

TEMA 7
RESPUESTA SISTÉMICA Y ORGÁNICA A LA RADIACIÓN
Miguel Alcaraz Baños

Objetivos generales

1. Establecer la diferencia entre efectos inmediatos y tardíos, reversibles e irreversibles.
2. Describir las diferencias entre regeneración y reparación celular.
3. Analizar la radiosensibilidad de los siguientes órganos y sistemas: hematopoyético, piel, digestivo, reproductor, ojo, huesos, respiratorio, urinario y nervioso central.
4. Describir el significado del término "síndrome de radiación".
5. Describir la nomenclatura habitual para expresar la dosis letal porcentual en función del tiempo.
6. Describir las etapas que se producen como consecuencia de una irradiación total aguda y la secuencia de los diferentes síndromes
7. Enumera los efectos más importantes de la radiación en las distintas etapas de la gestación.
8. Analizar los efectos tardíos de la radiación en función de la dosis, y su importancia en las exposiciones ocupacionales
9. Distinguir entre efectos somáticos y genéticos y enumerar los más importantes.
10. Explicar en qué consiste la dosis de duplicación.
11. Discutir la problemática de la estimación de dosis en mujeres gestantes.
12. Analizar y discutir casos concretos de riesgos frente a tipos y características de exploraciones.
13. Interpretar los nuevos factores de ponderación para tejidos y compararlos con los admitidos hasta el presente.

TEMA 7

INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA VIVA. RESPUESTA SISTÉMICA Y ORGÁNICA A LA RADIACIÓN.

Miguel Alcaraz Baños

7.1.- CLASIFICACIÓN DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS POR LA RADIACIÓN.

En función de los tejidos y células irradiadas, los efectos de las radiaciones en el organismo pueden clasificarse en efectos *genéticos* y *somáticos*. Los efectos genéticos son aquellos que afectan a las células germinales y, dada la función de éstas, pueden transmitirse a la descendencia. Sin embargo, los efectos somáticos son aquellos que únicamente afectan a las células del propio individuo irradiado.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICPR) clasifica los efectos producidos por la radiación en **Deterministas** y **no Deterministas**, como se muestra en la figura 7.1..

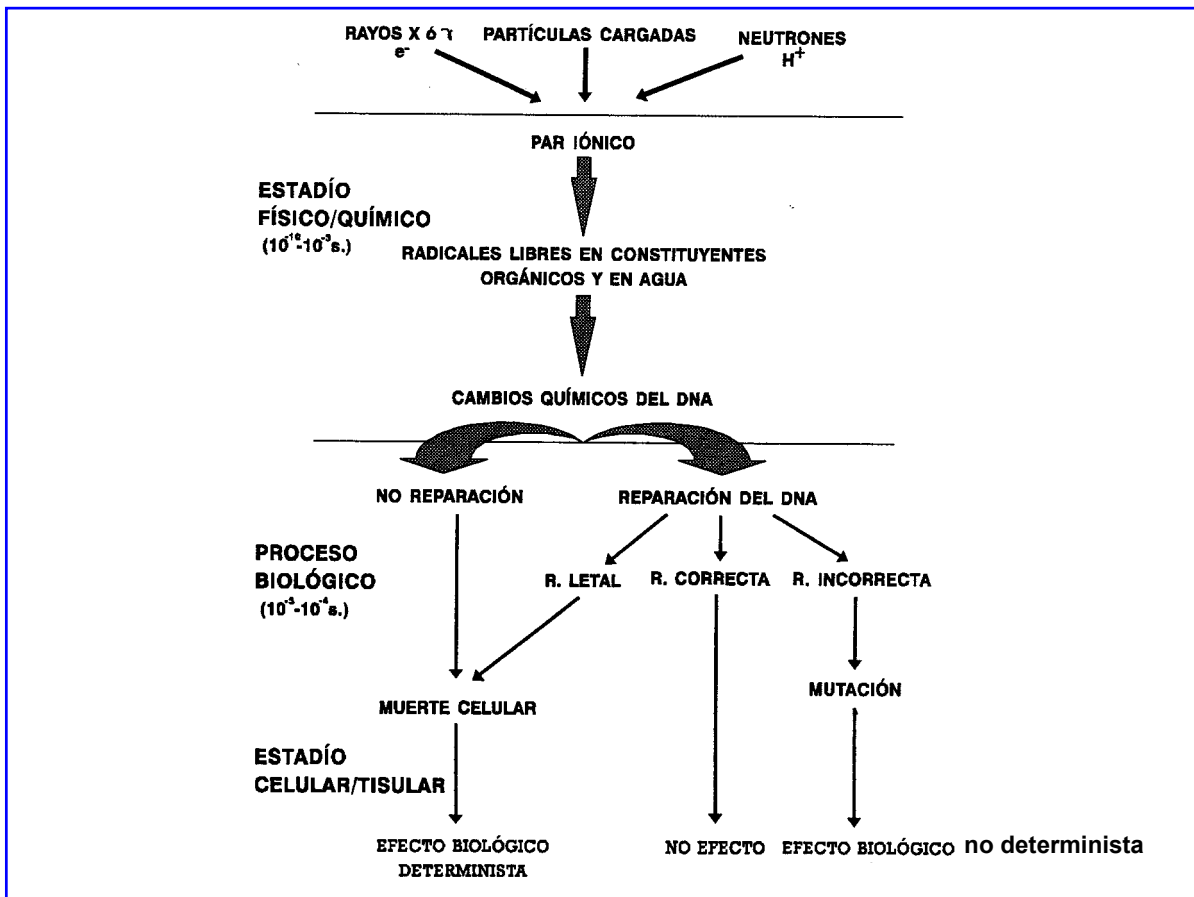


Fig. 7.1. Mapa conceptual de los efectos biológicos producidos por la radiación ionizante.

Los efectos deterministas se caracterizan porque su gravedad depende de la dosis de radiación absorbida. Existe una dosis umbral por debajo de la cual no se produce el efecto o las lesiones, o si éstos se producen serán de escasa gravedad. Cuanto mayor sea la dosis recibida más grave será la lesión producida. Los efectos deterministas nunca son hereditarios, son siempre efectos somáticos, aunque pueden afectar a las poblaciones de células germinales (ej. la irradiación de gónadas conduce a esterilidad, permanente o temporal, tanto en el hombre como en la mujer).

Los efectos no deterministas, por el contrario, se caracterizan porque la probabilidad de que se manifieste el efecto, pero no su gravedad, depende de la dosis de radiación recibida. Estos efectos se relacionan con la aparición de mutaciones tanto en células somáticas como en germinales. Así pues, habrá efectos estocásticos debidos a mutaciones en células somáticas (ej. cáncer) y efectos estocásticos genéticos por mutaciones en células germinales (ej. malformaciones fetales). La gravedad de los efectos no deterministas, una vez se manifiestan, es independiente de la dosis recibida, y los efectos serán igual de graves si se han recibido dosis altas o bajas. Sin embargo, la probabilidad de que aparezcan será mayor cuanto mayor sea la dosis de radiación recibida. Para estos efectos no existe dosis umbral, es decir, dosis por debajo de la cual no se produzca dicho efecto (Fig.7.2).

PROTECCION RADIOLOGICA Efectos Biológicos	PROTECCION RADIOLOGICA Efectos Biológicos
NO ESTOCASTICOS) ESTOCASTICOS
NO PROBABILISTICOS) PROBABILISTICOS
DETERMINISTAS) NO DETERMINISTAS
CON dosis umbral) sin dosis umbral
la gravedad depende de la dosis somaticos) son siempre graves
) carcinogénicos/hereditarios

Fig.7.2. Diferencias entre efectos deterministas y no deterministas.

7.2.- RESPUESTA ORGÁNICA A LA RADIACIÓN.

La respuesta orgánica a la radiación incluye la respuesta tanto de los distintos órganos irradiados de forma aislada, como de la totalidad del organismo expuesto a la radiación. La respuesta a la radiación de un sistema u órgano se define como los cambios morfológicos y/o funcionales, visibles o detectables, producidos por una dosis determinada en un cierto intervalo de tiempo.

La respuesta de un órgano a la radiación se produce en dos fases:

1ª.- Cambios iniciales, resultado de lesiones celulares. En función de la dosis pueden ser reversibles o no. Se manifiestan en los primeros días o semanas después de la irradiación. Como ejemplo, se citan los edemas e inflamaciones de las zonas irradiadas.

2ª.- Cambios tardíos, consecuencia de cambios iniciales irreversibles que perduran o se cronifican. Se manifiestan meses después de la irradiación. Es el caso, por ejemplo, de las fibrosis y ulceraciones de las zonas irradiadas.

El daño producido por las radiaciones puede ser eliminado bien por regeneración, en el cual se sustituyen las células dañadas por otras del mismo tipo; por reparación en el cual se sustituyen las células dañadas por otras de distinto tipo. La regeneración produce la restitución total o parcial de las funciones anteriores a la irradiación no mostrando el órgano cambios tardíos. La reparación actúa contra los efectos irreversibles con formación de una cicatriz (fibrosis). Este proceso no restaura el órgano y puede dar lugar a alteraciones funcionales crónicas.

7.2.1. Alteraciones tisulares y orgánicas inducidas por radiación ionizante.

Todos los órganos presentan alteraciones morfológicas y/o funcionales como consecuencia de su exposición a radiación ionizante. A continuación se describen los sistemas y órganos más importantes y el efecto de la radiación en ellos.

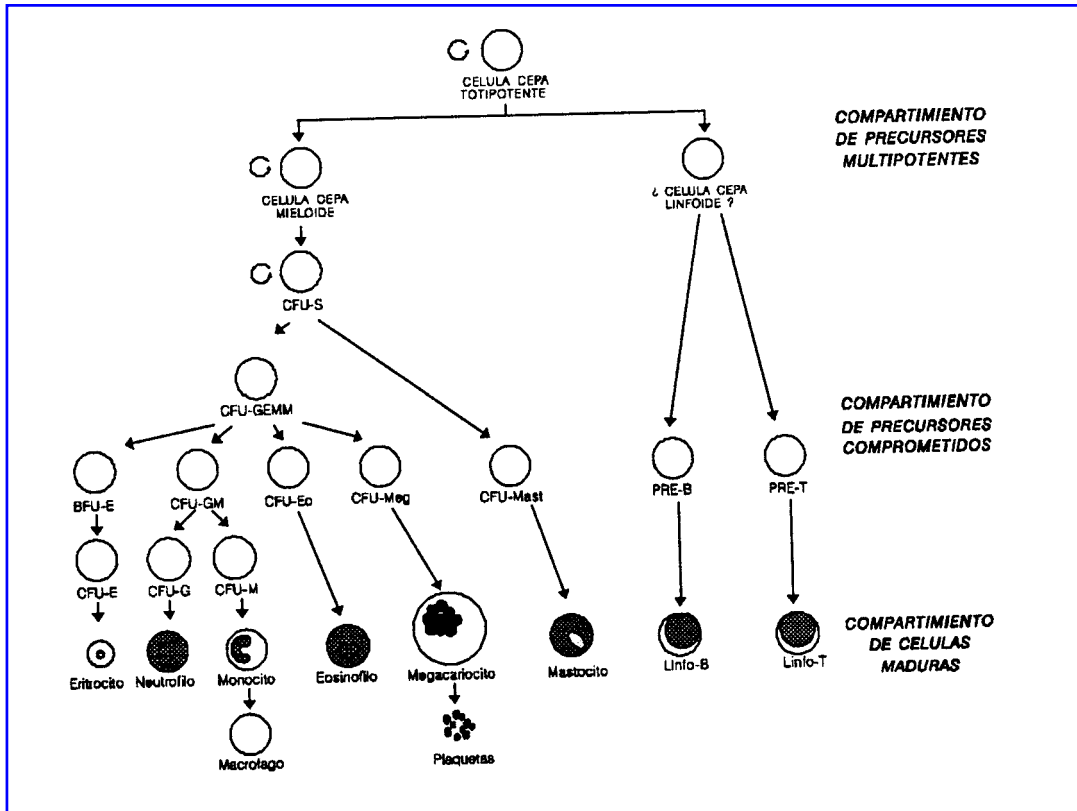


Fig.7.3. Esquema de la hematopoyesis.

En la médula ósea, situada en el canal medular del esternón y en las crestas ilíacas en el trabajador adulto, se encuentran las células madre, precursoras de la hematopoyesis, que son autorrenovables y totipotentes. Estas células darán origen a otras estirpes celulares que progresivamente se irán diferenciando hacia cualquier línea linfhematopoyética de la sangre periférica. Las células madre forman otros precursores comprometidos (cada vez más diferenciados) que dan origen a las distintas células funcionales que son transportadas hacia el torrente sanguíneo (figura 7.3.).

Dosis relativamente pequeñas de radiación ionizante pueden provocar la “depopulación” o despoblación de las células que constituyen la médula ósea. La elevada susceptibilidad a la radiación de las células madre y precursores comprometidos es causa del denominado síndrome hematopoyético a la radiación. La parada proliferativa de estas células conduce a un bloqueo de la hematopoyesis, de tal forma que la muerte de las células funcionales en sangre no podrá ser compensada por la producción de nuevas células. Ello da lugar a una caída en el número de células circulantes.

El efecto en sangre periférica de la lesión inducida en la médula ósea depende de la radiosensibilidad de las células precursoras y de la vida de cada estirpe hemática y, sobre todo, de la dosis de radiación administrada.

* Dada la elevada radiosensibilidad de los precursores hematopoyéticos, dosis moderadas de 0,5 Gy provocan una disminución de la proliferación de las células madre y precursores comprometidos, lo que origina un descenso del número de células funcionales de la sangre poco tiempo después.

* La pérdida de leucocitos conduce a una disminución o falta de resistencia frente a procesos infecciosos, que fácilmente crean sepsis generalizadas.

* La disminución del número de plaquetas favorece la aparición de hemorragias múltiples e incoercibles que, sumado a la falta de producción de eritrocitos, provoca anemias intensas.

* La disminución de los linfocitos, las células más radiosensibles del organismo, se aprecia con dosis del orden de 0,1 Gy; pero a estas dosis casi no se observan efectos sobre las demás células sanguíneas. Los linfocitos (en especial ciertas poblaciones de linfocitos B) son especialmente susceptibles a la radiación. A diferencia de aquellas células que mueren por fallos en su replicación, estas células sufren muerte por apoptosis con dosis bajas en unos pocos minutos después de la exposición. Esta elevada susceptibilidad de las células B a la radiación es causa de que la respuesta inmunitaria humoral sea más radiosensible que la inmunidad celular.

• Sistema respiratorio

El sistema respiratorio está formado por la nariz, la faringe, la tráquea y los pulmones.

Al irradiarse el pulmón, los primeros signos de la lesión consisten en la aparición de una inflamación del tejido irradiado y la extravasación de contenido vascular, que es el origen de un edema de la zona irradiada y de la aparición de un infiltrado de polimorfonucleares. A todo este cuadro se le denomina pneumonitis (inflamación del pulmón) postirradiación (de origen radioinducido) (Figs. 7.4 y 7.5).

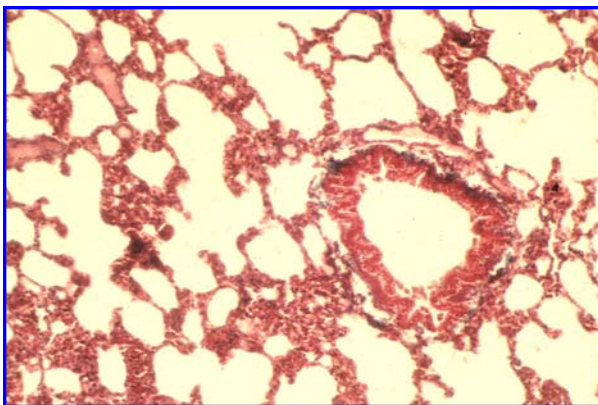
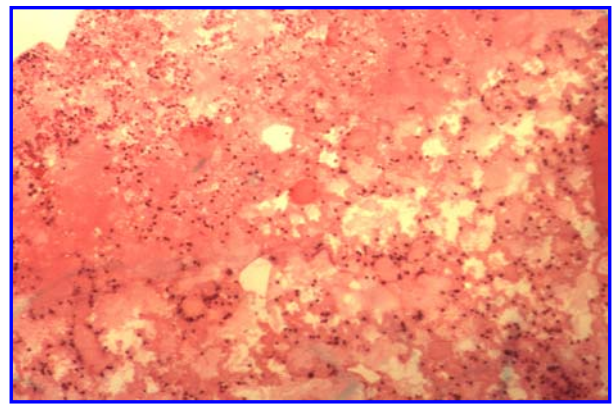


Fig.7.4. Pulmón normal.



7.5. Pulmón irradiado (pneumonitis radioinducida)

A partir de este momento, si la dosis de radiación no ha sido excesivamente elevada, el tejido pulmonar volverá a establecer su indemnidad, incluso sin dejar ningún tipo de secuela o cicatriz. Por el contrario, si la dosis ha sido más elevada, esta inflamación se cronifica y perdurará en el tiempo activando a los macrófagos y a los fibroцитos así como la secreción de matriz conjuntiva que constituye la fibrosis de la zona irradiada, como un intento de eliminar la inflamación de origen radioinducido.

Esta cicatrización por fibrosis de las zonas irradiadas culminará hacia los 12 a 18 meses postirradiación, en donde todo el parénquima funcionante inflamado será sustituido por tejido fibrótico cicatricial. La consecuencia será la pérdida de la función en esa zona fibrosada (Fig.7.6). Si el volumen irradiado es pequeño, el resto del parénquima podrá compensar la afuncionalidad de la zona dañada. Si el volumen irradiado es muy grande, la pérdida de función no podrá ser compensada y se

producirá una insuficiencia funcional que, en ocasiones, conllevará la muerte del individuo, en este caso, por insuficiencia respiratoria.

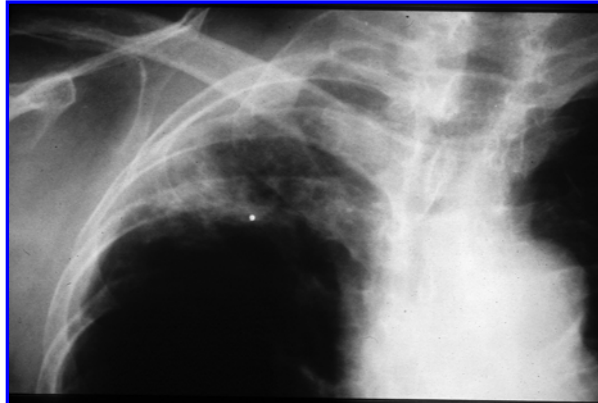


Fig.7.6. Fibrosis pulmonar radioinducida

• Piel.

La piel está formada por el conjunto de epidermis, dermis y una capa subcutánea de tejido graso y conjuntivo. La epidermis consta de una capa basal de células inmaduras que están en continua división y células maduras que al ir evolucionando hacia capas más externas mueren y se van descamando. La capa basal cumple todos los requisitos expuestos por Bergonie y Tribondeau, y por ello es la capa más radiosensible de la piel. Las lesiones en la piel se denominan **Radiodermatitis** (figura 7.4.) y se clasifican en tres grados según su intensidad, de forma similar a la clasificación de las lesiones producidas por quemaduras o congelaciones (Figs. 7.7 y 7.8).



Fig.7.7. Radiodermatitis de 2º grado



Fig.7.8. Radiodermatitis de 3º grado



Fig. 7.9. Radiodermatitis crónica: mano de radiólogo/Traumatólogo.

Los cambios iniciales que se observan en la piel tras la recepción de dosis moderadas y altas son: Inflamación, eritema y descamación, ya sea seca o húmeda. Los folículos pilosos son radiosensibles provocando alopecia temporal a dosis moderadas, o alopecia permanente a dosis más elevadas. Las lesiones crónicas sobre la piel se ponen de manifiesto como fibrosis, pigmentación, telangiectasias, necrosis o, incluso, cáncer.

• **Aparato Digestivo**

Abarca el conjunto de cavidad bucal, esófago, estómago, intestino delgado e intestino grueso. El intestino delgado es la parte más radiosensible del tubo digestivo, ya que presenta un conjunto de células indiferenciadas en continua división (situadas en las criptas de Lieberkuhn) que van reemplazando a las células que se descaman de la superficie de las microvellosidades intestinales.

Dosis moderadas de radiación pueden provocar la destrucción de las células de la capa basal de la mucosa que se encuentran en continua actividad mitótica. Se produce una disminución de la capacidad de absorción de materiales a lo largo de la pared intestinal, originando deshidratación y pérdida de electrolitos por el paso de fluidos hacia la luz intestinal. Pueden producirse infecciones sistémicas, provocadas por el paso de las bacterias que habitan normalmente en el tracto gastrointestinal hacia el torrente sanguíneo. La exposición a dosis altas ocasiona secuelas más graves, que generarán hemorragias multicéntricas, con diarreas profusas, alteraciones del pH sanguíneo y alteraciones hidroelectrolíticas graves.

• **Sistema reproductivo masculino**

La parte más radiosensible del sistema reproductor masculino es el testículo y, dentro de él, las espermatogónias (células precursoras de los espermatozoides), ya que cumplen los requisitos expresados en la Ley básica de radiosensibilidad celular.

El efecto primario de la radiación sobre el testículo es el descenso en el número de espermatogónias, que origina una disminución posterior del número de espermatozoides. Se produce un cierto período de fertilidad temporal, seguida de una fase de esterilidad, más o menos duradera dependiendo de la dosis recibida. El umbral para la inducción de esterilidad temporal es de 0,2 Gy, y de 3 a 6 Gy para la esterilización permanente.

El resto de las células del intersticio glandular son más resistentes a la radiación, por lo que estos cuadros de esterilidad no se acompañan de las alteraciones producidas por insuficiencia en la secreción de hormonas masculinas, y se mantienen intactos los caracteres sexuales secundarios.

• **Sistema reproductor femenino.**

Las células más radiosensibles de este órgano son los óvulos, situadas en los folículos ováricos. La radiosensibilidad de los óvulos depende del estadio en el cual se encuentre el folículo. La sensibilidad de los folículos dependerá de su estado de maduración. Pero, en general, todo el ovario presenta una elevada sensibilidad a la radiación, incluso mayor que la descrita para el testículo en el varón.

Las dosis necesarias para producir la esterilización transitoria se sitúa sobre los 2 a 2,5 Gy, y para la esterilidad permanente entre 4 a 6 Gy. En la mujer la destrucción ovárica conlleva un cuadro de privación hormonal, que provoca una menopausia precoz en las mujeres irradiadas.

Pero, además, la irradiación de los órganos reproductores masculino y/o femenino puede provocar, además, alteraciones genéticas que se mostrarán como lesiones hereditarias en la descendencia.

- **Ojo.**

El cristalino contiene una población celular de división activa que puede ser lesionada por la radiación ionizante. Estas células lesionadas van a convertirse en núcleos de opacificación que con el paso de los años ocasionarán la opacidad completa del cristalino: catarata (figura 7.10.). La catarata se asume como una lesión característica de los profesionales expuestos a dosis bajas de radiación. Experimentalmente, dosis de 2 Gy producen cataratas en algunos individuos, aumentando la incidencia al 100% cuando la dosis es de 7 Gy.

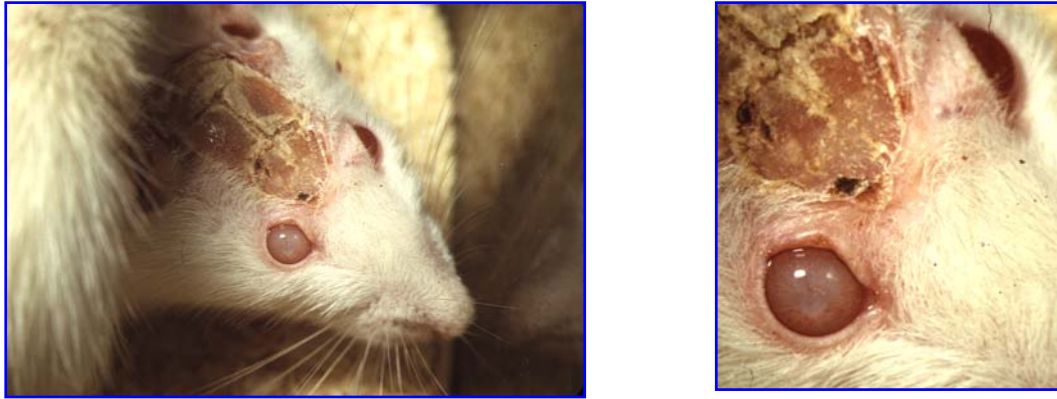


Fig.7.10. Catarata radioinducida. También se aprecia una secuela cicatricial de radiodermatitis (Cortesía del Dr. M. Maisin)

- **Sistema cardiovascular**

Este sistema está formado por la red de vasos sanguíneos y el corazón. Los vasos sanguíneos contribuyen a las radiolesiones, tanto en órganos radiosensibles como radiorresistentes, ya que su lesión compromete el aporte sanguíneo a los diferentes órganos y tejidos.

Los vasos más gruesos son más radiosensibles que los vasos más finos. Las alteraciones de los vasos sanguíneos se manifiestan en forma de efectos tardíos, tales como hemorragias petequiales, telangiectasias (dilatación de capilares terminales), y esclerosis de los vasos (fibrosis). En casos más graves puede producirse la rotura de la pared del vaso, y/o alteraciones que generen cuadros de trombosis y/o embolias (Fig.7.11).

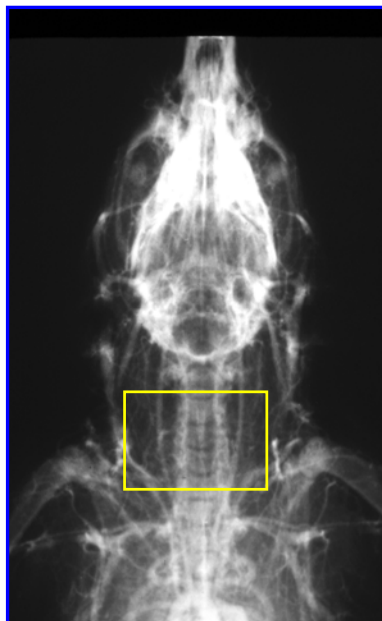


Fig.7.11.: Alteraciones vasculares que producen lesiones en los órganos que irrigan: Deaparición de la arteria tiroidea izquierda

- Huesos y cartílagos.

El tejido óseo maduro esta formado por la mineralización de los cartílagos, siendo tanto el hueso como el cartílago resistentes a la radiación. Los huesos y cartílagos en crecimiento son moderadamente radiosensibles, por estar formados por células diferenciadas (osteocitos y condrocitos) y células no diferenciadas (osteoblastos y condroblastos) de rápida división, lo que explica su mayor sensibilidad a la radiación.

Las dosis moderadas de radiación producen en el tejido óseo un retraso mitótico y la muerte de las células inmaduras que proliferan. Las dosis altas conducen a una inhibición permanente de la mitosis y la destrucción de las células en proliferación (Fig.7.12), circunstancia que puede conllevar a la detención del crecimiento óseo.

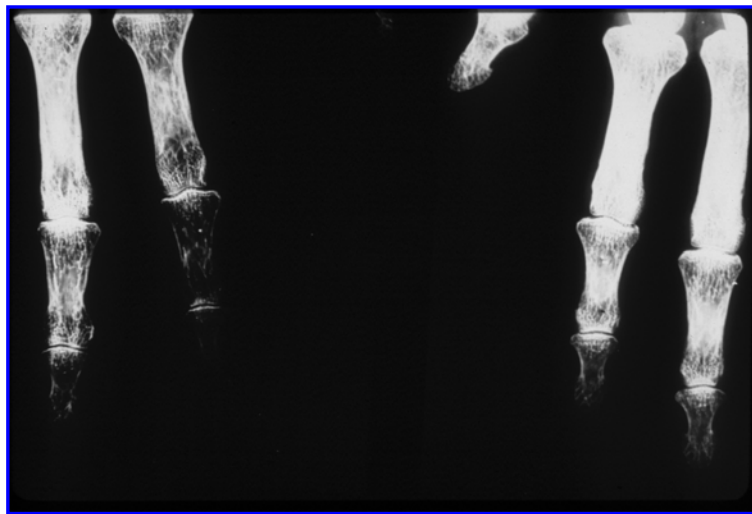


Fig.7.12. Alteraciones óseas en la mano de radiólogo/traumatólogo anterior

- **Hígado.**

Generalmente se considera al hígado como una parte del sistema digestivo, por constituir una glándula esencial para el almacenamiento, metabolismo y excreción de productos durante el proceso digestivo.

A lo largo de muchos años se supuso que el tejido hepático era resistente a la radiación, pero la opinión actual es que el hígado es un órgano moderadamente sensible. Las células hepáticas conservan la capacidad de regeneración mediante la mitosis aunque son ligeramente radiorresistentes. La radiosensibilidad del hígado se debe a que recibe un gran aporte sanguíneo a través de una red importante de vasos, y son éstos, al sufrir radiolesiones los que provocan modificaciones estructurales hepáticas.

Las dosis bajas y moderadas producen una respuesta inicial apenas apreciable clínicamente. Los cambios originados por dosis altas son difíciles de apreciar, excepto mediante estudios funcionales y que coinciden con una hepatitis post-irradiación.

Los efectos tardíos de la irradiación del hígado, consecuencia de la muerte celular y de la esclerosis vascular, consisten, esencialmente, en fibrosis (cirrosis) e incluso necrosis, que se acompaña del cuadro de insuficiencia hepática correspondiente.

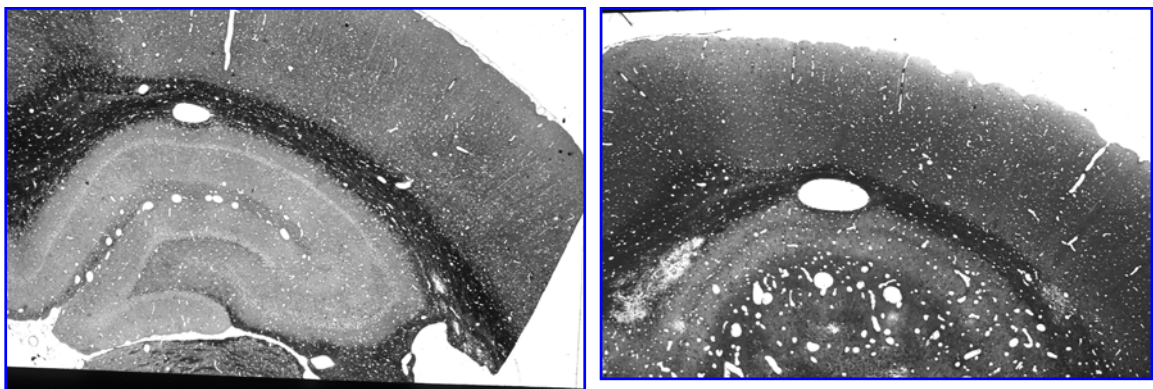
• Sistema urinario.

El sistema urinario está formado por los riñones, los uréteres, la vejiga y la uretra. Los riñones tienen una sensibilidad similar a los pulmones y, como en éstos, el cuadro de lesiones inducidas por la radiación es consecuencia de lesiones vasculares: la glomerulonefritis membranosa. Los cambios tardíos, atrofia y fibrosis renal, son secundarios a lesiones vasculares y terminarán generando hipertensión y fallos funcionales.

• Sistema nervioso central.

El sistema nervioso central está integrado por el cerebro y la médula espinal. En general, las células nerviosas no se dividen, lo que las hace relativamente radiorresistentes. De hecho, el sistema nervioso central se considera como el más resistente en el individuo adulto, hasta el punto que se acepta que las dosis de radiación bajas y moderadas, producen lesiones morfológicas mínimas. Sin embargo, a través de un mecanismo indirecto, el tejido cerebral se lesiona. Las alteraciones vasculares y de la glía se traducen en lesiones en el parénquima, que dañará las neuronas.

Los cambios iniciales en el sistema nervioso central, por dosis altas, comienzan con inflamación de las zonas irradiadas que progresa hasta llegar a la fibrosis o necrosis cerebral (Fig.7.13). Son la consecuencia indirecta de la esclerosis o trombosis en el sistema circulatorio. El límite umbral de radiolesiones en el sistema nervioso se suele situar entre 20-40 Gy.



a) Cerebro no irradiado; **b)** cerebro irradiado. Observense la intensa vacuolización presentada en el cerebro irradiado como expresión del daño radioinducido (Cortesía de Gianfelichi de Reniers)

• Glándula Tiroides.

Tradicionalmente la glándula tiroides se ha considerado como un tejido resistente a la radiación ionizante. Sin embargo, durante los últimos años esta apreciación está modificándose radicalmente. Dosis moderadas de radiación producen una intensa vacuolización citoplasmática, con expulsión de contenido intracitoplasmático al interior del coloide tiroideo, y la descamación de algunas células destruidas por la radiación. En ocasiones se observa un incremento de tejido fibroso cicatricial en el interior de la glándula (Fig.7.14)

Dosis más elevadas de radiación pueden ocasionar una “esterilización” de las células foliculares que, con el paso del tiempo, irán provocando una disminución del número de células funcionantes y la aparición clínica de cuadros de hipofunción tiroidea (hipotiroidismo). Dosis de 7.5 Gy producen alteraciones funcionales tiroideas en un 50% de los pacientes tratados durante los primeros años desde la realización del tratamiento.

De igual forma, se ha descrito la mayor incidencia de cáncer de tiroides en aquellos niños con hipertrofia e hiperplasia de timo, tratados con radiación ionizante.

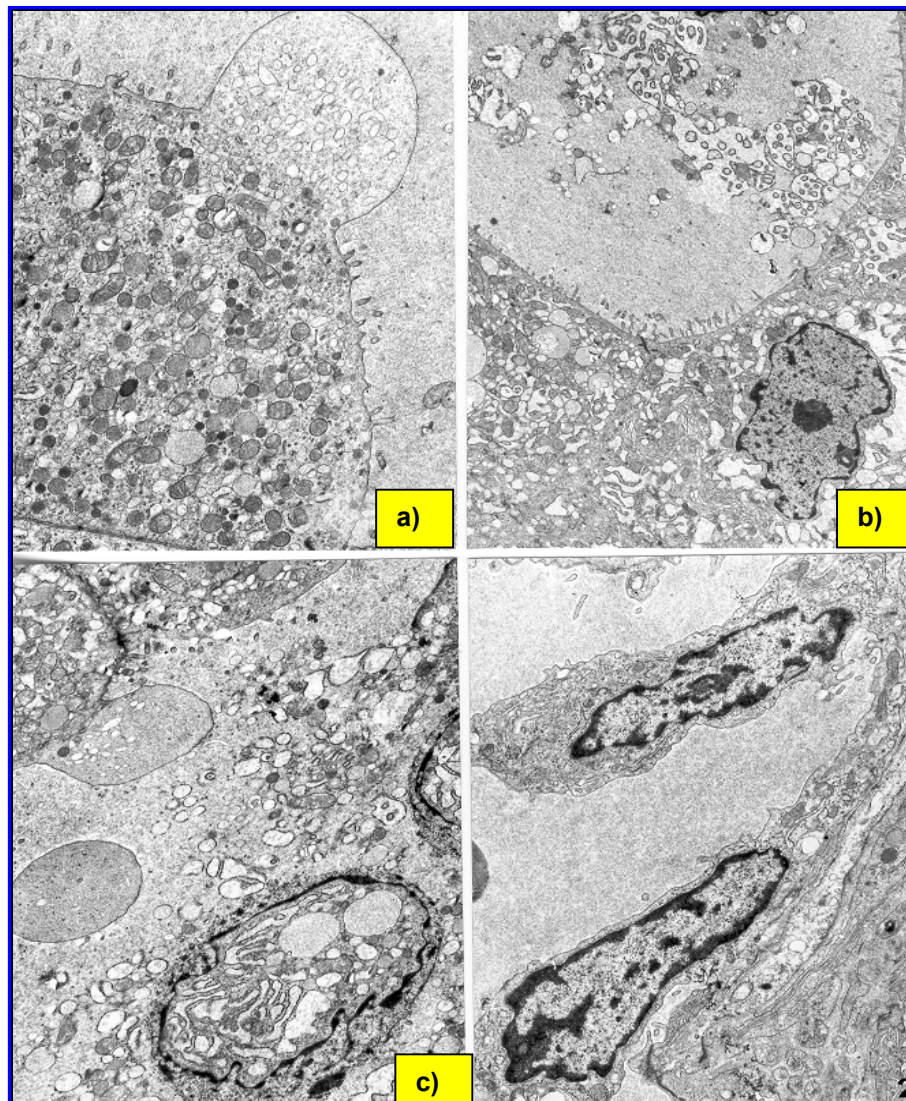


Fig.7.14.Microscopía electrónica de la glándula tiroides irradiada: a) Expulsión citoplasmática al coloide;b) restos citoplasmáticos en el coloide; c) descamación de células foliculares al coloide

En estos momentos, la glándula tiroides es uno de los órganos diana que necesitan de una mayor atención desde el punto de vista de la protección radiológica, tanto para el trabajador profesionalmente expuesto como para los pacientes de radiodiagnóstico.

7.3.- RESPUESTA SISTÉMICA A LA RADIACIÓN.

La respuesta del organismo a la radiación viene determinada por la suma de los efectos de cada uno de los sistemas irradiados. Sin embargo, dado que la radiosensibilidad y, por tanto, la respuesta varía en cada sistema, la respuesta global queda determinada por el sistema afectado que resulta ser el más radiosensible.

La respuesta del embrión y feto depende, entre otros factores, del tiempo de gestación en el que se produce la irradiación, por lo que en el desarrollo de este apartado se diferenciará entre la respuesta del adulto y la del embrión.

7.3.1. Respuesta orgánica de organismo adulto.

La respuesta de un organismo adulto a una exposición a radiación ionizante, puede dar lugar al síndrome de irradiación orgánica (SDI) cuando la exposición afecta a la vez a todo el organismo. Para que se produzca este cuadro clínico debe ocurrir que:

- la exposición del organismo a la radiación se produce en un corto período, es decir, es una exposición aguda.
- la exposición a la radiación es homogénea, es decir, debe de comprender la totalidad del organismo o su mayor parte.
- la irradiación procede, fundamentalmente, de fuentes externas al organismo.

La dosis letal porcentual en función del tiempo, se define como el cociente $DL_{m/n}$, donde m y n significan respectivamente el tanto por ciento de la población que sufre muerte y los días de supervivencia tras la irradiación. Así $DL_{50/30}$, significa la dosis letal necesaria para causar un 50% de promedio de muerte en la población expuesta al cabo de 30 días. Permite comparar los efectos letales que producen los distintos niveles de dosis.

La $DL_{50/30}$ para el hombre, en una irradiación corporal total, se encuentra en el intervalo de 2,5 a 3 Gy.

Representando el tiempo de supervivencia humano en función de la dosis recibida, se obtiene una curva con tres zonas bien diferenciadas (figura 7.15.).

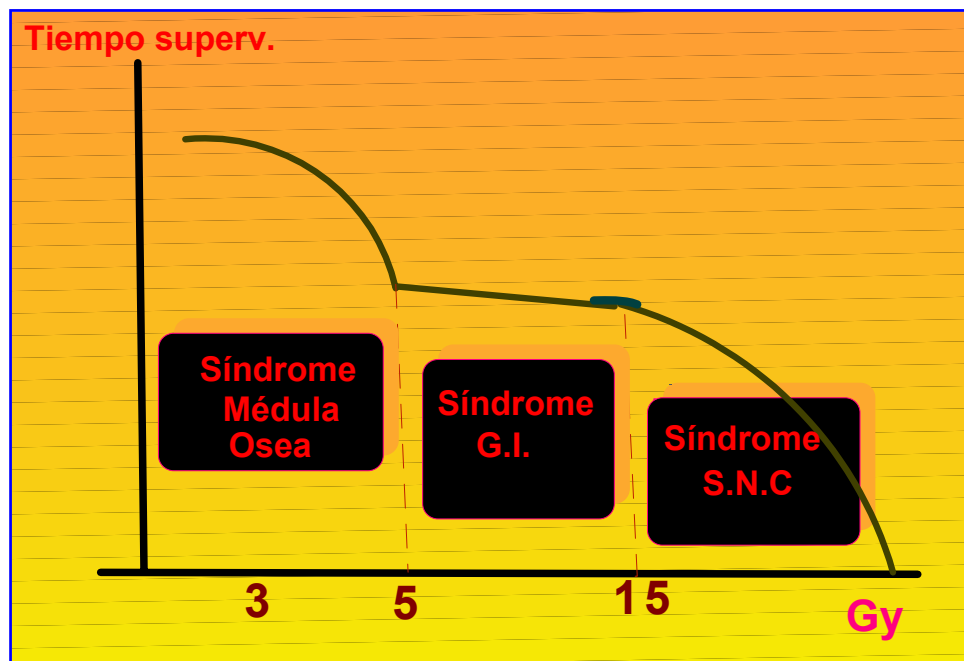


Fig. 7.15. Síndrome de irradiación corporal total.

La zona 1 es la zona llamada **síndrome de la médula ósea** (dosis 3-5 Gy), en el cual la muerte se produce al cabo de 30-60 días como consecuencia de la lesión del sistema hematopoyético al destruirse la médula ósea.

La zona 2 tiene la denominación del ***síndrome del sistema gastrointestinal*** (dosis 5-15 Gy), que provoca la muerte al cabo de 10-20 días como consecuencia de la destrucción de la mucosa intestinal (dosis superiores a 15 Gy).

La zona 3 tiene la denominación de ***síndrome del sistema nervioso central*** (dosis superiores a 15 Gy), la muerte ocurre en 1-5 días, con una sintomatología clínica compatible con un cuadro de hipertensión endocraneal.

Desde un punto de vista clínico, en la irradiación corporal total se podrían apreciar diferentes etapas:

- Latencia: periodo libre de síntomas clínicos que, incluso con dosis de radiación elevadas, puede ser de días o semanas.

- Etapa Prodrómica: cuadro de astenia, anorexia, náuseas, vómitos, febrícula, etc, entre 24 - 48 horas de evolución, completamente inespecífico.

- Etapa de enfermedad manifiesta: es un conjunto sindrómico caracterizado a su vez por los síntomas previamente descritos: el de la médula ósea, el gastrointestinal y el del sistema nervioso central. Con dosis de radiación muy elevadas podrán aparecer simultáneamente, mientras que las dosis bajas hacen que aparezcan de forma aislada (con una exposición de 2 Gy sólo el de médula ósea).

Otra forma de respuesta sistémica de todo el organismo lo constituye el ***síndrome de irradiación crónica***, también denominado radiotoxemia o roentgenkater. Es la respuesta a la radiación que se presenta durante el tratamiento radioterapéutico de pacientes cancerosos al aplicar grandes dosis en áreas corporales muy amplias (abdomen, cerebro, tórax). No tiene gran importancia clínica y su sintomatología es similar a la fiebre de reabsorción tras algunas intervenciones quirúrgicas, en donde se produce la reabsorción de grandes cantidades de tejido necrótico. Consiste en náuseas, mareos, vómitos, tendencia a diarreas, cefalea, anorexia y fiebre que suele ceder con corticoides o con la finalización del tratamiento.

7.3.2. Respuesta orgánica del embrión y el feto.

Desde que el matrimonio Müller en 1959 definió tres etapas diferentes en el desarrollo embrionario, a cada una de las etapas parece corresponder un diferente tipo de respuesta frente a la radiación ionizante.

A.- Etapa de preimplantación: sólo dura unos días, desde la fecundación del óvulo hasta su implantación en el útero. En este periodo, el huevo está formado por una pequeña cantidad de células muy indiferenciadas y totipotentes. Si la irradiación provoca una lesión celular que puede ser compensada por las células supervivientes, el embrión llegará a término sin ninguna alteración sobre el recién nacido.

Por el contrario, si las células supervivientes no compensan el daño producido por la radiación, el desarrollo del embrión es inviable y se produce el aborto. Todo ello se simplifica en la "Ley del todo o nada", o se produce la muerte del embrión o nacerá un niño completamente normal.

B.- Etapa de organogénesis: constituye la etapa en la cual se va a formar la mayor parte de los órganos en el embrión, y suele comprender desde la implantación en el útero del huevo, hasta las 12 a 15 semanas de gestación. En esta etapa, la lesión que puede ocasionar la radiación ionizante dependerá de la dosis de radiación y del momento en el que se produzca la exposición a la radiación ionizante.

Se ha establecido, tanto para los diferentes animales de experimentación como para la especie humana, un calendario en el que se detallan los días/semanas en los que se formarán los diferentes órganos del nuevo ser. El efecto de la radiación dependerá del momento en el que ese embrión se expone a radiación ionizante, ya que se lesionarán las células que están con mayor actividad mitótica, es decir, las que están formando los órganos en ese momento. Así, si la irradiación ocurre con dosis suficientemente elevadas, entre la 11^a - 12^a semana, las lesiones más

frecuentemente esperadas son las del tejido musculoesquelético que forman las extremidades superior e inferior. Si la irradiación se produce en la 20ª semana las lesiones esperadas afectarían al sistema nervioso central. Todo ello por ser los órganos en formación en ese momento (Fig.7-16).

Sin embargo, estas lesiones no son tampoco específicas, ya que numerosos agentes químicos (talidomida) o biológicos (rubeola, toxoplasmosis) van a producir lesiones similares, en función del momento en que entren en contacto el agente tóxico con el embrión.

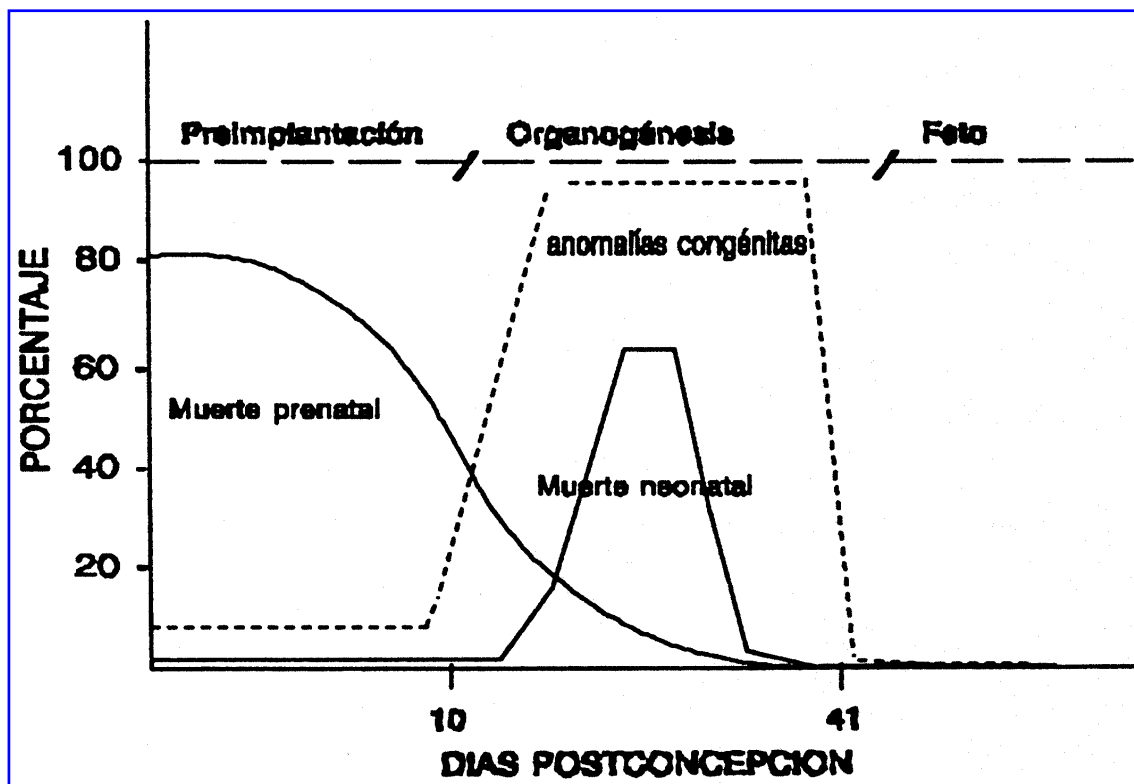


Fig.7.16. Cronología del embarazo y su relación con el efecto inducido por la radiación.

corresponde al periodo comprendido entre la finalización de la organogénesis hasta el nacimiento. En esta etapa son característicos los fenómenos de maduración de los diferentes procesos funcionales, y por ello su resistencia a la radiación es mayor que la presentada en los estadios anteriores.

Una exposición a dosis altas de radiación puede producir alteraciones funcionales, entre las que se describen la esterilidad masculina y femenina, la idiocia y la oligofrenia. También se ha relacionado con un incremento de angiomas cutáneos en los niños irradiados intraútero.

Cabe destacar que durante los primeros años de vida, en los niños irradiados dentro del útero materno, se ha descrito un aumento en la frecuencia de aparición de algunos cánceres (leucemias y carcinoma de tiroides).

Las lesiones mencionadas no ocurren con dosis inferiores a los 15 rads, según expresan los autores más conservadores; ni con menos de 50 rads para la mayoría de los autores. En general, son lesiones que precisan, para su producción, dosis relativamente elevadas. Sin embargo, su conocimiento impone extremar el cuidado, desde el punto de vista del radiodiagnóstico, con la mujer embarazada y con el feto. El cuidado especial a que nos referimos implica la ausencia de exposición innecesaria y el máximo cuidado en la radioprotección (incluso de la radiación dispersa) cuando se realice en estas situaciones, cualquier tipo de exposición.

7.3.3. Carcinogénesis.

Aunque la etiología del cáncer y los procesos de carcinogénesis no están suficientemente establecidos, la radiación ionizante se ha relacionado con numerosos tipos diferentes de neoplasias: leucemias, osteosarcomas, carcinomas de pulmón o de piel, etc.

El estudio de poblaciones expuestas a radiaciones ionizantes descubre su estrecha relación con la inducción del cáncer:

- Mineros de uranio y el cáncer de pulmón.
- Profesionales expuestos a radiación ionizante y cáncer de piel (mano del radiólogo).
- Trabajadores con pintura fluorescente y osteosarcoma del maxilar inferior.
- Aumento de la frecuencia de aparición en la población irradiada de Hiroshima y Nagashaki.
- Niños tratados por hipertrofia de timo y cáncer de tiroides.

La ICRP, en sus conclusiones de 1990, estima que la incidencia del cáncer radioinducido es de 13 casos cada 10.000 personas, al año y por cada 100 rads de radiación absorbidos, mientras que la incidencia de muerte por esta causa es de 6'3 casos/10.000 personas/año/100 rads.

Los valores estimados por la ICRP representan una incidencia relativamente baja en relación a otros factores lesivos y carcinogénicos a los que se enfrenta el ser humano en su actividad habitual. Si se aplican los criterios de mortalidad por cáncer radioinducido a la realización de mamografías (como exposición diagnóstica), el riesgo de producir una muerte por cáncer radioinducido entre 6 millones de mujeres al año, resulta equivalente al riesgo de morir durante un trayecto de 45 km. en avión, 6 Km. en coche, fumar de 1 a 8 cigarrillos diarios o vivir 3 minutos a partir de los 60 años.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

LATORRE TRAVIS, E. (1979).- *Radiobiología médica*. AC, Madrid (pp.92-162)