

"El documento original contiene páginas en mal estado"

EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES.

Por que la radiación ionizante es invisible, inaudible, inodora, insípida y hasta puede matar personas?. Esto puede ser considerado como el verdadero fantasma de la era moderna. Su acción es microscópica. En el caso de dosis altas, el síndrome agudo de radiación surge luego después de la exposición y el caso de dosis bajas los efectos pueden aparecer años después. Es justamente por no poseer sensores de radiación ionizante, no percibimos si fuimos o estamos siendo irradiados y mucho menos en que cantidad. Todos ya contestaron a eso, pues nadie siente absolutamente cuando se toma una radiografía de cualquier parte del cuerpo.

Estudios recientes sobre diferentes tipos de linfocitos humanos parecen indicar que la radiación ionizante disminuye la función del linfocito T, produciendo una condición de inmunodeficiencia adquirida (18) semejante a la causada por el virus del SIDA.

En nuestro cuerpo existen 75 trillones (19) de células, que constituyen una unidad básica de vida. Cada órgano es formado de un agregado de muchas y diversas células. El componente más importante de la célula es su núcleo, que es su centro de control.

En éstos se encuentran los cromosomas que son las estructuras nucleares filamentosas, formados esencialmente por la molécula de ácido

desoxirribonucleico (ADN). La molécula de ADN contiene los genes que disponen linealmente los cromosomas y son los responsables por las informaciones genéticas de una célula para otra y de una generación para otra; controlan la reproducción y la función diaria de las células. El proceso o el resultado del proceso de variaciones de la estructura molecular de los genes o de la variación del número o de la estructura de los cromosomas es denominado mutación. Una mutación inducida por un agente externo no puede ser distinguida de una mutación "espontánea", y, como ésta puede ser somática cuando ocurre en una célula somática, no transmitiéndose a los descendientes de la persona irradiada, al contrario de la mutación germinal que ocurre en las células del linaje germinal, pudiendo pasar para las generaciones futuras.

Una exposición del organismo a radiación ionizante puede desencadenar una serie de reacciones, que podrán resultar hasta la muerte del organismo o en la inducción a mutaciones en su material genético. Si todo el cuerpo de una persona fuese irradiado con una dosis equivalente entre 3 a 5 Sv ocurrirían centenares de rupturas moleculares del ADN de cada célula del cuerpo (20). Las mutaciones son en su gran mayoría, acondicionadoras de características indeseables, siendo que son raras aquellas que podrán beneficiar a sus portadores. Por otro lado se ha demostrado experimentalmente que la mayoría de las lesiones inducidas ADN son reparadas por mecanismos especiales existentes en el interior de las células.

Experimentos en laboratorios han demostrado que para una misma cantidad de dosis absorbida: (a) cuanto mayor la tasa de dosis (dosis por unidad de tiempo), mayor es el número de deformaciones cromosómicas inducidas; (b) cuanto mayor es el factor de calidad de la radiación incidente mayor también es el número de deformaciones cromosómicas inducidas.

ESCALA DE LOS EFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES.

La serie de reacciones causadas por las radiaciones ionizantes puede ser descrita en cuatro estados diferentes. El primer estado tiene una duración muy pequeña, del orden de un cuatrillonésimo de segundo, después de la incidencia de la radiación. En este momento ocurre el fenómeno físico de la ionización y de la excitación de los

átomos del cuerpo humano con la absorción de la energía de la radiación. En la ionización el electrón es expulsado del átomo y en la excitación el electrón gana energía pasando a una órbita más energética. En el segundo momento, denominado físico-químico, las ligas químicas de las moléculas son rotas con una formación de radicales libres. Este momento tiene una duración también muy corta, aproximadamente un milésimo de segundo. La tercera etapa tiene una duración de pocos segundos y una etapa química. Los radicales libres formados anteriormente son altamente reactivos, se ligan a moléculas importadas de la célula, tales como las proteínas, las enzimas, o en lo peor de los casos, en las moléculas del ADN dañándolas. Las células poseen mecanismos para corregir los daños causados por los radicales libres. Sustancias como las vitaminas C o E pueden liberar fácilmente electrones que inactivan los radicales libres. Además de esto, los cuerpos poseen maneras para recomponer las moléculas dañadas por los radicales libres. Desgraciadamente es imposible impedir que todos los radicales libres produzcan algún daño, y de la misma forma, ni todos los daños resultantes pueden ser reparados, y como consecuencia se van acumulando en el organismo. Algunos científicos creen que el envejecimiento de los seres vivos sea causado por los daños provocados por los radicales libres acumulados durante la vida. En la cuarta etapa ocurren efectos bioquímicos y fisiológicos produciendo alteraciones morfológicas y/o funcionales. Su duración es variable, desde horas hasta años.

MECANISMOS DIRECTO E INDIRECTOS.

Son dos los principales tipos de mecanismos por los cuales la radiación puede dañar una molécula: directo e indirecto. En el mecanismo directo la radiación actúa directamente sobre una biomolécula importante, como el ADN, dañando el material genético. En el mecanismo indirecto, las moléculas como el agua, que constituyen cerca del 70 % de la célula, son rotas por la radiación. Sus productos, como el radical libre hidroxilo OH, y el producto oxidante de peróxido de hidrógeno, más conocido como agua oxigenada, son muy eficientes en producir daño biológico, al atacar las biomoléculas importantes de la célula. La figura 7.1 ilustra esos dos mecanismos al atacar la doble hélice de la molécula de ADN de Crick-Watson.

Las dos hélices antiparalelas están formadas por la secuencia de grupos del fósforo y del azúcar que es la desoxirribosa. Estas están interconectadas por pares de bases (adenina, citosina, y guanina), que por su vez ligadas entre sí por los puentes de hidrógeno. La adenina solamente se liga con la timina y la citosina con la guanina.

Figura 7.1 Un átomo de hidrógeno es ionizado por la radiación X o gamma. El electrón lanzado puede actuar directamente en la molécula del ADN causando: (a) el rompimiento simple de la hélice; (b) rompimiento doble de la hélice; (c) ausencia de una base. En el efecto indirecto, el electrón interactúa con la molécula de agua produciendo el radical libre OH y el peróxido de hidrógeno, que por su vez dañan las moléculas del ADN.

En resumen, cuando la radiación pasa a través del cuerpo humano, cuatro diferentes tipos de eventos pueden ocurrir:

- * La radiación pasa próximo o a través de la célula sin producir daño.
- * La radiación daña la célula, más ésta es reparada adecuadamente;
- * La radiación mata la célula o la torna incapaz de reproducir.
- * El núcleo de la célula es dañado, pero no provocando la muerte celular. La célula sobrevive y se reproduce en su forma modificada, pudiendo diagnosticar, años más tarde células malignas en ese local.

EFFECTOS SOMATICOS Y HEREDITARIOS.

Los efectos biológicos de la radiación se clasifican comumente en somáticos y hereditarios. Los efectos somáticos afectan a la persona irradiada, en cambio los efectos hereditarios, lo manifiestan los descendientes de la persona irradiada. Los efectos somáticos pueden ser divididos en agudos o a corto plazo y tardíos, o largo plazo, dependiendo del tiempo de manifestación de los efectos, que está en función de la dosis absorbida, esto significa cuanto mayor la dosis, menor es el intervalo de tiempo entre la exposición y el apareamiento del efecto.

Los efectos agudos son observables en pocas horas, días, o semanas después de la exposición del individuo a una alta dosis de radiación en un pequeño intervalo de tiempo. Para una dosis de 1Gy, ocurre el vómito en 5% de las personas irradiadas, dentro de las 3 horas. Otro síntoma característico es una moderada leucopenia, (disminución de glóbulos blancos de la sangre). Para una dosis en todo el cuerpo con un total de 3 Gy, el vómito aparece en 100% de los casos con un intervalo de 2 horas, siendo el principal órgano afectado el tejido hematopoyético (productor de la sangre). Se estima que sea de 4 Gy la llamada dosis fatal que mata a 50% de las personas que sufrieron irradiación en todo el cuerpo, en 30 días. Dosis absorbidas entre 6 y 8 Gy provocan serios problemas gastrointestinales con muy poca probabilidad de sobrevivencia. La existencia de un limiar de dosis y tal vez la característica más importante..

de los efectos agudos, también clasificados como efectos no estocásticos. Estos pronósticos eran para casos no tratados, por falta de conocimientos. Con el accidente de Chernobyl, los médicos aprendieron como tratar las dosis fatales, parece haber subido para 7 a 8 Gy, pudiendo llegar a 10 Gy, se sabe hoy que ya no se muere en consecuencia de los efectos agudos de la radiación en los tejidos hematopoéticos. La terapia es la de soporte y sustitución. El control del desequilibrio hidroelectrolítico es controlado administrando electrolitos y solución salina en el caso de hemorragias se inyecta plaquetas. La infección se debe controlar através de antibióticos, antimicóticos, antivirales, gamaglobulinas humanas, concentrados de linfocitos y granulocitos. Los pacientes deben estar en locales altamente esterilizados donde es limitado el ingreso de visitas, a fin de evitar que éstas se contaminen de las personas irradiadas.

Los efectos somáticos tóxicos aparecen en las personas irradiadas con dosis bajas, en las crónicas, en un largo intervalo de tiempo, o en personas que recibieron dosis altas pero no letales y que aparentemente se recuperan. Esos efectos son el cáncer y lesiones degenerativas, como anemia perniciosa aplásica, causa de la muerte de Mme. Curie (21), y son de naturaleza estocástica o de probabilidad (esos efectos surgen, aparentemente solamente en algunas personas irradiadas). Es importante enfatizar que no existe ninguna enfermedad específica ligada a los efectos tóxicos de la radiación. Lo que se verifica es un aumento en la incidencia de ciertas enfermedades en relación a incidencia normal, por lo tanto todo análisis es hecho estadísticamente.

La incidencia (16) de la leucemia es de cerca de 1/6 con relación a todos los demás cánceres fatales inducidos por la radiación. Considerando la incidencia relativamente baja comparada a otros tipos de cáncer, la leucemia es más estudiada por tener un tiempo de latencia menor. Típicamente, la manifestación de la leucemia ocurre cerca de 2 años después a la exposición, pudiendo no manifestarse por 6 años y queda prácticamente en cero después de 25 años. Otros tipos de cáncer surgen, generalmente, a partir de 10 años después a la radiación; en Hiroshima y Nagasaki, 40 años después de las explosiones, el número de casos de leucemia es igual a los otras ciudades japonesas, pero la incidencia de otros tipos de cánceres continua aumentando.

Los estudios efectuados (22) en varios países por la Organización Mundial de la Salud sobre los efectos de la exposición a la radiación natural de alto nivel en la población muestran que:

- * existen indicaciones de cambios en las tasas de deformaciones cromosómicas;
- * Hay una posible relación con el síndrome de Down.
- * Aparentemente, hay una correspondencia entre cáncer de hueso y la alta concentración de radio-226 en el agua;
- * No se detectó la existencia de relación entre esa explosión y:

- mortalidad debida a cualquier otro tipo de cáncer
- anormalidades congénitas visibles
- índices de fertilidad
- crecimiento y desarrollo
- otras enfermedades hereditarias que no es el síndrome de Down
- mortalidad infantil
- nacimientos múltiples
- tasa de abortos espontáneos

Los efectos hereditarios pueden ocurrir cuando las células del ovario o de los testículos que forman respectivamente los óvulos y los espermatozoides fueran irradiados. Si el óvulo o el espermatozoide dañado fuese utilizado en la concepción, todas las células del nuevo organismo tendrán el defecto reproducido, incluyendo aquellas que más tarde irán a transformarse en óvulos o espermatozoides. De ésta forma, los efectos resultantes de la mutación original podrán pasar para futuras generaciones. Algunas de las mutaciones llegarán a ser fatales, causando la muerte del feto antes del nacimiento. Otras pueden producir defectos físicos o mentales o simplemente aumentan la susceptibilidad a determinadas enfermedades crónicas. Felizmente, no fue detectado ningún aumento de anormalidades genéticas entre los descendientes de Hiroshima y Nagasaki. Este hecho parece indicar que la capacidad de recuperación de las células germinativas es mayor de lo que se pensaba anteriormente.

SENSIBILIDAD A LA RADIACION.

En cuanto a la sensibilidad del organismo a la radiación, con relación a la vida del individuo, hoy se sabe que la fase embrionaria es más susceptible a efectos somáticos, que pueden causar deformaciones físicas o mentales congénitas, o puede propiciar al niño a tener asma, bronquitis o la misma leucemia. En Dinamarca (23), si un feto o embrión fuera irradiado en el útero de la madre con una dosis superior a 0,1 Gy, el aborto terapéutico es recomendado. Para dosis absorbidas entre 0,01 y 0,1 Gy, el aborto es recomendado, dependiendo si hay algún otro factor agravante o nó.

De una forma general, cuanto más joven es el individuo, más sensible a la radiación. Hoy las mujeres con edad alrededor de 40 años, que recibieron altas dosis de radiación, cuando eran niñas en Hiroshima y Nagasaki, están presentando índices crecientes de cancer de mamas. (15).

Las células, por su vez presentan diferentes sensibilidades a los efectos somáticos de radiación ionizante, dependiendo del tipo y fase de su ciclo de reproducción. Las células en división, o las que son metabólicamente activas, o las que se reproducen rápidamente, tales como las células blancas de la sangre, son más sensibles que aquellas altamente diferenciadas, como los músculos, huesos y tejido nervioso.

DESACUERDO ENTRE CIENTIFICOS.

Mucho de lo que se conoce en nuestros días provienen de experimentos hechos en animales, pero la sensibilidad de ellos puede ser muy diferente a la del ser humano. Hoy se sabe (24) que, entre los vertebrados, los mamíferos son más sensibles a la radiación que las aves, los peces, y los reptiles. Pero, los invertebrados son menos sensibles a la radiación que los vertebrados. Las moscas de las frutas (*Drosophila melanogaster*), por ejemplo, sobreviven después de una dosis absorbida de 640 Gy, y en los organismos unicelulares, como la ameba, son extremadamente resistentes, precisando de por lo menos de 1.000 Gy para morir.

Entre las fuentes de información pueden ser citados: sobrevivientes de bombardeos atómicos de las ciudades de Hiroshima y Nagasaki en 1945, pacientes con cáncer irradiados terapéuticamente, personas expuestas a radiación accidental o ocupacionalmente como médicos radiólogos, científicos, mujeres que pintaban las agujas de los relojes, y los trabajadores de las minas de uranio y torio.

Se sabe que cualquier tipo de cáncer inducido por la radiación no se distingue de aquél debido a otros factores. Además de eso, como el intervalo de tiempo entre el apareamiento del efecto a la exposición

es en general muy grande, tales estudios se vuelven extremadamente complicados por causas de incertidumbre en las estimaciones de las dosis absorbidas por las personas irradiadas. Los datos acumulados y utilizados para formular modelos teóricos son de dosis razonablemente altas, entre 0,5 a 2 Gy. Los riesgos carcinogénicos debido a la baja dosis de radiación, en los cuáles estamos actualmente interesados, son estimados através de una extrapolación en esos datos.

La cuestión del desacuerdo está muy bien analizada en un artículo de Joseph Rotblat (16), "A Tale of Two Cities".

MODELOS TEORICOS.

Se han encontrado indicios de que, dependiendo de la naturaleza del efecto biológico, sea estocástico o no, la relación dosis-efecto es diferente. Por lo tanto, cualquiera sea la consideración sobre los riesgos específicos debe ser hecha partiendo de un análisis sobre la probabilidad dosis-efecto.

La filosofía adoptada por la Comisión Internacional de Protección Radiológica presentada en la publicación ICRP-26 propone una función lineal, que en la recta dada por $E = aD$, siendo E el efecto o riesgo, D la dosis es el coeficiente angular de la recta. Presume también que no hay limiar para la producción de efectos estocásticos. La Figura 8.1a muestra una recta de dosis-efecto que intercepta la abscisa en el origen, cuyo significado es que con una dosis igual a cero el efecto es cero, y que no existe ninguna dosis que pueda ser considerada inócua, por menor que sea. Este tipo de recta es utilizada por la Comisión Internacional de Protección Radiológica en análisis y cálculos de efectos hereditarios, cancerígenos, principalmente relativos a la leucemia.

Recientemente, algunos científicos han apoyado la idea de que la curva dosis-efecto pueda ser lineal-cuadrática, presentada en la Figura 8.1b. Nuevamente, E es el riesgo y D es la dosis: $E = aD + bD^2$. La constante "a" prevalece para las dosis bajas y la "b" para las dosis altas, o sea, la relación dosis-efecto es descrita por una recta en la región de las dosis bajas y por una curva en las dosis altas. Numéricamente, "b" comienza a prevalecer arriba de 1 Gy. Este tipo de curva puede ser interpretado si observamos que, en la región de dosis bajas, para un incremento dado, D en la dosis, ocurre siempre un mismo incremento

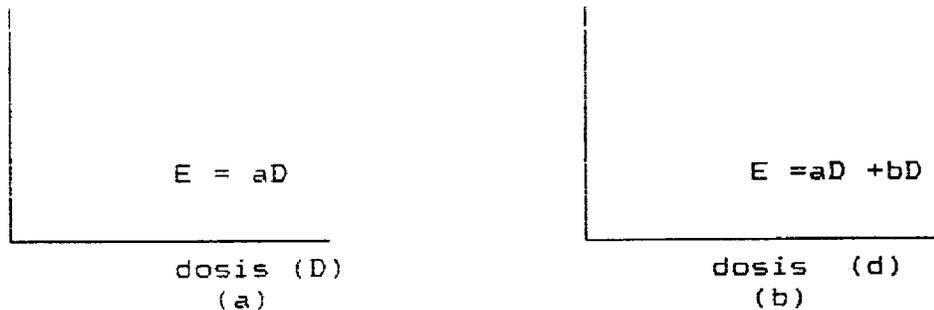


Figura 8.1 Relación dosis-efecto lineal (a), y lineal-cuadrática (b), ambas sin limiar de dosis.

E en el efecto (función lineal). Entre tanto, en la región de las dosis altas, para un mismo incremento D en la dosis, el incremento E en el efecto será mayor, cuanto mayor la dosis.

La Tabla 8.1 indica el número de muertes por cáncer debido a una dosis única en todo el cuerpo de 0,1Gy, según el informe del Comité de Efectos Biológicos de Radiación Ionizante (BEIR) (25). Los cálculos fueron hechos utilizando los modelos de función lineal-cuadrática, lineal y cuadrática.

Tabla 8.1 Estimación de riesgo en caso de exposición única de todo el cuerpo.

modelo	riesgo(muertes por millon de personas por 0,1Gy)
linear-cuadrática	766
linear	1.671
cuadrática	95

Como se puede observar, las estimativas de muerte utilizando el modelo de curva lineal dan valores de 2 a 18 veces, respectivamente, mayores a aquellos obtenidos con los modelos de curva lineal-cuadrática o simplemente cuadrática desde el inicio.

El Comité de Efectos Biológicos de Radiación Ionizante, apesar de reconocer la necesidad de estimar los impactos de la dosis bajas, recomienda que no se haga extrapolación a partir de los efectos de dosis altas por causa de las inadecuadas bases científicas.

CALCULO DE LA DOSIS INTERNA.

Cuando ocurre la incorporación de algún radionuclídeo por el organismo, este no se hace uniformemente, existiendo acumulación en determinados órganos, dependiendo del radionuclídeo. En el caso del Iodo-131 la acumulación se da en la tiroides, en el caso del Cesio-137 y Cesio-134, en los músculos del cuerpo, del Estroncio-90 en los huesos.

Para el cálculo de dosis interna causada por la ingestión o por la inhalación de radionuclídeos, son necesarias informaciones físicas (tipo de energía de las partículas emitidas en cada desintegración nuclear, media-vida y actividad del elemento etc) además de adicionales informaciones biológicas (metabolismo del radionuclídeo en el organismo y la anatomía de los diferentes órganos), siendo éste cálculo extremadamente complejo. Como las personas, en general, tienen órganos con tamaños, formas diferentes, fue creado el "hombre referencia" (26), que es un sistema padronizado de dimensiones y funciones del organismo humano. Por lo tanto se tomó como base la media de la población occidental. Este "hombre referencia mide 1,70 m de altura, masa de las hemacias de 1,7 kg, de páncreas 0,1 y de tiroides 0,02 kg etc. Los japoneses también crearon el "japones padronizado", que es diferente al "hombre referencia"

Los modelos específicos para la ruta de entrada del material, radiactivo en el cuerpo, principalmente para el sistema respiratorio y para el aparato gastrointestinal y su absorción, como los descritos en la publicación ICRP-30 (27), deben ser también utilizados. Además de esto tiene que considerarse el consumo diario de un determinado radionuclídeo, la excreción, o el contenido y la distribución del elemento similar no radiactivo en el cuerpo. En el caso de la leche se hace en general, la suposición que el consumo diario es de 1l por persona. En media, el consumo debe ser menor que ese valor; pero existen algunas personas que toman el doble del valor considerado y tienen el valor de la dosis subestimada.

Se sabe, por ejemplo que el Cesio-137 tiene una media-vida física de 30 años y una media-vida biológica en todo el cuerpo de un adulto de 50 a 150 días. En el caso de contaminación interna, se intenta disminuir la media-vida efectiva [$1/(media-vida efectiva) = 1/(media-vida física) + 1/(media-vida biológica)$], através del aumento de la tasa de eliminación de radionuclídeos, efectuando lavado gástrico.

administrando purgativos y coadyudantes específicos, como el azul de prusia, en el caso del Cesio. En un accidente en China(28), 5 personas fueron contaminadas internamente con Cesio-137. Estas personas fueron observadas y tratadas por 290 días. El sexo, la edad, el peso y la dosis diaria de azul de prusia administrada fueron, respectivamente: (m,38 años,55 kg,3g), (f,34 años, 56 kg, 3 g), (m, 11 años, 34 kg, 2g) ,(m,8 años, 24 kg,1,5 g) y (m,4 años, 13,5 kg, 1g). La media-vida del Cesio-137, durante el periodo de eliminación natural, fue de, respectivamente, 124,54,61,36,y36 días y durante el periodo de tratamiento con azul de prusia, de 38, 39 25, 17, y 16 días.

Utilizando los datos físicos y el modelo de metabolismo del Cesio (el cloruro de cesio y otros compuestos de Cesio que ocurren normalmente son rápidamente absorbidos por el cuerpo, vía aparato gastrointestinal), así podemos obtener que: la dosis equivalente en el cuerpo (2) debida a la ingestión de 1n Ci(37Bq) de Cesio-137 es de 0,06 mrem(0,0006 mSv).Por lo tanto, la ingestión diaria de alimentos contaminados con Cesio-137, con actividad por ejemplo de 37 Bq, crea una dosis equivalente anual en todo el cuerpo de 0,22 mSv. De ésta forma, tomando diariamente 1 litro de leche contaminada por ejemplo con 37 Bq de Cesio-137, habrá un incremento en la dosis equivalente anual média, debido a la radiación natural, de 22 %.

NATURALEZA DE LOS RIESGOS.

Los riesgos de dosis bajas de radiación a que una persona está sujeta, son tan probables como aquéllos de una persona que entra en un automóvil. Los riesgos de radiación dependen de la sensibilidad, la salud, sexo, edad etc. de la persona expuesta, así como los riesgos de una persona dependen del chofer, de las condiciones del auto, del tránsito etc. Como se sabe, siempre existe un riesgo inherente al estar en un automóvil, así como de exponerse a la radiación. Los beneficios y el confort que un automóvil trae son tan grandes que hoy en día, es imposible imaginar un mundo sin automóviles. Lo importante es, por lo tanto, informar bien a la población de los riesgos, y cada persona podrá decidir si el beneficio a ser obtenido valdrá la pena o no.

Como ya fue analizado, estos riesgos no son nada fáciles de ser calculados, dependiendo de un número muy grande de factores.

Después del accidente de Chernobyl, muchos científicos del mundo están escribiendo artículos. Ellos extrapolan a partir de los datos conocidos, el número de muertes por cáncer en los próximos 35 a 50 años y llegan a resultados no siempre concordantes.

En un tiempo atrás, los periodistas vincularon la noticia de que los jugos de frutas contenían el conservante dióxido de azufre, arriba de los valores permitidos por la ley, así como las gelatinas el cromo. Con que seguridad es posible afirmar que el consumo diario de jugos de frutas y de la gelatina con éstas sustancias con concentración inferior al límite establecido por ley no hace mal alguno a la población?

Entre los diferentes agentes nocivos al ser humano, como los insecticidas, el tabaco etc, los efectos de la radiación están entre los más estudiados. Una estadística americana (20) muestra que el tabaco es el principal agente de muertes, seguido de las bebidas alcohólicas, accidentes de vehículos motorizados, ganando de lejos de la radiación. La Tabla 8.2 ilustra algunas contribuciones anuales para el número de muertes en los Estados Unidos.

Tabla 8.2 Contribuciones anuales para el número de muertes en los Estados Unidos (20).

causa	número anual de muertes.
tabáco	150.000
bebidas alcohólicas	100.000
vehículos motorizados	50.000
motocicletas	3.000
ahogamientos	3.000
cirugías	2.800
rayos X	2.300
bicicletas	1.000
contraceptivos	150
avión comercial	130

Otro estudio pérdida de expectativa de vida, motivada por varias causas, fue hecho, tomando por base el pueblo americano (29). Algunos casos seleccionados de ese artículo están en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3 Pierda de expectativa de vida motivada por diferentes causas (29).

causa	días.
ser soltero	3.500
fumador de cigarrillos, sexo masculino	2.250
enfermedad cardíaca	2.100
ser soltera	1.600
obeso 30% arriba de lo normal	1.300
trabajadores de minas de carbón	1.100
cáncer	980
fumador de cigarrillos, sexo femenino	800
hemorragia cerebral	520
accidente con vehiculos motorizados	207
alcoholismo	130
diábetis	95
accidentes de trabajo	74
trabajador con radiación	40
accidentes con armas de fuego	11
radiación natural	8
rayos X para fines médicos	6
cafe	6
anticoncepcional oral	5

ALGUNAS
CONSECUENCIAS
DE LOS ACCIDENTES DE
GOIANIA Y DE CHERNOBYL.

ACCIDENTE DE GOIANIA.

La Sociedad Brasileira de Física formó una Comisión de Seguimiento de Cuestiones Nucleares, después del accidente de Goiania, que formuló una serie de cuestiones al CNEN, cuatro meses después el día 19 de Enero de 1988, el CNEN envió un documento conteniendo las respuestas a las preguntas (30), cuyo resumen es presentado a seguir.

Según el informe de la Policía Federal, la violación de la fuente de Cesio-137 ocurrió entre los días 13 y 14 de septiembre de 1987, liberando una masa total de 91g, siendo de Cloreto de Cesio 19,26g. La actividad de la fuente en la ocasión de la abertura de 1.375 Ci. El CNEN no precisó sobre la fracción de la fuente aún no localizada. El mayor vehículo de diseminación de la contaminación fueron las personas directamente relacionadas.

El suelo de los locales próximos a los focos contenían gran concentración de arcilla, lo que favoreció la retención de los iones de Cesio. En cambio ninguna anomalía fue detectada fuera del radio de 50m de los focos principales. Hasta el momento en que fue emitido el informe, la actividad de los radionuclídeos de las aguas superficiales había sido

siempre inferior al límite de detección de 1,0Bq/l y en cuanto al lienzo freático no fue detectado ninguna contaminación. Un número reducido de árboles frutíferos y hortalizas domésticas presentaron contaminación significativa. Estas estaban rigurosamente circunscritas a un radio de 50 m.

El 30 de septiembre al 20 de diciembre de 1987, 112.800 personas fueron monitoreadas por los técnicos del CNEN en la ciudad de Goiania. De ese estudio se constató que menos de 1.000 personas (no contaminadas) fueron irradiadas externamente con exposición arriba de la radiación natural; de esas 97% recibieron dosis entre 0,20 y 10 mGy. Por otro lado, 249 personas presentaron contaminación interna y/o externa, de las cuáles 49 fueron internadas: entre ellas 21 exigieron atención médica intensiva y 10 presentaron estados graves con complicaciones, una de ellas tuvo el antebrazo amputado. Desgraciadamente, existieron, 4 muertes, 2 por hemorragia y 2 por infección. La dosis citogénica de los 20 pacientes con síndrome agudo de radiación dió los siguientes datos: grado I - 4 pacientes con dosis entre 0,2 y 1 Gy; grado II - 3 pacientes con dosis entre 1 y 2 Gy; grado III - 11 pacientes con dosis entre 2 y 6 Gy (4 muertes); grado IV - 2 pacientes con dosis mayor que 6Gy.

Los 500 técnicos del CNEN que trabajaron en la descontaminación, monitorización y asesoría local también fueron expuestos a radiación emitida por el Cesio-137: 3% de todo el personal llegó a tener el límite semanal de 5,0 mSv, ni el límite mensual de 10mSv según las normas adoptadas por el CNEN.

La basura generada de la descontaminación de las personas y los locales fueron compactados, los líquidos solidificados con cemento. Algunas casas y chosas tuvieron que ser destruidas y removidas con todo lo que había en su interior. Sólo dos focos de contaminación también fueron removidos. Para acondicionar la basura fueron utilizados diversos tipos de embalajes. La basura con niveles más altos de radioactividad fueron colocados en el interior de tambores de 40 o 100 l que por vez fueron colocados dentro de otro tambor de 200 l o de una caja metálica, cubriendo la superficie de concreto. El volumen total de basura acabó siendo de 3.461 m³, constituido de 1.400 cajas metálicas de 1,7 m³ cada una, 3.800 tambores de 200 l, 10 "containers" marítimos de 32 m³ cada uno y 6 embalajes especiales construidas

en concreto armado con paredes de 20 cm de espesor. Del 25 de Octubre al 19 de Diciembre fueron realizados 275 transportes de desechos para un terreno situado a 20 km del centro de Goiania y a 2,5 km de la ciudad de Abadia de Goias. Este fue el lugar escogido para el almacenamiento provisional de los desechos, después de muchas polémicas, una vez que las autoridades de cada Estado brasilero vehementemente se rehusaron a recibir ese material. Todo el desecho está colocado sobre 9 plataformas de concreto con dimensiones de 60 m x 18 m x 0,2m. Actualmente, los índices de exposición en los locales irradiados en Goiania son inferiores a los de Guaraparí o de Pozos de Caldas.

Cinco meses después del accidente, la población de Goiania practicamente retornó a su vida normal, y las areas contaminadas fueron liberadas. El CNEN mantiene en Goiania 11 técnicos para el seguimiento de los desechos radiactivos, para el control del medio ambiente, de las víctimas. Seis de ellas presentan secuelas razonablemente graves como radiodermatitis (quemaduras por radiación) y continúan recibiendo tratamiento médico diario.

ACCIDENTE DE CHERNOBYL.

El Hospital número 6 (31) de Moscú fue designado para tratar las personas gravemente accidentadas. En las primeras 24 horas después del accidente, 129 personas fueron internadas en ese hospital y en las siguiente 24 horas otras 170 personas. En el Hospital de Kiev fueron internadas otras personas en estado no tan grave. Las estimaciones de las dosis fueron hechas biológicamente através de la cuenta de daños cromosómicos, cuenta de linfósitos, historia e inicio de náuseas, extensión de quemaduras por radiación. Las estimaciones fueron las siguientes: diversas personas recibieron dosis superior a 10 Gy; 50 personas, cerca de 5 Gy y otras 200, 1Gy. Dos de los médicos que trabajaban en triage fueron hospitalizados y uno de ellos murió.

Cuando el equipo del médico americano Dr Robert Gale, especialista en transplante de médula ósea, llegó a Moscú, los médicos rusos ya habían efectuado transplantes de células del hígado fetal en 6 pacientes. Ninguno de esos 6 pacientes, así como los

otros 13 que recibieron trasplante de médula ósea, sobrevivieron. De esta manera parece que el concepto del trasplante de médula ósea como solución para el síndrome agudo por radiación ionizante cae por tierra, tanto que esa práctica no fue adoptada en ninguno de los accidentados en Goiania, a pesar de que el Dr. Robert Gale se encontraba en el país.

Hasta el día 20 de Julio de 1986, la secuencia de muertes (18) entre los accidentados fue la siguiente: 2 muertes durante la explosión, 2 en la segunda semana, 10 en la quinta semana, 3 en la sexta semana, y más 2 en la décima segunda semana, totalizando 28 muertes. En la décima segunda semana, estaban internados 30 pacientes en condiciones todavía muy graves, varios de los cuales con quemaduras en la boca y garganta debido a la radiación. En muchos de esos pacientes las quemaduras fueron provocadas por el calor y la radiación. Las quemaduras por radiación se hicieron sentir cuando las quemaduras por calor estaban comenzando a mejorar, esto se debe porque la descontaminación de la piel quemada fue extremadamente difícil de ser hecha. *Sanata que el número de muertes en este accidente fue de 31 personas hasta el fin de 1986.*

De esta situación trágica, los científicos aprendieron mucho sobre los efectos agudos de la radiación y como tratarlos. Estos conocimientos fueron utilizados con mucha eficiencia en los accidentados en Goiania, tanto que el número de muertes fue menor a lo esperado.

EVACUACION DE LA AREA.

La evacuación (18) de la área alrededor de Chernobyl se desarrolló en varias etapas, iniciando con la transferencia casi inmediata de 129 víctimas que recibieron dosis altas para el Hospital número 6 de Moscú. Los preparativos para evacuar los vecinos del reactor comenzaron con la convergencia de la policía para la ciudad Pripyat, a 2.5 km del reactor, con 45.000 habitantes. Según un comunicado oficial soviético, el inicio del accidente fue a la 1 h y 23 min (hora local) del día 26 de Abril de 1986. El índice de exposición (32) en Pripyat en la tarde del mismo día se encontraba entre 14 y 140 mR/h. En la mañana siguiente, había subido para 150-200 mR/h. Treinta y seis horas después del accidente fue realizada la operación de evacuación que duró de las 14 a las 16h y 20 min del domingo, 27 de Abril, con 1.100 omnibus transportando cerca de 49.000 habitantes desde la zona a 10 km del reactor. Los residentes fueron retirados de

sus residencias para evitar aglomeraciones, pánico y una mayor contaminación. Cuando finalizó la evacuación, el índice de exposición se encontraba entre 360 y 1.000 mR/h. La segunda operación de evacuar, después de una semana transfirió más de 35.000 personas de un radio de 30 km alrededor del reactor accidentado, incluyendo los habitantes de la ciudad de Chernobyl, localizada a 18 km del reactor. A inicios de Junio, otras 20.000 personas fuera de la zona de los 30 km fueron retiradas, después que se descubrió alta contaminación en ciertos locales.

CONTAMINACION RADIOACTIVA.

En Europa, la contaminación radioactiva debido al accidente de Chernobyl fue detectada por vez primera el día 28 de Abril de 1986 (33) por el Laboratorio de Investigaciones Energéticas de Studsvik, a 75 km al sur de Estocolmo, durante medidas rutinarias. Los niveles de radiación habían llegado a un valor 15 a 30 veces superior al valor normalmente medido, lo que llevó a pensar en un accidente en ese laboratorio.

Según las estimaciones hechas el 7 de Mayo de 1986 por el Lawrence Livermore Laboratory de los Estados Unidos, fueron liberados en la atmósfera 40 millones de Ci de Iodo-131 y 3 millones de Ci de Cesio-137. De acuerdo con el informe italiano ENEA (3), existió la liberación en la atmósfera de un mínimo de 17 millones y un máximo de 2.400 millones de Ci de radionucléidos, durante las primeras 24 horas después del accidente. La estimativa de los científicos soviéticos (34), fueron liberados en la atmósfera 100 % de los radionucléidos de gases nobles presentes en el reactor (principalmente el Criptón-85, emisor beta y gama con una media-vida física de 10,7 años, y el xenón-133, emisor beta y gama con una media-vida física de 5,3 días) y 50 millones de Ci de radionucléidos condensables.

Las concentraciones de radionucléidos emisores de radiación gama más abundantes detectados en las muestras del suelo recolectadas en la región de Saluggia (3) en Italia, en el día 4 de Mayo de 1986, y Tarnsjo en Estocolmo en Suecia (35) en el día 30 de Abril de 1986 están listadas en la Tabla 9.1. El Estróncio-90, que emite solamente radiación beta, es detectado por un proceso diferente al procedimiento para detectar emisores gama, no constan en esta tabla. Su media-vida física es de 28.1 años y la biológica cerca de

50 Años. Por tener características químicas semejantes a la del Calcio, se instala en los huesos y es bastante dañino. Felizmente, la contaminación por Estróncio-90 fue bastante baja, cerca de 20 veces inferior, la contaminación por Cesio-137 y menor que la acumulada durante varios años con los teste nucleares.

Es importante citar que las muestras de Tarnsjo de la Tabla 9.1 que presentó alta contaminación radioactivo fue recogida después de lluvias en la región. Así la contaminación del suelo europeo varió de región a región, dependiendo de la cantidad de lluvias, que descargaron en el suelo los radionuclídeos traídos por las nubes radioactivas.

Observando los radionuclídeos de la Tabla 9.1 se verifica que el elemento que causó mayor preocupación a los europeos a corto plazo por su media-vida física y por la cantidad depositada fue el Iodo-131. El tiempo necesario para bajar al 10% del valor inicialmente depositado es de 26,7 días en el caso del Iodo-131, y para

Tabla 9.1 Radionuclídeos emisores de radiación gama más abundantes depositadas en el suelo de Saluggia (Italia), Tarnsjo en Estocolmo (Suecia).

radionuclídeo	media-vida física	actividad por areas(Bq/m)		
		Saluggia	Tarnsjo	Estocolmo
nióbio-95	35,0 días	18	1.400	1.400
ruténio-103	39,3 días	1.828	7.700	1.000
ródio-106	30,0 segundos	414	--	--
plata-110m	255,0 días	11	--	--
antimónio-125	2,8 años	44	--	--
iodo-131	8,05 días	4.292	170.000	6.700
cesio-134	2,06 años	596	24.000	200
cesio-137	30,0 años	1.166	33.000	300
cesio-141	32,5 días	14	--	--
lantánio-140	40,0 horas	551	23.000	1.800
báριο-140	12,8 días	588	36.000	2.000
molibcénio-99	65,9 horas	307	4.400	800
telurio-132	76,3 horas	4.070	210.000	1.600
cesio-136	13,1 días	159	--	--
iodo-132	2,3 horas	3.363	--	--
telurio-129	69,6 min	1.139	--	--
telurio-129m	34,1 días	1.749	--	--
zirconio-95	65,0 días	--	1.000	1.500
neptunio-239	2,4 días	--	--	5.000

Telúrio-132 y Iodo-132 es respectivamente 10,6 días y 7,6 horas.

El órgano que es atacado por el Iodo cuando es ingerido o inhalado es la tiroides. En algunos países fueron y están siendo distribuidos a la población tabletas conteniendo Iodo no radiactivo, para saturar la tiroides, evitando así la absorción del Iodo-131.

Entre los elementos detectados en abundancia de vida más larga se encuentran el Césio-134 y el Césio-137. Esos metales alcalinos poseen propiedades químicas similares a los del Potasio y del Rubideo. Como su metabolismo se parece con el Potasio se distribuye por los músculos de todo el cuerpo.