

442
2 ej°



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ODONTOLOGIA

DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES

"PRINCIPIOS DE RADIOTERAPIA (UTILIZACION DE RADIACIONES IONIZANTES) PARA CIRUGIA BUCAL

T E S I S A

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
CIRUJANO DENTISTA
P R E S E N T A :
JOSE LUIS VAZQUEZ SALVADOR

ASESOR: C. M. F. ROCIO GLORIA FERNANDEZ LOPEZ
RESPONSABLE DEL AREA QUIRURGICA



MEXICO, D. F.

NOVIEMBRE DE 1996



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS

A mis amigos: Agueda, Yolotzin, Juan Manuel, Estrella, Elfego,
Concepción, Carolina, Mauricio, Laura, Sherezada,
"Irmitta", Guillermina, Alejandro, José Martín,
Armando (14),

A una congregación muy linda (Josefina y Moises).

A mi perrita: JANHA.

AGRADECIMIENTOS: A mi mamá Agripina Salvador Marín

A mi hermano Ing. Rolando Vázquez Salvador

A mi asesora C.D. Rocío Gloria Fernández López

A mi amiga Lic. Estrella Guerrero Arellano

A mi amiga Sña. Irma Margarita Flores

A mi primo C.P. Constantino Sánchez Vázquez

A mi amiga C.D. Agueda Marisol Arellano Flores

A la familia Arellano Flores

por su gran motivación y ayuda, que me dieron para llegar al final de la meta
de mi carrera profesional, y poder ser orgullosamente CIRUJANO DENTISTA.

DEDICATORIAS

DEDICATORIAS

A todos los que amo, quiero y estimo.

Mis profesores de la UNAM

Mis compañeros de la facultad de Odontología, generacion 91-94 y 92-95.

Mi "gran" familia: *Emiliano, *Palemón, Severiana, Carmen,

Olilio, Agripina.

Rolando, Venancio, Refugio, Lucio y Romualdo

Gloria, Emelia, Luis y Rosario.

"VAZQUEZ SALVADOR"

Mi "segunda" familia: Juanita, Damián, *Martina,

Mateo, Constantino, Lucio, Abraham y David

Marta, Samuel, Josias, Israel, Hugo y Juan

"SANCHEZ VAZQUEZ"

Mis cuñadas: Adela, María de Jesus, Olga, Sonia, Lucia.

Lidia, Marta, Antonia.

A los futuros profesionistas: Veltia, Jazmín, Daniel, Nora,

Ariadna, Diana, Jairo, Lorena, Juan

de Dios y al bebe...

Ana, Alma, Edgar, Dan Ian, Arlahí,

Sinaí, Yoshimi, Alberto, Barbara...

DEDICATORIAS

A mis amigos: Agueda, Yolotzin, Juan Manuel, Estrella, Eifego,
Concepción, Carolina, Mauricio, Laura, Sherezada,
"Irmita", Guillermina, Alejandro, José Martín,
Armando (14),

A una congregación muy linda (Josefina y Moises).

A mi perrita: JANHA.

AGRADECIMIENTOS: A mi mamá Agripina Salvador Marín

A mi hermano Ing. Rolando Vázquez Salvador

A mi asesora C.D. Rocío Gloria Fernández López

A mi amiga Lic. Estrella Guerrero Arellano

A mi amiga Sria. Irma Margarita Flores

A mi primo C.P. Constantino Sánchez Vázquez

A mi amiga C.D. Agueda Marisol Arellano Flores

A la familia Arellano Flores

por su gran motivación y ayuda, que me dieron para llegar al final de la meta de mi carrera profesional, y poder ser orgullosamente CIRUJANO DENTISTA.

INDICE

1. OBJETIVOS.....	6
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	6
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	6
2. INTRODUCCION.....	8
3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE.....	12
3.1. DEFINICION	12
3.2. BASES FISICAS Y QUIMICAS.....	14
3.3. MAGNITUDES, UNIDADES Y CONCEPTOS.....	24
3.4. TIPOS DE RADIACION IONIZANTE.....	37
3.5. FORMAS DE DETECCION DE LAS RADIACIONES.....	41
3.6. FUENTES DE RADIACION Y SU UTILIZACION	49
4. ANTECEDENTES HISTORICOS.....	53
4.1. INTRODUCCION.....	53
4.2. LOS RAYOS X: SU DESCUBRIMIENTO.....	54
4.3. EL INICIO DE LA RADIOLOGIA EN MEXICO.....	57
4.4. UNA MUJER EXTRAORDINARIA: CURIE	60
4.5. EL PRIMER RADIOISOTOPO.....	62
4.6. EL HOMBRE EN BUSCA DE MAS RESPUESTAS	63
4.7. LOS AVANCES MAS RECIENTES.....	64
4.8. UN DESASTRE NUCLEAR: A 10 AÑOS DE CHERNOBYL	66

5. CONSIDERACIONES BIOLÓGICAS DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN EL ORGANISMO HUMANO	75
5.1. INTRODUCCION.....	75
5.2. TEORIA DE LA ACCION BIOLÓGICA DE LA RADIACION IONIZANTE.....	76
5.3. LESIONES EN CELULAS Y TEJIDOS.....	77
5.4. FISIOPATOLOGIA.....	79
5.5. SINTOMATOLOGIA.....	80
5.6. DIAGNOSTICO Y PRONOSTICO.....	84
5.7. PROFILAXIS.....	86
5.8. TRATAMIENTO.....	86
6. RADIOTERAPIA	90
6.1. DEFINICION.....	90
6.2. TELETERAPIA.....	92
6.3. TELECOBALTOTERAPIA.....	93
6.4. TELECESIOTERAPIA.....	96
6.5. ACELERADORES DE PARTICULAS LINEALES Y CIRCULARES.....	97
6.6. BRAQUITERAPIA.....	98
6.7. CURIETERAPIA O RADIUMTERAPIA.....	99
6.8. IRIDIOTERAPIA.....	102
6.9. RADIOSENSIBILIZADORES.....	104
6.10. FORMAS DE ADMINISTRACION.....	105
6.11. DOSIMETRIA.....	106
7. CONCLUSIONES	109

INDICE

8. BIBLIOGRAFIA 111

INDICE

8. BIBLIOGRAFIA 111

CAPITULO 1
OBJETIVOS

2. INTRODUCCION

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

1. Que el trabajo elaborado sea de utilidad para aquellos que se interesan, en la aplicación terapéutica de las radiaciones ionizantes, en Odontología.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

1.1 Disipar dudas y aclarar conceptos erróneos que surgen en el ámbito odontológico sobre las radiaciones ionizantes.

1.2 Abarcar información sobre las radiaciones ionizantes utilizadas más allá de su uso para con fines de diagnóstico.

1.3 Despertar el interés, en los profesionistas de Odontología, sobre las aplicaciones de las radiaciones ionizantes

1.4 Reunir información sobre las aplicaciones terapéuticas de las radiaciones ionizantes para los profesionistas de Odontología que se interesan en comenzar una trayectoria de investigación práctica.

1.5 Realizar un informe con los conocimientos básicos y el papel de la radioterapia en Cirugía Bucal.

1.6 Conmemorar el centenario de los descubrimientos que marcaron el inicio de una nueva era en el campo de la Medicina (Odontología) especialmente de la Cirugía.

2. INTRODUCCION

CAPITULO 2
INTRODUCCION

2. INTRODUCCION

2. INTRODUCCION

¿Qué está en todos lados, pero no lo podemos ver? ¿qué cosa nos puede atravesar de un lado a otro sin que nos demos cuenta? ¿qué nos puede curar, pero al mismo tiempo nos puede matar? ¿qué nos llega desde millones de años luz de distancia? ¿qué puede proporcionar energía suficiente para encender un millón de focos? ¿qué requiere de un aparato de 60 km de tamaño para producirlo? ¿qué nos aporta datos sobre lo más profundo de la materia? ¿qué nos puede ayudar a identificar cada uno de los átomos de una sustancia? ¿qué puede mostrar nuestros huesos sin quitarnos la piel? ¿qué nos permite guardar alimentos frescos sin refrigerar? ¿qué mantiene encendido al sol y las otras estrellas? ¿qué puede medir objetos de menos de un millonésimo de millonésimo de centímetro?

Aunque parezca extraordinario, hay una respuesta única a todas las preguntas: la radiación ionizante.

Como seres integrantes de la naturaleza, estamos perfectamente adaptados a la radiación ambiental. Sin embargo, nos parece una cosa misteriosa porque no siempre comprendemos cómo funciona. Debido a ésta situación, muchas preguntas han surgido y se han contestado total o parcialmente en los cien años que la conocemos. (22)

En muchos países desde su descubrimiento se le ha dedicado esfuerzos importantes, a la investigación de las radiaciones ionizantes, esfuerzos de investigación básica, orientada y aplicada, al desarrollo tecnológico y uso industrial. México no ha sido la excepción, porque a través de los años se ha beneficiado con el uso adecuado de las radiaciones ionizantes; resultado del trabajo realizado por científicos mexicanos.

2. INTRODUCCION

Científicos y académicos de la UNAM de diversas áreas, han contribuido en gran medida con sus estudios sobre la utilización racional de las radiaciones ionizantes, al desarrollo tecnológico nacional, logrando verdaderos avances en la industria y en la medicina. Esto le ha valido a la UNAM ser reconocida a nivel mundial en éste campo de trabajo.

Es un hecho que la radiación ya participa en nuestra vida cotidiana de maneras insospechables, amén de habernos provisto de importantes datos sobre la estructura de la materia y las leyes de la naturaleza.

Aunque su entendimiento a fondo y la habilidad para aprovecharla requieren por lo menos de una carrera profesional no hay razón para que no se puedan conocer ampliamente algunas de sus características primordiales.

La razón principal de realizar éste trabajo es por un lado disipar dudas o aclarar conceptos erróneos que fácilmente surgen en el ámbito odontológico y por otro lado, tal vez despertar en algunos la curiosidad sobre un importante fenómeno, curiosidad que puede conducir, a una trayectoria de investigación práctica y no como en mi caso, que sólo ha llegado a ser una investigación literal, pero eso sí llena de sorpresas y satisfacciones. Aunque aclaro que no se llegará nunca a un lugar importante como Cirujano Dentista en el campo de las investigaciones sobre radiaciones ionizantes con fines terapéuticos, si nos limitamos a estudiarlas únicamente para aplicarlas con fines de diagnóstico.

Durante el tiempo que he recopilado información literal sobre las radiaciones ionizantes, no he podido llevar a la práctica los conocimientos teóricos obtenidos, pero ésto no me preocupa, ni desespera, porque la formación teórica también trae muchas satisfacciones,

2. INTRODUCCION

por ésto podría coincidir con la idea de que "la radiación, sin ser misteriosa, tiene un atractivo muy especial por sus características".

Veamos ahora la radiación, definámosla, midámosla, apliquémosla y entendámosla.

CAPITULO 3
GENERALIDADES DE RADIACION
IONIZANTE

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

3.1. DEFINICION

Existen muchas formas y niveles de radiación. Pero a efectos terapéuticos las que interesan en oncología (radioterapia) son las radiaciones ionizantes.

Las radiaciones ionizantes reciben ésta denominación por su especial capacidad de interaccionar con los átomos y moléculas del organismo, produciendo una "ionización" que se traduce en efecto biológico. Dicho efecto se ejerce sobre las células normales y las células malignas, pero la radiosensibilidad de éstas puede ser mayor, así como su capacidad de regenerar las lesiones producidas por la radiación.(23)

Todas las radiaciones ionizantes son potencialmente capaces de producir cambios locales y sistémicos.(10),(11). También son potenciales carcinógenos.(12)

Estos cambios son directamente proporcionales al tipo de radiación ionizante, cantidad y duración de exposición, tipo y edades de las células expuestas y algunas diferencias individuales de sensibilidad.

Debemos recordar que los cambios provocados por la radiación pueden ser o no ser reversibles, y producir o no cambios clínicos observables en células y tejidos, según las variables señaladas.(10)

La característica básica de la radiación ionizante es que requiere de energía para producir la ionización, y esa energía debe estar concentrada en espacios muy pequeños para

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

poder transmitirse a los electrones atómicos. Una vez ionizados los átomos, pueden combinarse o formar nuevos compuestos químicos, cuyo cambio puede ser permanente o de gran duración:

Ejemplo: veamos en éste caso una partícula alfa emitida por un núcleo de 235 U. Como sabemos la partícula alfa es muy pequeña (del tamaño de los núcleos). Por otro lado su energía es de 4.4 MeV, la cual alcanza para ionizar a muchos de los átomos a que se acerca, en virtud de que su carga eléctrica arranca a los electrones de su lugar. Por lo tanto, califica para llamarla radiación ionizante.

Por otro lado, consideremos las ondas de transmisión de la radio o televisión. Estas contienen poca energía y están distribuidas en grandes espacios. No pueden ionizar la materia, sino cuando mucho provocar movimientos colectivos de los electrones del material sin cambios permanentes. No se califican como radiación ionizante.

Para finalizar la descripción de que es la radiación ionizante se plantea la siguiente pregunta: ¿la radiación es una onda o una partícula? la respuesta es sí, ambas. Toda materia tiene dualidad onda partícula. A veces aparece más como onda, a veces más como partícula.

Ejemplo: las ondas electromagnéticas, de radio o televisión, de longitud de onda grande, sus efectos se dejan sentir en objetos grandes, como antenas. Pero a medida que la longitud de onda disminuye (progresivamente en luz infrarroja, luz visible, rayos ultravioleta, rayos X y rayos gamma) sus efectos están más localizados y adquieren propiedades de partículas. Los rayos gamma, pueden chocar con electrones atómicos como si fueran pequeñas pelotas. Por otro lado, los electrones o los neutrones, que generalmente se visualizan como partículas, manifiestan propiedades de ondas en ciertos experimentos. El fenómeno que se produce se llama difracción y consta de una reflexión preferente en ciertas direcciones, semejante a la que producen las ondas de luz al

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

encontrar un enrejado fino. Cada longitud de onda se refleja en una dirección propia, descomponiéndose en los colores del arcoiris.

La dualidad onda-partícula es un fenómeno real y parte de la naturaleza. La física moderna la describe con toda claridad. Que no extrañe entonces que a veces digamos que los neutrones y protones tienen longitud de onda, o que los rayos gamma rebotan como pelotas.(22)

3.2. BASES FISICAS Y QUIMICAS

La radiación ionizante es atómica o subatómica. Proviene principalmente de los átomos y de sus componentes. También sus efectos se dejan sentir en los átomos y en sus partes. Por eso no es posible hablar de radiación sin antes haber visto aunque sea de manera general cómo es la estructura de la materia y cómo se comporta en el nivel más elemental. Habrá que aclarar que la descripción que sigue sólo pretende ser un punto de partida para analizar la radiación. Una descripción pictórica puede ser útil para visualizar a los fenómenos, aún cuando no se apegue estrictamente al entendimiento actual de la física y de la química.

Átomo.

Originalmente pensado como indivisible, y que es la unidad más pequeña de un elemento que puede existir sola y conservar las propiedades químicas del elemento. Son extremadamente pequeños: miden aproximadamente 10^{-8} cm, y pesan alrededor de 10^{-24} g. Cada uno de ellos está formado por un núcleo (conglomerado de protones y neutrones principalmente) y por electrones que giran

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

a su alrededor en órbitas definidas; el número de éstos puede llegar a sobre pasar los cien.(19)

Núcleo

Es un conglomerado de protones y neutrones principalmente. Fue dividido por Han, Stassmann y Meitner en 1939, al bombardear con neutrones el metal uranio y producir la fisión nuclear. En el núcleo se concentra la totalidad de la carga positiva del átomo y la inmensa mayoría de su masa, en un diámetro, aproximadamente diez mil veces menor que al diámetro del átomo.(19)

Es la parte más compacta del átomo, está constituido por un conjunto de partículas (nucleones), de dos tipos: los protones y los neutrones.(8)

Los nucleones atraen eléctricamente a cuanto electrón requieren para balancear su carga.

La fuerza que mantiene unidos a los protones y neutrones en el núcleo no es eléctrica, pues por un lado los neutrones no tienen carga, y por el otro los protones más bien se rechazan entre sí por tener todas cargas iguales (positivas). Esta nueva fuerza se llama "fuerza nuclear", y es por lo menos suficientemente intensa para contrarrestar la repulsión eléctrica entre protones.

El número de protones (Z) y de neutrones (N) es variable en los distintos núcleos. Para empezar, Z y N suelen ser parecidos, especialmente en los elementos ligeros; en los más pesados N es mayor que Z.(22)

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

Protón

Tienen una masa 2000 veces aproximadamente superior a la del electrón y llevan una carga eléctrica elemental positiva igual a $+1.6 \times 10^{-19}$ Culombios (+e).(8)

El número de protones (Z) en un núcleo determina de que elemento químico se trata. Su carga es de igual magnitud que la del electrón, pero de signo opuesto.(22)

Neutrones

Es una partícula sin carga con una masa igual a 1.008665 u.m.a. contenida en el núcleo atómico, cuyo número sumado al número atómico (número de protones) determina el número de masa. Los neutrones pueden ser emitidos por algunos núcleos al realizarse la fisión nuclear o bien por medio de reacciones nucleares. En éstos casos sirven para bombardear elementos blancos y producir otras reacciones nucleares clasificándose de acuerdo a su energía en: "términos" (energías alrededor de 0.025 eV); "epitérmicos" (energías entre 0.1 eV y 100 eV); "lentos" (energías cercanas a 100 eV); "intermedios" (energías entre 100 y 100.000 eV) y "rápidos" (energías mayores a 0.1 MeV).(19)

Electrones

Son partículas ligeras, cargadas negativamente que se desplazan a gran velocidad alrededor del núcleo sobre capas energéticas definidas.(8)

La primera capa llamada K, la más cercana al núcleo, admite sólo dos electrones, por lo que se dice que el helio (Z=2) es de capa cerrada y no tiene actividad química. El siguiente elemento, el litio (Z=3), tiene la capa K, llena y el electrón adicional está en la capa L. Este electrón, más alejado del núcleo y más suelto, es fácilmente compartido con otros átomos, lo cual da lugar a reacciones químicas. La capa L se llena con 8 electrones, que sumados a los 2 de la capa K nos dan un total de Z=10, el neón, otro elemento inerte.(19)

Las demás capas energéticas son M, N, O, P y Q.

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

Los electrones tienen una masa de 9×10^{-31} kg y una carga eléctrica elemental negativa igual a -1.6×10^{-19} Culombios (-e). (8)

La carga del electrón es de igual magnitud que la del protón, pero de signo opuesto. (22)

El número de electrones que gravitan en torno del núcleo es, en estado estable, igual al número de protones; el conjunto es, pues, eléctricamente neutro. El radio del átomo es del orden del angstrom ($1 \text{ Angstrom} = 10^{-8} \text{ cm}$); el del núcleo es aproximadamente 10.000 veces más pequeño, del orden de 10^{-12} cm .

La estructura electrónica de las capas periféricas determina las propiedades químicas de los distintos elementos o cuerpos simples (un centenar). Los átomos de éstos elementos se agrupan para formar moléculas (innumerables variedades).

El comportamiento observable a nuestra escala de poblaciones de partículas (átomos y moléculas) es la resultante del comportamiento de las partículas individuales cuyo gran número se traduce por la magnitud del número de Avogadro ($N_A = 6.02 \times 10^{23}$), número de átomos reales presentes en 12 gramos de carbono, tomado como elemento de referencia. (8)

Núclidos

Un núclido es un átomo con una constitución nuclear característica, es decir un número atómico determinado (igual al número de protones, generalmente designado con una Z) y un número de masa específico (igual al número de protones más neutrones, usualmente designado con A). Por tanto, el número de neutrones (representado por N) es la diferencia entre el número de masa y el número atómico $N = A - Z$. Si son colocados los números de masa y atómico a la izquierda del símbolo que corresponde a su elemento, tendremos un núclido completamente caracterizado.

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

Isótopos

Son los núclidos que tienen el mismo valor de número atómico (Z), pero de diferentes valores de número de masa (A) y de número de neutrones (N). Por ejemplo $^{31}_{15}\text{P}$ y $^{32}_{15}\text{P}$

$^{31}_{15}\text{P}$ $^{32}_{15}\text{P}$

que difieren en un neutrón, siendo el primero un isótopo inerte que forma el 100% del fósforo en la naturaleza y el segundo un isótopo radiactivo, es decir, un radioisótopo. (19)

Isóbaros

Son los núclidos con igual número de masa (A), pero distinto número atómico (Z) y número de neutrones (N).

Por ejemplo $^{32}_{16}\text{S}$ y $^{32}_{15}\text{S}$,

$^{32}_{16}\text{S}$ $^{32}_{15}\text{S}$

que difieren en un protón y un neutrón, siendo el primero un isótopo inerte, 95% del azufre que existe en la naturaleza, y el segundo un radioisótopo.

Isótono

Son los núclidos que presentan igual número de neutrones (N) pero diferente número de masa (A) y número atómico (Z).

Por ejemplo ^2_1H y ^3_2He ,

^2_1H ^3_2He

que difieren en un protón, formando el primero el 0.0148% del hidrógeno y el segundo 1.3×10^{-4} elevado a la potencia -4% del helio existente en la naturaleza, siendo ambos inertes.

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

Radiactividad

La materia es radiactiva cuando los núcleos atómicos emiten partículas subnucleares, o radiación electromagnética característica, sin masa ni carga, teniendo lugar un intercambio de energía al mismo tiempo. (19)

Decaimiento radiactivo

Es el proceso de degradación por el cual los núcleos emiten partículas o rayos, perdiendo masa o pura energía, y convirtiéndose en algún otro elemento en el primer caso o el mismo elemento en otro estado de energía en el segundo. Este es un proceso espontáneo y al azar, independiente de factores externos. La probabilidad de que un núcleo radiactivo particular emita partículas o rayos en la unidad de tiempo adaptada, es independiente del destino de núcleos vecinos y también independiente del estado químico de los átomos y de sus condiciones físicas.

Vida media de los radioisótopos

Es el tiempo requerido para que una especie radiactiva determinada disminuya a la mitad su radiactividad. La vida media es característica de cada radioisótopo y es conocida también como período de semidesintegración.

Esquema de decaimiento

Es el método gráfico para mostrar las formas de decaimiento que tienen lugar en una especie radiactiva, indicando el porcentaje de cada forma de decaimiento y la energía de las radiaciones emitidas.(19)

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

Especies principales de radiaciones emitidas por el núcleo

1. Partícula alfa

Consiste en dos neutrones asociados con dos protones. Pueden ser consideradas como núcleos de átomo de helio. Tienen una masa de 4 u.m.a. (unidad de masa atómica) y dos cargas positivas. Es importante considerar aquí que la unidad de masa atómica es equivalente a $1/12$ de la masa del átomo de ^{12}C , o sea igual a 1.66043×10^{-24} g. La masa del protón es igual a 1.007277 u.m.a. La masa del electrón es igual a 0.000549 u.m.a. La masa del neutrón es igual a 1.008665 u.m.a.

Si el núcleo atómico es radiactivo y emite una partícula alfa, pierde dos unidades en carga y cuatro unidades de masa. Este átomo se convierte en otro elemento, con número atómico menor (número de protones que han disminuido en dos unidades) y número de masa menor (número de protones más neutrones que han disminuido en cuatro unidades). Esto significa que los elementos radiactivos que decaen por la emisión de partículas alfa pasan a ocupar un sitio dos lugares a la izquierda de su colocación original en la tabla periódica de los elementos. (19)

2. Partículas beta

Son partículas de masa despreciable (su masa es la del electrón o sea aproximadamente $1/1832$ de aquella del protón y $1/1834$ de aquella del neutrón) y presentan carga positiva o negativa.

La partícula beta negativa o "negatrón" es un electrón emitido por el núcleo, el cual aumenta 1 unidad de carga positiva, al transformar un neutrón en un protón. Por tanto, el número atómico aumenta 1 unidad, el átomo se convierte en el elemento situado un lugar a la derecha en la tabla periódica y su número de masa permanece sensiblemente el mismo.

La partícula beta positivo o "positrón", es emitida cuando un protón se transforma en neutrón y una partícula de la misma masa que el electrón pero con carga positiva es

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

emitida por el núcleo. El número atómico decrece 1 unidad y el elemento se corre un lugar a la izquierda en la tabla periódica.(19)

3. Neutrones

Son partículas sin carga teniendo una masa de aproximadamente 1 u.m.a. Por tanto, los núcleos perdiendo neutrones no cambian su número atómico pero su número de masa disminuye una unidad por cada neutrón emitido. La emisión de neutrones se produce durante los eventos de fisión nuclear de metales pesados o por reacciones nucleares características.(19)

4. Rayos gamma

Son radiaciones electromagnéticas, similares a los rayos X, la luz u ondas de radio, pero con mucho menor longitud de onda y en consecuencia mucho mayor energía. Los rayos gamma, al igual que los rayos X, tienen energías bien definidas ya que son producidos por la transición entre niveles de energía del átomo, pero mientras los rayos gamma son emitidos por el núcleo, los rayos X resultan de las transiciones de energía de los electrones fuera del núcleo u orbitales. Los rayos gamma son a menudo llamados fotones, cuando se consideran paquetes de energía con valor constante emitidos por un núcleo radiactivo al decaer.(19)

Existen en gran número otras partículas subnucleares inestables, tales como neutrinos, anti-neutrinos y mesones, de gran importancia teórica para el establecimiento de la constitución del núcleo y para la explicación de los fenómenos cuánticos, cuyo estudio, es realizado por la Física Nuclear.(19)

Energía nuclear

El estudio detallado de la estabilidad de los distintos nucleidos muestra que puede liberarse energía ya sea partiendo un núcleo muy pesado en dos fragmentos de masa intermedias (fisión), ya sea fusionando dos núcleos muy ligeros, isótopos de hidrógeno por ejemplo (fusión). Estas energías, de origen intranuclear, son mucho más importantes por átomo que las energías puestas en juego en los enlaces extranucleares (químicas), debido a la pérdida de masa concomitante y su equivalencia energética: $W=mc^2$ (m: masa, C: velocidad de la luz).(8)

Fisión

No es fácilmente provocada por neutrones más que sobre el Uranio 235, así como sobre el Plutonio 239 y el Uranio 233 obteniendo el Torio 232. Cada fisión libera 200 MeV y la fisión de un gramo de Uranio 235 libera una energía equivalente a la combustión de tres toneladas de carbón. Además, en cada fisión se emiten 2.5 neutrones por término medio, de ahí deriva la posibilidad de una reacción en cadena. Esta reacción en cadena puede ser de dos tipos: o bien mantenida con regularidad, principio de los reactores nucleares, o bien explosiva si se cumplen ciertas condiciones muy estrictas de enriquecimiento (a más del 90%) de masa y de configuración (extremadamente difíciles de realizar) (bomba A).(8)

Fusión

Sólo puede iniciarse a partir de una temperatura-umbral de orden de 100 millones de grados; una temperatura tal se obtiene en el caso de la bomba H por la explosión de una bomba A que sirve de detonador; hasta el momento no se ha logrado obtener una fusión controlada utilizable para aplicaciones civiles; por otra parte, la fusión es el origen de la energía irradiada por el sol y las estrellas.(8)

Reacciones nucleares

Aparte de los decaimientos nucleares que suceden en la naturaleza, el hombre se las ha ingeniado para inducir artificialmente transformaciones de unos núcleos en otros, mediante reacciones nucleares. En éste caso se lanza un proyectil sobre un núcleo y se observan los núcleos que salen de ésta unión.

Por ejemplo, en $^{18}\text{O} + \text{proyectil} = \text{reacción} = \text{partículas alfa} + ^{15}\text{N}$ se lanza un protón energético sobre un núcleo de ^{18}O y se observa que el producto de ésta reacción es un ^{15}N y una partícula alfa. Las reacciones nucleares han sido la herramienta más poderosa para estudiar la física y química de los núcleos. (22) (3)

A medida que se han perfeccionado las técnicas para la investigación nuclear, se han descubierto muchas partículas más, que sólo mencionaremos de paso, pues si bien son fundamentales en el entendimiento de la estructura de la materia, para nuestro objetivo desempeña un papel secundario. Así, tenemos los mesones o muón, pión, caón, y eta, todos de masa intermedia entre el electrón y el protón. Más pesados que el protón y el neutrón son los hiperones (λ , σ , ξ y ω). Por otro lado, se sabe ahora que los nucleones están formados cada uno por tres cuarks. (22) (3)

Después de haber visto algunas bases físicas y químicas del átomo y, a su vez; del núcleo, veremos ahora: como se agregan los átomos para formar los materiales.

La forma más elemental en que se unen los átomos es por parejas, como, por ejemplo, el oxígeno en que dos átomos se unen, compartiendo electrones, para formar una "molécula". En virtud de los enlaces químicos, las moléculas pueden contener hasta muchos miles de átomos, como en el caso de los "polímeros", que consisten en gran número de repeticiones de una unidad básica en forma de cadenas, las cuales a su vez pueden entrelazarse, unirse y trenzarse. La materia orgánica está formada por éstas cadenas en que el eslabón principal es el átomo de carbono.

La mayoría de las sustancias inorgánicas están formadas por apilamientos regulares de átomos llamados "cristales", en que los átomos se acomodan guardando entre sí una

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

posición que se repite en todas direcciones, como si estuviesen en los vértices de un gran edificio. Hay 14 diferentes tipos de estructura en que se pueden acomodar. Esta regularidad explica por qué en los diamantes, por ejemplo, o en los granos de arena, se notan facetas bien definidas.

Es de notarse que todas las propiedades macroscópicas, y por lo tanto las posibilidades de uso de los materiales, está determinadas por las estructuras que hemos mencionado, tanto atómicas y subatómicas como multiatómicas. Peso, color, estabilidad dimensional, conductividad eléctrica, dureza, elasticidad, densidad, fosforescencia, magnetización, reactividad química, brillo, radiactividad, porosidad, transparencia, y muchas características más. Todas vienen a final de cuentas de la estructura.(22),(31)

3.3. MAGNITUDES, UNIDADES Y CONCEPTOS

Magnitud	/	Unidades
(nombre, significado)	/	(nombre, símbolo)

Actividad:	/	
Tasa de desintegración nuclear	/	Curio (Ci)
	/	Becquerelio (Bq)

Energía	/	
(de partículas o fotones)	/	Electronvoltio (eV)

Dosis absorbida: energía másica	/	
cedida por la radiación a la –	/	
materia atravesada	/	Rad (rad)

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

	/	Gray (Gy)
Dosis equivalentes: producto de	/	
dosis absorbida por factores de	/	
eficacia biológica	/	Rem (rem)
	/	Sievert (Sv)

Tabla 3.3.a (8)

Unidad (nombre, símbolo)	/	Definición (significación)
Bard (b)	/	Unidad que mide la sección eficaz o probabilidad de ocurrencia, de un evento determinado cuando núcleos característicos son bombardeados con iones, partículas subnucleares o rayos gamma y de una energía precisa.
	/	El bard es equivalente a 10 elevado a la potencia -24 cm cuadrados ($1b=10$ elevado a la potencia -24 cm cuadrados)
Becquerel (Bq)	/	Es una de las unidades útiles para medir la intensidad del fenómeno de la radiactividad.
	/	El becquerel corresponde con 1 desintegración por segundo (1dps) ó 60

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

/ desintegraciones por minuto (60dpm) de
/ nucleones presentes en cualquier material
/ radiactivo. Su equivalencia con el curio
/ es la siguiente: $1\text{Bq}=2.7 \times 10^{-11}$ elevado a la
/ potencia -11 Ci (o sea que $1\text{Ci}=3.7 \times 10^{11}$
/ elevado a la potencia 10 Bq).

Coulombio
por
Kilogramo (C/Kg)

/ Unidad creada en 1975 para medir la
/ intensidad de radiación en un espacio
/ dado.
/ Se define como la cantidad de radiación
/ gamma ó X capaz de producir un coulombio
/ de carga electrostática de cualquier signo
/ por kilogramo de aire.
/ Su equivalencia con el roentgen es la
/ siguiente: $1\text{C/Kg}=3876\text{R}$ (o sea que
/ $1\text{R}=2.58 \times 10^{-4}$ elevado a la potencia -4 C/Kg)

Curie
o Curio (Ci)

/ Pierre y Marie Curie fueron los
/ descubridores del radio, primer elemento
/ radiactivo descubierto en la naturaleza.
/ Se designa con su nombre a una de las
/ unidades útiles para medir la intensidad
/ del fenómeno de la radiactividad.
/ El curie o curio corresponde con 3.7×10^{10}

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

/ elevado a la potencia 10 desintegraciones
/ por segundo (3.7×10^{10} elevado a la potencia
/ 10 dps) ó 2.22×10^{10} elevado a la potencia 12
/ desintegraciones por minuto (2.22×10^{10}
/ elevado a la potencia 12 dpm) de núcleos
/ presentes en cualquier material
/ radiactivo.
/ Su equivalencia con el becquerel es la
/ siguiente: $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ elevado a la
/ potencia 10 Bq (o sea que $1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11}$
/ elevado a la potencia -11 Ci)

Gray (Gy)

/ Unidad creada en 1975 para medir la dosis
/ absorbida. Se define al gray (Gy) como la
/ cantidad de radiación absorbida que disipa
/ 1 Julio de energía por kilogramo de
/ material.
/ Su equivalencia con el rad es la
/ siguiente: $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rads}$ (o sea
/ $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$).

Electronvoltio (eV)

/ Es la energía adquirida por un electrón
/ cuando es acelerado por una diferencia de
/ potencial de 1 voltio.
/ El Megaelectrónvoltio (MeV) es la unidad
/ más adecuada para medir la energía de las
/ radiaciones nucleares: $1 \text{ MeV} = 10^6$ elevado a

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

	/	la potencia 6 electronvoltio.
--	---	-------------------------------

Rad	/	Unidad para medir la dosis absorbida. El
	/	rad es la dosis de radiación que resulta
	/	en la absorción de 100 ergios de energía
	/	por gramo de cualquier material.
	/	Su equivalencia con el gray es la
	/	siguiente: $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$ (o sea que 1
	/	$\text{Gy} = 100 \text{ rads}$).

Rem	/	Unidad para medir el daño biológico
	/	producido al hombre cuando absorbe una
	/	cierta dosis de un determinado tipo de
	/	radiación.
	/	Se define como el daño biológico causado
	/	cuando es absorbido 1 rad de radiación
	/	gamma, de modo que el daño originado por
	/	cualquier otro tipo de radiación es igual
	/	al producto de la dosis absorbida en rads
	/	por el valor característico EBR de ese
	/	tipo de radiación ($\text{rem} = \text{rad} \times \text{EBR}$).

Roentgen (R)	/	Unidad para medir la intensidad de
	/	radiación en un espacio dado.
	/	Se define como la intensidad de radiación
	/	gamma o X que produce la absorción de

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

	/	87.7
	/	ergios de energía por gramo de aire.
	/	Su equivalencia con el coulombio por
	/	kilogramo es la siguiente: $1 R=2.58 \times 10$
	/	elevado a la potencia $-4 C/Kg$ (o sea que
	/	$1 C/Kg=3876 R$)

Unidad	/	$-1/12$ de la masa del átomo de ^{12}C , o sea
de	/	igual a 1.66043×10 elevado a la potencia
masa atómica	/	$-24 g$.
(u.m.a.	/	Esta unidad es utilizada para determinar
	/	la masa de los núcleos atómicos y de las
	/	partículas contenidas en ellos.

Sievert (Sv)	/	Dosis biológicamente equivalente.
	/	Equivalente en rems: $1 Sv=100\text{rems}$.
	/	Magnitud biofísica.

Tabla 3.3.b (19)

Acarreador

Iones de igual o parecida naturaleza química a otros radiactivos que se encuentran en solución a muy bajas concentraciones, y que se agregan a la solución a fin de alcanzar una concentración que haga posible su separación por medios químicos o físicos (precipitación, extracción por solvente, intercambio iónico, cromatografía en papel,

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

electroforésis, etc.). Los acarreadores pueden ser isotópicos, o sea isótopos inertes del mismo elemento, o bien no isotópicos, o sea isótopos inertes de un elemento distinto al que desea separarse, pero de parecidas propiedades químicas o físicas.

Acelerador

Es un instrumento que confiere una energía determinada a conjuntos de iones, al acelerarlos por medio de campos eléctricos, para seleccionarlos y dirigirlos por medio de campos magnéticos.

Alcance máximo (o rango máximo)

Es el mayor espesor de materia que puede ser atravesado por partículas negativas de una determinada energía máxima (en función de la cual el alcance máximo adquiere su valor). Las partículas alfa también tienen un alcance o rango, que depende de su energía.

Actividad (o radioactividad)

Es el fenómeno por el cual los núcleos atómicos emiten partículas subnucleares con masa y carga, o radiación electromagnética característica, sin masa ni carga, teniendo lugar un intercambio de energía al mismo tiempo.

Blindaje

Es cualquier material usado para absorber radiaciones nucleares a fin de que no lleguen en cantidades nocivas a individuos que se encuentren en la vecindad de materiales radiactivos.

Coefficiente de absorción

Factor que mide la disminución en la intensidad de radiación X o gamma al atravesar la materia, por unidad de longitud del medio atravesado (coeficiente de absorción lineal) o por unidad de masa (coeficiente de absorción másico).

Criticalidad

Es el estado combustible de un reactor nuclear en el cual la cadena de eventos de fisión se mantiene por sí misma, fenómeno descubierto por Fermi en 1942.

Dosis máxima permisible (DMP)

Es la dosis de radiación que puede recibir una persona ocupacionalmente expuesta sin que su organismo sufra daño alguno, según conclusiones al respecto establecidas por medio de estadística. La dosis máxima permisible para personal ocupacionalmente expuesto durante 40 horas a la semana es de 2.5 milirems por hora (2.5mi rem/hr).

Efectividad biológica relativa (EBR)

Unidad que se utiliza para medir el daño biológico causado por iguales dosis de diferentes tipos de radiación. Se define como la dosis de radiación gamma dividida entre la dosis de cualquier otro tipo de radiación que produce igual daño biológico (el término en castellano "efectividad biológica relativa", abreviado EBR, es la traducción que aquí se ha dado al término inglés "relative biological effectiveness", abreviado RBE).

Efecto Compton

Una de las formas de interacción de los rayos gamma con la materia. Consiste en que un rayo gamma transfiere una fracción de su energía a un electrón orbital de uno de los átomos que constituyen el medio atravesado por la radiación y éste electrón es desplazado del átomo, formándose un par de iones o par iónico. El rayo gamma incidente queda con

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

menor frecuencia, menor energía, mayor longitud de onda y en consecuencia con una mejor disposición para interactuar con los átomos vecinos, hasta que se produce el efecto fotoeléctrico y es absorbido.

Efecto fotoeléctrico

Es una de las formas de interactuar de los rayos gamma con la materia. Consiste en que la totalidad de la energía de un rayo gamma es transferida a un electrón orbital de uno de los átomos que constituyen el medio atravesado por la radiación, y este electrón es desplazado del átomo formándose un par de iones o par iónico.

Electrones Auger

Son los electrones emitidos desde una órbita atómica cuando un rayo X originado en una órbita interior del mismo átomo interactúa con ellos.

Elemento

Es un material formado por una sola especie de átomos, definida por su número atómico.

Electrones por conversión

Son los electrones emitidos desde una órbita atómica cuando un rayo gamma originado en un núcleo del mismo átomo interactúa con ellos, proceso conocido como conversión interna.

Número de Avogadro

Es el número de átomos contenidos en un átomo gramo de cualquier elemento o de moléculas en una molécula gramo o mol de cualquier compuesto. El número de Avogadro es igual a 6.0225×10^{23} átomos o moléculas.

Par ionico.

Conjunto formado por el ión positivo remanente y el electrón orbital lanzado del átomo cuando una radiación nuclear interacciona con éste último al atravesar la materia.

Producción de pares

Una de las formas de interacción de los rayos gamma con la materia. Se produce con rayos gamma de energía por encima de 1.02 MeV y consiste en que al ser absorbido por un rayo gamma son producidas dos partículas beta, una positiva y otra negativa, con una energía cinética proporcionada por el exceso de energía del rayo gamma sobre 1.02 MeV.(19)

Limite anual de corporación

Es la actividad que, introducida en el organismo, comporta para un individuo dado una dosis comprometida igual al límite de dosis anual apropiado.

Dosis efectiva

Corresponde al acumulo de las exposiciones parciales de los diferentes órganos o tejidos afectados por factores ponderales (según la radiosensibilidad del tejido).

Actividad

Se refiere a una cantidad dada de materia. Se habla entonces de actividad másica o actividad volúmica según ella está referida a la unidad de masa o volumen del medio o substrato. Se habla también de actividad superficial cuando se evalúa la radioactividad expuesta por unidad de superficie.(19)

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

Niveles energéticos de la corteza electrónica

Ionización

Es la interacción de la radiación ionizante con la materia, se inicia con la expulsión de un electrón planetario de un átomo. Este fenómeno requiere de energía.(17)

La acción de ionizar un átomo rompe su equilibrio eléctrico. Resultando un electrón suelto por un lado y por otro un átomo al que le falta un electrón y por lo tanto tiene carga neta positiva se le llaman ión positivo. De inmediato se puede ver que éste desequilibrio eléctrico afectará las uniones con otros átomos, o sea, las propiedades químicas. La ionización es la acción de separar completamente a un electrón del resto del átomo; requiere energía. La unidad de energía que se usa en éstos casos es el electrón-volt (eV), que es la energía cinética que adquiere un electrón al atravesar por una diferencia de voltaje de 1 volt. Por ejemplo, la energía de amarre del electrón en el hidrógeno es de 13.6 eV; para ionizar el átomo de hidrógeno debemos impartirle ésta energía o más. En elementos más pesados (Z mayor) los electrones de la capa K tienen energías de amarre mayores. El hierro tiene 7.1×10^3 eV, o sea 7.1 KeV (Kiloelectrón-volts); el uranio 115.6 KeV.(22)

La presencia de capas se debe a que en un átomo dado sólo puede existir ciertas energías de amarre; cualquier otra es imposible. Este es un resultado de la teoría cuántica de los átomos. Se dice que la energía está cuantizada, y se habla de niveles de energía.(22),(17)

Excitación electrónica

En un átomo dado los electrones pueden brincar de un nivel a otro. Si el nivel original es más bajo que el final, se requiere energía para lograr la transición. El paso de un nivel bajo a uno más alto se llama excitación electrónica. Inversamente, el paso de un nivel alto a uno más bajo se llama "desexcitación", y en este proceso sobra energía.

La energía necesaria para excitar (o para ionizar) un átomo se obtiene generalmente de absorber radiación; la energía que sobra cuando se desexcita se va en forma de radiación

u otros macanismos semejantes. Esta radiación que emiten los átomos puede ser infrarroja, visible, ultravioleta o de rayos X.(22)

Las radiaciones, los materiales que las emiten y sus aplicaciones han sido continuamente estudiadas, dando lugar a la creación de nuevas diciplinas científicas:

Radioquímica, estudia las propiedades fisicoquímicas de los radioisótopos naturales y artificiales, los métodos para su obtención y purificación, el uso de trazadores radiactivos en investigación química y los efectos químicos de las transformaciones nucleares.

Química de radiaciones, estudia los efectos químicos producidos por las radiaciones ionizantes.

Química nuclear, estudia la síntesis de nuevos núcleos y la producción de elementos artificiales, como tecnecio, prometio y transuránidos.

Física nuclear, estudia las partículas que forman el núcleo atómico, la configuración del mismo y los cambios de energía que en él tienen lugar.

Ingeniería nuclear, estudia el diseño y funcionamiento de los reactores nucleares, esto es, dispositivos destinados a producir la fisión de núcleos de metales pesados (uranio y plutonio), a fin de obtener neutrones y energía calorífica. Estudia también el diseño y funcionamiento de los dispositivos necesarios para realizar la fusión nuclear de elementos ligeros (hidrógeno y sus isótopos deuterio y tritio) con el consecuente desprendimiento de energía y neutrones.

Física de neutrones, estudia la producción, detección y comportamiento de esta partícula subnuclear, en particular.

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

Medicina nuclear, estudia el comportamiento de compuestos radiactivos en el organismo humano, usados como trazadores con propósitos de diagnóstico, o bien con fines terapéuticos, así como el diagnóstico y tratamiento de padecimientos originados sobre la exposición de las radiaciones nucleares.

Radiobiología, estudia el efecto de las radiaciones nucleares sobre las estructuras celulares de los seres vivos.

Seguridad radiológica, estudia los métodos necesarios para que el manejo de materiales radiactivos pueda realizarse sin riesgos para la salud o el medio ecológico.(19)

Vista la parte estrictamente técnica de la radiación, vale la pena ahora hacer mención de algunas cosas que la radiación es y otras que no es, para tratar de aclarar algunas ideas preconcebidas que pueden existir y que entorpecen la posibilidad de usar cabalmente la tecnología nuclear.

La radiación no es misteriosa. Sus orígenes, sus leyes, sus efectos son perfectamente conocidos. Basta con consultar cualquier texto de física nuclear, de física moderna o de radioquímica para encontrar todos los detalles o las fórmulas que se requieran. El hecho de que sea invisible a nuestros ojos no debe molestarnos: también son las ondas de radio o televisión, los microorganismos y el oxígeno que respiramos.

La radiación no es esotérica ni mágica; es perfectamente mundana. Cualquiera que lo desee la puede usar, aunque naturalmente es importante tener la capacitación adecuada y el entendimiento de su naturaleza.

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

La radiación sí es de cuidado. Puede causar daños, al igual que cualquier otra aplicación de la tecnología. En este caso los daños pueden ser quemaduras u otros cambios químicos en los tejidos y cambios genéticos. Existe un código, elaborado en base a la experiencia acumulada, sobre el uso de las radiaciones, código que recomienda diferentes niveles de dosis de radiación que no deben rebasar los diversos sectores de la población. Las precauciones que exige el uso de la radiación no son distintas, en el fondo, de las que demandan otras tecnologías: evitar derrames, diseñar protecciones adecuadas, capacitar al personal, tener monitores apropiados, seguir ciertas reglas de conducta.

La radiación sí puede ser benéfica si se usa correctamente. Han salvado incontables vidas las radiografías y otros métodos de radiodiagnóstico. También la radioterapia ha salvado o prolongado gran número de vidas. Las múltiples aplicaciones no médicas de los radioisótopos, los aceleradores y los reactores han ayudado a los avances tecnológicos de maneras insospechadas; y por otro lado, en la producción de energía eléctrica por reactores nucleares son las radiaciones producidas por la fisión nuclear las que calientan el fluido que mueve las turbinas. En algunos países la energía nuclear predomina sobre las otras fuentes, por lo que es indiscutible el beneficio para esos países. (22)

3.4. TIPOS DE RADIACION IONIZANTE

Las radiaciones se califican de ionizantes cuando su energía es suficiente para ionizar las estructuras atómicas o moleculares: es el caso de las radiaciones corpusculares y de las radiaciones electromagnéticas X y gamma, a diferencia de las demás radiaciones electromagnéticas (ultravioleta, visible, infrarrojo, hertziana).

Las modificaciones de estructura de las diversas regiones de los átomos son el origen de las emisiones de las radiaciones ionizantes.

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

Rayos X. Son los que provienen de la perturbación de las capas electrónicas perinucleares por partículas aceleradas o fotones (provocando saltos de electrones de una órbita a otra).

Rayos gamma. Son radiaciones electromagnéticas, su modo de emisión, es de origen nuclear. Su recorrido en la materia es muy variable, atraviesan habitualmente varios centímetros de plomo. Son emitidos según un espectro de rayos, característico del radionucleido emisor.

Partículas alfa. Son núcleos de helio expulsados a gran velocidad, muy ionizantes debido a su doble carga positiva y de su gran masa; son detenidas por una simple hoja de papel o algunos centímetros de aire. Su velocidad, así como su energía, es característica del radionucleido (espectro monoenergético).

Las partículas beta. Son electrones expulsados, a gran velocidad; cuanto mayor es su velocidad mayor es su penetración; de ordinario son detenidos por algunas décimas de milímetros de metal o algunos metros de aire. A la inversa de las anteriores son emitidas según un espectro continuo, siendo pues poco características del radionucleido emisor.

Los neutrones. Se liberan principalmente en el proceso de fisión de núcleos de uranio. En estado libre, el neutrón es radiactivo, es decir se desintegra espontáneamente.

Al no poseer carga eléctrica, los neutrones no pueden ser frenados por interacción a distancia, sino solamente por choque directo contra los núcleos de la materia atravesada, fenómeno de baja probabilidad. Los neutrones rápidos tienen un gran poder de penetración y son progresivamente moderados a lo largo de su recorrido. Los neutrones lentos son capturados por los núcleos con emisión de un fotón gamma (captura radiactiva). Los choques con los núcleos de hidrógeno son los mejores frenos, de ahí la eficacia de los materiales ricos en hidrógeno para absorber los neutrones (agua, parafina). (8)

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

Las radiaciones ionizantes (electromagnéticas y partículas) comprenden las siguientes modalidades

1.-Electromagnéticas: rayos X y rayos gamma.

2.-Partículas: partículas alfa, electrones, neutrones y partículas beta. (23)

Ahora, clasifiquemos cada tipo de radiación, para así poder seleccionar en cada caso el detector más apropiado.

Tipos I

En primer lugar vale la pena agrupar protones, partículas alfa, iones pesados en general y productos de fisión. Todos ellos se caracterizan por tener carga positiva y una masa grande, por lo menos 1,840 veces mayor que la de los electrones. Así pues al cruzar velozmente un material donde predominan los electrones, es como si una bala de cañón atravesara una región llena de pelotas de ping-pong. El proyectil va golpeando a los electrones, pero sin cambiar sensiblemente su trayectoria original, y sólo después de muchos de estos choques va perdiendo su energía hasta detenerse. Su trayectoria es esencialmente una línea recta. Su longitud depende de su energía inicial y de la densidad de la materia; por ejemplo, protones de 1 MeV y de 100 MeV en aluminio viajan respectivamente, 15 micras y 3.7 cm; en gas nitrógeno estos alcances son de 2.4 cm. y 72 m.(22)

Tipos II

Ahora vayamos a un segundo grupo de radiaciones, que incluye a los electrones y las partículas beta. Al chocar éstos con la materia es como si fueran pelotas de ping-pong sobre otras iguales, por tener los proyectiles la misma masa que los electrones atómicos. Ahora los proyectiles pueden ser rebotados y pueden cambiar la dirección notablemente en un sólo choque, por lo que la trayectoria es en zig-zag; incluso pueden retrodispersarse y salir del material.

Sus alcances no son todos iguales, y resultan bastante mayores.

El alcance de los electrones de 1 MeV en aluminio es aproximadamente de 1.5 mm, o sea, 100 veces más que el de protones de la misma energía.(22)

Tipos III

En el tercer grupo vamos a incluir los rayos X y los rayos gamma. Estos sufren principalmente tres efectos: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la formación de pares. Cuando sucede el efecto fotoeléctrico el fotón (X o gamma) transfiere toda su energía a un electrón del material; esta energía se usa por una parte para liberar al electrón y por otra parte para darle velocidad. Si sucede el efecto Compton, la energía del fotón original se reparte entre un electrón del material y un nuevo fotón más débil. Por último, si la energía del fotón original es mayor que 1.02 MeV, puede suceder la formación de pares, en que el fotón se transforma en par electrón-positrón (e^- , e^+).

Es de notarse que en los tres efectos el fotón original desaparece y se crean electrones energéticos. Son estos electrones secundarios los que luego producen la mayoría de la ionización del material. Los rayos X o gamma pueden atravesar bastante material antes de sufrir algunos de estos tres efectos, por lo que su penetración es grande.(22)

Tipos IV

Finalmente, vayamos al cuarto grupo, que en realidad sólo abarca un tipo de partícula, los neutrones. Recordemos que estos no tienen carga eléctrica, así que no pueden interactuar con los electrones del material, sino sólo los núcleos y cuando el choque es de frente. Esto hace que sean muy raros los choques de los neutrones, por lo que su penetración es grande al igual que en el caso anterior. Cuando un neutrón llega a chocar con un núcleo, rebota como una bola de billar. En el rebole el neutrón pierde parte de su energía, y el núcleo con que chocó la adquiere, transformándose éste en un ion pesado

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

que ioniza al material en su camino. Por lo tanto, también en este caso la ionización se debe a efectos secundarios.

Cuando hay un solo rebote, la curva de transmisión también es exponencial, y, como ejemplo típico, se necesitan 2.7 cm de concreto para reducir la intensidad inicial N_0 de neutrones a la mitad. Sin embargo, la historia no termina allí, pues el neutrón puede volver a chocar con otros núcleos, perdiendo algo de energía en cada choque hasta que su velocidad es tan pequeña como la de los mismos átomos del material. Estos neutrones térmicos, pueden mantenerse algún tiempo en el material hasta que son absorbidos casualmente por los núcleos, o decaen en un protón, un electrón y un neutrino.

Hay procesos colectivos donde desempeña un papel importante el hecho de que en un sólido se tiene una estructura cristalina. Los átomos están alineados en ciertas direcciones y planos característicos de cada estructura. La radiación se puede reflejar en estos planos preferentemente cuando su separación guarda cierta relación con la longitud de onda de la radiación y con su ángulo de incidencia. Esta relación se llama la ley de Bragg. (22)

Todos estos conceptos de como la materia frena a las radiaciones, pero a su vez sufre efectos, forman la base para el diseño de detectores de radiación, lo cual veremos a continuación.

3.5. FORMAS DE DETECCION DE LAS RADIACIONES

La característica de la radiación que más dificulta su comprensión es que es invisible. Sus efectos no se sienten de inmediato a menos que sea de muy alta intensidad; sin embargo, algunos de estos efectos pueden aflorar con el tiempo. Entonces puede uno estar expuesto a radiación sin saberlo y posteriormente podrán sentirse o no sus efectos, de acuerdo con las condiciones de la irradiación. Por ejemplo, cuando uno se saca una radiografía no se siente absolutamente nada. Las dosis recibidas en las radiografías en

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

general son tan pequeñas y esporádicas que el paciente no sufre efectos posteriores. Las personas que están expuestas a radiaciones más frecuentemente deberán vigilar que no sea excesiva la exposición, pues a veces los efectos pueden aparecer muchos años después.

El que la radiación sea invisible la coloca en una categoría de riesgos que requieren algunos cuidados especiales; por lo tanto necesitamos idear dónde está y en qué cantidad.

Con esta idea se han desarrollado muchos tipos diferentes de detector. Una manera de clasificarlos es separarlos en dos grupos: los de registro permanente y los de señal instantánea. Cada uno tiene su utilidad propia, pues son tan diversos los requisitos para detectores como diferentes usos hay de la radiación.(22) (3)

Detectores de registro permanente

1. Emulsión fotográfica

Su importancia histórica es grande, pues así se descubrieron la radiactividad, el radio, y los rayos X. Su funcionamiento se basa en que el efecto que produce la radiación en la película es el mismo que produce la luz. Todo mundo ha visto en una radiografía la imagen que dejan los rayos X. También puede usarse la emulsión para grabar el paso de radiaciones específicas, por ejemplo, partículas alfa o protones. Los dosímetros personales más comunes para registrar la radiación que recibe el personal son pequeñas placas fotográficas con absorbedores para clasificar el tipo de radiación y medir su intensidad. Es claro que hay que revelar la película para obtener la información, y esto puede ser una desventaja por el tiempo que toma. Por otro lado, una vez revelada la película, no se puede volver a usar.

En realidad hay muchos compuestos que, como la emulsión fotográfica, sufren cambios apreciables al ser irradiados, y los efectos son visibles aun sin un revelado. La magnitud

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

de estos cambios depende de la dosis de radiación recibida. El cambio que más se aprovecha en el empleo de estos materiales como dosímetros es la coloración o la densidad óptica (absorción de luz), y se debe a reacciones químicas que producen nuevos compuestos. Un dosímetro muy empleado es el Fricke, que consiste en una solución de sulfato amonio-ferroso en agua y ácido sulfúrico. La radiación transforma los iones ferrosos en férricos, con el siguiente cambio óptico que se mide en un espectrofotómetro. (22) (3)

2. Método de registro de trazas

Es para detectar partículas alfa, protones o productos de fisión. Hay algunas sustancias, como el vidrio, la mica y algunos plásticos, que sufren daños en su estructura al pasar las partículas. Si posteriormente son atacadas con reactivos químicos apropiados, afloran los puntos dañados por ser más fuerte el ataque químico en ellos. Estos pueden verse con un microscopio o a simple vista si se les somete a una intensificación posterior. Gracias a su propiedad de retener la información, los detectores de trazas se han usado con éxito para medir pequeñas dosis de radiación. Son muy útiles para medir la radiación ambiental. Hay que advertir, sin embargo, que son insensibles a los rayos X y gamma, y también a electrones.(22) (31)

3. Termoluminiscencia (TL)

Método para detectar radiación durante largos periodos y en pequeñas cantidades. Existen ciertos cristales, como el fluoruro de litio, que al recibir radiación sus átomos quedan excitados en estados que pueden tener vidas muy largas. Por lo tanto, parte de la energía de la radiación ionizante queda almacenada en ellos, acumulándose esta energía a medida que es expuesto el cristal. La manera de liberar la energía es calentar el cristal, con lo cual se desexcitan los átomos y emiten luz. La cantidad de luz emitida es proporcional a la dosis de radiación recibida. Los cristales termoluminiscentes también se

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

usan como dosímetros personales, y tienen la ventaja de que una vez que emitieron la luz almacenada, pueden volver a usarse como dosímetros, repitiéndose el ciclo varias veces. Ciertos materiales, siendo termoluminiscentes, pueden almacenar energía durante siglos. Se han usado para determinar edades, por ejemplo, de cerámicas. Al calentarse una vasija, tal vez hace muchos años, se desexcita, y pierde toda energía previamente almacenada; por lo tanto, de ese momento en adelante inicia un ciclo de absorción de radiación. Si uno luego mide la desexcitación y conoce o puede estimar la rapidez con que el objeto recibió radiación, se puede de allí calcular el tiempo durante el cual se acumuló, y por lo tanto la edad del artefacto. El método se ha empleado, por ejemplo, para determinar edades de algunas cerámicas de Teotihuacan y de Cholula. (22) (31)

4. Electroscopio

Se usa como dosímetro personal para medir dosis acumuladas. Al cargarse el electroscopio con una fuente de voltaje, un elemento móvil, que es una fibra de cuarzo, se coloca en una posición determinada. Al recibir radiación, la ionización ayuda a descargarlo, y la fibra se desplaza, lo cual se observa con ayuda de una lente. El desplazamiento depende de la cantidad de radiación recibida. (22)

Los detectores que hemos descrito aquí se caracterizan por que acumulan durante un tiempo la información sobre la radiación, y luego mediante algún método se pone de manifiesto.

El segundo grupo de detectores proporciona la información en el instante de recibirse la radiación.

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

Detectores de señal instantánea

1. Cámara de niebla

Es un recipiente que contiene un vapor sobreenfriado, por ejemplo de alcohol, que se condensa con gran facilidad. El sobreenfriamiento se logra por una expansión súbita con un émbolo, o bien enfriando con nitrógeno líquido. Al pasar una partícula, el vapor se condensa en los iones producidos, formando gotitas en la trayectoria de la partícula, con lo cual la vuelve visible durante un instante mientras se difunden las gotitas. La trayectoria se puede ver a simple vista, y si se sincroniza una cámara para tomar una fotografía en el instante que se produce, se puede tener un registro permanente de los eventos.(22)

2. Cámara de burbujas

En ésta se tiene un líquido a punto de hervir, en que se forman burbujas con cualquier perturbación; generalmente se usa hidrógeno líquido. Se escoge un líquido transparente para poder ver las burbujas formadas en la trayectoria completa de la radiación, y también generalmente se toman fotografías de los eventos. Con la cámara de burbujas se pueden ver trayectorias de partículas de muy alta energía, lo cual no es posible con otros métodos. (22) (31)

3. Detectores de gas

Entre estos detectores, están las cámaras de ionización, los contadores proporcionales y los detectores de Geiger-Müller. Todos ellos funcionan porque el gas que contienen se ioniza repentinamente al pasar una radiación. Si se le aplica un alto voltaje, los iones y los electrones producidos por la ionización se dirigen a los electrodos. Los iones positivos se dirigen al cátodo, y los electrones al ánodo, lo cual produce un pulso eléctrico muy corto que luego puede amplificarse y analizarse. Con las cámaras de ionización se intenta

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

recolectar todas las cargas producidas en el gas. Entonces el tamaño del pulso depende del número de iones producidos y, por lo tanto, de la energía de la radiación. Este detector tiene por eso una doble utilidad: saber el instante en que llegó la radiación y conocer su energía.

El contador proporcional es semejante a la cámara de ionización, pero se le aplica un voltaje más alto, de modo que los iones y electrones, al viajar hacia los electrodos, vuelven a producir ionización, y los nuevos iones y electrones contribuyen también al pulso eléctrico. De esta manera se logra una amplificación del pulso que se produce, y su tamaño resulta proporcional a la energía de la radiación.

En el contador de Geiger-Müller se aplica un voltaje todavía más alto, y los pulsos son muy grandes, de modo que necesitan poca amplificación posterior. Sin embargo, se pierde la proporcionalidad del pulso, así que sólo es un indicador de que hay radiación, pero no da información sobre su energía. Los contadores Geiger-Müller se usan mucho en monitores portátiles por su relativa sencillez. Se conectan a una aguja indicadora o a una bocina.(22)
(31)

4. Contador de centelleo

Aprovecha el pequeñísimo destello que produce la radiación en ciertas sustancias fluorescentes. Si se coloca una pantalla fluorescente en presencia de radiación en la obscuridad, y si uno permite unos minutos para que la vista se haga sensible, se pueden ver los destellos. Consta de un material fluorescente y transparente, ya sea sólido (v.gr. yoduro de sodio o antraceno) o líquido, y debe estar a oscuras. El destello que produce la radiación se transforma en una pequeña corriente eléctrica en un material que emite electrones cuando le llega luz. Luego esta corriente es amplificada para dar un pulso

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

eléctrico; el dispositivo que se encarga de esto se llama fotomultiplicador. El tamaño de los pulsos producidos es proporcional a la intensidad del destello y, por lo tanto, a la energía de la radiación. (22)

5. Detector de estado sólido

Es el detector más usado en la actualidad. Consiste en un cristal de silicio o de germanio que contiene impurezas que le permiten conducir electricidad. La radiación incidente produce ionización, y así libera cargas móviles que se pueden recolectar en un par de electrodos. Se parece su operación a la de una cámara de ionización, excepto que, en vez de suceder en un gas, las cargas se desplazan dentro de un cristal sólido. También en estos detectores se tiene información sobre la energía de la radiación. Se usan de silicio para detectar partículas cargadas y rayos X; de germanio para rayos gamma.(22)

En general no se puede detectar todos los tipos de radiación con cualquier detector, aunque todos éstos a fin de cuentas operan con la ionización producida. Cada tipo de detector tiene cierta utilidad, y habrá que cuidar que se use el apropiado. Por ejemplo, los detectores de gas necesitan un recipiente cerrado y sellado por lo que las partículas alfa o los protones de baja energía no se pueden detectar, pues no logran atravesar la pared. Por otro lado, para detectar los rayos gamma es preferible un detector sólido a uno de gas, porque la densidad del material determina la eficiencia del detector; de todos modos es posible que los rayos gamma atraviesen el detector sin dispararlo. Cada detector tiene sus limitaciones.

El observar neutrones requiere de técnicas especiales porque no ionizan directamente. Pueden sufrir choques o reacciones nucleares, impartiendo parte de su energía a otras partículas, y luego éstas ionizan. Por lo tanto, la estrategia para ver neutrones es poner en el detector una sustancia que cause muchos choques o reacciones y convierta así los

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

neutrones en radiación ionizante. Por ejemplo, un detector de gas que contenga hidrógeno hace que los neutrones choquen con frecuencia, en cada choque un protón (hidrógeno) recibe un golpe y retrocede, lo cual ioniza el gas. También se usan detectores de centelleo ricos en hidrógeno, como ciertos plásticos, para producir el mismo efecto. En algunos detectores se introduce especialmente una sustancia que produce reacciones nucleares con los neutrones. Casi cualquier detector puede usarse para neutrones si se le agrega un convertidor a radiación ionizante.

La electrónica moderna ha permitido un manejo muy complejo de los pulsos eléctricos que producen los detectores, o tal vez se podría decir que la necesidad de manejar información en experimentos nucleares tuvo que ver con el desarrollo de la electrónica moderna, incluyendo el uso de computadoras.

He aquí una lista de algunas operaciones que pueden llevarse a cabo con los pulsos, y que ayudan a conocer como se comporta tanto la radiación como la materia con que choca.

- a) Se pueden contar en gran cantidad, hasta millones por segundo.
- b) Se pueden amplificar hasta que tengan el tamaño requerido para usos especiales.
- c) Se pueden registrar en coincidencia, o sea, sólo cuando dos detectores distintos dan pulsos simultáneos.
- d) Se puede medir el intervalo entre dos pulsos, por ejemplo, el tiempo que tarda una radiación en llegar de uno a otro detector.
- e) Se puede analizar el tamaño de los pulsos, que depende de la energía de la radiación, lo cual da por resultado un espectro de energías.
- f) Se pueden analizar al mismo tiempo los pulsos de muchos detectores, sacando de cada uno de ellos la información más relevante.

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

El desarrollo de detectores de radiación es una de las principales ramas de la tecnología nuclear, ha resultado ser una actividad muy compleja, muy minuciosa y fundamental para la investigación de la naturaleza.(22)

3.6. FUENTES DE RADIACION Y SU UTILIZACION

Fuentes naturales

El hombre está sumergido en todo momento en un baño de radiación natural que actúa por exposición externa (fuentes telúricas y radiación cósmica) o por exposición interna resultante de la incorporación de radioelementos naturales en cantidades muy débiles (K 40, radio, radón principalmente). Estas radiaciones generalmente son de origen nuclear y proceden de la materia que constituye el medio terrestre (animado o inanimado) o de la materia extraterrestre del sol o de los astros (radiación cósmica).

Esta radiación natural varía con bastante amplitud (de 1 a 10 o incluso más en casos excepcionales) de un lugar a otro (en particular en función de la altitud y de la composición del terreno).(8)

Fuentes artificiales

Desde el principio de este siglo, el hombre ha añadido a esta radiación natural, unas fuentes de radiación artificial que diferenciaremos según su utilización.

1. Utilización médica:

- a) Generadores eléctricos (generadores de rayos X y aceleradores de partículas).
- b) Fuentes radiactivas encapsuladas (telegammaterapia, curieterapia, unidad de cobalto, cesioterapia e iridioterapia).
- c) Fuentes radiactivas no encapsuladas (exploraciones funcionales, radioinmunología, radioterapia metabólica o intersticial).

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

2. Utilización extramédica

- a) Generadores eléctricos (generadores de rayos X aplicados a la industria, aceleradores de partículas con reglamentación especial y destinadas a la investigación).
- b) Fuentes radiactivas encapsuladas (gammagrafia, medidas de grosor, de densidad, de humedad y de nivel, irradiación de diversos productos, eliminación de electricidad estática, detección de humos, radioluminiscencia).
- c) Fuentes radiactivas no encapsuladas (técnica de los trazadores tanto en la investigación de laboratorio, como en hidrología, sedimentología, etc; y radioluminiscencia de pinturas).
- d) Instalaciones nucleares e industrias conexas.
- e) Minas e industrias de tratamiento de sustancias radiactivas naturales. (8)

Clasificación de las fuentes de producción de las radiaciones ionizantes (aparatos) según su intensidad de voltaje.

- a) Radioterapia intersticial. Aparatos con voltaje inferior a 150 Kv.
- b) Ortovoltaje, "radioterapia convencional". Aparatos con voltaje entre 150 y 1000 Kv (1 MeV).
- c) Megavoltaje o supervoltaje. Aparatos con voltaje arriba de 1 MeV. (Bomba de cobalto con irradiación gamma generada por el cobalto 60 con voltaje de 2 MeV, aceleradores lineales con voltaje de 4 a 10 MeV, betatrones con voltaje de 20 MeV). (23)

Existe un informe, que dice: "sólo los aparatos con megavoltajes o supervoltajes, permiten abordar la radioterapia del cáncer con finalidades curativas".

Kaplan y Tubiana sostienen este informe y definen los beneficios del uso de supervoltajes, en comparación con los aparatos de menor voltaje:

1. Permiten administrar dosis homogéneas, tanto en regiones superficiales como en profundas.

3. GENERALIDADES DE RADIACION IONIZANTE

2. Proporcionan campos de delimitación bien definida, con lo cual es posible irradiar regiones cercanas a órganos vitales sin daño irreversible de éstos o con menor porcentaje de efectos secundarios.
3. La dosis conseguida es mayor en la profundidad de los tejidos sin que surgan los graves eritemas que antes limitaban esta terapéutica.
4. El tejido óseo absorbe menos radiación, con lo cual las radionecrosis óseas y cartilaginosas, antes frecuentes, a penas se observan.(23)

CAPITULO 4
ANTECEDENTES HISTORICOS

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

4.1. INTRODUCCION

Un modo apropiado de continuar este trabajo es conociendo las actividades de los hombres de ciencia, la manera como llevaron acabo sus investigación y comenzaron a saber sobre la sorprendente naturaleza de la radiación X, y de otras especies de radiación, revolucionando, este campo de trabajo y muchos otros como: la medicina y la industria.

Michael Faraday (1791-1867) quien introdujo las denominaciones de ánodo y cátodo, estableció las leyes de la electrólisis, observó la acción del campo electromagnético sobre la luz polarizada y atisbo las nociones de "campo" y "línea de fuerza" en el dominio del electromagnetismo.

James Clerk Maxwell (1831-1879), autor del Tratado de electricidad y magnetismo, fue quien supo definir y ampliar estas intuiciones iniciales de Faraday. A él se deben, en efecto, la teoría matemática de los campos eléctrico y magnético y la concepción de la luz como una ondulación electromagnética del éter (ecuaciones de Maxwell, 1873).

Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) poco después comprobó experimentalmente la teoría de Maxwell relativa a las ondas electromagnéticas (1887), que más tarde se llamarían en su honor ondas Hertzianas. Por lo que toca al conocimiento de las radiaciones, la obra de Hertz fue tan sólo un primer paso.

Al estudiar el efecto de las descargas eléctricas a través de gases enrarecidos (H: Geissler, W. Crookes), se descubrieron los rayos canales (E: Goldstein), los rayos catódicos (J. Plücker, J.W. Hittorf) y los rayos X (W.K. Röntgen), cuya naturaleza

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

ondulatoria fue ingeniosamente demostrada por M. von Laue, W. Friedrich y P. Knipping, mediante su difracción a través de redes cristalinas (1912).(26)

El importantísimo descubrimiento de la radiactividad iba a complementar insospechadamente todos estos hallazgos. Un azar de laboratorio hizo ver que los compuestos de uranio pueden impresionar placas fotográficas a través de envolturas opacas (Henri Becquerel, 1852-1908). La subsiguiente y tenaz investigación de un hecho tan sorprendente llevó a los esposos Curie a descubrir compuestos de un elemento nuevo: el rádium o radio, dos millones de veces más activo que el uranio (1898), y a crear una fecundísima rama de la ciencia y la técnica, la radioactividad. Con el descubrimiento del actinio en 1899 por André-Louis Debierne (1874-1949), comenzó a adquirir extensión el campo de la nueva disciplina.(32)

A partir del hallazgo de los rayos X por Röntgen en 1895, ha sido posible alcanzar el supremo decideratum de la mentalidad anatomoclínica, tan temprana y significativamente expresado por el nombre mismo de estetoscopio: una visión directa de las lesiones ocultas.(33)

4.2. LOS RAYOS X: SU DESCUBRIMIENTO

Los rayos X han existido desde siempre en el universo, sin embargo, nadie lo sabía, hasta hace más de 100 años, cuando la tarde del 8 de Noviembre de 1895 la humanidad se enteró de su existencia.

En la universidad de Wurburgo en Baviera, el profesor de física, Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923), se encontraba en su laboratorio haciendo experimentos con un tubo de vacío.

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

Un tubo sencillo que tenía dentro dos pequeñas placas metálicas separadas varios centímetros; un alambre partía de cada placa atravesando el vidrio del tubo.

Cuando las terminales de estos alambres se conectaban a una fuente de electricidad, una carga eléctrica cruzaba el vacío del tubo, desde una placa a la otra. Ninguna luz era visible dentro de la ampolla de vidrio, pero el vidrio adquiría brillantez cerca de una de las placas. Mientras trabajaba ese día Roentgen miró casualmente un estante colocado en el otro extremo del laboratorio, notando que una sustancia química contenida en uno de los frascos brillaba débilmente.

La investigación de Roentgen indicó que el frasco contenía un producto químico con el difícil nombre de platinocianuro de bario. Este es uno de los compuestos que brillan siempre cuando un rayo luminoso incide directamente sobre ellos, dichos compuestos se llaman fluorescentes.

El frasco en el laboratorio de Roentgen no se encontraba expuesto a la luz directa, así que el brillo estaba aparentemente relacionado con la corriente eléctrica dentro del tubo, ya que la corriente en el tubo hacía relucir el compuesto químico, aún cuando el tubo estuviese cubierto con un cartón negro. Parecía que había algo, similar a la luz, pero sin efecto sobre el ojo, que era producido cuando la corriente atravesaba el tubo y que podía atravesar el cartón negro.

El "algo" descubierto por Roentgen (el agente como lo llamó al principio) podía penetrar a través del vidrio, del cartón negro y el aire.

Durante las pocas semanas siguientes, Roentgen se formuló muchas preguntas. Pero no intentó encontrar respuestas completas. Sus experimentos eran por completo preliminares. Exploraba buscando respuestas provisionales que sirvieran de guía para un estudio posterior y sistemático.

Su primer paso fue construir una pantalla de papel pintada con una solución de platinocianuro de bario y colocarla en varias posiciones cerca del tubo de vacío. Siempre que la corriente atravesaba la ampolla la pantalla brillaba, con mayor intensidad cuando la

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

superficie pintada estaba vuelta hacia la región fluorescente del vidrio. Parecía como si los rayos salieran de ésa región y alcanzarán la pantalla. Como Roentgen suponía que el agente eran rayos de una naturaleza desconocida les puso el nombre de rayos X.

El segundo paso fue colocar varios objetos entre el tubo y la pantalla y observar el brillo de ésta al pasar la corriente por aquél. Más tarde, Roentgen estudió los objetos usados; encontrando como resultado que eran transparentes a los rayos X. Pero cuando Roentgen puso su mano entre el tubo y la pantalla vio "...la sombra más oscura que los huesos destacándose dentro de la sombra, sólo ligeramente menos oscura, de la mano". La carne, por tanto, no era completamente transparente a los rayos X y los huesos lo eran aún menos. Roentgen había dejado de observar simplemente si los rayos X atravesaban un material; comenzaba a medir el grado en que penetraban.

Roentgen también uso técnicas fotográficas en su investigación, no empleó cámara, sino sólo placas sensibilizadas.

De nuevo, Roentgen utilizó los objetos que tenía a su alcance. Colocó primero una placa sensible dentro de una caja de madera, después puso sobre la caja una llave de una puerta e hizo pasar una corriente por el tubo de vacío. Cuando reveló la placa, encontró en ella la imagen de la llave y obtuvo la impresión de las monedas que estaban dentro. A continuación fotografío su mano.

Roentgen deseaba compartir su entusiasmo y sus hallazgos iniciales con otras personas interesadas. En consecuencia, redactó sus notas de laboratorio con el fin de preparar un informe. Este informe lo leyó en la sesión de Diciembre de la Sociedad Científica Local, la Asociación Físico-Médica de Wurzburg. La disertación de profesor Roentgen tuvo gran significado para ambos grupos. Los físicos vieron el descubrimiento de los rayos X como un paso hacia un mejor conocimiento del comportamiento de la energía y de la estructura de la materia. Los médicos, como un acontecimiento de gran valor práctico para su profesión, especialmente en cirugía.(20)

4.3. EL INICIO DE LA RADIOLOGIA EN MEXICO

La historia de la radiología en México ha hecho el objeto, a su tiempo, de una publicación incompleta del Dr. Carlos Coquí.(34) Según éste autor, mientras en Europa y en los Estados Unidos de Norteamérica la radiología progresaba rápidamente a partir de su descubrimiento de Röntgen, en la América Latina avanzaba lentamente. Pero la exploración radiológica se inició de manera satisfactoria en México, Argentina y Cuba. En 1896 ya existían aparatos de rayos X en la República Mexicana: el primero en San Luis Potosí que utilizara en clínica el Dr. José María Quijano y Ramos, (35) y el segundo en el Hospital Juárez de México, con el que se tomó la primera radiografía en el Distrito Federal el 28 de Octubre de aquel año.(36) En la capital potosina, el Dr. Daniel García y Javier Espinosa y Cuevas fueron los iniciadores de la angiografía en 1897 y sus trabajos están entre los primeros en el mundo.(35) Allí también el Dr. Arturo Méndez obtuvo imágenes radiológicas a principio de nuestro siglo. Por otro lado el médico Roberto Jofre realizaba radiografías en Puebla. Y en la capital de la república, la tesis del Dr. Alfonso Pruneda sobre el diagnóstico de tuberculosis (1902) exhibía dos radiografías de tórax.

El Dr. Coquí, quién el 1o de Enero de 1934 fue nombrado jefe del departamento de rayos X en el Hospital General de México relata que el desarrollo de la radiología mexicana se debió al esfuerzo conjunto de médicos eminentes, como los doctores Ulises Valdés, notable cirujano, Julián Villarreal y otros. Entre los que serían propiamente especialistas radiólogos, destacan los doctores: Manuel Madrazo, presidente de la primera Sociedad de Radiología y Fisioterapia, Vicente Pérez de la Vega, jefe del departamento de radiología en los hospitales Militar y General de México, José Araujo, quién practicaba la radiumterapia, Fernando Hernández y Ruíz Cornejo. Cuando se estructuraron los especialistas, en los años 30, la radiología se desarrollo a grandes pasos, estimulada por varios clínicos. Coquí menciona específicamente al Dr. Ignacio Chávez quien, siendo

director de la facultad de medicina en 1933, tuvo la excelente idea de invitar al distinguido radiólogo cubano Pedro L. Fariñas para que diera un curso en México. Años después, en 1937, éste último fue invitado nuevamente por el Dr. Chávez, en aquel entonces director del Hospital General. Así pues, la radiología mexicana "avanzó en forma fulminante". En el Hospital Militar de la capital, durante el período 1943-1945, los doctores Gómez de Campo y Meneses Hoyos obtuvieron, por vez primera en clínica, opacificaciones de la aorta ascendente y coronariografías rudimentarias.(35) El Dr. Alejandro Celis introdujo la angiocardioneumografía en los años 1945-1946, al inyectar por un catéter grueso y a gran velocidad cantidades importantes del medio de contraste en la aurícula derecha. Esta técnica fue aplicada por Chávez y Dorbecker y el mismo Celis en 1947 para realizar las primeras angiocardiografías selectivas.(37) Debe reconocerse el mérito de Dr. Ignacio Chávez, insigne pionero no sólo de la cardiología, sino también de la radiología mexicana. A consecuencia del rápido desarrollo de la radiología en el país, se constituyó en 1946-1947 la Sociedad Mexicana de Radiología, sucesora de la Sociedad de Radiología y Fisioterapia. Y a principios de la década de los 60, se efectuó en el Centro Médico del Seguro Social, el primer curso de radiología para médicos graduados con el aval de la facultad de medicina de la UNAM.(38)

A CIEN AÑOS DEL DESCUBRIMIENTO DE LA RADIATIVIDAD NATURAL

El descubrimiento de la radiactividad natural por Henri Becquerel en 1896, poco después del descubrimiento de los rayos X por roentgen en 1895, señaló el comienzo del moderno estudio de la estructura del átomo.

Henri Becquerel se interesó en la investigación de la posible relación entre la fosforescencia que presentaban algunas sales después de sufrir irradiación con luz natural, y la fosforescencia de los vidrios bajo la acción de los rayos X. Entre otras sales utilizó el sulfato doble de uranio y potasio. Una de las experiencias que hizo consistió en envolver una placa fotográfica con un papel negro muy grueso, colocar un cristal de uranio

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

sobre ella y exponer el conjunto a la luz del sol. Cuando la placa fue revelada la silueta de la sustancia fosforescente apareció en negro sobre el negativo, demostrando que la sal de uranio había emitido radiaciones capaces de impresionarla.

A continuación modificó la experiencia situando una moneda agujereada entre la sal del uranio y la placa fotográfica; al revelar ésta encontró la imagen de dichos objetos sobre el negativo.

Al intentar repetir los anteriores experimentos, Becquerel tropezó con el tiempo lluvioso y nublado, por lo que puso todos los materiales en un cajón y esperó que hiciese sol. Unos pocos días después reveló la placa fotográfica y encontró que las siluetas en negro habían aparecido de nuevo con gran intensidad aunque la sal no había sido expuesta a la luz solar.

Para estar seguro de que ésta actividad no precisaba ayuda de una fuente luminosa externa, construyó un cajón bien cerrado y realizó una serie de experimentos con la placa fotográfica en el fondo de aquel. En una de ellas pasó cristales de sales de uranio directamente sobre la placa fotográfica, y obtuvo siluetas muy oscuras de los cristales. En otra colocó un trozo de aluminio entre los cristales de sal de uranio y la placa fotográfica. De nuevo obtuvo las siluetas, pero más tenues que las obtenidas sin la placa de aluminio, llegando a la conclusión de que las radiaciones activas eran emitidas por la sal de uranio y que la luz exterior no tenía ninguna influencia sobre dicha actividad.

Becquerel procedió entonces a experimentar con diferentes compuestos de uranio, utilizando las sales en forma cristalina y en desolución, hallando que todas ellas emitían radiaciones, fueran o no fosforescentes. Así, pues, llegó a la conclusión de que existía un elemento, el uranio, causante de éstas radiaciones. Confirmó ésta conclusión repitiendo los anteriores ensayos con uranio comercial. En experiencias posteriores se demostró que las radiaciones del uranio producía también la descarga de cuerpos eléctricamente cargados.(20)(28)

4.4. UNA MUJER EXTRAORDINARIA: CURIE

Fue Marie Curie la que puso el nombre de radioactividad a la acción de las sustancias radioactivas.

Los esposos Curie, Pierre y Marie, que conocían a Becquerel, se interesaron en el descubrimiento. Marie estudió algunos minerales de uranio y encontró que uno de ellos (la pechblenda, uraninita), parecía producir más radiación que la correspondiente a su contenido de uranio. Así iniciaron los esposos Curie una de las más abrumadoras investigaciones científicas de todos los tiempos: decidieron separar todas las sustancias que se encontraran en una tonelada de pechblenda. Durante meses acarrearón el mineral y concentraron la porción productora de los rayos, para determinar lo que producía rayos aún más intensos que los del uranio.

Finalmente anunciaron el descubrimiento de nuevos elementos, en 1898: al primero lo llamaron polonio, en honor de Polonia el país natal de Marie; al segundo lo denominaron radio.(20)

COMIENZA LA RADIATIVIDAD ARTIFICIAL

Muy poco después, Rutherford investigó el poder penetrante de las radiaciones de uranio, comprobando la existencia de dos tipos de radiaciones, una muy blanda fácilmente absorbida por la materia, que Rutherford denominó rayos alfa, y otra de tipo más penetrante, que denominó rayos beta. Sabemos ahora que la radiación que afectaba a la placa fotográfica de la experiencia de Becquerel era de ésta última clase.

El sistema empleado por Rutherford en el estudio de éstas radiaciones fue un método eléctrico basado en la ionización producida por la radiación a su paso a través de un gas. Las corrientes de ionización así producidas pueden utilizarse para medidas cuantitativas.

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

Muchos otros científicos empezaron a estudiar los rayos emitidos por las sustancias radiactivas. Entre éstos estaban Rutherford. Se encontró tres clases de rayos, llamados con las tres primeras letras del alfabeto griego: alfa, beta y gamma. Los rayos alfa eran determinados por una hoja ordinaria de papel o por algunos centímetros de aire. Los rayos beta atravesaban muchos decímetros de aire y delgadas laminillas metálicas. Los rayos gamma se detenían por 2.5 kilómetros de aire o unos 30 centímetros de plomo.

Además, se investigó el efecto de un imán en la trayectoria de éstos rayos, se encontró que los rayos alfa se curvan en una dirección, los rayos beta en otra. Mientras que los rayos gamma no eran desviados. Los científicos ya saben que un campo magnético obliga a curvar la trayectoria del movimiento de una partícula cargada, dependiendo el sentido de la curvatura de si la carga es positiva o negativa. En consecuencia, éste y otros experimentos llevaron a la conclusión de que los rayos alfa son núcleos positivos de helio, los rayos beta son electrones y los rayos gamma son muy parecidos a los rayos X, pero más penetrantes. Las partículas alfa y beta salen del núcleo con una gran cantidad de energía cinética y los rayos gamma se llevan también energía.(20)

Después del descubrimiento de la radiactividad, los núcleos y los isótopos, muchos hombres de la ciencia de principios del siglo XX estaban muy excitados por la búsqueda de toda clase de raros núclidos. Las armas con que contaban eran: los rayos alfa, beta y gamma del radio y del uranio. Los disparaban contra el núcleo y liberaban los núclidos. Para realizar esto usaron al principio electroscópios y pantallas de sulfuro de zinc que brillaban cuando las partículas chocaban contra ella. Luego fueron inventados otros aparatos, contadores G-M, cámaras de niebla, nuevas clases de contadores y, más recientemente, cámaras de burbujas y cámaras de chispas.

Las partículas alfa fueron las más utilizadas. Son más pesadas que las partículas beta y más efectivas para romper un núcleo. Rutherford, en 1919 fue el primero en transmutar un núcleo; disparó partículas alfa sobre átomos de nitrógeno y encontró que se producían protones.

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

Varios físicos obtuvieron un interesante resultado cuando bombardeaban berilio con partículas alfa. Se producían rayos muy penetrantes, que no eran afectados por un imán y no podían ser partículas cargadas. Y al principio se pensó que eran rayos gamma. Luego, Irene Curie "una hija de Marie y Pierre" y su esposo F. Joliot dirigieron los rayos sobre un bloque de parafina, un compuesto con hidrógeno, y protones (núcleos de hidrógeno) fueron expulsados de dicho bloque.

Los protones, procedentes de la parafina, poseían tanta energía y cantidad de movimiento que los golpeadores no era posible que fueran rayos gamma.

J. Chadwick un científico inglés, leyó la descripción del experimento de los Joliot-Curie investigó más y anunció, en 1932, que el problema de la energía y de la cantidad de movimiento podía resolverse correctamente si los rayos que parten del berilio consistían de partículas neutras que pesaran lo mismo que los protones. De éste modo fue encontrado el neutrón.

El premio nobel de física fue otorgado a Chadwick, en 1935, por éste descubrimiento.(20)

4.5. EL PRIMER RADIOISOTOPO

Irene Curie y F. Joliot pronto descubrieron que cuando el aluminio es bombardeado con partículas alfa, se comporta como el berilio, emitiendo neutrones.

Tanto en el berilio como el aluminio, los neutrones se emiten sólo mientras llegan partículas alfa. Cuando las fuentes de las partículas alfa se retira los neutrones dejan de aparecer. Puesto que los neutrones ya se habían descubierto, el hecho de que también pudieran obtenerse del aluminio tuvo interés, pero no produjo sensación.

Pero ahora los Joliet-Curie hicieron un descubrimiento que sí fue sensacional. Después que apartaron la fuente de partículas alfa, probaron el aluminio con un contador G-M y anotaron un conteo; dos y medio minutos después el conteo se redujo a la mitad; después

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

de otros dos minutos y medio, disminuyó otra vez a la mitad. El hecho de que el contador G-M reaccionara demostró que estaba presente un elemento radiactivo. Hasta entonces, y los únicos radioelementos conocidos eran elementos pesados como el radio y el uranio. Cuando los científicos bombardearon aluminio con partículas alfa ocasionaron un cambio, que produjo un nuevo elemento radiactivo de peso ligero, con una vida media corta de 2.5 minutos. Este fue el primer isótopo radiactivo obtenido por el hombre.

Los Joliot-Curie recibieron el premio nobel de química en 1935 por haber fabricado por primera vez un isótopo radiactivo.(20)

4.6. EL HOMBRE EN BUSCA DE MAS RESPUESTAS

El fin no está a la vista y puede que nunca lo esté. Después de haber usado la radiación X, las radiaciones del radio del uranio y de otros elementos radiactivos, los hombres de ciencia empezaron a inventar aceleradores de partículas para conseguir partículas alfa, protones y electrones cada vez más veloces y usarlos como balas para romper el núcleo. Encontraron que al destrozarse algunos núcleos con esas partículas rápidas obtenían corrientes de neutrones. Luego usaron los neutrones para destruir otros núcleos. Los deuterones acelerados y los tritones también han sido usados como proyectiles. Cada año crece la lista de nuevos descubrimientos sobre la naturaleza de las radiaciones existentes y otras nuevas de radiación, añadiéndose al conocimiento que tiene el hombre de la naturaleza del universo. El motivo por el cual el hombre ha seguido estudiando éste campo de trabajo es debido a la utilidad que les ha dado en la industria, en la medicina y en otras áreas.(20)

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

4.7. LOS AVANCES MAS RECIENTES

Tomografía axial computarizada (TAC).

Fue introducida en la práctica por el Dr. Godfrey Hounsfield, miembro de los laboratorios de investigaciones centrales EMI de Inglaterra, en 1972. Por eso se le otorgó el premio nobel en 1979, compartido con el Dr. A. M. Cormack quien se había dedicado a los problemas de física.(39) La idea básica de Hounsfield derivaba del hecho de que los rayos X, que pasan a través del cuerpo humano, pueden proporcionar información acerca de todos los constituyentes del cuerpo, que encuentran en su camino. Pero gran parte de ésta información no podía recogerse en el estudio convencional con placas radiográficas.

La TAC consiste en la reconstrucción, por medio de una computadora, de un plano tomográfico de un determinado objeto. La imagen se consigue por medio de medidas de la absorción de rayos X, hechas alrededor del objeto considerado.

La primera imagen clínica se obtuvo, en 1972, en una mujer con sospecha de lesión cerebral. El estudio mostró claramente una imagen circular oscura, correspondiente a un quiste, en el cerebro. Poco después el Dr. J. Ambrose, neurorradiólogo del Hospital Morley Atkinson, inició estudios clínicos habituales.(40) El primer tomógrafo axial computarizado (EMI-Scanner) se instaló en los Estados Unidos de Norteamérica el 19 de Junio de 1973 para examinar pacientes de la Clínica Mayo. Entonces los exámenes estaban limitados al cráneo y al cerebro. Conforme se fueron introduciendo mejores técnicas, se logró realizar estudios de todo el cuerpo hasta llegar en la actualidad a la TAC helicoidal.

Resonancia magnética nuclear (IRM)

Ha llegado a ser una importante modalidad de exploración, debido a su capacidad de proporcionar imágenes de alta resolución y excelente calidad en cualquier plano, sin el uso de radiaciones ionizantes. Aunque su aplicación en la clínica es reciente, el conocimiento del fenómeno físico es antiguo. El descubrimiento básico se hizo en los Estados Unidos de

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

Norteamérica por dos grupos de investigadores, que trabajaban independientemente: uno en Stanford, encabezado por Félix Bloch.(41) y el otro en Harvard, dirigido por Edward Purcell.(42) Sus resultados desde los puntos de vista de la física clásica y cuántica, respectivamente, se publicaron al mismo tiempo en 1946. Más tarde (1952) dichos investigadores obtuvieron el premio nobel de física. El primer experimento biológico fue realizado por Félix Bloch en 1946, al colocar su propio dedo en un espectrómetro de RMN. La señal obtenida fue muy fuerte ya que estaba integrada por los protones de sangre, grasa y médula ósea, no pudiéndose lograr información especial de la disposición de éstos átomos en el dedo del investigador.

Las demostraciones preliminares acerca de la capacidad de generar imágenes microscópicas gracias a éste fenómeno, se conocieron en los años 1972 y 1973.(43)(44) Y sin embargo, no fue sino hasta 1977 cuando se obtuvieron las primeras imágenes crudas del cuerpo humano, producidas por resonancia magnética. Los primeros ensayos clínicos acerca del procedimiento se iniciaron en 1981 y éste se introdujo en muchos centros médicos en 1984.(26) Desde entonces el desarrollo de la IRM ha sido explosivo, gracias a la aplicación de la tecnología de computadoras y procesos magnéticos de reconstrucción utilizados en el TAC. En la actualidad, los estudios de imágenes (imagenología) han revolucionado los abordajes diagnósticos de muchas enfermedades. Los procedimientos, cada vez menos invasivos, han substituido casi por completo a la cirugía exploradora.

En conclusión, al considerar los avances rápidos y substanciales de la radiología en sus primeros cien años de vida, cabe evocar la exclamación del poeta: "poca favilla gran fiamma seconda" (A una pequeña chispa sigue poderosa flama).

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

4.8. UN DESASTRE NUCLEAR: A 10 AÑOS DE CHERNOBYL

Las consecuencias para el ambiente y la salud de la mayor catástrofe producida en una central nuclear perdurarán a través de generaciones.

"Era como si el mundo llegase a su fin... No daba crédito a lo que veían mis ojos. El reactor hecho trizas por la explosión. Nadie antes había contemplado semejante desastre. Como soy ingeniero nuclear, medí cuenta enseguida de las consecuencias que tendría lo que había pasado. Un infierno nuclear. Sentí pánico"... abril, 1986, jefe encargado del reactor nuclear

En 1986 estalló en la central de Chernóbil (en el norte de Ucrania), un reactor nuclear. La explosión y el incendio que produjo esparcieron cenizas radiactivas por buena parte de la Europa oriental.

Las consecuencias, de esta espantosa tragedia, ocurrida la noche del 25 y la madrugada del 26 de abril de 1986, se han extendido mucho más allá de la industria nuclear; los problemas que se han suscitado son fundamentales en una civilización dominada por la técnica. Antes de la explosión, Chernóbil era una pequeña ciudad apenas conocida para el resto del mundo.

Desde entonces, su nombre ha entrado en los anales de la historia asociado al peor desastre ambiental de origen técnico.

Sus repercusiones políticas aceleraron el derrumbe del imperio soviético.

La importancia de este desastre para toda la humanidad obliga a conocer las razones de que sucediera así como sus consecuencias. Son bien sabidos los hechos que condujeron a la explosión. El reactor número cuatro, un RBMK-1000, de 1000 megawatts, producía vapor que movía los generadores de electricidad. La noche del accidente los técnicos realizaban una prueba; querían ver cuánto tiempo funcionaban los generadores sin

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

energía. Para ello redujeron mucho la que producía el reactor y bloquearon el flujo de vapor hacia los generadores.

A la una y veintitrés con cuarenta segundos de la madrugada del 26 de abril, el genio nuclear había sido liberado.

El resultado fueron dos explosiones que hicieron volar por los aires la placa metálica de 2000 toneladas de peso que sellaba la parte superior del reactor y destruyeron el edificio donde se albergaba, a la explosión siguió fuego, durante diez días ardieron los cientos de toneladas de grafito que hacían de moderador en el reactor. Los gases calientes que ascendían llevaron al exterior, convertidos en aerosoles, el combustible y los productos de fisión, es decir, los isótopos que se crean cuando los átomos de uranio se escinden. El combustible era, sobre todo, uranio, mezclado con cierta cantidad de plutonio, subproducto del funcionamiento normal del reactor. El plutonio es el elemento más tóxico que se conoce, y algunos de los productos de fisión eran muchos más radiactivos que el uranio o el plutonio. Entre los más peligrosos estaban el yodo 131, el estroncio 90 y el cesio 137.

Un penacho con estos elementos avanzó arrastrado por los vientos dominantes, hacia el norte y al oeste, y depositó partículas radiactivas sobre zonas situadas a miles de kilómetros. Entre las regiones afectadas no sólo estaba Ucrania, sino también Bielorrusia, Rusia, Georgia, Polonia, Suecia, Alemania y Turquía.

Ni siquiera los remotos Estados Unidos y Japón quedaron exentos de dosis mensurables de radiación. En Polonia, Alemania, Austria, Hungría y Ucrania hubo que destruir las cosechas y la leche contaminadas, mientras que en Finlandia, Suecia y Noruega hubo que deshacerse de los renos muertos que habían padecido la vegetación irradiada.

La cifra soviética oficial total de radiactividad liberada fue de 90 millones de curies. La cantidad total de radiactividad liberada, nunca se sabrá, pero la cifra soviética oficial de 90 millones de curies es un mínimo, el accidente fue comparable a un bombardeo nuclear de magnitud media. En los momentos inmediatos siguientes a la explosión y el fuego 187 personas manifestaron un envenenamiento agudo por radiaciones; 31 de ellas murieron.

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

El reactor destruido liberó cientos de veces más radiación que los bombardeos atómicos de Hiroshima y Nagasaki. La intensidad de la radiación gamma en la central nuclear superó los 100 roentgens por hora. Este nivel produce en una hora una dosis cientos de veces la máxima que la Comisión Internacional de Protección Radiológica admite para el público en un año.

En el techo del edificio destruido del reactor, el nivel de radiación alcanzó unos terroríficos 100,000 roentgens por hora.

La distribución de las partículas fue extremadamente irregular. Quedaron afectadas zonas extensísimas. Aunque el yodo 131 tiene una vida media de sólo ocho días, en las semanas siguientes al accidente este isótopo fue causa de una masiva emisión de radiación.

El estroncio 90 y el cesio 137, por su parte, son más persistentes. Se cree que a largo plazo las dosis de radiación mayores serán las debidas al cesio.

Más de 260,000 kilómetros cuadrados del territorio de Ucrania, Rusia y Bielorrusia tienen aún más de un curie por kilómetro cuadrado de contaminación con cesio 137. En su mayor parte, 26,000 kilómetros cuadrados es labrantío. Se ha restringido los cultivos en las zonas más afectadas, pero se sigue sembrando en los distritos menos contaminados.

El número de habitantes afectados asciende a más de 167,000 tan sólo de Ucrania, han abandonado sus hogares personas que vivían en las zonas más afectadas. En 30 kilómetros a la redonda de la central de Chernóbil apenas vive ahora nadie. Se han evacuado también 60 pueblos que estaban fuera de esa zona. Emplazamientos antaño dinámicos son ahora pueblos fantasmas. El gobierno ha tomado medidas, promulgando leyes y garantizando protección. Pero las repercusiones durarán generaciones.

Las consecuencias médicas son, por supuesto, las más serias. De 400 000 trabajadores "liquidadores" -personal militar y civil que se ocupó de enterrar los residuos más peligrosos y de construir en torno al reactor siniestrado un edificio especial, el "sarcófago"- han caído más de 30,000 enfermos. De estos, unos 5000 han quedado inválidos.

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

No es fácil averiguar, cuantas personas han muerto ya a causa del accidente. La Organización Greenpeace Ucrania ha calculado un total de 32,000 muertos. Puede que algunas, quizá muchas, de esas muertes se deban a la inmensa tensión psicológica que sufren quienes viven en la región contaminada.

El examen médico de un número de liquidadores, efectuado por investigadores de Kiev, han descubierto que la mayor parte de la muestra sufría una constelación de síntomas que, juntos parecen definir un nuevo síndrome médico. Entre los síntomas se aprecian fatiga, apatía, un menor número de células "asesinas naturales" en la sangre.

Las células asesinas naturales, un tipo de leucocitos, matan las células de los tumores y las infectadas por virus. La caída de su número debilita el sistema inmunitario. Algunos han llamado a éste síndrome "el sida de Chemóbil". Además de incrementarse la tasa de leucemias y tumores malignos, quienes padecen el síndrome se hallan expuestos a cardiopatías severas e infecciones comunes como bronquitis, tonsillitis y neumonías.

Al haber inhalado aerosoles que contenían yodo 131 inmediatamente tras el accidente, 13,000 niños de la región quedaron expuestos a dosis de radiación en la tiroides de más de 200 equivalente roentgen (por lo menos lo doble del máximo admitido para los trabajadores de la industria nuclear en un año entero). Hasta 4000 de esos niños sufrieron dosis de 2000 equivalentes roentgen. Por el yodo acumulado en la glándula tiroides han desarrollado una inflamación tiroidea crónica. La inflamación no produce síntomas por sí misma, pero ha empezado a generar una ola de casos de cáncer de tiroides.

Según los investigadores de Kiev, entre 1981 y 1985, en Ucrania, antes del accidente el número de cánceres de tiroides era de 5 anuales. Años después al desastre era de 22 al año. Entre 1992 y 1995 el promedio anual de fue de 43. De 1986 a finales de 1995 se registraron 589 casos de cáncer de tiroides en niños y adolescentes. En Bielorrusia la incidencia es aún mayor. Este cáncer forma metástasis fácilmente, pero si se le detecta a tiempo se cura extirpando la glándula. Los pacientes tienen entonces que recibir un tratamiento de por vida que les aporten hormonas tiroides.

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

Otra investigación, realizada por expertos ucranianos e israelíes, ha hallado que uno de tres liquidadores -sobre todo hombres de treinta y tantos años- ha padecido problemas sexuales o relacionados con la reproducción: impotencia, anomalías del fluido espermático, y merma de la capacidad fecundante de los espermatozoides. Han crecido los embarazos con complicaciones entre mujeres que viven en las áreas afectadas, y muchos chicos y chicas padecen un temor fóbico a la radiación.

Cierto es que las previsiones de los catastrofistas no se han cumplido -algunos de los cuales predijeron que el número de casos de cáncer superaría con creces los 100,000-. Con todo, la experiencia previa sobre los efectos a largo plazo de la radiación - procedentes de los estudios efectuados en Hiroshima y Nagasaki- indica que las pérdidas humanas seguirán creciendo. Pueden pasar muchos años antes de que los cánceres causados por la radiación se manifiesten.

El silencio sobre el peligro de la radiación en la propaganda soviética ha producido el efecto contrario al que se pretendía. La gente vive con un estrés continuo, asustada por su salud y, sobre todo, la de sus hijos. Este trauma mental ha generado un síndrome psicológico comparable al sufrido por los veteranos de las guerras de Vietnam y Afganistán. Entre los niños evacuados de la zona del reactor, la incidencia de trastornos neuropsiquiátricos se ha multiplicado de 10 a 15 veces.

La catástrofe y el éxodo consiguiente de grandes poblaciones han causado también un daño irreparable a la rica diversidad étnica de las zonas contaminadas. Buena parte del hermoso paisaje es ahora inseguro para las personas.

La zona de Chernóbil es hoy uno de los lugares radiactivos más peligrosos del mundo. Entre los escombros del reactor destruido hay decenas de miles de toneladas métricas de combustible nuclear con un nivel total de radiactividad de unos 20 millones de curies. El nivel de radiación en el reactor propiamente dicho, varios miles de roentgen por hora, es letal para toda forma de vida. Pero el peligro se extiende mucho más allá. En 30 kilómetros a la redonda hay unos 800 fosos de enterramiento, construidos de prisa y corriendo, donde,

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

sin más, se han vertido en pozos de paredes de arcilla residuos muy radiactivos (árboles incluidos que habían absorbido radioisótopos de la atmósfera).

Puede que éstos fosos expliquen la considerable contaminación de los sedimentos del río Dnieper y su afluente el río Pripyat, que suministran agua a 30 millones de personas. Los sedimentos del Pripyat junto a Chernóbil contienen, se estima, 10,000 curies de estroncio 90, 12,000 de cesio 137 y 2000 de plutonio. Para evitar que los compuestos solubles sigan contaminando los manantiales hay que trasladar los residuos a instalaciones adecuadamente diseñadas y equipadas, y esas instalaciones aún no existen.

Los dos reactores que todavía funcionan en la central de Chernóbil plantean también un gran problema (un incendio dejó fuera de servicio un tercero en 1992). Generan el 5% de la energía de Ucrania; el sector nuclear produce en conjunto el 40% de la electricidad del país. Ucrania y el Grupo de los Siete firmaron en diciembre de 1995 un acuerdo formal sobre un proyecto de cooperación para cerrar definitivamente la central de Chernóbil a lo largo del año 2000. El acuerdo establece que la Unión Europea y los Estados Unidos ayudarán a Ucrania a preparar planes que mitiguen los efectos del cierre en la población local. Prevé también mecanismos que permitirán a los países donantes acelerar la mejora de la seguridad de uno de los reactores aún en uso. Además, el acuerdo estipula la cooperación internacional para retirar de servicio la central y enfrentarse al mayor de todos los problemas: la sustitución duradera y ecológicamente adecuada del "sarcófago" que se construyó alrededor de las ruinas del reactor número cuatro.

El "sarcófago", de diez pisos de alto y paredes de más de seis metros de espesor, construidos sobre todo con hormigón, y grandes placas metálicas, se diseñó para que durase 30 años. Pero se edificó apresuradamente y en medio de una gran radiación. Por ello la calidad de la obra fue pobre, y la estructura necesita hoy una reparación inmediata. El metal empleado en el edificio se ha corroído y más de mil metros cuadrados de hormigón están muy agrietados. La lluvia y la nieve penetran en el interior. Si el

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

"sarcófago" se derrumbase -lo que ocurriría si hubiese un terremoto-, los escombros liberarían, muy probablemente, grandes cantidades de polvo radiactivo.

En 1993 se celebró un concurso internacional para encontrar la mejor solución a largo plazo; al año siguiente se seleccionó un ganador: Alliance, un consorcio encabezado por Campenon Bernard, de Francia. Su propuesta, que consiste en la construcción de un "supersarcófago" alrededor del existente, une empresas de Francia, Alemania, Gran Bretaña, Rusia y Ucrania. La eliminación final de los residuos del accidente llevará 30 años, por lo menos. Una posibilidad que se estudia es encerrar los residuos en un cristal especial.

Chernóbil no fue un desastre más del estilo de los que la humanidad ha sufrido a lo largo de la historia, como incendios, terremotos o inundaciones. Es un suceso de nuevo cuño con repercusiones en toda la biosfera. Se caracteriza por la presencia de miles de refugiados medioambientales, por la contaminación duradera del suelo, el agua y el aire, y, posiblemente, por un deterioro irreparable de los ecosistemas. Chernóbil es una demostración de la amenaza siempre creciente de que la técnica se nos escape de las manos.

Los ingenieros que diseñaron la central, no se atenían a las normas internacionales de seguridad. El RBMK-1000 es una adaptación de un reactor militar ideado, en su origen, para producir el material de las armas nucleares. Debería alarmar que los reactores RBMK todavía funcionen en Ucrania, Lituania y Rusia.

El desastre refleja la enorme responsabilidad de los científicos y demás expertos que asesoran a los políticos en las cuestiones técnicas.

La catástrofe subraya, además, el peligro que las centrales de energía pueden suponer donde halla guerra. Ni que decir tienen que en esas circunstancias son potencialmente vulnerables a los ataques terroristas.

4. ANTECEDENTES HISTORICOS

Chernóbil le ha enseñado a todas las naciones una lección trágica acerca de la necesidad de estar preparados si hemos de depender de la técnica nuclear. LA HUMANIDAD PERDIO LA INOCENCIA EL 26 DE ABRIL DE 1986. Nos hemos embarcado en una nueva era, la era pos-Chernóbil, y aún no hemos captado todas sus consecuencias.(27)

CAPITULO 5
CONSIDERACIONES BIOLÓGICAS DE
LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES
IONIZANTES EN EL ORGANISMO
HUMANO

5. CONSIDERACIONES BIOLÓGICAS DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN EL ORGANISMO HUMANO

5. CONSIDERACIONES BIOLÓGICAS DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN EL ORGANISMO HUMANO

5.1. INTRODUCCION

Es innegable que la radiación afecta a los organismos. Los puede enfermar o curar. Puede ser administrada como cualquier medicina, o tener efectos letales. Depende de cómo se use.

Sabemos que la ionización que produce puede dar lugar a transformaciones químicas en la materia. Si es materia viva, necesariamente interfieren estos cambios con las funciones vitales de las células que reciben radiación. Además, como algunas radiaciones pueden penetrar en el cuerpo, dichos efectos se pueden producir en órganos o en células de muy diversas funciones.

Los efectos que la radiación produce en el organismo se han clasificado en cuatro grupos: los que producen cáncer, las mutaciones genéticas, los efectos en los embriones durante el embarazo y las quemaduras por exposiciones excesivas. Los primeros dos grupos generalmente suceden cuando las dosis recibidas son pequeñas, pero prolongadas. El tercero, en una etapa de la vida en que el organismo es especialmente sensible por estar reproduciendo sus células a ritmo acelerado. El cuarto sucede en accidentes o en explosiones nucleares. Se han hecho muchos estudios sobre cómo cada uno de estos casos se presenta bajo diversas circunstancias. (22) (31)

5.2. TEORÍA DE LA ACCIÓN BIOLÓGICA DE LA RADIACIÓN IONIZANTE

Mecanismos de acción

No se han conseguido los detalles precisos de los mecanismos por los que la radiación ionizante produce sus efectos biológicos. Se han propuestos dos hipótesis: 1) la teoría de la diana y 2) la teoría de la acción indirecta.(45) (8)

La teoría de la diana

Esta teoría propone que la energía radiante actúa por impactos directos en moléculas diana dentro de la célula. Se han propuestos modelos que implican un único impacto a una célula, impactos únicos o múltiples a muchas células o múltiples impactos a una célula. Sea cual sea el proceso, se piensa que la diana clave de las lesiones es el DNA, específicamente sus uniones y puentes. El ataque al DNA puede producir mutaciones, con sus potenciales alteraciones genéticas o cancerígenas, o inhibición de la división celular y muerte celular, con efectos somáticos agudos. Sin embargo, la radiación también puede alterar otras macromoléculas como las membranas y enzimas.(45)

La teoría de la acción indirecta

Propone que la energía radiante produce su efecto generando radicales libres calientes el interior de las células, según la siguiente secuencia: la energía radiante absorbida produce radiolisis del agua celular con formación de moléculas de agua ionizadas H_2O^+ , H_2O^- . Estas se disocian para formar los radicales libres H y OH; que a su vez inician una cadena de reacciones entre ellos mismos, sus propios productos de reacción y el agua tisular para formar otros radicales reactivos, tal como el H_2O_2 y HO_2 . Por último estos radicales libres interactúan con componentes críticos, entre los más importantes son las membranas, ácidos nucleicos y enzimas. De esta forma secuencial se produce un cambio bioquímico crucial que causa inhibición de la división celular y muerte celular.(45)

La energía radiante causa lesiones tanto por métodos directos como indirectos. Los rayos gamma y rayos X actúan primariamente por acción indirecta, mientras que es más probable que las partículas cargadas actúen por la acción directa de la diana. La transferencia de energía a un átomo o molécula diana de la fuente incidente de energía radiante ocurre en microfracciones de segundo, aunque su efecto tarde en hacerse evidente de minutos a incluso decenios. Por tanto la radiación tiene un período de latencia. Debe asumirse que durante este período de latencia ocurren reacciones secuenciales que terminan produciendo un efecto funcional o morfológico detectable.(22) (3) (8) (14)

5.3. LESIONES EN CELULAS Y TEJIDOS

Aunque la energía radiante puede afectar a las enzimas, macromoléculas y organelos citoplasmáticos, el blanco más vulnerable es el DNA nuclear.

La molécula de DNA sufre diversas alteraciones según la dosis, velocidad de administración y radiosensibilidad de las mismas. Entre estas alteraciones están la formación de dímeros de pirimidina, uniones cruzadas, roturas de doble filamento o de un solo filamento y diversas reordenaciones. La mayor parte de las roturas de un solo filamento se reparan rápidamente (a veces en minutos). Las roturas de doble filamento también pueden unirse rápidamente o con mayor lentitud, pero algunas son irreparables.(45)

Estas alteraciones llevan a muy diversos trastornos cromosómicos y de las cromátidas, como deleciones, roturas, traslocaciones, interadherencias de cromosomas, fragmentación e incluso todas las formas de morfología cromosómica anormal. El uso mitótico aparece a menudo desordenado o incluso caótico. Pueden encontrarse poliploidia

y aneuploidia. Las células pueden presentar tumefacción nuclear con condensación de la cromatina en grumos y, a veces, roturas de la membrana nuclear. Puede observarse todos los tipos de anomalías de la morfología nuclear. Pueden aparecer células gigantes con núcleos extremadamente pleomórficos o más de un núcleo y persistir durante años después de la exposición. Con dosis extremadamente elevadas de energía radiante, aparece rápidamente picnosis o lisis nuclear como marcadores de muerte celular.(45)

Además de afectar al DNA y a los núcleos, la energía radiante puede producir diversos cambios citoplásmicos, como tumefacción citoplásmica, deformación mitocondrial y degeneración del retículo endoplásmico. Puede haber roturas y defectos focales de la membrana plasmática y, de hecho, algunos investigadores afirman que las membranas celulares son blancos particularmente sensibles a la radiación.(45) (8) (31)

Los cambios vasculares son llamativos en todos los tejidos irradiados sean normales o neoplásicos. En el período inmediato a la radiación, los vasos pueden presentar solo dilatación, responsable del eritema cutáneo observado tan a menudo en radioterapia. Posteriormente o con dosis más elevadas, aparecen diversos cambios regresivos, como tumefacción de células endoteliales y vacuolización o incluso disolución con necrosis total de las paredes de pequeños vasos (como capilares y vénulas) los vasos afectados pueden romperse dando lugar a hemorragias o trombosarse. Estos cambios vasculares tienen una peculiar distribución parchada a lo largo del trayecto de un vaso y, es por esto, que en un corte de tejido algunos vasos se ven afectados y otros no lo parecen. Posteriormente, en los vasos irradiados se observa proliferación de células endoteliales e hialinización colágena con engrosamiento de la media, lo que produce un marcado estrechamiento e incluso obliteración de la luz vascular.(31) (45)

5. CONSIDERACIONES BIOLÓGICAS DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN EL ORGANISMO HUMANO

5.4. FISIOPATOLOGIA

Los tejidos varían su respuesta a la lesión por radiación inmediata, de acuerdo con el siguiente orden descendente de sensibilidad:

1. células linfoides
2. gónadas
3. células de la médula ósea en proliferación
4. células epiteliales del intestino
5. epidermis
6. células hepáticas
7. epitelio de los alvéolos pulmonares y de las vías biliares
8. células epiteliales del riñón
9. células endoteliales (pleura y peritoneo)
10. células nerviosas
11. células óseas
12. tejido muscular y conectivo

Si la dosis de radiación absorbida es suficientemente alta, se producirá la muerte de todas las células vivas (según pueden juzgarse por criterios anatomopatológicos de necrosis). Las dosis grandes, pero subletales, de radiación, pueden producir trastornos de la proliferación celular:

- a. La cifra de mitosis está disminuida, y
- b. la síntesis de DNA está reducida de dos maneras: Primera: La velocidad de síntesis se reduce; Segunda: Las células pueden continuar la síntesis de DNA y volverse poliploides.

5. CONSIDERACIONES BIOLÓGICAS DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN EL ORGANISMO HUMANO

Estos y otros efectos mal definidos de la radiación, ocurren con certidumbre razonable después de dosis tisulares importantes recibidas en las categorías 1 a 4 citadas anteriormente.(16)

La producción disminuida de células nuevas en los tejidos normalmente experimentan renovación continuada (por ejemplo mucosa entérica, médula ósea, gónadas) tiene por consecuencia hipoplásia, atrofia y, eventualmente fibrosis progresivas, según la dosis. Algunas células, lesionadas, pero todavía capaces de mitosis, pueden estar tan lesionadas que pasen por uno o dos ciclos generativos, produciendo una progenie anormal, como pueden ser metamielocitos gigantes y neutrófilos hipersegmentados, antes de morir.(16)

5.5. SINTOMATOLOGIA

La disrupción de los sistemas de renovación celular y lesión directa de otros tejidos, producen síndromes clínicos claramente definidos:

1. Síndrome por radiación aguda

Los síndromes, según la velocidad de dosis, áreas del cuerpo y tiempo tras la exposición, pueden dividirse en categorías cerebral, gastrointestinal y hematopoyética.

El síndrome cerebral

Se produce por dosis de radiación total del cuerpo extremadamente altas (>3.000 rads), es siempre fatal y consiste en tres fases: un período prodrómico de náuseas y vómitos; luego indiferencia y somnolencia que varían desde la apatía hasta la postración (posiblemente debida a focos inflamatorios no bacterianos en el cerebro o a los efectos de productos tóxicos inducidos por la radiación); y, finalmente un componente más generalizado

5. CONSIDERACIONES BIOLÓGICAS DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN EL ORGANISMO HUMANO

caracterizado por temblores, convulsiones, ataxia y muerte en el plazo de unas pocas horas.

El síndrome gastrointestinal (400 rads o más)

Se produce cuando la dosis de radiación es más pequeña, pero todavía más elevada. Se caracteriza por náuseas, vómitos y diarreas intratables, que dan lugar a deshidratación grave, disminución del volumen plasmático, colapso vascular y muerte. Se origina por la "toxemia" inicial debida a necrosis del tejido, y es perpetuado por la atrofia progresiva de la mucosa gastrointestinal. En último término las vellosidades intestinales están denodadas, con pérdida masiva de plasma a la luz del intestino. Si la regeneración de las células epiteliales intestinales es posible después de dosis grandes de radiación, la reposición masiva del plasma y los antibióticos durante los primeros 4 a 6 días mantienen a los pacientes vivos hasta que se regenera el epitelio. No obstante, la mejoría es sólo temporal, ya que habrá un fracaso hematopoyético que comience al cabo de 2 a 3 semanas. (8) (16)

El síndrome hematopoyético (200 a 1000 rads)

Con anorexia, apatía, náuseas y vómitos, puede ser máximo al cabo de 6 a 12 horas después de la exposición, el sujeto está asintomático. Durante éste período de relativo bienestar, los ganglios linfáticos, el bazo y la médula ósea comienzan a atrofiarse, dando lugar a pancitopenia. Esta atrofia es, a su vez, el resultado de dos procesos distintos -la muerte directa de las células radiosensibles y la inhibición de producción de las células nuevas-. En la sangre periférica, la linfopenia comienza de inmediato, haciéndose máxima al cabo de 24 a 36 hrs. La neutropenia se desarrolla más despacio. La trombocitopenia puede ser prominente al cabo de 3 a 4 semanas.

5. CONSIDERACIONES BIOLÓGICAS DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN EL ORGANISMO HUMANO

La susceptibilidad aumentada a la infección, se desarrolla debido a:

1. Una disminución, dependiente de la dosis, de los granulocitos y linfocitos circundantes.
2. Una disminución, dependiente de la dosis, de la producción de anticuerpo.
3. disminución de la migración de granulocitos y de la fagocitosis.
4. menor capacidad del sistema retículoendotelial de matar bacterias fagocitadas.
5. disminución de la resistencia a la difusión en los tejidos subcutáneos, y
6. áreas hemorrágicas en la piel y el intestino que fomentan la penetración y desarrollo de las bacterias. Hay susceptibilidad a la infección por microorganismos tanto saprófitos como patógenos. La hemorragia se debe principalmente a la trombocitopenia.

Con dosis de radiación aguda del cuerpo de >600 rads, la mala función hematopoyética o gastrointestinal, será fatal; con dosis < de 600 rads, la probabilidad de supervivencia guarda relación inversa con la dosis total. (16) (46) (47)

2. La "enfermedad por radiación" aguda tras la irradiación terapéutica.

(particularmente del abdomen) se caracteriza por náuseas, vómitos, diarrea, anorexia, dolor de cabeza, malestar y taquicardia de intensidad variable. El malestar remite en el plazo de pocas horas o días; su causa no se conoce.

3. Efectos tardíos

a) Efectos intermedios: la exposición prolongada o repetida a pequeñas velocidades de dosis por fuentes depositadas internamente o fuentes externas, de radiación, puede producir amenorrea, disminución de la fertilidad en ambos sexos, disminución de la libido sólo en la mujer, anemia, leucopenia, trombocitopenia y cataratas. La exposición más intensa o muy localizada, a causa de pérdida de pelo, atrofia y ulceración de la piel, queratosis y telangiectasia y finalmente, puede terminar por carcinomas de células

5. CONSIDERACIONES BIOLÓGICAS DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN EL ORGANISMO HUMANO

escamosas. Pueden aparecer osteosarcomas años después de la ingestión de nuclidos radiactivos afines al hueso, tales como sales de rádium. (16)

Ocasionalmente puede producirse una lesión graves de órganos expuestos tras radioterapia extensa para el cáncer. Cuando la exposición acumulada del riñón es >2.000 rads, se producirá en dicho riñón fibrosis por radiación y pérdida de la función. Las dosis grandes acumuladas en los músculos pueden tener por consecuencia miopatía dolorosa con atrofia y calcificación. Muy rara vez, estas alteraciones pueden ir seguidas de una alteración neoplásica, generalmente un sarcoma. La neumonitis por radiación y la fibrosis pulmonar subsiguiente, pueden ser graves cuando se irradian metástasis pulmonares, y pueden ser fatales después de una dosis acumulativa de >3.000 rads si el tratamiento no se extiende durante un período suficiente. Se han producido pericarditis y miocarditis por radiación después de radioterapia mediastínica extensa. Puede desarrollarse una mielopatía catastrófica después de que un segmento de la médula espinal ha recibido dosis acumulativas >4.000 rads. Después de una terapéutica vigorosa de los ganglios linfáticos abdominales para el seminoma, el linfoma o el carcinoma de ovario, puede desarrollarse ulceración crónica, fibrosis y perforación del intestino. El eritema de la piel y la ulceración de la piel se observan con bastante frecuencia durante la era de la terapéutica de rayos X con ortovoltaje, pero los fotones de alta energía producidos por las unidades o los aceleradores de cobalto penetran más profundamente en los tejidos y han eliminado virtualmente éstas complicaciones. (16)

b) Efectos somáticos y genéticos tardíos

La radiación altera el "sistema de información" de las células somáticas y germinales en la proliferación. En las células somáticas ésto puede manifestarse en último término como enfermedad somática -por ejemplo cáncer (leucemia, tiroides, piel, hueso) o cataratas- o, tal como sugieren los modelos animales, por un acortamiento inespecífico de la vida. Se ha

5. CONSIDERACIONES BIOLÓGICAS DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN EL ORGANISMO HUMANO

observado leucemia por radiación importante en los seres humanos. Se afirma, pero no se ha demostrado, que no hay dosis "umbral" para la leucemia, y que la incidencia aumenta con la dosis. El carcinoma del tiroides se ha observado 20 a 30 años después del tratamiento con rayos X, de la hipertrofia adenoidea y amigdalina, y el tratamiento de rayos X en los estados no malignos se considera hoy inapropiado, excepto en situaciones muy desusadas.

En la exposición de células germinales, el número de mutaciones está aumentado. Si las mutaciones se perpetúan por procreación, el curso de generaciones, podemos extrapolar, a partir de los estudios en animales, que se expresarán en un número cada vez mayor de defectuosos genéticos. Aun cuando esto no se ha observado en el hombre como resultado directo de irradiación de la célula germinal, la posibilidad representa un grave problema médico, ético y filosófico con respecto a las generaciones no nacidas. Impone una obligación moral limitar la exposición a la radiación a aquella que sea absolutamente necesaria para objetivos diagnósticos o terapéuticos válidos, y a un control estricto de la exposición ocupacional. (16) (31)

5.6. DIAGNOSTICO Y PRONOSTICO

Cuando una persona está recibiendo una radiación terapéutica o ha estado expuesta durante un accidente de laboratorio o de carga del bastón de combustible, la etiología es evidente. No obstante, el pronóstico depende de la dosis y de su distribución dentro del cuerpo, y su determinación puede requerir una revisión extensa del accidente y estudios seriados hematológicos y de la médula ósea para calibrar la gravedad de la lesión de la médula. (16) (31)

5. CONSIDERACIONES BIOLÓGICAS DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN EL ORGANISMO HUMANO

Cuando las formas cerebral o gastrointestinal se hallan presentes después de un accidente, el diagnóstico es simple, si bien el pronóstico es grave. La muerte se produce en el síndrome cerebral al cabo de unas pocas horas a unos pocos días; cuando hay síntomas gastrointestinales en el plazo de 3 a 10 días; y con los síntomas hematopoyéticos a los 8 a 50 días. En este último síndrome, la muerte puede producirse a partir de una infección sobreañadida en 2 a 4 semanas, o por hemorragia masiva entre la semana 3a y 6a.(16)

En las formas crónicas, en las que la exposición externa o no se conoce, o ha pasado inadvertida o es de escaso grado, el diagnóstico puede ser difícil o imposible. Es necesaria una investigación de una posible exposición ocupacional. En las instituciones con licencia del gobierno federal o estatal, se mantienen registros de la exposición a la radiación. Pueden practicarse estudios cromosómicos seriados para vigilar los tipos y frecuencia de las anomalías cromosómicas que es probable que se produzcan después de una exposición importante a la radiación, pero tales anomalías pueden haber preexistido o ser inducidas por causas que no son la radiación. La exploración periódica para descubrir cataratas precoces es apropiada en situaciones que llevan a una exposición crónica del ojo a la radiación, especialmente a los neutrones.(16) (31)

Los casos de supuesta exposición a la radiación son difíciles de valorar, ya que tienden a predominar los factores emocionales o psicológicos. A no ser que el individuo tenga demostrada una dosis externa o interna, el diagnóstico exacto probablemente es imposible. Las cifras hematológicas normales y la ausencia de enfermedad clínica objetiva permitiría tranquilizar al paciente y a otras personas interesadas. (16) (3)

5.7. PROFILAXIS

De muchos medicamentos y sustancias químicas se sabe que aumentan la cifra de supervivencia en los animales, si se administran antes de la irradiación; por ejemplo, los compuestos de sulfidrito. No obstante, ninguno tiene valor práctico en el hombre. La única forma cierta de evitar la exposición excesiva fatal o grave, es la aplicación rigurosa de medidas de protección y la observancia de los máximos niveles de dosis permisibles (máximum permissible dose = MPD). Estas cifras aparecen en forma de list. en los Basic Radiation Protection Criteria, NCRP Report No. 39, publicado por el National Council on Radiation Protection (P.O. Box 4867, Washington D.C. 20008 E.U.A.).(16) (22)

5.8. TRATAMIENTO

La contaminación de la piel por materiales radiactivos debe eliminarse inmediatamente con irrigación abundante con agua, y soluciones quelantes especiales que contengan EDTA cuando se disponga de ésta (Radiac Wash). Las pequeñas heridas por punción deben tratarse vigorosamente para eliminar la contaminación. La irrigación y el desbridamiento están indicados hasta que la herida esté libre de radiactividad. El material ingerido debe eliminarse rápidamente por inducción del vómito o lavado de estómago si la exposición es reciente. Si es inhalado o ingerido en grandes cantidades radioyodo, el paciente debe recibir solución de Lugol, o solución saturada de yoduro potásico (SSKI) para bloquear la retención tiroidea, y debe promoverse la diuresis. La monitorización de los pacientes expuestos es obligatoria, utilizando sondas de tipo manual para medir la tasa o un recuento sofisticado del cuerpo entero. La orina debe ser analizada en relación con radionúclidos no emisores de gamma, si se sospecha de una exposición a estos agentes. En los casos en que se sospeche la ingestión de rádium, pueden hacerse análisis de radón en la respiración.

5. CONSIDERACIONES BIOLÓGICAS DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN EL ORGANISMO HUMANO

Síndrome cerebral agudo, el tratamiento es paliativo, ya que resulta uniformemente fatal, y va encaminado a combatir el shock y la anoxia, aliviar el dolor y la ansiedad, y sedar para el control de las convulsiones.

Enfermedad por radiación debida a irradiación terapéutica del abdomen, los síntomas pueden controlarse en parte con una antiemético (proclorperacina, 5 a 10 mg por vía oral o intramuscular 4 veces al día) y pueden prevenirse administrándolo de antemano. Es obligatorio prestar atención a la nutrición y al equilibrio del líquido, merced a una cooperación íntima entre radioterapeuta y médico de cabecera. Con un planeamiento del tratamiento conjunto (dosis, intervalo de tiempo entre tratamientos, terapéutica de apoyo) la mayor parte de las dificultades pueden evitarse o reducirse a un mínimo.

Síndrome gastrointestinal, si se desarrolla después de irradiación de todo el cuerpo externa, el tipo y grado de la terapéutica estarán dictados por la intensidad de los síntomas. Después de una exposición modesta, pueden bastar los antieméticos y la sedación. Si puede iniciarse la alimentación oral, lo que mejor se tolera es la dieta blanda. Pueden ser necesarios líquidos, electrolitos y plasma, por las vías apropiadas, en grandes volúmenes. La cantidad y el tipo estarán dictados por los estudios de química en sangre, especialmente electrolitos y proteínas, presión sanguínea, pulso, recambio de líquido y turgencia de la piel.

Síndrome hematopoyético, su tratamiento, con sus evidentes factores, potencialmente fatales, de infección, hemorragia y anemia, es similar a la terapéutica de la hipoplasia de la médula ósea y de la pancitopenia por cualquier causa. Los medios terapéuticos principales son los antibióticos, y el suero sanguíneo. La asepsia rígida durante todos los procedimientos de punción de la piel, es obligatoria, como lo es el aislamiento estricto para prevenir la exposición a los patógenos.

Debe evitarse la quimioterapia antineoplásica simultánea o el uso de otros medicamentos supresores de la médula ósea, a no ser que estén fuertemente indicados por algún

5. CONSIDERACIONES BIOLÓGICAS DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN EL ORGANISMO HUMANO

trastorno clínico preexistente o alguna complicación súbita -debido al potencial de una mejor supresión de los elementos formadores de la sangre en la médula ósea-.

Los trasplantes de médula ósea se han demostrado útiles en los animales genéticamente idénticos. Si se sospecha de una dosis mayor a 200 rads, debe hacerse una tipificación de tejido y una búsqueda de médula ósea compatible. Si se dispone de un gemelo, un trasplante de médula ósea aumentará la probabilidad de supervivencia. Si los granulocitos y las plaquetas continúan disminuyendo a una velocidad constante y descienden a menos 500 y 20,000/mm³ respectivamente, se pensará en el homotrasplante de médula ósea, aún cuando sea pequeña la probabilidad de éxito y el trasplante pueda ir seguido de una reacción inmunológica potencialmente fatal injerto-*contra-huesped*.

Efectos somáticos tardíos debidos a exposición crónica grave, cuando se trate de esto, el primer paso será el alejamiento del paciente, de la fuente de radiación. En la deposición de radium, torio o radioestrocio en el cuerpo, la administración inmediata de agentes quelantes orales o parenterales (EDTA) aumentará algo la velocidad de excreción. No obstante, en las últimas fases estos agentes son inútiles. Las úlceras y los cánceres por radiación, requieren escisión quirúrgica y reparación plástica. La leucemia inducida por radiación, se trata como cualquier leucemia espontánea similar. La anemia se corrige con transfusión de suero sanguíneo. La hemorragia trombocitopénica puede reducirse con transfusión de suero sanguíneo. No obstante, estas medidas solo tienen valor temporal, ya que es poco probable que una médula ósea extensamente lesionada se regenere. No se ha ideado ningún tratamiento eficaz de la esterilidad, o de la disfunción ovárica y testicular, *excepto los suplementos de hormonas.* (16) (8) (14) (3)

CAPITULO 6
RADIOTERAPIA

6. RADIOTERAPIA

6. RADIOTERAPIA

6.1. DEFINICION

Una manera apropiada de comenzar este capítulo, es dando una idea amplia de radioterapia, apuntando que no hay un acuerdo definitivo sobre su definición, como punto de partida consideraremos algunas definiciones de autores relevantes en la materia, esperando con esto, se cumpla un objetivo más de este trabajo.

P. Farreras y C. Rozman consideraban a la Radioterapia como "el tratamiento de las enfermedades por medio de las radiaciones". (23)

Jean Hamburger conceptúa la Radioterapia como "el tratamiento por radiaciones ionizantes", y dice "consiste en entregar en un volumen anatómico (volumen blanco) una dosis de radiación (expresada en grays) en un cierto número de días (exposición) y en un cierto número de sesiones (fraccionamiento). Además agrega "esencialmente se emplea en el tratamiento del cáncer donde constituye, junto con la cirugía y la quimioterapia, un medio terapéutico mayor".(2)

M. John Kissane refiere dos modalidades de Radioterapia: curativa y paliativa. Anota que el término Radioterapia "representa el tratamiento de elección para una gran variedad de neoplasias" y la considera "una modalidad terapéutica para aliviar los síntomas causados por un tumor inoperable o erradicar por completo una neoplasia maligna".(3)

Blakinston define a la Radioterapia de la siguiente manera: "es el tratamiento de una enfermedad con cualquier tipo de radiación, incluyendo el uso de rayos X, rádium u otras sustancias radiactivas; por lo general se busca un efecto destructivo sobre los tejidos malignos". (4)

6. RADIOTERAPIA

"La Radioterapia incluye el tratamiento de la enfermedad maligna con radiación ionizante. Puede utilizarse sola con intento curativo, o junto con cirugía, con quimioterapia, o ambas", esta definición la proporcionó E. Carmack Holmes y Barry D. Mann.(5)

El doctor Raúl Romero Torres tiene un punto de vista por demás particular y digno de tomarse en cuenta, ya que para él la Radioterapia "tiene un amplio campo de aplicación en el tratamiento de las diferentes formas de cáncer. puede aplicarse con criterio curativo, paliativo y complementario, lo que depende de manera básica de los factores de radiosensibilidad y radiorresistencia del tumor y de los tejidos que lo rodean. Un tumor muy sensible a la radiación en un órgano con tejidos radiosensibles representa un serio problema para la Radioterapia". (6)

Y existen otros estudiosos de la Radioterapia que nos dan una definición que compagina con alguna de las que ya mencionamos previamente, podemos citar entre ellos a Marcelo Friedenthal (7), Mauricio García Sanz (17), José Ramón Escajadillo (18), Lester Burket Grace (29), M. González Barón, A. Ordoñez y J. Feliu (9), Alberto Folch y Pi y Jorge Orizaga Samperio (13), A McGehee Harvey (11), Vincent T. De Vita, Samuel Hellman y Steven A. Rosemberg (14) y muchos otros.

Una definición muy actual sobre Radioterapia es la que nos proporcionan: el doctor Francisco J. Ochoa y la C.D. Rocío G. Fernández López en su libro de Neoplasias Orales; radioterapia es aplicar una dosis homogénea y terapéutica de radiación, a un adecuado volumen tumoral, con los efectos mínimos posibles en los tejidos normales que lo rodean. Dicho volumen se define tanto clínicamente como por los hallazgos operatorios y el resultado de investigaciones especiales que incluyen radiografías, gamagrafías, ultrasonidos y estudios tomográficos; dichos estudios tienen una resolución limitada y demuestran solo la enfermedad macroscópica. Pero debido a que la definición tumoral a tratar debe ser lo más adecuada posible, el volumen tratado se determina por otros factores también, como el conocimiento de la historia natural de la enfermedad y los

6. RADIOTERAPIA

patrones de diseminación del tumor, el intento final del tratamiento de éste es radical o paliativo y la tolerancia de tejidos normales adyacentes.(1)

6.2. TELETERAPIA

La planeación en la radioterapia implica distintas consideraciones para la ejecución de la misma, como son la posición que debe guardar el paciente dado el tratamiento, localización del tumor y de órganos críticos vecinos a través de placas de rayos X que denominamos placas de localización tumoral y que se practican en un equipo de rayos X con fluoroscopia denominado simulador (pues en estas placas se definirá el llamado volumen blanco que será el volumen a tratar, el tiempo que se detecta los órganos críticos, esquematizando en ellos las zonas que deben ser cubiertas con protecciones especiales durante el tratamiento), también se debe considerar la elaboración de un plan de tratamiento con una dosimetría deseable y adecuada, y llevar a cabo las instrucciones para la implementación como son la inmovilización del paciente y las protecciones adecuadas necesarias, al tiempo que la prescripción debe ser lo más clara posible en lo siguientes puntos:

- Dosis total.
- Número de sesiones en que se dará el tratamiento.
- Dosis por cada sesión.
- Número de sesiones por semana.
- Inmovilización que se necesita durante el tratamiento.
- Qué energía y qué equipo de tratamiento (CO-60 o acelerador lineal para radiación externa).(1)

6. RADIOTERAPIA

6.3. TELECOBALTOTERAPIA

El cobalto es un material con un peso atómico de 58.9 y un número atómico de 27. Ocurre en la naturaleza como un solo isótopo que es el cobalto 59. La activación de éste isótopo por medio de neutrones producidos en reactores nucleares (atómicos), hace posible la obtención del cobalto como un isótopo radiactivo.(21) (46)

En el proceso se pueden obtener actividades de hasta 200 curies por gramo de cobalto, lo que significa que en 30 o 40 gramos de este material se acumulan de 6000 a 9000 curies. Esta circunstancia hizo que por primera vez fuera posible poner una fuente radiactiva pequeña a una distancia relativamente grande del paciente, emulando así la operación de un aparato de rayos X de alta energía, sin los costos ni las complicaciones de este último.(21) (46)

Las primeras fuentes de cobalto fueron producidas en el reactor nuclear de Chalk River en Canadá en 1951 y ese país sigue siendo el principal surtidor de estas fuentes radiactivas.

El cobalto 60 emite dos líneas de radiación gamma, cada una de ellas de alta energía (1.1 y 1.3 MeV), el material decae a níquel 60, que es estable. La vida media es de 5.3 años, lo que significa que al cabo de ese tiempo la actividad inicial disminuye a la mitad. (21) (46)

El cobalto 60 es usado como fuente de radiación externa o interna, ya sea intersticial, a manera de implantes de agujas o intracavitarias, como en el tratamiento de tumores ginecológicos.(21)

6. RADIOTERAPIA

Unidades de Radioterapia Externa: Bombas de Cobalto

La descripción general de una de éstas bombas comprende una fuente radiactiva encapsulada, cuyo diámetro mayor no sobrepasa a los 2 cm. Dicha cápsula o pastilla de cobalto, se encuentra dentro de un contenedor que se conoce como cabeza y que está construido básicamente de plomo, sin embargo en la vecindad de la fuente se usan metales como el uranio o el tungsteno, cuyo peso atómico es muy alto y sirven, junto con el plomo, para mantener el nivel de la radiación en la superficie del contenido, dentro de los límites que precisan los conceptos de protección radiológica. Se considera como límite permisible el de 2 mr. por hora, a un metro de la fuente. Estas cabezas tienen un dispositivo para movilizar la fuente radiactiva de una posición de "apagado" a una posición de "encendido". Dicho mecanismo se hace habitualmente por aire comprimido y cuando éste falla, se puede hacer manualmente. (21) (46)

Así mismo existe un sistema de diafragmas que están contruidos de plomo y de uranio, y que permiten obtener áreas de tratamiento precisas, generalmente cuadradas o rectangulares y tan extensas como campos de 28x28 cm. Dicho sistema colimador de haz puede ser complementado para tratar áreas o campos irregulares. (21) (46)

Por último existe un mecanismo de sostén y dirección del haz de radiación que puede ser estacionario o de movimiento, dependiendo del tipo de unidad a que se refiera.

Esta unidad está ubicada en su totalidad en un cuarto de tratamiento cuyo espesor de paredes protege al personal de radiaciones. Dicho cuarto está diseñado en tal forma que es posible vigilar al paciente estrechamente y hablar con él o escucharlo en caso necesario. (21) (46)

6. RADIOTERAPIA

Aspectos importantes de la radiación emitida por el cobalto 60

El primer aspecto importante de las características de radiación que emiten estas fuentes es su penetración. La dosis que se obtiene a profundidad es mayor que con aparatos de rayos X de otro voltaje.

El segundo aspecto importante es el efecto en la piel, la cual sufre menos, ya que la máxima ionización sucede por debajo de la capa basal de la misma y esto permite que al conservar la célula germinal de la piel, ésta pueda regenerarse rápidamente.

Debe mencionarse, sin embargo, que por debajo de la piel puede ocurrir fibrosis tardía si la dosis es excesiva.

El tercer aspecto es interesante es el que corresponde al hecho que con la radiación emitida por el cobalto 60, la energía absorbida en el tejido blando y en el hueso son iguales, significando una reducción en el daño que se puede producir en el tejido óseo. Asimismo, la dosis integral es menor, lo que permite una mejor tolerancia sistémica con disminución de síntomas generales en el paciente.(21) (46)

Una ventaja para el radioterapeuta es la simplicidad de su manejo y de su mantenimiento, que los componentes mecánicos de la unidad en forma global, son relativamente sencillos. Aunque la cobaltoterapia permite una planeación sencilla, de ninguna manera debe pensarse que esto no implica un máximo cuidado y atención en la colocación del paciente y en la calibración del aparato. Asimismo, se requiere de una serie de aditamentos para la dirección de haces y la concentración en los sitios deseados, basta mencionar el arco puntero, puntero posterior, los filtros de cuña, los campos múltiples, la oscilación y la rotación de la unidad. (21) (46)

6. RADIOTERAPIA

6.4. TELECESIOTERAPIA

En el tratamiento de cáncer de la mucosa bucal, no se utiliza, prácticamente, la radioterapia llamada convecinal, salvo en el carcinoma de labio, donde los resultados son semejantes a los obtenidos por el rádium en puntura.

Es interesante, sin embargo, consignar que con el uso de modernos localizadores, algunos radioterapeutas utilizan radiaciones convencionales en algunas localizaciones del cáncer en la mucosa bucal.

En los cánceres en donde la colocación de agujas de rádium resulta muy dificultosa (muy posterior o grandes carcinomas) utilizamos radioterapia de supervoltaje o megavoltaje con bombas de cobalto (o cesio) o con aceleradores lineales (46)

Si bien en las adenopatías el tratamiento ideal es la cirugía, es interesante señalar que se está utilizando radioterapia de supervoltaje como tratamiento profiláctico sobre las adenopatías.

Las bombas de cesio, son aparatos semejantes, donde la sustancia radiactiva es el cesio 137. Fleming en 1968, da su opinión sobre las ventajas y desventajas del uso de la bomba de cesio. Dice:

Ventajas:

1. Hay una economía en el equipo, por costo y lugar.
2. Mejor acceso a cabeza y cuello.
3. Es un isótopo con más larga vida media.

Desventajas: cutáneas-

1. A pesar de dar menos reacciones que la terapia convencional, ellas son más frecuentes que con la bomba de cobalto.

En síntesis:

Es un buen auxiliar en el departamento de terapia radiante.

Actualmente se está abandonando el uso de la bomba de cesio.

6.5. ACELERADORES DE PARTICULAS LINEALES Y CIRCULARES

Los grandes tumores malignos tienen zonas hipóxicas centrales, que son menos sensibles a las radiaciones convencionales y aún a las bombas de cobalto o cesio; esas zonas son fuentes de recurrencia, por falta de control de la lesión. Con el uso de formas de alta energía como los aceleradores de electrones, las cosas cambian.

Durante un tiempo, se usaron aceleradores de partículas de dos tipos: el ciclotrón que aceleraba deuterones con blanco de berilio y el que los aceleraba con blanco de tritio. Sin embargo el rendimiento era bajo.(46)

Hoy se construyen aceleradores lineales (L.I.N.A.C.) o circulares (betatrón) que para uso médico, alcanzan de 3 a 45 MeV (millones de voltios). Ya se usaban desde el año 1965 y aún antes.

Los aceleradores lineales de 10 o más MeV pueden ser generadores de fotones o electrones. Si tienen menos de 10 MeV sólo generan fotones. Los fotones tienen las indicaciones de la roentgenoterapia. Los aceleradores de 4 MeV equivalen aproximadamente a la cobaltoterapia: 3 MeV.

En cambio los aceleradores de electrones, cuya mayor energía indica mayor penetración (1 cm cada 3 MeV), permiten actuar en ciertas localizaciones más profundas antes no contempladas: tórax, adenopatías profundas de cuello, etc. Actualmente los aceleradores de partículas más usados son los lineales.(46)

Los aceleradores modernos, usados en medicina, impulsan electrones, traducidos en una fuente de iones que se constituye en proveedora de los proyectiles. Estos se dirigen hacia el dispositivo de aceleración, que puede estar integrado por una serie de placas, entre las cuales se aplica una diferencia de potencial o un sistema de aceleración progresiva, dadas por campos, que se desplazan a medida que avanzan los electrones. Finalmente estos poseen, a la salida del sistema de aceleración, la energía equivalente a la que adquiriría

6. RADIOTERAPIA

un electrón acelerado por una diferencia de potencial mucho mayor que la existente dentro del aparato de aceleración. La sincronización de estos pasos, es la que permitió obtener aparatos útiles de dimensiones pequeñas.(46)

La ventaja de los aceleradores lineales además de su alta energía, está en seleccionar a voluntad el rendimiento en profundidad. Pueden hacer un mejor blanco y existe una reducida dispersión lateral, respetando órganos o tejidos sanos que circundan al tumor o están cerca de la zona irradiada.(46)

Basta un sólo campo de irradiación para conseguir la distribución deseada. El acoplamiento de computadoras otorga al método una gran seguridad, porque la misma impide errores de técnica.(46)

6.6. BRAQUITERAPIA

Otra modalidad de tratamiento que se utiliza, sobre todo en los tumores de la cavidad oral, es la aplicación de implantes de material radiactivo, destacando principalmente el empleo de agujas de Cesio-137 y alambres de Iridio-192.

Para dicha aplicación, se define el volumen tumoral bajo los mismos principios previamente descritos en la radiación externa y, una vez establecido el volumen a tratar se lleva a cabo su implementación bajo anestesia general, con la toma de placas radiográficas ortogonales, que nos definen si la distribución especial de dicho material radioactivo cubre adecuadamente el volumen deseado del tratamiento.

6. RADIOTERAPIA

Una vez dado el visto bueno, un profesional en física médica determina la dosimetría de manera tridimensional, para darnos a conocer la dosis que recibe el paciente por hora y, por lo tanto, el número total de horas que debe mantenerse al paciente con dichos implantes radiactivos. Esta forma de tratamiento se conoce como terapia intersticial o braquiterapia.(1)

6.7. CURIETERAPIA O RADIUMTERAPIA

El radio es un radiosótopo natural que emite radiaciones alfa, beta y gamma. Es ésta última la que se utiliza en el tratamiento de cáncer.(46)

La dosis que se deberá emplear en un tratamiento con rádium, configura un gran interrogante, como sucede con cualquier otro tipo de tratamiento radiante. Sólo una gran experiencia podrá determinar el monto útil y la manera de usar éste material.(46)

Al tratamiento curieterápico de la cavidad bucal se llega luego de efectuar un concienzudo examen del paciente que se presenta por primera vez, considerando la etapa de evolución del tumor.

En los estadios iniciales los tumores malignos de la boca (carcinomas en su casi totalidad) se presentan en localizaciones bien determinadas y su tratamiento por rádium estará condicionado a que su extensión, no exceda las razonables posibilidades técnicas para lograr la curación o mejoría de los mismos.

6. RADIOTERAPIA

Los implantes con agujas de distintos pesos, en los carcinomas exofílicos o infiltrantes cubren prácticamente la casi totalidad de las neoplasias de tejidos blandos, no muy vecinos al lecho óseo y de posible acceso a las agujas de rádium. En una proporción menor (bóveda palatina, por ejemplo), se confeccionan aparatos protéticos en acrílico, que se cargan con tubos de rádium y se fijan mediante ganchos en el área que deseamos irradiar.

Las punturas se efectúan en uno o dos planos separados entre sí por distancias de 1 a 1.5 centímetros en forma paralela, fijando los hilos de las agujas con puntos de sutura o anudándolos en pares.

El plan de tratamiento vale decir la cantidad y tipo de agujas a emplearse, la dosis prevista y su distribución están condicionados por múltiples factores, a saber: tamaño del tumor y su base de implantación, sitio, naturaleza del mismo, de acuerdo con el informe de la biopsia, si es virgen de radiaciones o recidivado y en este último caso el componente del daño anterior, la edad del paciente, el estado general, las enfermedades concomitantes, posibilidades técnicas (trismo), etc.

El estado de los dientes se analiza con el fin de eliminar previamente las piezas que puedan entorpecer las maniobras o que se encuentren en malas condiciones de higiene o implantación.(46)

Técnica de colocación del rádium.

El paciente recibe una hora antes del tratamiento, premedicación con Valium de 10 miligramos intramuscular y 1 miligramo de atropina.

6. RADIOTERAPIA

En el momento de la intervención se efectúa anestesia local o troncular, con lo que se consigue una útil colaboración del enfermo.

Así mismo deberá permanecer internados, aislados, sin visitas de familiares y rigurosamente vigilados, ya que puede producirse la caída o desprendimiento de alguna aguja a pesar de su fijación y en algunos raros casos hasta su arrancamiento de los propios pacientes.

En ocasiones se recurre a la anestesia general con intubación.

Durante el período de tratamiento los pacientes serán alimentados por vía natural con régimen líquido o blando, sin sonda ni otro dispositivo auxiliar.

La dosis es calculada en dos formas: a) en milicurias, que expresan la cantidad de energía radiante emitida por la suma de los componentes del equipo, colocado durante el tiempo que dura el tratamiento, b) también se calcula la dosis en rad (unidad de absorción), mediante la confección de curvas de isodosis que nos indicarán en los puntos que se determinen, la cantidad de radiación llegada a los mismos, desde el foco radiante (cámaras y gammameter).

La dosis útil de cada caso en particular, puede oscilar entre los 3,000 y 10,000 rad en masas tumorales de gran tamaño, no previamente tratadas.

El empleo de la curieterapia está limitado casi exclusivamente a los carcinomas (epiteliomas) que, por otra parte, son el 90% de los procesos malignos de la cavidad bucal.

Los sarcomas y melanomas no son radiosensibles y por lo tanto serán pasibles de otra modalidad de tratamiento.

6. RADIOTERAPIA

Una vez efectuada la curieterapia, puede ser complementada en muchas ocasiones con roentgenoterapia, telecobalto o cesio, o una intervención quirúrgica.(46)

6.8. IRIDIOTERAPIA

El iridio fue utilizado por Henschke y Col., en el año 1954. En Francia es un muy usado en la actualidad.

Este material sorprendente reúne todas las bondades del rádium pero no sus peligros.

Con este elemento, por ejemplo, un cáncer de mama puede irradiarse en su totalidad en pocos días, sin inconveniente serio para nadie.

La paciente solamente recibe una simple anestesia local. Dada su fácil colocación, este material flexible puede contornear el tumor y adaptarse a su forma y tamaño lo que es imposible con el rádium. La dosis es homogénea sin puntos calientes ni fríos.

Está formalmente indicado en las localizaciones tumorales de difícil arribo quirúrgico, como la parte fija de la lengua, laringe y esófago; como único tratamiento o posirradiación a distancia o pre o posquirúrgico.(46)

En pocas horas pueden darse unos 6,000 rad, dosis que para completar con cualquier equipo moderno de teleterapia necesitaría unas 30 sesiones (unos 2 meses).

6. RADIOTERAPIA

La dosimetría es sencilla de realizar, pues su vida media de 74 días, lo hace lo suficientemente estable para el cálculo.(46)

Ventajas.

Se le recomienda en los cánceres ginecológicos, en la esfera otorrinolaringológica, en los muy extendidos de la piel y especialmente en los de mama.

Reemplaza al rádium en el cáncer bucal.

En pocas horas se llega a una dosis de 6,000 rad, lo que también significa para el paciente un método económico. Por otra parte no es necesario ajustarse a las complicadas reglamentaciones cada vez más estrictas, exigidas para el uso de las radiaciones ionizantes, como ocurre como el rádium.

Además, las aplicaciones del iridio son menos dolorosas que la del rádium y provocan menos edema.

Desventajas.

En la boca, el iridio da un 30% aproximado más de necrosis que el rádium.(46)

6.9. RADIOSENSIBILIZADORES

Se denomina así a los elementos que asociados a la radioterapia, mejoran su acción. Los principales sensibilizadores son: la oxigenoterapia (oxígeno hiperbárico), la hipertermia y algunas medicaciones.

La oxigenación amplifica las lesiones por radiación de las células y tejidos. La energía radiante interacciona con el oxígeno molecular produciendo radicales libres, como el superóxido, que se combinan con átomos y moléculas para ocasionar la lesión celular. El efecto oxígeno es importante en la radioterapia de las neoplasias. El centro de los tumores de crecimiento rápido puede estar mal vascularizado y, por tanto, hipóxico, lo que restaría eficacia a la radioterapia.

Hipertermia. La producción de altas temperaturas, aumenta la acción anticancerígena de las radiaciones y permite actuar también sobre células radiorresistentes. Las células son inactivadas por el calor, que además es un sensibilizador para las radiaciones ionizantes. Parece que el calor actúa interviniendo en el DNA, en el RNA y en la síntesis de las proteínas, reduciendo el consumo de oxígeno y haciendo más lábiles las lisozimas.

La aplicación de calor local, regional o sistémico solo o en combinación con quimioterapia, es considerada una modalidad terapéutica atractiva, pero esta en una etapa aun de investigación.

Drogas radiosensibilizadoras. Las más usadas son el metronidazol y el nisomidazole que actúan disfundiendo el oxígeno, algunas pirimidinas que aumentan la fragilidad del DNA ante las radiaciones y agentes anticancerosos como la actinomicina D, la bleomicina y la adriamicina.(46)

6. RADIOTERAPIA

6.10. FORMAS DE ADMINISTRACION

Las radiaciones ionizantes pueden ser administradas de diversas maneras, pero en cualquiera de los casos el fundamento siempre es el mismo.

1. Radiaciones externas (teleterapia): es cuando la fuente emisora esta alejada del paciente. Los equipos que se utilizan en esta práctica médica son la cobaltoterapia, cesioterapia, radioterapia y aceleradores de partículas.
2. Radiaciones intracavitarias: en éste caso las fuentes radiactivas son colocadas en cavidades naturales del organismo. Por ejemplo en cavidades ginecológicas, moldes intrabucales, coloides radiactivos en cavidades serosas. Los elementos más usados son el rádium 226, cobalto 60, cesio 137, iridio 192, oro 198, yodo 125 y fósforo 32.
3. Radiaciones intersticiales: aquí las fuentes radiactivas son implantadas directamente en la masa tumoral, sea en forma de agujas, semillas o alambres. Los elementos utilizados son el rádium 226, cobalto 60, cesio 137, iridio 192, oro 198 y yodo 125.
4. Radiaciones metabólicas: aquí el isótopo utilizado, ingresa al metabolismo del tejido a tratar, en forma similar a la que lo haría el elemento estable no radiactivo y entrega toda su energía en ese lugar; y se utiliza el yodo 131 y fósforo 32 iónico.

Estas cuatro formas de administrar las radiaciones pueden ser utilizadas individualmente o combinándolas entre si.

Las radiaciones ionizantes pueden emplearse como único tratamiento o combinadas con otras terapéuticas anticancerosas (cirugía, quimioterapia antineoplásica), antes o después de ellas.

a) Irradiación como único tratamiento: se emplea con criterio curativo en diversas lesiones y localizaciones de cánceres (piel, cavidad bucal, cuello uterino, laringe, etc.) o con criterio

6. RADIOTERAPIA

paliativo en casos avanzados, para calmar el dolor, cohibir hemorragias o mitigar molestias al paciente.(46)

b) Irradiación preoperatoria: determinado tipo de tumores (mamas, cavidad bucal, laringe, endometrio, cuello uterino) de indicación quirúrgica electiva pueden ser tratados en forma más efectiva, utilizando radioterapia preoperatoria. Con éste método se intenta reducir el tamaño tumoral, desvitalizar las células que pudieran desplazarse durante el acto operatorio, fibrosar y obstruir los vasos linfáticos para dificultar la diseminación por esa vía. Se utiliza la mitad o dos tercios de la dosis útil de radioterapia y en ese momento se observa si es posible su extirpación. En caso contrario, se continua con la dosis total externa o intersticial con cualquiera de los elementos indicados para tal fin y se asocia luego con quimioterapia. Por último, es posible eliminar quirúrgicamente el resto del tumor si aún subsiste.(46)

c) Irradiación postoperatoria: se utiliza siempre en los casos que a criterio del cirujano la excéresis no fue satisfactoria en cuanto a margen de seguridad se refiere y/o para tratar territorios de drenaje linfático de difícil acceso quirúrgico.(46)

d) Irradiación profiláctica: se efectúa sobre el cuello, en caso de no existir ganglios palpables, para tratar las posibles micrometástasis.(46)

6.11. DOSIMETRIA

Evidentemente, la dosis es importante para determinar el efecto biológico de la radiación. Pero además si se administra en dosis fraccionadas (como es habitual en radioterapia), el ritmo de administración modifica significativamente su efecto biológico. Aunque el efecto

6. RADIOTERAPIA

de la energía radiante es acumulativo, la administración en dosis fraccionadas puede permitir a las células reparar algunas de sus lesiones en los intervalos. La radioterapia de los tumores aprovecha el hecho de que, en general, las células normales son capaces de una reparación y recuperación más rápidas y, por tanto no sufren tantas lesiones por radiación acumulada por las células tumorales.

A continuación mencionaremos algunos procedimientos de fraccionamiento de las dosis:

1. Radioterapia protactada. Este método tiene por finalidad proteger la piel y tomar más sensible a la zona central hipóxica. Por ello se utiliza alto fraccionamiento de la dosis total que además permite una mayor dosis total.
2. Fraccionamiento de las dosis. Es clásico que la radioterapia externa, se haga a razón de 150 a 200 rads por día para llegar a una dosis total, entre 4000 y 6000 rads en un término de 3 a 7 semanas.
3. Técnica de dosis dividida. Se aplican de 250 a 300 rads diarios (hasta llegar a la mitad de la dosis total) y luego de 2 a 3 semanas de descanso, se hace otra serie. A veces después de la primera serie, el tumor es operable. Esta técnica se usa especialmente en cáncer de pulmón.
4. Multifraccionamiento. Repitiendo dosis de 100 a 150 rads, dos a tres veces al día, hasta alcanzar la dosis deseada. Se usa en tumores con crecimiento rápido.
5. Superdosis. De 600 a 1100 rads, una vez por semana, hasta completar la dosis útil. Se utiliza cuando se requiere disminuir rápidamente la masa tumoral y hacerla accesible a la cirugía.

CAPITULO 7
CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

1. Nunca se llegará a un lugar importante como Cirujano Dentista en el campo de las investigaciones sobre radiaciones ionizantes con fines terapéuticos, si nos limitamos a estudiarlas únicamente para aplicarlas con fines de diagnóstico.
2. Saber que la radiación puede ser mortal no debe amedrentarnos, es necesario en cambio aumentar nuestro conocimiento sobre la acción de las radiaciones en los seres vivos.
3. Se debe, pues, de acuerdo con el mandato bíblico, someter a la tierra -en el sentido más amplio de la palabra- con todas las fuerzas que encierra, incluyendo el uso más benéfico y sabio de las radiaciones ionizantes: la medicina (odontología) (Génesis 1:28).

CAPITULO 8
BIBLIOGRAFIA

8. BIBLIOGRAFIA

- 1.- Ochoa Carrillo Francisco Javier y Fernández López Rocío Gloria, Neoplasias Orales, División de Estudios de Universidad Abierta UNAM, 1a. Edición, México D.F., 1996.
- 2.- Hamburger, Jean, Pequeña Enciclopedia Médica, Editorial Panamericana, 17a. Edición, Buenos Aires, Argentina., P.P.381-383.
- 3.- Kissane M. John, Tratado de Patología, Capítulo 6, Editorial Médica Interamericana, 8a. Edición, México, 1986, P.P. 315-319.
- 4.- De Blakinston, Diccionario Breve de Medicina, Editorial Ediciones Científicas "La prensa Médica Mexicana", 1a. Edición en español traducida de la 3a. edición en inglés, México, 1983.
- 5.- Sabiston, David C. Jr., Principios de la Cirugía, Capítulo 16 Editorial Nueva Interamericana McGraw Hill, México, 1990.
- 6.- Romero Torres, Raúl. Tratado de Cirugía, Tomo 1, Editorial Interamericana McGraw Hill, 2a Edición, P.P. 387 y 591.
- 7.- Friedenthal, Marcelo., Diccionario Odontológico, Editorial Panamericana, Buenos Aires, Argentina., 1981.
- 8.- Desoille, H. Sherrer, J. Truhaut, R., Medicina del Trabajo, Capítulo 23, Editorial Masson S.A., España, 1990, P. 374.
- 9.- González Barón, M. Ordoñez, A. Feliu, J., Tratado de Medicina Paliativa y Tratamiento de Soporte en el enfermo con Cáncer, Editorial Médica Panamericana, Madrid, España, 1996.
- 10.- Lynch, Malcom A. Brightman, Vernon. Greenberg, Martin S., Manual Práctico de Medicina Bucal, Tomo III, 8a Edición, México, 1990, P. 511.
- 11.- McGenhee Harvey, A. Colvin, Michael. Owens, Albert H. Jr., Tratado de Medicina Interna, Editorial Interamericana, 22a. Edición, México, 1994, P.P. 469-471.

8. BIBLIOGRAFIA

- 12.- Tamayo, Pérez. Principios de Patología, Editorial Panamericana, 3er Edición, 1991, P.P. 410 y 776.
- 13.- Folch y P. Alberto. Orizaga Samperio, Jorge. Manual Práctico de Medicina Bucal, Tomo II, Capítulo 9, Editorial Interamericana, México, 1990, P. 370.
- 14.- Devita, Vincent T Jr. Hellman, Samuel. Rosenberg, Steven A., Cáncer: Principios y Práctica de Oncología, Tomo II, Capítulo 17, Editorial Salvat, 2a Edición, 1988, P. 387.
- 15.- Guyton. Tratado de Fisiología Médica, Editorial Interamericana, 7a Edición, México 1988.
- 16.- Sharp, Merck. Berkow, Robert. Talbott, John H., Manual Merck de Diagnóstico y Terapéutica, Editorial Dohme Internacional, 6a Edición, 1981, P.P. 1868-1874.
- 17.- Uribe, Misael. Tratado de Medicina Interna, Tomo II, Capítulo 467, Editorial Médica Panamericana, 2a Edición, 1995, P.P. 1689-1691.
- 18.- Escajadillo, José Ramón. Oídos, Nariz, Garganta y Cirugía de Cabeza y Cuello, Capítulo 27, Editorial El Manual Moderno, México, 1991, P.P. 720-743.
- 19.- Navarrete, Manuel. Cabrera, Luis., Introducción al Estudio de los Radioisótopos, Editorial Porcia, 2a Edición, México UNAM, 1993.
- 20.- Stollberg, Robert. Hill, Faith Fitch. Física: Fundamentos y Fronteras, Publicaciones Culturales, México D.F., 1968.
- 21.- El Hospital. Cobaltoterapia: su principio funcional y los beneficios que se derivan de su uso. Vol. 51, No. 6, Diciembre 1995-Enero 1996, P.P. 38-40.
- 22.- Richards Campell, Jorge., Las radiaciones ionizantes: reto y realidades, (lito Ediciones Olimpia) (coedición la ciencia desde México), Fondo de Cultura Económica, SEP y CONACYT, 1986, P.P. 9-11, 13.
- 23.- Farreras Valenti, P. y Rozman Ciril. Medicina Interna, Tomo II, Capítulo 14 "Oncología Médica", Editorial Marin, 9a Edición, 1978, P.P. 1059-1060.
- 24.- American Joint Commitlte on Cáncer. Manual for Staging of Cáncer, J.B. Lippincott Co, Philadelphia, 1983, P. 41.

B. BIBLIOGRAFIA

- 25.- Uribe Misael, Medicina Interna, Vol. II, Cap. 271, "Ricardo Sosa", Editorial Panamericana, 1988, P.P. 1865-1867.
- 26.- Michel, Alfredo. Vázquez, Jesús: El Centenario de la Radiología, Archivo del Instituto Nacional de Cardiología "Ignacio Chávez", México, Vol. 65, Sep-Oct, 1995, P.P. 389-394.
- 27.- Schcherbak, Yuri M., Chernóbil: diez años después, Investigación y Ciencia, Junio, 1996, No. 237, Edición Española de Scientific American, P.P. 46-51.
- 28.- Grafton Michael, A cien años del descubrimiento de la radioactividad, Geomundo, Editorial América S.A. (Editorial Eres), México, 1996, Año XX, No. 6, Junio, P.P. 564-571.
- 28.- Fuentes Fierro Patricia. Radioterapia en el siglo XX, Información Científica y tecnológica, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México, Junio, 1993, Vol. 15, No 201, México, P.P. 30-33.
- 29.- Burket Grace, Lester. Medicina Bucal: Diagnóstico y tratamiento, Editorial Interamericana, 7a Edición, México, 1980, P. 572.
- 30.- García Procel Emilio, Roentgen (galería), Rev. IMSS, México, Enero-Febrero, 1995, Vol. 33, No. 1, P.P. 38,66,88.
- 31.- Richards C. Jorge, Burillo Guillermina, Negrón Mendoza Alicia, ¿Que es la Radiación? Rev Información Científica Y tecnológica (ICYT), Vol 12, Num. 165, junio, 1990, P.P. 17-52
- 32.- Lain Entralgo P. Historia de la Medicina, Editorial Salvat, Barcelona, 1978, P. 471.
- 33.- Martínez Cortes F, La Medicina Científica y el Siglo XIX Mexicano, FCE, México 1987, P.P. 28-33.
- 34.- COQMC, Consideraciones sobre roentgen-diagnóstico II, Gaceta Médica Mexicana 1965, 105(8): 723-738.
- 35.- Quijano Pitman F. Padrón Puyou F. Alcocer Andalon A: Historia de la Radiología. Un antecedente potosino de la arteriografía, Rev. Méx. Radiol. 1987; 41:39-44.
- 36.- Villanueva B: Datos para la historia de la radiología en México, Rev. Méx. Radiol. 1969; 23:259-273.
-

8. BIBLIOGRAFIA

- 37.- Chávez I. Dorbecker N. Celis A: Direct intracardiac angiocardiology. It's diagnostic value. Am heart J. 1947, 33:560-593.
- 38.- Bassols F: Consideraciones sobre roentgen-diagnóstico III, Gaceta Médica Mexicana, 1965, 105 (8):739-742.
- 39.- Hounsfield on computerized axial scanning (tomography) Part I: Description of system. Br. J. Radiol 1973; 4: 1016-1022.
- 40.- Ambrose J. Hounsfield GN: Computed transverse axial tomography. Br. J. Radiol 1973; 46: 148-149.
- 41.- Blach, F. Hansen WW. Packard M: Nuclear Induction. (letter to the editor) Phys Rev 1946; 69:127.
- 42.- Purcell EM, Torrey HC, Pound Rv: Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid (letter to the editor) Phys Rev 1946, 69: 37-38.
- 43.- Damadian R: Apparatus and method for detecting in tissue, U. S. Pat No. 3789832, filed 17, March, 1972.
- 44.- Lauterbur PC: Image formation by induced local interactions: Examples employing nuclear magnetic resonance. Nature 1973; 243:190-191
- 45.- Ramzi S. Contran; Vinay Kumar; Stanley L. Robbins. Patología Estructural y Funcional Volumen I, Editorial Interamericana, McGraw-Hill, 4a. edición, México, 1990, pag.535-543.
- 46.- Grispan, David. Enfermedades de la boca (semiología, patología clínica y terapéutica de mucosa bucal), Editorial Mundi, Buenos Aires, 1983, P.P. 3143-3157, 3159-3185.
- 47.- Borghelli Ricardo F. Temas de Patología Clínica (con nociones de epidemiología bucal), Capítulo 35, Editorial Mundi, Buenos Aires, 1979, P.P.447-450.

