

RADIOBIOLOGÍA

- RADIOBIOLOGÍA.
- RADIACIONES IONIZANTES.
- RAYOS X.
- CONCEPTOS BÁSICOS DE BIOLOGÍA CELULAR
- EPIDEMIOLOGÍA.
- RADIOSENSIBILIDAD
- RADIOGENÉTICA.
- RESPUESTA SISTÉMICA A LA RADIACIÓN.
- RESPUESTA ORGÁNICA TOTAL A LA RADIACIÓN (EMBRIÓN, FETO Y ADULTO).
- EFECTOS TARDÍOS DE LA RADIACIÓN: SOMÁTICOS Y GENÉTICOS.
- ESTIMACIÓN DE RIESGOS DURANTE EL EMBARAZO.

Autor: Josep Alfred Pera i Pelliçer

RADIOBIOLOGÍA

Es la ciencia que estudia los fenómenos que suceden cuando un tejido vivo ha absorbido la energía cedida por las radiaciones ionizantes. Estos fenómenos son las lesiones que se producen y los mecanismos que aporta el organismo en funcionamiento para compensar esas lesiones.

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes son el resultado del esfuerzo de los seres vivos por controlar la energía absorbida como consecuencia de su interacción con alguna radiación ionizante. La Radiobiología estudia la serie de sucesos que tienen lugar después de la absorción de energía, los mecanismos utilizados por los organismos para compensar los efectos de esta absorción de energía y las lesiones que la misma, puede producir en los individuos.



A la hora de interpretar los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes podemos emplear dos enfoques distintos. El primero consiste en estudiar las modificaciones -lesiones- producidas a nivel del organismo y una vez caracterizadas correlacionarlas con cambios a nivel molecular; con el segundo se procede de forma inversa, una vez estudiadas las modificaciones a nivel molecular se intenta predecir lo que ocurrirá a nivel de organismo completo. Estos dos enfoques representan opciones extremas y de escasa operatividad. Habiéndose impuesto como solución de compromiso el enfoque celular.

El nivel celular ofrece un punto de equilibrio entre ambos; por un lado puede ser considerado la base de la comprensión de los cambios a nivel de tejido, órgano y organismo y por otro, representa el primer nivel de organización biológica en el que los cambios dependen y pueden ser correlacionados con alteraciones inducidas a nivel molecular.

La Radiobiología se podría definir como el estudio de los fenómenos que suceden una vez que un tejido vivo ha absorbido la energía depositada por las radiaciones ionizantes, lesiones que se producen y mecanismos que tiene el organismo para compensar estas lesiones.

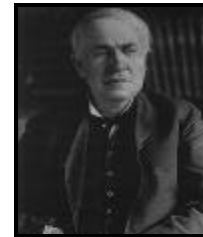
Introducción histórica

En 1.896 Henri Becquerel descubrió las propiedades perjudiciales de las radiactividad, tomando en

cuenta las quemaduras que le produjo un frasco que contenía radio.



Henri Becquerel



Thomas Alva Edison





Diferentes ilustraciones de la época. Demuestran la ligereza del uso de Rx y la poca o ninguna precaución.

Ese mismo año Clarence Madison Dally, se sometió a radiaciones que acabaron con su vida, era ayudante de Thomas Alva Edison, inventor del fluoroscopio.

Durante la exposición industrial realizada en 1.896 en Nueva York, Dally expuso, reiteradamente sus manos al experimento presentado por él, consistente en un equipo de rayos X, cuyo objetivo era observar las sombras en el esqueleto humano.

Poco tiempo después las manos se le ulceraron, siéndole posteriormente amputadas. El cáncer contraído le fue progresando en su organismo y en 1.904 acabó con su vida. Fue la primer víctima descrita por las radiaciones ionizantes.

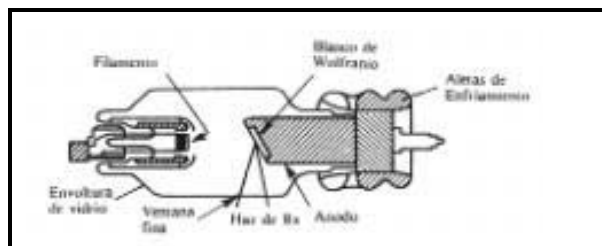
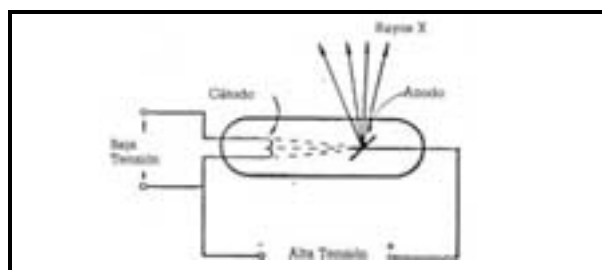
RADIACIONES IONIZANTES

Introducción.



El empleo de rayos X con fines diagnósticos y de los rayos X y los materiales radiactivos con fines terapéuticos, se extendió a los pocos años del descubrimiento de los rayos X por Röntgen en 1895 y de la radiactividad por Becquerel en 1896.

Se progresó en el empleo de la radiación, tanto en el campo diagnóstico como en el terapéutico, cuando en los años cuarenta, se hizo posible la producción artificial de forma radiactivas



de los elementos químicos comunes. Más recientemente los refinados métodos computarizados han permitido aumentar enormemente la precisión en la localización de los órganos, explorando la absorción de los rayos X o la emisión de la radiación de los radionucleidos incorporados por dichos órganos.

Al tiempo que se producía este notable avance en el uso médico de la radiación y se extendía su empleo en todo el mundo se ha ido reconociendo la importancia tanto para los pacientes como para el personal sanitario, de limitar la magnitud de la exposición al mínimo necesario para los fines clínicos de la prueba o el tratamiento. Cuando se comenzaron a utilizar radiaciones con fines clínicos se vio que las altas dosis originaban lesiones en los tejidos y podían inducir a la aparición de cáncer en las zonas irradiadas. Desde los años cuarenta se ha visto que incluso las dosis bajas pueden producir cáncer en los órganos irradiados, o defectos hereditarios -genéticos-, si se afectan las células germinales -de ovarios o testículos-.

No cabe duda de que los riesgos derivados de la mayoría de los métodos de diagnóstico y tratamiento radiológico son mínimos en comparación con los beneficios que aportan. Sin embargo, los riesgos de irradiación de algunos de los métodos utilizados en el pasado fueron importantes, como en el caso de un preparado de Torio -el Thorotrast- usado en las arteriografías, o el tratamiento de la espondilitis anquilosante severa con rayos X o inyecciones de radio. No obstante, en la actualidad, siguiendo las recomendaciones de la Comisión Internacional para la Protección Radiológica y de otros organismos nacionales e internacionales en cuanto a los requisitos de protección necesarios para el correcto empleo de las radiaciones



ionizantes en medicina, los efectos indeseables se han minimizado.

Radiaciones ionizantes.

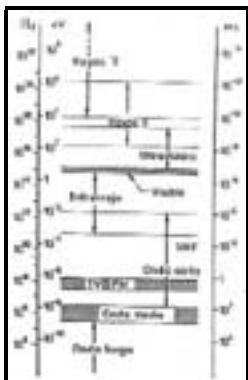
El término de radiaciones ionizantes se refiere a aquellas regiones del espectro electromagnético en que la energía de los fotones emitidos es suficiente para producir ionizaciones en los átomos de las moléculas absorbentes.

Capaces de interactuar con la materia aportándole calor y formando iones. La facultad de dar calor es lo que hace que puedan quemar, de la misma forma que lo hacen las radiaciones solares. La ionización degrada la materia. Este efecto en los seres vivos afecta especialmente a las células, ya que contienen en sus núcleos los códigos por los que se reproducen, manteniendo así el cuerpo humano. Las más sensibles por lo tanto son aquellas que se están reproduciendo con mayor frecuencia como las de: los fetos, pelo, uñas, reproducción sexual o tumores cancerosos.

Tipos de radiaciones ionizantes:

Los rayos X

Son radiaciones electromagnéticas (como la luz o las ondas de radio) de frecuencia muy alta y por tanto pequeña longitud de onda. Son lo suficientemente pequeñas como para poder atravesar huecos entre átomos y dentro de átomos, con lo que las usamos para ver el interior de los objetos que la luz no puede atravesar y hacer lo que llamamos radiografías.



Los producimos con lámparas. Con estas lámparas ocurre como con las bombillas, cuando están apagadas no emiten nada. Las lámparas de rayos X sólo se encienden en el momento de realizar una radiografía y se tienen encendidas durante cortos espacios de tiempo.

Las radiaciones a

Son núcleos de helio procedentes de la desintegración de un elemento radiactivo al que abandonan a gran velocidad. Para la escala a la que nos movemos cuando hablamos de radiactividad, estamos refiriéndonos a partículas de enorme tamaño. Su capacidad de penetración es prácticamente nula (no pueden atravesar ni una hoja de papel) y en el aire solo alcanzan unos pocos centímetros.

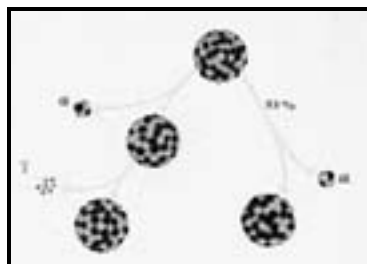
El peligro de una partícula a se encuentra en su

velocidad, que va perdiendo a medida que choca contra átomos de su alrededor. Cuando se para es un ion de helio -gas noble y uno de los componentes del aire- completamente inocuo por tanto. Es como un camión, que lanzado a gran velocidad es muy peligroso porque lleva mucha energía, que puede perder suavemente por fricción con el aire o repentinamente en un choque, pero una vez parado no representa un peligro.

Estas características las hacen adecuadas para algunas aplicaciones. Así las fuentes a se usan para aplicaciones como detectores de incendios o pararrayos radiactivos, ya que los blindajes son muy simples y aún estando al aire, no afectan a las personas aunque se encuentren próximas (a más de un palmo de distancia).

Esto no quiere decir que sean inocuas y revisten un peligro también derivado de sus características. Dada su enorme masa llevan una gran cantidad de energía y si llegan a tener contacto con tejidos vivos, causan mucho más daño que ningún otro tipo de radiación. Por otra parte, su falta de capacidad de penetración los hace indetectables por los aparatos de medida que normalmente usamos, ya que no pueden penetrar en dosímetros ni radiómetros, salvo que estén provistos de sondas específicas para estas radiaciones.

El peligro para nosotros con las fuentes a se encuentra en que una fuente pulverizada o diluida se nos quede adherida a la piel, nos la traguemos o la inhalamos.



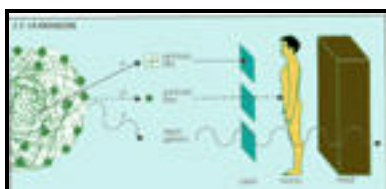
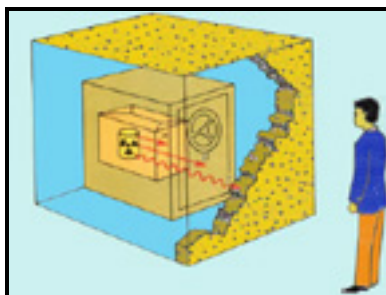
Este peligro fuera de las centrales nucleares o laboratorios nucleares es muy pequeño, ya que para el resto de aplicaciones las fuentes se encapsulan de forma que resistan -casi- cualquier tipo de agresión.

Las radiaciones b

Son electrones de alta energía. Al igual que las radiaciones a, son producidas por la desintegración de un elemento radiactivo del que salen a gran velocidad. Como en el caso anterior, la partícula sin velocidad no representa un peligro.

La masa de un electrón es unas 7.200 veces más pequeña que la de un átomo de helio, por lo que la energía de una radiación b es mucho menor que la de una a y su capacidad de penetración mucho mayor, sin llegar a ser excesivamente grande; unos metros en el mejor de los casos. Una hoja de alu-

minio de unos milímetros es blindaje suficiente para pararla.



De forma paralela a las radiaciones a, su detección por los aparatos de medida habitualmente usados es difícil, salvo que se disponga de sondas adecuadas. Pero a diferencia de ellas sí es normal encontrar fuentes b no encapsuladas en hospitales,

donde se usan como elementos trazadores y en radioterapia, por lo que existe el peligro de contaminación radiactiva.

Las radiaciones g

Al contrario que las dos anteriores son ondas electromagnéticas. Su frecuencia es aún más alta que la de los rayos X y su capacidad de penetración es por tanto mayor.

Tienen aplicación en radioterapia, son las que producen las bombas de cobalto, los medidores de nivel, los aparatos de gammagrafía y en tratamientos de medicina nuclear. Salvo en este último caso las fuentes g suelen ser encapsuladas. La mera exposición a las radiaciones g no nos contamina. Las radiaciones a y b cuando interaccionan con la materia producen ciertas cantidades de radiación g, por lo que esta radiación la encontraremos en cualquier tipo de fuente.

Las radiaciones de neutrones

Las fuentes de neutrones son muy raras, se usan como iniciadoras de reacciones nucleares y para crear fuentes radiactivas. Normalmente sólo se encuentran en centrales o laboratorios nucleares.

Las fuentes radiactivas

Hay elementos que son inestables y sus átomos tienden a buscar una mayor estabilidad emitiendo partículas de materia o energía que les sobra, transformándose en otros elementos más estables. Así, un átomo de uranio en la naturaleza sufrirá una serie de transformaciones espontáneas que implicarán emisión de radiaciones y lo acabarán transformando en un átomo de plomo que es estable. A los materiales formados por o con estos elementos les llamamos fuentes radiactivas.

Periodo de semidesintegración

La actividad de las fuentes decae con el tiempo y para medir ese decaimiento se ha inventado el concepto de período de semidesintegración, que es período de tiempo en el que la mitad de los átomos de una fuente se han desintegrado o transmutado.

Esto quiere decir que la actividad de una fuente cuyo período de semidesintegración sea de 1.000 años es para nosotros constante y en cambio una que tenga un período de semidesintegración de 1 segundo y contenga una tonelada de elemento radiactivo en un momento dado, sólo contendrá una millonésima de gramo un minuto más tarde.

Fuentes encapsuladas

Para evitar el peligro de contaminación las fuentes cuya disgregación no sea interesante para su uso se encapsulan. Una forma de encapsular es por ejemplo: sinterizar con cobre. Este procedimiento consiste en prensar en caliente la fuente con partículas de cobre, hasta que formen una masa compacta.

Fuentes no encapsuladas

En las de este tipo la fuente no va protegida, siendo muy común que se presente en forma de disolución. Esta forma es útil por ejemplo para inyectar la fuente en el cuerpo.

Irradiación

Es la exposición de una persona a las radiaciones ionizantes. Sus efectos son proporcionales a la cantidad de energía procedente de la radiación que haya absorbido el cuerpo. Una persona o un objeto por estar irradiados no causan daño a quienes mantengan contacto con ellos.

Contaminación

Una persona u objeto se encuentran contaminados cuando es la propia fuente radiactiva la que entra en contacto con ellos. Esta persona u objeto sí pueden causar daños y contaminar a su vez a quien entre en contacto con ellos. En el caso de las personas la contaminación puede ser:

Externa: Cuando la fuente se ha depositado en la piel, en cuyo caso la descontaminación consistirá en un energético lavado.

Interna: Cuando la fuente ha penetrado en el interior del cuerpo por ingestión o inhalación, en cuyo caso el tratamiento curativo es difícil y poco eficaz. La forma de protegernos contra la contaminación

está en el uso de equipos de respiración autónomos y trajes de protección química, debiendo tener las mismas precauciones que si nos encontramos ante un producto tóxico.

Las dosis

La radiactividad no se puede ver, tocar, ni oler y es capaz de causar daños incluso a través de las paredes, esto hace que nos produzca el temor de lo desconocido. Pero la radiactividad hemos de admitir que forma parte de la vida cotidiana por existir en la naturaleza y como producto de la actividad humana. Sobre la incidencia en el hombre de las radiaciones ionizantes hay diversos estudios, extraído de ellos la siguiente tabla:

Dosis en mSv	Efectos, límites y exposiciones
10.000	Muerte rápida
3.500	50% de mortalidad en 5 meses
3.000	Afecciones en la piel, caída de pelo
1.000	Primeras molestias, nauseas, vómitos
250	Dosis máxima establecida en el Plan Básico de Emergencia Nuclear para evacuación de población. Dosis admisible para personal que trabaje en la emergencia
100	Dosis admitida en varios países europeos como máxima para bomberos en intervención.
50	Dosis máxima anual para los trabajadores. Fue la dosis recibida en un radio de 30 Km. de Chernobyl
10	Radiografía del riñón
5	Límite de dosis anual para el público en general
2	Irradiación natural media
1	Irradiación médica media

Diariamente el hombre se ve rodeado de radiaciones ionizantes que provienen de la naturaleza, éstas se conocen como radiación natural de fondo. Estas radiaciones existen desde el comienzo de los tiempos y nuestros organismos están acostumbrados a su presencia.

Las radiaciones naturales se dividen en radiaciones externas e internas al cuerpo. Dentro de las radiaciones externas tenemos dos componentes dependiendo de su origen:

- las radiaciones cósmicas

- las radiaciones terrestres

Respecto a las radiaciones internas, éstas se agrupan según su modo de entrada a nuestro organismo, ya sea por procesos de inhalación o por ingestión. Un promedio mundial de la dosis efectiva debido a la radiación natural es de 2.4 mSv/año. Al hablar de las radiaciones ionizantes, generalmente los efectos nocivos asociados a ellas cobran mucha importancia.

Radiación natural

Cuando hablamos de las radiaciones ionizantes pensamos en que éstas son nocivas a nuestro organismo y que fueron creadas por el hombre. Esta es una idea errónea que una gran parte de la población maneja debido a la falta de información clara y concisa. Debemos conocer que todo en la tierra es radiactivo, esto es, emite radiaciones en la forma de partículas alfa y beta o en forma de radiación electromagnética que llamamos radiación gamma.

Constantemente somos bombardeados por radiación que proviene del espacio exterior, lo que nos rodea contiene materiales radiactivos y aun dentro de nuestro cuerpo tenemos medio millón de desintegraciones por minuto que bombardean las células de nuestro organismo.

La radiación natural de fondo ha estado con nosotros desde el comienzo de los tiempos y hemos aprendido a convivir con ella. El hombre fue capaz de producir por primera vez artificialmente radiaciones ionizantes con el descubrimiento de los rayos X por el científico alemán Wilhem Conrad Röntgen en 1895. Las radiaciones ionizantes artificiales y naturales han encontrado grandes aplicaciones en nuestra vida diaria, pues ellas se utilizan en la industria, la medicina y la investigación.

Pero aún así, son las radiaciones naturales las que contribuyen en mayor porcentaje a la dosis global que recibe la población. La cantidad de la radiación natural que recibimos depende de muchos factores: el lugar de residencia, la composición del suelo, los materiales de construcción que nos rodean, la estación del año, la latitud y hasta las condiciones del tiempo. Por ejemplo, la lluvia, nieve, presión alta o baja y dirección del viento afectan los niveles de radiación natural a que nos vemos expuestos.

En el estudio de las radiaciones naturales, éstas se dividen en fuentes externas al cuerpo humano y fuentes internas al cuerpo.

Estudiemos a cada una por separado.

Fuentes externas al cuerpo:

dentro de esta categoría tenemos a las fuentes radiactivas de origen cósmico y de origen terrestre. La tierra es continuamente bombardeada por partículas de alta energía que se originan en el espacio exterior. Estos rayos cósmicos interactúan con los núcleos de los elementos que se encuentran en la atmósfera produciendo una cascada de interacciones y productos secundarios de estas reacciones. Las interacciones de los rayos cósmicos producen núcleos radiactivos que se conocen como radionucleidos cosmogénicos. Los radionucleidos cosmogénicos contribuyen en un porcentaje pequeño del total de la radiación natural. Los más importantes son: el tritio-3 cuyo período físico es de 12.3 años, el berilio con un período físico de 53.6 años, el carbono-14 con un período físico de 5730 años y el sodio-22 con un período de 2.6 años.

La radiación cósmica varía considerablemente con la altura debido a que la atmósfera actúa como una barrera protectora y a la latitud. Por lo tanto, a mayor altura recibimos una mayor dosis. Las dosis que resulta del componente cósmico podría aumentar ligeramente, si por ejemplo somos viajeros frecuentes en vuelos comerciales, o formamos parte de la tripulación de compañías aéreas. El componente ionizante de las radiaciones cósmicas, produce en promedio una dosis efectiva de 32 mSv/año a nivel del mar en altitudes medias.

Los radionucleidos naturales de origen terrestre, a los cuales también se le conoce como radionucleidos primordiales, están presentes en nuestro medio ambiente. Sólo aquellos radionucleidos con períodos físicos comparables con la edad de la tierra y sus descendientes existen en cantidades significativas en nuestros suelos hoy en día.

El componente terrestre de las radiaciones naturales se debe a la presencia de las cadenas radiactivas del uranio y del torio que se encuentran en los materiales de la corteza terrestre.

Tanto el uranio como el torio dan lugar a una serie de hijas radiactivas que van decayendo con el tiempo y que al hacerlo emiten radiaciones ionizantes para lograr llegar a una estabilidad nuclear en el plomo (que no es radiactivo). La localización es un factor importante en la cantidad de dosis que recibimos del componente terrestre. Los suelos arenosos presentan menos radiación que los sedimentarios, y éstos a su vez menos que los que contienen granito.

Fuentes internas al cuerpo:

Dentro de esta categoría tenemos a las fuentes radiactivas que ingresan a nuestro cuerpo por vía

de la ingestión y de la inhalación.

Los alimentos que ingerimos contienen materiales radiactivos. Los dos radionucleidos que ingerimos de más importancia son el potasio-40 y el radio-226. La principal fuente de potasio-40 se obtiene de los bananos y la leche que consumimos. Este radionucleido también se ha estudiado en los filetes de atún. Aunque quisiéramos disminuir el nivel de potasio en nuestros cuerpos hemos de recordar que el potasio se encuentra en equilibrio homeostático y que éste es esencial para el buen funcionamiento de nuestro cuerpo.

El radio-226 presente en los alimentos no es esencial para nuestro cuerpo y su incorporación dependerá de lo que comamos. La principal contribución a nuestra dieta del radio la encontramos en el agua que bebemos de pozos. Ciertos lugares de Estados Unidos (Illinois y Nueva Inglaterra) tienen pozos de agua con elevadas concentraciones de radio.

Los niveles de radiactividad se contemplan con los requerimientos de la OMS.²⁹

La mayor fuente de exposición de la radiación debido a la inhalación de fuentes de radiación natural se debe al radón y a sus descendientes. El radón es un gas radiactivo inoloro, incoloro y químicamente no-reactivo, es un producto de las cadenas de desintegración tanto del uranio y del torio. De la dosis anual total que recibimos debido a fuentes naturales, el radón es el principal contribuyente. La dosis promedio anual a la región del epitelio bronquial es de aproximadamente 25 mSv. Por ser un gas, se difunde rápidamente desde su lugar de origen. La concentración de radón que encontremos dependerá de la porosidad del suelo, la concentración local de radio-226, la temperatura y la presión atmosférica. Su concentración al aire libre es baja, pero llega a acumularse en lugares cerrados. Es por esto último, que las altas concentraciones de radón en recintos habitacionales encontrados alrededor del mundo han llevado a crear programas nacionales de monitoreo y a autoridades internacionales a pronunciarse sobre los niveles máximos permitidos y sus posibles efectos sobre la salud.

Productos de consumo que contienen radiación

Durante las últimas décadas se ha aumentado tremendamente la cantidad de productos comerciales al público. Muchos de ellos contienen materiales innovadores, cuyas propiedades son desconocidas por los consumidores. Un ejemplo, son aquellos que emiten radiaciones ionizantes. Generalmente desconocemos de la gran cantidad de productos de consumo que utilizamos diariamente que contiene materiales radiactivos.

Estos los podríamos agrupar dependiendo del lugar en donde los usemos, por ejemplo, en el hogar, trabajo, productos de uso personal y en el medio ambiente. Dentro de nuestros hogares, recordemos que los materiales de construcción de nuestras casas y edificios tienen elementos radiactivos, estos pertenecen a las cadenas de uranio y torio. Los sistemas de calefacción y cocinas que trabajan con gas natural liberan al ambiente el gas radón y sus descendientes.

Algunos vidrios con los que se fabricaban anteojos o productos ópticos contenían uranio y torio, sin embargo desde 1975 existe normativa para reducir la cantidad de radiactividad en ellos. En el pasado, los fabricantes ponían sales de uranio a los dientes postizos para darles un color natural y un brillo similar a los verdaderos. Algunas joyas tipo "cloisonné" contenían uranio para dar un brillo especial. Las linternas de gas que se utilizan para acampar contienen óxido de torio.

En la industria se utilizan en gran manera los medidores de grosor que contienen material radiactivo, éstos se utilizan en los procedimientos rutinarios de control de calidad. Existen soldaduras con puntas de tungsteno que tienen un arranque más fácil y contaminan menos el metal. Los monitores portátiles de radiación, generalmente contienen una fuente radiactiva (Sr-90, Kr-85 ó U-238) muy pequeña para comprobar el correcto funcionamiento del instrumento.

En los centros de investigación, los microscopios electrónicos entregan dosis muy pequeñas a un número reducido de la población. Respecto al punto de vista del medio ambiente, el uso tan grande de fertilizantes órgano-fosforados aumenta las dosis pues el fósforo en su forma natural viene acompañado de uranio y torio. En los procesos de obtención de energía eléctrica por medio de la combustión de hidrocarburos (carbón, aceite o gas) se liberan al medio ambiente materiales radiactivos.

La inspección de equipaje aéreo por medio de máquinas fluoroscópicas de rayos X es cada vez más utilizada, la cantidad de radiación que recibe el pasajero es casi nula (alrededor de 1% de la radiación recibida en un vuelo transcontinental). Los radiofármacos que se utilizan en medicina nuclear, deben ser transportados por vía aérea, esto debido a sus periodos de vida tan cortos, exponiendo a los pasajeros, tripulantes y al personal de los aeropuertos. Es importante recalcar, que de todos los productos de consumo humano, el que produce mayor dosis de radiación es el tabaco, debido a la radiación entregada por los radionucleidos plomo-210 y polonio-210 en el epitelio bronquial. Es

importante recalcar que del total de la dosis que recibe el hombre, los productos de consumo solo representan un 3% del total.

Radiaciones de bajo nivel y nuestra salud

En 1990, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP),⁴⁴ saca a la luz pública su publicación N°. 60 en donde afirma el carácter estocástico o sea probabilístico de las radiaciones, adoptando el modelo lineal sin umbral para los efectos biológicos de las radiaciones. En palabras más sencillas, esto quiere decir, que una cantidad muy pequeña de radiación tiene un riesgo muy pequeño de producir un efecto nocivo, por ejemplo un cáncer. Este modelo es el que ha sido adoptado mundialmente por todos los órganos reguladores en materia de protección radiológica. Es un modelo muy conservador y costoso, el cual tiende a sobre proteger a los trabajadores que utilizan radiaciones ionizantes. Sin embargo, recientemente han surgido estudios científicos que demuestran cómo las bajas dosis de radiación tienen efectos beneficiosos para la salud. Este fenómeno se llama hormesis por radiación. La hormesis es el beneficio en la salud debido a cantidades pequeñas de sustancias tóxicas. Los principales estudios son:

Los sobrevivientes japoneses de la bomba-A (aún de los 400 casos de muerte por cáncer inducido) están viviendo más tiempo en promedio que poblaciones controles.

El Estudio de los Trabajadores de Barcos Nucleares muestra que 29000 trabajadores de barcos nucleares con dosis acumulada más altas, están en mejores condiciones de salud que 33000 trabajadores (para los mismos trabajos y rangos de edades) de barcos no nucleares. Se encontró un 24% menos de tasa de muerte para todos los cánceres comparados con los controles.

La población que vive en los 7 estados de Estados Unidos de América donde se encuentran los más altos niveles de radiación natural de fondo tienen cerca de 15% menos de muertes por cáncer que el promedio de EUA.

Los lugares que tienen altos niveles de radón (>5 pCi/l) en EUA tienen un 40% menos de mortalidad por cáncer de pulmón que los estados con niveles bajos de radón (<0.5 pCi/l).⁴⁹

Los estudios antes mencionados, han tenido muy poca difusión entre el público en general y el mundo sigue viviendo una fobia innecesaria a la radiación. Además las magnitudes y unidades utilizadas en el área de la protección radiológica, por ejemplo Gray (Gy), Sievert (Sv), Becquerelio (Bq) y

otros son muy complicadas para las personas que no son especialistas en el tema. Es por esto, que recientemente se está introduciendo el concepto del BERT para explicar al público los niveles de radiación a que nos vemos expuestos.

La idea detrás del concepto del BERT es convertir la dosis efectiva debido a una exposición en un tiempo dado (días, semanas, meses o años) para obtener la misma dosis efectiva debido a la radiación natural de fondo. Se acuerda tomar como dato de referencia una dosis efectiva de radiación natural de 3 mSv/año, aunque esta varíe un poco de país a país. El BERT presenta las siguientes ventajas:

- no implica ningún riesgo, es solo una comparación
- enfatisa el hecho que la radiación es natural
- la respuesta es entendible por el público

Utilizando este concepto es muy sencillo explicarle a un paciente del Departamento de Rayos X cuál es la dosis que recibe al practicarse un examen en particular. Por ejemplo, si a una señora le realizan una mamografía y pregunta ¿cuál es la dosis que recibió? le contestarán: "la mamografía probablemente le dará una dosis efectiva de cerca de 1 mSv." Mientras que con ayuda del BERT le responderán "la dosis que recibió equivale a 4 meses de radiación natural".

¿Cómo son establecidos los límites de dosis de radiación?

Generalmente los límites básicos de dosis son fijados a nivel nacional siguiendo las recomendaciones de la "Comisión Internacional de Protección Radiológica" (ICRP). Esta a su vez justifica sus propias recomendaciones considerando los informes exhaustivos que publican periódicamente el "Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas" (UNSCEAR) y organizaciones nacionales como el "Comité sobre los Efectos Biológicos de las Radiaciones Ionizantes" (BEIR) de la Academia Nacional de Ciencias (NAS) de USA, así como también numerosos trabajos de los investigadores más reconocidos internacionalmente.

La intención de la ICRP es establecer un nivel de dosis sobre el cual las consecuencias para el individuo pueden ser vistas como claramente inaceptables. Para este propósito considera la dosis que podría recibir durante toda la vida laboral en forma moderadamente uniforme, o una dosis anual recibida continuamente durante 47 años (de 18 a 65 años). Las consecuencias de la exposición que

evalúan son: la probabilidad de muerte por cáncer radioinducido, la morbilidad por cáncer no fatal y efectos hereditarios, y la pérdida media de la expectativa de vida a los 18 años. La ICRP estima que para una dosis menor de 1 Sv recibida en toda la vida laboral (o 20 mSv cada año de trabajo), dichas consecuencias son tolerables y el nivel de riesgo es similar al de ocupaciones normalmente reconocidas como seguras. Los valores calculados de las principales consecuencias de esa dosis son: para la reducción de la expectativa de vida, 0.5 años y para la probabilidad de muerte atribuible a la exposición, 3.6 %. Aunque se considera que la Protección Radiológica debe ser tal que dichos valores no deberían ser alcanzados salvo raras excepciones.



RAYOS X

Aplicaciones de los rayos X

La aplicación diagnóstica más sencilla de los rayos X es delimitar los huesos, dientes y otras estructuras calcificadas, por contraste con los tejidos blandos circundantes que no poseen alto contenido de calcio y, por tanto, no absorben los rayos X con la misma intensidad; en detectar la localización de estructuras metálicas u otros fragmentos; o en delimitar órganos como el corazón, por contraste con los pulmones llenos de aire que lo circundan. También se pueden obtener contrastes entre la densidad de distintos órganos (por ejemplo en el interior del abdomen) o a partir de la distribución del gas presente en el tracto intestinal y dentro de

órganos como los pulmones.

Además, se obtiene información importante al delinear órganos mediante la administración de sustancias que rellenan el órgano en cuestión o se concentran en él y que, como el calcio, son relativamente opacas a los rayos X. Dichas sustancias incluyen las sales de bario, que atraviesan el estómago y el intestino sin ser absorbidas; los compuestos yodados, selectivamente concentrados y secretados por la vesícula biliar o los riñones, destacando así los conductos biliares y las vías urinarias; y sustancias que pueden inyectarse al líquido cefalorraquídeo.

El desarrollo de métodos de tomografía axial computarizada (TAC) han aumentado mucho la precisión en la localización por rayos X de las estructuras corporales. En esta técnica, se hace pasar un fino haz de rayos X a través del organismo, en multitud de direcciones diferentes y de forma sucesiva, en planos sagitales separados.

Las estructuras corporales situadas a una determinada distancia sólo interrumpirán, y absorberán radiación, del alguno de los haces de rayos X que atraviesan el cuerpo a dicha sustancia axial. De esta forma pueden calcularse la localización de las estructuras con diferentes absorciones de rayos X a partir de las cantidades relativas de absorción de los haces de rayos X que atraviesan el cuerpo en distintas direcciones.

CONCEPTOS BÁSICOS DE BIOLOGÍA CELULAR

Todos los seres vivos están constituidos por células, definidos como pequeños compartimentos rodeados por membranas y en cuyo interior contienen una solución acuosa de productos químicos. Las formas más simples de vida son células individuales que se dividen en dos para su propagación. Mientras que los organismos superiores son comunidades celulares donde las células se dividen en grupos para realizar funciones más o menos especializadas y se relacionan entre sí por complicados sistemas de comunicación.

Evolución celular

Todos los organismos y todas las células que los constituyen derivan de un antecesor celular común por evolución. La evolución implica dos procesos esenciales:

- La variación al azar de la información genética transferida de unos individuos a sus descendientes.

La selección de aquella información genética que posibilita a su poseedor una mayor probabilidad de conseguir descendencia.

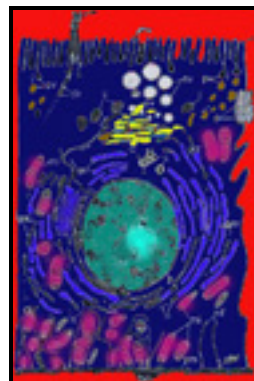
Hace aproximadamente 3500 millones de años que apareció la primera célula en la tierra y ello debió de ocurrir a través de un proceso de agregación espontánea de moléculas. El criterio actual sobre las etapas que debieron de cubrirse fueron:

- La formación de polímeros de ácido ribonucleico (RNA) capaces de replicarse mediante apareamiento de bases complementarias.

- La aparición de mecanismos por los cuales una molécula de ARN diese directamente una proteína

- La formación de una membrana lipídica que encerrase esta mezcla autorreplicante de moléculas de ARN y proteínas. Más tarde ácido desoxirribonucleico (ADN) sustituiría al ARN como material genético.

Uno de los principales pasos evolutivos lo constituye la transición, acaecida hace aproximadamente



1500 millones de años, desde células pequeñas, con una estructura relativamente simple "procariotes" las cuales incluyen varios tipos de bacterias, a la célula eucariótica de mayor tamaño y muchísimo más compleja.

La célula eucariótica

Las células eucarióticas contienen por definición, núcleo, en el cual se encuentra la mayor parte de ADN celular, encerrado por una membrana de doble capa, la membrana nuclear. El resto del contenido celular, el citoplasma, en donde tiene lugar la mayoría de las reacciones metabólicas. En este último compartimento es posible distinguir distintos orgánulos, cada uno de ellos encerrados en su propia membrana, que realizan funciones perfectamente definidas. Las mitocondrias presentes en todas las células eucarióticas son responsables de la función respiratoria celular, y muestran muchas características comunes a los organismos procarió-

tos: tienen una forma que recuerda a la de las bacterias, presentan capacidad de auto propagación con independencia de la célula en la que se encuentran, tienen ADN propio y ribosomas similares a los de las bacterias y diferentes a los de la célula eucariótica.

Los cloroplastos sólo se encuentran en aquellas células eucarióticas capaces de llevar a cabo la función fotosintética, es decir, en células vegetales. Actúan de la misma manera que las cianobacterias (procariontes) absorbiendo energía luminosa por medio de la clorofila.

Las membranas además de rodear al núcleo, a las mitocondrias y a los cloroplastos forman también un intrincado laberinto, el retículo endoplásmico, donde se sintetizan los lípidos y las proteínas de las membranas junto con los productos a exportar fuera de la célula.

Los lisosomas, rodeados también por membranas, almacenan las enzimas requeridas en los procesos de digestión intracelular. Las membranas juegan también un importante papel en el proceso de entrada o salida de sustancias. Mediante la endocitosis, donde porciones de membrana se invaginan atrapando material extracelular, lo incorporan como vesícula al citoplasma y mediante la exocitosis realizan el proceso inverso. Ambos procesos son únicos para las células eucarióticas.

Todas las células eucarióticas poseen un esqueleto interno -el cito esqueleto- el cual contribuye a darlas forma, facilitando su movimiento y la distribución y transporte de los orgánulos. Está compuesto por filamentos proteicos, siendo dos de los más importantes los filamentos de actina y los microtúbulos. Ambos son imprescindibles para los movimientos internos de la célula. Los microtúbulos constituyen el huso mitótico esencial para el reparto del material genético en la mitosis. Los filamentos de actina participan, por ejemplo, en la contracción muscular.

Composición química de la célula

Una célula viva está compuesta fundamentalmente por 6 elementos (C,H,N,O,P,S) que representan aproximadamente el 99% de su peso. La molécula más abundante, el agua, supone aproximadamente el 70%, por lo que la mayoría de las reacciones intracelulares ocurren en solución acuosa.

Los organismos vivos están fabricados a partir de un reducido número de pequeñas moléculas, basadas en el carbono y esencialmente las mismas para los diferentes tipos de organismos. Las principales son: azúcares, ácidos grasos, aminoácidos y nucleótidos. Los azúcares son la fuente primaria de

energía química para la célula y se integran en polisacáridos para su almacenamiento. Los ácidos grasos aunque también son importantes como reservorio de energía, intervienen fundamentalmente en la formación de membranas. Los aminoácidos se polimerizan en proteínas, moléculas que suponen la más diversa y versátil macromolécula conocida. Los nucleótidos juegan un importante papel en la transferencia de energía, pero su principal misión consiste en ser las subunidades de las macromoléculas de la información (ADN y ARN).

Reacciones celulares

Las células vivas están altamente ordenadas y deben de mantener y crear este orden a lo largo de su existencia. Esto es termodinámicamente posible gracias a la entrada continua de energía procedente de la radiación electromagnética del sol. Los animales obtienen esta energía por oxidación de moléculas orgánicas en una serie de reacciones, catalizadas por enzimas, acopladas para formar ATP. La molécula de adenosin trifosfato (ATP) es la forma comúnmente utilizada en todas las células para portar energía y su hidrólisis se acopla a otras reacciones para contribuir, a través de un proceso energéticamente desfavorable, a crear orden.

Las células animales consiguen energía de los nutrientes como las proteínas, los polisacáridos y los ácidos grasos rompiéndolos en pequeñas moléculas dentro de la célula produciendo moléculas de acetil CoA y una limitada cantidad de ATP y NADH. Estas etapas proporcionan energía en ausencia de oxígeno. La acetil CoA se degrada en las mitocondrias dando CO₂ y protones. Los electrones de los protones pasan a través de una completa cadena de transporte cuya finalidad es la reducción del oxígeno molecular del agua. Los protones (H⁺) son transportados fuera de la mitocondria. El gradiente de protones creado a través de la membrana interna está fuertemente dirigido a la síntesis de ATP.

La hidrólisis de ATP se encuentra acoplada a reacciones desfavorables energéticamente, tales como la síntesis de macromoléculas, normalmente a través de intermedios reactivos fosforilados. Otras moléculas reactivas de transporte, llamadas coenzimas transfieren otros grupos químicos en el curso de la biosíntesis.

Los muchos miles de reacciones químicas de distintas clases que se llevan a cabo simultáneamente en la célula están estrechamente correlacionadas. Una gran variedad de mecanismos de control regulan la actividad de las mismas, en respuesta a cambios en las células. Un mecanismo muy común es la inhibición reversible por retroalimentación sobre la primera enzima de una ruta metabólica, ejercida por el producto final de la misma.

Información genética

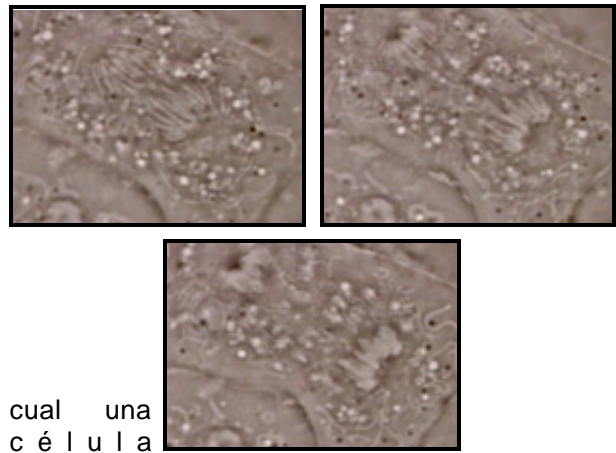
La información genética está contenida en la secuencia de nucleótidos del ADN. Cada molécula de ADN contiene dos cadenas de nucleótidos complementarias que permanecen unidas por puentes de hidrógeno entre los pares de bases guanina-citocina (G-C) y adenina-timina (A-T).

La replicación del ADN, donde se duplica la información genética, se lleva a cabo por la polimerización de una nueva cadena complementaria de cada una de las dos viejas.

La expresión de la información genética implica la traducción de una lineal de nucleótidos de ADN, a una secuencia colineal de aminoácidos en las proteínas. Un segmento específico del ADN es copiado inicialmente en una cadena complementaria de un ARN, la cual es entonces traducida a proteínas de los ribosomas. Los aminoácidos utilizados para la síntesis de proteínas son llevados por pequeñas moléculas de ARN, los ARN-t, cada una de las cuales reconoce por complementariedad en el apareamiento de bases un grupo de tres nucleótidos de ARN-m. La secuencia de nucleótidos del ARN-m es traducida desde el principio hasta el final en grupos de tres bases de acuerdo con el código genético.

División celular

El crecimiento y desarrollo de un organismo pluricelular depende de la proliferación coordinada de sus células. Este proceso de multiplicación por el



cual una célula forma dos o

más células, se conoce como división celular. La división celular lleva consigo dos procesos:

- citocinesis o división de la entidad celular completa.
- cariocinesis o división exclusiva del núcleo.

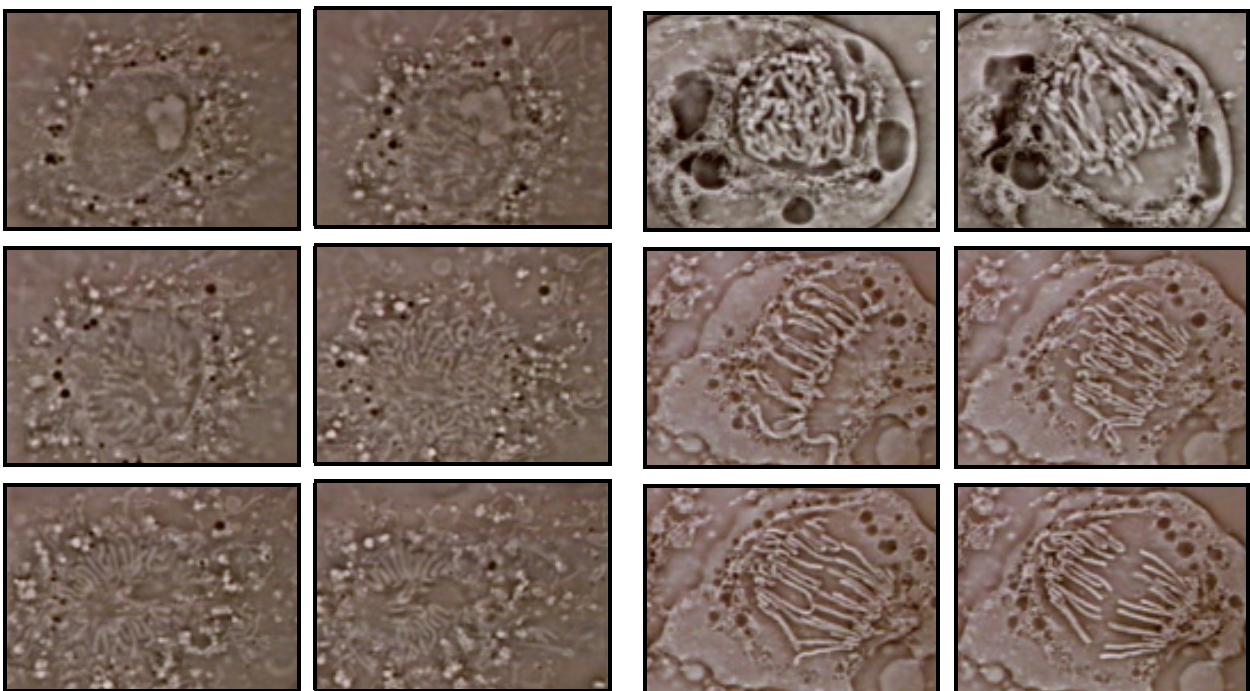
La cariocinesis implica un reparto del material genético, atendiendo a como se realiza podemos señalar dos tipos:

Mitosis

división de los cromosomas en dos fracciones idénticas y cuya finalidad es simplemente la proliferación

Meiosis

Exclusiva de organismos pluricelulares -donde existe la reproducción por fusión de dos gametos- donde los cromosomas denominados homólogos se juntan para separarse enteros, uno a cada polo.



Todas las células antes de dividirse pasan a través de una fase de duplicación del ADN por la que se producen dos moléculas idénticas a la original. Inicialmente, la molécula de ADN se separa deshaciendo su configuración de doble hélice de tal forma que nuevas bases complementarias se emparejan a cada una de las cadenas sencillas. Este proceso continúa gradualmente a lo largo de cada cadena hasta que se sintetizan dos cadenas completamente nuevas de ADN, complementarias de las originales. El proceso vital de la célula es cíclico y consta, además de la división celular (fase M) y de esta etapa de síntesis de ADN (fase S), de una fase G2 anterior a la división y de una fase G1 que precede a la de síntesis.

EPIDEMIOLOGÍA

Concepto

La epidemiología se ocupa de los estudios epidemiológicos en todas las fases evolutivas de la enfermedad, tanto en el momento epidémico como no epidémico. La utilidad de los métodos epidemiológicos ha llevado a extender su aplicación a enfermedades como el cáncer, las enfermedades cardiovasculares, los efectos de las radiaciones ionizantes, los accidentes, etc.

La estadística sanitaria permite estudiar aumentos relativos en la incidencia de una enfermedad. El registro constante de los datos sanitarios y la observación adecuada son fundamentales para el conocimiento de las enfermedades.

Para aplicar mejor el concepto de epidemiología, la definiremos como el estudio de la distribución de la salud y enfermedades en los grupos sociales -epidemiología descriptiva-, así como de los factores que determinan su aparición y difusión en la población -epidemiología analítica-.

Metodología Epidemiológica

El método epidemiológico puede ser cualquier método de estudio del hecho analizado, tanto cualitativo como cuantitativo. Sin embargo, hay cuatro tipos de estudios que son los más utilizados en epidemiología:

- Epidemiología descriptiva:

- Estudios descriptivos

- Epidemiología analítica

- Estudios retrospectivos o estudios caso-control

- Estudios prospectivos o estudios de cohortes

- Epidemiología experimental

- Estudios de intervención.

Epidemiología descriptiva

Se ocupa de estudiar la frecuencia y distribución del fenómeno analizado en la población estudiada. Es la primera etapa de la acción epidemiológica, una simple observación de la realidad que conduce a una serie de hipótesis, sobre las posibles causas del hecho estudiado.

Se deben observar una serie de condiciones:

- Usar siempre las mismas medidas de los fenómenos

- Comparar grupos de población homogéneos

Las variables analizadas en el estudio descriptivo van a ser todos los elementos que intervienen en el fenómeno epidemiológico, como son las respuestas a las preguntas siguientes:

- QUE (el hecho de describir)
- CUANTO (el número)
- QUIENES (personas afectadas)
- DONDE (lugar)
- CUANDO (tiempo)

Del estudio descriptivo de estos eslabones nacerá el COMO y el PORQUE, proporcionando datos para una posible hipótesis, que será analizada en la Epidemiología Analítica y demostrada en la Epidemiología Experimental.

DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO EPIDEMIOLÓGICO (QUE).

Se estudiarán todos los síntomas, signos y pruebas analíticas que nos ayuden en la descripción en sí del proceso.

DISTRIBUCIÓN NUMÉRICA (CUANTO).

Se compara entre frecuencias de diversos fenómenos o entre la frecuencia con que un determinado hecho se presenta en diversas poblaciones.

El conocimiento de que en un pueblo han fallecido un número determinado de personas en un año, es un dato real, que por sí sólo no nos da una idea clara del posible problema y sin un significado, sino es comparándolo con otra magnitud, que lógicamente será la población, obteniendo así los datos

relativos y apareciendo los términos de razones, tasas e índices. Así pues, si esos fallecimientos han ocurrido en una población de x habitantes, correspondería a un determinado porcentaje, que podrá resultar normal o anormal.

PERSONAS AFECTADAS (QUIENES)

Es muy importante estudiar las características de las personas sobre las que incide el fenómeno epidemiológico estudiado.

Las descripción de las personas puede realizarse en relación a diferentes atributos, en función del estudio que estemos realizando como: Edad, Sexo, Hábitos, Profesión, Lugar de trabajo, Conocimientos de prevención, etc.

DISTRIBUCIÓN DEL ESPACIO (DONDE)

Existe una diferencia entre la distribución de las dosis de irradiación según: los lugares de trabajo, las técnicas radiológicas, la formación en protección radiológica, los países, las regiones, etc.

DISTRIBUCIÓN EN EL TIEMPO (CUANDO)

Es conveniente el estudio de la distribución cronológica de los procesos: por decenios, quinquenios, años, meses, exposiciones puntuales, etc.

Epidemiología analítica

Se ocupa de analizar e interpretar los hechos observados según los datos aportados por la Epidemiología Descriptiva, con el fin de examinar las hipótesis sugeridas por ésta.

Los estudios de Epidemiología Analítica suponen siempre una hipótesis previa y comportan la elaboración de dos series de datos. Según el método utilizado se distinguen dos tipos de estudios analíticos: retrospectivos y prospectivos.

El objeto de estos estudios es comparar las características de un grupo de individuos afectados por el proceso a estudiar -grupo de estudio o casos-, con otro grupo compuesto por individuos de características análogas en edad, sexo, etc. Pero no afectados por proceso en cuestión -grupo control-.

Los estudios prospectivos consisten en escoger un grupo de personas expuestas a un factor y otros grupos testigos no expuestos, y buscar la frecuencia con que se llegan a afectar a través del tiempo, mediante una vigilancia de éstos grupos en estudio.

ESTUDIOS REKORD-LINKAGE O SIMNESIS.

Se trata de una variante del método prospectivo, pues como en éste caso toda la información de rutina disponible relativa a un individuo. Es ya clásico el estudio rekord-linkage acerca de los posibles efectos carcinogénicos de las radiaciones terapéuticas realizadas por BROWN y DOLL en 1.955. El grupo de individuos expuestos a la causa hipotética lo componían enfermos afectados de espondilitis anquilosante tratados mediante irradiación. Reuniendo información de modo diverso, sobre casos de leucemia y otras neoplasias registradas en miembros del grupo estudiado, pudo demostrarse que si la irradiación había sido intensa aumentaba el riesgo de aparición de cánceres en los puntos irradiados.

Epidemiología experimental

El estudio epidemiológico experimental es un procedimiento metodológico en el cual un grupo de individuos han sido divididos en forma aleatoria en grupo de estudio y grupo control o testigo, y analizados con respecto a algún factor de riesgo o alguna medida preventiva que se quiere estudiar o evaluar sus efectos.

ESTUDIOS EPIDEMIOLÓGICOS SOBRE LA EXPOSICIÓN A LAS RADIACIONES IONIZANTES.

Desde comienzos de siglo se sabe que las radiaciones ionizantes son capaces de inducir efectos patológicos cuando interaccionan con los organismos vivos. El estudio de la frecuencia y distribución de estos efectos en la población expuesta, la emisión y en su caso la confirmación de hipótesis acerca de su forma de actuación, la evaluación de las medidas de prevención puestas en marcha, etc. Si consideramos el momento en que aparecen los efectos, podemos hablar de efectos precoces y tardíos o diferidos. Los primeros se manifiestan en un corto período de tiempo y están ligados a altas dosis de radiación recibidas en un período de tiempo reducido. Los diferidos aparecen de forma insidiosa y se manifiestan después de largos períodos de tiempo (período de latencia o intervalo libre), e incluso puede que no se observen en el individuo irradiado, sino en sus generaciones sucesivas.

La determinación de los efectos diferidos inducidos por dosis bajas de radiación presentan diversas dificultades:

Necesidad de manejar grandes volúmenes de población expuesta para que los resultados estadísticos sean suficientemente fiables. Se ha estimado (REISSLAN y otros 1.976), que para el Reino Unido sería necesario un período de seguimiento de 34 años de toda la población profesionalmente expuesta a las radiaciones ionizantes para tener

una probabilidad del 50% de detectar el supuesto aumento de riesgo de leucemia debido a las radiaciones con una confianza del 80%.

A medida que las dosis son más pequeñas, es necesario un mayor número de personas.

En cualquier caso la interpretación de los resultados será problemática sobre los cánceres y anomalías genéticas pueden tener causas muy variadas que no son bien conocidas; esto implica un análisis multivariante o una considerable dificultad en seleccionar poblaciones testigo que se puedan considerar similares a la población de personal profesionalmente expuesto.

RADIOSENSIBILIDAD

Poco después del descubrimiento de Röntgen se observó que los rayos X parecían tener una eficacia selectiva para destruir células cancerosas sin afectar a los tejidos normales. De aquí nace el concepto de radiosensibilidad, basado en las características celulares específicas o inherentes a la célula y no a la radiación. Poco tiempo después se demostró la existencia de una relación entre la radiosensibilidad de una célula y su nivel de diferenciación. Entendiendo como célula diferenciada aquella que está especializada funcional y no morfológicamente, y como una célula no diferenciada aquella que tiene pocas características morfológicas y funcionales especializadas. La misión fundamental de este tipo de células indiferenciadas es dividirse proporcionando así células para mantener su propia población y para reemplazar a aquellas células diferenciadas que debido a la actividad del organismo se van perdiendo.

Se pueden elegir muchos criterios biológicos para comparar la radiosensibilidad de poblaciones celulares distintas, pero probablemente el criterio más ampliamente utilizado es el de muerte celular, entendiendo como tal la pérdida de capacidad de proliferación de la célula. Una célula puede mantener sus funciones vitales y su aspecto morfológico y, sin embargo, considerarse como célula muerta si ha perdido su capacidad de división.

Diremos que una célula es radiosensible cuando se manifiesten algunos de los fenómenos descritos anteriormente. Una célula será radiorresistente, cuando recibida la misma dosis que la anterior no sufre ninguno de esos trastornos.

En general, los microorganismos son más resistentes a las radiaciones ionizantes que los seres superiores. Por ejemplo, la dosis de reducción decimal (D10) para las endosporas de ciertas especies de Clostridium es de 2000-3000 Gy. Las células vege-

tativas de la bacteria *Deinococcus radiodurans* (observe el nombre específico) es de 2.200 Gy. Otras especies más normales poseen una dosis de reducción decimal en torno a 200-600 Gy. Compare estos datos con el valor de sólo 10 Gy como dosis letal para humanos.

Los efectos de las radiaciones ionizantes son letales, tanto directos como indirectos, así como mutagénicos. Los efectos letales directos se logran a altas dosis de radiación, mientras que los letales indirectos y mutagénicos se consiguen a menores dosis.

La radiosensibilidad de los distintos tejidos y sistemas

La radiosensibilidad se define como el grado de afectación celular provocado por la acción de las radiaciones ionizantes. Los tejidos biológicos tienen una radiosensibilidad muy diferenciada, que en general obedece a la ley básica que en 1.906 formularon los radiólogos franceses J. BERGONIE y L. TRIBONDEAU, tras amplios estudios, -irradiando testículos de roedores- extrapolaron sus resultados a la sensibilidad de todas las células del cuerpo que tengan características semejantes en función de la actividad mitótica y la diferenciación relativa a la sensibilidad a la radiación de las células del organismo. Dicha Ley puede expresarse en los siguientes términos:

- Una célula es más radiosensible cuanto mayor sea su actividad mitótica.
- Una célula es más radiosensible cuanto menos diferenciada sea.
- Una célula es más radiosensible cuanto más largo sea su período cariocinético, es decir, cuantas más divisiones deba cumplir para adoptar su forma y funciones definitivas.

La validez de esta ley es aceptable en general, ya que a pesar de excepciones notables, como el linfocito, sigue siendo una guía básica y útil para determinar la radiosensibilidad celular.

La radiosensibilidad depende de las características específicas de las células que los forman. Según la sensibilidad celular de las células que componen un determinado tejido u órgano es posible clasificarlos en función de su radiosensibilidad. Evidentemente, los órganos o tejidos que contengan células radiosensibles serán más sensibles a la radiación y recíprocamente serán radio resistentes los que contengan células radiorresistentes.

La sensibilidad de un tejido u órgano a la radiación depende de las células más sensibles que contenen-

ga, que generalmente estarán en el parénquima por lo que éste será el primero en resultar dañado. No obstante en los órganos radiorresistentes las células del estroma resultarán más sensibles a la radiación que las del parénquima. Por lo tanto, las células del estroma presentan cambios a dosis más bajas que las del parénquima, y las lesiones del estroma pueden afectar al funcionamiento del órgano y por tanto indirectamente a las células del parénquima. Es importante tener en cuenta que, incluso células maduras resistentes a la radiación, no son inmunes y pueden lesionarse directamente con dosis altas.

Radiosensibilidad de los distintos órganos de mayor a menor:

- Tejido linfóide, médula ósea y timo
- Ovarios
- Testículos
- Mucosas
- Glándulas salivares
- Folículo piloso
- Glándulas sudoríparas y sebáceas
- Epidermis
- Serosas y pulmón
- Riñón
- Otras glándulas viscerales abdominales (suprarrenales, hígado, páncreas)
- Tiroides
- Tejido muscular
- Tejido conjuntivo y vasos
- Tejido cartilaginoso
- Tejido óseo
- Células ganglionares simpáticas
- Nervios

Como una ampliación de las leyes de Bergonie y Tribondeau, Rubin Casaret, en 1.968 definieron **cinco categorías básicas de poblaciones celulares:**

VIM: células intermitóticas vegetativas

Se dividen muy rápidamente, indiferenciadas, de vida muy corta; según las leyes de B. y T. serían el grupo más sensible del organismo: células basales de la epidermis, de las criptas intestinales, espermatogonias, eritroblastos.

DIM: intermitóticas diferenciadas

Son activamente mitóticas; provienen de las VIM, pero están más diferenciadas. Serán por tanto menos sensibles que las VIM: espermatogonias intermedias de tipo B.

Células de tejido conjuntivo multipotenciales

Se dividen irregularmente y están más diferencia-

das que las VIM y DIM. En cuanto a su radiosensibilidad están en posición intermedia; células endoteliales de los vasos sanguíneos, fibroblastos del tejido conjuntivo.

RPM: células postmitóticas reversibles

Normalmente no entran en mitosis para conservar la capacidad de hacerlo en determinadas circunstancias.

FPM: células postmitóticas fijas

No se dividen; son altamente diferenciadas, tanto morfológica como funcionalmente. Son radiorresistentes y las hay de vida larga o corta: en algunas ocasiones pueden ser sustituidas por células diferenciadas DIM no se sustituyen.

Factores que afectan a la radiosensibilidad celular

La respuesta de las células a la radiación ionizante no es constante pudiendo verse afectada por diferentes factores. Unos la disminuyen (radioprotectores) mientras que otros la aumentan (radiosensibilizantes). Los distintos factores pueden agruparse en físicos, químicos y biológicos.

Factores físicos.- La calidad de la radiación y la tasa de dosis modifica la respuesta celular. La transferencia lineal de energía (LET) es el término que describe la tasa de pérdida de energía de los distintos tipos de radiación a medida que atraviesan la materia. La irradiación del mismo sistema biológico con radiaciones de distinto LET conducirá a distinto grado de respuesta biológica. La eficacia biológica relativa (RBE) es el parámetro que relaciona la respuesta biológica con el tipo de radiación empleado.

Factores químicos.- De entre los muchos radiosensibilizantes químicos conocidos, el que tiene un efecto más drástico y del que se ha demostrado que potencia de forma universal la respuesta a la radiación es el oxígeno. Este efecto es más pronunciado para rayos X y rayos gamma (radiación de bajo LET) mientras que no es tan efectivo para neutrones y partículas alfa (radiaciones de alto LET).

Como radioprotectores, los efectos químicos mejor conocidos son aquellos que contienen un grupo sulfhidrico (-SH), como la cisteína y la cisteamina.

Factores biológicos.- La fase de dicho ciclo celular en el que se encuentra la célula en el momento de la irradiación va a determinar el grado de respuesta a la misma. En general, se acepta que las fases más radiosensibles son G1 y M, que G2

muestra una radiosensibilidad intermedia y que S es la fase más radorresistente.

Como segundo factor biológico implicado en la respuesta celular a las radiaciones ionizantes, citaremos, la capacidad de la célula de reparar lesiones subletales. La existencia de esta reparación se demuestra mediante experiencias de fraccionamiento de dosis., donde una dosis única se divide en dos, separadas por intervalos de tiempo. El grado alcanzado en cada caso, dependerá del intervalo de tiempo transcurrido entre las dosis y de la anchura del hombro de la curva de supervivencia.

Tanto los factores físicos, como los químicos y biológicos modifican las curvas de supervivencia, aumentan la pendiente y disminuyendo el hombro (radiosensibilizantes) o disminuyendo la pendiente y aumentando el hombro (radioprotectores) de las curvas de supervivencia célula

RADIOGENÉTICA

La radiogenética se inicia en 1.927 con los trabajos de Muller, que demostró que las R.I. eran capaces de producir mutaciones en el genoma de la *Drosophila Melanogaster*, y que estas eran 150 veces más frecuentes que las que se presentaban espontáneamente. Por estas investigaciones recibió el premio Nobel. Algo más tarde, estudios realizados con grandes poblaciones de ratones y cobayas confirmaron este hecho. Las RI producen un aumento de la frecuencia de las mutaciones, sin que haya ningún tipo especial de mutación que pueda ser atribuida a ellas.

Las mutaciones inducidas por las RI pueden afectar tanto a las células somáticas como a las células germinales, siendo los efectos sobre estas últimas más importantes, puesto que producen alteraciones transmisibles a la descendencia. Una mutación es toda alteración de aparición instantánea, pero permisible e irreversible, en el material genético de un organismo cualquiera, y que determina un cambio brusco y permanente de uno o varios caracteres hereditarios.

Por razones desconocidas, los genes y el DNA que los forman cambian espontáneamente. Estas variaciones de la información hereditaria proporcionan una gran variabilidad genética a las poblaciones, constituyendo el proceso clave de la evolución a nivel molecular.

Mutación

Es una fragmentación cromosómica y por lo tanto

también denominada aberración cromosómica o alteración estructural.

Hay tres **tipos principales de mutaciones cromosómicas** que pueden ser inducidas por las radiaciones ionizantes:

- Mutación de tipo cromático.

En el cual se fracturan las dos cromátidas.

- Mutación de tipo cromátida.

En el cual se afecta solo una de ellas.

- Mutación de tipo subcromátida

En el cual se afecta la mitad de una cromátida.

Las mutaciones cromosómicas son mutaciones groseras, visibles al microscopio. Las **lesiones que generalmente se producen** son fracturas cromosómicas, traslocaciones, deleciones y otras alteraciones de los cromosomas. Podemos clasificar las lesiones en dos grupos fundamentales:

- Roturas simples

- De un brazo del cromosoma: La secuencia habitual es la reparación o restitución de la arquitectura normal, pero en ocasiones se produce la pérdida de un fragmento de cromosoma en el momento de la división celular lo que supone una alteración importante en la información transmitida a las células hijas.

- De un brazo de dos cromosomas: Como consecuencia pueden intercambiarse los fragmentos dando lugar a una traslocación, o producirse la pérdida de un fragmento en el momento de la división

- Roturas dobles

- De un brazo de un cromosoma: Dando lugar a la pérdida de un fragmento o a la inversión de dicho fragmento, alterándose el orden de las bases nitrogenadas del DNA

- De los dos brazos de un cromosoma: Dando lugar, bien a la inversión bien a la formación de un cromosoma en anillo y un fragmento acéntrico.

Aunque es difícil que una célula portadora de mutaciones cromosómicas pueda atravesar los procesos de división, y lo normal es que muera, las consecuencias de los procesos mutacionales pueden ser graves, especialmente si afectan a las células germinales, pues serán causa de una amplia gama de alteraciones y anomalías hereditarias en la descendencia.

Mutaciones puntiformes

Son aquellas no demostrables microscópicamente por no producir cambios lo suficientemente importantes en la estructura del cromosoma. Pueden resultar, sin embargo, más influyentes en las generaciones sucesivas, ya que la célula que contiene el cromosoma portador de una mutación de este tipo podrá dividirse normalmente, extendiéndose el defecto a las células hijas.

Las R.I. pueden inducir lesiones en el DNA como consecuencia de la ruptura de alguno de los puentes de hidrógeno entre las bases nitrogenadas complementarias o en los enlaces entre los nucleótidos que forman las cadenas.

Las lesiones inducidas pueden ser:

- Sustitución o pérdida de una base nitrogenada, lo que tiene como consecuencia el cambio de la información genética codificada por la secuencia de bases.
- Ruptura del puente de hidrógeno entre las dos cadenas complementarias en la molécula de DNA.
- Fractura sencilla o múltiple del esqueleto de una o de las dos cadenas de DNA.
- Unión cruzada entre una molécula de DNA o desde una molécula a otra.

Los cambios producidos de esta forma en el DNA constituyen mutaciones que pueden dar lugar a graves consecuencias si los mecanismos enzimáticos de reparación de los ácidos nucleicos (DNA-polimerasa, transcriptasa, etc.), son sobrepasados en su capacidad reparadora, ya que el DNA es el director de la actividad celular. Si se trata de células germinales, estas mutaciones tendrán consecuencias en las generaciones sucesivas.

De los estudios de Muller y otros se deducen una serie de **consecuencias** que podemos resumir en las siguientes.

- No existe ninguna dosis lo suficientemente pequeña para que no produzca mutaciones. Por ello, se dice que la producción de mutaciones es una respuesta sin umbral.
- Dosis aún mínimas se suman a lo largo del tiempo de fecundidad de un individuo
- No existe, todavía un medio eficaz para impedir el efecto mutágeno de la radiación.
- Las mutaciones, individualmente consideradas, no pueden anularse, sino que actúan de forma

ineludible sobre las generaciones venideras.

- Los efectos genéticos no se presentan necesariamente en la primera generación, sino que pueden aparecer en la segunda, tercera o posteriores.

Tipos de mutaciones

- Cromosomiales
- Espontáneas
- Radio-inducidas

M. Cromosomiales

- Fracturas de los cromosomas
- Alteraciones groseras (microscópicas)
- Hay una total "restitutio ad integrum"
- Significa la muerte en la mayoría de los casos

Características que definen a una mutación

- Las mutaciones genéticas se deben a un solo impacto
- La cantidad de mutaciones provocadas son directamente proporcionales a la dosis administrada.
- El porcentaje de mutaciones es independiente de la calidad de la radiación, exceptuando cuando se trata de una radiación muy ionizante.
- No se observa influencia del factor tiempo
- El proceso es independiente de la temperatura
- Aparecen en igual medida en células sexuales cualquiera que sea su estado evolutivo.

La mutación no produce una pérdida de sustancia en el gen sino solamente una transformación.

RESPUESTA SISTÉMICA A LA RADIACIÓN

Poco tiempo después del descubrimiento de los rayos X se observó un efecto aparentemente selectivo de la radiación sobre los tejidos. Partiendo de estas observaciones y después de amplios estudios de investigación, Bergonie y Tribondeau en 1906 formularon una ley según la cual se afirma que las radiaciones ionizantes resultan más efica-

ces sobre células que tienen una elevada actividad proliferativa y que no están diferenciadas.

En 1925 Ancel y Witemberger establecían que la susceptibilidad inherente de toda célula a los daños producidos por las radiaciones ionizantes es la misma, pero que el tiempo que tardan en aparecer las lesiones está influenciado por el stress biológico de la célula, **entendiendo por ello su necesidad de división.**

El criterio actual es el decir que la respuesta de un tejido u órgano a una dosis de radiación ionizante depende fundamentalmente de dos factores: **la sensibilidad inherente de las células, consideradas como un todo del que las células forman parte.**

La sensibilidad de las células que tienen una división activa se expresa en la forma de las curvas. Cuando lo que se determina en estas células es la pérdida de la capacidad para dividirse indefinidamente (muerte reproductiva), se observa que la radiosensibilidad de la mayor parte de las células de mamíferos es parecida, sin embargo, diferentes tejidos que contienen células con división activa responden de manera muy diferente a la radiación. Ello, es atribuido, muy principalmente, a las diferencias de la cinética de la población celular.

Los sistemas, tejidos y órganos presentan una radiosensibilidad que depende de las células que lo forman. Todos los sistemas, tejidos y órganos tiene células de parénquima y células de estroma. Habrá órganos con parénquima diferenciado, de células maduras que no se dividen (sistema nervioso central) o que lo hacen poco (higado) otros tiene una pérdida constante de sus células maduras, pero tiene también células indiferenciadas, inmaduras, que regeneran nuevas células parenquimatosas, por constantes divisiones (médula ósea, mucosa intestinal, piel, etc.).

El estroma es el tejido conjuntivo de sostén, presente en todos los órganos y también los vasos sanguíneos, necesarios para todos los tejidos, pues transportan los elementos de nutrición al parénquima.

Así los tejidos y órganos y sistemas presentarán lesiones radio inducidas a su parénquima o en su estroma.

Generalmente, cuando hablamos de respuesta de un sistema u órgano a la radiación nos referimos a efectos de los llamados no estocásticos (que se producen con seguridad a partir de un cierto umbral) aunque su origen esté a nivel microscópico en efectos típicamente estocásticos.

La respuesta a la radiación de un sistema u órgano no se define como el conjunto de cambios morfológicos y/o funcionales detectables, producidos por una dosis en un cierto tiempo y será función de la dosis y del tiempo postirradiación que transcurra hasta la valoración del efecto. Evidentemente los cambios que se observan no son característicos exclusivamente de las radiaciones ionizantes y pueden ser producidos por otros agentes.

En el caso de las células altamente diferenciadas, que realizan funciones muy específicas, al no tener actividad mitótica no se les puede aplicar la terminología de las curvas de supervivencia. El conocimiento de los efectos de la radiación en estas células es más escaso dado que para ello resulta necesario desarrollar nuevas técnicas biológicas. Todo lo que se puede decir en términos generales, es que, **la dosis de radiación necesaria para destruir la capacidad funcional de las células diferenciadas es mucho mayor que la necesaria para detener la actividad mitótica de las células que se dividen.**

Al hablar de respuesta sistemática a la radiación nos referiremos a la respuesta de un conjunto de órganos que realizan una o más funciones vitales. **Su respuesta dependerá pues, de la respuesta de los órganos que lo constituyan, de la de sus tejidos, así como de la respuesta de las poblaciones celulares de estos tejidos.**

La referencia a dosis bajas, moderadas o altas se hace con orden de magnitud inferior a 1 Gy, entre 1 y 10 Gys y superior a 10 Gys, respectivamente y suponiendo que se reciben en una sola vez y en un solo órgano.

RESPUESTA ORGÁNICA TOTAL A LA RADIACIÓN (Adulto, embrión y feto)

La respuesta orgánica total viene determinada por la respuesta combinada de todos los sistemas orgánicos a la irradiación.

La respuesta de un organismo adulto a una exposición aguda de radiación (en un tiempo muy corto, del orden de minutos) de todo el organismo produce signos, síntomas y un cuadro clínico variables que se conoce con el nombre de SINDROME DE IRRADIACIÓN (SDI). Generalmente la exposición que da lugar al llamado SDI ocurre en forma aguda, irradiándose desde el exterior y casi todo el organismo.

Con objeto de poder comparar los efectos letales

de distintos niveles de dosis, se suele utilizar el concepto de dosis letal porcentual en función del tiempo, con una notación de la forma DL 50/30 que significa la dosis letal necesaria para matar al 50% de la población expuesta al cabo de 30 días. La DL 50/30 está en el orden de los 2,5 a 3 Gy para el hombre (irradiación a cuerpo entero).

Tiempo de supervivencia en función de la dosis

La respuesta de un animal a una irradiación total aguda se suele poder diferenciar en tres etapas:

1ª ETAPA (o etapa prodrómica)

Se caracteriza por náuseas, vómitos y diarreas, cefaleas, vértigo, alteraciones de los órganos de los sentidos, taquicardia, irritabilidad, insomnio, y puede durar desde algunos minutos hasta varios días.

2ª ETAPA. (o etapa latente)

Se caracteriza por la ausencia de síntomas y puede durar desde algunas horas hasta varias semanas.

3ª ETAPA. (o etapa de enfermedad manifiesta)

Se presentan los síntomas concretos de los sistemas lesionados.

Síndrome de la médula ósea

Se produce por dosis de 1 a 10 Gy. La fase prodrómica aparece a las pocas horas y consiste en vómitos, náuseas y diarreas. La fase latente puede durar entre días y tres semanas, según la dosis. En esta tercera semana se inicia la enfermedad hematopoyética, como leucopenia y plaquetopenia muy marcadas. La inmunidad está deprimida, por lo que aparecen infecciones graves. Habrá hemorragias por trastornos de la coagulación, que acentuarán más la anemia debida a la lesión medular.

A partir de la quinta semana se inicia la recuperación con dosis inferiores a 3 Gy. Dosis más altas pueden provocar la muerte en 2-6 semanas.

Síndrome gastrointestinal

Su intervalo de dosis se sitúa por encima de 5 Gy. La DL 100% para el hombre está situada entre 6 y 10 Gy.

La etapa prodrómica se produce a las pocas horas de exposición y se caracteriza por náuseas, vómitos y diarreas muy intensas. Desde el segundo al quinto día postirradiación dura la fase latente. En la

enfermedad manifiesta, vuelven a aparecer las náuseas, vómitos y diarreas, con fiebre. Entre el tercer y catorceavo día el individuo puede morir. La sintomatología se debe a la lesión del tramo gastrointestinal, y en parte a la de la médula ósea.

El intestino delgado pierde su mucosa. Existe un cuadro de mala absorción, con pérdida de líquidos, proteínas y electrolitos, por vía digestiva, apareciendo deshidratación, hemorragias intestinales. Se favorece la infección generalizada, producida por los gérmenes habituales del intestino, sobre todo si existe leucopenia por afectación de la médula ósea y depresión inmunitaria.

Síndrome del sistema nervioso central

Se produce a dosis mayores de 50 Gy, aunque este sistema se afecte con dosis superiores a 20 Gy. La fase prodrómica aparece rápidamente y su duración es a veces de minutos. Hay náuseas, vómitos, síntomas psíquicos, como confusión, irritabilidad, etc. y neurológicos, como disminución de la conciencia, sensación de quemazón en la piel, etc. La fase latente dura escasas horas. A las 4-6 horas de irradiación aparece la fase final con sintomatología neurológica, convulsiones, ataxia, grados progresivos de coma, para sobrevenir la muerte, a los 3 días post-exposición. La causa de ésta es un cuadro de hipertensión endocraneal muy fuerte, con edema cerebral, hemorragias y meningitis aséptica, con afectación vascular sobre todo.

Otra segunda variedad de respuesta a la radiación consiste en el síndrome de irradiación crónica, también denominado pequeño mal de rayos o radio toxemia, que se puede observar durante el tratamiento radioterapéutico de los enfermos tumorales, al aplicar pequeñas dosis fraccionadas en áreas reducidas a lo largo del tratamiento. No tienen gran importancia clínica y su sintomatología recuerda el mareo producido en algunos medios de transporte (barco, avión, etc.) y consiste en náuseas y vómitos, tendencia a la diarrea, cefaleas, ligera elevación de la temperatura, pérdida de apetito, insomnio, mareos, etc.

El caso del ser humano en desarrollo debe ser tratado aparte del adulto por sus peculiaridades frente a las radiaciones ionizantes. Nos referimos a efectos sobre el embrión o el feto que son extremadamente radiosensibles por su inmadurez y potencialidad de división.

Los efectos de las radiaciones ionizantes en embriones y/o fetos podrán ser:

- Letalias

Muerte del ser en desarrollo

- Anomalías congénitas

Producidas ahora y no heredadas y se manifiestan al momento de nacer.

- Anomalías congénitas

Que no se manifiestan en el momento del nacimiento sino más tarde.

Hay que tener en cuenta que estos efectos también podrían ser causados por una mutación de los óvulos o espermatozoides que generan el nuevo ser. Mutaciones que se habrían producido en los padres (o abuelos) y transmitida al nuevo ser engendrado por el denominado efecto genético.

Los efectos en embrión y/o en feto, serán críticamente dependientes del tiempo de gestación ya que a medida que transcurre este tiempo se van desarrollando las distintas estructuras del nuevo ser.

Con la etapa de preimplantación, cuando el huevo consta de 0 a 11 días, antes de 3 semanas las dosis del orden de 1 Gy a estos embriones les supone un gran número de muertes prenatales pero pocas anomalías graves en los niños que llegan a nacer.

En la etapa de órgano génesis -embrión propiamente dicho- la irradiación de fetos entre 4 a 11 semanas puede producir anomalías graves en muchos órganos sobre todo en el SNC y esqueleto. La irradiación entre las 11 semanas y 16, suele producir retraso mental y microcefalias, y a partir de la semana 20, pueden producirse efectos funcionales.

El problema que se plantea es si las dosis bajas, producidas en radiodiagnóstico o medicina nuclear, pueden afectar a un embrión humano, en sus primeras semanas de gestación, periodo en que una mujer fértil puede ignorar aún su embarazo. Es difícil establecer la relación causa-efecto, ya que la incidencia de efectos congénitos en la población es de un 8%, no pudiendo precisarse su etiología, ya que ningún efecto es específico del agente que lo provoca.

EFFECTOS TARDIOS DE LA RADIACIÓN: SOMÁTICOS Y GENÉTICOS

Aparte de las distintas etapas de afectación de los distintos órganos (fibrosis, ulceraciones, etc.) que se pueden presentar tardíamente pero que son efectos típicamente no estocásticos. Los efectos tardíos de la radiación son los probabilísticos o

estocásticos. Para ello cabe hablar de la existencia de un umbral, basta una única interacción (simbólicamente hablando) para que se produzca y lo que aumenta con la dosis es la probabilidad de que aparezca.

Estos efectos se clasifican en:

Somáticos

Que afectan a la salud del individuo que ha recibido la dosis. Son fundamentalmente todos los tipos de cánceres (leucemias, carcinomas de piel, osteosarcomas, carcinoma de pulmón, carcinoma de tiroides, etc.) Algunos autores consideran el acortamiento no específico de la vida (una especie de aceleración del envejecimiento) como un efecto tardío somático de la radiación.

Genéticos

Que afectan a la salud de los descendientes. Son las mutaciones que suponen malformaciones de cualquier tipo (por ejemplo el mongolismo en los seres humanos). La radiación incrementa el número de mutaciones que se sabe se producen de forma espontánea con cierta probabilidad. La radiación no produce mutaciones nuevas o típicas ya que el efecto de la radiación ionizantes es inespecífico.

Se llama dosis de duplicación a la dosis que duplica la probabilidad de que aparezca un efecto. Según la ICRP los **factores de riesgo medios para los distintos órganos y tejidos** son los siguientes:

Gónadas

El factor de riesgo medio para efectos hereditarios en las dos primeras generaciones se toma como 4.10⁻³ Sv⁻¹

Hueso

El factor de riesgo para cáncer de hueso se toma como 5.10⁻⁴ Sv⁻¹.

Médula

El factor de riesgo para leucemia se toma como 2.10⁻³ Sv⁻¹.

Pulmón

El factor de riesgo para el cáncer de pulmón se toma como 2.10⁻³ Sv⁻¹.

Tiroides

El factor de riesgo para el cáncer de Tiroides se toma como 5.10⁻⁴ Sv⁻¹.

Mama

El factor de riesgo para el cáncer de mama se toma como $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$.

Otros tejidos

El factor de riesgo para cáncer en otros tejidos u órganos no cita dosis toma como $5 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$. (estómago, glándulas salivares, hígado, etc.) y cada órgano aislado, no es responsable de más de $1/5$ de este factor.

Si sumamos todos los efectos obtenemos un total de $16,5 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$.

Si definimos un factor de ponderación para cada órgano o tejido (WT) que represente la proporción de riesgo estocástico que resulte del órgano o tejido T, al riesgo total, cuando se irradia todo el cuerpo uniformemente, al valor $16,1 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$. le corresponderá un factor de ponderación de 1; a cada uno de los órganos o tejidos anteriores, los valores siguientes:

Estos factores de ponderación (WT) son importantes ya que a efectos de protección radiológica se define la dosis equivalente efectiva como

Donde HT representa la dosis equivalente en el órgano o tejido T y Hwb la dosis equivalente efectiva en todo el cuerpo (o cuerpo entero) pudiendo así combinar el efecto de irradiaciones parciales de los distintos órganos y obtener un valor equivalente a cuerpo entero.

ESTIMACIÓN DE RIESGOS DURANTE EL EMBARAZO

Efectos más importantes en las distintas etapas de gestación

La acentuada sensibilidad a las radiaciones ionizantes que se experimenta en las primeras edades de la vida, se determina por la lesión celular, que puede alterar el intrincado juego de la proliferación celular y de la organización que siguen a la fertilización del óvulo y durante su crecimiento y desarrollo.

Un amplio espectro de radiación induce lesiones que pueden manifestarse por sí mismas, según el estado de desarrollo del componente celular y de la dosis de radiación.

Precozmente, durante el desarrollo embrionario, pueden provocarse la muerte celular, o la alteración de la estructura y movilidad de las células supervivientes incluso con una dosis baja de radiación; en el género humano es más probable que ocurra

entre las 6 ó 7 primeras semanas de gestación.

En un periodo más avanzado del desarrollo, la alteración de la síntesis celular quizá impida la diferenciación celular normal. La radiosensibilidad de las células germinales depende de si están en el estadio proliferativo de la mitosis en la embriogénesis precoz, o en alguna de las múltiples fases de la meiosis en la embriogénesis más tardía, o en la vida postnatal.

La mutación somática, debida a la irradiación, que desemboca en la inducción de neoplasias en la infancia, se ha relacionado con la cantidad de radiación que el feto recibió durante los exámenes de la pelvis y abdomen maternos; todo ello queda todavía a nivel de hipótesis y ha sido objeto de muchas encuestas y discusiones.

Es mejor considerar que la exposición radiológica durante la vida fetal o neonatal deja un tiempo máximo para que puedan desarrollarse las secuelas de tales exposiciones. Cuando los fetos de ratón reciben 5 r en un estadio temprano de su organogénesis, comparable a una fase desarrollo de un feto humano correspondiente a 3-4 semanas de gestación, se observa incremento de la incidencia de malformaciones esqueléticas y un retardo en el crecimiento del embrión, no existiendo ninguna demostración indicativa donde el umbral para causar daño fetal esté por debajo de los 5 r.

Administrando 10 r a un feto de rata se puede disminuir el crecimiento de las neuronas, y doblando esta dosis se puede alterar permanentemente las células nerviosas e interferir la formación normal del cortex. Con una dosis mayor aparece una gran malformación del cerebro del feto de rata. Cuando se administró 1r a la rata grávida durante la gestación, sumando un total de 20r, se observó una reducción del peso cerebral de la prole, así como importantes lesiones neuropatológicas.

La sensibilidad de las células germinales varía no solamente en relación con la fase de la ovogénesis en la que se encuentra sino también en unas especies a otras e incluso dentro de cada especie. Las estrechas semejanzas citológicas en la ovogénesis del mono Rhesus y del hombre sugieren que las células germinales femeninas humanas pueden ser tan refractarias a las radiaciones como lo son las del mono. Debido a que este problema no se ha explorado completamente en las primates, cabe la posibilidad de que exista una fase extremadamente radiosensible en las células germinales femeninas del hombre.

Mediante estudios epidemiológicos, se ha demostrado la posibilidad de inducir lesiones malignas en el feto, a partir de bajas intensidades de radiación;

indicando un aumento de la incidencia de cánceres de todos los tipos que se presentan en la infancia. La relación causal entre la irradiación intrauterina, realizada con fines diagnósticos, y la aparición de caracteres malignos en el último periodo de la infancia, se ha puesto en cuestión alegando que los datos que se obtiene de los rayos X son insuficientes para demostrar que se produzcan efectos en respuesta a dosis determinadas; no existen datos de estudios sobre animales que sustenten las experiencias que existen sobre el hombre ni que indiquen característica alguna, que todavía no se haya identificado, sobre el embarazo, aparte de que la irradiación sea la responsable de la diferencia observada.

Efectos específicos en embrión-letalidad, anomalías congénitas y efectos a largo plazo

El daño provocado por las irradiaciones de bajo nivel en los tejidos fetales y en el recién nacido viene avalado por los estudios realizados en los animales de experimentación. Está demostrado que existe una radiosensibilidad diferente entre las distintas especies e incluso dentro del mismo tipo de órgano de ataque en un estadio del desarrollo similar.

Sin embargo, existe un alto grado de semejanza entre los efectos embriológicos sobre el hombre y los animales de experimentación estudiados, sobre todo en los estadios más precoces del desarrollo; además los efectos inducidos experimentalmente por la irradiación en el hombre, son del mismo tipo.