

Las estimaciones realizadas por los dos métodos son similares: se estima que, en el caso de una población humana a baja tasa de dosis absorbida de radiaciones ionizantes de baja TEL (rayos X o gamma), el aumento del número de mutaciones radioinducidas es de unas 2000 aproximadamente, para una radioexposición de 1 Gy distribuida sobre una generación (30 años) para 10^6 nacimientos en la primera generación. En el equilibrio, después de un número de generaciones, variable según el efecto genético, radioexpuestas en las mismas condiciones, el aumento de su número es de 15.000 por 10^6 nacimientos. Para 1 cGy por generación, el aumento es de 20 en la primera generación, y 150 en el equilibrio, por 10^6 nacimientos. Estos resultados pueden compararse con la frecuencia natural de las mutaciones (10%).

Efectos de un aumento de la frecuencia de las mutaciones

El aumento de la frecuencia de las mutaciones no significa un aumento idéntico de la frecuencia de los caracteres correspondientes.

— Caracteres multifactoriales

Numerosos caracteres son multifactoriales, es decir, que dependen de la presencia de varios genes y de la influencia de las diversas agresiones procedentes del medio.

La frecuencia de las enfermedades hereditarias depende más de las condiciones del medio que del aumento de la frecuencia de los genes contribuyentes a la aparición del carácter.

En definitiva, en el caso de los caracteres multifactoriales, las consecuencias de un aumento de las tasas de mutación parecen muy reducidas.

— Carácter recesivos

El niño que presenta este carácter es homocigótico, siendo los padres heterocigóticos. La frecuencia de los caracteres recesivos, ligada a la presencia en los dos cromosomas de una pareja idéntica del gen deletéreo, depende, por lo tanto, de la probabilidad de matrimonios entre heterocigóticos, influenciada ésta por las características de la población (dimensión, costumbres matrimoniales, etc.).

El aumento de las tasas de las mutaciones no tiene prácticamente ninguna consecuencia sobre la frecuencia de los caracteres recesivos, incluso después de varias generaciones.

— Caracteres dominantes

Los caracteres dominantes se manifiestan en los sujetos heterocigóticos que, por lo tanto, tienen un único cromosoma de la pareja, que sea portador del gen nocivo.

En este caso, la frecuencia de aparición del carácter es proporcional a la tasa de mutación y si la tasa de mutación se duplica, la frecuencia del carácter se multiplica por dos.

En el caso de un carácter letal, los sujetos portadores del carácter no se reproducirán, con lo que el efecto se reduce a la primera generación.

En el caso de un carácter patológico grave pero no letal, los sujetos se reproducen a un ritmo más débil que el resto de la población, el efecto máximo se alcanza al cabo de varias generaciones.

— Caracteres ligados al sexo

El gen responsable del carácter está situado en el cromosoma sexual. Por lo tanto los caracteres se manifiestan como caracteres dominantes. De hecho, son veinticinco veces menos frecuentes que esos últimos, y su incidencia es reducida.

— Efecto global

Por ahora, el problema de los riesgos genéticos permanece en el plano teórico. No se ha observado ningún efecto significativo entre los hijos de personas profesionalmente expuestas a las radiaciones.

Sin embargo, teniendo en cuenta el aumento de actos de radiodiagnóstico y de medicina nuclear, es preciso seguir de un modo particularmente atento la evolución de los riesgos genéticos.

Cuantificación de los efectos retardados

Se basa en el empleo de parámetros derivados de la dosis equivalente, H , definida como el producto de la dosis absorbida, D , por el factor de calidad Q , y por el factor N , producto de los otros factores de ponderación.

Dosis efectiva individual y colectiva

La dosis equivalente efectiva individual H_E , fue introducida inicialmente en 1977 por la CIPR, para fijar límites a la radioexposición de los trabajadores expuestos. Este parámetro tiende a ser aplicado a los casos de radioexposición del público (radioexposición natural, artificial: industrial y médica).

Se obtiene ponderando la dosis equivalente de un órgano particular, H_T , multiplicándolo por un factor W_T que da cuenta del riesgo relativo de cancerización mortal, y para las gónadas de la aparición de enfermedades hereditarias graves en el curso de las dos generaciones siguientes.

El factor W_T es igual a la relación entre la probabilidad de efectos estocásticos resultante de la exposición del órgano T y de la probabilidad total de efectos estocásticos resultante de una radioexposición uniforme del organismo entero, igual a $1.65 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ calculada como promedio, teniendo en cuenta la edad y el sexo. (ver Tabla 4).

TABLA - 4

Valor de los efectos de peso W_T	Factor de riesgo (Sv^{-1})	
Gónadas	0,25	4×10^{-3}
Tiroides	0,03	5×10^{-4}
Mama	0,15	$2,5 \times 10^{-3}$
Médula ósea roja	0,12	2×10^{-3}
Pulmón	0,12	2×10^{-3}
Hueso (superficies óseas)	0,03	5×10^{-4}
Resto del organismo (1)	0,30	5×10^{-3}

El riesgo para un tejido: $R(T) = W_T \cdot H_T \cdot r$ siendo $r = 1.65 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$

(1) Para determinar la contribución del resto del organismo, se evaluará la dosis media para los cinco órganos o tejidos más expuestos del resto del organismo (con exclusión del cristalino, piel, mamas, antebrazos, pies y tobillos), utilizando para cada uno de ellos un factor de 0.06. Se ignorará entonces la indicación de los otros órganos y tejidos.

Se define, por tanto, la dosis equivalente como:

$$H_E = \sum_T H_T W_T$$

En el S.I. H_E se expresan en Sv, lo mismo que H_T .

La dosis equivalente colectiva S_E se expresa en Sv-persona y se emplea a menudo en caso de una radioexposición que afecta a un gran número de individuos (radioexposición natural, debida a las explosiones nucleares atmosféricas, médicas...) Representa la suma de la dosis equivalente efectiva del conjunto de la población radioexpuesta.

$$S_E = \int H_E N_{H_E} dH = \int H_E P_{H_E}(H) dH_E$$

Donde N_{H_E} es el número de individuos radioexpuestos a H_E (donde P_{H_E} es el número de individuos que reciben una dosis efectiva comprometida entre H_E y $H_E + dH_E$). Puede también representarse para millones de personas de una población.

De S_E podemos obtener una dosis efectiva media H_E , haciendo

$$H_E = S_E/N$$

Donde N es el número total de personas radioexpuestas.

La dosis equivalente efectiva individual, H_E , colectiva S_E y media H_E se calculan, en general, integrando las tasas correspondientes durante la duración de la radioexposición y lo normal es expresarlo en Sv por año de radioexposición.

La probabilidad de efectos estocásticos somáticos (cancerización mortal) y genéticos (limitados a las dos primeras generaciones) se obtiene para el individuo por el producto de la dosis equivalente efectiva H_E por el factor de riesgo global de $1.65 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$; para la población, el número de individuos afectado se obtiene multiplicando la probabilidad individual por la dimensión de la población.

Dosis efectiva comprometida

En el caso de radioexposición artificial de duración muy larga (debida a radioelementos de muy largo período físico producidos por explosiones nucleares atmosféricas experimentales o debida a los reactores nucleares), se emplea el concepto de dosis efectiva comprometida H_{E1} , obtenida integrando hasta el infinito la tasa correspondiente.

$$H_E = H_E dt$$

En radioprotección, se limita el intervalo de integración a los cincuenta años, pues la esperanza de vida a la edad adulta es de este orden y se define la dosis integrada como:

$$H_{50} = H_E dT$$

La dosis efectiva comprometida colectiva SE_E^∞ se obtiene por integración de la dosis efectiva comprometida extendida al conjunto de la población radioexpuesta y se expresa en Sv- persona.

Dosis somáticamente significativa (D.S.S.)

Se define como la dosis equivalente que, aplicada al conjunto de la población radioexpuesta, conduciría al mismo número de efectos somáticos retardados que el efecto observado.

$$D.S.S. = \frac{\sum_e \sum_s \sum_T H_{e,s,T} \cdot N_{e,s} \cdot W_{s,T}}{\sum_s \sum_T N_s \cdot W_{s,T}}$$

donde $N_{e,s}$ es el número de individuos de la clase de edad e, y sexo s, cuyo órgano T está sometido a una dosis equivalente $H_{e,s,T}$; $W_{s,T}$ es la probabilidad de cancerización mortal debida a la radioexposición del órgano T, por unidad de dosis equivalente, en la clase de edad e, y sexo s.

Teniendo en cuenta la falta de información actual, se puede utilizar en vez del factor $W_{s,T}$ los factores W_T (Tabla 4). La D.S.S. es un medio de estimar el riesgo de cancerización mortal y de enfermedades genéticas graves en las dos primeras generaciones, en la población radioexpuesta. Su número es igual al producto de D.S.S. por la dimensión de la población y del factor de riesgo W global, igual a $1,65 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$.

Dosis genéticamente significativa (DGS)

Se entiende por dosis genéticamente significativa, la dosis equivalente media por individuo que, liberada de un modo uniforme sobre el conjunto de la población, implicaría el mismo número de efectos hereditarios que el observado, teniendo en cuenta la distribución real de la dosis equivalente en la población:

$$D.G.S. = \frac{\sum_e \sum_s H_{e,s} \cdot N_{e,s} \cdot W_s}{\sum_s N_s \cdot W_s}$$

Siendo $N_{e,s}$ el número de individuos que pertenecen a la clase de edad e , y sexo s , expuestos a una dosis equivalente en las gónadas $H_{e,s}$ y siendo W_s la esperanza de procreación del individuo perteneciente a la clase de edad e , y sexo s , y siendo N_s el número de individuos de esta misma clase.

El D.G.S. equivale a la dosis equivalente a las gónadas ponderada por la probabilidad de procreación después de la radioexposición, promediada sobre el conjunto de la población.

El número de efectos genéticos en una población puede obtenerse multiplicando la D.G.S. por el tamaño de la población y por el factor de riesgo genético: $0,8 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$.

También se define la dosis anual genéticamente significativa (DAGS) para una población que es igual a la media de las dosis anuales individuales recibidas en las gónadas. Cada dosis individual será ponderada por un factor que tendrá en cuenta el número probable de niños que puedan ser engendrados después de la exposición.

A partir de éste se define el concepto de dosis Genética (DG) del siguiente modo:

La dosis genética (DG) es la dosis que, si fuera efectivamente recibida por cada individuo de una población dada, desde su concepción hasta la edad media de procreación, implicaría la misma carga genética para la población en su conjunto que las dosis realmente recibidas por los individuos de esta población. La dosis genética se calcula efectuando el producto de la dosis anual genéticamente significativa (DAGS) por la edad media de procreación (treinta años).

TEMA - 7. INCORPORACION DE RADIONUCLEIDOS AL ORGANISMO HUMANO

INTRODUCCION

Los riesgos de irradiación interna derivados de los distintos tipos de exposiciones, están condicionados a las características físicas y químicas de los compuestos contaminantes y a su vía de entrada al organismo, ya que su distribución y depósito varía cualitativa y cuantitativamente con las vías de penetración y las características de transportabilidad del compuesto en el organismo.

La existencia de radionucleidos liberados en la atmósfera y depositados en el suelo y en el medio acuático pueden dar lugar a una contaminación directa por inhalación o a través de los ciclos ecológicos.

Otros riesgos proceden de la utilización de materiales radiactivos no encapsulados tanto para fines industriales como en aplicaciones médicas, agricultura, investigación etc., que supone un riesgo potencial de irradiación para las personas profesionalmente expuestas, derivado de la posible incorporación a través de las distintas vías de penetración en el organismo.

CARACTERISTICAS GENERALES

A continuación se analizarán los distintos parámetros que intervienen en los procesos físicos, químicos y biológicos relacionados con la contaminación interna, consecuencia de la incorporación de los radionucleidos, distinguiendo las características del radionucleido, del compuesto en el que se encuentra y del receptor.

Características del radionucleido

Distinguimos: período de semidesintegración, naturaleza de la radiación (partículas alfa, beta o radiación gamma), actividad específica y vida media biológica.

Características del compuesto contaminante

La composición química y naturaleza física del compuesto contaminante, son factores determinantes para la localización y depósito del radionucleido pudiendo variar para un mismo radionucleido (pulmón, hueso).

Características del receptor

La composición del organismo (elementos químicos, masa de los órganos, etc.) y en cada caso defectos anatómicos y estado fisiológico y patológico del individuo, influyen en las disposiciones metabólicas y explican la complejidad y las variaciones individuales que acompañan a los fenómenos biológicos.

VIAS DE CONTAMINACION INTERNA

Las vías de contaminación pueden ser directas a la sangre a través de heridas o lesiones en la piel, o indirectas a través del tracto respiratorio (TR) por inhalación, y tracto gastro intestinal (TGI), por ingestión.

Absorción transcutánea

En esta vía de penetración hay que diferenciar entre piel intacta o lesionada. En el primer caso, la absorción puede tener lugar por difusión a través de la epidermis o por penetra-

ción en folículos pilosos o en conductos secretores de las glándulas sudoríparas o sebáceas.

En el caso de piel lesionada, la absorción es más directa dependiendo su cuantía del tipo de lesión (incisión, contusión, quemadura etc.), y de la profundidad y localización anatómica. Por lo tanto, en las heridas, puede existir una entrada directa a la sangre como si se practicara una inyección intravenosa, o la simultánea entrada en sangre y permanencia en los tejidos de la herida, desde donde es absorbido el radionucleido.

En general la penetración por la piel está influida por la extensión de la superficie expuesta, características de los compuestos contaminantes y, en su caso, por los efectos patológicos sobre la piel de los disolventes empleados.

Inhalación

El comportamiento de los compuestos contaminantes que penetran en los pulmones por inhalación, está influido fundamentalmente por los siguientes factores: características anatómicas y fisiológicas del sistema respiratorio, tamaño de partículas, grado de transportabilidad de los compuestos inhalados, factores que afectan tanto al depósito como a la movilización y desplazamiento de los compuestos inhalados desde el tracto respiratorio a la sangre, linfa y tracto gastrointestinal.

Depósito y movilización de partículas en el tracto respiratorio (TR)

En la diferenciación de los procesos de depósito y movilización en el TR seguimos al Grupo de Trabajo sobre Dinámica Pulmonar (GTDP), de la CIPR, dividiendo el TR en tres compartimentos, nasofaríngeo (NF), traqueobronquial (TB) y pulmonar (P).

Los compuestos transportables inhalados, se difunden en la sangre y fluidos orgánicos y son transportados, para depositarse en órganos y tejidos o excretarse vía orina.

De los no transportables, una fracción del depósito NF es exhalada, otra parte pasa por acción ciliar hacia el esófago y Tracto Gastrointestinal Inferior (TGI) o hacia la sangre y linfa por solubilización de las partículas o por transporte de las mismas a través del epitelio pulmonar.

El tamaño de las partículas es factor determinante para el depósito en el TR.

Cinética de movilización

El proceso de eliminación de partículas radiactivas desde el TR es de suma importancia por la influencia que el tiempo de permanencia tiene en la dosis de radiación al pulmón. Los mecanismos que intervienen en este proceso son fundamentalmente, la acción ciliar, fagocitosis y la movilización a los sistemas circulatorios, sanguíneo y linfático.

En la acción ciliar influyen las características anatómicas y fisiológicas del sistema respiratorio (glándulas secretoras, epitelio de cilios vibrátiles y epitelio alveolar).

La eliminación por fagocitosis en el caso de partículas inertes, es intracelular y está condicionada al ciclo vital del fagocito. En el caso de partículas radiactivas el transporte puede ser además extracelular ya que en el caso de una elevada radiotoxicidad como ocurre con el plutonio, puede producirse muerte y lisis de la célula con la inevitable liberación de las partículas a los espacios extracelulares, dependiendo la frecuencia de esta fase extracelular de la citotoxicidad del compuesto inhalado.

Ingestión

La ingestión directa se puede producir en aquellos casos de alimentos o bebidas contaminadas, o como consecuencia de falta de protección en personas profesionalmente expuestas a ambientes y manipulación de polvo (contaminación de manos, cuerpo o ropas).

En general el riesgo de penetración por ingestión directa es improbable en exposiciones industriales por las normales medidas de protección.

El Tracto Gastrointestinal Inferior (TGI) es más bien una vía de transporte del radionucleido inhalado y depositado en el TR del que pasa al TGI en distintas proporciones y tiempo según la región donde se haya producido el depósito.

Las fracciones que llegan a la sangre por ingestión, varían considerablemente de unos radionucleidos a otros, desde una absorción del 100%, factor unidad para el Tritio a factores del orden de $1 \cdot 10^{-4}$ para el Plutonio, $5 \cdot 10^{-4}$ para Uranio, 0,2 para el Radio, etc.

DISTRIBUCION DE RADIONUCLEIDOS DESDE LA SANGRE

El comportamiento de los radionucleidos que llegan a la sangre a través de las distintas vías de contaminación, varía considerablemente de unos a otros. Nos referimos al Plutonio y al Uranio como representativos de una elevada radiotoxicidad el primero y de incluir una importante toxicidad química el segundo. El Plutonio que llega a la sangre, cualquiera que sea su procedencia, puede ser:

- a) Absorbido y excretado por la orina si el compuesto es muy estable.
- b) Desaparecer en unos minutos por ser movilizado al hígado si está fuertemente hidrolizado.
- c) Complejarse con las proteínas del plasma si el compuesto es inestable, en cuyo caso aproximadamente el 90% se une a una betaglobulina, la transferrina, para formar un complejo estable.

La afinidad del Plutonio por la transferrina es análoga a la del hierro por esa misma proteína, y en una primera fase, el transporte a órganos y tejidos es común para ambos.

La distribución y el depósito en distintos órganos y tejidos está condicionado a la estabilidad de los compuestos que han pasado a la sangre o que se han formado por hidrólisis a pH fisiológico. En el caso de compuestos fuertemente complejados, el depósito se realiza preferentemente en el hueso. Si el compuesto ha sido hidrolizado, el depósito tiene lugar preferentemente en el hígado.

En el caso del Uranio, en la sangre se encuentre formando dos complejos aniónicos, el complejo uranil-bicarbonato fácilmente difusible y el complejo uranil-proteína difícilmente difusible. El primero pasa de la sangre, difundiéndose a través de los líquidos extracelulares, a los tejidos blandos y se introduce de nuevo en la corriente circulatoria sanguínea de la que pasa al riñón. En éste, el complejo se filtra a través de los capilares del glomérulo renal pudiendo fijarse, eliminarse o ser absorbido.

En esta fase de la distribución, la proporción de complejo difusible está condicionada a la reserva alcalina de la sangre; si ésta es alta, la mayor parte del Uranio es eliminado o reabsorbido y no se combina con la proteína de la superficie de los túbulos; si la reserva alcalina es baja, se puede fijar a la célula con el consiguiente peligro de lesión histológica y efecto nefrotóxico.

ELIMINACION

Una primera eliminación de las fracciones de radionucleidos no absorbidas, se produce bien por el aire exhalado, o por las heces. La eliminación se produce, según el radionucleido absorbido, por vía renal (Pu y U), pulmonar (Rn), sudoral y renal (H-3) etc. Los coeficientes de eliminación varían en función del tiempo que transcurre desde la contaminación y esta variación comprende varias fases, que corresponden a las etapas de difusión, depósito y retención.

De la experimentación animal en la mayoría de los casos y de algunos datos humanos, se han obtenido de distintos radionucleidos, modelos metabólicos específicos que describen la incorporación, retención y excreción. Para el Plutonio, la eliminación es relativamente lenta y el grado de excreción bajo, siendo inferior ya en las primeras veinticuatro horas al 1% de la dosis administrada. Para el Uranio en las primeras veinticuatro horas la eliminación es elevada, del orden del 70%, siguiendo después un proceso lento que corresponde al Uranio retenido.

Las expresiones matemáticas de estos modelos, son en general de tipo exponencial o sucesión de exponenciales, o bien de tipo potencial.

ORGANOS DE DEPOSICION DE LOS RADIONUCLEIDOS

Dado que el concepto de órgano crítico está siendo abandonado, reseñamos a continuación los órganos en los cuales se depositan preferentemente los diferentes radionucleidos.

<u>RADIONUCLEIDO (compuesto)</u>	<u>ORGANO PREFERENTE</u>
H-3 (soluble) (inmersión)	Cuerpo entero Piel
C-14 (CO ₂) (soluble) (inmersión)	Tejido adiposo Cuerpo entero
P, Ca (soluble) (insoluble)	Hueso Pulmón
Cr (soluble) (insoluble)	Tracto gastrointestinal (TGI) TGI, todo el cuerpo Pulmón, TGI
Co (soluble) (insoluble)	TGI Pulmón, TGI
Zn (soluble) (insoluble)	Cuerpo entero, próstata, hígado. Pulmón, TGI
As (soluble) (insoluble)	TGI TGI
Sr (soluble)	Hueso
Zr (soluble)	Pulmón, TGI
Nb (soluble) (insoluble)	TGI, cuerpo entero Pulmón, TGI
Ru (soluble) (insoluble)	TGI Pulmón, TGI
I (soluble) (insoluble)	Tiroides Pulmón
Cs (soluble) (insoluble)	Cuerpo entero, hígado, páncreas, músculo. Pulmón, TGI
Ce (soluble) (insoluble)	TGI, hueso, hígado Pulmón, TGI
Pm (soluble)	TGI, hueso

(insoluble)	Pulmón, TGI
Ta (soluble)	TGI, hígado
(insoluble)	Pulmón, TGI
Ir (soluble)	TGI, riñón, páncreas
(insoluble)	Pulmón, TGI
Au (soluble)	TGI
(insoluble)	TGI
Rn	Pulmón
Ra (soluble)	Hueso
(insoluble)	TGI
U (soluble)	TGI, riñón, hueso
(insoluble)	Pulmón, TGI
Pu (soluble)	Hueso
(insoluble)	Pulmón, TGI

TEMA - 8. ATENCION AL PACIENTE IRRADIADO

INTRODUCCION

El aumento en las aplicaciones de todo tipo de los isótopos radiactivos hace que sea continuamente creciente el número de personas que se ven expuestas a los riesgos que tales actividades implican.

Por ello, presenta vital importancia el conocimiento de los conceptos básicos y principios generales de primeros auxilios.

En este sentido, hay dos conceptos fundamentales, que son: el conocimiento del nivel de riesgo y el conocimiento de la urgencia necesaria en el tratamiento.

En caso de que se presenten accidentes radiológicos con heridas que puedan suponer una amenaza para la vida del accidentado, la contaminación o irradiación presentan una importancia secundaria.

El contenido de este capítulo abarca los aspectos clínicos y terapéuticos del personal irradiado, y aunque los tratamientos en él expuestos son casi totalmente propios de centros hospitalarios, con una mayor o menor especialización en este tipo de problemas, creemos interesante que el personal del grupo sanitario conozca este tipo de tratamientos.

ATENCION AL PACIENTE IRRADIADO

Los principios generales que rigen las acciones a desarrollar cuando una persona se expone a altos niveles de radiación, se basan en los conocimientos adquiridos con animales y a partir de casos clínicos.

Debe quedar muy claro que los niveles de radiación que van a requerir una intervención médica, son muy superiores a los niveles de dosis permitidos en la legislación. Es decir, una persona que reciba unas dosis dentro de los límites, nunca necesitará tratamiento médico; a lo sumo un examen para comprobar su estado general de salud.

La actuación del médico debe ser bastante diferente según que nos encontremos con una irradiación parcial o total del organismo.

Irradiación parcial

En estos casos, no se requieren primeros auxilios. La persona expuesta deberá ser examinada por un especialista, que debe tratar los problemas que puedan surgir en las próximas semanas. Esos efectos tienen una relación clara con la dosis y para evaluarla correctamente debe esperarse la evolución de los efectos.

Por supuesto, hay un período de latencia hasta la aparición de los síntomas. Cuanto mayor sea la dosis, menor es el período de latencia. No obstante, el médico tiene tiempo para evaluar las indicaciones de tratamiento, y es inútil, si no peligroso, precipitarse en la actuación. Deben determinarse lo antes posible las condiciones de la irradiación para cuantificar la dosis recibida con exactitud.

Irradiación global

Al contrario que en el caso anterior, en una irradiación global con dosis alta, hay una serie de medidas inmediatas a tomar, que son fundamentales. Si esas medidas no se toman a tiempo se puede perder una gran información que sería de gran utilidad para emitir un diagnóstico y decidir un tratamiento.

Las acciones a tomar dependen de la magnitud de la exposición y por eso debemos conocer ciertos niveles críticos.

Por ejemplo, para una dosis única en poco tiempo a todo el cuerpo, el riesgo de muerte comienza alrededor de 2 Gy (200 rad). (Si se trata de radiación gamma 2 Sv (200 rem).

Otros niveles a tener en cuenta son los siguientes: con dosis por debajo de 1 Gy (10 rad) el daño producido es casi con toda seguridad, recuperable. Entre 1 Gy y 2,5 Gy (100 y 250 rad) el síndrome de radiación es de intensidad moderada y la recuperación es probable siempre que la tasa de células en sangre no disminuya exageradamente.

Entre 2,5 Gy y 5 Gy (250 y 500 rad) todavía es posible recuperarse con un tratamiento especializado, aunque las probabilidades de recuperación son pocas.

A partir de 5 Gy (500 rad) la recuperación depende de muchos factores y se hace más difícil elegir el tratamiento adecuado. Por encima de los 10 Gy (1000 rad) el pronóstico es totalmente pesimista.

En función de los síntomas que presente el paciente se establecen cuatro categorías a bitrarias que pueden ayudar a acotar el tratamiento:

a) Hasta 1 Gy (100 rad), recuperación casi segura (Tabla 8.1).

En este nivel no se presentan síntomas o se reducen a náuseas transitorias. Hay pocos cambios en la sangre (fundamentalmente granulo-citopenia y linfopenia) que en algunos casos se presentan junto con una suave trombocitopenia. Normalmente no se requiere tratamiento, aunque debe someterse al paciente a vigilancia médica durante varios días (al menos hasta que los datos dosimétricos confirmen el pronóstico clínico). No es necesaria la hospitalización del paciente para los análisis de sangre y orina adicionales.

b) Alrededor de 200 rad, recuperación probable (Tabla 8.2).

En este nivel siempre se presentan síntomas clínicos; la aparición de náuseas y vómitos es rápida (entre 2 y 6 horas) pero casi nunca dura más de dos días. Los cambios en el hemograma son superiores a los descritos en el punto anterior.

Normalmente se produce la recuperación, pero la posibilidad de aparición de efectos tardíos en las siguientes 3-6 semanas, obliga a un control médico estricto. Se hace necesario el traslado del paciente a un centro especializado pero, al no ser una situación de gran urgencia, permite llevar a cabo la toma de las muestras biológicas indicadas, así como velar por la comodidad del paciente durante el traslado.

c) Dosis entre 250 y 500 rad., recuperación posible pero poco probable (Tabla 8.3 y 8.4).

Estas dosis ya se encuentran en las proximidades de la DL_{50} para el hombre. Los síntomas son siempre de gravedad y hay pruebas rápidas de laboratorio que indican el daño. El pronóstico se basa en la rapidez de aparición de los síntomas y en la severidad y velocidad de aparición de cambios en la sangre. Debe realizarse la evacuación del paciente con toda urgencia (a un centro especializado), a no ser que requiera atención médica inmediata por otras causas además de la radiación (heridas o fracturas, etc.).

En caso de shock traumático, deben administrarse analépticos y/o vasopresores. Puede hacerse con precaución una perfusión de plasma o administrar sustitutos macromoleculares. Dado que va a confundir el cuadro clínico, **NUNCA DEBE REALIZARSE UNA TRANSFUSION DE SANGRE**, a no ser que corra peligro la vida del paciente.

d) Dosis superiores a 500 rad. (Tablas 8.5., 8.6., 8.7., 8.8. y 8.9.)

En este estado, la supervivencia es imposible sin un tratamiento. El diagnóstico se basa fundamentalmente en un descenso casi inmediato de la tasa de linfocitos, que llega a valores extremadamente bajos en pocas horas. Por lo demás, el tratamiento es similar al indicado en el apartado anterior.

En todos los casos, hay algunas pruebas que son obligatorias. Un examen médico es de gran importancia, y debe ser exhaustivo, sin olvidar ningún órgano o sistema. Debe prestarse especial atención al examen de la piel para detectar algún posible eritema o edema. El síntoma, sin embargo, puede ser transitorio.

De la misma forma es muy importante un examen del tracto digestivo prestando especial atención a los casos más graves indicados por diarreas y vómitos precoces y repetidos. Es importante, si es posible, determinar con precisión el intervalo de tiempo transcurrido entre la exposición y la emesis.

El examen médico puede dar resultados negativos, pero la ausencia de síntomas no debe tomarse como indicación de una baja exposición, a no ser que los análisis biológicos lo confirmen.

Los análisis biológicos son esenciales: inmediatamente después de la irradiación deben tomarse muestras de sangre y orina del paciente para usarlas como referencia posteriormente. Deben efectuarse también exámenes periféricos con numeración diferencial y absoluta de glóbulos blancos y de plaquetas. Los ensayos standard deben repetirse varias veces en el primer día. Un ensayo repetido cada 3 horas debe proporcionar un pico leucocitario (durante las 36 horas subsiguientes a la irradiación). La técnica de muestreo biológico debe aplicarse rigurosamente y los procedimientos seguidos al pie de la letra.

Una irradiación accidental puede afectar a varias personas al mismo tiempo. En dicha situación, la primera tarea del médico y el servicio es separar las víctimas según las dosis recibidas. Esto presenta bastante dificultad en la práctica, pues en las primeras horas no hay síntomas, excepto en los casos más graves.

Hay, además, un elemento psicológico que viene a complicar la situación, pues es difícil en ocasiones atribuir un determinado síntoma subjetivo a la irradiación o a factores emocionales. Debe evitarse confundir por exceso de celo, a una persona sana con una enferma. No debe olvidarse que pueden ser momentos de cierta confusión si son varias las personas afectadas.

Muestras que deben tomarse en caso de irradiación externa

En todos los casos deben tomarse muestras. Se recuerda que deben seguirse cuidadosamente las técnicas y los procedimientos.

SANGRE: La sangre se usa para:

- a) Ensayos hematológicos: cantidad diferencial y absoluta de glóbulos blancos y plaquetas; valor hematocrito, hemograma y hemoglobina.
- b) Medidas bioquímicas: balance electrolítico.
- c) Análisis cromosómico: cultivos de linfocitos para análisis de roturas en cromosomas, utilizando, si es posible, la técnica de "banding".

Las muestras a tomar serán las siguientes, mediante pinchazo en la vena previa desinfección con alcohol o alcohol-éter, **NUNCA YODO**:

1. De 2 a 5 ml. en EDTA anhidro (2 mg. por cada ml. de sangre); agitar inmediatamente; preparar muestras en portaobjetos, apuntando la fecha, la hora y el nombre del paciente.
2. 5 ml. con heparina (1.25 mg.), para estudio electrolítico.
3. 10 ml. con heparina (2.50 mg.) en un frasco estéril herméticamente cerrado, para citogénesis.
4. Aspiración de médula ósea (*habitualmente no hay tiempo para ello*).

El ensayo 1., debería repetirse varias veces durante las primeras 6 horas. Diariamente debe obtenerse, en el centro especializado, la cantidad de linfocitos.

Los ensayos citogenéticos deben repetirse en el centro especializado para confirmar los resultados. Si ha de hacerse un envío a un laboratorio, debe consultarse un citogenetista.

ORINA: La primera orina después del accidente es muy importante y, por lo tanto, no debe mezclarse con el resto de muestras del primer día. Debe registrarse la hora de la toma de muestra. Asimismo debe tenerse gran cuidado para no contaminar la muestra con elementos radiactivos. Las muestras deben guardarse en frío, preferiblemente en una nevera.

DATOS DOSIMÉTRICOS: Las muestras biológicas deben tomarse al mismo tiempo que el resto de datos de dosimetría física referentes a la fuente de exposición, radiación ambiental, parámetros geométricos individuales y, sobre todo, las horas deben ser conocidas lo más exactamente posible. Se ha comprobado que es muy difícil evaluar posteriormente la duración de la exposición.

Precauciones que deben tomarse en caso de hospitalización

En algunos casos, se hace necesaria la hospitalización del paciente irradiado, en general por dos razones: la propia gravedad o naturaleza del accidente que requiera un tratamiento de gran complejidad, o simplemente por conveniencia, con la finalidad de realizar evaluaciones clínicas y biológicas que requieren los servicios de varios especialistas.

En el caso de un paciente irradiado no son necesarias medidas de protección para las instalaciones del hospital ni para el personal médico. Dado que los casos de exposición al cuerpo entero son muy raros y no es necesaria gran urgencia en el sentido médico, no merece la pena que exista en el hospital una habitación permanentemente preparada para recibir a pacientes irradiados. Sin embargo, dada la rareza de dichos casos y la posibilidad de que revistan gravedad, es necesaria la existencia de un plan de actuación coherente y coordinado. En particular es necesario compaginar las acciones de los diferentes servicios especializados que se verán involucrados en el tratamiento.

Los servicios que se van a necesitar son numerosos y, en ocasiones bastante apartados unos de otros y es esencial que exista alguna unión entre todos ellos. Los servicios más importantes serán: dermatológicos, neurológicos, gastroenterológicos, cardiológicos, odontológicos y otorrinolaringológicos, así como una unidad eficaz de reanimación y una serie

de biólogos que abarquen campos como patología en sus formas más especializadas tales como la citogenética, bacteriología, inmunología cinética, celular e histopatología.

El hospital ideal para el tratamiento de una persona víctima de una gran irradiación al cuerpo entero es uno para quemados, pues allí se está bastante familiarizado con las técnicas de aislamiento y asepsia. Un problema importante es el de confinar o no al paciente en un ambiente estéril. Como es impensable tener una habitación permanentemente reservada como recinto estéril, es quizá preferible disponer de recinto de plástico que se pueda montar en cualquier habitación rápidamente. Este equipo debería revisarse periódicamente cuando no se use (permanecerá entonces plegado), y deberá tener su propio sistema de filtración que se mantendrá en sobrepresión respecto al exterior.

La elección entre un aislamiento estéril o simplemente frente a infecciones exógenas (las de origen dental no deben descuidarse) se deja para el especialista o grupo de especialistas a cargo del paciente. En cualquier caso, además de personal especializado, el hospital debe tener otras instalaciones disponibles, incluyendo como mínimo un medio de aislamiento del paciente.

Aunque un paciente aislado no debería, como regla general, abandonar el aislamiento durante toda la enfermedad, y son los especialistas lo que deben visitarlo, es deseable su envío a casa hasta que posteriores cambios en la sangre indiquen que necesita hospitalización de nuevo (alrededor del vigésimo primer día). Dado que no debe exponerse un paciente sin defensas al posible ataque de microorganismos, sería conveniente disponer de un sistema sellado de transporte individual. En cualquier caso es realmente aconsejable disponer los medios para que el paciente tenga algunos contactos, aunque sólo sean audiovisuales, con su familia, para evitar problemas psicológicos.

De lo dicho puede deducirse que el tipo de instalaciones y equipos médicos son muy parecidos, si no coincidentes, con aquellos hospitales que, al ser capaces de realizar operaciones de transplantes de órganos o de médula ósea, están dotados de zonas estériles.

Tratamiento inicial de pacientes irradiados a todo el cuerpo (irradiación global).

Los determinantes primarios de la supervivencia entre la mayoría de los pacientes que hubieran recibido dosis intermedias de radiación (que son serias pero no totalmente fatales) son:

- El tratamiento de las infecciones microbianas.
- La detención de las hemorragias.

Si el paciente ha recibido una dosis intermedia pero en los valores más altos, la pérdida de fluidos será la causa de un desenlace fatal. Para un caso que recibiera una dosis global subletal, los efectos sobre el tracto gastrointestinal predominan en los dos primeros días. En ese período el uso de antieméticos (metoclopramida y dazoprida) pueden ser efectivos en reducir tales síntomas; sin embargo, estas drogas actualmente disponibles tienen efectos secundarios significativos. A menos que el grado de irradiación sea severo, los síntomas disminuirán en el primer día post-irradiación. Para un paciente que continúa experimentando deterioro gastrointestinal, debería considerarse la vía parenteral. Si se produce una diarrea explosiva dentro de la primera hora post-exposición es probable que sea debido a una dosis fatal.

El soporte cardiovascular para pacientes con disfunción neurológica e hipotensión significativas debería abordarse únicamente si los recursos disponibles y el cuerpo médico lo permiten. Ya que la probabilidad de supervivencia de estos pacientes es muy baja al combinarse el daño de los sistemas vasculares y gastrointestinales con la aplasia medular.

A pesar de la existencia de potentes antibióticos, la infección debida a agentes patógenos oportunistas es todavía un problema serio.

La mayoría de estos organismos son Gram-negativos, incluyendo *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*. Estas infecciones son consecuencia de la profunda inmunosupresión y colonización anormal de las superficies corporales e instrumental médico.

Las superficies corporales susceptibles incluyen el árbol orofaríngeo-respiratorio y los testinos. Las zonas con heridas o llagas y los aparatos invasivos artificiales tales como los catéteres son también importantes fuentes de infección. Las infecciones pueden ser prevalentes y severas si los pacientes son mantenidos durante largos períodos en ambientes que contengan agentes patógenos resistentes a los antibióticos.

Tanto el desbridamiento de heridas con el vendaje y, cuando sea necesario, el uso de antibióticos, son elementos clave en el control de la infección.

Los antibióticos, preferiblemente en combinaciones terapéuticas (ver tabla 8.10) deberían ser rápidamente empleados para tratar cualquier síntoma febril.

Cuando aparezcan los síntomas de infección en un paciente granulocitopénico, el tratamiento debería comenzar sin esperar a cultivo ni estudios de sensibilidad. Los organismos prevalentes y los modelos de susceptibilidad microbiana de cada instalación médica en particular deberían ser también considerados.

En el momento presente, las drogas más a menudo utilizadas para tratamiento inicial son penicilinas sintéticas tales como Ticarcilina combinada con un aminoglucósido como Tobramicina. Se recomienda el tratamiento confirmado con ambos hasta que el nivel de granulocitos se sitúe en más de 500, o bien tratar durante dos semanas y parar, aun cuando todavía sea bajo el recuento de leucocitos, siempre que los signos de infección hayan terminado.

Conclusiones

- Debe tenerse muy clara la diferencia, en todos los aspectos, entre una irradiación parcial y una global.
- En términos generales no hay necesidad de una acción terapéutica inmediata.
- Debe afinarse al máximo en la evaluación de la dosis para tener los datos más exactos posibles.
- Excepto en casos muy agudos o fatales, el tratamiento se adaptará adecuadamente al cuadro clínico.
- Esta situación no se corresponde con una emergencia en el sentido médico del término.
- La radiación actúa sinérgicamente con otras enfermedades al afectar la respuesta inmunitaria lo que además permite las infecciones oportunas.

TABLA 8.1.

SINTOMAS EN EL INTERVALO DE DOSIS DE 50 A 100 cGy (rad)

Síntoma	Tiempo postexposición																		
	Horas						Días					Semanas							
	0	4	8	12	16	20	24	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5
Náusea	— 5-30% débil —																		
Vómito (arcadas)	— 5-20% débil —																		
Anorexia	— 15-50% —																		
Diarrea																			
Fatiga																			
Debilidad																			
Hipotensión																			
Mareo																			
Desorientación																			
Hemorragia																			
Fiebre																			
Infección	— (a) —																		
Ulceración																			
Pérdida de fluidos/descompensación electrolítica																			
Cefalalgia																			
Lipotimia (desmayo)																			
Muerte																			

(a) Ligera caída en el conteo de linfocitos, plaquetas y granulocitos; síntomas no claros.

TABLA 8.2.

SINTOMAS EN EL INTERVALO DE DOSIS DE 100 A 200 cGy (rad)

Síntoma	Tiempo postexposición																		
	Horas						Días					Semanas							
	0	4	8	12	16	20	24	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5
Náusea	— 30 a 70% leve a moderada —																		
Vómito (arcadas)	— 20 a 50% leve a moderado —																		
Anorexia	— 50 a 90% —																		
Diarrea (a)																			
Fatiga	— 30 al 60% leve a moderada — leve																		
Debilidad	— 30 al 60% leve a moderada — leve																		
Hipotensión																			
Mareo																			
Desorientación																			
Hemorragia																			
Fiebre	— (b) — —10% leve—																		
Infección	— (c) — —10-50%—																		
Ulceración	— (d) — leve a moder.																		
Pérdida de fluidos/descompensación electrolítica																			
Cefalalgia																			
Lipotimia (desmayo)																			
Prostración																			
Muerte																			

(a) El 10% de las víctimas de las Islas Marshall expuestas 175 cGy experimentaron diarrea durante el primer día post-exposición.

(b) Ligera a moderada caída en la cuenta de plaquetas: de $3 \times 10^9/\text{mm}^3$ a $1.8-0.8 \times 10^9/\text{mm}^3$.

(c) Ligera a moderada caída en la cuenta de granulocitos: de $6 \times 10^3/\text{mm}^3$ a $4.5-2.0 \times 10^3/\text{mm}^3$.

(d) Ligera a moderada caída en la cuenta de linfocitos: de $3 \times 10^3/\text{mm}^3$ a $2.0-1.0 \times 10^3/\text{mm}^3$.

TABLA 8.3.

SINTOMAS EN EL INTERVALO DE DOSIS DE 200 A 350 cGy (rad)

Síntoma	Tiempo postexposición																			
	Horas							Días							Semanas					
	0	4	8	12	16	20	24	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6
Náusea	— 70-90% moderada —																			
Vómito (arcadas)	— 50-80% moderado —																			
Anorexia	— 90-100% —																			
Diarrea (a)	— 10% moderada — Moderada → 40-60% —																			
Fatiga	— 60-90% moderada — Leve — Moderada —																			
Debilidad	— 60-90% moderada — Leve — Moderada —																			
Hipotensión																				
Mareo																				
Desorientación																				
Hemorragia	— (a) — 10-50% moder. —																			
Fiebre	— (b) — 10-50% mo. —																			
Infección	— (d) — —																			
Ulceración	— 30% mod. —																			
Pérdida de fluidos/descompensación electrolítica																				
Cefalalgia																				
Lipotimia (desmayo)																				
Postración																				
Muerte	≤ 5-50% →																			

- (a) Moderada caída en la cuenta de plaquetas: de $3 \times 10^5/\text{mm}^3$ a $0.8-0.1 \times 10^5/\text{mm}^3$.
- (b) Moderada caída en la cuenta de granulocitos: de $6 \times 10^3/\text{mm}^3$ a $2.0-0.5 \times 10^3/\text{mm}^3$.
- (c) Ligera a moderada caída en la cuenta de linfocitos: de $3 \times 10^3/\text{mm}^3$ a $1.0-0.4 \times 10^3/\text{mm}^3$.
- (d) Epilación

TABLA 8.4.

SINTOMAS EN EL INTERVALO DE DOSIS DE 350 A 550 cGy (rad)

Síntoma	Tiempo postexposición																			
	Horas							Días							Semanas					
	0	4	8	12	16	20	24	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6
Náusea	— 90-100% severa moderada — 60-100% moderada —																			
Vómito (arcadas)	— 80-100% severo moderado — 60-100% moderada —																			
Anorexia	— 100% — 100% —																			
Diarrea (a)	— 10% moderada a severa — 60-100% moderada a severa —																			
Fatiga	— 90-100% moderada a severa —																			
Debilidad	— 90-100% moderada a severa —																			
Hipotensión																				
Mareo	— 60% moderado —																			
Desorientación	— 60% moderado —																			
Hemorragia	— (a) - 50-100% moderada a severa —																			
Fiebre	— (b) - 80-100% moderada a severa —																			
Infección	— (c) —																			
Ulceración	— (d) - 50% leve a moderada —																			
Pérdida de fluidos/descompensación electrolítica	— 50% leve a moderado — (e)-50% mod. —																			
Cefalalgia	— 50% leve a moderada — (e)-50% mod. —																			
Lipotimia (desmayo)	(e)-50% mod. —																			
Postración	(e)-50% mod. —																			
Muerte	— 50-99% —																			

- (a) Severa caída en la cuenta de plaquetas: de $3 \times 10^5/\text{mm}^3$ a $0.1 \times 10^5/\text{mm}^3$.
- (b) Severa caída en la cuenta de granulocitos: de $6 \times 10^3/\text{mm}^3$ a $0.5 \times 10^3/\text{mm}^3$.
- (c) Severa caída en la cuenta de linfocitos: de $3 \times 10^3/\text{mm}^3$ a $0.4-0.1 \times 10^3/\text{mm}^3$.
- (d) Epilación
- (e) Leve daño intestinal

TABLA 8.5.

SINTOMAS EN EL INTERVALO DE DOSIS DE 550 A 750 cGy (rad)

Síntoma	Tiempo postexposición																		
	Horas						Días						Semanas						
	0	4	8	12	16	20	24	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5
Náusea	----- severa 100% moderada a severa -----																		
Vómito (arcadas)	----- severo 100% moderado a severo -----																		
Anorexia	----- 100% -----																		
Diarrea	----- 10% moderada a severa ----- 100% ----- moderada a severa																		
Fatiga	----- 100% severa -----																		
Debilidad	----- 100% severa -----																		
Hipotensión	----- ----- 100% severa																		
Mareo	----- 100% severo -----																		
Desorientación	----- 100% severa -----																		
Hemorragia	----- ----- (a) ----- 100% severa																		
Fiebre	----- ----- (b) ----- 100% severa																		
Infección	----- ----- (c) -----																		
Ulceración	----- ----- (d) ----- 100% severa																		
Pérdida de fluidos/descompensación electrolítica	----- 80% moderado ----- (e) ----- 80% mod. a severo																		
Cefalalgia	----- 80% ----- 100% mod. a severa																		
Lipotimia (desmayo)	----- ----- 80% mod. a severa																		
Postración	----- ----- 80% mod. a severa																		
Muerte	----- ----- 100%																		

- (a) Caída en la cuenta de plaquetas próximamente a cero.
- (b) Caída en la cuenta de granulocitos próximamente a cero.
- (c) Caída en la cuenta de linfocitos próximamente a cero.
- (d) Epilación
- (e) Moderado daño intestinal

TABLA 8.6.

SINTOMAS EN EL INTERVALO DE DOSIS DE 750 A 1000 cGy (rad)

Síntoma	Tiempo postexposición																		
	Horas						Días						Semanas						
	0	4	8	12	16	20	24	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5
Náusea	----- 100% severa -----																		
Vómito (arcadas)	----- 100% severo -----																		
Anorexia	----- 100% severa -----																		
Diarrea	----- 10% severa ----- 100% severa -----																		
Fatiga	----- ----- 100% severa -----																		
Debilidad	----- ----- 100% severa -----																		
Hipotensión	----- ~80% leve (a) -----																		
Mareo	----- 100% severo -----																		
Desorientación	----- 100% severa -----																		
Hemorragia	----- ----- (b) ----- 100% severa																		
Fiebre	----- ~30-45% moderada (a) ----- (c) ----- 100% severa																		
Infección	----- ----- (d) -----																		
Ulceración	----- ----- (e) ----- 100% severa																		
Pérdida de fluidos/descompensación electrolítica	----- 100% moderado (f) ----- 100% severo																		
Cefalalgia	----- 100% moderada a severa ----- 100% severa																		
Lipotimia (desmayo)	----- ----- 70% mod. a severa																		
Postración	----- ----- 70% mod. a severa																		
Muerte	----- ----- 100%																		

- (a) Caída de la presión sanguínea a un 25%; aumento de la temperatura a 39 °C.
- (b) Caída en la cuenta de plaquetas a cero.
- (c) Caída en la cuenta de granulocitos a cero.
- (d) Caída en la cuenta de linfocitos a cero.
- (e) Epilación
- (f) Moderado a severo daño intestinal

TABLA 8.7.

SINTOMAS EN EL INTERVALO DE DOSIS DE 1000 A 2000 cGy (rad)

Síntoma	Tiempo postexposición																		
	Horas						Días							Semanas					
	0	4	8	12	16	20	24	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5
Náusea	100% severa													100% severa					
Vómito (arcadas)	100% severo													100% severo					
Anorexia	100%													100%					
Diarrea	20% severa						100% severa												
Fatiga							100% severa												
Debilidad							100% severa												
Hipotensión							100% moderada a severa												
Mareo							100% severo												
Desorientación							100% severa												
Hemorragia														100% severa					
Fiebre	45-80% mod. a severa													100% severa					
Infección							(a)												
Ulceraación							(b)												
Pérdida de fluidos/descompensación electrolítica	100% moderado a severo						(c)							100% severa					
Cefalalgia	100%						(d)							100% severo					
Lipotimia (desmayo)														100% severa					
Prostración														80% severa					
Muerte							(e)							100%					

- (a) Caída en la cuenta de plaquetas a cero.
- (b) Caída en la cuenta de granulocitos a cero.
- (c) Caída en la cuenta de linfocitos a cero.
- (d) Severo daño intestinal.
- (e) Fallo renal.

TABLA 8.8.

SINTOMAS EN EL INTERVALO DE DOSIS DE 2000 A 3000 cGy (rad)

Síntoma	Tiempo postexposición																		
	Horas						Días							Semanas					
	0	4	8	12	16	20	24	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5
Náusea	100% severa																		
Vómito (arcadas)	100% severo																		
Anorexia	100%																		
Diarrea	30% severa													100% severa					
Fatiga							100% severa												
Debilidad							100% severa												
Hipotensión							100% severa												
Mareo							100% severo												
Desorientación							100% severa												
Hemorragia																			
Fiebre	80-90% mod. a severa													(a)					
Infección	80-90% mod. a severa													(b)					
Ulceraación																			
Pérdida de fluidos/descompensación electrolítica	100% severo																		
Cefalalgia	100% severa																		
Lipotimia (desmayo)														100% severa					
Prostración														100% severa					
Muerte														100%					

- (a) Caída granulocitos a cero.
- (b) Caída en la cuenta de linfocitos a cero.

TABLA 8.9.**INTERVALOS DE DOSIS Y SUCESOS FISIOPATOLÓGICOS ASOCIADOS**

Rango de Dosis cGy (rads)	Sucesos Fisiopatológicos		
	Efectos Prodrómicos	Manifestación y Efectos de la Enfermedad	Supervivencia
50- 100	Leve	Ligera disminución de células en sangre	Prácticamente segura
100- 200	Leve a Moderado	Síntomas iniciales de daño de la médula ósea	Probable (> 90%)
200- 350	Moderado	Daño de severo a moderado de la médula ósea	Posible: Tercio menor del intervalo LD _{5/60} Tercio medio: LD _{10/60} Tercio neto: LD _{50/60}
350- 550	Severo	Daño severo de médula ósea	Muerte entre 3,5-6 semanas Mitad inferior: LD _{90/60} Mitad superior: LD _{99/60}
550- 750	Severo	Pancytopenia de la médula ósea y moderado daño intestinal	Muerte entre 2-3 semanas
750-1000	Severo	Daño combinado gastrointestinal y médula ósea; hipotensión	Muerte entre 1-2,5 semanas
1000-2000	Daño severo gastrointestinal; próxima a la incapacidad transitoria; muerte gastrointestinal		Muerte entre 5-12 días
2000-3000	Daño gastrointestinal y cardiovascular		Muerte entre 2-5 días

TABLA 8.10**TERAPIA ANTIBIÓTICA SISTEMÁTICA**

1. Aminoglucósidos, tales como Gentamicina, Netilmicina, Tobramicina y Amikacina son los más efectivos.
2. Ureidopenicilinas, tales como Ticarcilina y Piperacilina, son menos efectivos que los Aminoglucósidos pero son sinérgicos con ellos contra los entéricos Gram-negativos.
3. Monobactámicos, son menos efectivos contra los entéricos Gram-negativos que los aminoglucósidos pero no tienen la toxicidad renal de éstos.
4. Penicilinas resistentes a beta-lactamasas, tales como Meticilina o Dicloxicilina, efectivas contra el *Staphylococcus aureus*; la Vancomicina puede ser administrada para terapia de *S. aureus* de cepas resistentes a la Meticilina.
5. Imipenem (combinado con Cilastatin) efectivo contra organismos Gram-positivos y Gram-negativos, así como bacterias anaerobias; sin embargo, algunas cepas de *Pseudomonas* pueden serle resistentes.

TERAPIA COMBINADA

Se han propuesto varias combinaciones para la terapia de infección mezcla de agentes aerobios y anaerobios o para la terapia de agentes Gram-negativos en pacientes comprometidos; tales son:

- Infección Gram-negativa
 - 1 + 2
 - 1 + Cefalosporinas (2.^a o 3.^a generación); 1 + 3
- Infección Gram-positiva
 - 4 + 1
- Infecciones mezcla de aerobios y anaerobio:
 - 1 + Clindamicina + Cefoxitina o Metronidazol

ANEXO. LISTAS DE CHEQUEO

LISTA DE CHEQUEO - A

ACCIONES A TOMAR DESPUES DE UNA EXPOSICION GLOBAL A LA RADIACION

1. Tiempo post-exposición: 0 - 6 horas

— Gestión médica:

- * Tratamiento de urgencia a daños asociados.
- * Chequeo de una posible contaminación externa severa; si ésta se presenta, despojar de sus ropas al paciente y descontaminar las áreas afectadas.
- * Sedación suave de náuseas y/o vómitos.

— Observación clínica

- * Recoger la información dosimétrica previa.
- * Interrogar al paciente sobre las circunstancias y transmitir la información al equipo de evaluación dosimétrica.
- Si se sospecha una dosis superior a 0,25 Gy (25 rad) comenzar la observación clínica.
- * Hacer una prognosis provisional de los síntomas, conteo de células en sangre, relato del paciente del accidente y cualquier información de dosimetría física.
- * Realizar un examen clínico atendiendo particularmente a los síntomas críticos (malestar general, náuseas, vómitos, etc.), siendo rara su aparición para dosis inferiores a 50 rad. Si aparecen para estas dosis es muy posible que sean de origen psíquico por las circunstancias del accidente o de la persona.

— Investigaciones biológicas

- * Tomar y guardar muestras de orina.
- * Tomar muestras de sangre para conteo inmediato de células y análisis bioquímico.
- * Tomar sangre para cultivo de linfocitos y análisis cromosómico.
- * Si se produce una exposición general es conveniente efectuar un seguimiento de los linfocitos, que son los más sensibles a la irradiación, pudiendo descender un 30% al tercer y quinto día posteriores a la irradiación para dosis inferiores a 50 rad. El descenso de los trombocitos (al trigésimo día) o granulocitos (al tetragésimo día) es más raro para dosis inferiores a 50 rad. Por ello, es aconsejable un seguimiento diario de la serie blanca durante la primera semana, una vez/semana durante un mes, una vez/mes durante un año y una vez/semestre durante dos años.

— Estudios dosimétricos

- * Recoger y procesar todos los dosímetros personales de los individuos expuestos y acompañantes.
- Realizar selección de las observaciones.
- * Chequear cualquier registro de equipo instalado en las proximidades de la sobreexposición.
- Realizar una primera evaluación del tipo y distribución de la radiación y de los niveles de dosis e informar al médico.

- Identificar cualquier región del paciente en la que puedan haberse recibido dosis más altas que el promedio.

- Interrogar a los acompañantes.

- Acción administrativa

- * Investigación detallada de las circunstancias.

2. Tiempo post-exposición: 6 a 71 horas

- Gestión médica

- * Si se sospecha una dosis absorbida superior a 1 Gy (100 rad) dar tratamiento sintomático y sedación y transferir al paciente a un hospital especializado.

- * Si la dosis absorbida es menor que 1 Gy (100 rad) se realizará una vigilancia clínica ambulatoria.

- Observación clínica

- Realizar un examen clínico sistemático y completo, con atención particular a los síntomas críticos (eritema, signos neumológicos, náuseas, vómitos).

- * EEG o ECG.

- Investigaciones biológicas

- * Muestras de orina diaria.

- * Muestras de sangre (3 veces las primeras 24 horas y después diaria) para estudios hematológicos, bioquímicos, y cromosómicos.

- Estudios dosimétricos

- * Realizar una vigilancia del paciente incluyendo contaje del cuerpo entero si el médico lo permite.

- * Revisión de todos los datos y reevaluación de los niveles de dosis y su distribución aproximada.

- * Si las dosis son muy altas pensar en una posible reconstrucción del accidente.

- Acción administrativa

- * Discusión del probable curso del accidente.

3. Tiempo post-exposición: Después de 72 horas y siguientes

- Gestión médica y observaciones clínicas

- * Vigilancia médica ambulatoria durante una semana, o más tiempo si se considera necesario.

- * Dar de alta al paciente tan pronto como sea apropiado.

- * Organizar la continuación de la vigilancia médica.

- * Consulta médica sobre futura vigilancia.

- Investigaciones biológicas

- * Reevaluación de las dosis y de la prognosis a partir de los estudios cromosómicos, de dosimetría física y el curso clínico.

- * Continuar, si es necesario, las muestras diarias de sangre para contaje celular y repetir los análisis bioquímicos.

- * Tomar muestras de orina para compensaciones de resultados bioquímicos.
- Estudios dosimétricos
- * Comparar las estimaciones de dosis media de la dosimetría física con las de los estudios cromosómicos, resultados bioquímicos y contaje de células en sangre.
- * Revisar las implicaciones de cualquier discrepancia, debido a que el accidente pudo ser más complicado de lo que se pensó en un principio.
- * Conducir una reconstrucción del accidente, si es necesario.
- * Realizar una revisión final de los niveles y distribución de las dosis.
- Acción administrativa
- * Consideraciones médico-legales

LISTA DE CHEQUEO - B

ACCIONES A TOMAR DESPUES DE UNA EXPOSICION EN LAS MANOS

1. Tiempo post-exposición: 0 a 6 horas
 - Observación clínica
 - * Interrogar a la persona afectada sobre el accidente.
 - * Examen cuidadoso de la piel.
 - * Tomar fotografías en color.
 - Estudios dosimétricos
 - Procesar la dosimetría personal.
 - * Determinar la dosis absorbida.
 - Acción administrativa
 - * Investigación detallada de las circunstancias.
2. Tiempo post-exposición: 6 a 71 horas
 - Gestión médica
 - * Envío del paciente a un centro especializado.
 - Observación clínica
 - * Repetición del examen de piel y fotografías.
 - Estudios dosimétricos
 - * Reconstrucción del accidente.
3. Tiempo post-exposición: 72 horas en adelante
 - Observación clínica
 - * Examen piel, fotografías; durante varios meses.
 - Estudios dosimétricos
 - * Estimación final de la dosis.
 - Acción administrativa
 - Considerar aspectos médico-legales.

LISTA DE CHEQUEO - C

ACCIONES A TOMAR DESPUES DE UNA EXPOSICION DE LA CARA A LA RADIACION

1. Tiempo post-exposición: 0 a 6 horas

— Gestión médica

- * Tratamiento sintomático de los síntomas neurológicos.
- * En caso de alta dosis transferir a hospital especializado.

— Observación clínica

- * Recolección de información dosimétrica preliminar.
- * Observación clínica de: desorientación, ataxia, sensación de quemazón, shock, etc.
- * EEG.

— Investigaciones biológicas

- * Tomar y guardar muestras de orina.
- * Tomar muestras de sangre para conteo inmediato de células y análisis bioquímico.
- * Tomar sangre para cultivo de linfocitos y análisis cromosómico.

— Estudios dosimétricos

- * Determinación de dosis absorbida, utilizando la dosimetría personal o los registros de detectores próximos de modo que se puedan realizar evaluaciones de los niveles y distribución de las dosis así como la existencia o no de regiones del paciente con dosis más elevadas que el promedio.

— Acción administrativa

- * Investigación detallada de las circunstancias

2. Tiempo post-exposición: de 6 a 71 horas

— Observación clínica

- * Repetir examen clínico (eritema, edema, conjuntivitis)

— Investigaciones biológicas

- * Recoger muestras de orina y sangre del tercer al cuarto día para los exámenes bioquímicos y hematológicos.

— Estudios dosimétricos

- * Reconstrucción del accidente.

— Acción administrativa

- * Consideración de las consecuencias médico-legales

3. Tiempo post-exposición: 72 horas en adelante

— Observaciones clínicas

- * Vigilancia médica ambulatoria.

TEMA - 9. ATENCION AL PACIENTE CONTAMINADO

INTRODUCCION

A pesar del gran incremento producido en el uso industrial de fuentes radiactivas no encapsuladas y, por tanto, del riesgo de contaminación por radionucleidos, los casos que se han presentado hasta la actualidad son pocos.

Pero existen instalaciones que, dada la enorme cantidad de material radiactivo que emplean, presentan más riesgo de contaminación para sus trabajadores. Esto es el caso de las centrales nucleares, las instalaciones de reprocesado de combustible irradiado y los grandes almacenamientos de residuos radiactivos.

Salvo casos graves y muy improbables de accidente nuclear, el médico probablemente no tendrá que poner en práctica los conocimientos adquiridos con este texto, pero es imprescindible un acercamiento a los últimos conocimientos en el tratamiento a las personas contaminadas, principalmente en casos de contaminación interna. Debe tenerse muy presente que las técnicas o productos aquí descritos son, en su mayoría, objeto de continuas investigaciones y puestas al día, por lo que el personal médico interesado no debe descuidar la actualización de sus conocimientos consultando asiduamente las publicaciones sobre el tema.

CONTAMINACION EXTERNA

Entendemos por contaminación externa la presencia indeseada de radionucleidos en el exterior del organismo ya sea en la piel o en cualquier otro órgano externo. Normalmente el trabajador en una instalación nuclear o radiactiva irá provisto de un vestuario de trabajo, (en el caso del público, su propia ropa) que evitará el contacto de los contaminantes con grandes zonas cutáneas, pero accidentalmente puede llegar a verse afectada una zona de dimensiones más o menos grandes. Vamos a ir viendo progresivamente los tratamientos más adecuados y experimentados para eliminar dicha contaminación.

Descontaminación de la piel

El objetivo de la descontaminación de la piel es eliminar la mayor parte posible del radionucleido presente con el fin de disminuir la tasa de dosis superficial y evitar que los materiales radiactivos se introduzcan en el organismo.

Una buena limpieza de la piel aumentará la exactitud con la que podamos medir la actividad incorporada al organismo en un Contador de Radiactividad Corporal (si estuviera disponible) sin interferencias.

Es importante no exagerar el rigor del tratamiento, pues una agresión de la piel puede aumentar la absorción de contaminantes a través de la misma.

Principios físicos y biológicos

Muchos casos de contaminación de la piel con materiales radiactivos son descontaminados por personal no médico, por lo que los procedimientos de primera intervención en este caso no tienen por qué ser complejos.

Cuando los métodos iniciales de limpieza no son efectivos, el paciente debe enviarse al médico especialista cuyas decisiones en cuanto a los procedimientos de descontaminación estarán basadas en el correcto entendimiento de los principios físicos y biológicos involucrados en el proceso. El éxito en la descontaminación requiere una evaluación muy correcta del nivel de contaminación residual, tasa de descontaminación y condiciones de la piel del paciente. Estos factores cambian continuamente a medida que se avanza en la descontaminación.

El espesor total de la piel es del orden de 2 mm. El de la epidermis es de aproximadamente 0.1 mm. de profundidad en la mayoría de las partes del cuerpo. En las palmas de las manos y en las superficies palmares de los dedos, puede llegar a 0.8 mm., y en las plantas y los dedos de los pies, hasta 1.4 mm. debido a la capa córnea de mayor espesor. Para estimar las dosis a la piel el tejido más relevante es la capa de células basales situadas a una profundidad media de 0.7 mm., excepto en las palmas de las manos y las plantas de los pies como se ha dicho.

En la cara, el espesor de la capa de células basales es algo menor que en el resto del cuerpo. Los pequeños capilares de la dermis pueden dañarse cuando varios Grays de radiación beta de alta energía o rayos X o gamma alcanzan la piel.

La posibilidad de que se produzcan efectos biológicos a partir de la contaminación de la piel varía con el tipo de radiación y la energía. Frente a radiación alfa, la capa córnea protege la capa de células basales. Por ejemplo, las partículas alfa emitidas por el plutonio, que tienen un rango de aproximadamente 0.04 mm. en tejido blando, no alcanzan la capa de células basales de la epidermis. La contaminación con emisores alfa es de importancia, sin embargo, por la posibilidad de absorción a través de la piel si la forma química es apropiada y por la posible irradiación por radiación beta o gamma de los hijos del emisor alfa.

La contaminación desprendible con emisores alfa lleva consigo un riesgo de inhalación o incluso ingestión del material.

Un milímetro de tejido reducirá la mayor parte de las radiaciones beta a la mitad, de forma que *la dosis debida a contaminación beta es mucho menor en el tejido subcutáneo que en la epidermis*. La radiación beta con energía menor de 50 KeV no penetra la capa más externa de la piel y aquella de energía mayor de 200-300 KeV, se atenúan en gran medida. Por ejemplo, la tasa de dosis en la capa basal, debida a 1 μ Ci de C-14 (de energía media 50 KeV) *uniformemente distribuido en 1 cm²*, es de 1.7 rad/hora, mientras que para el P-32, con una energía media de 695 KeV, es de 6.4 rad/hora. Por tanto, la actividad superficial necesaria para producir daño agudo a la piel, es muy variable.

La radiación gamma de baja energía (10-15 KeV) tiene sobre la piel un efecto similar al de la radiación beta. La radiación gamma de 50-300 KeV de una fuente depositada en la piel, es capaz de producir efectos biológicos en las capas profundas de la piel y en el tejido subcutáneo.

La absorción percutánea es de tener en cuenta con todos los tipos de emisores y, cuando ocurre, la mayoría de las sustancias pasan a través de la epidermis antes que a través de las glándulas sudoríparas o folículos pilosos. La barrera más importante para la penetración es la capa córnea. Cuando la contaminación alcanza el fondo de esta capa, difunde rápidamente a través del resto de la epidermis y alcanza los capilares de las papilas dérmicas. Las zonas más profundas de la capa córnea poseen una gran capacidad para llenarse y vaciarse, al estilo de una esponja. Este proceso puede explicar por qué reaparece la contaminación alfa después de haber desaparecido. El nivel de contaminación alfa residual en la piel puede aumentar, por tanto, a las 24-48 horas de una descontaminación inicial satisfactoria.

La absorción percutánea es un proceso pasivo determinado por las propiedades físicas y químicas del contaminante y sus interacciones con la epidermis. El rango de permeabilidades de las diferentes sustancias es amplio (*entre 0.0007 y 1.100 mm/s*). La mayor parte de los disolventes acuosos están entre 0.5 y 10 mm/s mientras que los materiales no acuosos tienen permeabilidades entre 0.02 y 1.7 mm/s. El daño mecánico y la hidratación, aumentan la absorción mientras que las quemaduras de ácidos tienden a disminuirla. Las quemaduras de ácidos diluidos facilitan la absorción, al menos en el caso del plutonio. Dado que cada compuesto puede tener fases de penetración completamente

diferentes, no es muy útil hacer generalizaciones. Por ejemplo, el 10% de una solución acuosa de cloruro de Sr-89 aplicado en la piel, se absorbe rápidamente, mientras que se absorbe menos del 0.3% de una solución acuosa de yoduro potásico (I-131).

La absorción de plutonio en ácido nítrico 0.4 N, aplicado a la piel de la palma de la mano, es inferior al 0.0002%/hora.

Cuando la contaminación externa es especialmente peligrosa, por ejemplo con Pu-239, debe tenerse en cuenta la posibilidad de la absorción percutánea, y debe evitarse el deterioro de la capa córnea.

Los contaminantes pueden retenerse en la piel mediante fuerzas electrostáticas o tensión superficial. También pueden formarse compuestos químicos entre el contaminante y las proteínas de la piel. Con materiales de pequeño tamaño de partícula, puede ocurrir su detención en los planos hexagonales de la capa córnea. Aunque la contaminación puede ser difícil de eliminar por métodos físicos o químicos, la piel se limpiará sola pues la capa córnea se renovará en un ciclo de unos 15 días.

La tasa de renovación varía en las diferentes zonas de la piel. La piel de la frente se renueva mucho más rápido que la del dorso de la mano y ésta más que la de otras zonas. En general, la mayoría de la contaminación se limitará a la parte superior de la capa córnea, y será eliminada en pocos días.

Evaluación de la contaminación

Cuando se produce una contaminación accidental, debe medirse la radiación inicial con un detector de radiación alfa y beta-gamma.

La contaminación de la piel con emisores beta de bajas energías puede no detectarse por una persona sin experiencia en el manejo de dichos instrumentos. La medida debe iniciarse con la ventana abierta, de forma que se detecten tanto beta como gamma.

Los emisores beta son capaces de producir quemaduras si se produce una gran contaminación y la persona, sin advertirlo, permite que la contaminación permanezca en la piel o en un guante de cirujano durante un tiempo demasiado largo.

Otro método para determinar la distribución del material radiactivo en la piel es la autorradiografía alfa de alta velocidad, técnica en la cual el área contaminada se sitúa frente a una pantalla de centelleo de sulfuro de Zn y una película Polaroid durante unos pocos minutos. El tiempo de exposición necesario para conseguir la mejor visualización, depende del nivel de contaminación, y puede llevar cierto tiempo para experimentación.

Niveles de actuación

El médico o, en general, la persona encargada de realizar la descontaminación, desea saber cuándo debe detenerse sin riesgo el proceso de descontaminación y cuándo es inútil continuar el proceso. No sería nada práctico adoptar un nivel numérico rígido, pues ésto requeriría muchas suposiciones que no siempre se van a cumplir.

Debemos hacernos varias preguntas sobre el asunto:

¿Está confinada la contaminación en la superficie de la capa córnea?

¿Ha penetrado uniformemente a través de dicha capa o a través de la capa basal?

Si la contaminación se encuentra en la superficie o cerca de ella será eliminada con toda probabilidad en dos o tres días. Si se encuentra distribuida uniformemente por toda la capa córnea, la velocidad de eliminación será similar al tiempo de renovación de la propia capa córnea, del orden del 6 ó 7 por ciento al día.

Aplicase una solución preparada recientemente de bisulfito sódico al 5% (50 gr/litro de agua destilada) (se usa para eliminar los restos de permanganato).

Igual que la anterior. Prestar atención a los tiempos. Aplíquese crema de manos al terminar.

Las mismas.

Otra técnica para ayudar a la descontaminación de las manos y los pies, y en alguna ocasión para el resto del cuerpo, es conseguir que el afectado sude, de forma que se puedan eliminar contaminantes que hayan empezado a absorberse a través de la piel.

La forma es la siguiente:

Para los pies o las manos, forrarlos con plástico o introducirlos en guantes de goma, y acercarlos a una fuente de calor hasta que se vea que sudan profusamente. Para el cuerpo entero lo que se hace es indicar al afectado la realización de ciertos ejercicios que le provoquen el sudor (p.e. carreras).

El tiempo que debe transcurrir entre la provocación del sudor y la eliminación, debe ser el menor posible, pues puede volverse a absorber el contaminante nuevamente.

b) Contaminación del cabello

El cabello presenta una gran superficie útil para el depósito de materiales, por lo que en caso de contaminación, será realmente difícil de eliminar.

Naturalmente, es más difícil descontaminar un cabello largo y rizado que uno corto y liso. En todo caso debe recomendarse si existiese alto riesgo de contaminación, llevar el cabello corto, al tiempo que vestir adecuadamente algún tipo de cubrecabeza (pañuelo, gorra, capucha, sombrero etc.).

La forma de descontaminarlo es usando agua y jabón ácido, pudiéndose repetir la operación varias veces. Si persiste la contaminación, lavar de nuevo y aclarar con solución de ácido acético al 1% (o solución de ácido cítrico o clorhídrico al 1%), o frotar los cabellos con champú de "monoxidasa" o con solución de "Schubert". Si no baja la contaminación hasta límites aceptables, el cabello debe cortarse lo más posible y aplicar nuevamente las técnicas. Como último recurso, se afeitará la cabeza y se aplicarán técnicas de descontaminación de la piel.

c) Contaminación de los ojos

Este es un caso delicado dada la gran importancia del órgano y su situación. La forma de eliminar la contaminación es mediante lavado con las siguientes soluciones, dependiendo del tipo de agresivo:

Para agresivos alcalinos: solución de ácido bórico al 2%

Para agresivos ácidos: solución de bicarbonato sódico al 2%

Para agresivos neutros: solución de cloruro sódico al 9%

La técnica a seguir es la siguiente:

Abrir el párpado lo máximo posible, aplicar la solución salina y limpiar con agua en abundancia. No se recomiendan otros agentes descontaminantes.

d) Contaminación de la nariz, garganta, boca

La técnica es similar a la utilizada en la descontaminación de los ojos, usando abundante cantidad de descontaminante de forma continuada. Para la nariz se empleará la irrigación después de sonarse; para la garganta y la boca, se harán enjuagues. **NO DEBE JAMAS TRAGARSE LA SOLUCION.** Finalizada la descontaminación puede hacerse, si se considera necesarios aerosolterapia con DTPA por vía nasal (una ampolla durante 5 min), que se repetirá a las 24 h, y enjuagues con quelantes específicos locales.

e) Contaminación de las orejas

Para eliminar la contaminación de las orejas debe realizarse una limpieza sumamente cuidadosa con la ayuda de un bastoncillo de algodón. Nunca debe usarse un bastoncillo de este tipo para limpiar el interior del oído. Lo habitual es usar agua sola o suero fisiológico.

f) Contaminación de la cara

Para eliminar la contaminación de la cara no deben emplearse duchas generales. La descontaminación se realiza con agua tibia y jabón líquido, protegiendo previamente los orificios naturales (nariz, oídos, boca y ojos).

g) Contaminación difusa de todo el cuerpo

Se descontaminan en primer lugar la cara y cabellos y a continuación, el resto del cuerpo con una ducha generalizada con abundante agua tibia y jabón líquido.

Tratamiento de heridas contaminadas

Una vez que se han administrado los primeros auxilios para controlar la hemorragia y tratar el shock, el primer paso para la descontaminación es encontrar la contaminación. Con emisores beta de alta energía y la mayoría de los gamma, esto no presenta mayor problema, pero con emisores beta blandos o emisores alfa, la cosa es muy complicada. En la mayoría de los casos, la eliminación de la contaminación una vez encontrada no presenta problemas quirúrgicos especiales, pero requiere grandes dosis de paciencia y perseverancia.

Absorción

La absorción de un contaminante de una herida a la circulación general o nodos linfáticos, es de gran importancia.

Las características fisicoquímicas que van a determinar la velocidad del movimiento del contaminante desde la herida, son la solubilidad, el pH, la reactividad del tejido, el tamaño de la partícula, etc.

Si el contaminante está en un estado muy ácido o básico, las proteínas de los tejidos del cuerpo pueden coagularse y reducir la dispersión en los fluidos. Algunos compuestos de radionucleidos cambiarán gradualmente su solubilidad después de períodos largos de contacto con los fluidos del cuerpo.

Si el contaminante se mueve, puede llegar a irradiar otros órganos, aparte del lugar de la herida. En cualquier caso, debe prevenirse lo antes posible el movimiento de cualquier contaminante aunque sea insoluble.

Clasificación de las heridas

ABRASIONES: Una abrasión contaminada presenta una probabilidad de absorción grande pues la superficie es rugosa normalmente y la piel no está intacta. Podrían limpiarse con un detergente y, si se considera necesario, usando un anestésico, para lavar más fuertemente. Después de un esfuerzo razonable no hay necesidad de intentar eliminar toda la contaminación puesto que el residuo que queda en la superficie, se incorporará a la costra que se forme.

PUNCIONES: Pueden provocarse por cortes producidos por metales contaminados o cristales, así como accidentalmente, por una aguja. En algunos casos pueden ser difíciles de encontrar dado el pequeño tamaño que pueden llegar a tener.

LACERACIONES: Una laceración simple y limpia producida superficialmente por un objeto puntiagudo contaminado, es probablemente el tipo más fácil de herida a tratar. En algunas muy profundas, la contaminación puede ser difícil de detectar y eliminar. Existe también la posibilidad de entrada directa de contaminación.

Consideraciones quirúrgicas

Cuando se descubre que un individuo tiene un material radiactivo en una herida, deben tomarse medidas rápidamente. Como primeras precauciones se realizarán irrigaciones de la herida con agua estéril o salina, se hará sangrar la herida y se preparará un torniquete para evitar el retorno de la sangre.

Si el paciente necesita primeros auxilios debido a grandes complicaciones, éstos deben realizarse antes de la descontaminación.

En este punto, debe tenerse en cuenta la necesidad o conveniencia de administrar al paciente compuestos que puedan minimizar el riesgo de contaminación interna, como el DTPA. Posteriormente hay que centrarse en la contaminación. Después de un lavado de profundidad, la herida necesita, frecuentemente, ser agrandada para mejorar el efecto de la irrigación, y puede ser necesario cortar un trocito de tejido para eliminar la mayoría de la contaminación (desbridamiento).

A menudo es efectivo agrandar la herida realizando una escisión en cada lado y por debajo de la misma, levantando el bloque de tejido. En ciertos casos en que el tejido ha quedado muy destruído, esta técnica puede proporcionar una herida que sea más fácil de cerrar.

Este procedimiento quirúrgico debe realizarse con especial cuidado de no extender la contaminación. Debe controlarse la contaminación que vaya adquiriendo el bisturí u otros instrumentos, sustituyéndolos cuando puedan presentar un riesgo.

Debe pensarse el uso de anestesia aunque haya un cierto riesgo de contaminación del equipo, teniendo cuidado de medir dicha contaminación y eliminarla del equipo antes de llevarlo a una zona limpia.

No existe ninguna razón para dejar una herida abierta a menos que haya riesgo de infección.

En todos los casos de heridas contaminadas, deben hacerse muestreos de contaminación interna.

CONTAMINACION INTERNA

Introducción

Los procedimientos para el tratamiento de personas contaminadas internamente con radionucleidos tienen como finalidad reducir las dosis absorbidas de radiación y, por tanto, el riesgo de futuros efectos biológicos.

Estos objetivos pueden cumplirse por dos medios:

- Reducción de la absorción y deposición interna del radionucleido.
- Estimulación de la eliminación o excreción del radionucleido absorbido.

Ambas medidas son tanto más efectivas cuanto antes se implantan.

El tratamiento es más efectivo si se impide que los contaminantes alcancen la circulación sistémica. Para aumentar la eliminación o disminuir la absorción por los tejidos, pueden usarse métodos de dilución o bloqueo con agentes químicos.

Es importante también saber cuándo debe cesar el tratamiento aplicado. Esa decisión dependerá de la experiencia y juicio del médico especialista, y estará basada en la relación entre los riesgos y los beneficios obtenidos.

Procedimientos para reducir la absorción gastrointestinal

La absorción gastrointestinal puede ser disminuida mediante lavado o usando ciertos medicamentos específicos. Se repasan brevemente los más importantes.

Lavado de estómago

Este procedimiento puede usarse para eliminar del estómago materiales tóxicos por medio de un tubo gástrico. Se usará, raramente, cuando se tenga conocimiento de una incorporación grande y dentro del tiempo razonable para que el contaminante esté aún en el estómago.

Después de insertar un tubo nasogástrico o gástrico, se introduce agua con una jeringa, que es devuelta por efecto sifón. Este proceso debe continuarse hasta que el agua de lavado esté prácticamente libre de material radiactivo.

La posición más efectiva para ello es situar el tubo de succión cerca del píloro, con la persona tendida (tendido supino), con su lado izquierdo elevado hasta unos 45°. Es mejor poner a la persona de forma que no se pueda producir aspiración del líquido.

Si este procedimiento no funciona, considérese el uso de eméticos.

Eméticos

Los eméticos son compuestos usados para producir vómitos con el fin de vaciar el estómago rápida y completamente después de la ingestión de materiales tóxicos. Actúan estimulando la mucosa gástrica, estimulando el centro del vómito en el cerebro, o ambas cosas.

Son normalmente más efectivos si se toman con 200 ó 300 ml de agua. Su uso está contraindicado en casos de pérdida del conocimiento y después de la ingestión de agentes corrosivos o derivados del petróleo. Los efectos secundarios incluyen nerviosismo, náuseas persistentes, debilidad, palidez, respiración irregular, taquicardia, baja presión sanguínea y pérdida de consciencia. Los eméticos más conocidos son:

— Clorhidrato de apomorfina

Se administra por vía subcutánea, siendo la dosis de 5 a 10 mg para los adultos.

Es muy inestable en presencia de luz o aire. Si se pone de color verde esmeralda ya está deteriorado. Puede producir depresión del sistema nervioso central. **NO REPETIR LA DOSIS.**

— Ipecac

Se administra por vía oral en cápsulas de 1 ó 2 gramos. Puede ser irritante para las mucosas. La dosis debe repetirse cada 15 minutos hasta que se produzca el vómito.

También existe en forma de jarabe o de tintura siendo las dosis a administrar en esa forma de 15 ml para el jarabe y entre 5 y 20 para la tintura.

No deben confundirse el jarabe o la tintura, con el extracto fluido, que es 14 veces más potente.

— Purgantes

Los purgantes o laxantes están clasificados en general como irritantes. Actúan produciendo ácido ricinoleico, que estimula las contracciones intestinales. También puede ser útil usar enemas o irrigaciones colónicas para reducir el tiempo de residencia de los contaminantes en el colon.

La selección de un determinado purgante debe tener en cuenta la velocidad de actuación del mismo. Hay que pensar, además, si el purgante tiene propiedades adicionales

que actúen en el mismo sentido, como por ejemplo la producción de compuestos menos solubles del mismo radionucleido. El sulfato magnésico es un ejemplo de catártico salino que puede producir sulfatos relativamente insolubles con algunos radionucleidos y, de esa forma, reducir la absorción.

Los catárticos salinos actúan normalmente entre 3 y 6 horas después de la administración. La acción depende del nivel de absorción de cationes, aniones, o los dos. Se produce una solución hipertónica en el intestino y, como consecuencia, se extrae agua de la mucosa intestinal.

Todos los purgantes están contraindicados en caso de dolor abdominal de etiología indeterminada. Las reacciones puede ser deshidratación, irregularidades cardíacas, enteritis, etc.

Los compuestos purgantes más empleados son:

* Bisacodil: Puede administrarse por vía oral o rectal. Por vía oral la dosis está entre 10 y 30 mg para adultos, y suele actuar dentro de las primeras 6 horas.

* Aceite de castor: Por vía oral, 15 ml. Actúa en 2 horas.

* Fenoltaleína: Por vía oral, 60 mg. Actúa entre 4 y 8 horas después. La acción puede llegar a durar entre 3 y 4 días.

Los catárticos salinos más usados son:

* Sulfato magnésico: Por vía oral, 15 g disueltos en agua helada. No debe usarse en caso de insuficiencia renal.

* Solución de citrato magnésico: Por vía oral, 200 ml. Se prepara disolviendo entre 1.55 y 1.9 g de óxido de magnesio hasta 100 ml, y bicarbonato sódico para producir efervescencia. No usar con insuficiencia renal.

Vamos a ver, a continuación, otros compuestos usados con cierta extensión en la descontaminación interna.

Azul de Prusia

Químicamente es ferrocianuro férrico $Fe_4 Fe (CN)_6$. No se absorbe por el tracto gastrointestinal, presenta baja toxicidad y es bueno en el tratamiento de cationes monovalentes. Se tolera bien y, si se actúa con rapidez, disminuye mucho la absorción inicial. Se usa habitualmente para eliminar el Cesio del organismo. La dosis que se tolera sin problemas es de 1 gramo 3 veces al día durante un máximo de 3 semanas.

Antiácidos con aluminio

Son muy efectivos reduciendo la absorción intestinal del estroncio. Una única dosis de 100 ml de sulfato de aluminio gel justo después de la exposición, disminuye la absorción en un 85%; 60 ó 100 ml. de hidróxido de aluminio, lo hace en un 50%. Ambos son bien tolerados y no tóxicos. Pueden producir estreñimiento.

Alginatos

Son sales del ácido algínico, sustancias gelatinosas obtenidas de ciertas algas marinas. (En inglés kelp). También reducen la absorción del estroncio. Una dosis de 10 gramos disminuye la absorción entre 8 y 10 veces. Un inconveniente es que son muy viscosos y a veces difíciles de tomar, aunque hay preparados de alginato sódico poco viscosos. Una forma de mejorar su administración es con pan.

Bloqueantes y diluyentes

Otro tipo de agentes empleados son los bloqueantes. Su misión es saturar los procesos metabólicos con un compuesto estable de forma que se reduzca la absorción del radiactivo. Para ser efectivos, ha de administrarse en una forma que se absorba rápidamente.

El caso más conocido es el del yodo. Administrando una dosis (390 mg) de yoduro potásico, se elimina la posibilidad de incorporación de yodo radiactivo. Debe administrarse durante un período de 7 a 15 días, para evitar el reciclaje del radioyodo.

La técnica de dilución también es efectiva para nuestros propósitos. Lo que se hace es administrar un isótopo estable del mismo elemento contaminante, para reducir la probabilidad de absorción. El mejor ejemplo que se puede poner es la táctica de beber grandes cantidades de agua para reducir la absorción de tritio.

Otro ejemplo es el del estroncio, que puede aplicarse oralmente (lactato) o de forma intravenosa (glocevato) para reducir la absorción del estroncio radiactivo.

También se aplica calcio de forma oral o intravenosa para tratar las incorporaciones de calcio radiactivo, igualmente ocurre con el potasio, o con el zinc.

Según las formas de contaminación y los elementos químicos implicados, los tratamientos son variados, quedando reflejados en el Anexo 1.

Entre los tipos de compuestos que allí se mencionan, están resinas de intercambio iónico, antitiroideos, agentes quelantes, diuréticos y expectorantes.

Muestras biológicas que deben tomarse en caso de contaminación

Las muestras biológicas, junto con las medidas directas de la incorporación, permiten realizar el diagnóstico de la contaminación, evaluar la severidad de la misma, y decidir a "grosso modo" el tratamiento a aplicar. El tipo de muestras depende del contaminante y el modo de contaminación. En el Anexo 2 se indican los elementos más característicos. Sin embargo hay algunas cuestiones aplicables a todos.

SANGRE: Además de los ensayos descritos para el caso de irradiación (9.2.3.), debe tomarse más sangre para investigaciones de radionúclidos, pues todos los datos son necesarios.

Cantidad a tomar: 20 ml sin tratar
10 ml con heparina

El laboratorio analítico debería tener las dos muestras pues a veces el contaminante no puede identificarse del todo o, incluso, un segundo análisis puede proporcionar resultados inesperados.

Si la contaminación produce grandes dosis de radiación, deben tomarse las muestras de sangre referidas en ambos casos.

ORINA: La primera muestra debe tomarse inmediatamente; posteriormente, el resto debe guardarse. La orina de cada 24 horas puede guardarse en el mismo recipiente; no así la de días diferentes.

HECES: Deben tomarse todas las de los 3 ó 4 primeros días, recomendando un mínimo de 3.

VARIOS: Pañuelos de tela o papel, esputos, muestras nasales, etc. deben analizarse para identificar radionúclidos.

Es importante no deshacerse de las muestras hasta recibir autorización oficial, pues deben tenerse en cuenta posibles complicaciones médico-legales.

Medidas que deben tomarse en caso de hospitalización

Mientras que en un caso de irradiación las principales medidas a tomar tienen como finalidad proteger al paciente, en caso de contaminación deben tomarse otras tanto para proteger al equipo médico como incluso al público. Además, un caso de irradiación no es normalmente un caso de gran emergencia, mientras que el pronóstico de una contaminación depende en gran medida de la rapidez de iniciación del tratamiento. En general los casos que presenten riesgos para otras personas no se presentarán más que en situaciones muy excepcionales.

Medidas para tratar con la contaminación

La admisión en el hospital no presenta problemas, en general, pues la víctima ha sido descontaminada previamente. En casos excepcionales el paciente puede haber llegado directamente del punto de contaminación (caso de lesión grave además de contaminación); en ese caso, es deseable que el paciente no entre al hospital por el mismo camino que el resto de pacientes.

Excepto en casos de emergencia médica, el paciente debería ser descontaminado, por ejemplo en una mesa de autopsias, para evitar extender la contaminación.

El equipo médico debe protegerse cuidadosamente frente a la contaminación.

Si los niveles de contaminación son muy altos, el equipo médico que estudió al paciente debe ser examinado posteriormente para detectar posible contaminación.

Aunque es muy improbable, debe considerarse la posibilidad de que el paciente represente un riesgo para el equipo médico por la radiación que pueda emitir. En dicho caso, se tomarán las precauciones oportunas.

De la misma forma, debe tenerse en cuenta que cualquier excreción o fluido del paciente, así como el agua usada en su aseo u otros materiales que puedan entrar en contacto con él son residuos radiactivos y como tales deben tratarse. Las mismas precauciones deben tomarse en caso de intervención quirúrgica.

Si el paciente falleciese con un alto grado de contaminación, cosa muy poco probable, deben tenerse presente los problemas que pueden plantearse a la hora de enterrarlo o hacerle una autopsia.

Enseñanzas del accidente

Todas las incidencias referentes al propio accidente y al tratamiento del accidentado y su respuesta, deben quedar registradas para su posterior análisis, con el fin de conservar las acciones probadamente beneficiosas y desechar y modificar aquellas que no lo son tanto.

Reincorporación al trabajo

Una vez superado el accidente y sus consecuencias más graves, corresponde al médico la decisión de autorizar o no la vuelta al trabajo del paciente. Esta no es siempre una decisión fácil pues coincidirán multitud de factores que lo complicarán.

Estos factores serán de índole médico así como social, laboral, familiar, etc.

REFERENCIAS

— RADIOLOGICAL HEALTH HANDBOOK. Ed. 1970. U.S. Department of Health, Education and Welfare.

— NCRP REPORT N.º 65, 1979. Management of Persons Accidentally Contaminated with Radionuclides.

— IAEA Safety Series n.º 47, 1978.

— Military Radiobiology. Ed. James J. Conklin and Richard I. Walker. Academic Press. INC.1987.

ANEXOS

ANEXO - 1: Se incluyen fichas tomadas de la publicación n.º 47 de la IAEA, sobre las principales características de los isótopos más habituales.

ANEXO - 2: Lista de chequeo.

ANEXO - 3: Utilillaje.

ANEXO - 1

DATOS REFERENTES A LOS CONTAMINANTES MAS HABITUALES

BROMO (Br)

1. Terapia

El Bromo-82 tiene un período muy corto (1,27 días) lo que en muchos casos hace inútil o innecesaria la terapia. Las propiedades sedantes (no soporíferas) de los compuestos de Bromo tales como el Bromuro de Sodio significa que el método de dilución isotópica es difícil de emplear en un tratamiento de primeros auxilios; además, para los valores de dosis necesarios para el tratamiento por el método de dilución isotópica los compuestos de Bromo son depresores cardiacos. Por otra parte la estimulación de la eliminación renal mediante el aumento de incorporación de fluidos o mediante el uso de diuréticos suaves aumenta la efectividad del tratamiento. Una contaminación importante del sistema digestivo puede justificar el lavado de estomago.

2. Vigilancia personal (Br-82)

Dosimetría individual de película.

Medida de la radiación emitida: análisis biológico y análisis de la orina.

3. Características principales (Br-82)

Tipo de emisión	beta negativo gamma
Organo de deposición preferente	Todo el cuerpo
Período efectivo	1,27 días
Energía efectiva (MeV)	1,8

CALCIO (Ca)

1. Terapia

Junto con todos los demás radioisótopos de los elementos normalmente presentes en el organismo, la única terapia concebible en caso de contaminación por calcio radioactivo es la dilución isotópica, siendo administrado el calcio, en las presentaciones farmacéuticas convencionales, bien oral o bien por vía intravenosa (mejor).

2. Vigilancia personal

Análisis biológico. Análisis de orina: Medida de la radiación emitida (Ca-47). El uso de la película dosimétrica no es una buena técnica en el caso del Calcio-45.

3. Características principales

	Ca-45	Ca-47
Tipo de emisión	beta negativo	beta negativo gamma
Organo de deposición preferente	Hueso	Hueso
Período efectivo	165 d	4,53 d
Energía efectiva (MeV)	0,43	2,6

CARBONO

1. Terapia

A la vista de los cortos periodos biológicos que se han observado en el C-14, son raros los accidentes en los que la terapia sea útil. Sin embargo, dado que es difícil especificar cuando puede ser necesario un tratamiento, las personas expuestas accidentalmente deben enviarse a centros especializados.

2. Comportamiento metabólico

a) Si se encuentra como CO₂ (dióxido de carbono), el C-14 produce muy poca contaminación interna pues el dióxido se transfiere de la sangre al aire a través de los pulmones.

b) Cuando forma parte de una molécula, el C-14 sigue la misma ruta metabólica que la citada molécula. Normalmente el metabolismo termina con la formación de CO₂. Sin embargo, una pequeña parte de dichas moléculas pueden incorporarse a cadenas de estructuras cuya evolución es muy lenta (por ejemplo el colágeno). Después de la degradación de una molécula el C-14 debe encontrarse en el aire exhalado. Si las moléculas no se degradan, debe medirse la actividad de excretas.

3. Vigilancia personal (C-14)

Análisis biológico de orina (centelleo líquido) o de aire exhalado. No es útil el uso de dosímetro personal.

4. Características principales (C-14)

Tipo de emisión: beta negativa

Organo de deposición preferente: cuerpo entero

Período efectivo: 0,4 días

Energía efectiva: 0,054 MeV

CESIO

1. Terapia

Como con todos los radionucleidos que se absorben rápidamente, el tratamiento es una cuestión de urgencia. Todos los compuestos de cesio deben considerarse solubles, incluso un compuesto considerado como insoluble (silicoaluminato de cesio) es soluble después de cierto tiempo.

En caso de heridas contaminadas, la descontaminación local no debía retrasar la precipitación intestinal con azul de prusia diluido; el tratamiento debe ser general, considerando que hubiera contaminación pulmonar o digestiva. Este tratamiento impedirá también la reabsorción intestinal interrumpiendo el ciclo intestinal. Dosis: 1 gramo tres veces al día en un poco de agua. Algunos especialistas sugieren 11 gramos al día (1 gramo inicialmente, 5 gramos después de 4 horas y otros 5 gramos después de otras 4 horas). La

dosis para el día siguiente son 10 gramos con intervalos de 8 horas. Como antídoto oral se utiliza el BARIO-DIF, si la contaminación interna ha sido vía ingestión. Se administran 150 cm³ de suspensión del antídoto.

En todos los casos la persona expuesta debe trasladarse lo antes posible (después de completar el tratamiento de urgencia y tomar muestras de orina y heces) a un centro especializado.

2. Comportamiento metabólico

Su metabolismo se parece mucho al del potasio. Se absorbe rápidamente y se incorpora a las células. La absorción intestinal es del 100%.

Es secretado, además, en el lumen del tracto gastrointestinal, entre el estómago y el intestino delgado. Se concentra, entre otros lugares, en los músculos. Tiene un período biológico de unos 70 días. Las muestras biológicas son importantes pues se puede determinar la incorporación con una exactitud aceptable midiendo la relación de actividad en la orina respecto a las heces.

3. Vigilancia personal (Cs-137)

Dosimetría personal

Medida de la radiación emitida: análisis biológico.

4. Características principales (Cs-137)

Tipo de emisión: beta negativa, gamma.

Organo de deposición preferente: cuerpo entero.

Período efectivo: 70 días.

Energía efectiva: 0,59 Mev.

CROMO

1. Terapia

La efectividad del tratamiento de la contaminación con radiocromo depende del estado físico-químico del metal:

a) Para contaminación por una sal de cromo en la que el metal está como catión, pruébese con un agente quelante, por ejemplo una inyección intravenosa lenta de 0,5 gramos de DTPA cálcico. Si hay una herida lávese con solución concentrada de DTPA cálcico. También puede usarse Desferioxamina en una dosis de 1 gramo administrada por vía intramuscular. En caso de herida puede lavarse con el mismo producto.

b) Si el cromo forma parte de un amión, no hay ningún tratamiento efectivo.

2. Comportamiento metabólico

En términos generales su comportamiento es similar al de los coloides aunque no hay un patrón fijo pues su estado físico-químico es determinante.

3. Vigilancia personal (Cr-51)

Dosimetría personal

Medida de la radiación emitida o análisis de orina.

4. Características principales (Cr-51)

Tipo de emisión: beta negativa, gamma, X.

Órgano de deposición preferente: pulmones, tracto gastro-intestinal.

Período efectivo: 22,8 días (en los pulmones)

Energía efectiva: 0,014 MeV.

COBALTO

1. Terapia

Dado que la mayoría de las sales de cobalto son insolubles, no es necesaria ninguna terapia especial después de la ingestión. Una persona que tenga una herida contaminada por cobalto radiactivo debe recibir una inyección intravenosa lenta de DTPA cálcico de 0,5 gramos. Puesto que el tratamiento ideal (la administración de un quelato Co-DTPA) no es posible de momento al no existir este producto comercialmente, lo mejor es realizar una dilución isotópica con algún medicamento farmacodinámico disponible; podría usarse también una sal convencional como el gluconato de cobalto o un quelato. Algunos de esos compuestos de cobalto son vasodilatadores y deben ser usados con mucha precaución.

2. Comportamiento metabólico

La absorción intestinal es función de la solubilidad de la sal y del contenido de cobalto en la misma. En caso de sales solubles, como los cloruros, la absorción intestinal puede llegar al 50%. Inyecciones intravenosas repetidas, de forma que la incorporación sea relativamente constante es seguida por una retención de un 75% con una eliminación por la orina (15-17%) superior a la eliminación por las heces (6-8%).

3. Vigilancia personal

Dosimetría personal

Medida de radiación emitida por análisis radiotóxico de orina.

4. Características principales

	Co-57	Co-58	Co-60
Tipo de emisión	beta negativa gamma	beta positiva gamma	beta negativa gamma
Órgano de deposición preferente	Pulmón		
Período efectivo	85 días	45 días	117 días
Energía efectiva	0,053 MeV	0,29 MeV	0,72 MeV

INDIO

1. Terapia

El período efectivo tan corto que presenta el In-113 m contribuye a su clasificación como radionúclido de baja toxicidad. En otras palabras, la mayoría de las contaminaciones con indio-113 m no necesitan tratamiento. La situación es diferente cuando se trata de In-114 m cuyo período radiactivo es de 49 días. Agentes complejantes como AEDT y 8-hidroquinolina no son efectivos; pero dada la efectividad del azul de Prusia en el caso del talio se puede suponer por su situación en la tabla periódica, que también será útil para el Indio. La clasificación será la misma que para el cesio (ver la ficha correspondiente).

2. Comportamiento metabólico

La absorción por el sistema digestivo es muy baja, del orden del 0,5%. Para el resto de las vías de incorporación, al cabo de cuatro días la absorción es independiente de la ruta

seguida y llega al 50% o más. La deposición es muy alta en los riñones, hígado, páncreas y glándulas salivares. También se deposita algo en el esqueleto. La excreción, que no depende del camino de entrada sigue dos patrones, uno de eliminación por un proceso rápido, y otro de eliminación más lenta que se inicia a las 3 semanas. Aproximadamente el 40% se elimina en la orina o en las heces al final del primer mes.

3. Vigilancia personal

Dosimetría individual

Medida de radiación emitida o análisis radiotoxicológico de la orina.

4. Características principales (In-113 m)

Tipo de emisión: beta negativa, gamma, X.

Organo de deposición preferente: Riñón, parte superior del intestino grueso.

Período efectivo: 1,61 horas (en el riñón)

Energía efectiva: 0,20 MeV

YODO

1. Terapia

El tratamiento para la contaminación con yodo radiactivo consiste en saturar el tiroides con yodo estable lo antes posible. Dado que la velocidad de saturación es directamente proporcional a la cantidad administrada, mayores dosis proporcionan mejor protección; la dosis recomendada es de 100 mg de yoduro administrado oralmente en forma de yoduro potásico (130 mg de KI), yoduro sódico o de magnesio. La rapidez condiciona la efectividad. Por ejemplo, el tiroides puede protegerse completamente administrando yodo estable antes de que se produzca la contaminación. La reducción del radioyodo incorporado es menor si se retrasa el tratamiento: un 10% si se administra al mismo tiempo que se produce la contaminación y un 50% si tiene lugar cuatro horas después de la contaminación. El tratamiento con yodo estable 24 horas después de la contaminación no afecta a la cantidad que se incorpora pero reduce algo el período biológico.

2. Comportamiento metabólico

La concentración de yodo alcanza su valor máximo 24 horas después de una administración intravenosa. Dado el período efectivo del I-131, la fracción transferida al tiroides es aproximadamente el 30% de la incorporada. La eliminación se realiza con dos períodos biológicos diferentes: uno de 6 horas, debido al yodo contenido en el cuerpo entero (70%) y otro de unos 100 días, debido a la eliminación del yodo contenido en el tiroides (30%).

3. Vigilancia personal

Dosimetría individual

Medida de la radiación emitida (debido a la rapidez y efectividad de las medidas de radiación en el tiroides, no es necesario tomar muestras biológicas).

4. Características principales

	I-123	I-125	I-131
Tipo de emisión	beta negativa gamma, X	beta negativa	beta negativa, gamma
Organo de deposición preferente	Tiroides		

Período efectivo	0,54 días	41,8 días	7,6 días
Energía efectiva	0,05 MeV	0,037 MeV	0,23 MeV

HIERRO

1. Terapia

Debe tratarse con DFOA (Desferrioxamina) que compleja el exceso de hierro y lo elimina en la orina. La persona expuesta debe recibir una inyección intramuscular de 1 gramo el primer día, seguido de 0,5 gramos diarios.

El DTPA es también muy efectivo (la constante de estabilidad para el complejo DTPA-Fe (III) es muy alta). Deben administrarse 0,5 gramos en inyección intravenosa lenta.

2. Características metabólicas

La absorción media para el sistema digestivo es del 10% la mayor concentración se encuentra en el páncreas. El hígado y la médula ósea también acumulan hierro en gran medida. Después de 24 horas ya no se elimina por el riñón.

3. Vigilancia personal

Dosimetría individual

Medida de radiación emitida (sólo Fe-59) o análisis de orina (Fe-55). Sólo válidos en el primer día.

4. Características principales

	Fe-55	Fe-59
Tipo de emisión	beta negativa, X	beta negativa, gamma
Organo de deposición preferente	Páncreas	
Período efectivo	388 días	41,9 días
Energía efectiva	0,0065 MeV	0,34 MeV

KRYPTON

1. Terapia

La contaminación con Kr-85 es imposible, pues no se absorbe por el cuerpo. El problema será la inmersión en una mezcla que contenga Krypton, dado que pueden irradiarse los pulmones y la piel.

2. Comportamiento metabólico

Completamente inerte.

3. Vigilancia personal

No aplica.

4. Características principales (Kr-85)

Tipo de emisión	beta negativa
Organo de deposición preferente	cuerpo entero
Período efectivo	--
Energía efectiva	0,24 MeV

LANTANIDOS

1. Nota

Todos los lantánidos (desde Lantano hasta Lutecio) tienen prácticamente la misma química. Por tanto todos precisan la misma urgencia en el tratamiento con DTPA-Ca.

2. Terapia

a) Heridas contaminadas: inyección intravenosa lenta de 0,5 gramos de DTPA-Ca y lavado inmediato con 1 gramo de solución de DTPA-Ca. Tomar muestras de orina y llevar al paciente a un centro especializado.

b) Contaminación del sistema respiratorio: preparar inmediatamente un aerosol de DTPA-Ca, con un generador de aerosoles convencional e inyector 0,5 gramos de DTPA-Ca por vía intravenosa.

Tomar muestras de orina y trasladar al paciente a un centro especializado. En caso de inhalación masiva de un compuesto insoluble, un lavado pulmonar en condiciones hospitalarias no es incompatible con el tratamiento con DTPA-Ca.

3. Comportamiento metabólico

Excepto si están en forma compleja y con el mismo pH que la materia viva, los lantánidos están en forma de hidróxido y casi no se absorben. Se fijan principalmente en el esqueleto y el hígado.

4. Vigilancia personal

Dosimetría personal: (excepto para el Pm-147)

Medida de la radiación emitida y análisis de orina.

5. Características principales

	La-140	Ce-144	Pr-144 (hijo del Ce-144)
Tipo de emisión	beta negativa gamma	beta negativa gamma	beta negativa gamma
Organo de deposición preferente	Tracto gastro intestinal	Hueso	
Período efectivo	--	243 días	
Energía efectiva	0,8 MeV	6,3 MeV	
	Pm-147	Yb-169	Lu-177
Tipo de emisión	beta negativa	gamma, X	beta negativa, gamma
Organo de deposición preferente	hueso	hueso	tracto gastroin- testinal
Período efectivo	570 días	29,8 días	
Energía efectiva	0,35 MeV	0,495 MeV	0,16 MeV

MANGANESO

1. Terapia

a) Si el manganeso está como catión debe tratarse con inyección intravenosa lenta del DTPA-Ca (0,5 gramos). Las heridas se lavan con disolución concentrada de DTPA-Ca.

b) Si el manganeso está como anión, no hay tratamiento posible.

2. Vigilancia personal

Dosimetría individual

Medida de radiación emitida o análisis de orina.

3. Características principales (Mn-54)

Tipo de emisión	gamma, X
Organo de deposición preferente	Pulmón, hígado
Período efectivo	88,5 días (pulmón) 23 días (hígado)
Energía efectiva	0,23 MeV

MERCURIO

1. Terapia

Debe usarse DTPA-Ca o Dimercaprol (2, 3-dimercapto-1-propanol), teniendo presente que el DTPA sólo compleja el Hg 2+.

Estos dos componentes tienen algún efecto en la deposición renal del mercurio, pero no actúan en todos los niveles del organismo.

Dosificación: DTPA-Ca: 0,5 gramos de inyección intravenosa lenta. Posteriores inyecciones deben administrarse en un centro especializado.

Dimercaprol: 3 mg/kg de peso, en inyección intramuscular (ver ficha del plomo).

2. Comportamiento metabólico

En forma elemental: absorción en tracto digestivo, nula inhalado, más del 85%.

En el tracto digestivo se absorbe un 10% si está en forma de sal inorgánica y un 100% del metilmercurio. Se concentra en los riñones. Los compuestos orgánicos se degradan más rápidamente que las otras formas y se eliminan principalmente en la orina.

3. Vigilancia personal

Dosimetría individual

Medida de la radiación emitida o análisis radiotoxicológico de orina.

4. Características principales

	Hg-197	Hg-203
Tipo de emisión	beta negativa gamma, X	beta negativa gamma
Organo de deposición preferente	Riñón	
Período efectivo	2,3 días	11 días
Energía efectiva	0,043 MeV	0,15 MeV

FOSFORO

1. Terapia

Dado que el fósforo existe en el organismo, la contaminación con P-32 sólo puede tratarse por dilución isotópica. El tratamiento debe basarse en dosis masivas: 5 gramos de PO_4 en un vaso de agua.

2. Comportamiento metabólico

Después de la ingestión, aproximadamente el 75% del fósforo se absorbe en el tracto digestivo, y luego se extiende por el organismo. La fracción depositada en el esqueleto es un 37%.

3. Vigilancia personal

Dosimetría individual

Análisis radiotoxicológico de orina.

Medida de radiación emitida.

4. Características principales (P-32)

Tipo de emisión	beta negativa
Organo de deposición preferente	Hueso
Período efectivo	14 días
Energía efectiva	3,5 MeV

POTASIO (K)

1. Terapia

El médico tiene pocos medios para tratar en la contaminación por potasio radiactivo. Sin embargo, el corto período de semidesintegración del K-42, el isótopo más usado, limita el tiempo de exposición debido a contaminación interna. El único tratamiento concebible es la dilución isotópica, sin menoscabo de los riesgos de saturación de potasio; no son raras las contraindicaciones incluso en un centro médico. En necesaria una estricta supervisión médica en todos los casos, haciendo especial énfasis en el corazón.

Dosis: aproximadamente 4 g de potasio estable por día durante un período no superior a 3 días (dado el corto período de semidesintegración del K-42, tratamientos de 3 días sólo son necesarios cuando el grado de contaminación es alto).

2. Comportamiento metabólico

Al contrario que el sodio, el potasio se deposita fundamentalmente dentro de la célula. Es absorbido rápidamente, casi completamente en el intestino. Se elimina por la orina, actuando el riñón como un regulador homeostático.

3. Vigilancia personal (K-42)

Dosimetría personal de película.

Análisis de sangre.

Medida de la radiación emitida (o análisis radiotoxicológico de orina).

4. Características principales (K-42)

Tipo de emisión	beta negativa, gamma.
Organo de deposición preferente	estómago
Energía efectiva	1,5 MeV

MEZCLA DE PRODUCTOS DE FISION

1. resumen de los principios generales que rigen el tratamiento

Los productos de fisión de interés son fundamentalmente Cs-137, Sr-89 y Sr-90 (nucleidos transferibles), Ce-144 (no transferible) y los yodos (si la mezcla es reciente o de menos de dos meses).

Esto significa 4 tipos de tratamiento. La regla general para fijar las prioridades a dar a los diferentes tipos de tratamiento se basan en la **toxicidad del nucleido y en la velocidad con que se transfiere en el campo**, y también de la efectividad del agente terapéutico (por ejemplo: utilizar inmediatamente un tratamiento 100% efectivo - posteriormente puede utilizarse un tratamiento menos efectivo).

Es posible clasificar los productos de fisión en orden de:

- * Toxicidad decreciente: I, Sr, Ce, Cs.
- * Velocidad de transferencia decreciente: I, Cs, Ce (forma iónica), Sr, Ce (forma coloidal).
- * Efectividad terapéutica decreciente: I, Ce, Cs, Sr.

Hay dos reglas generales:

- a) Si la mezcla contiene yodo, tratar siempre inmediatamente la contaminación de yodo con yodo estable.
- b) Administrar Ca-DTPA, el método depende de la naturaleza de la contaminación.

2. Reglas prácticas para el tratamiento

Para las dosificaciones, contraindicaciones y reglas generales deben seguirse los datos de las fichas de cada elemento.

— Contaminación de la piel

- * Administración oral de yodo (100 mg de KI de una vez)
- * Lavar con solución diluida de Ca-DTPA (pH 5) o, si esto falla, con agua acidulada con HCl.

— Contaminación de heridas

- * Tratamiento general: yodo administrado oralmente (100 mg de KI de una vez); Ca-DTPA vía intravenosa (0,5 a 1 gr).
- * Tratamiento local: rodizonato de potasio rociado sobre la herida (1 gr); solución diluida de Ca-DTPA o inyectada en el área que rodea la herida o usada para lavar la herida.
- * Azul de Prusia (1 gr), administrado oralmente.
- * Toma de muestras biológicas (orina, heces y sangre).
- * Evacuación a un centro especializado si es necesario.

— Contaminación del sistema respiratorio.

- * Administración oral de yodo (100 mg de KI de una vez).
- * DTPA como aerosol e inyección vía intravenosa.
- * Alginato cálcico (o sulfato de magnesio y azul de prusia) administrado oralmente.
- * Toma de muestras biológicas (orina, heces y sangre).
- * Evacuar a un centro especializado.

SELENIO (Se)

1. Terapia

No hay terapia para la contaminación del selenio, pero un 2% de sulfato de sodio en la dieta incrementa la eliminación del selenio.

2. Comportamiento metabólico

Después de la absorción, el selenio es metilado en el hígado y eliminado en forma de $\text{Se}(\text{CH}_3)_2$ a través de los pulmones; va acompañado por un pronunciado olor similar al del ajo.

3. Vigilancia personal (Se-75)

Dosimetría individual de película

Medida de la radiación emitida o análisis radiotoxicológico de orina.

4. Características principales

Tipo de emisión	beta negativo	gamma
Organo de deposición preferente	Pulmones	Riñones
Período efectivo	61 días	10 días
Energía efectiva	0,1 MeV	0,08 MeV

ESTRONCIO (Sr)

1. Terapia

Cualquiera que sea la ruta de entrada del estroncio y el agente terapéutico elegido, lo importante es la urgencia del tratamiento ya que el estroncio se absorbe muy rápidamente. El tratamiento se basa en convertir al estroncio en no transportable o por precipitación o atrapándolo, de manera que se inhibe su absorción.

En el caso de heridas contaminadas, la conversión del estroncio en no transportable es posible y efectiva, especialmente si el tratamiento se lleva a cabo durante el primer cuarto de hora; rociar 1 gr de rodizonato de potasio o de sodio y poner una inyección de EDTA-Co (COMPLECAL-lbys), como agente quelante.

En el caso de contaminación a través del tracto digestivo o respiratorio, el estroncio tiene que ser atrapado con alpinato sódico o cálcico -10g en un vaso de agua.

Una sustancia inerte como el fosfato de aluminio es efectiva y su uso es recomendado. Si falta esto, 10 gr de sulfato de magnesio aceleran el tránsito y reducen la absorción. También se recomienda el uso de EDTA-Ca como agente quelante, Bario-DIF o BARIO-FASES como antídotos orales y Calcium Sandoz más cloruro amónico oral (GEN-DIUR) como diluyentes isotópicos.

Si la contaminación se produce vía inhalación deben administrarse EDTA-Ca, CALCIUM Sandoz y GEN-DIUR.

2. Comportamiento metabólico

El metabolismo del estroncio es muy similar al del calcio. La mayoría de las sales son solubles y se absorben rápidamente. Se estima que alrededor del 25% se absorbe por los fluidos extracelulares después de la ingestión y el 30% después de la inhalación, la mitad de la cantidad absorbida se fija rápidamente en el esqueleto. La eliminación es muy lenta.

3. Vigilancia personal

- * Los dosímetros de película no están garantizados para el Sr-85.
- * Con el Sr-89 y Sr-90 sólo puede medirse la radiación de frenado y se necesita un equipo especial para medirla.
- * Análisis radiotoxicológico de orina y heces.

4. Características principales

	Sr-85	Rbm-85	Sr-89	Sr-90	Y-90
Tipo de emisión	gamma	e-, X	beta negativa	beta negativa	beta negativa
Organo de deposición preferente	hueso	hueso	hueso	hueso	hueso
Período efectivo	64 días	64 días	52 días	6,4 10 ³ días	6,4 10 ³ días
Energía efectiva	0,091 Mev	0,091 MeV	2,8 MeV	5,5 MeV	5,5 MeV

AZUFRE (S)

1. Terapia

El único tratamiento es la dilución isotópica usando compuestos con, por ejemplo, un hiposulfito de magnesio y administrados en grandes cantidades. Para la contaminación por moléculas marcadas con S-35, el tratamiento ideal sería dar dosis tan grandes como sea posible de la misma molécula con azufre en forma estable.

2. Comportamiento metabólico

Los compuestos de azufre inorgánico se concentran en los tejidos cartilagosos y en la médula ósea. La eliminación por la orina es considerable (30-90%) y rápida (48 horas) después de la inyección vía intravenosa.

3. Vigilancia personal (S-35)

- * Análisis radiotoxicológico de orina.
- * No es necesario llevar dosímetro personal.

4. Características principales (S-35)

Tipo de emisión	beta negativa
Organo preferente de deposición	todo el cuerpo
Período efectivo	6,5 días
Energía efectiva	0,056 MeV

TECNECIO (Tc)

1. Terapia

El corto período radiactivo del Tc-99m (6 horas) hace que la terapia sea irreal.

2. Comportamiento metabólico

La absorción del tecnecio por el sistema digestivo varía del 0,5% al 1% aproximadamente.

La administración del tecnecio en la forma de pertecnato es seguida de una eliminación considerable en la orina alrededor del 30% el primer día, decayendo rápidamente alrededor del 1% por día durante el resto de la primera semana, independientemente de que el radionucleido se haya administrado oralmente o vía intravenosa. Dos horas después de la administración, la cinética del metabolismo no depende de la ruta de entrada en el organismo. Se depositan grandes cantidades en las glándulas salivares, en la pared del estómago, en el hígado y en los riñones.

El Tc-99m se usa en una gran variedad de exámenes de radiodiagnóstico y su distribución a través del cuerpo es últimamente función de la forma en la que se administra. Los órganos blanco para el hierro marcado con Tc-99m son los riñones, para el pertecnato el tiroides o el intestino grueso y para los coloides el hígado.

3. Vigilancia personal (Tc-99m)

- Dosimetría individual de película.
- * Medida de la radiación emitida o análisis radiotoxicológico de la orina.

4. Características principales (Tc-99m)

Tipo de emisión	gamma negativa	gamma
Organo preferente de deposición	Tiroides	tracto gastro intestinal
Período biológico	1,6 días 3,7 días 22 días	
Energía efectiva	0,022 MeV	0,035 MeV

TRITIO (H-3)

1. Terapia

La única terapia posible es acelerar el ciclo del agua del cuerpo incrementando la ingestión de líquidos y favoreciendo la diuresis. Es posible reducir el período biológico del tritio desde diez días a 2,4 días simplemente incrementando el consumo de agua de bebida. Puede ser importante la adición de diuréticos, pero tendrán que tenerse en cuenta los riesgos y contraindicaciones de esta terapia. El consumo de grandes cantidades de cerveza puede realizar ambas funciones. En el caso excepcional de una contaminación masiva, puede ser necesario un tratamiento especial tal como una diálisis peritoneal o tratamiento con un riñón artificial.

2. Comportamiento metabólico

El agua tritiada puede ser absorbida a través de una herida, por los pulmones o a través de la piel. El tritio puede incorporarse en tres formas químicas diferentes:

- a) Gas tritio: sólo produce ligera contaminación interna.
- b) Agua tritiada: en esta forma se absorbe fácilmente y se comporta como el agua normal, que llega a fijarse a las proteínas.
- c) Moléculas marcadas: el tritio sigue el ciclo metabólico de la molécula marcada.

3. Vigilancia personal (H-3)

- * Análisis radiotoxicológico de la orina.
- No es necesario llevar dosímetro personal.

4. Características principales (H-3)

Tipo de emisión	beta negativa
Organo preferente de deposición	Todo el cuerpo
Período efectivo	10 días
Energía efectiva	0,01 MeV

ELEMENTOS TRANSPLUTONICOS (Americio, Curio, Berquello, Californio y Einstenio).

1. Nota

Los elementos transplutónicos son más transportables en el cuerpo que el plutonio. El tratamiento con el Ca-DTPA siempre está indicado.

2. Terapia

a) En todos los casos administrar inmediatamente Ca-DTPA, 0,5 gr. vía intravenosa: limpiar las heridas con una solución concentrada de Ca-DTPA. Si hay contaminación del sistema respiratorio, preparar un aerosol de Ca-DTPA. Si esto ayuda a ganar tiempo, el tratamiento puede iniciarse con la administración de Ca-DTPA en forma de aerosol. Bajo ninguna circunstancia se administrará vía intravenosa. Otro agente quelante recomendado es la Desferrioxamina-B, metansulfonato (DEFERIN Ciba). Si la contaminación se produce vía ingestión se administrará además $MgSO_4$ como purgante.

b) El tratamiento inmediato se seguirá de la toma de muestras biológicas (todas las excretas y muestras de sangre) y evacuación de la persona expuesta a un centro especializado.

3. Comportamiento metabólico

La absorción de los actínidos es mucho más rápida que la del plutonio. La difusión puede ser rápida, la deposición es fundamentalmente en el esqueleto, con muy alta retención, y en el hígado, con moderada eliminación. La excreción por la orina es muy alta, comparada con la del plutonio durante los días siguientes a la contaminación y está relacionada con la difusión del elemento.

4. Vigilancia personal

* Dosímetro individual de película para el Am-241 (gamma), Cf-252 (neutrones) y Es-253 (gamma).

* Medida de la radiación emitida y análisis radiotóxicológico de los excretos (orina y heces).

5. Características principales

Tipo de emisión	Am-241 alfa gamma	Cm-242 alfa, X	Cm-244 alfa	Bk-249 beta ne- gativa gamma	Cf-252 alfa fisión	Es-253 alfa
Organo preferente de deposición	hueso	hueso	hueso	hueso	hueso	hueso
Período efectivo	83,9 año	161,8 días	15 años	311 días	2,5 años	20,4 días
Energía efectiva	280 MeV	400 MeV	300 MeV	20 MeV	1100 MeV	370 MeV

XENON

1. Terapia

Dado sólo es muy ligeramente soluble en grasas, no puede producirse una contaminación importante por xenon. El verdadero problema es la irradiación en una nube que contenga xenon.

2. Comportamiento biológico

El Xenon es completamente inerte y no reacciona con ningún material biológico.

3. Vigilancia personal (Xe-133)

Dosimetría personal.

4. Características principales

Tipo de emisión	beta negativa, gamma
Organo de deposición preferente	cuerpo entero
Período efectivo	--
Energía efectiva	0,19 MeV

YTRIO

1. Terapia

Los casos de contaminación ligera por Y-90 no requieren tratamiento. En estos casos, o si se duda, administrar 0,5 gr de DTPA-Ca por inyección intravenosa lenta (diluido en suero fisiológico) y trasladar al paciente a un centro especializado.

Nota: la gran energía beta y corto período, pueden entrañar grandes dosis al intestino, por lo que se justifica el uso de un laxante (por ejemplo sulfato magnésico: 10 gr en 100-200 ml de agua).

2. Comportamiento metabólico

El Ytrio se comporta como un lantánido, se absorbe muy poco por el sistema digestivo. Se deposita principalmente en los huesos o hígado.

3. Vigilancia personal

* No es necesario (ni útil) usar dosímetro personal.

* Análisis radiotoxicológico de orina y heces.

4. Características principales

Tipo de emisión	beta negativa
Organo de deposición preferente	tracto gastrointestinal, hígado huesos
Período efectivo	--
Energía efectiva	0,89 MeV

ZINC

1. Terapia

El tratamiento es la inyección intravenosa lenta del DTPA (0,5 gramos). Sería mejor el DTPA-Zn, si pudiera conseguirse.

Los tratamientos largos han de llevarse en un centro especializado.

2. Comportamiento metabólico

Los órganos donde más se deposita son hígado, riñón, páncreas, músculo y esqueleto. La absorción intestinal es muy alta, del 80%. Durante los dos días siguientes a una inyección de Zinc, se observa una ligera eliminación en la orina y unas tres veces más en las heces.

3. Vigilancia personal (Zn-65)

Dosímetro personal

Medida de la radiación emitida o análisis radiotoxicológico de orina.

4. Características principales (Zn-65)

Tipo de emisión	beta positiva, gamma, X
Organo de deposición preferente	cuerpo entero, pulmones
Período efectivo	194 días (cuerpo entero) 81 días (pulmones)
Energía efectiva	--

ANEXO - 2. LISTA DE CHEQUEO

ACCIONES A TOMAR DESPUES DE SOSPECHAR LA EXISTENCIA DE CONTAMINACION INTERNA.

1. Tiempo post-contaminación: 0-6 horas

— Gestión médica:

* Terapia preliminar:

Lavado con gran cantidad de agua.

Se propiciará que sangren las heridas (si las hubiere).

Esto deberá hacerse a los pocos minutos o inmediatamente después de la contaminación.

Administración de pastillas de Yodo estable en forma de INa, IK o Yodato si el contaminante es un radioyodo.

Para minimizar la absorción respiratoria puede usarse irritantes y expectorantes. Para minimizar la absorción gastrointestinal usar laxantes u otros compuestos que la disminuyan.

— Investigaciones biológicas:

* Frotis de nariz y boca.

* Vigilancia de la radiactividad corporal en un contador de cuerpo entero.

* Recogida de muestras de orina y heces.

* Recogida de muestras de sangre para estudios cromosómicos.

— Estudios dosimétricos:

* Confirmación de la incorporación.

* Evaluación preliminar.

— Acción administrativa:

* Investigación sobre las circunstancias.

2. Tiempo post-contaminación. 6-48 horas

— *Gestión médica:*

* Decisión de terapia adicional.

* Terapia.

— *Investigaciones biológicas:*

* Muestras de heces y orina.

* Medida de la radiactividad corporal.

— *Estudios dosimétricos:*

* Demostración de una incorporación excesiva.

* Estudios de las muestras de aire.

3. Tiempo post-exposición.

— *Gestión médica:*

* Continuación de la terapia.

— *Investigaciones biológicas:*

* Programa de muestreo continuado.

— *Estudios dosimétricos:*

* Dosis recibidas, y estimación en el futuro, debidas a la actividad retenida en el órgano.

— *Acción administrativa:*

* Considerar los aspectos médico-legales del accidente.

ANEXO - 3. UTILLAJE

MATERIAL NECESARIO PARA UNA UNIDAD DE CONTAMINACION EXTERNA.

— Detectores de radiactividad

— Disoluciones lava ojos

Acido bórico al 2%

Bicarbonato sódico al 2%

Cloruro sódico al 9 por mil

— Disoluciones para la piel

Acido acético al 1%

Bicarbonato sódico al 5%

— Acomplejantes de aplicación local

Agua oxigenada al 3%

Permanganato potásico al 4%

Bisulfito sódico al 5%

Detergente

Pasta de dióxido de titanio

EDTA-Ca

DTPA

Acido acético al 1%

Acido cítrico al 1%

Acido clorhídrico al 1%

Disolución de Lugol

Agua mineral monosulfurada ('monoxidasa')

Solución Schubert

— Lavamanos, lavapies, lavacabezas, lavaojos, duchas y WC.

— Toalleros automáticos

— Secamanos por aire caliente

— Recipientes para ropa contaminada

— Camilla

— Vitrina con el siguiente material:

Antisépticos

Colirio anestésico

Jeringa lavaoidos

Guantes de cirugía

— Carro de curas con:

Algodón

Gasas

Pañuelos de papel

Pinzas

Limpiaoídos

Suero salino

Jabón líquido

Cepillos de cerda suave

Esponjas

Lanolina

MATERIAL NECESARIO PARA UNA UNIDAD DE CONTAMINACION INTERNA.

— Agentes acomplejantes:

DTPA-Ca

EDTA-Ca

Azul Prusia

Suero bicarbonatado al 14%

D-Penicilamina

— Antídotos orales

Sulfato de Ba o Alginato de Ca

Azul de Prusia coloidal

Sulfato de Magnesio

Solución de citrato magnésico

— Diluyentes isotópicos

Gluconato de Ca

Cloruro amónico oral

Ioduro potásico

Líquidos

— Suero fisiológico

— Algodón, gasas, bastoncillos limpia oídos

— Pinzas

— Pañuelos de papel

— Palangana

— Vasos de plástico

TEMA - 10. EL PERSONAL SANITARIO ANTE UNA EMERGENCIA NUCLEAR

INTRODUCCION

Dentro del concepto de "Seguridad a ultranza", utilizado en seguridad nuclear o radiactiva, o en cualquier actividad de la que se derive o pueda derivarse un riesgo radiológico inaceptable, según la reglamentación vigente, y como ampliación de dicho concepto, se realiza una planificación de las actuaciones a seguir ante una situación de emergencia.

En este contexto, diremos que una Emergencia es la situación provocada por un accidente capaz de superar las barreras que permiten la protección de las personas y los bienes. De modo que, un Plan de Emergencia constituye una barrera más frente a sucesos que, aunque tienen una probabilidad de ocurrencia muy pequeña, pueden derivar hacia unas consecuencias radiológicas más o menos graves para las personas y sus bienes.

En nuestro país, por razones históricas y administrativas, existen dos Planes de Emergencia asociados a las Instalaciones Nucleares y Radiactivas: El llamado Plan de Emergencia Interior y el Plan de Emergencia Exterior. Pero, aun cuando su finalidad es la misma obedecen a planteamientos distintos.

El Plan de Emergencia Interior es elaborado por el titular de la Instalación y forma parte de la documentación que éste habrá de someter a las Autoridades Competentes.

El Plan de Emergencia Exterior es elaborado por la Dirección General de Protección Civil teniendo en cuenta los criterios emanados del Consejo de Seguridad Nuclear, que participa en su aprobación por la Comisión Nacional de Protección Civil.

Esta distinción que legal y técnicamente es justificable, no es adecuada en el momento de producirse una situación de Emergencia. Por lo que, tanto la Dirección General de Protección Civil como el Consejo de Seguridad Nuclear han convenido en considerar ambos planes como un único **Plan de Emergencia Integrado**, que si bien mantiene la separación de ambos planes, los contenidos de ellos se ven correlacionados.

En este tema expondremos las características de ambos planes, las relaciones funcionales y orgánicas existentes entre ambos o interfase y la actividad, en dicha planificación, de los miembros del Grupo Sanitario con la finalidad de que conozcan las implicaciones de su intervención dentro del conjunto de las actuaciones del Plan.

PLAN DE EMERGENCIA INTERIOR

El Plan de Emergencia Interior es el que es competencia de la entidad titular de la licencia de la instalación. Este Plan esta constituido por una Documentación escrita en la que se describen los distintos aspectos del Plan de modo que el titular se responsabilizará de tener preparados:

— Una ORGANIZACION cuyo tamaño será acorde con el tipo de suceso anormal que se presente (Medios a activar) y estará también en función de la potencialidad o daño de la instalación consideranda en el Plan.

— Unos PROCEDIMIENTOS ESCRITOS que permitan hacer frente a la emergencia. En dichos procedimientos se elaborarán las INSTRUCCIONES que señalan las acciones a realizar en caso de emergencia. Estos procedimientos pueden dividirse en dos clases:

- * Los necesarios para llevar la instalación a una CONDICION SEGURA.
- * Los necesarios para hacer mínimo el riesgo de exposición a las personas.

De modo que el titular ha de tener previsto una Organización más o menos compleja en la que se define:

Un responsable llamado DIRECTOR DE EMERGENCIA que habrá de:

1. Formar y/o activar el resto de la organización.
2. Hacer cumplir los procedimientos escritos según el tipo de suceso para minimizar el riesgo de exposición y llevar la instalación a condición segura.

Además de las misiones antes reseñadas dicha organización deberá:

1. Notificar con prontitud y fiabilidad la situación que se presente a las Actividades competentes en especial al Consejo de Seguridad Nuclear y al Gobierno Civil de la provincia.
2. Disponer de los medios para apoyar a las Autoridades en la toma de decisiones.
3. Los medios humanos y materiales que deberán ser activados tanto en el propio emplazamiento como en el Centro de Apoyo Exterior del Titular, los Centros Sanitarios, con los que se tengan concertadas prestaciones para estos casos.

EL MAXIMO ACCIDENTE PREVISIBLE

El concepto de riesgo esta intimamente unido a toda actuación humana. La probabilidad de un hecho adverso se percibe siempre unida al daño producido. Estos dos elementos: probabilidad y daño son los constituyentes esenciales del riesgo y son siempre valorados de un modo consciente o inconsciente. A veces, podemos calcularlos con precisión, pero esto no sucede siempre así. Hay tres formas o métodos de cálculo del riesgo:

— El método actuarial que se basa en el uso de un amplio volumen de datos estadísticos, este es el método utilizado por las Compañías de Seguros que no es muy útil en el caso de los accidentes nucleares debido a que hasta ahora los habidos no constituyen una muestra suficientemente representativa. Sin embargo, este es el método utilizado para el cálculo de fiabilidad de los sistemas de una central nuclear pues la probabilidad de fallo de sus componentes puede obtenerse de las estadísticas industriales convencionales.

— El método del “peor caso” se basa en la selección del peor conjunto de circunstancias deseables que produzcan las peores consecuencias. La selección es claramente subjetiva y las consecuencias pueden, por lo tanto, ser irreales. Además no hay consideraciones cuantitativas sobre la probabilidad de las circunstancias que conducen a tales consecuencias. Este método es el único disponible cuando se carece de la información actuarial. Un ejemplo de ello es el concepto de MAXIMO ACCIDENTE CREIBLE utilizado desde los primeros días en la industria nuclear, que sirvió y sirve todavía, como concepto básico de Autorización.

— El método analítico se basa en una combinación de algunos datos primarios actuariales, que comprenden principalmente los componentes de los sistemas de la central junto con datos sobre el comportamiento humano, y un conjunto de técnicas analíticas que describen de que modo la situación de los elementos básicos puede afectar a todo el sistema, analizando los fenómenos físicos asociados con los estados de fallo y determinando las consecuencias derivadas de dichos fenómenos. Un ejemplo de este método es el Reactor Safety Study, más conocido como Informe Rasmussen.

El uso del método del peor caso para calcular el riesgo es equivalente a la llamada metodología determinista usada en la concesión de autorizaciones mientras que el uso del método analítico recibe el nombre de metodología probabilística en dicha concesión. El primero en usarse fue el método determinista y tal ocurrió en los Estados Unidos, pero al aumentar la potencia de las centrales las exigencias que planteaba el accidente máximo creíble diseñado hizo casi irreales las características que debía cumplir el emplazamiento.

En efecto el llamado MAXIMO ACCIDENTE CREIBLE se describe como aquel accidente que dará lugar a la liberación de productos de fisión en el edificio de contención, cuya integridad se suponía durante todo el accidente. Y en él, el escape gaseoso consistía en aproximadamente el 100% del inventario de gases nobles, el 50% de los halógenos, y el 1% de los productos volátiles (partículas). Esta mezcla se supone que fuga de la contención a una velocidad definida por la prueba de presión de la contención (0,1% al día es un valor usado). Se consideró que tal escape era debido al deterioro del núcleo por la falta de refrigeración debida a la ruptura del circuito primario.

La dispersión de los radioisótopos liberados se calculó también de manera determinista, usando unos valores para los parámetros de dispersión atmosférica que reflejaban unas pobres condiciones meteorológicas, en vez de promedios. También se consideró la contaminación de las aguas empleando la metodología del peor caso.

La utilización de este concepto de MAXIMO ACCIDENTE CREIBLE a las centrales de mayor potencia produjo el desarrollo de nuevos sistemas de seguridad:

- * Contenciones con bajas tasas de fugas.
- * Contenciones dobles.
- * Sistemas de aspersion en la contención para disminuir la presión mediante la condensación del vapor de agua.
- * Sistemas de extracción de calor de la contención.
- * Sistemas de limpieza del aire de la contención, incluyendo el uso de aditivos en el sistema de aspersion de la contención.
- * Sistemas redundantes de refrigeración de emergencia del núcleo.

Todos estos sistemas recibieron el nombre de Salvaguardias Tecnológicas, la adición de tales sistemas a las tres barreras, - vainas, barrera de presión y la propia contención- instaladas para evitar la liberación incontrolada de radioactividad, junto con los métodos administrativos de control - control de calidad, y sistema de Autorizaciones administrativas forman la llamada MATRIZ DE SEGURIDAD (TABLA 10.1).

De modo que las salvaguardias tecnológicas se diseñan por un accidente de probabilidad remota (especialmente las de la Contención), el llamado Accidente Base de Diseño que es el Accidente de Pérdida de Refrigerante (LOCA) en el que se supone una pérdida instantánea de la segunda Barrera (por la llamada ruptura en guillotina de un lazo del primario) que conlleva a la pérdida sucesiva de las demás, si no actuasen dichas Salvaguardias.

TABLA - 10.1

LA MATRIZ DE LA SEGURIDAD

BARRERAS MULTIPLES	VAINA	BARRERA DE PRESION	CONTENCION
Salvaguardias Tecnológicas	Sistema de Protección del Reactor	Sistema de Refrigeración de Emergencia del Núcleo	Salvaguardias de la Contención
Control Administrativo	Control de la Calidad de los Componentes	Sistema de Garantía de la Calidad	Autorizaciones Administrativas

Es evidente que tal ruptura instantánea de las gruesas tuberías de acero del circuito primario es una hipótesis irreal. Sin embargo, pudiera ocurrir, como lo sucedido en los accidentes de la Isla de Las Tres Millas (EE.UU.) o en el de Chernobílsk (URSS), que una secuencia de fallos sucesivos, de origen material o humano, conduzcan a una pérdida de integridad de las barreras.

Evidentemente esta secuencia tendrá un suceso, o más bien un escenario inicial de sucesos, que la inicie. Este es el llamado SUCESO INICIADOR.

Se han estudiado los posibles sucesos iniciadores y las secuencias asociadas a los mismos, que podrían dar lugar a estas situaciones. Es por ello, por lo que este suceso iniciador caracteriza una serie de condiciones iniciales cuya evaluación permite hacer previsiones sobre la posible evolución de la emergencia.

PLAN DE EMERGENCIA EXTERIOR

Para hacer frente a los riesgos del funcionamiento de las centrales nucleares, los Servicios de Protección Civil redactan los Planes de Emergencia Nuclear de las provincias en las que se sitúan tales instalaciones.

Este Plan de Emergencia Nuclear de la Provincia se desarrolla bajo la responsabilidad del Gobernador Civil. Se pone en marcha cuando se prevé que un accidente en la central puede tener consecuencias radiológicas fuera del Área de Exclusión de la instalación. Por lo cual también podríamos hablar de un Plan de Emergencia Exterior (a la central nuclear).

El objetivo del Plan de Emergencia es el de evitar, o al menos reducir en lo posible, los efectos adversos de las radiaciones ionizantes sobre la población en caso de accidente nuclear.

Dado que la evolución del suceso iniciador de la Emergencia Nuclear no se produce instantáneamente sino que sigue un proceso, podemos hablar del carácter netamente preventivo de este Plan mediante el cual se definen las medidas de protección adecuadas para cada situación y con tiempo suficiente para su aplicación.

Por lo tanto, podemos aseverar que una "adecuada planificación" conlleva a una eficaz respuesta a la emergencia.

Para obtener esta "adecuada planificación" se deben tener en cuenta los siguientes principios fundamentales:

- * Notificación, por parte de la central nuclear, a la autoridad competente de sucesos que puedan inducir daños a las personas o a sus bienes.
- * Evaluación de los sucesos con el fin de conocer la magnitud del daño o riesgo asociado y tomar así las decisiones oportunas para minimizar sus consecuencias.
- * Establecimiento de Fases y Situaciones en concordancia con las medidas de protección que deben adoptarse.
- * Actuación coordinada de las diferentes organizaciones involucradas de manera que se consiga un máximo nivel de protección.
- * Conocimiento de la capacidad y de los medios, tanto humanos como materiales, necesarios.
- * Información a la población afectada y al público en general.
- * Mantenimiento de la efectividad del Plan a través de revisiones y entrenamientos periódicos con el personal y equipos asociados a la emergencia.

Además también hay que considerar las características específicas del entorno de una central:

- * Situación geográfica del emplazamiento.
- Condiciones meteorológicas predominantes.
- * Delimitación de la zona afectada.
- * Distribución de la población, cultivos, y ganadería en las zonas de planificación.
- * Comunicaciones de la zona.

INTERFASE

Entre el Plan de Emergencia Interior y el Plan de Emergencia Exterior existe la interfase como relación funcional y orgánica entre ambos.

Esta interfase implica, por un lado, que ambos Planes comparten una comunidad doctrinaria constituida por los siguientes principios compartidos como un lenguaje común:

- Categorías
- Fases y situaciones
- Niveles de intervención

Por otra parte, logra la materialización de esa comunidad doctrinaria a través del modelo de Notificación de Emergencia Nuclear, el teléfono punto a punto, el telex y el telefax entre ambos.

Asimismo asegura el conocimiento adecuado por parte del Director del Plan Provincial de aquellos procedimientos de la Central Nuclear que puedan tener incidencia en el exterior.

NOTIFICACION DE LA EMERGENCIA

Cuando el funcionamiento de la Central se sale de especificaciones técnicas pudiendo producirse emisiones anormales de efluentes radiactivos que sobrepasen las especificaciones de vertido o cuando por causa ajena a la misma se derive una situación que pueda hacer degradar su nivel de seguridad física o nuclear estamos frente a sucesos que deben ser notificados.

Una vez identificado el suceso iniciador, el Director de Emergencia de la Central Nuclear lo notificará al Centro de Coordinación Operativa del Gobierno Civil de la Provincia en que este emplazada la Central (CECOP) y al Consejo de Seguridad Nuclear (SALEM), buscando un equilibrio entre la prontitud en realizar la notificación y el detalle de la misma.

Los datos que se notifican deben ser concisos y contener la información suficiente para que la Dirección del Plan pueda conocer con claridad la situación y en base a ello actuar consecuentemente.

Quizá en un primer momento no se conozca, o no sea posible determinar todos los datos. Pero, según la práctica seguida en seguridad radiológica, esta carencia se sustituye por hipótesis conservadoras que aseguren una sobreestimación de los efectos.

El CECOP y el SALEM efectuarán la verificación de la notificación comprobando su autenticidad.

En la evaluación del suceso se puede suponer o no la emisión de materiales radiactivos al exterior y se hace necesario conocer las condiciones ambientales a fin de estimar los efectos radiológicos sobre la población y limitar el área de actuación.

En base a estos efectos se podrán iniciar las medidas adecuadas.

A medida que evolucione el suceso, se podrán ir conociendo más datos que hagan posible un conocimiento realista de la situación y así decidir sobre las medidas de protección de la población a aplicar de forma más rigurosa.

Las decisiones a tomar por el Director del Plan han de estar basadas en cuanto a su aspecto radiológico se refiere, en las evaluaciones realizadas con los datos disponibles.

Estas evaluaciones tienen como finalidad la estimación de los efectos radiológicos que pueden producirse a causa del suceso. Este concepto de cálculo "apriorístico" permite a la Dirección del Plan tomar las medidas correspondientes a fin de garantizar a la población un nivel de protección radiológica en consonancia con los criterios establecidos por el Consejo de Seguridad Nuclear.

Los posibles o razonablemente hipotéticos accidentes que pueden ocurrir en una central nuclear de potencia quedan clasificados en cuatro categorías, según la liberación máxima de material radiactivo que, a consecuencia de una evolución pesimista del suceso iniciador, sale al exterior.

Los radionucleidos considerados para el establecimiento de tales categorías se agrupan en gases nobles y radioyodos, según la práctica usual seguida y las recomendaciones internacionales al respecto. No obstante en la Guía del Consejo de Seguridad Nuclear "Modelo Dosimétrico en Emergencias Nucleares" se considera de forma individual aquellos que han de tenerse en cuenta en la evaluación de los efectos radiológicos.

Las cuatro categorías o situaciones de emergencia en la central son las siguientes (Tabla 10.2.).

TABLA - 10.2.

Categorías de sucesos

SUCESOS	Emisión radiactiva esperada	Situación en la central
Categoría I	Ninguna	Suceso anormal notificable.
Categoría II	Ligera	Alerta de emergencia.
Categoría III	Significativa	Emergencia en el emplazamiento.
Categoría IV	Máxima	Emergencia en el exterior del emplazamiento (Emergencia General).

Categoría I

La constituyen aquellos sucesos de los que no se derivan vertidos al medio, no obstante como medida de precaución han de ser comunicados a las Autoridades.

Se incluye toda circunstancia o incidente de carácter limitado en extensión o gravedad que pueden tener o no un efecto directo sobre la operación de la central y que por si solos no suponen una amenaza inminente para la seguridad.

Ejemplos:

* Puesta en marcha automática del Sistema de Refrigeración de Emergencia del Núcleo.

- Superación del algún límite de seguridad nuclear de las Especificaciones Técnicas de la Central. Esto es, de los Límites Técnicos de Operación, de las Condiciones y los Requisitos impuestos a la planta en interés de la salud y seguridad del público y del medio ambiente.

- * Incendios con duración superior a una dada, pero que no afectan a sistemas de seguridad nuclear.

- * Fenómenos sísmicos que activan la instrumentación de vigilancia sísmica.

- * Etc.

Categoría II (Alerta de Emergencia)

La constituyen sucesos que en caso de evolución desfavorable pueden liberar:

0,37 PBq (10^4 Ci) de gases nobles. (*)

370 GBq (10 Ci) de radioyodos. (*)

En esta categoría, aun cuando ni la Central ha sufrido daños ni su personal tampoco, e incluso, puede que no sea necesario cambiar inmediatamente el estado de la planta, pero se reconoce que hay que tomar precauciones.

Ejemplo:

- * Fenómenos naturales severos como inundación, terremotos que puedan afectar la seguridad de la central.

- * Incendios importantes en los alrededores del emplazamiento o en la propia central.

- * Liberación de gases tóxicos o explosión en ruta de transporte cercana.

- * Fallos de dispositivos que pueden afectar a la seguridad nuclear y por lo tanto conducir a descargas inaceptables de radiactividad.

- * Incidentes en centrales cercanas.

- * Amenazas contra la seguridad física de la central.

- * Etc.

Categoría III (Emergencia en el emplazamiento)

La constituyen sucesos que en caso de evolución desfavorable pueden liberar:

37 PBq (10^6 Ci) de gases nobles. (*)

0,037 PBq (10^3 Ci) de radioyodos. (*)

Supone la posible descarga accidental de materiales radiactivos que puede extenderse más allá de la central y que según la información y la evaluación realizada, es improbable que exija adoptar medidas de protección en el exterior del emplazamiento.

Ejemplo:

- * Situaciones tales que los monitores de zona y de fuentes no señalan efectos radiológicos inaceptables en el exterior del emplazamiento.

- * No existen fallos intolerables en la hermeticidad del circuito primario ni de la contención.

(*) Estos valores corresponden a una central de 1.000 Mwe (3.200 Mwt) de potencia. Si fuese otra la potencia, habrían de aplicarse los factores de escala correspondientes.

Categoría IV (Emergencia en el exterior del emplazamiento o Emergencia General).

La constituyen sucesos que en el caso más desfavorable de su evolución conducen a la fusión total o parcial del núcleo, por concatenación de fallos de las salvaguardias tecnológicas, incluida la contención. Según las hipótesis más conservadoras actualmente consideradas, la liberación puede alcanzar:

1,4 x 10⁴ PBq (3,7 x 10⁸ Ci) de gases nobles. (*)

6,7 x 10³ PBq (1,8 x 10⁸ Ci) de radioyodos. (*)

Una situación de emergencia en el exterior del emplazamiento es aquella que tiene como origen la liberación de materiales radiactivos en cantidad tal que es necesario adoptar medidas de protección en el exterior del emplazamiento y será necesaria la evacuación del emplazamiento de las personas cuya presencia no sea esencial.

Teniendo pues clasificados los sucesos iniciadores en categorías, y siempre con miras a obtener la protección máxima a la población, cuando se identifica uno de ellos puede preverse conservadoramente, la actividad liberada.

NIVELES DE INTERVENCION

La gravedad de un accidente nuclear sería dada por la dosis de irradiación que puede recibir la población.

Esta dosis, a su vez, viene condicionada por una serie de factores que podemos concretar en tres:

* Gravedad del incidente que se puede definir en función de la cantidad de sustancias radiactivas que puedan salir al exterior.

* Condiciones meteorológicas, incluida dirección del viento, que permitirá estimar las condiciones en que dichas sustancias se van a difundir en la atmósfera, cómo se depositan sobre el suelo y cual es la dirección más probable hacia la que se van a dirigir.

* Distancia a la central nuclear, pues la probabilidad de verse afectados por las radiaciones disminuye a medida que nos alejamos del foco emisor.

Conocidos estos valores existen métodos de cálculo que permiten estimar cuál será la dosis de irradiación que puede recibir un individuo situado en un lugar determinado.

Mediante estos cálculos, la Dirección del Plan Provincial decide las medidas de protección a adoptar.

En España, para que sirvan de criterio a la Dirección del Plan, el Consejo de Seguridad Nuclear establece unos Niveles de Intervención o "niveles de referencia", que son valores de dosis equivalente esperada en una zona, y que coinciden con los de la Comunidad Económica Europea (Julio 1982), para definir la situación de emergencia que conviene adoptar.

* Nivel inferior de intervención: define dosis por debajo de las cuales no está justificada la adopción de las medidas de protección a la población que se indican.

(*) Estos valores corresponden a una central de 1.000 Mwe (3.200 Mwt) de potencia. Si fuese otra la potencia, habrían de aplicarse los factores de escala correspondientes.

DOSIS EQUIVALENTE mSv (rem) (*)

Medida de protección	Todo el cuerpo	Tiroides, pulmón u otros órganos individualmente considerados
CONFINAMIENTO	5 (0,5)	50 (5)
PROFILAXIS	--	50 (5) sólo tiroides
EVACUACION	100 (10)	300 (30)

(*) Expresada en milisievert y rem.

* Nivel superior de intervención: define dosis por encima de las cuales, si está justificada, se adopta la adopción de las medidas de protección a la población que se indican.

DOSIS EQUIVALENTE mSv (rem) (*)

Medida de protección	Todo el cuerpo	Tiroides, pulmón u otros órganos individualmente considerados
CONFINAMIENTO	25 (2,5)	250 (25)
PROFILAXIS	--	250 (25)
EVACUACION	500 (50)	1.500 (150)

(*) Expresada en milisievert y rem.

En la práctica, los valores que se adoptan para la definición de las situaciones de emergencia son los definidos por el nivel inferior, es decir, se adopta la medida de protección correspondiente cuando se produce o se espera que se produzca una exposición que de lugar a una dosis equivalente igual o superior a la indicada por el nivel inferior de intervención (ver figura 10.1.).

• Niveles de dosis para el personal de intervención en la emergencia

El personal con misiones específicas asignadas dentro del Plan de Emergencia estará sometido a un control dosimétrico especial, a fin de asegurar que la dosis de este personal se mantiene a los siguientes niveles:

Para actividades generales a realizar dentro del Plan de Emergencia, 250 mSv (25 rem) por exposición externa o 1.200 mSv (120 rem) a la glándula tiroides. Únicamente en situaciones excepcionales se puede permitir la superación de los valores anteriores.

FASES Y SITUACIONES DE EMERGENCIA

En caso de emergencia, las medidas de protección se adoptan en función de la gravedad que para la población pueda tener el suceso. Siendo esta emergencia de carácter nuclear, las consecuencias primordiales que se consideran para la población son las radiológicas y que guardan una estrecha relación con la cantidad de sustancias radiactivas que puedan ser liberadas al exterior. Considerando los niveles de intervención (inferior y superior) las medidas de protección a adoptar se agrupan en Situaciones las cuales, a su vez, se agrupan en dos Fases: Preemergencia y Emergencia en función de la dosis que se estime pueden recibir los grupos críticos de población como consecuencia de

la emisión de material radiactivo. En los primeros momentos, y para asegurar una rápida respuesta, puede considerarse la **categoría del suceso** para establecer las Fases y Situaciones.

Fase de Preemergencia:

Viene caracterizada por sucesos que no producen vertidos anormales al exterior, o si se producen tales vertidos, los efectos generados sobre la población no alcanzan los niveles inferiores de intervención. Esta Fase contempla dos Situaciones:

— Situación 0:

Cuando el suceso ocurrido es tal que es razonable que no se produzcan vertidos al exterior. No se considera necesario adoptar medidas de protección a la población.

— Situación 1:

El suceso ocurrido es tal que los efectos radiactivos, aún en circunstancias adversas no dan lugar a dosis superiores al nivel inferior de intervención. No está justificada la adopción de medidas de protección a la población, sin embargo es recomendable implantar el control de accesos para evitar cualquier otro tipo de riesgos.

Fase de Emergencia:

Viene caracterizada por sucesos que pueden conducir a liberaciones de radiactividad que entrañen riesgos radiológicos inaceptables a la población por excederse los niveles superiores de intervención si no se adoptan las medidas de protección convenientes.

La Fase de Emergencia contempla las Situaciones 2, 3 y 4 según la estimación de las dosis a la población afectada.

— Situación 2:

La liberación supuesta o real es de tal magnitud que, en circunstancias ambientales adversas, las dosis a la población igualan o superan el nivel inferior de intervención pero no sobrepasan la cuarta parte del nivel superior de intervención. Las medidas de protección a considerar son, además del control de accesos, el confinamiento de las personas en edificios, la profilaxis radiológica y la protección personal.

— Situación 3:

La liberación, supuesta o real es tal que, en circunstancias ambientales adversas, las dosis a la población igualan o superan la cuarta parte del nivel superior de intervención pero no lo sobrepasan. Las medidas de protección a considerar, además de las ya indicadas, son: la evacuación de grupos críticos, el control de alimentos y agua y la estabulación de animales.

— Situación 4:

La liberación, supuesta o real es tal que, en circunstancias ambientales adversas, las dosis a la población igualan o superan el nivel superior de intervención; en este caso la medidas de protección a considerar, además de las ya indicadas, es la evacuación general de la población.

En el siguiente cuadro resumimos las condiciones que definen estas situaciones.

TABLA - 10.3.

Condiciones y situaciones

	No se esperan vertidos	Situación 0
PREEMERGENCIA	< 5 mSv (< 0,5 rem, < 2,5 rem) a todo el cuerpo	Situación 1
	< 50 mSv (< 5 rem) al tiroides	
	> 5 mSv, < 25 mSv (> 0,5 rem, < 2,5 rem) a todo el cuerpo	Situación 2
> 50 mSv, 250 mSv (> 5 rem, < 25 rem)	al tiroides	
EMERGENCIA	> 25 mSv, < 100 mSv (> 2,5 rem, < 10 rem) a todo el cuerpo	Situación 3
	> 250 mSv, < 1000 mSv (> 25 rem, < 100 rem) al tiroides	
	> 100 mSv (> 10 rem) a todo el cuerpo	Situación 4
	> 1000 mSv (> 100 rem) al tiroides	

Asimismo, si la evolución del accidente lo hace aconsejable, el Director del Plan podría declarar la Situación que considere oportuna, aunque la estimación de dosis no corresponda con los niveles de intervención.

La declaración de una determinada Situación puede hacerse directamente, sin paso previo por situaciones anteriores, pero las acciones que deben desencadenarse en este caso, tienen prioritariamente en consideración la protección a la población y acumular paralelamente las acciones previstas para las situaciones anteriores.

ZONAS DE PLANIFICACION

Los efectos de un posible accidente nuclear disminuyen con la distancia a la central, de allí que se contemple una clasificación en zonas para la planificación en emergencia nuclear.

Estas zonas de planificación se determinan por su distancia a la central nuclear y por los efectos esperados en ellas a consecuencia del espectro de accidentes tenidos en cuenta en la elaboración del Plan.

** Zona bajo control de explotador*

Las medidas de protección y las actuaciones en esta zona están especificados en el Plan de Emergencia de la Central Nuclear.

Sus dimensiones quedan determinadas en las autorizaciones correspondientes expedidas por el Ministerio de Industria y Energía a favor de la Central (Autorizaciones de Puesta en Marcha, etc.).

* *Zona de exposición por submersión (Zona I)*

Se corresponde con aquel área geográfica en donde el camino crítico de exposición está asociado a la permanencia en la nube radiactiva. A consecuencia de dicha permanencia, la población soporta un riesgo radiológico por irradiación externa o interna (vía inhalación) por tanto en ella se han de considerar medidas de protección destinadas a minimizar el riesgo radiológico individual.

También se hace necesario, considerar los caminos de exposición debidos a la deposición de partículas en el terreno, con el fin de limitar las dosis equivalentes individuales y colectivas a la población que permanezca en la misma o a los equipo que intervengan en la emergencia.

* *Zona de exposición por ingestión (Zona II)*

Corresponde con aquel área geográfica en donde el camino crítico de exposición está asociado a la contaminación de alimentos debida a la deposición de partículas radiactivas en el terreno o bien sobre dichos alimentos.

A consecuencia de dicha ingestión la población soporta un riesgo radiológico por irradiación interna. En esta zona se han de considerar medidas de protección destinadas a prevenir el riesgo radiológico a causa del consumo de productos alimenticios y agua. Tales medidas se justificarán a través del equivalente de dosis colectiva.

Esta zona comprende también a la anterior.

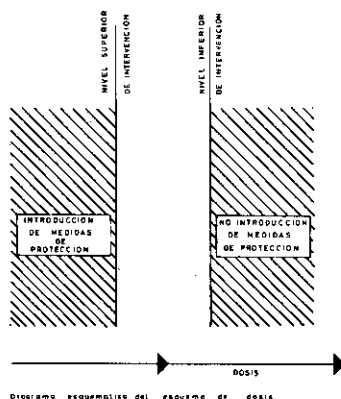


FIGURA 10.1.

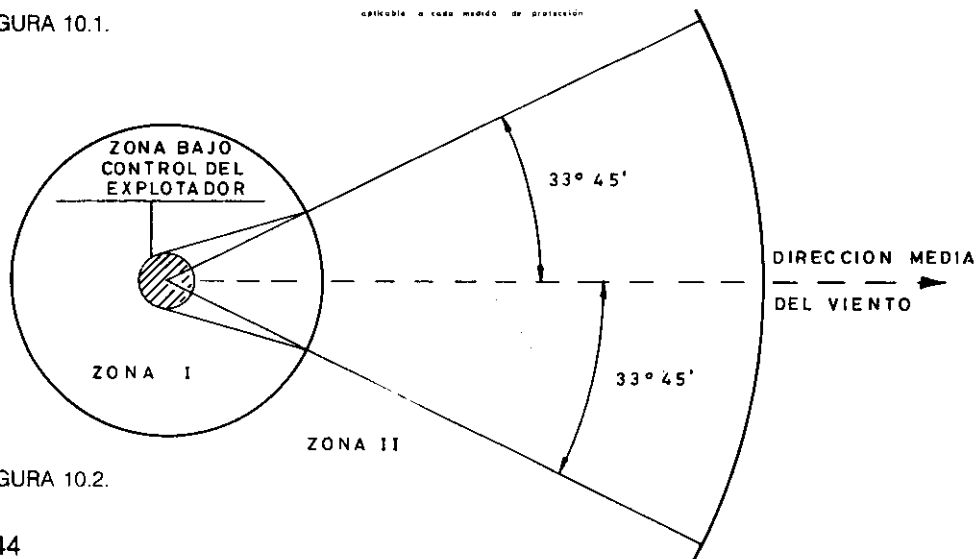


FIGURA 10.2.

Según las características de las centrales nucleares que operan en España o están en construcción, los parámetros de difusión de sus emplazamientos, el perfil topográfico y la distribución demográfica, el Consejo de Seguridad Nuclear ha estimado que a fin de uniformizar desde el punto de vista de planificación las dimensiones de las zonas, y teniendo en cuenta la práctica usual de estimación de los efectos radiológicos internacionalmente aceptada, se considera, con los márgenes de seguridad adecuados, que:

La zona de exposición por submersión (o Zona I a efectos del Plan) no será superior a 10 km.

La zona de exposición por ingestión (o Zona II a efectos del Plan), no será superior a 30 km.

Así mismo, la Zona I se subdivide en tres subzonas dependiendo de las medidas de protección que en ellas se pueden tomar para la protección de la población durante la emergencia.

Subzona IA no superior a 3 km.

Subzona IB no superior a 5 km.

Subzona IC no superior a 10 km.

(Ver figura 10.2.).

Sector de atención preferente:

Cuando se origina en la central un suceso que puede dar lugar a la expulsión al exterior de productos radiactivos estos salen en forma de nube que se difunde en la atmósfera en función de las condiciones meteorológicas y de la dirección del viento.

Por lo tanto, en los primeros momentos de comenzar los vertidos radiactivos no se verán afectadas las zonas circundantes en toda su amplitud, sino que siguiendo la dirección del viento afectarán con anterioridad aquellas que se encuentren situadas a sotavento.

Teniendo en cuenta los fenómenos de transporte y sus posibles fluctuaciones, el Consejo de Seguridad Nuclear considera aceptable la figura 10.3. como el área máxima dentro de las Zonas I y II que puede quedar afectada y sobre lo que las autoridades responsables deben centrar su atención en los primeros momentos de iniciarse el vertido radiactivo.

CATEGORIAS, FASES Y SITUACIONES

De lo anteriormente expuesto se deduce la Tabla 10.4. en la que se pone de manifiesto la correlación de las Categorías, con las Fases y con las Situaciones.

TABLA - 10.4.

Correspondencia entre Fases, Situaciones y Categorías

FASE	SITUACION	NIVELES DE INTERVENCION		CATEGORIA DE SUCESO (*)
		DOSIS A CUERPO ENTERO	DOSIS A TIROIDES DE NIÑO	
PREEMERGENCIA	0 (**)	5 mSv (0,5 rem)	50 mSv (5 rem)	I y II III
	2	5 mSv (0,5 rem) 25 mSv (2,5 rem)	50 mSv (5 rem) 250 mSv (25 rem)	
EMERGENCIA	3	25 mSv (2,5 rem) 100 mSv (10 rem)	250 mSv (25 rem) 1000 mSv (100 rem)	IV
	4	100 mSv (10 rem)	100 mSv (100 rem)	

(*) La correspondencia entre Fases, Situaciones y Categorías de sucesos es válida en los primeros momentos de la emergencia.

(**) No se esperan vertidos

Como puede observarse el nivel superior de intervención viene establecido en 100 mSv (10 rem) a todo el cuerpo y 1000 mSv (100 rem) a tiroides. Estos valores están por debajo de los recomendados por la Comisión de las Comunidades Europeas.

MEDIDAS DE PROTECCION

De acuerdo con la evolución de la emergencia, el Director del Plan decretará las Fases y Situaciones en las que se aplicará una serie de medidas de protección a la población, que tienen como finalidad reducir las exposiciones a valores tan bajos como razonablemente puede conseguirse.

Cuando tiene lugar un accidente de consecuencias radiológicas, los efectos asociados pueden disminuirse sensiblemente siempre que se tomen las medidas adecuadas respecto al tipo de riesgo y que esto se haga en el momento oportuno. Estas medidas han de ser suficientemente flexibles para que sean adoptadas con facilidad y sencillez. Si bien su adopción no representa un riesgo adicional, en una emergencia hay que considerar que pueden producirse entre la población otros efectos no radiológicos más graves que los radiológicos, que son los que se tratan de evitar.

En España, de acuerdo al Plan de Emergencia Nuclear, las medidas de protección a considerar son:

— **Control de accesos.** Trata de evitar que se acerquen a las zonas en peligro las personas que están fuera. Disminuye la dosis a la población y facilita el tráfico en la zona afectada.

— **Confinamiento.** Reduce la dosis por exposición a la nube y por inhalación.

— **Profilaxis personal.** En la práctica, se reduce a la ingestión de yodo no radiactivo. El tiroides se satura con este yodo y si después el individuo inhala yodo radiactivo, éste no se incorpora al organismo. Para que sea eficaz, dicha ingestión tiene que realizarse antes del paso de la nube radiactiva.

— **Protección personal.** El uso de prendas que envuelvan el cuerpo o que filtren el aire que se respira.

— **Control de alimentos y agua de bebida.** Trata de evitar la irradiación por ingestión.

— **Estabulación de animales.** Trata de evitar que los animales sean vehículo para que la contaminación se propague o llegue a las personas a través de ellos.

— **Evacuación.** Es la medida más eficaz; sin embargo, sólo debe adoptarse cuando la dosis esperada lo justifique, por los muchos inconvenientes y trastornos que conlleva.

— **Descontaminación de personas y equipos.** Esta medida habrá que adoptarla cuando, a pesar de todas las precauciones, se haya producido dicha contaminación.

— **Asistencia sanitaria.** Más que una medida de protección se trata de un servicio que hay que tener previsto para el caso de que se produzcan accidentes personales durante la emergencia. Conviene distinguir entre los casos de personas que puedan estar irradiadas o contaminadas y aquellas otras cuyas enfermedades o traumatismos no vayan unidos a problemas radiológicos. Para las primeras hay que tener disponibles servicios especiales; para los segundos son los servicios sanitarios que se pueden necesitar en cualquier situación no normal.

— **Descontaminación de áreas y traslado.** Se trata de medidas a adoptar después de la emergencia en aquellas zonas que hayan podido ser contaminadas. La **descontaminación** debe realizarla personal especializado y su finalidad es eliminar la radiactividad residual después de la emergencia. Se llama **traslado** a la evacuación, después de la emergencia, de las áreas contaminadas.

De acuerdo con la situación las medidas a considerar para su adopción, si procede, son las que a continuación se exponen. Nótese que cada Situación acumula las de Situaciones anteriores.

TABLA - 10.5.

Medidas y Fases

MEDIDAS	FASE PREEMERGENCIA		FASE EMERGENCIA		
	SITUACION		SITUACION		
	0	1	2	3	4
Ninguna	*				
Control de acceso		*	*	*	*
Confinamiento			*	*	*
Profilaxis radiológica			*	*	*
Protección personal			*	*	*
Control de alimentos y agua				*	*
Estabulación de animales				*	*
Evacuación de grupos críticos				*	*
Evacuación general					*
Descontaminación de personas y equipos				*	*
Asistencia sanitaria				*	*

Es preciso señalar que:

— Por debajo del nivel inferior de intervención no es necesario adoptar medidas de protección, pero es recomendable el control de accesos.

— Al alcanzar el nivel superior de intervención de la Situación 2, debe adoptarse la medida de confinamiento.

— Cuando en la Situación 4 se llegue a dosis de 500 mSv (50 rem) a todo el cuerpo 1500 mSv (150 rem) al tiroides debe adoptarse la medida de evacuación de la población.

— La adopción de medidas de protección, dentro del margen de aplicación, se efectuará considerando aquellos factores ambientales que condicionan el nivel de protección a la población.

ESQUEMA GENERAL DEL PLAN DE EMERGENCIA PROVINCIAL

El Plan de Emergencia Exterior o Plan Provincial tiene como objetivo evitar, o al menos reducir en lo posible, los efectos adversos de las radiaciones ionizantes sobre la población en caso de accidente nuclear.

El Plan contempla la planificación de las actuaciones, en caso de emergencia radiológica producida por la posibilidad de accidente nuclear, en una central nuclear de potencia, preferentemente durante las fases inicial e intermedia de dicho accidente.

Por tanto, para materializar y cumplir los objetivos previstos, dentro de una planificación de emergencia nuclear, se establece, en cada provincia donde está emplazada una central nuclear, un plan de actuación que describa la organización, funciones y acciones de

los distintos elementos que deben intervenir en la emergencia, así como, de los medios con que deben estar dotados para cumplir lo establecido en el Plan.

El Plan Provincial se estructura de la siguiente manera (ver figura 10.3.).

— **Director del Plan:** es el Gobernador Civil, que como responsable provincial de Protección Civil, decide sobre las acciones a tomar en respuesta a la emergencia dentro del marco del Plan.

— **Centro de Coordinación Operativa (CECOP):** es el Puesto de Mando donde se controlan las operaciones de emergencia, recibiendo la información de la situación que, una vez indicada, se traduce en decisiones. Lo constituyen la Sala de Coordinación Operativa (SACOP) y el Centro de Transmisiones (CETRA).

— **Comité Asesor:** para asistir el Director del Plan en los distintos aspectos relacionados con el mismo.

— **Gabinete de Información:** cuya función es difundir órdenes, consignas y recomendaciones e informar en relación con la emergencia a los medios de comunicación social y a cuantas personas lo necesiten.

— **Grupos de Acción:** la ejecución de las medidas y acciones previstas para el desarrollo del Plan se estructura a través de tres Grupos de Acción:

- * Grupo Sanitario: es el responsable de la asistencia sanitaria de la población en la emergencia.

- * Grupo Logístico: es el responsable de la previsión y provisión de todos los medios logísticos que el Director del Plan y los demás Grupos necesiten para cumplir sus respectivas misiones. Así como, la realización de las operaciones de movilización de dichos medios para cumplir la finalidad global del Plan.

- * Grupo Radiológico: es el responsable de seguir y evaluar la emergencia desde el punto de vista radiológico, y proponer a la Dirección del Plan las medidas de protección a adoptar.

ORGANIZACION DEL GRUPO SANITARIO

El **Grupo Sanitario** es el responsable de la asistencia sanitaria de la población en la emergencia.

Tiene asignadas las siguientes **funciones** básicas:

- * Aplicar las medidas profilácticas que se regulan en el Plan de Emergencia o las que se ordenen en cada momento por el Director del Plan.

- * Asistir a las personas irradiadas o contaminadas, así como a todas aquéllas que necesitan asistencia sanitaria.

- * Evacuar, en colaboración con el Grupo Logístico, a las personas que necesiten transporte sanitario.

- * Realizar el control médico de las personas evacuadas o que participan en la emergencia.

La organización de este Grupo de Acción se estructura de acuerdo con el siguiente organigrama (ver figura 10.4.).

Para el cumplimiento de las funciones asignadas el Grupo sanitario tiene la estructura que se describe a continuación:

Jefe de Grupo: es designado por el Director del Plan entre las autoridades sanitarias provinciales dependientes de la Administración Central o de la Comunidad Autónoma correspondiente.

Está auxiliado por una Comisión Asesora, designada por él, cuyos integrantes serán aquellas personas que por sus competencias y funciones puedan asumir la Jefatura de los Servicios de Acción que componen el Grupo. De entre los miembros de dicha Comisión Asesora, designará a su vez un Segundo Jefe, para asistirle en el cumplimiento de sus funciones, sustituirle en sus ausencias, asegurar la adecuada coordinación entre los Jefes de los Servicios Operativos, y hacerse cargo de las funciones que específicamente delegue.

Para la ejecución de las funciones del Grupo Sanitario se establecen Cinco Servicios Operativos de Sanidad:

1) **Servicio de Primera Intervención:** Está constituido por los Jefes Locales de Sanidad y los sanitarios locales de los Municipios de la zona afectada por la emergencia.

2) **Servicio de Estaciones de Clasificación y Descontaminación (ECD):** Está constituido por los Jefes Locales de Sanidad y los sanitarios locales de los Municipios sede de las ECD y cuenta con la colaboración del Equipo de Protección Radiológica asignado.

3) **Servicio de Asistencia Sanitaria de las Areas Base de Recepción Social (ABRS):** Se integra con los Jefes Locales de Sanidad y los sanitarios locales de los municipios con funciones de ABRS.

4) **Servicio Sanitario de Apoyo:** La constituyen los Centros Sanitarios de Apoyo (CSA) que se consideren necesarios y que se elegirán entre los hospitales y clínicas de la provincia.

5) **Servicio Médico para Irradiados:** Este Servicio se constituye con el personal e instalaciones especializadas del Centro Médico (CMI) de Irradiados que se designe.

— El **Jefe del Grupo Sanitario** tiene las siguientes funciones:

- * Asesorar al Director del Plan en todo lo referente a los aspectos sanitarios.
- * Formar parte del Comité Asesor.
- * Asegurar el cumplimiento de las directrices sanitarias del Plan.
- * Colaborar en el mantenimiento de la efectividad del Plan.

— Los Jefes Locales de Sanidad y Sanitarios Locales que componen el **Servicio de Primera Intervención** deberán:

- * Evaluar y proponer la prioridad en la evacuación de grupos críticos. Evaluar y ejecutar la evacuación preventiva de los posibles enfermos o impedidos.
- * Asistir sanitariamente en los casos de traumatismos, pánico, etc., procurando paliar en lo posible las situaciones de histeria colectiva que puedan presentarse.
- * Realizar tratamiento médico urgente a las personas potencialmente contaminadas que presenten además lesiones traumáticas.
- * Distribuir fármacos profilácticos contra la contaminación interna cuando lo ordene el Jefe del Grupo Sanitario.
- * Colaborar en la información a la población afectada sobre normas de conducta a seguir (confinamiento, etc.).
- * Recoger toda la información posible sobre el personal afectado, las incidencias sanitarias que vayan produciéndose y las necesidades de asistencia.

— Los Jefes Locales de Sanidad y sanitarios locales de los Municipios sede de las Estaciones de Clasificación y Descontaminación tienen asignadas las siguientes funciones:

- * Recibir e identificar a la población remitida por el Servicio de Primera Intervención.

* Evaluar la dosis recibida o la contaminación asociada para determinar el traslado a un centro de tratamiento de irradiados o proceder a la descontaminación o tratamiento médico más adecuado.

* Determinar la remisión de las personas a las ABRS o a los CSA, según corresponda.

— Los Jefes Locales de Sanidad y sanitarios locales de los **Municipios con función de Área Base de Recepción Social (ABRS)** se encargarán de la asistencia sanitaria y vigilancia epidemiológica de los evacuados hasta su regreso a los lugares de origen o su remisión a centros especializados. Controlarán periódicamente las condiciones higiénicas de los centros de albergue que componen la ABRS.

• El **Servicio Sanitario de Apoyo** constituido por los Centros Sanitarios de Apoyo que se consideren necesarios prestarán asistencia médica general a las personas remitidas por el Servicio de Primera Intervención, las ECD y ABRS.

* El **Servicio Médico para Irradiados** su función será prestar asistencia sanitaria especializada al personal remitido por la ECD, el Servicio de Primera Intervención o el servicio sanitario de la central.

Actuación anterior a la emergencia

Para el personal del Grupo Sanitario es tarea permanente de ejecución:

- El control sanitario de la población que potencialmente puede ser afectada.
- La revisión y el control periódico del material sanitario.
- La formación higiénico-sanitaria del personal implicado.

Con estas premisas se logra optimizar el carácter preventivo del Plan Básico de Emergencia Nuclear.

Control Sanitario previo de la población que potencialmente puede ser afectada

Los sanitarios locales deben llevar una relación de todas las personas que se encuentren en situación de enfermedad aguda o crónica, sin posibilidad de desplazarse por sí mismos o cuyo desplazamiento suponga un riesgo o dificultad. Estos son los enfermos que padecen:

- * Traumatismos en fase de tratamiento inicial o recuperación.
- * Infecciones agudas febriles y/o contagiosas.
- * Impedimentos físicos.
- * Impedimentos síquicos con trastornos mentales o de la personalidad.
- * Enfermedad aguda o crónica del sistema cardio-respiratorio.
- * Antecedentes alérgicos de cualquier naturaleza.

Todas estas personas constituyen los llamados grupos críticos dentro de los cuales se incluyen mujeres en edad de procrear, embarazadas, lactantes y niños.

Esta relación de los grupos críticos mencionados debe estar actualizada permanentemente con el objeto de que en caso de simulacros ó, ante una posible emergencia real, las autoridades sanitarias que intervengan tengan conocimiento exacto de la situación.

Revisión y control periódico del material sanitario a utilizar en casos de emergencia

Es necesario revisar y controlar periódicamente el material a utilizar en caso de emergencia para poder hacer buen uso de él. Este no difiere básicamente del utilizado en cualquier tipo de emergencia en que se prevea movimiento de masas donde el pánico, ner-

viosismo, caídas etc., son las causas más frecuentes de intervención. Para lo cual se debe tener antihistamínicos, corticoides y adrenalina por si se produce alguna reacción alérgica.

El elemento nuevo y casi exclusivo de prevención radiológica es el Ioduro Potásico (en tabletas o gotas), cuya adquisición, depósito, renovación, control y revisiones es parte de los procedimientos escritos en cada Plan Provincial.

Formación Higienico-Sanitaria al personal de la zona potencialmente afectada

Este es uno de los puntos fundamentales para conseguir llevar a buen fin el Plan de Emergencia, siendo uno de los pilares fundamentales de su carácter preventivo.

Esta formación tiene un doble objetivo:

- Lograr que el personal sanitario local esté perfectamente informado desde el punto de vista técnico y de su misión ante estos acontecimientos.
- Lograr que este mismo personal colabore en concienciar al público en general de los riesgos reales y de su correcta actuación en tales circunstancias.

El conocimiento exacto de todas las medidas a tomar ante los mayores riesgos posibles reduce enormemente las consecuencias, que de una falta o mala información pudieran acaecer, ajenas al propio riesgo.

Para lograr estos objetivos se impartirán los cursos y seminarios teóricos y prácticos en número y extensión conveniente.

Actuación durante la Emergencia

En este caso todas las actuaciones quedan supeditadas a la Dirección del Plan de Emergencia y durante ella la misión del equipo sanitario estará encaminada a efectuar:

a) Medidas preventivas de orden médico y de orden técnico.

La prevención médica consiste básicamente en la administración de Ioduro Potásico.

En el caso de la población residente en torno a la instalación afectada la decisión de iniciar y terminar la administración de Ioduro Potásico depende del Gobernador Civil de la Provincia (como Director del Plan de Emergencia Provincial) asesorado por el Jefe del Grupo Sanitario y el Jefe del Grupo Radiológico, en base al tipo de incidente, estimaciones de la descarga de radioyodos, dirección del viento y, posteriormente, de los datos de control radiológico.

El resultado de la administración de Ioduro Potásico es el bloqueo Tiroideo, cuyo comienzo se observa unos 30 minutos después de la administración oral. Por lo tanto se obtiene un bloqueo muy eficaz siempre que se administre antes de haberse producido la exposición al radioyodo a fin de conseguir su acumulación en el tiroides y evitar la fijación de aquél.

La prevención técnica consistirá en colaborar con el resto de las autoridades aconsejando a la población las medidas higiénicas pertinentes como:

- Selección de los alimentos, procurando consumir los envasados o enlatados.
- No ingerir bebidas de fuentes, manantiales de la zona ni de la red de agua potable, solamente embotelladas o en garrafas procedentes de lugares distantes.
- Mantenerse en el interior de las viviendas con puertas y ventanas cerradas hasta que las autoridades dispongan otra actuación.

b) Colaborar en la evacuación si fuese necesario, únicamente de la población con problemas médicos, grupos críticos y de quienes pudiera sospecharse problemas derivados de la prevención médica.

Prestar ayuda en la evacuación de la población en general, teniendo en cuenta especialmente aquella "situación de impacto agregado" (situación derivada de una inadecuada planificación o de una improvisación que tiene efecto multiplicador en cualquier tipo de percance). En muchas ocasiones el "impacto agregado" provoca situaciones más graves que las planteadas por el siniestro en sí.

c) Tratamiento del personal afectado

Las pautas de actuación, siguiendo el esquema de tratamiento presentado en el Plan Básico de Emergencia Nuclear (PBEN), se dividen en tres escalones:

Primer escalón. Equipo de Primera Intervención: está constituido por los Jefes Locales de Sanidad y los sanitarios que le apoyan.

Al margen de sus dependencias jerárquicas impuestas por la Organización del Plan para su buen desarrollo y funcionamiento, el personal sanitario de este escalón se dedicará fundamentalmente a:

- * La administración de Ioduro Potásico (cuando así lo instruya el Director del Plan).
- * Colaborar con el resto de las autoridades aconsejando normas de conducta a la población.
- * Colaborar en la evacuación de grupos críticos o en la evacuación total.
- * Atención de traumatismos, desvanecimientos, etc., procurando tranquilizar a la población si hubiera situación de histeria colectiva, aplicando los remedios adecuados en cada caso.

Segundo escalón. Estaciones de Clasificación y Descontaminación: está constituido por los Jefes Locales de Sanidad y los sanitarios locales de los municipios sede de la ECD y cuenta con la colaboración del Equipo de Protección Radiológica asignado.

La misión de los sanitarios en esta etapa consiste en seleccionar y tratar a la población remitida por el primer escalón.

Se efectuará un estudio radiológico y médico profundo repitiendo la descontaminación tantas veces como sea necesario, comprobando cada vez el grado de disminución hasta que en una de ellas se constate que no disminuye más. Si esa contaminación externa está por debajo de los límites de intervención se considera finalizada la descontaminación pasando al Area Base de Recepción Social (ABRS) del tercer escalón.

Si persiste alguna patología psicofísica se remitirá al Centro Sanitario de Apoyo (CSA) del tercer escalón.

Si la contaminación todavía alcanza niveles de intervención se enviará al Centro Médico de Irradiados (CMI) del tercer escalón.

Tercer escalón. Está constituido por tres unidades que son: Las Areas Base de Recepción Social (ABRS), los Centros Sanitarios de Apoyo (CSA) y el Centro Médico de Irradiados (CMI).

1) Area Base de Recepción Social. En ellas el personal sanitario se ocupará de la asistencia y vigilancia epidemiológica de los evacuados descontaminados o no contaminados hasta su regreso al lugar de origen o su remisión a centros especializados, controlando periódicamente las condiciones higiénicas de los alimentos de estas ABRS.

2) Centro Sanitario de Apoyo. Corresponden a los hospitales o clínicas más próximas donde se prestará asistencia médica general a la población remitida por el Servicio de Primera Intervención, ECD o ABRS.

3) Centro Médico de Irradiados. Su función será la prestación de asistencia sanitaria especializada al personal remitido por la ECD, el Equipo de Primera Intervención (excepcionalmente) o el Servicio Sanitario de la Central.

Actuación después de la Emergencia

Una vez finalizada la emergencia, el Director del Plan instruye la vuelta a la normalidad para lo cual al personal sanitario desarrolla las tareas consistentes en:

- Controlar la situación médica de los grupos críticos que fueron evacuados en primera instancia.
- Seguir el tratamiento de las lesiones acaecidas durante la posible "situación de impacto agregado" y valorar su importancia tomando nota de todo para los datos estadísticos y epidemiológicos.
- Mantener contacto con los sanitarios que hayan retenido para observación o tratamiento a personal con algún daño en las ABRS, CSA o CMI del tercer escalón, con el objeto de mantener el control que se requiere tras su salida.

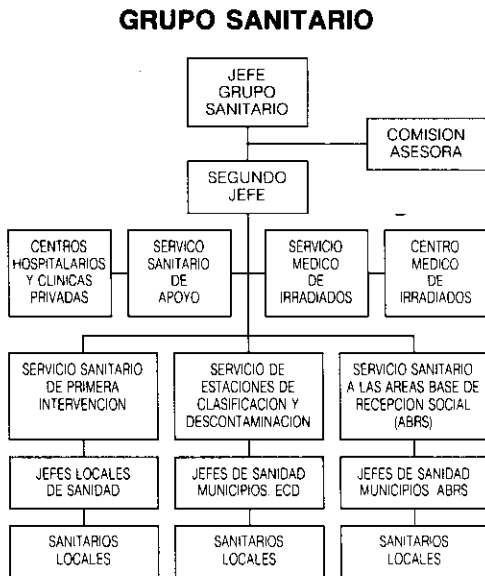
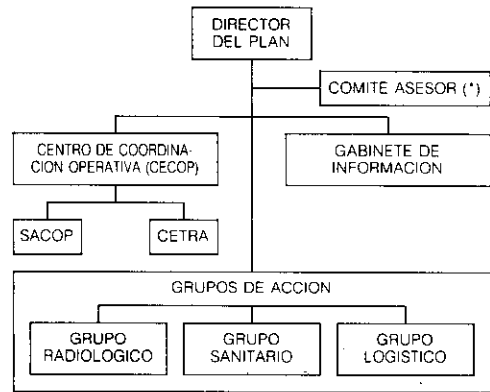


FIGURA 10.3.



(*) COMITE ASESOR

- Secretario General del Gobierno Civil
- Director Provincial de Industria
- Jefe del Grupo Radiológico
- Jefe del Grupo Sanitario
- Representante de las Fuerzas Armadas
- Jefe de los Servicios Provinciales de Protección Civil
- Técnicos y funcionarios de la Administración Central y Autónoma u otras personas que el Director del Plan considere oportuno
- Representante de los Servicios Provinciales de P.C. de la Comunidad Autónoma

FIGURA 10.4.

APENDICE. EFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

GENERALIDADES

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes (RI) son el resultado de una sucesión de reacciones desencadenadas por sus interacciones con los átomos de bajo número atómico (Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, etc.) que constituyen la materia viva.

Estas interacciones son básicamente colisiones con la corteza electrónica de los átomos y moléculas del medio atravesado.

En estas interacciones se comunica una cierta cantidad de energía a un electrón de un átomo o una molécula.

Según la importancia de esta transferencia de energía, el átomo (o la molécula) puede ser ionizado, excitado o simplemente incrementada su energía térmica (traslacional, vibracional o rotacional).

Si la cantidad de energía transferida, es superior a la energía de ligadura del electrón, éste es sacado de su órbita: la molécula (o el átomo) es ionizada. Se forman entonces un par de iones: el electrón cargado negativamente y la molécula cargada positivamente.

Si la cantidad de energía transferida es ligeramente inferior a la energía de ligadura del electrón, éste puede ser llevado a un nivel de energía superior: la molécula (o el átomo) ha sido excitada.

Si la cantidad de energía transferida es insuficiente para excitar a la molécula (o el átomo), este suplemento de energía se convierte simplemente en un aumento de las velocidades de translación, rotación y vibración de la molécula.

Para producir la ionización de un átomo se necesita una transferencia de **energía media de 33,85 eV**. Este es un valor independiente de la radiación considerada para un medio dado, y varía poco de un material a otro.

De lo dicho, concluimos en la sorprendente desproporción entre la energía necesaria y la gravedad de los efectos biológicos producidos. En efecto, puesto que $1\text{Gy} = 1\text{ J/Kg} = 100\text{ rads} = 104\text{ erg. g}^{-1} = 2,39 \times 10^{-4}\text{ cal. g}^{-1}$, es posible calcular la cantidad de calor correspondiente a una dosis absorbida dada y deducir la elevación temperatura que comporta (tabla 1).

TABLA - 1

Correspondencia entre dosis absorbida y elevación de temperatura de una masa de agua (medio biológico)

Dosis absorbida		Elevación de temperatura en grados centígrados
En rads	En Grays	
10.000	100	0,024
1.000	10	0,0024
500	5	0,0012
200	2	0,0005

Estas dosis absorbidas, correspondientes a trasferencias de energía insignificante, son, de hecho, extremadamente peligrosas:

— Una dosis absorbida de 100 Gy (10.000 rads) en radioexposición a todo el cuerpo será mortal en dos días.

— La tasa de mortalidad de un grupo de jóvenes adultos de buena salud que reciba cada uno de ellos una dosis a todo el cuerpo de 5 Gy (500 rads) será del 50%.

También puede decirse que una dosis de ese orden (10 Gy) produce cambios en un porcentaje sumamente pequeño de moléculas que, no obstante, son suficientes para que de forma directa o indirecta, los daños al organismo sean fatales.

MODO DE ACCION DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

La energía impartida por la radiaciones ionizantes da lugar a daños causados a los elementos indispensables para la vida celular, los que se explican mediante efectos fisico-químicos directos o indirectos (fig. A.1.).

Efecto físico-químico directo

La ionización o la excitación de una molécula implica una reorganización de los electrones que aseguran su cohesión, susceptible de provocar la ruptura de enlaces químicos y su destrucción. Si dicha molécula juega un papel esencial en la vida celular, las consecuencias biológicas de una ionización o de una excitación pueden ser importantes. Este mecanismo es muy útil para el estudio de los efectos celulares y genéticos pero no interviene verdaderamente más que en una parte menor de los efectos somáticos en una radioexposición total del organismo.

Efectos físico-químicos indirectos

Tienen su origen en la alteración de las moléculas de agua en donde se encuentran en disolución el resto de moléculas biológicas.

La importancia de estos efectos es evidente dada la abundancia en agua de los organismos vivos constituidos a base de soluciones acuosas y de un pequeño número de moléculas biológicas y explica el interés radiológico de la radioquímica del agua.

Radiolisis del agua: formación de radicales libres

En 1901, P. Curie observó que las soluciones acuosas de sales de radio desprendían hidrógeno y oxígeno.

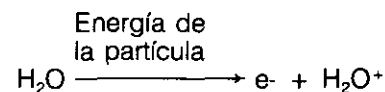
Se constató que el agua irradiada era muy reactiva: los componentes disueltos en agua irradiada presentaban con frecuencia modificaciones químicas.

Esta actividad es el resultado de la formación de radicales libres en el agua irradiada.

Un radical libre es una especie química con electrones desapareados. Los radicales libres poseen una alta reactividad química.

El efecto de las radiaciones ionizantes sobre el agua ha sido explicado por Lea. (1947):

Una partícula ionizante, al incidir sobre el medio celular, arranca un electrón de la molécula de agua, y se produce la reacción:



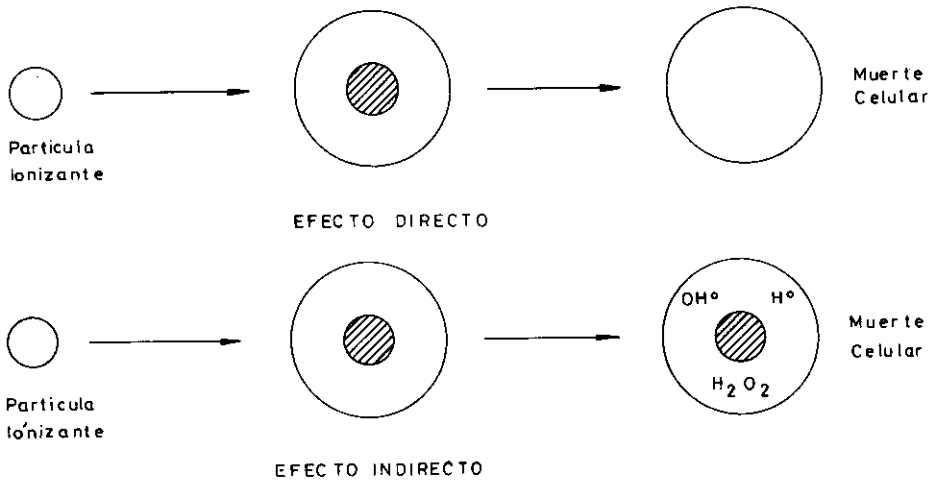


FIGURA A.1. MODOS ELEMENTALES DE ACCIÓN

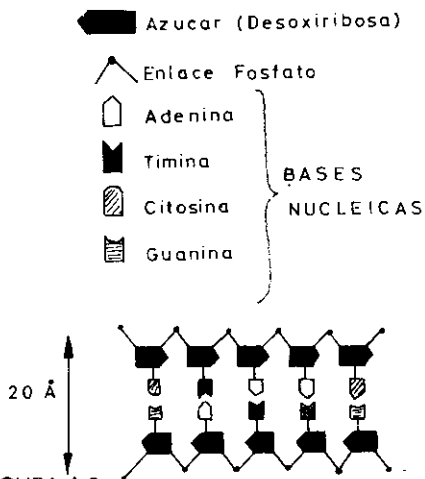


FIGURA A.2.

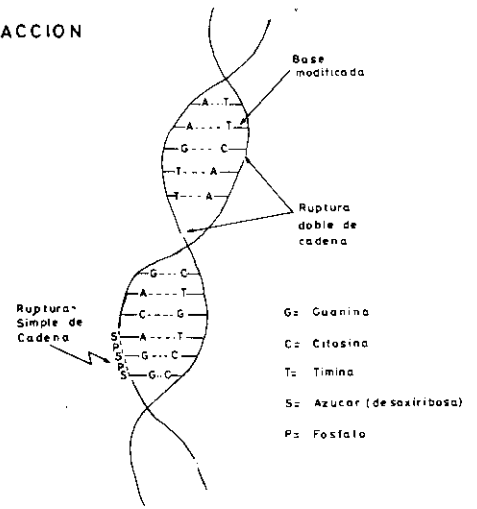


FIGURA A.3. LESIONES RADIOINDUCIDAS EN EL ADN.

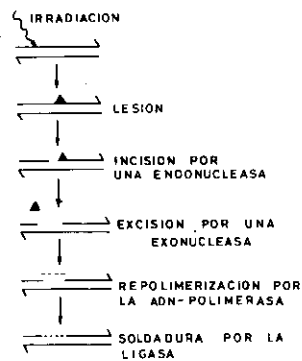
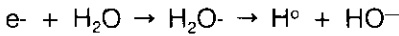


FIGURA A.4.

Esta reacción se denomina ruptura homolítica de la molécula. Este ión H_2O^+ es muy inestable y se disocia para dar un protón H^+ , y un radical libre hidróxilo, HO^\bullet .

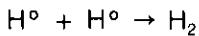
Cuando se para el electrón, se asocia a una molécula de agua para dar un ión negativo H_2O^- :



El ión H_2O^- se disocia, dando un ión hidroxilo HO^- y un radical libre H^\bullet . De hecho, el ión H_2O^- , no ha sido detectado nunca.

Su reparto alrededor de la trayectoria de la partícula ionizante es distinto: los radicales OH^\bullet son engendrados en sus proximidades, mientras que los H^\bullet pueden serlo a distancia.

Después del paso de la partícula, el agua irradiada se convierte en una solución más o menos concentrada de radicales HO^\bullet , H^\bullet y de moléculas de hidrógeno, resultantes de la reacción:



Comportamiento de los radicales libres

Las reacciones siguientes que se producen después del paso de la partícula ionizante dependen de numerosos factores:

- Naturaleza de la radiación
- Presencia de oxígeno disuelto en agua
- Presencia de sustancias orgánicas en el agua

A) Influencia de la naturaleza de la radiación

Las radiaciones difieren en el número de ionizaciones y excitaciones que provocan por unidad de volumen de un medio dado. La densidad lineal de ionizaciones producidas por una partícula ionizante (o sea, el número de ionizaciones formadas por unidad de longitud de la trayectoria) está estrechamente ligada a la energía, transferida por la partícula por unidad de longitud de trayectoria (Transferencia Lineal de Energía L_∞), expresada normalmente en $\text{Kev}/\mu\text{m}$ de trayectoria. Los valores de L_∞ medios se ven en la Tabla 2.

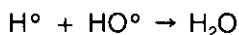
TABLA - 2

Valores medios de L_∞ para diferentes radiaciones ionizantes

Tipo de Radiación	L_∞ ($\text{Kev}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)
Fotones de 4 MeV	0,3
Partículas β^- emitidas por el tritio	5,5
Protones de 7 MeV	10
Núcleos de retroceso producidos por neutrones de fisión	45
Protones de 0,6 MeV	65
Partículas α	190
Fragmentos de Fisión	4000-9000

Hagamos notar que los valores de L_{50} de la tabla son valores medios, iguales a la relación entre la energía de la partícula y la longitud de su trayectoria.

En el caso de radiaciones con L_{50} pequeña, la densidad de ionización es poco elevada: las ionizaciones están alejadas las unas de las otras, la probabilidad de reencuentro de los radicales HO° y H° es débil, con lo que la reacción más probable es la recombinación:



B) Influencia de la presencia de oxígeno

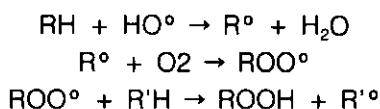
El oxígeno aumenta los efectos de la radioexposición, siendo este aumento inversamente proporcional a la L_{50} de la radiación considerada. Se define la O.E.R. (Oxygen Enhancement Ratio) o razón de potenciación del oxígeno como la relación de las dosis absorbidas con y sin oxígeno necesarias para obtener un cierto efecto. Su valor se sitúa en el rango 2,5 - 3 para los fotones X y gamma.

C) Influencia de la presencia de sustancias orgánicas

Los medios biológicos son soluciones más o menos diluidas de moléculas orgánicas. Estas pueden ser alteradas por los productos radiolíticos. Estos constituyen el origen de diversas reacciones:

— Formación de peróxidos

Los radicales oxidantes formados como resultado de la radiolisis del agua, son capaces de transformar en peróxidos numerosas sustancias orgánicas, según R. Latarjet:



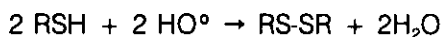
Los radicales, especialmente los radicales peróxidos ROO° , son poderosos oxidantes, muy tóxicos para las estructuras celulares que contengan lípidos en su composición, como las membranas celulares.

Los radicales formados son numerosos: ha sido detectada la formación en cadena de 70 peróxidos a partir de una única ionización.

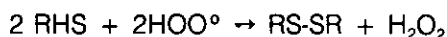
Desaparecen muy lentamente, por lo que se les asigna la responsabilidad de ciertos efectos retardados de la radioexposición.

— Acción sobre los grupos sulfurados

Los grupos SH son oxidados según:



En presencia de oxígeno, se produce la reacción:



De modo inverso, la radiación puede romper los puentes disulfuro y dar grupos SH.

Estas reacciones pueden implicar modificaciones de las proteínas responsables de la inactivación radioinducida de ciertos enzimas.

— Acción sobre los ácidos nucleicos

Los productos de la radiolisis del agua provocan alteraciones de los ácidos nucleicos que veremos en los párrafos siguientes.

MECANISMOS BIOQUIMICOS DE LAS LESIONES CELULARES

Sistemas enzimáticos

Son sistemas que pueden intervenir, bien directa o indirectamente en la génesis de las lesiones celulares.

— Directamente

Históricamente, se supuso que las radiaciones actuaban por alteración de los sistemas enzimáticos intracelulares indispensables para la vida. Hoy se sabe que únicamente juega un papel importante la desorganización de las cadenas de óxido-reducción de los citocromos de las membranas, de las de síntesis de las proteínas y del ácido desoxirribonucleico (DNA).

— Indirectamente

La alteración de las membranas de los lisosomas, fragilizadas por los peróxidos y los radicales libres, pueden conducir a la liberación, en el interior de la célula, de enzimas proteolíticas que agravan los efectos directos e indirectos de las radiaciones.

Acido desoxirribonucleico (ADN)

Como consecuencia de la importancia capital del ADN para la vida celular, se concede una importancia particular a la acción de la radiación sobre este compuesto.

— Constitución y función del ADN

El ADN es un constituyente esencial de la cromatina del núcleo, a partir de la cual se individualizan, en la mitosis o meiosis, los cromosomas.

El ADN está presente también fuera del núcleo: en las mitocondrias y en los cloroplastos de las células vegetales.

La forma y constitución del ADN fue precisada por Watson y Crick en 1952. (Fig. A.2. y A.3.).

La molécula de ADN está constituida por dos cadenas enrolladas una en torno a la otra, en sentido opuesto, formando una doble hélice parecida a una escalera de caracol.

El sentido de enrollamiento inicialmente descubierto fué el derecho, como las agujas del reloj. En los años 70, se descubre en el ADN-Z un enrollamiento en el sentido izquierdo; la estructura local de la doble hélice: el paso, la inclinación de las bases en relación con el eje varía a lo largo de la molécula según la secuencia de las bases y las restricciones físicas existentes. Estas son responsables de cambios estructurales incesantes: apertura de la doble hélice, separación local de dos ramas, superenrollamientos, etc.

La longitud de la molécula es extremadamente grande: 2 m en los cromosomas humanos. Su organización en un núcleo de 10 μm de diámetro o más se obtiene por repliegues y enrollamientos sucesivos alrededor de glóbulos proteicos llamados histones, además de los realizados sobre sí misma.

La unidad estructural de la molécula es el nucleótido, que está constituido por:

- Una base púrica (Adenina o Guanina) o pirimidínica (Citosina o Timina).
- Una molécula de desoxirribosa ligada a la base.
- Una molécula de ácido fosfórico ligada al azúcar (desoxirribosa).

Los nucleótidos se unen entre sí por enlaces fosfo-diéster.

Las dos cadenas complementarias de la molécula ADN están unidas por enlaces-puente de hidrógeno que unen las bases orientadas hacia el interior de la molécula.

El acoplamiento de las bases es únicamente posible uniendo adenina con timina y guanina con citosina.

La secuencia de las bases en una de las cadenas es "arbitraria" pero determina la secuencia de las bases en la otra cadena, el orden según el cual están dispuestas las bases, adenina (A), citosina (C), timina (T) y guanina (G), unas con relación a las otras, codifica la información genética.

La asociación de tres pares de bases sucesivas constituye un codón, elemento del código genético. Un único codón permite representar 64 palabras diferentes, que sobran para codificar los 20 aminoácidos.

La secuencia de los pares de bases que codifica la información genética para una proteína dada, se llama gen.

Cada uno de ellos viene precedido, en general, por un codón de iniciación y terminado por uno o varios codones de finalización. Además del codón de iniciación hay una o varias regiones de regulación de la expresión del gen.

Un gen (o algunos genes) controla cada una de las etapas de la vida celular y constituye el soporte material de los caracteres hereditarios.

Los genes están dispuestos secuencialmente a lo largo de los cromosomas.

El ADN interviene en dos procesos vitales:

— *En la división celular*

En el momento de la división celular, las dos cadenas del ADN se separan y cada una sirve de modelo para la síntesis de otra cadena complementaria. La síntesis se efectúa después de la apertura de la doble hélice, en la dirección 5'→3' por pequeños fragmentos bajo la dependencia de la ADN-polimerasa- α . Estos fragmentos son soldados en seguida entre ellos por una ligasa. "In vivo", parecería que la síntesis no comienza por un extremo sino que tiene lugar a nivel de desdoblamientos de la doble hélice producidos en puntos de iniciación por enzimas desenrollasas.

* En la síntesis de las proteínas

Esta se efectúa en dos etapas, transcripción y traducción.

A) Transcripción

En esta etapa, un segmento dado de ADN sirve de modelo para la síntesis de un ácido ribonucleico (A.R.N.) del tipo mensajero (ARNm) de composición y estructura análogas a la del ADN, salvo que el Uracilo (otra base pirimidínica) reemplaza a la Timina.

La transcripción se efectúa gracias al enzima ARN-polimerasa, que se sitúa sobre una de las dos cadenas de ADN, y provoca un desdoblamiento de una pequeña región de la doble hélice.

Las constricciones creadas por la separación de las cadenas en la región a replicar son levantadas por una enzima girasa.

Los ribonucleótidos van a colocarse en frente de los desoxirribonucleótidos de la matriz de ADN: la Guanina frente (G) a la Citosina (C), y el Uracilo (U) frente a la Adenina (A). El ARNm formado, monocatenario, viene caracterizado por una secuencia de las bases exactamente complementaria de la del ADN.

Después de la excisión de copias de los intrones (secuencias del ADN que no poseen propiedades de codificación conocidas, a diferencia de los exones), el ARNm deja el núcleo y lleva el mensaje codificado a los ribosomas, orgánulos celulares constituidos por proteínas y ARN (ARN-r) que sintetizan las proteínas.

B) Etapa de Traducción

En el citoplasma, un ribosoma se fija a la extremidad de la cadena del ARNm y se desplaza a lo largo de ella. La traducción del mensaje llevado por el ARNm es efectuado gracias a los ARN de transferencia (ARNt) que se encuentran libres en el citoplasma.

Para cada aminoácido, existe un ARNt específico, individualizado por una secuencia de tres bases, que constituyen un ANTI-CODON. Este se fija, por apareamiento de las bases, sobre el codón complementario del ARNm.

El aminoácido aportado por el ARNt se liga al que le había precedido.

El ribosoma avanza de tres en tres bases a lo largo del ARNm, y sucesivamente, cada uno de los ARNt específico de uno de los veinte aminoácidos que participan en la construcción de una proteína, coloca un aminoácido en la cadena peptídica que se alarga progresivamente.

Cuando todos los aminoácidos han sido insertados en la cadena peptídica, la proteína se libera del complejo ribosoma-ARNm.

De este modo, la información genética contenida en el ADN, se expresa finalmente en la estructura de las proteínas.

— *Lesiones del ADN*

Las radiaciones ionizantes pueden producir esencialmente por efecto indirecto, lesiones variadas:

- * Rupturas de una o dos cadenas de ADN
- * Alteraciones de bases
- * Alteraciones de azúcares
- * Modificaciones de la estructura de la molécula de ADN (fig. A.3.).

— *Rupturas de cadena*

El acontecimiento letal principal puede ser representado por una ruptura de la doble cadena del ADN, con mayor frecuencia por efecto indirecto. La integridad estructural de la molécula se pierde y la lesión parece irreparable. De hecho, para dosis en que la mortalidad celular es significativa, se constata una mayor cantidad de rupturas dobles de la cadena que de células muertas, lo que hace suponer la existencia de un modo de reparación de estas lesiones.

El acontecimiento subletal cuya acumulación conduce a la letalidad puede representarse por rupturas simples de la cadena de ADN, lesión irreparable cuando el ADN es cortado por un número demasiado grande de lugares.

Después de una primera ruptura simple de la cadena, por ejemplo, una segunda ruptura simple que se produjera en un intervalo próximo equivaldría a una ruptura doble de la cadena letal.

Cuando se produce una ruptura simple de la cadena, las moléculas de agua penetran en la brecha, los puentes de hidrógeno se rompen y las extremidades cortadas se separan de la otra cadena. Esta lesión es irreparable.

— *Alteraciones de las bases*

Las bases pueden sufrir una hidroxilación con formación de hidroperóxidos en presencia de oxígeno.

La radiación ultravioleta produce principalmente la formación de enlaces químicos fuertes entre dos bases pirimidínicas sucesivas de una misma cadena dando lugar a dímeros de timina o citosina.

Esto desorganiza la doble hélice a nivel de bases alteradas por la ruptura de los enlaces débiles (puente H) con las bases complementarias de la otra cadena de la molécula.

Estas modificaciones pueden producir, bien en los procesos de restauración, o bien, durante la replicación normal del ADN, la incorporación a la molécula de ADN de bases inadecuadas.

— *Alteración de los azúcares*

Estos pueden ser oxidados y después hidrolizados con liberación de la base.

— *Modificaciones estructurales del ADN*

Las radiaciones ionizantes pueden producir entrecruzamientos (cross-linking) de las cadenas de ADN o la unión de una cadena a una proteína.

La alteración en la forma de la molécula es el origen de anomalías en la replicación y en la transcripción.

Reparación enzimática de las lesiones

Descripción de los mecanismos

A) Proceso de excisión-resíntesis

Este proceso, que es muy general puesto que se pone en marcha después de agresiones tanto físicas como químicas, permite reparar las alteraciones de bases, los puentes intracatenarios, las modificaciones de la desoxirribosa, las rupturas sencillas de la cadena, ciertos puentes entre cadenas, incluso ciertas rupturas de la doble cadena.

Esta reparación que dura de 3 a 6 horas, se efectúa en cuatro etapas (ver fig. A.4.):

— Reconocimiento de la alteración del ADN por una enzima ADN- glicosilasa que corta el enlace azúcar-base; seguido de la sección al nivel del mismo azúcar, del enlace azúcar-fosfato por otro enzima: Ap-endonucleasa, cortando así la cadena de ADN.

Los enzimas aquí implicados son específicos del tipo de lesión detectado, al contrario de los usados en las etapas siguientes.

— Excisión de la secuencia de ADN alterada, de importancia variable según la lesión, de algunos nucleótidos a algunas centenas, por una exonucleasa y eliminación del fragmento de ADN.

— Síntesis reparadora fiel a partir de la cadena intacta por un ADN-polimerasa- β .

— Soldadura de la porción nueva sintetizada en posición y lugar del segmento escindido por una ligasa.

B) Proceso de reparación S.O.S. (fig. A.5.)

La aparición de lesiones del ADN, durante la fase de replicación, que no permite la puesta en marcha del proceso anterior, implica la síntesis y/o la activación de la proteína llamada RecA (llamada así por el gen que le ha dado nacimiento), esta proteína se fija sobre la porción de ADN lesionado activándose una reacción enzimática de fragmentación de otra proteína llamada LexA, que levanta la inhibición de los genes de esta reparación y permite la síntesis de las enzimas correspondientes. La reparación consiste en la incorporación de bases nucleicas al azar sobre la cadena del ADN hija frente a la lesión sobre la cadena madre, lo que permite la continuación de la replicación. Este mecanismo per-

mite así la supervivencia celular a costa de la aparición de una mutación del ADN en una de las células hijas. Tal proceso puede ponerse en marcha en el caso de que las lesiones producidas en el ADN sean de tal abundancia que exceda las posibilidades de los procesos de excisión-resíntesis.

Este proceso descrito en bacterias, existe probablemente en el hombre.

C) Recombinación post-replicativa

Este proceso ha sido descrito, como en el caso anterior, en bacterias y ha sido extrapolado al hombre.

Se pone en marcha durante la replicación. El enzima ADN, que normalmente interrumpe la replicación en el caso de encontrarse con una lesión en el ADN, salta ésta y reinicia la síntesis del ADN de la cadena hija, aproximadamente 1000 bases más lejos. El hueco situado frente a la lesión se llena entonces mediante un cambio entre las ramas hija y madre, mediante la proteína Rec A, que crea un nuevo hueco. Pero éste, al no estar situado frente a la lesión puede ser cubierto llamando a las dos últimas etapas, no específicas, del proceso excisión-resíntesis (polimerización y soldadura).

Este proceso salva a la célula afectada a costa de una lesión del ADN en una de las células hijas (fig. A.6.).

— Modalidades de realización

Ciertas alteraciones de las bases tales como los puentes intracatenarios (dímeros de timina o de citosina) pueden ser separados por enzimas sistemáticos específicos sin corte del ADN. Por ejemplo, el enzima de fotoreactivación corta los enlaces anormales producidos por las radiaciones U.V.

Las rupturas simples de la cadena de la molécula de ADN, cuando son rupturas limpias, pueden ser reparadas en algunos minutos por la acción de la ligasa.

Las rupturas simples de la cadena más complejas ya, que presentan alteraciones de una y otra parte de la sección, ciertas alteraciones de bases, modificaciones de la desoxirribosa, son reparables por el proceso de excisión-resíntesis con restitución "ad integrum" de la estructura inicial.

Las rupturas dobles de la cadena y los enlaces intracatenarios son reparables del mismo modo que otras alteraciones cuando las lesiones producidas en el ADN son suficientemente distantes, al no estar una frente a la otra, ya que en este caso aparecen como dos lesiones distintas.

Si las posibilidades del mecanismo excisión-resíntesis son insuficientes en el momento de la replicación, los procesos de recombinación post-replicativa y de reparación tipo S.O.S., que aseguran la supervivencia celular a costa de producir daños sobre una o las dos de las células hijas, son los que se ponen en marcha. Los mecanismos de reparación de las verdaderas rupturas dobles de la cadena no están todavía descifrados (1984).

Consecuencias cromosómicas de las lesiones del ADN

Estructura de los cromosomas (fig. A.7.)

En el momento de la división celular, la cromatina nuclear se reúne y se condensa bajo la forma de bastoncillos de 0,2 a 2 mm de diámetro y de 0,2 a 50mm de largo, los cromosomas están constituidos cada uno por dos filamentos (cromatida) unidos en un punto llamado centrómero. Si éste está situado en el centro del bastoncillo, se dice que el cromosoma es metacéntrico, si está situado en un extremo, se dice que el cromosoma es acrocéntrico.

Son el resultado de la ruptura, debida a la radioexposición, de uno o de varios cromosomas, seguida finalmente de la reparación o sustitución de la arquitectura normal. La ruptura de un cromosoma es un fenómeno aleatorio cuya probabilidad aumenta con la dosis absorbida.

A) Alteraciones de la estructura de uno o de varios cromosomas.

* Cambio del número de los cromosomas

* Alteraciones de la estructura de uno o varios cromosomas

A diferencia de las lesiones de los genes, invisibles al microscopio, las lesiones cromosómicas son detectables citológicamente. Estas son de dos tipos:

— Lesiones cromosómicas

Los residuos cromosómicos resultantes de una irradiación (trazuras y después reunión) pueden observarse con precisión gracias a las técnicas de banda de coloración puesto de que estas últimas son características de tal o cual porción de cromatina.

El análisis de los cromosomas en una célula en trance de división permite clasificarlos por orden de tamaño decreciente, es decir, obtener el cariotipo de la especie estudiada. Fundándose únicamente en el estudio de la talla y posición del centrómero, este examen es completado desde 1970 por el análisis de la estructura fina de las bandas de coloración (denominadas Q, R, G, C, F) características de cada cromosoma, sometido a la acción de colorantes (por ejemplo, mostaza de quinacrina). Se describe un millar de bandas en el conjunto de los cromosomas humanos. Cada banda corresponde a aproximadamente una decena de genes.

El ser humano cuenta con 23 cromosomas en las células germinales y con 46 cromosomas (o sea dos juegos de 23) en las células somáticas. Uno de los dos juegos ha sido suministrado por el padre y el otro por la madre. La unión de estos 46 cromosomas conjunta varios miles de genes.

FIGURA A.5.

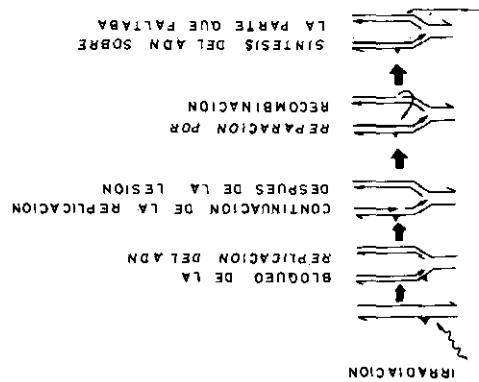
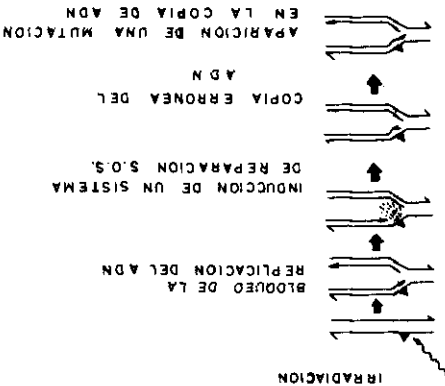


FIGURA A.6.



La unión no puede efectuarse nada más que entre dos extremidades cortadas.

Las rupturas pueden producirse según distintas modalidades (fig. A.8.):

— De un brazo de un único cromosoma

A continuación puede producirse una reunión con restitución "ad íntegrum", o no producirse la reunión, se dice en este último caso que se ha producido una deleción terminal. En el instante de la división celular, el fragmento del cromosoma desprovisto de centrómero desaparecerá y se perderá la información genética a él asociada.

— Ruptura doble de un mismo cromosoma

A continuación de esto puede producirse:

• La reunión de las extremidades cortadas y restitución "ad íntegrum".

* La deleción intersticial: el fragmento provisto de centrómero se suelda al fragmento distal y desaparece el fragmento intermedio; microscópicamente, una deleción intersticial no puede distinguirse de una deleción terminal.

* La inversión: el fragmento interno del cromosoma comprendido entre los dos cortes gira 180 grados y sus extremidades se resueldean a los otros fragmentos, no se pierde ningún nucleótido, pero puede alterarse en razón de la reorganización de las secuencias de las bases.

* La formación de anillos: las dos extremidades de fragmento interno pueden soldarse, dando lugar a un cromosoma en anillo; éste según la localización de los cortes podrá tener o no centrómero.

— Ruptura de varios cromosomas

En el caso de dos cortes sobre dos cromosomas (véase fig. A.9.) distintos no homólogos, son posibles diversas conclusiones:

• Restitución "ad íntegrum"

* Translocación recíproca, fijación de uno de los fragmentos de un cromosoma cortado sobre otro cromosoma. En este caso no se presenta ninguna pérdida de material genético, pero en el momento de la gametogénesis, se forman gametos anormales.

El individuo portador de segmentos cromosómicos translocados no presenta ningún problema, pero puede engendrar, bien hijos anormales, bien hijos normales que a su vez pueden engendrar hijos anormales.

* Formación de cromosomas dicéntricos, las extremidades cortadas de los dos cromosomas pueden soldarse, dando un cromosoma con dos centrómeros (cromosoma dicéntrico). En el momento de la mitosis, un centrómero emigrará hacia un polo y el otro hacia el segundo polo. Aparece un puente cromático que se rompe, dando lugar a la pérdida del cromosoma y muy a menudo a la muerte de la célula. El fragmento acéntrico desaparece.

B) Cambios en el número de los cromosomas

El número n de pares de cromosomas contenidos en el núcleo es característico de la especie, cada núcleo encierra $2n$ cromosomas (en el hombre $2n = 46$); en numerosas especies, y en la humana en particular, un par de cromosomas está formado por dos cromosomas distintos.

Una radioexposición que se produzca en el curso de una división celular puede ser responsable de la formación de una trisomía 21 o mongolismo.

Alteración de los genes

El aumento, pérdida o sustitución de una o varias bases de la molécula de ADN, sin modificación de la morfología de los cromosomas, implica la modificación de la secuencia de las bases (codón). Esta se traducirá en la ausencia o introducción de un aminoácido distinto en la cadena peptídica. En ambos casos, esta lesión genética implica una mutación.

LOS EFECTOS CELULARES DE UNA RADIOEXPOSICION

El ciclo celular

Los sucesos biológicos que se desarrollan entre dos mitosis sucesivas constituyen el ciclo celular que comporta cuatro fases en los mamíferos (fig. A.10., Tabla 3).

- La fase G1, que sucede a la mitosis, tiene una duración en general de 4 a 8 horas; en el curso de la cual la célula acumula nucleótidos.
- La fase S dura de 6 a 8h; la célula, en el curso de esta fase de síntesis, dobla la cantidad de ADN contenida en el núcleo.
- La fase G2 tiene una duración de algunas horas, en general, pero puede ser muy corta.
- La fase M, que corresponde a la mitosis dura aproximadamente una hora; la célula inicial se escinde en dos células-hijas, conteniendo cada una la totalidad de la información genética.

Después de una mitosis o justo antes de ésta, ciertas células pueden ponerse en reposo y no recorrer el ciclo durante cierto tiempo: esta es la fase G.

TABLA - 3

Duración del ciclo celular de distintas células humanas

Tipo histológico	Duración del ciclo en horas
Mucosa del colon	39
Mucosa rectal	48
Médula ósea (células madre)	18
Mucosa bronquial	220
Carcinoma de estómago	72
Leucemia mieloblástica aguda	80-84
Leucemia mieloide crónica	120
Carcinoma bronquial	196-200

La mayoría de las técnicas de estudio del ciclo celular utilizan el marcado de las células con ayuda de un indicador radiactivo. Si se incuban células en presencia de un aminoácido marcado (timidina marcada con Tritio (H-3) o Carbono-14), las que se encuentran en fase de síntesis, lo incorporan. Si se efectúa un frotis celular sobre un placa de autoradiografía, estas serán las únicas que impresionan la emulsión, las células que estaban en fase S durante el período de incubación. Así se puede seguir en el tiempo el devenir de las células. Este método recibe el nombre de método de las mitosis marcadas o método de doble marcaje.

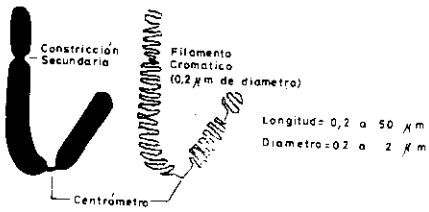


FIGURA A.7.

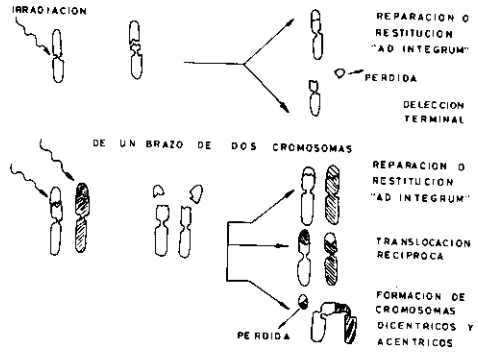


FIGURA 6.8 RUPTURAS SIMPLES DE UN BRAZO DE UN CROMOSOMA.

FIGURA A.8.

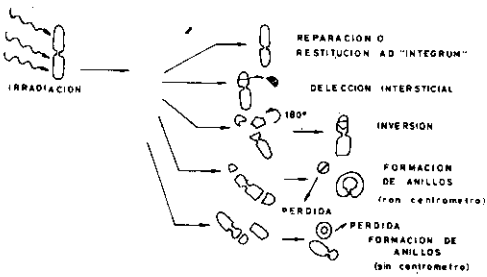
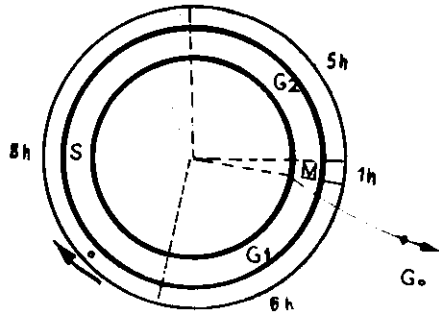


FIGURA A.9.



CICLO CELULAR MAMIFEROS

FIGURA A.10.

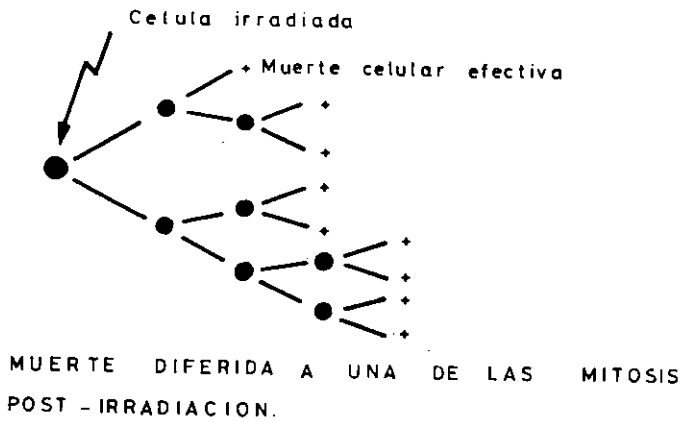


FIGURA A.11.

Los distintos efectos celulares

Según la dosis liberada, una radioexposición puede implicar la muerte celular o las alteraciones de las funciones celulares.

Muerte celular

Cuando exponemos una población celular, se observa un cierto número de muertes celulares inmediatas o retardadas.

- Muerte inmediata o en interfase, que se observa para dosis elevadas y se manifiesta en las horas que siguen a la radioexposición.
- Muerte diferida hasta la mitosis; para una dosis menor, las células radioexpuestas pueden sobrevivir hasta la mitosis siguiente, pero son incapaces de dividirse y mueren.
- Muerte diferida hasta una generación posterior; las células radioexpuestas a dosis bajas (algunos Grays) después de algunos trastornos propios de la radioexposición, se reproducen dando lugar a varias generaciones de células hijas que parecen realizar una actividad metabólica normal pero que desaparecen todas durante un fracaso de división celular, en el curso de una de las 7 u 8 mitosis posteriores a la radioexposición (figura A.11.), se dice en este caso que la célula ha perdido su capacidad potencial de reproducción si el medio ambiente le continúa siendo favorable.

La muerte celular se manifiesta mediante distintas modificaciones:

- Picnosis: retracción del núcleo con aparición en él de haces de cromatina condensada.
- Cariolisis: desaparición de la cromatina y del núcleo.
- Coagulación protoplásmica.
- Cariorexia: estallido del núcleo y dispersión de sus restos en la célula.
- Citolisis: licuefacción, inflación y estallido posterior con desaparición de la célula.

Alteración de las funciones celulares

Se producen por dosis menores que las que producen la muerte celular e inciden sobre:

- La permeabilidad celular: puede ser aumentada o disminuida, estas modificaciones de la permeabilidad se explicarían por el cambio de viscosidad de los líquidos intracelulares dando lugar a una modificación de la relación entre agua ligada y no líquida, o por alteración de las membranas celulares.
- La movilidad celular: que disminuye generalmente
- La síntesis del ARN y de las proteínas: que disminuye
- El ciclo mitológico: la mitosis puede ser retrasada o parada por un aumento de la fase S, y por parada en el ciclo celular, más o menos prolongada, en la fase G2.

La inhibición de la mitosis tiene lugar sobre todo al comienzo de la profase, cuando los cromosomas están poco condensados, pero antes de la ruptura de la membrana nuclear; si la radioexposición interviene después, la mitosis no es retrasada, los retrasos en la mitosis complican la cinética celular produciendo la disminución de todas las poblaciones; esta es la razón de las manifestaciones clínicas de los síndromes hematopoyético y gastrointestinal de la radioexposición del organismo entero.

- El crecimiento celular: en general se retrasa, después de un tiempo de latencia debido probablemente a la formación progresiva de metabolitos inhibidores.

FACTORES DE RADIOSENSIBILIDAD

La radiosensibilidad celular es función de la gravedad de las lesiones producidas por las radiaciones y de sus aptitudes para repararlas.

Depende, por lo tanto de:

- Las condiciones de la radioexposición
- Factores ligados al ambiente celular
- Factores celulares propiamente dichos

Condiciones de la radioexposición

— *Tasa de dosis, fraccionamiento de la dosis*

Puede no ser indiferente, desde el punto de vista de la supervivencia, impartir una misma dosis de forma fraccionada o de una sola vez. En ciertos casos, el fraccionamiento tiene por efecto disminuir la eficacia de la radioexposición, cualquiera que sea la curva de supervivencia: exponencial o con hombro.

Si la explicación de las curvas con hombro puede ser la reparación de las lesiones subletales con restitución "ad integrum", dejando las células supervivientes en las mismas condiciones que las anteriores a la radioexposición, por el contrario, no está clara la explicación para las curvas exponenciales.

— *La naturaleza de la radiación*

A) Eficacia Biológica Relativa

La experiencia muestra que la dosis absorbida y la tasa a la que ésta es administrada a un tejido no bastan para dar cuenta de la gravedad de los efectos biológicos. Estos dependen de la naturaleza y de la energía de la radiación considerada que condiciona la distribución espacial de la cantidad de la energía absorbida, caracterizada por el L_{∞} de la radiación considerada.

La Eficacia Biológica Relativa o EBR es un coeficiente que sirve para comparar los efectos biológicos provocados por dos radiaciones distintas. Se define como la relación inversa de las dosis respectivas D_i y D_j de cada uno de ellos, necesarias para producir el mismo efecto radiobiológico.

$$(E.B.R)_i \times D_i = (E.B.R)_j \times D_j$$

Normalmente la radiación usada como referencia son los rayos X o gamma con una $L_{\infty} \leq 3,5 \text{ KeV}$, μm^{-1} y una tasa de dosis de $0,1 \text{ Gy} \cdot \text{min}^{-1}$ (X de 250 kv gamma de aproximadamente 1 MeV): de modo que su EBR se toma arbitrariamente como la unidad. Entonces tenemos:

$$E.B.R. = D_j/D_i$$

Donde D_j representa la dosis impartida para la radiación de referencia.

El E.B.R. se obtiene, en la práctica, comparando las curvas de supervivencia celular para las dos radiaciones estudiadas.

La E.B.R. es una función de la L_{∞} , que varía según la radiación utilizada (ver tabla 2) pero la relación entre ambas depende de los efectos radiobiológicos estudiados.

B) Factores de calidad utilizada en radioprotección

— Factor de calidad Q

En Protección Radiológica, para tener en cuenta el efecto biológico de una dosis absorbida de una radiación dada, se multiplica la dosis absorbida D por un coeficiente denominado "Factor de calidad [Q]", que depende de la L_{∞} de la radiación considerada (Tabla 5).

TABLA - 5

Valor del factor de calidad (Q) para radiaciones distintas

Radiaciones	Q	T.L.E. L_{∞} en el agua KeV- μ m-1
Partículas β -, electrones de energía máxima superior a 0,03 MeV X y Y de todas las energías	1	$\leq 3,5$
Partículas α	20	53
Neutrones térmicos	2,3	7
Neutrones rápidos protones de débil Energía	10	53
Núcleos pesados de retroceso y fragmentos de fisión	20	≥ 175

La magnitud así definida recibe el nombre de "Dosis equivalente" (H).

La unidad de dosis equivalente del sistema internacional es el Sievert [Sv]:

$$H \text{ (en Sv)} = D \text{ (en Gy)} \times Q$$

La unidad histórica, utilizada aún con cierta frecuencia es el rem (röntgen equivalent man):

$$H \text{ (en rem)} = D \text{ (en rad)} \times Q$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv}$$

Además los expertos han definido otros dos factores de ponderación que se aplican en ciertos casos particulares de radioexposición:

El llamado factor n y el factor relativo a la radioexposición de los cristalinos.

— El factor n

Este factor se aplica cuando los radioelementos están presentes en el tejido óseo, se ha introducido para tener en cuenta la heterogeneidad de su reparto en el hueso.

Este factor es igual a:

* Uno (1), si el radioelemento presente en el hueso es un isótopo del Radio o si la dosis absorbida ha sido impartida por rayos X o .

* Cinco (5), si la dosis absorbida ha sido impartida por partículas α y β de radioelementos distintos al Radio.

— Factor aplicable en caso de radioexposición de los cristalinos.

Su valor está ligado al valor del factor de calidad de la radiación, es igual a 3 para valores iguales o superiores a 10 y a 1 para valores iguales a 1.

Resumiendo, tendremos:

$H \text{ (en Sv)} = D \text{ (en Gy)} \times Q \times \text{factor } n \times \text{factor de radioexposición de los cristalinos.}$

— Factor N

Este factor, producto de los factores, n, del de radioprotección de los cristalinos, de los de tasa y de fraccionamiento de la dosis absorbida (cuya utilización está recomendada por la ICRP), introducido como un recurso de simplificación, permite en una operación simple hacer corresponder a una dosis absorbida, D en Grays, la dosis equivalente en Sieverts, conociendo el factor de calidad, Q:

$$H \text{ (en Sv)} = D \text{ (en Gy)} \times Q \times N$$

La ICRP recomienda $N = 1$ en radioexposición externa.

La Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas (en inglés ICRU) en su documento ICRU-40 "Quality Factor in Radiation Protection" del 4 de Abril de 1986 propone el uso de los criterios siguientes para el valor de Q:

1) Se define: $\bar{Q} = 1/D \int D(y) Q(y) dy$

Cuya interpretación física no es otra que el valor promedio de Q para un radiación que no tenga un único valor para la Energía (radiación no monocromática).

2) Se utilizará la expresión:

$$H = \bar{Q}.D$$

(Se deja de usar la N)

3) Los valores recomendados para \bar{Q} son:

Factores (X y gamma) con energía superiores a 30 KeV.

Electrones con energías superiores a 30 KeV. 1

Rayos beta de Tritio. 2

Neutrones (todos los tipos) protones e iones pesados.

Partículas α 25

Factores relativos al ambiente celular

— *Presencia de radioprotectores*

Un radioprotector es una sustancia que, si se administra inmediatamente antes de la radioexposición, atenúa o suprime los síntomas debidos a ésta y disminuye el riesgo de mortalidad.

Se distingue entre:

* Radioprotectores químicos

* Radioprotectores biológicos

A) Los radioprotectores químicos:

Se dividen en dos grupos:

— Productos actuantes sobre los mecanismos bioquímicos iniciales.

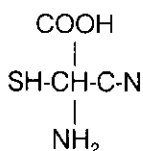
— Productos actuantes sobre los mecanismos bioquímicos de las lesiones.

* Productos que actúan sobre los procesos físico-químicos iniciales.

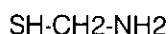
Estos protectores actúan participando directamente en el suceso radio-químico, reduciendo de este modo el daño causado a la molécula-blanco.

Los principales radioprotectores son reductores de radical SH:

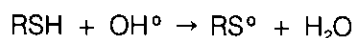
La cisteína



* La cisteamina (ó 2 mercapto-etilamina)



Estos captan los radicales OH° según la reacción:



El radical RS° , poco reactivo, ha reemplazado al radical OH° , que es muy reactivo.

La acción protectora de ciertos compuestos no sulfurados de débil poder de ionización, tales como la serotonina, podría explicarse por un mecanismo semejante.

— Productos que actúan sobre los mecanismos bioquímicos

Estos protectores disminuyen la radiosensibilidad celular o tisular según dos mecanismos:

• Protección de las estructuras biológicas

* Inactivación de los enzimas hidrolizantes

* Protección de las estructuras biológicas:

El protector se combina con una molécula sensible (proteína, ácido nucleico) y la protege contra la acción directa de las radiaciones ionizantes, y también contra la acción de los productos de la radiolisis del agua, manteniendo de este modo su estructura.

* Inactivación de las enzimas hidrolizantes

Distintos compuestos, como el ácido para-amino- metilbenzoico, el ácido E-amino-caproico, ejercen una acción radioprotectora inhibiendo las enzimas proteolíticas liberadas por los lisosomas.

Otros productos, tales como los agentes anabolizantes, normalizan el metabolismo proteico perturbado por la radioexposición.

En la práctica, los radioprotectores químicos más eficaces son actualmente: la cisteamina, la β -amino-etil-iso-tiourea, la serotonina, las tiazolidinas, el glutation, el WR-2721 que es un ácido amino-fosforotioico. De hecho, la toxicidad de estos compuestos es lo que limita su utilización práctica.

B) Los radioprotectores biológicos

Estos protectores actuan favoreciendo la evolución de la célula hacia la radiorresistencia mediante distintos mecanismos:

— Desplazamiento del metabolismo celular hacia una vía relativamente independiente del oxígeno.

- Aumento de la reacción inmunológica.
- Aumento de la actividad del sistema hipotálamo-hipófisis-suprarrenal.

Su activación es de larga duración.

Son sustancias muy diversas: endotoxinas, vitaminas (fosfato de piridoxal), polinucleótidos, polisacáridos, antibióticos (tetraciclina), doroquina, barbitúricos, morfina, etc.

— *Presencia de radiosensibilizantes*

Se llama radiosensibilizante a un agente químico capaz de aumentar los efectos de la radioexposición.

El efecto del oxígeno ha sido descrito anteriormente.

Estos productos pueden clasificarse en tres categorías principales:

- * Radiosensibilizadores de las células hipóxicas
- * Compuestos citotóxicos activados por las radiaciones
- * Compuestos que modifican los procesos de regulación

A) Radiosensibilizadores de las células hipóxicas

Ciertas sustancias químicas, tales como el nitrofurano, el nitroimidazol, el flagil (metronidazol) actúan selectivamente sobre las células hipóxicas, radiorresistentes. Su eficacia biológica está ligada a su afinidad electrónica, es decir, a su potencial de oxido-reducción.

Otros compuestos como los anestésicos, analgésicos, y los tranquilizantes, tienen una acción sensibilizante sobre las células hipóxicas por alteración específica de las estructuras membranales.

B) Compuestos citotóxicos activados por las radiaciones

Ciertos compuestos yodados como el ácido yodotalámico tienen una actividad radiosensibilizante sobre los cultivos celulares y sobre los tumores en el ratón.

C) Compuestos que modifican los procesos de regulación

Se trata de compuestos que se ligan al ADN o se intercalan en su cadena (bromuro de etidio, por ejemplo).

Así, ciertas moléculas pueden intercalarse entre las bases del ADN, y bajo la influencia de una exposición a las radiaciones ionizantes, establecer enlaces químicos fuertes, covalentes, un puente entre las dos cadenas del ADN.

De este modo se bloquea la replicación posterior, conduciendo a la muerte celular.

En el tratamiento de ciertas afecciones cutáneas, tales como la psoriasis, se aumentan los efectos de la exposición a los rayos UV administrando previamente hidrocarburos poliácidos como el psolareno.

Esta molécula intercalada en el ADN de todas las células radioexpuestas no establecen el puente intracatenario nada más que en el caso de células radioexpuestas.

De un modo más general, un cierto número de agentes de la quimioterapia anticancerosa, mitomicina C, sales de platino y agentes alquilantes aumentan también de radiosensibilidad celular por alteraciones del ADN, dando lugar a derivados de monoadicción (metilo (-CH₃), etilo (-CH₂-CH₃), compuestos intracatenarios, etc.

Desgraciadamente, tales drogas son muy tóxicas, mutagénicas y por lo tanto cancerígenas, lo que restringe su utilización.

Otros productos inhiben los radioprotectores naturales (tioles de débil peso molecular, piridinas nucleótidas reducidas). El bloqueo, por el para-hidroxi-mercuri-benzoato, de los grupos SH del "micrococcus radiodurans" da lugar a una importante radiosensibilización de este microorganismo.

De un modo genérico, la inactivación de enzimas cuya actividad está ligada a su grupo SH aumenta la radiosensibilidad.

Factores celulares

— Contenido en ADN

Dado un tipo celular, la radiosensibilidad se puede expresar por el factor D_0 (Tabla 4) que crece con la cantidad de ADN contenida en la célula. Así las levaduras haploides (n -cromosomas) son más radiosensibles que las levaduras diploides ($2n$ cromosomas); sus curvas de supervivencia son respectivamente: exponenciales en el primer caso, y con hombro y un número de extrapolación de dos, en el segundo caso (fig. 6.21.).

— Equipo enzimático

Cuanto mayor sea el equipo enzimático de la célula, mejor podrá ésta realizar la restauración de las lesiones radioinducidas.

La perturbación de los procesos de restauración posteriores a un déficit enzimático explica la existencia de mutantes de radiosensibilidad elevada.

— Fase del ciclo celular

Cualquiera que sea el tipo celular considerado, existe una variación de la radiosensibilidad celular a lo largo del ciclo, distinto según las familias celulares.

En general, la radiosensibilidad es máxima durante la fase M de la mitosis y mínima al final de la fase S.

— Naturaleza de las células: Ley de Bergonie-Tribondeau

La radiosensibilidad tisular de un organismo bajo la acción de las radiaciones ionizantes, es variable. Aunque la radiosensibilidad celular, indicada por el valor de D_0 , varía un poco de una célula a otra. En efecto, la vida media de una célula es muy variable, desde dos días para una célula epitelial intestinal a diez años para una célula nerviosa. Como la muerte celular aparece en una de las mitosis posterior a la radioexposición, los tejidos que tienen una renovación rápida resultan más radiosensibles que los tejidos de lenta renovación.

Bergonie y Tribondeau enunciaron en 1906 su ya clásica ley:

Las radiaciones ionizantes actúan con mayor intensidad sobre las células que:

- 1) Mayor sea su actividad reproductora
- 2) Más largo sea su porvenir cariocinético
- 3) Menos definitivamente fijadas sean sus funciones y su morfología (menos especializada sea).

Según esto podemos clasificar las células según su función y por orden decreciente de sensibilidad en cinco categorías:

- Células vegetativas intermitóticas (VIM)
- Células intermitóticas diferenciales (DIM)
- Células multipotenciales de los tejidos conjuntivos (CMP)
- Células post-mitóticas reversibles (PMR)

— Células post-mitóticas fijas (FPM)

Tanto en el hombre como en el animal, y en orden de radiosensibilidad decreciente, tenemos:

— Los tejidos embrionarios

— Los órganos hematopoyéticos

— Las gónadas

— La epidermis

— La mucosa intestinal

— El tejido conjuntivo

— El tejido muscular

— El tejido nervioso

— El cristalino es una excepción a la ley pues, aún cuando no posee ninguna de las características enunciadas por la ley, constituye un tejido muy radiosensible.

Por el contrario, todos los tejidos tienen en común una perfusión vascular cuyo punto sensible es el endotelio de los capilares. Cualquiera que sea el tejido radioexposto, llega una fase crítica, unos seis meses después de la radioexposición, en la vascularización que, o bien sucede a las consecuencias de la radioexposición de un tejido de rápida renovación (piel, intestino), o bien precede a las de la radioexposición de un tejido de renovación lenta (riñones, cerebro).