



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

DOSIMETRÍA DE RADIACIONES IONIZANTES CON SOLUCIONES DE ETANOL - CLOROBENCENO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

QUÍMICO

PRESENTA:

Carlos Chávez Mercado

1983.



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.

CONTENIDO.

iv

Página

Lista de cuadros.	vi
Lista de ilustraciones.	vii

CAPITULO I.

DOSIMETRIA DE RADIACIONES.

1.1. Introducción.	1
1.2. Conceptos básicos.	2
1.3. Unidades y términos comunes en dosimetría.	13
1.4. Efectos biológicos de la radiación.	22
1.5. Aspectos físicos de la absorción de la radiación.	23

CAPITULO II.

SISTEMAS DOSIMETRICOS.

2.1. Introducción.	35
2.2. Guías para la dosimetría.	37
2.3. Criterios para la selección de un dosímetro.	38
2.4. Dosímetros de referencia.	40
2.5. Dosímetros secundarios y de rutina.	68

CAPITULO III.

DOSIMETRO DE ETANOL-CLOROBENCENO.

3.1. Introducción.	105
3.2. Dosímetro de etanol-clorobenceno.	106
3.3. Parte experimental.	113
3.4. Cálculo de la dosis.	120

CAPITULO IV.

DISCUSION, RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

4.1. Discusión.	122
4.2. Resultados.	124
4.3. Conclusiones.	124

CAPITULO V.

BIBLIOGRAFIA.	133
---------------	-----

LISTA DE CUADROS.

vi

Cuadro.	Página.
1.- Otros dosímetros químicos y sus características.	87
2.- Otras películas plásticas para dosimetría.	96
3.- Soluciones de colorantes radiocrómicos 5.0 mM.	96
4.- Respuesta a rayos γ y descripción de varios dosímetros de película fotográfica.	100
5.- Otros sistemas dosimétricos.	103
6.- Dosis superiores límite para el uso del dosímetro de etanol-clorobenceno.	111
7.- Características de absorción de energía para el dosímetro de etanol-clorobenceno y algunos materiales.	112
8.- Resultados de las dosis medidas con los diferentes sistemas dosimétricos.	127
9.- Resultados de las mediciones de la D.óptica de las soluciones de ion Cl^- y de los niveles de dosis de radiación absorbidos.	130

Figura.	Página.
1.- Efecto fotoeléctrico	12
2.- Efecto Compton.	12
3.- Producción de pares.	12
4.- Equilibrio de radiación.	27
5.- Energía y absorbedores.	27
6.- Densidad de flujo y flujo en campos monodireccional y multidireccional.	34
7.- Un ejemplo de un espectro o distribución espectral para un campo de rayos X.	34
8.- Elementos de un calorímetro.	43
9.- Calorímetro de agua.	43
10.- Dibujo esquemático de una cámara de ionización.	52
11.- Corriente de saturación en una cámara de ionización.	52
12.- Variación de la corriente de ionización con el espesor de la pared de la cámara de ionización.	57
13.- Disposición del anillo de guarda en una cámara de ionización de forma cilíndrica.	57
14.- Curva de calibración para iones H^+ .	128
15.- Curva de calibración para iones Cl^- (volumétrico)	129
16.- Curva de calibración para el ion Cl^- (espectrofotométrico).	131
17.- Curva de calibración para los dosímetros de acrílico rojo.	132

CAPITULO I.

DOSIMETRIA DE RADIACIONES.

1.1. Introducción.

Debe parecer evidente que la frase "dosimetría de radiaciones" implica, justamente, la medida de la radiación mediante un dosímetro. Esencialmente esto es correcto. En dosimetría de radiaciones, el término dosis es una abreviación de dosis absorbida que se define como la energía impartida a la materia por la radiación ionizante por unidad de masa del material.

Aunque por lo señalado anteriormente, la medida de la dosis absorbida por la materia es el punto principal, la dosimetría de radiaciones es comúnmente aplicada a otros tipos de medida como son los siguientes.

- Medida de la energía liberada por partículas indirectamente ionizantes por unidad de masa de algún material de referencia.
- Medida del número de partículas o de sus energías incidentes en un punto dado.
- Medida de alguna función del número y energía de partículas incidentes en un punto dado!

Sin embargo, antes de entrar formalmente al tema, es importante tener presente los siguientes conceptos básicos.

1.2. Conceptos básicos.

1.2.1. Desintegración radiactiva y fuentes de radiación.

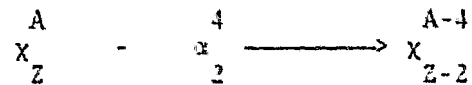
Ciertos núcleos son estables, es decir, se encuentran en equilibrio y muestran una tendencia a permanecer en la misma forma, mientras que otros son inestables y tienden a transformarse mediante una reorganización de sus componentes. Esta reorganización consiste en la expulsión o captura de alguna o algunas partículas elementales acompañadas o no de emisión de radiación electromagnética. El proceso anterior recibe el nombre de desintegración radiactiva o decaimiento radiactivo y los núcleos inestables en donde ocurren se llaman radionúclidos. Este es un proceso totalmente espontáneo y al azar, independiente de factores externos.^{2,3}

1.2.2. Tipos de radiaciones nucleares.

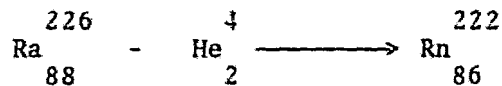
Las radiaciones emitidas por el núcleo atómico son principalmente las siguientes.

-Partículas α , que consisten en la asociación de dos protones y dos neutrones, los cuales pueden ser considerados como núcleos de helio. Tienen una masa de 4 u.m.a. (unidades de masa atómica) y dos cargas positivas. Cuando una partícula α es emitida por el núcleo, éste pierde dos unidades de car-

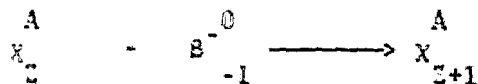
ga y cuatro unidades de masa convirtiéndose en el elemento correspondiente a estas nuevas características. Si es un radionúclido dado, la desintegración α puede expresarse de la siguiente manera:



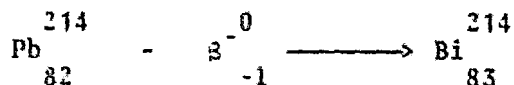
Ejemplo:



-Partículas β , las cuales tienen una masa despreciable y presentan una carga positiva o negativa. En la desintegración β^- , un neutrón del núcleo se transforma en un protón, un electrón y un neutrino. El protón permanece en el núcleo y el electrón y el neutrino son expulsados. El electrón expulsado en este proceso se denomina negatrón. El resultado final es que el radionúclido aumenta su número atómico en una unidad, permaneciendo su masa sensiblemente igual.

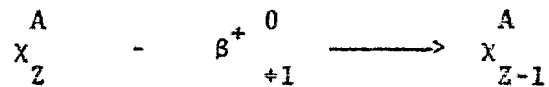


Ejemplo:

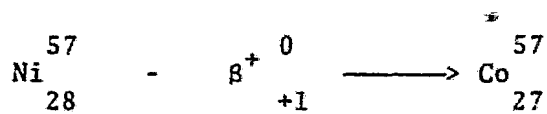


En la desintegración β^+ , un protón del núcleo se trans---

forma en un neutrón, un positrón y un antineutrino. El neutrón permanece en el núcleo y el positrón y el antineutrino son expulsados. El radionúclido reduce su número atómico en una unidad permaneciendo su masa sensiblemente igual.



Ejemplo:



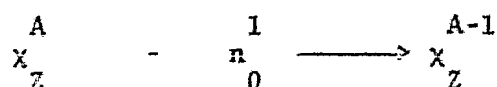
-Captura electrónica o captura K, en la cual un protón del núcleo se combina con un electrón extranuclear transformándose en un neutrón y emitiendo un neutrino. El electrón con que se combina el protón es generalmente de la capa K y a esto debe su nombre el proceso. El electrón capturado es reemplazado por algún electrón de una capa superior, emitiéndose radiación electromagnética. En este proceso el núcleo reduce su carga en una unidad y la masa permanece igual.



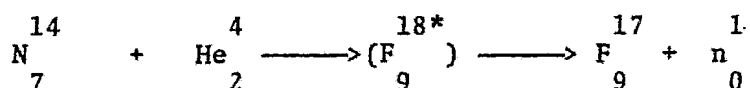
Ejemplo:



-Neutrones, que son partículas sin carga y con una masa de 1 u.m.a., por lo tanto, los núcleos que pierden un neutrón no cambian su número atómico, pero su masa decrece en una unidad.

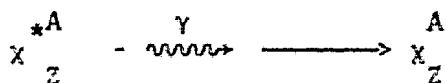


Ejemplo:

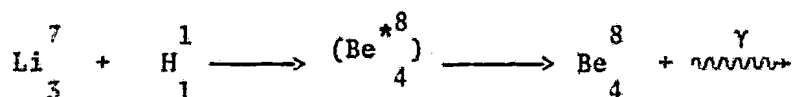


Esta reacción que puede realizarse artificialmente recibe el nombre de reacción (α, n).

-Radiación γ . En cualquiera de los procesos anteriores puede ocurrir que el radionúclido quede con mayor energía de la que corresponde en su estado estable. Entonces se dice que el radionúclido se encuentra en estado excitado, y este exceso de energía provoca la emisión de radiación γ , que es radiación electromagnética similar a los rayos X pero de longitud de onda mucho menor y por lo tanto, mayor energía.



Ejemplo:



Esta reacción recibe el nombre de reacción (p, γ).

En la desintegración α , las partículas son emitidas con una energía definida para cada especie en particular. En el caso de la desintegración β , la energía de la emisión de los positrones o negatrones no es definida, sino que muestra una distribución continua. Esto se explica suponiendo que la energía de la emisión se distribuye entre el positrón o el negatrón y el anti-neutrino o el neutrino, respectivamente. Sin embargo, la energía máxima de la emisión si es definida para cada especie. Por último, los rayos γ al igual que los rayos X, tienen energías bien definidas, ya que son producidos por las transiciones entre niveles de energía del átomo, pero, mientras los rayos γ son emitidos por el núcleo, los rayos X resultan de las transiciones de energía al pasar los electrones de un orbital a otro.^{2,3}

1.2.3. Leyes de la desintegración radiactiva.

Un átomo inestable puede desintegrarse en cualquier momento y es imposible predecir cuando lo hará, sin embargo, si se tiene un número considerable de átomos de la misma especie, es posible predecir por consideraciones estadísticas, que porcentaje de estos átomos se desintegrará en un intervalo de tiempo determinado.

Si definimos a λ como la probabilidad que tiene un átomo de desintegrarse en la unidad de tiempo, entonces λdt será la probabilidad que tiene ese mismo átomo de desintegrarse en el tiempo dt . Si existen N átomos que pueden desintegrarse en una muestra dada, $-\lambda N dt$ será el número de átomos que se desintegran en el tiempo dt , es decir:

$$dN = -\lambda N dt \quad (1.1)$$

El signo negativo indica que N decrece con el tiempo.

Reordenando la ecuación anterior e integrando tenemos:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln N \Big|_{N_0}^N = -\lambda t$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

donde N_0 es el número de átomos que se tenían en un instante cualquiera que se toma como inicial y N es el número de átomos que aún no se han desintegrado al cabo de un tiempo t .

La constante λ es característica de cada especie nuclear y se conoce con el nombre de constante de decaimiento radiactivo.

La vida media-concepto introducido por Rutherford en 1904-es el tiempo necesario para que un elemento radiactivo se desintegre desde una actividad dada a la mitad de esa actividad. Como la actividad (λN) es proporcional al número de átomos presentes en la muestra que no han decaído, entonces el tiempo $t_{1/2}$ al cual $N = 1/2 N_0$ viene dado, de acuerdo con la ley de desintegración, por la expresión:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

Así, la vida media será:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.69315}{\lambda} \quad (1.3)$$

La vida promedio es el tiempo que tarda un átomo en desintegrarse. Si en un primer intervalo de tiempo de $0-t_1$ se desintegran dN_1 átomos, en un segundo intervalo de tiempo de $0-t_2$ se desintegran dN_2 átomos y así sucesivamente, entonces la vida promedio τ , vendrá dada por:

$$\tau = \frac{t_1 dN_1 + t_2 dN_2 + \dots + t_n dN_n}{dN_1 + dN_2 + \dots + dN_n} \quad (1.4)$$

La forma integral de la ecuación anterior vendrá dada por:

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} t \, dN}{\int_0^{N_0} dN} = \frac{\int_0^{N_0} t \, dN}{N_0}$$

Substituyendo dN de la ec. 1.2 e integrando se tiene:^{3,4,6.}

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} \lambda t N e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

1.2.4. Interacción de la radiación con la materia.

Los efectos de las radiaciones sobre la materia son función de la masa, la carga y la energía de las radiaciones incidentes y de la naturaleza de la materia.

para el estudio de la interacción de las radiaciones con la materia es conveniente tratar por separado el caso de las radiaciones corpusculares y el de la radiación electromagnética.

-Interacción de las radiaciones corpusculares con la materia.

Las radiaciones corpusculares son partículas con una energía superior a los niveles energéticos normales, entendiéndose por niveles energéticos normales aquellos asociados a las partículas que se encuentran formando parte de átomos estables.

Al pasar a través de la materia, las radiaciones corpusculares pierden su exceso de energía por interacción con los átomos y principalmente con los electrones de los átomos que se encuentren en su trayectoria. como resultado de esta interacción los electrones de los átomos pueden ser desplazados de un nivel orbital a otro de mayor energía o pueden ser arrancados por completo del átomo. el primer proceso se llama excitación y el segundo ionización. Los iones producidos en esta forma, pueden causar a su vez ionizaciones posteriores en otros átomos y a estos efectos se les conoce como efectos secundarios. Después de un re-

corrido más o menos largo, las partículas alcanzan niveles energéticos normales y entran a formar parte de átomos estables.

-Interacción de la radiación electromagnética con la materia.

La radiación electromagnética emitida por los átomos inestables al desintegrarse, interacciona con la materia por cualquiera de los siguientes procesos.

- a) Efecto fotoeléctrico.
- b) Efecto Compton.
- c) Producción de pares.

En el efecto fotoeléctrico un fotón interacciona con un átomo cediéndole toda su energía. El átomo expulsa entonces un electrón con una energía igual a la diferencia entre la energía del fotón y la energía de amarre del electrón. La vacante orbital es ocupada por otro electrón proveniente de orbitas superiores, emitiéndose un rayo X con una energía específica igual a la diferencia entre las energías de amarre de los electrones de ambos niveles. Sin embargo, puede suceder que la energía de este rayo X sea absorbida por un electrón en una órbita cercana al núcleo con un nivel da baja energía, mismo que es expulsado y se conoce como electrón Auger (fig. 1).

En el efecto Compton o dispersión Compton sucede que un rayo γ que tiene una mayor energía que en el caso anterior, no es absorbido completamente en la colisión. En este caso, la energía del fotón provocará la emisión del electrón y se desviará en su trayectoria con una energía menor. La energía del rayo dispersado será igual a la diferencia de energía entre el rayo incidente y la energía de amarre del electrón expulsado.

El rayo dispersado puede sufrir varias colisiones antes de ser absorbido por efecto fotoeléctrico y al igual que en éste puede suceder la emisión de rayos X o de electrones Auger (fig. 2).

La producción de pares es el efecto menos frecuente de los tres debido a que el fotón incidente debe tener una energía muy alta.

En este proceso cuando el fotón es absorbido por la materia, se transforma en masa y produce dos partículas β , una negativa y una positiva. Como dos masas de electrón son producidas, es necesario como mínimo una energía equivalente a ellas ($2 \times 0.51 = 1.02$ MeV). Si la energía del fotón es mayor de 1.02 MeV, el exceso aparecerá como energía cinética del par formado. El negatrón puede a su vez producir ionización, en tanto que el positrón no tarda en chocar con un electrón, sucediendo una reacción de aniquilación de cargas y produciéndose dos rayos γ de 0.51 MeV de dirección opuesta. Esta radiación se denomina radiación de aniquilación (fig. 3).^{3, 5, 6, 7.}

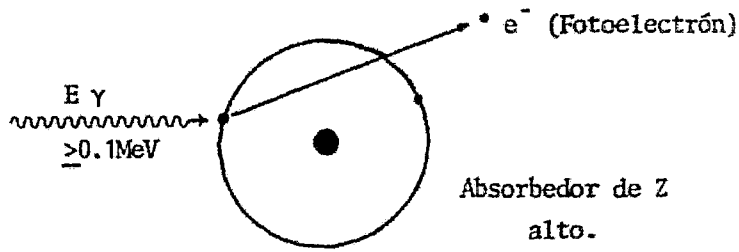


Fig. 1. Efecto fotoeléctrico.

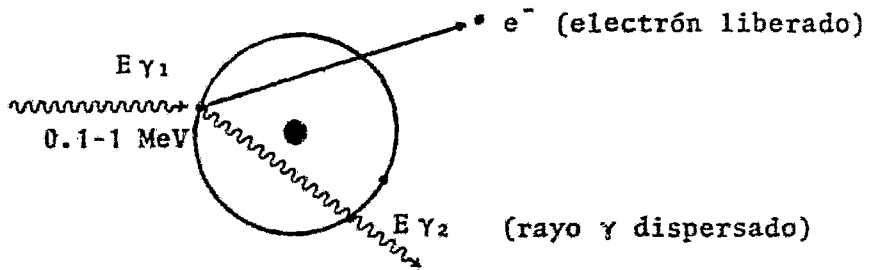


Fig. 2. Efecto Compton.

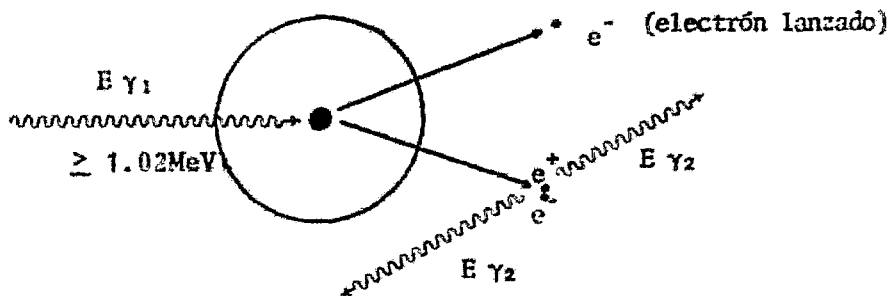


Fig. 3. Producción de pares.

1.3. Unidades y términos comunes en dosimetría.

-Partículas directamente ionizantes. Son partículas cargadas (electrones, protones, partículas α , etc.), que tienen la suficiente energía para producir ionización por colisión.

-Partículas indirectamente ionizantes. Son partículas no cargadas que pueden liberar directamente partículas ionizantes o pueden iniciar una transformación nuclear..

-Radiación ionizante. Es cualquier radiación consistente de partículas directa o indirectamente ionizantes o de una mezcla de ambas.

-Química de radiaciones. La química de radiaciones trata del estudio de los cambios químicos producidos por el paso de las radiaciones nucleares a través de la materia.

-La energía impartida por la radiación ionizante a la materia en un volumen dado, es la diferencia entre la suma de las energías de todas aquellas partículas directa o indirectamente ionizantes que entran en ese volumen y la suma de las energías de todas aquellas que lo dejan, menos la energía equivalente a cualquier incremento en el resto de masa que tiene lugar en reacciones nucleares o de partículas elementales dentro del mismo volumen.

-Dosis absorbida, D (Absorbed dose). Es el cociente de ΔE_D en Δm , donde ΔE_D es la energía impartida por radiación ionizante a la materia en un elemento de volumen. Δm es la masa de la materia en ese elemento de volumen. El signo Δ tiene el significado de concerniente a cualquier proceso que involucra un promedio.

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m}$$

La unidad tradicional de dosis es el rad.

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} = \frac{1}{100} \text{ Joules/Kg.}$$

Sin embargo, esta unidad ha sido desplazada por el gray.

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ Joule/Kg.}$$

-Razón o intensidad de dosis absorbida, \dot{D} (Absorbed dose rate). Es el cociente de ΔD en Δt , donde ΔD es el incremento en la dosis absorbida en el tiempo Δt .

$$\dot{D} = \frac{\Delta D}{\Delta t}$$

La unidad especial de la razón de dosis es cualquier cociente del gray en una unidad conveniente de tiempo (Gy/h, Gy/min, Gy/seg, etc.).

-Dosis equivalente, D.E. (Dose equivalent). Es una estimación de la dosis absorbida por un tejido biológico. Se define como el producto de la dosis absorbida D, el factor de calidad F.C., (también llamada efectividad biológica relativa E.B.R.) el factor de distribución de dosis F.D., y otros factores modificantes necesarios. La unidad de D.E. es el rem.

$$D.E. = D (F.C.) (F.D.) \dots\dots$$

-El factor de calidad, F.C. (Quality factor) o efectividad biológica relativa, se define como la razón o cociente de la dosis absorbida de radiación γ y la dosis absorbida de cualquier otro tipo de radiación que se requiere para producir el mismo efecto biológico.

-El factor de distribución de dosis, F.D. (Distribution factor), es un factor que se usa para estimar la distribución no uniforme de la dosis internamente depositada.

-Exposición, X (Exposure). Es el cociente de ΔQ en Δm , donde ΔQ es la suma de las cargas eléctricas de todos los iones de un signo producidos en el aire cuando todos los electrones-positrones y negatrones-liberados por fotones en un elemento de volumen de aire cuya masa es Δm , son detenidos completamente.

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

La unidad de exposición es el roentgen (R).

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ Coul/Kg.}$$

-Razón de exposición, \dot{X} (Exposure rate). Es el cociente de ΔX en Δt , donde ΔX es el incremento en la exposición en el tiempo Δt .

$$\dot{X} = \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

La unidad especial de la razón de exposición es cualquier cociente del roentgen en una unidad conveniente de tiempo (R/seg, R/h, R/min, etc.).

-Actividad, A (Activity). Es el cociente de ΔN en Δt , donde ΔN es el número de transformaciones nucleares que ocurren en el tiempo Δt referido a una cantidad de un núclido radiactivo.

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

La unidad tradicional de actividad es el curie (Ci), aunque en la actualidad ha sido desplazada por el becquerel.

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ d. seg}^{-1}.$$

$$1 \text{ Bq} = 2.7027 \times 10^{-11} \text{ Ci}.$$

-La energía promedio, W (Average energy) consumida en un gas por par iónico formado, es el cociente de E en N_W , donde N_W es el número promedio de pares iónicos formados cuando una partícula cargada de energía inicial E es completamente frenada por el gas.

$$W = \frac{E}{N_W}$$

-Rendimiento radioquímico o valor G . Se define como el número de moléculas particulares, radicales libres, iones, etc., descompuestos o formados por cada 100 eV de energía absorbida por la radiación. Es el rendimiento químico provocado por las radiaciones y es característica cuantitativa de las reacciones químicas que ocurren bajo el efecto de las radiaciones ionizantes.

El valor G es independiente de la dosis o de la razón de dosis, como de la naturaleza de la radiación, de tal manera que:

$$G = \frac{N}{E} \times 100.$$

en donde:

N = No. de moléculas, iones o radicales producidos o transformados en un volumen dado.

E = Energía absorbida por ese volumen.

-Kerma, K. Es el cociente de ΔE_k en Δm , donde ΔE_k es la suma de las energías cinéticas iniciales de todas las partículas cargadas liberadas por partícula directa o indirectamente ionizante en un elemento de volumen de un material específico y Δm es la masa de la materia en el elemento de volumen.

$$K = \frac{\Delta E_k}{\Delta m}$$

-Razón de Kerma, \dot{K} (Kerma rate). Es el cociente de ΔK en Δt , donde ΔK es el incremento en el Kerma en el tiempo Δt .

$$\dot{K} = \frac{\Delta K}{\Delta t}$$

-Coeficiente de atenuación de masa, $\frac{\mu}{\rho}$ (Mass attenuation coefficient) de un material dado por partículas indirectamente ionizantes, es el cociente de dN en el producto de ρ , N y dl , donde N es el número de partículas incidentes en una capa de espesor dl y densidad ρ y dN es el número de partículas que experimentan interacciones en esa capa.

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho N} \frac{dN}{dl}$$

-Coeficiente de transferencia de energía másica, $\frac{\mu k}{\rho}$ (Mass energy transfer coefficient), de un material por partículas indirectamente ionizantes, es el cociente de dE_k en el producto de E , ρ y dl , donde E es la suma de las energías (excluyendo energías de reposo) de partículas indirectamente ionizantes incidentes sobre una capa de espesor dl y densidad ρ y dE_k es la suma de las energías cinéticas de las partículas cargadas liberadas en esa capa.

$$\frac{\mu k}{\rho} = \frac{1}{E\rho} \frac{dE_k}{dl}$$

-El coeficiente de absorción de energía másica, $\frac{\mu en}{\rho}$ (Mass energy-absorption coefficient), de un material por partículas indirectamente ionizantes, es el producto de $\frac{\mu k}{\rho}$ por $(1-G)$, donde G es la proporción de energía de partículas secundarias cargadas que se pierden por Bremsstrahlung en el material.

$$\frac{\mu en}{\rho} = \frac{\mu k}{\rho} (1-G)$$

-El poder de frenado másico, $\frac{S}{\rho}$ (Mass stopping power), de un material por partículas cargadas, es el cociente de dE_s en el producto de dl y ρ , donde dE_s es el promedio de energía perdida por una partícula cargada de energía específica al atravesar una trayectoria de longitud dl . ρ es la densidad del medio.

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE_s}{dl}$$

-La transferencia lineal de energía, LET (Linear energy transfer) de partículas cargadas en un medio, es el cociente de dE_L en dl , donde dl es el promedio de energía localmente impartida al medio por una partícula cargada de energía específica al atravesar la distancia dl .

$$LET = \frac{dE_L}{dl}$$

-Electron volt, eV. Es la cantidad de energía que adquiere un electrón cuando es acelerado a través de una diferencia de potencial de un Volt.

-Flujo o fluencia, ϕ (Fluence). Es el cociente de ΔN en Δa , donde ΔN es el número de partículas que entran en una esfera de sección transversal Δa .

$$\phi = \frac{\Delta N}{\Delta a}$$

-Densidad de flujo, ψ (Flux density). Es el cociente de $\Delta \phi$ en Δt , donde $\Delta \phi$ es el flujo que sucede en el tiempo Δt .

$$\psi = \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

Esta cantidad puede referirse algunas veces como razón de flujo.

-El flujo de energía o fluencia de energía, F (Energy fluence). Es el cociente de ΔE_f en Δa , donde ΔE_f es la suma de las energías, exceptuando las energías de reposo de todas las partículas que entran a una esfera de sección transversal Δa .

$$F = \frac{\Delta E_f}{\Delta a}$$

-Densidad de flujo de energía o intensidad, I (Energy flux density). Es el cociente de ΔF en Δt , donde ΔF es el flujo de energía en el tiempo Δt .

$$I = \frac{\Delta F}{\Delta t}$$

Esta cantidad puede referirse algunas veces como razón de flujo de energía.

-La constante específica de radiación gamma, Γ (Specific gamma ray constant) de una emisión γ de un radionúclido, es el cociente de $\frac{l^2 \Delta X}{\Delta t}$ en A , donde $\Delta X/\Delta t$ es la razón de exposición a una distancia l de un punto de la fuente de este núclido, teniendo una actividad A .

$$\Gamma = \frac{l^2 \Delta X}{A \Delta t}$$

Las unidades especiales de la constante específica de radiación gamma son $Rm^2 h^{-1} Coul^{-1}$ o cualquier múltiplo.

-Equilibrio electrónico. Se denomina también equilibrio de partículas cargadas y se considera la situación existente en un punto dentro de un medio bajo irradiación cuando por cada partícula cargada que sale del volumen del elemento circundante, entra otra partícula cargada de la misma naturaleza y energía.^{9, 9, 10}

1.4. Efectos biológicos de la radiación.

Las radiaciones nucleares son nocivas para los seres vivos. Una dosis de radiación suficientemente elevada puede matar a cualquier organismo viviente, pero en última instancia, cualquiera que sea el efecto de las radiaciones sobre un organismo, este efecto proviene de los daños causados a las células individualmente.

Cuando las radiaciones inciden sobre una célula viva, ésta puede ser dañada mediante dos procesos.

- a) Impacto directo sobre alguna parte vital.
- b) Ionización de las moléculas de las sustancias que contienen las células, produciendo radicales libres.

Los radicales libres producidos por el proceso de ionización reaccionan con otras moléculas o entre si mismos produciendo sustancias químicas ajenas a la fisiología normal de la célula e intoxicándola.

La mayor parte de estos procesos suceden en el citoplasma,

ya que ocupa la mayor parte de la célula, pero también el núcleo puede ser dañado produciéndose alteraciones en los genes (mutaciones) que generalmente son malignas, o inhibiendo por completo la reproducción u otras funciones vitales.⁵

1.5. Aspectos físicos de la absorción de la radiación.

1.5.1. Coeficientes de interacción y sección eficaz.

La situación básica a considerar en la interacción de la radiación con la materia, es el estudio de un rayo angosto de un sólo tipo de energía de radiación incidente perpendicularmente en una capa delgada de materia.

Si N partículas o cuantos entran en la capa cuyo grosor es dl , y dN de ellas sufren interacción con la materia, entonces el coeficiente de atenuación μ , es definido como;

$$\mu = \frac{dN}{Ndl}$$

Este coeficiente es constante para un tipo dado de energía de radiación e indica la porción de la radiación que es absorbida por la capa. μ está dada en cm^{-1} .

La ecuación anterior puede escribirse en forma alternativa en función de la atenuación de la energía llevada por los rayos, es decir:

$$\mu = \frac{dE}{Edl}$$

que es la forma en que frecuentemente es utilizada en dosimetría.

Si ρ es la densidad del material, μ/ρ recibe el nombre de coeficiente de atenuación de masa. Si n es el número de partículas por unidad de volumen, $\sigma = \mu/n$ es llamada sección eficaz. Si las partículas de materia son átomos, núcleos o moléculas, n es igual a $\rho N_A/A$, donde N_A es el número de Avogadro y A es el peso atómico o molecular. Si las partículas son electrones, n es igual a $\rho N_A Z/A$, donde Z es el número atómico.

Cuando un gran número de partículas cargadas atraviesan la capa de material de grosor dl , se define el promedio de energía perdida dE_S , entonces:

$$S = \frac{dE_S}{dl}$$

y S/ρ es denominado poder de frenado másico!

1.5.2. Dosis absorbida.

La energía impartida a la materia por la radiación ionizante por unidad de masa de materia, se denomina dosis absorbida.

Si se considera un pequeño volumen centrado en un punto en el cual se desea conocer la dosis absorbida, y que contiene una masa Δm , y si ΔE_E es la suma de las energías de todas las radiaciones ionizantes que entran en este volumen durante algún intervalo de tiempo, ΔE_1 es la suma de las energías de todas aquellas que lo dejan, y ΔE_R es la energía equivalente en algún incremento en el resto de masa que tiene lugar en interacciones de partí-

culas nucleares o elementales dentro del volumen, entonces, se define como energía impartida a la materia como:

$$\Delta \dot{E} = \Delta E_E - \Delta E_I - \Delta E_R$$

De lo anterior, la dosis absorbida se define como:

$$D = \frac{\Delta E_{\Delta}}{\Delta m}$$

1.5.3. Equilibrio de radiación.

La figura número 4 muestra el caso en que la radiación se distribuye uniformemente a través de una región V conteniendo un material homogéneo en composición y densidad, un punto de interés p y un pequeño volumen v encerrado en V.

Si la mínima distancia d entre V y v es al menos tan grande como el rango o alcance máximo de la componente mas penetrante de la fuente de radiación, es evidente bajo estas condiciones que, en el promedio de un gran número de rayos entrando y dejando V, es muy probable que un rayo como A transporte una cierta energía fuera de v, y es muy probable también, que un rayo como B entre con la misma energía. Se dice entonces que en p existe un equilibrio de radiación.

Si una partícula A, transportando una cierta energía fuera de v, es reemplazada por otra partícula idéntica cargada B que transporta la misma energía dentro, se dice entonces que existe en p un equilibrio partícula-carga (charged-particle equilibrium). Cuando las partículas son electrones se dice que hay un equilibrio

electrónico.

1.5.4. Transferencia lineal de energía (LET).

La transferencia lineal de energía de partículas cargadas en un medio, es el cociente de dE en dl , donde dE es el promedio de energía perdida debido a colisiones y dl es la distancia recorrida por dichas partículas.

$$LET = \frac{dE}{dl}$$

Considerando los posibles tipos de energía perdida por partículas cargadas de energía específica E , que inciden normalmente en un absorbedor de grosor A_1 , se asume que A_1 es lo suficientemente delgado para que múltiples eventos de dispersión puedan ser despreciados.

Si una partícula pierde energía en el sitio descrito, ésta es desviada en un ángulo θ y sale del absorbedor con una energía E' . Como se ilustra en la figura 5, los diferentes tipos de energía pueden ser caracterizados de la siguiente manera:

O representa una partícula que atraviesa sin intercambio de energía.

U es la energía transferida al sitio localizado de interacción.

q es la energía transferida por una partícula secundaria de rango corto para la cual $q \leq \Delta$, donde Δ es un nivel selec-

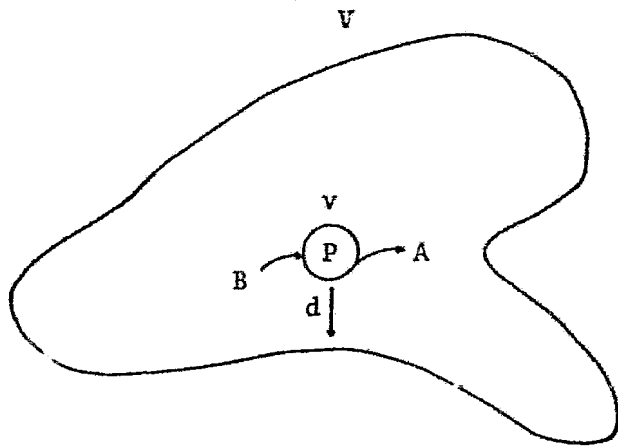


Fig. 4. Equilibrio de radiación.

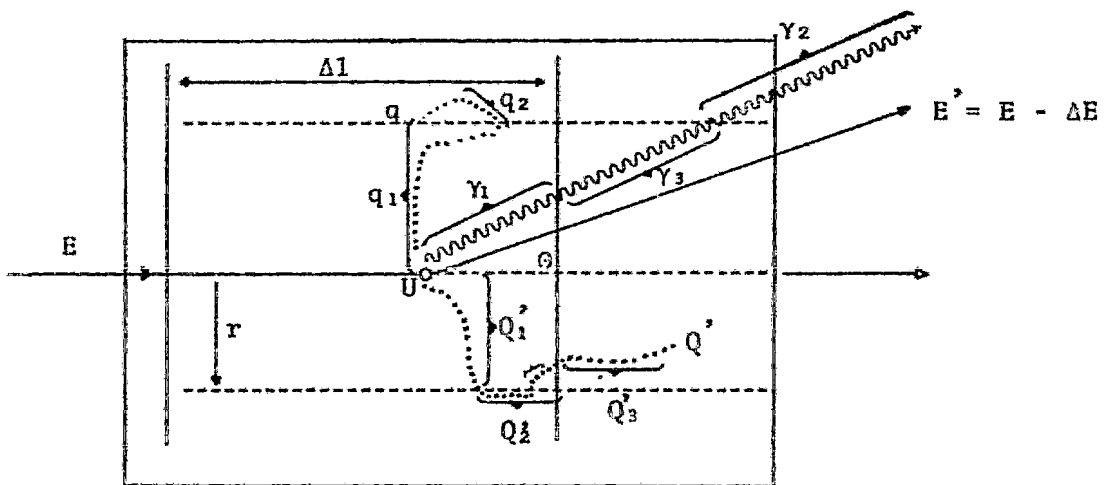


Fig. 5. Energía y absorbedores.

cionado de corte de energía.

Q' es la energía transferida al medio a lo largo del rango de la partícula secundaria para la cual $Q' \geq \Delta$.

γ es la energía transferida por los fotones (cuya energía máxima es igual a E).

r es una distancia geométrica de corte de la trayectoria de la partícula.

θ es el ángulo de desviación de la partícula incidente.

Las interacciones q, Q' y γ son además divididas en tres partes. El compartimiento 1 representa la energía gastada entre Δl y un cilindro de radio r alrededor de la trayectoria de la partícula, el compartimiento 2 representa la energía gastada fuera del cilindro, y el compartimiento 3 representa la energía gastada fuera de Δl pero dentro del cilindro.

Las distribuciones en los varios compartimientos de energía son generadas como el resultado de muchas partículas incidentes de energía E atravesando el absorbedor. $\overline{\Delta E}$ representa la suma de las varias energías gastadas en categorías 0, U, q_1 , q_2 , q_3 , Q'_1 , Q'_2 , Q'_3 , γ_1 , γ_2 , y γ_3 , divididas por el número total de partículas incidentes. El poder lineal de frenado se define entonces como:

$$\frac{dE}{dl} = \left[\frac{\Delta E}{\Delta l} \right]_{1+0}$$

donde dE/dl es una razón promedio de energía perdida y dl

es la distancia atravesada. En el caso del poder de frenado másico, dl se reemplaza por ρdl .

Regresando a la discusión de LET, se define como LET_{Δ} , a aquella parte del total del frenado másico dE/dl , que se asocia con la energía de excitación-ionización transferida hasta el valor de corte Δ . Entonces se puede ver que:

$$LET_{\Delta} = \frac{\overline{\Delta E_{\Delta}}}{\Delta l}$$

donde $\overline{\Delta E_{\Delta}}$ representa la suma de las energías gastadas en categorías O, U y q sóloamente, divididas por el número total de partículas incidentes.

LET_r , se define como aquella parte del total de energía perdida dE/dl , que se deposita entre un cilindro de radio r y la longitud Δl , centrado a lo largo de la trayectoria de la partícula.

De la figura 5 se puede ver que:

$$LET_r = \frac{\overline{\Delta E_r}}{\Delta l}$$

donde $\overline{\Delta E_r}$, representa un promedio de contribuciones en O, U, q_1 , Q_1' y γ_1 .

LET_{Δ} es fácil evaluarlo analíticamente, pero difícil de evaluarlo directamente, en cambio, LET_r es difícil de evaluarlo analíticamente, pero en principio puede ser medido, sustituyendo el cilindro por una medida adecuada artificial, como por ejem-

plo, un microdosímetro¹¹

1.5.5. Campo de radiación.

El camino más simple para describir un campo de radiación es contar el número de rayos o partículas por unidad de área y por unidad de tiempo en cada punto. Existen por lo menos dos maneras significativas en que esto puede hacerse.

Considérese primero el caso de un campo monodireccional pasando cerca de un punto P. Lo que se pretende es contar el número de rayos o partículas por unidad de área y tiempo pasando en la vecindad de P (una muy pequeña región), de tal manera que el campo sea prácticamente uniforme en toda ella. Si una pequeña área circular es centrada en P con una orientación fija, tal como se muestra en la figura 6, serán interceptados un número de rayos por unidad de tiempo que será proporcional al valor absoluto del coseno del ángulo entre la dirección de los rayos y la dirección perpendicular al plano. En el caso en que $\theta = 0$, se lleva al máximo el número de rayos o partículas interceptadas.

Entonces, el número de partículas o rayos que atraviesan por unidad de área del plano circular por unidad de tiempo, será definida como la densidad de flujo de partículas.

Para el caso de un campo multidireccional, es evidente que el plano fijo no puede ser atravesado por todos los rayos y partículas, sin embargo, si se permite que el plano gire libremente, su periferia circular barrerá una superficie esférica, y aquellos rayos que inciden perpendicularmente en el plano circular, tam-

bién penetrarán en la esfera.

Esto sugiere un camino general de definir la densidad de flujo de partículas.

Si Δa es el área del círculo que barre la esfera y ΔN es el número de partículas o rayos que penetran en la esfera en el tiempo Δt , entonces la densidad de flujo de partículas ψ , estará definida por:

$$\psi = \frac{\Delta N}{\Delta a \Delta t}$$

Para abreviar, esto se denomina frecuentemente como densidad de flujo. La densidad de flujo es definida por este camino debido a que muchas instancias en dosimetría están primeramente interesadas en los efectos producidos en un punto por la radiación, prescindiendo de la dirección de incidencia.

Para algunos propósitos puede quererse expresar el número total de partículas por unidad de área penetrando la esfera durante un intervalo de tiempo definido; esto es llamado flujo de partículas o fluencia.

$$\phi = \frac{\Delta N}{\Delta a}$$

Esta cantidad es la integral de tiempo de la densidad de flujo de partículas.

Si en lugar de contar el número de partículas o rayos que penetran en la esfera por unidad de área y tiempo, se mide la

suma de sus energías $E_f = \sum_{i=1}^{i=N} T_i$, donde T_i es la energía del i ésimo rayo, se obtiene entonces la intensidad o la densidad de flujo de energía I .

$$I = \frac{\Delta E_f}{\Delta a \Delta t}$$

La integral de tiempo de la intensidad es llamada flujo de energía o fluencia de energía F .

$$F = \frac{\Delta E_f}{\Delta a}$$

Es costumbre incluir sólo las energías cinéticas en este tipo de expresiones!

1.5.6. Distribución espectral.

La más completa información acerca de la calidad del haz de radiación, está dada por la distribución espectral. Este conocimiento hace posible calcular la cantidad relativa y calidad de la radiación dispersada en varios puntos de un medio determinado.

Considerando que la probabilidad de ocurrencia de que una partícula tenga un valor preciso de energía en la infinidad de valores posibles en un rango de energía dado es cero, entonces es preferible expresar la densidad de flujo de partículas que tengan energías entre límites en la forma de una integral:

$$\Psi (T_1, T_2) = \int_{T_1}^{T_2} \Psi' (T) dT$$

$\Psi' (T)$ es llamada la concentración espectral o la distribución de la densidad de flujo con respecto a la energía. Esto está dado usualmente en términos del número de partículas por intervalo de Kiloeléctron-volt (o millones de electrón-volt). Una gráfica de $\Psi' (T)$ contra T es llamada un espectro o una distribución espectral de la densidad de flujo. Un ejemplo se muestra en la figura 7. El área bajo la curva de $\Psi' (T)$ y el eje T , que se encuentra entre las abscisas T_1 y T_2 , da el número de partículas ocurriendo en ese rango de energía por unidad de tiempo y área en el punto de interés.

La densidad de flujo es la integral de la ecuación anterior sobre todas las energías.

$$\Psi = \int_a^{\infty} \Psi' (T) dT$$

Las concentraciones espectrales también pueden estar dadas por la intensidad, flujo, flujo de energía y por algunas de las otras cantidades definidas anteriormente. Es solamente necesario que la cantidad represente una superposición de efectos de partículas de diferentes energías.

Las distribuciones espectrales pueden estar dadas con respecto a otras propiedades de la radiación además de la energía, como por ejemplo, con respecto a la velocidad de las partículas, momento, etc.^{1, 8.}

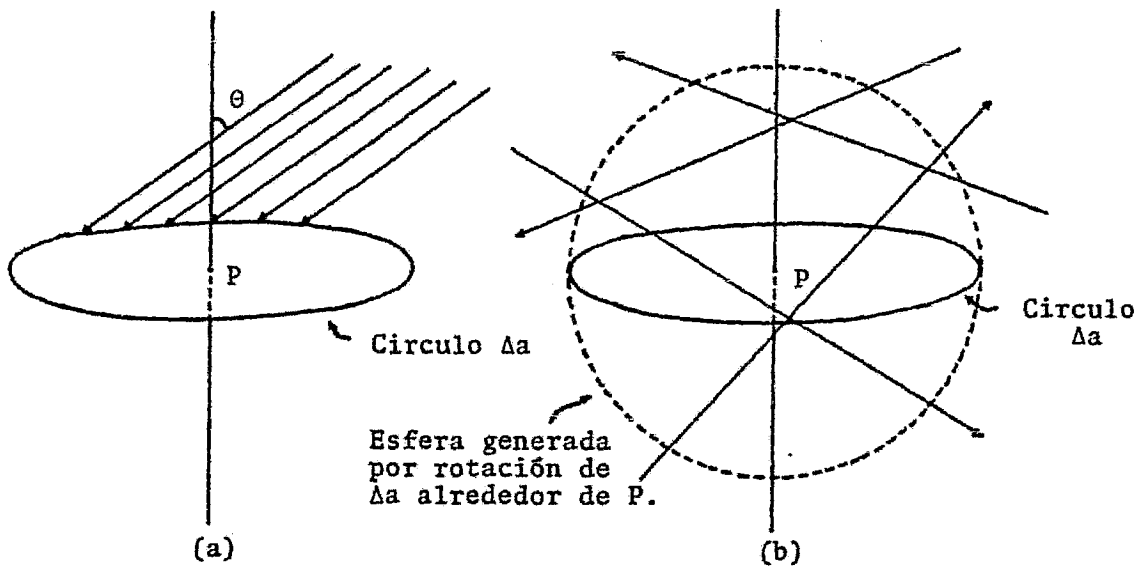


Fig. 6. Densidad de flujo y flujo en campos monodireccional y multidireccional.

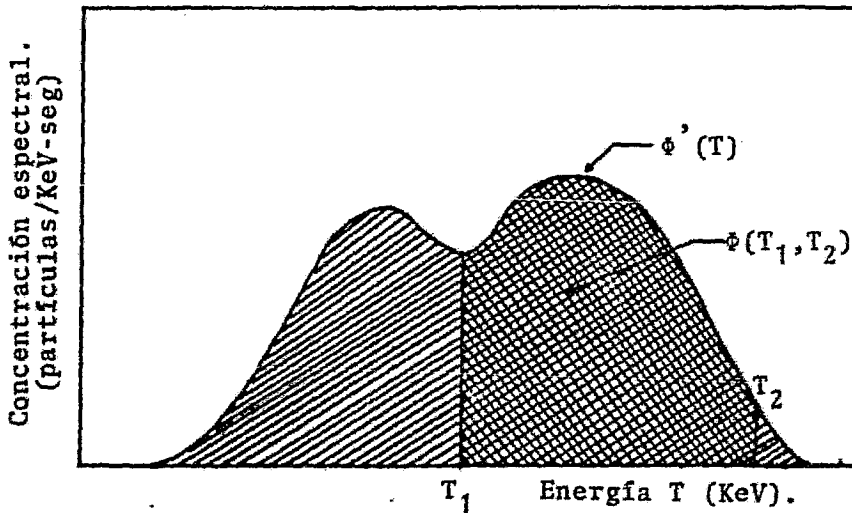


Fig. 7. Un ejemplo de un espectro o distribución espectral para un campo de rayos X

CAPITULO II.

SISTEMAS DOSIMETRICOS.

2.1. Introducción.

En la selección de sistemas óptimos de medida para las muy diversas aplicaciones de la radiación en la industria, agricultura, biología, medicina, química, etc., es factor determinante el nivel de dosis requerido. Por tanto, los sistemas dosimétricos pueden caracterizarse según el rango o límite de dosis absorbida, tomándose por lo general los siguientes límites:¹⁷.

Bajo: $10 - 5 \times 10^3$ Gy.

Medio: 5×10^3 Gy - 5×10^4 Gy.

Alto: 5×10^4 Gy - 10^6 Gy.

Por otra parte, la dosis absorbida puede determinarse de una forma directa o no, así, los métodos dosimétricos comúnmente se clasifican en métodos primarios o absolutos y métodos secundarios o relativos.

En los métodos primarios, la lectura está basada en la medición de una cantidad física básica, tal como la corriente de ionización o la temperatura, mientras que en los métodos secundarios, la respuesta a la radiación absorbida, se conoce por comparación con dosímetros primarios. Como dosímetros primarios se tienen a los calorímetros y a las cámaras de ionización, y como dosímetros secundarios a las soluciones acuosas (dosímetros quí-

micos), emulsiones fotográficas, colorantes, cristales, plásticos, sales, monitores biológicos y enzimáticos, etc.

Una clasificación menos estricta que la anterior, es la de considerar a la dosimetría dividida en dosimetría de referencia y dosimetría de rutina. Los dosímetros de referencia son definidos como sistemas estándar cuya lectura, además de estar basada en cantidades físicas básicas, pueden medir el producto químico debido a la radiación en soluciones estándar fácilmente disponibles y reproducibles en cualquier tiempo, de un laboratorio a otro.

La función de los dosímetros de rutina, difiere de la de los dosímetros de referencia. Estos sistemas de rutina deben ser de fácil manejo, así como tener una respuesta que sea fácilmente medible. Generalmente son usados en un mayor número y frecuencia que los sistemas de referencia, de aquí, que su respuesta tenga que ser correctamente calibrada contra un sistema de referencia en términos de efecto de radiación medible como función de la dosis absorbida en el material de interés. Algunos de los dosímetros de rutina pueden ser usados en forma cualitativa en la evaluación de niveles de dosis de un paquete de producto a otro, día a día, o para determinar perfiles de campo de radiación, o pueden servir como monitores "pasa - no pasa". En otras palabras, a través de ellos, puede no tenerse una muy buena precisión o reproducibilidad en su respuesta a la radiación como es en el caso de los dosímetros de referencia, pero son mucho más prácticos y versátiles para uso continuo!^{2,17}.

2.2. Guías para la dosimetría.

Un requerimiento muy importante para llevar a cabo una buena dosimetría, es que el operador de un proceso dado demuestre su habilidad y conocimiento en el campo de la dosimetría. Esto involucra:

- a) Medición de la dosis absorbida en el material de interés de una forma precisa y exacta.
- b) Interpretación correcta del significado de las medidas mediante técnicas de calibración y factores apropiados de corrección, que permitan convertir la dosis en un sistema de rutina, en la dosis recibida en el producto.
- c) Determinación correcta de la distribución de dosis en el objeto montado.
- d) Tener libre acceso a dosímetros de referencia precisos para calibrar la respuesta de la dosimetría de rutina.
- e) Guiarse por criterios de selección prescritos de dosimetría, en orden a proveer precisa, relevante y eficientemente la dosimetría o el monitoreo.
- f) Guardar registro preciso de dosimetría y utilizar listas de comprobación en todos los pasos del proceso.

Una lista de comprobación para dosimetría, puede incluir los siguientes datos.

- 1.- Razón de flujo del producto y parámetros de control del

proceso; velocidad del transportador, tiempo de detención, número de pasos, información del escudriñador y cualesquiera otros datos de importancia que provengan del irradiador.

- 2.- Parámetros de la fuente; magnitud de la fuente (rayos gamma), eficiencia de conversión (rayos X), poder efectivo del haz (electrones).
- 3.- Espectro incidente aproximado.
- 4.- Tamaño efectivo del haz, forma y dirección.
- 5.- Dimensiones del producto.
- 6.- Dosímetros calibrados requeridos, incluyendo dosímetros monitores de rutina y sistemas de pruebas químicas y biológicas.
- 7.- Información sobre el perfil de distribución de dosis a través del producto.
- 8.- Frecuencia de muestreo (monitores, indicadores biológicos, pruebas químicas, etc.).
- 9.- Máxima y mínima dosis requerida.
- 10.- Condiciones ambientales.
- 11.- Procedimientos de seguridad.
- 12.- Requerimientos estadísticos (límites de precisión, etc.).

2.3. Criterios para la selección de un dosímetro.

En la selección de un sistema dosimétrico para uso en procesos de irradiación, las siguientes consideraciones son de fundamental importancia para asegurar una dosimetría adecuada.

Un sistema dosimétrico debe tener ciertas características como son:

- 1.- Respuesta lineal con la dosis.
- 2.- Respuesta lineal e independiente de la razón de dosis.
- 3.- Respuesta independiente de la energía y LET de la radiación.
- 4.- Ser independiente de las condiciones de irradiación (temperatura, presión, humedad, etc.).
- 5.- Cubrir amplios límites de irradiación (10^{-2} - 10^6 Gy).
- 6.- Ser estable químicamente antes y después de la irradiación.
- 7.- Respuesta medible con precisión en instrumentos y con técnicas adecuadas.
- 8.- Reproducible en $\pm 2\%$ y más generalmente $\pm 5\%$.
- 9.- Bajo costo, manejo simple y procedimientos sencillos de lectura.
- 10.- Sencillo y seguro en su manipulación.
- 11.- Que no se active.
- 12.- Variación limitada en su respuesta cuando se use con diferentes espectros de radiación.
- 13.- Prepararse con reactivos y solventes fácilmente accesibles, así como de que sea insensible a pequeñas concentraciones de impurezas en los reactivos y materiales e independiente de pequeños cambios en la composición del dosímetro, por ejemplo, en la concentración de los reactivos durante la preparación, variación del pH du-

rante la irradiación o de la producción de gases.

No existe ningún dosímetro que tenga todas las características anteriores, por lo que es necesario hacer una cuidadosa selección de un dosímetro para cada caso particular.

2.4. Dosímetros de referencia.

2.4.1. Calorimetría.

Cualquier material colocado en un campo de radiación absorbe energía de radiación. La cantidad de energía absorbida depende de las propiedades del campo y de las propiedades del material absorbente. Casi toda esta energía es eventualmente transformada en calor. Un conocimiento exacto de las cantidades de calor involucradas en tales interacciones, puede proporcionar información útil acerca del campo de radiación y de la energía depositada en el material absorbente. Tomando en cuenta lo anterior, resulta fácil comprender porqué los métodos calorimétricos son utilizados en el campo de la dosimetría.

Los calorímetros pueden dividirse en dos categorías:

- a) Calorímetros de absorción total de energía. Diseñados para absorber toda la energía emitida por la fuente de radiación (por ejemplo, para mediciones absolutas de actividad, vida media, o determinación de la intensidad del haz de partículas).

- b) Dosímetros calorimétricos. Diseñados para medir la energía de radiación absorbida de alguna muestra de tamaño y composición definida.

En el presente trabajo, solamente se discutirán detalles concernientes a la segunda categoría.

Un calorímetro para dosimetría puede definirse como un dispositivo para medir la energía radiante depositada en el objeto de interés, asumiendo que el valor íntegro de esta energía es convertida en calor. Un calorímetro consiste fundamentalmente de tres partes (fig. 8): Cuerpo absorbente (B), medio circundante (M) y camisa (C). Debido a que una formación de calor ocurre en el cuerpo absorbente, es mejor denominar a esta parte del sistema como cuerpo térmicamente activo o TAB (Thermally active body). El medio circundante funciona como medio de transferencia de calor entre el cuerpo y la camisa y ésta última es la parte del sistema que intercambia energía calorífica directamente con el cuerpo absorbente por transferencia de calor a través del medio circundante. Para simplificar, las tres partes del sistema se denominan usualmente como cuerpo, medio y camisa.

A estos tres constituyentes va asociado el siguiente equipo:

Equipo para la medición de la temperatura.

Equipo de control de la temperatura.

Equipo de calibración.

Una clasificación conveniente de los calorímetros, está ba-

sada en la forma particular de intercambio de calor entre el cuerpo y la camisa. De acuerdo a esta clasificación, pueden distinguirse los siguientes métodos calorimétricos.

Calorimetría isotérmica.

Aquí la temperatura del TAB permanece constante durante la determinación de la dosis. La cantidad que se mide es el cambio de fase (sólido a líquido o líquido a gas), inducido por el calor desprendido en el cuerpo. La temperatura a la cual se trabaja es usualmente la temperatura de fusión o de ebullición del material con que está hecho el cuerpo.

Calorimetría adiabática.

El intercambio de calor entre el cuerpo y la camisa es llevado a un mínimo. En la práctica esto se logra por regulación cuidadosa de la temperatura de la camisa. La razón de temperatura se presenta constante en tanto la capacidad calorífica del cuerpo permanece constante y para una razón constante de energía depositada. De aquí que no siempre se obtengan experimentalmente condiciones totalmente adiabáticas. Un cierto número de calorímetros se diseñan para trabajar bajo condiciones cuasi-adiabáticas. Aquí las condiciones experimentales son ajustadas de tal forma que se facilite la derivación de valores adiabáticos verdaderos por el uso de gráficas simples o correcciones matemáticas.

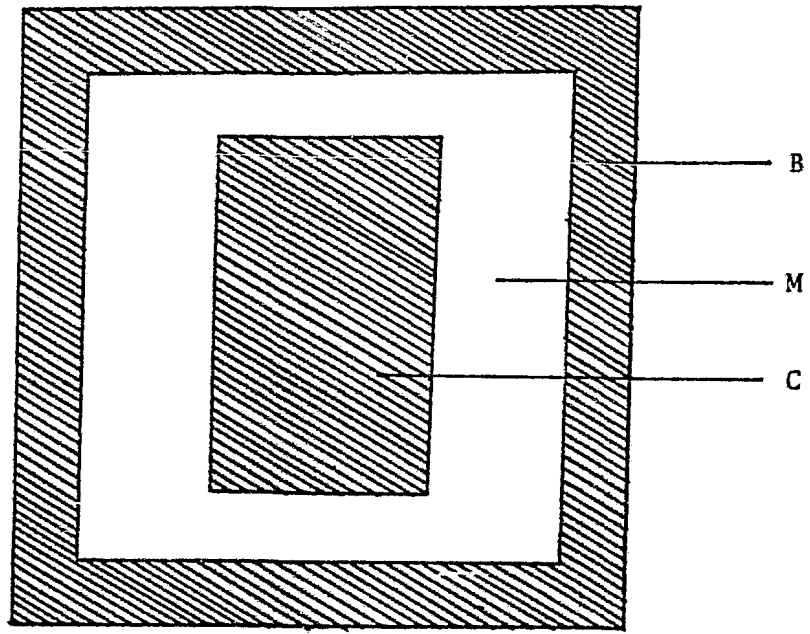


Fig. 8. Elementos de un calorímetro: (B) cuerpo absorbente, (M) medio circundante, y (c) camisa.

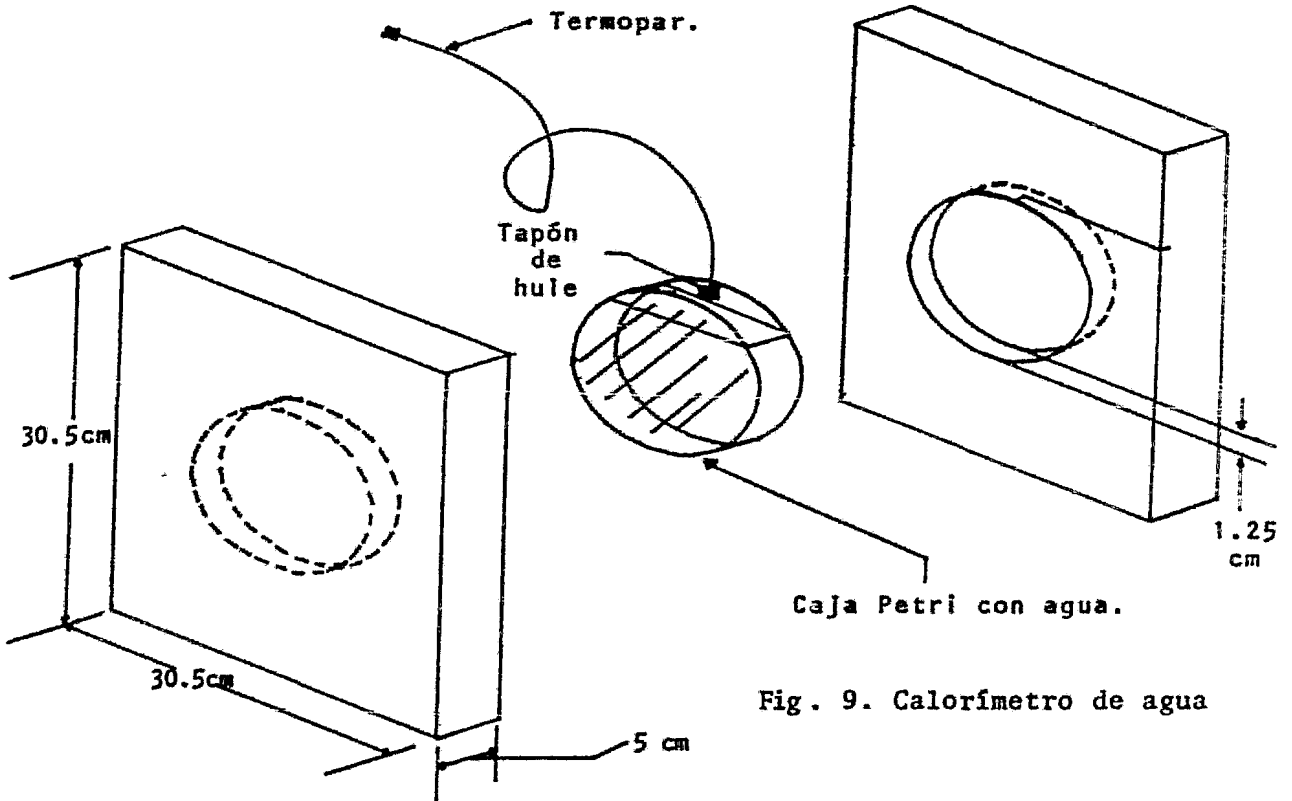


Fig. 9. Calorímetro de agua

Calorimetría de flujo de calor.

El intercambio de calor entre el cuerpo y la camisa si se lleva a cabo. Este intercambio o flujo de calor, está experimentalmente controlado por la elección de un medio de transferencia de calor apropiado. La temperatura de la camisa se mantiene constante durante la medición. En este caso, la razón de cambio de temperatura no es constante, aunque la razón de energía depositada si lo es. La razón de temperatura decrece con el tiempo y viene a ser cero cuando se establece el equilibrio. En esta etapa, la razón de energía desprendida en el cuerpo se compensa por la pérdida de calor. En el equilibrio, la diferencia de temperatura entre el cuerpo y la camisa es directamente proporcional a la razón de energía depositada, o sea, a la razón de dosis absorbida.

Calorimetría diferencial.

La calorimetría diferencial es, en principio, del tipo flujo de calor. En lugar de un cuerpo simple, estos calorímetros constan de dos o más. Uno de ellos funciona como referencia, los otros vienen a ser cuerpos térmicamente activos en el sentido convencional. Todos los cuerpos deben colocarse en el mismo medio circundante y todos ellos recibir la misma cantidad de energía en un campo de radiación homogéneo. En tal sistema es posible disminuir o eliminar la mayoría de los efectos colaterales de influencia en la temperatura del cuerpo, y también, simplificar el control de la temperatura de la camisa. Por ejemplo, si dos contene-

dores idénticos -uno vacío y otro conteniendo un líquido dado- son expuestos al mismo campo de radiación y se mide la diferencia de temperatura entre ellos, los datos de absorción de la energía en el líquido se obtienen directamente y los efectos colaterales de absorción en el contenedor son eliminados. Tal medición diferencial puede efectuarse mediante dos caminos.

a) Análisis térmico diferencial (ATD), donde se mide la diferencia de temperatura entre el cuerpo activo y el cuerpo de referencia, o la diferencia de temperatura entre cada uno de los cuerpos y la camisa.

b) Análisis potencial diferencial (APD), donde se calienta el cuerpo de referencia con una energía de entrada conocida de manera que su temperatura iguale la temperatura del cuerpo activo. La razón de energía de radiación de entrada se calcula entonces de la razón eléctrica calibrada del cuerpo de referencia.

Los métodos diferenciales son muy útiles para la calibración de dosímetros químicos, particularmente para sistemas líquidos donde es necesario distinguir entre la energía absorbida por la muestra y la energía absorbida por el contenedor (por ejemplo, una ampollita).⁷

Equipo asociado a los calorímetros.

Equipo de medición de la temperatura.

Es necesario que los cambios de temperatura puedan ser observados fuera del campo de radiación, para esto se usan dos tipos de detectores de la temperatura; los termopares y los termómetros de resistencia. Ambos son adecuados para calorimetría, la selección entre ellos está normalmente determinada por la conveniencia bajo condiciones establecidas.

Termopares. Cuando se unen dos metales distintos a temperaturas diferentes, se produce una fuerza electromotriz (fem), que es proporcional a la diferencia de temperaturas. La junta a menor temperatura se denomina junta fría, y la de mayor temperatura, junta caliente. Una de las juntas se mantiene a una temperatura constante conocida, entonces, la fem puede leerse bajo apropiada calibración para ser convertida a grados centígrados. Un gran número de metales son usados para la construcción de termopares?

Termómetros de resistencia. Estos termómetros se basan en el cambio de resistencia de un cuerpo resistor como función de la temperatura. Dos tipos de termómetros de resistencia son usualmente utilizados; (1) resistores de hilo metálico (Pt, Cu, etc.) y (2) termistores, los cuales pueden estar hechos de materiales semiconductores. La principal diferencia operacional entre estos dos tipos, es que el resistor metálico tiene un cambio de resistividad del orden de $0.4\%/^{\circ}\text{C}$ y los

termistores, un cambio de alrededor de $4\%/^{\circ}\text{C}$, lo que significa que estos últimos son más sensibles por un factor de 10. Las resistencias son medidas usualmente en un puente de Wheatstone.

Equipo de control de temperatura.

Dos tipos de control de temperatura se usan en calorimetría. El primer tipo se usa para mantener la temperatura de la camisa constante en dosimetría de flujo de calor, y el segundo, para igualar la temperatura del cuerpo y de la camisa en calorimetría adiabática y cuasi-adiabática. Ambos tipos, así como su electrónica están ampliamente descritos en la literatura.⁷

Equipo de calibración.

Para una determinación exacta de la dosis o razón de dosis, debe conocerse el factor de proporcionalidad entre el efecto de la temperatura medida y la energía de entrada. Este factor de proporcionalidad depende del método aplicado y de los detalles de construcción del calorímetro. En algunos casos, éste puede conocerse de las propiedades térmicas del sistema. Con el método adiabático por ejemplo, resulta usualmente suficiente conocer la capacidad calorífica del cuerpo, la cual puede calcularse de datos tabulados. Con el método de flujo de calor, el valor del factor de proporcionalidad K puede calcularse, pero no con muy buena precisión.

Es conveniente determinar el factor de calibración experimentalmente, por medición de la temperatura contra el tiempo por un procedimiento de calibración eléctrico. A un calentador eléctrico de resistencia conocida montada en el cuerpo, se le hace pasar una corriente eléctrica conocida. El cambio de temperatura se sigue como función del tiempo y el factor de calibración puede entonces determinarse.

Uno de los calorímetros más práctico y simple, consiste de una caja Petri de poliestireno aislada conteniendo agua y un termistor o termopar. Este calorímetro se encuentra ilustrado en la figura 9. El calorímetro está revestido de espuma de poliestireno para evitar la rápida pérdida de calor. La dosis absorbida se calcula como sigue:

$$D = K \times \Delta T$$

donde ΔT es el cambio de temperatura del agua en $^{\circ}\text{C}$, y K es la constante determinada para un cuerpo calorimétrico en particular:

$$K = \frac{m_i C_i}{m_i \times 2.389}$$

donde m_i es la masa de cada componente contribuyente a la temperatura (por ejemplo, agua, poliestireno, termistor, etc.) y C_i es la capacidad calorífica de cada uno de los componentes. El

factor 2.389 representa un factor de conversión (calorías por gramo de material irradiado a una dosis de 1 Mrad o 10 KGy!⁷

2.4.2. Cámaras de ionización

Ya que la interacción de los varios tipos de radiaciones con la materia consiste en la ionización de los elementos en los cuales se disipa la energía de radiación, un método de detectarla consiste en la recolección de los iones producidos y posterior transporte en circuitos eléctricos. Instrumentos de este tipo usados en dosimetría son las cámaras de ionización. Las características principales de tales instrumentos son contar con un sistema de electrodos donde los iones son recolectados, y un circuito a través del cual pasa la corriente originada cuando los iones son atraídos hasta los electrodos por medio de una diferencia de potencial aplicada entre ellos.

Si bien se produce ionización cuando la radiación pasa a través de cualquier estado de la materia, uno de los medios más apropiados para realizar la recolección de los iones producidos es un gas contenido en una cavidad cuya pared actúa como cátodo, con un alambre central que actúa como ánodo, de manera que, bajo condiciones apropiadas, una corriente debe pasar desde el alambre central hasta el otro electrodo y a través de un circuito externo (figura número 10).

Existen varios tipos de cámaras de ionización. Por la forma de sus electrodos se clasifican en planos y cilíndricos; los primeros poseen electrodos planos y paralelos, mientras que en los

segundos se encuentran formados por un cilindro metálico y un alambre o varilla situada en su eje.

Por su forma de operar se dividen en cámaras de corriente continua y cámaras de impulsos. Las primeras están diseñadas para poder medir la intensidad media de corriente que atraviesa la cámara, que es en general proporcional a la intensidad de radiación que recibe. En las cámaras de impulsos se procura detectar por separado los impulsos eléctricos individuales a que dan lugar cada conjunto de iones creados por cada partícula ionizante que atraviesa el volumen de la cámara!⁸

Por último, las cámaras de ionización pueden dividirse en cámaras de ionización absolutas para estandarización de una fuente de radiación, cámaras de medición de corriente para comparación relativa de intensidad de las fuentes y tipos integrados para medición de dosis total de radiación acumulada!⁹

Análisis del funcionamiento.

Las partículas cargadas y la radiación electromagnética que atraviesan el gas de la cámara, experimentan colisiones inelásticas con átomos y moléculas, en las cuales los ionizan formando iones positivos y electrones, mismos que, en ausencia de un campo eléctrico, se vuelven a combinar para formar átomos neutros.

Cuando se aplica una diferencia de potencial entre los electrodos, los iones se mueven a lo largo de líneas de fuerza produciendo una corriente de ionización. En condiciones ordinarias, los electrones se mueven a velocidades del orden de 10^6 cm/seg, mientras que el movimiento de los iones es de magnitud mucho menor,

pues sus colisiones más frecuentes con moléculas del gas les impiden alcanzar altas velocidades. Cuando se somete una cámara de ionización a radiación ionizante, la corriente medida aumenta primero al aumentar el voltaje y luego alcanza un nivel constante. En esta región de operación de voltaje (R en la figura 11), ocurre recombinación de los iones, esto es, el número de iones recolectados es menor que el número de iones formados. En P, el campo eléctrico es lo bastante fuerte para impedir la recombinación, los iones una vez formados, son separados más rápidamente y tienden a ser recolectados todos.

La meseta en la gráfica de la corriente de ionización en función del voltaje aplicado se le llama corriente de saturación. En general el voltaje necesario para alcanzar esta corriente de saturación en una cámara de ionización dependerá de la rapidez a la cual se produzca la ionización. En el voltaje de saturación, la corriente de ionización media i , está relacionada con el número de pares iónicos producidos por unidad de tiempo, por la ecuación:

$$i = Ne$$

en donde e es la carga electrónica. Cada par de iones representa 1.602×10^{-19} coulombs y la recolección de 6.25×10^6 pares iónicos (10^{-12} coulombs) por segundo, corresponde a una corriente de 10^{-12} amperes. Así, la cámara de ionización mide el efecto integral o total de un gran número de casos de ionización. En promedio se necesitan aproximadamente 34 eV para producir un par de iones en el aire, y esto es válido para las partículas alfa y be-

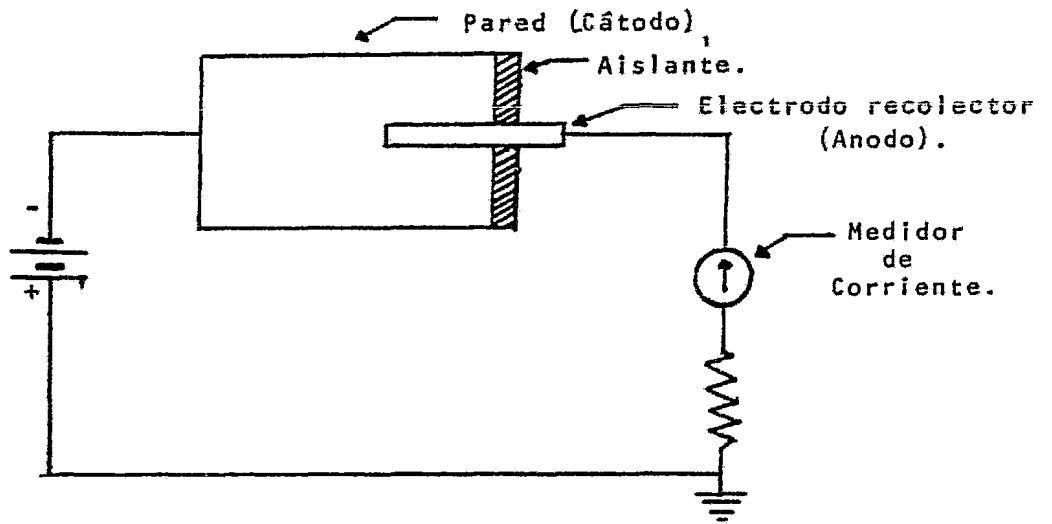


Fig. 10. Dibujo esquemático de una cámara de ionización.

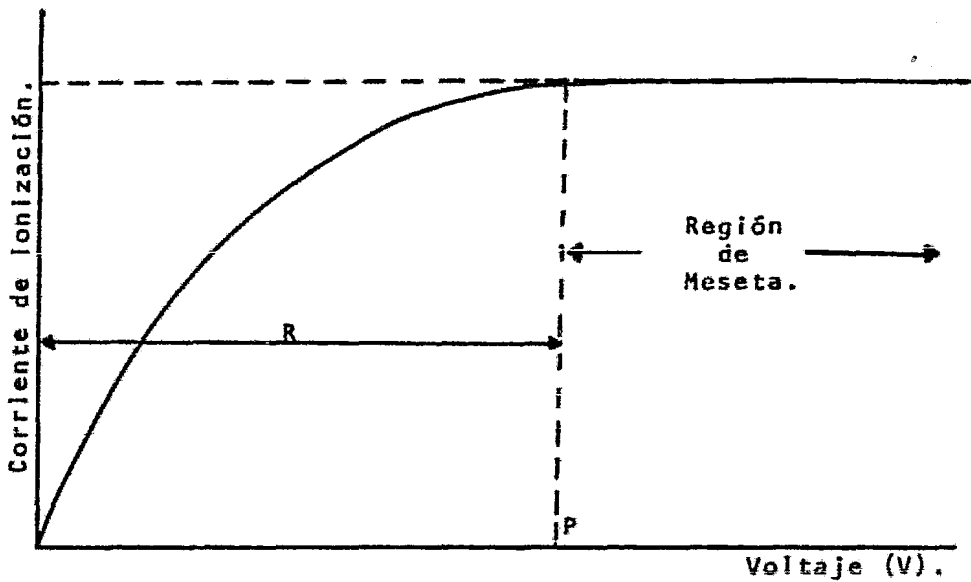


Fig. 11. Corriente de saturación en una cámara de ionización.

ta al igual que para los rayos X y la radiación gamma.

La rapidez de respuesta del instrumento detector de corriente se suele hacer larga para suprimir fluctuaciones estadísticas y carece de importancia el hecho de que los electrones se recojan como electrones libres (como en el argón) o unidos a moléculas de lento movimiento formando iones negativos (como en el oxígeno). Ha de observarse que la probabilidad de recombinación es menor en un gas en el cual solo se forman electrones libres, y entonces puede alcanzarse saturación a menor intensidad del campo.

Cuando la corriente de saturación es lo suficientemente grande, puede medirse con un microamperímetro, pero en general, es necesario usar métodos más sensibles como por ejemplo, hacer que la carga sea recogida en la capacitancia de la cámara y un condensador adicional combinados, y medir la rapidez resultante del cambio de voltaje en esta capacitancia en un electrómetro. Así como $Q = CV$ (en donde Q es la carga en coulombs, C es la capacitancia en farads y V es el potencial en volts), se deduce que la intensidad de corriente i puede determinarse por medio de la ecuación:

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt}$$

Para medir el voltaje a través del capacitor es necesario emplear un electrómetro, un instrumento de impedancia muy alta, cuya operación se basa en la interacción de un cuerpo cargado con un campo eléctrico, en contraste con el galvanómetro de baja impedancia que se basa en la interacción de un cuerpo cargado con un campo magnético. Para una intensidad de radiación dada, la co-

rriente de ionización depende principalmente de la masa del gas en la cámara, y en menor medida, de las dimensiones y forma de la cámara.

Espesor de la pared.

En dosimetría de rayos X y de rayos gamma, los electrones puestos en movimiento por las interacciones del fotón, tienden a viajar en línea recta con respecto a la dirección de haz. Cerca de la superficie, el número de electrones que atraviesan la unidad de área, se incrementa con la profundidad debido a que los electrones generados en una primera capa de la travesía, se añaden a los electrones generados en una segunda capa y así sucesivamente. Este acumulamiento continúa hasta que los electrones generados en la primera capa completan su rango y en seguida, el número de electrones permanece aproximadamente constante estableciéndose el equilibrio electrónico. Esto provoca que el número de electrones que cruza la cavidad que llena el gas, y por tanto la ionización, se incremente con el espesor de la pared de la cámara de ionización como se ilustra en la figura 12. Después de un nivel de ionización máximo, posterior incremento del espesor de la pared causa una disminución de la ionización debido a la atenuación del fotón en la pared. El rango de los electrones, y por tanto, el espesor de la pared al cual ocurre la máxima ionización, depende de la energía del fotón. Muy frecuentemente se escoge el espesor de tal manera que se tenga un nivel máximo de ionización, lo que se determina experimentalmente. Si se mide

exposición, la definición de roentgen constituye una pared de la cámara equivalente al aire de suficiente espesor para establecer el esencial equilibrio electrónico. Si la dosis absorbida en un punto de un medio dado se mide por medio de una cámara de ionización dispuesto en el, es recomendable tener una pared de espesor de equilibrio tan cercanamente equivalente al medio como sea posible.

Cuando se miden haces de electrones, no es posible igualar la pared de la cámara con el medio, entonces ésta debe hacerse tan delgada como sea posible para reducir la absorción de la pared del flujo de los electrones a un mínimo. La absorción resultante puede corregirse construyendo una gráfica de espesor de la pared contra ionización y extrapolando a cero?

Materiales de la pared y gases de llenado.

Es esencial que la pared de una cámara de ionización sea buen conductor, resistente, químicamente estable e impermeable al gas. El grafito y los metales reúnen estos requerimientos aunque frecuentemente su número atómico es inapropiado. Si este es el caso, el material de la pared puede "igualarse" al medio de interés. Una adecuada igualación de los materiales requiere que los coeficientes de absorción de energía másica de los fotones y el poder de frenado másico de los electrones sean idénticos. Si esto no es posible en términos absolutos, frecuentemente puede lograrse un grado de precisión adecuado para ciertos propósitos experimentales. Las más frecuentes necesidades de igualación surgen en

mediciones de exposición, cuando la pared de la cámara debe ser equivalente al aire, y en la medición de dosis absorbida en tejidos. La igualación puede lograrse más fácilmente empleando una mezcla de materiales de tal forma que se logre tener un número atómico medio idéntico al del medio. Si estos materiales no son conductores, suele recubrirse con una delgada capa conductora de grafito coloidal?

Casi todos los gases ordinarios resultan más o menos apropiados para el llenado de las cámaras de ionización, basta aplicar a los electrodos una tensión suficiente para que los efectos de recombinación sean despreciables, es decir, para que se alcance la corriente de saturación. A la tensión mínima para que se alcance dicha corriente de saturación se le llama tensión de saturación de la cámara.

La tensión de saturación, aparte de depender de la configuración de los electrodos, deberá ser tanto más elevada cuanto mayor sea la presión y más intensa la densidad de ionización, pues mayor resulta entonces la probabilidad de recombinación. Depende por otra parte del gas que llena la cámara; para aire seco a presión atmosférica es del orden de unos centenares de volts por milímetro de separación entre los electrodos, mientras que para el argón puro es de unos 10 volts/cm. Tan notable diferencia es debida a la distinta movilidad de iones y electrones, y sobre todo a la presencia del oxígeno en el aire, gas electronegativo, cuyas moléculas captan electrones libres para formar iones negativos que se mueven más lentamente, aumentando la probabilidad de re-

7.18.

combinación.

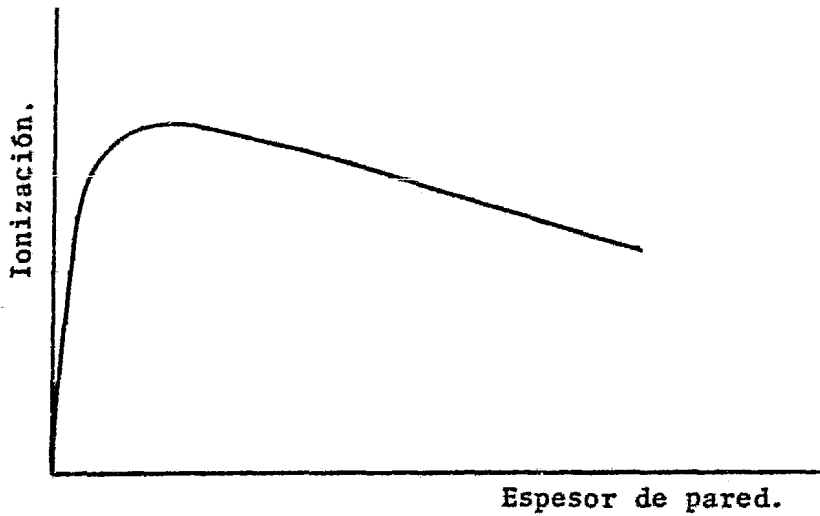


Fig. 12. Variación de la corriente de ionización con el espesor de la pared de la cámara de ionización.

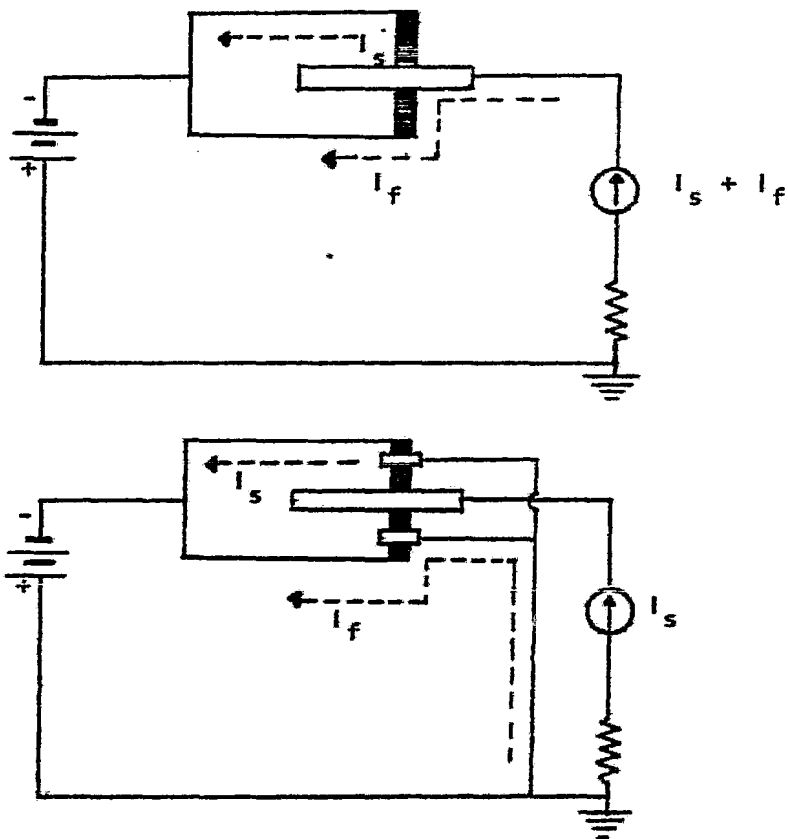


Fig. 13. Disposición del anillo de guarda en una cámara de ionización de forma cilíndrica (para evitar perturbaciones por corrientes de fuga en el aislante). I_s = corriente de ionización, I_f = corriente de fuga.

Aislantes y anillos de guarda.

El aislante que separa los electrodos de una cámara de ionización se encuentra sometido a una tensión V aplicada a la misma. Si dicho aislante no es de muy buena calidad o no está cuidadosamente limpio, circulará a través de él una corriente parásita o de fuga que se sumará a la corriente de ionización en la cámara y falseará la medida de la intensidad de la radiación. Para evitar esta perturbación, se divide el citado aislante en dos partes mediante un anillo conductor denominado anillo de guarda, que rodea la terminal de entrada del electrodo colector y que está conectado al potencial aplicado. De esta forma la porción de aislante situado entre el anillo de guarda y el electrodo colector no está sometida prácticamente a ninguna tensión eléctrica y no se originan corrientes de fuga. Las corrientes que pueden circular desde el anillo de guarda al electrodo interior, no influyen en el circuito de medida (figura 13)!*

Exposición.

Si la cavidad de una cámara de ionización se construye de paredes virtualmente equivalentes al aire, la exposición en roentgens, sujeta a algunas modificaciones pequeñas, será igual al número de unidades electrostáticas de carga colectadas, dividido por el valor sensible del volumen de la cámara en cm^3 . Las modificaciones son correcciones relativas a la temperatura, presión, humedad, cualquier desviación en la equivalencia al aire, absor-

ción y difracción de las paredes, desviación en el equilibrio electrónico, no uniformidad del campo de radiación, disturbios en el campo por la presencia de la cámara, etc.

Dosis absorbida.

Si una cámara de ionización calibrada en roentgens para un espectro de fotones en un medio dado, se coloca en él y se registra una exposición de X roentgens, la dosis absorbida en el medio en un punto provisto de equilibrio electrónico entre las paredes de la cámara será:

$$D = 0.86 A \left[\frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{M}}}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{aire}}} \right] 0.01 \text{ Gy}$$

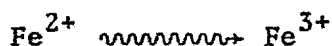
donde A es algún factor de corrección de cualquier disturbio en el campo de radiación causado por la cámara de ionización y $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{M}}$, $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{aire}}$ son los coeficientes de absorción de energía másica del medio y del aire respectivamente?

2.4.3. Dosímetro de Fricke.

El dosímetro de Fricke pertenece a la categoría de los dosímetros químicos. Sin embargo, debido a su alta precisión y confiabilidad es completamente aceptado como dosímetro de referencia y frecuentemente se usa para calibración de otros dosímetros.

El dosímetro fue desarrollado hace más de 40 años por Fricke y Morse, y se basa en el proceso de oxidación de los iones ferro-

tos en solución ácida a iones férricos por efecto de la radiación ionizante.

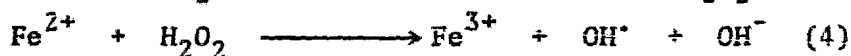
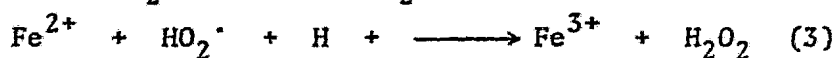
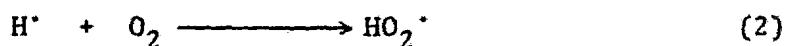
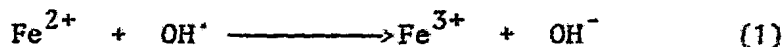


La dosis se deriva de la concentración de iones férricos en solución después de la irradiación.

El dosímetro puede ser usado para medición de dosis absolutas con una precisión de 1-2%.

Mecanismo de reacción.

Las reacciones en el sistema dosimétrico a dosis bajas están bien establecidas. La oxidación de los iones ferrosos a iones férricos sigue el mecanismo:



Cada radical hidroxilo oxida un ion ferroso, cada radical hidroperoxilo oxida tres iones ferrosos y cada molécula de peróxido de hidrógeno oxida dos iones ferrosos. $G(\text{Fe}^{3+})$ puede escribirse entonces como

$$G(\text{Fe}^{3+}) = G_{\text{OH}} + G_{\text{H}} + G_{\text{H}_2\text{O}_2}$$

La sustitución de los rendimientos iniciales da $G(\text{Fe}^{3+}) = 15.6$, lo cual está de acuerdo con los mejores valores experimentales.

Todas las reacciones son rápidas, excepto la del peróxido de hidrógeno, pero para Fe^{2+} 0.001 M e irradiación gamma, esto no afecta la dosimetría.

Preparación de la solución dosimétrica.

Disolver 0.392 g de sulfato ferroso amónico ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y 0.005 g de cloruro de sodio (NaCl) en 12.5 ml de H_2SO_4 0.8 N. Diluir a 1 litro en un matraz volumétrico con H_2SO_4 0.8 N (las concentraciones finales en solución son 0.001 M de sulfato ferroso amónico, 0.001 M de cloruro de sodio y 0.8 N de ácido sulfúrico). Todas las sustancias deben ser grado reactivo analítico.

El ácido sulfúrico 0.8 N se prepara disolviendo 22.5 ml de ácido sulfúrico concentrado (densidad: 1.84 g/cm^3) en agua tri--destilada y aforando a un litro.

La solución final debe saturarse de aire.

Curva estándar o curva patrón.

Pesar 100 mg de alambre de fierro espectrofotométricamente puro. Colocarlo en un matraz volumétrico de 1000 ml. Añadir 60 ml de agua destilada y 22.5 ml de ácido sulfúrico concentrado (densidad: 1.84 g/cm^3). Calentar suavemente el matraz destapado hasta que se disuelva completamente el fierro. Con un vaso de precipitados invertido sobre la boca del matraz, llevar la solución a enfriar. Añadir de 3 a 5 ml de peróxido de hidrógeno al 35% y

hervir a reflujo de 0.5 a 1 hora o hasta que cesen las burbujas de exceso de peróxido. Llevar el matraz a enfriar y colocarlo en un termostato a 25°C. Aforar el matraz a la marca de 1,000 ml con agua tridestilada. Esta solución deberá tener aproximadamente una absorbancia de 4 a una longitud de onda de 305 nm.

La molaridad de la solución está dada por:

$$C_{\text{Fe}^{3+}} = \left(\frac{m_{\text{Fe}^{3+}}}{V} \right) K$$

donde:

$m_{\text{Fe}^{3+}}$ es la masa de fierro disuelto (g).

V es el volumen de la solución final (l)

K es un factor de conversión. $K = \frac{1 \text{ mol}}{0.056 \text{ Kg}}$ para iones Fe^{3+} .

Transferir 1, 5, 10, 20 y 25 ml de esta solución a matraces volumétricos de 100 ml y aforar cada porción a la marca con ácido sulfúrico 0.8 N. Leer la absorbancia de estas soluciones usando una celda de cuarzo de 1 cm en un espectrofotómetro con temperatura controlada (25°C) al pico de absorción de 305 nm. Usar una celda de cuarzo de 1 cm con agua destilada como blanco de referencia.

Construir una gráfica de la absorbancia de las soluciones contra la molaridad de iones férricos.

La molaridad de $C_{\text{Fe}^{3+} \text{ dil.}}$ de cada solución diluida puede ser calculada de:

$$C_{\text{Fe}^{3+} \text{ dil.}} = \frac{C_{\text{Fe}^{3+}}}{s} = \left(\frac{m_{\text{Fe}^{3+}}}{V} \right) \frac{K}{s}$$

donde s es el factor de dilución que es el volumen final dividido por los volúmenes iniciales, o sea, el volumen del matraz volumétrico usado para las diluciones (100 ml) dividido por el volumen tomado de la solución inicial-1,000 ml- (1, 5, 10, 15, 20 o 25 ml).

La pendiente en cualquier punto de la curva es el coeficiente de extinción molar. En un buen sistema óptico, la curva debe ser una línea recta y el coeficiente de extinción molar de $2,195 \pm 10 \text{ l mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ a 25°C .

El valor del coeficiente de extinción molar varía con la temperatura. Si las mediciones para la curva patrón son tomadas a $t^\circ\text{C}$, el valor del coeficiente de extinción molar puede ser corregido por la fórmula:

$$\epsilon_{\text{Fe}^{3+}, 25^\circ\text{C}} = \frac{\epsilon_{\text{Fe}^{3+}, t^\circ\text{C}}}{\{1 + \xi(t - 25)\}} \quad 15^\circ\text{C} < t < 35^\circ\text{C}.$$

en donde $\epsilon_{\text{Fe}^{3+}, 25^\circ\text{C}}$ y $\epsilon_{\text{Fe}^{3+}, t^\circ\text{C}}$ son los valores de los coeficientes de extinción molar a 25 y $t^\circ\text{C}$ respectivamente, y ξ es el coeficiente de temperatura de $\epsilon_{\text{Fe}^{3+}, 25^\circ\text{C}}$ ($\xi = 0.007^\circ\text{C}^{-1}$).

Dosimetría.

Llenar los contenedores dosimétricos con solución dosimétrica y colocarlos en el campo de radiación durante un intervalo de tiempo cuidadosamente medido. Vigilar que se establezcan las condiciones de equilibrio electrónico y que las posiciones de irradiación sean reproducibles con precisión.

Después de la irradiación, leer la absorbancia (A_i) de las soluciones irradiadas en el espectrofotómetro al pico de absorbancia de 305 nm. Usar solución no irradiada como blanco o medir la absorbancia de la solución no irradiada (A_0) usando el paso de aire como 100% de transmitancia.

La ecuación para calcular la dosis absorbida en la solución dosimétrica de Fricke es:

$$D = \left(\frac{\Delta A \cdot N}{\rho \cdot G \cdot \epsilon \cdot d} \right) \frac{b}{k}$$

en donde:

D es la dosis absorbida en rads o su equivalente en Gy

ΔA es el cambio de absorbancia a 305 nm a 25°C.

$\Delta A = (A_i - A_0)$, donde A_i y A_0 son las absorbancias de las soluciones irradiada y no irradiada respectivamente.

N es el número de Avogadro ($6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).

ρ es la densidad de la solución dosimétrica.

ρ Fricke = 1.024 g/cm^3 ($1.024 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$).

G es el rendimiento radioquímico de la formación de iones Fe^{3+} .

G Fricke = $15.6 \times 10^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ($9.74 \times 10^{17} \text{ J}^{-1}$).

ϵ es el coeficiente de extinción molar (a 305 nm, 25°C).

$\epsilon_{\text{Fe}^{3+}}$ = $2,195 \text{ l mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ($219.5 \text{ m}^2 \text{ mol}^{-1}$).

d es la longitud óptica de la celda de cuarzo.

d = 1 cm (0.01 m).

k es un factor de conversión de volumen y b un factor de conversión de energía

$$k = 10^3 \text{ cm}^3 \text{ l}^{-1} \quad (k = 1)$$

$$b = 1.602 \times 10^{-14} \text{ rad g eV}^{-1} \quad (b = \text{Gy}(\text{J Kg}^{-1})^{-1} = 1).$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación de dosis y efectuando las operaciones correspondientes se tiene:

$$D = 2.75 \times 10^4 \Delta A \text{ rad} \quad \text{o} \quad D = 2.75 \times 10^2 \Delta A \text{ Gy}$$

Dilución de la solución dosimétrica después de la irradiación.

Para la mayoría de los espectrofotómetros, las lecturas de absorbancia con alta precisión (0.1%) solamente son posibles hasta $A_i = 1.4$. Sin embargo, para la mayoría de los propósitos puede considerarse una precisión aceptable hasta $A_i = 2.0$. Si la absorbancia medida excede este valor, debe diluirse la solución con H_2SO_4 0.8 N. En este caso la ecuación de dosis será:

$$D = \left(\frac{\{\Delta A \cdot s\} N}{\rho \cdot G \cdot \epsilon \cdot d} \right) \frac{b}{k}$$

donde s es el factor de dilución (volumen final dividido entre el volumen inicial) y el término $\Delta A \cdot s$ representa el valor de $(A_i - A_0)s$, donde la solución no irradiada es diluida en forma similar. Finalmente:

$$D_{\text{fricke}} = 2.75 \times 10^4 \Delta A \cdot s \text{ rad} \quad \text{o} \quad D = 2.75 \times 10^2 \Delta A \cdot s \text{ Gy}$$

NOTA: En los datos anteriores, como en los subsiguientes, los valores entre paréntesis corresponden a unidades derivadas del Sistema Internacional de Unidades (SI).

Si las medidas de absorbancia no se llevan a cabo a 25°C, debe efectuarse una corrección de la temperatura. La ecuación apropiada será entonces:

$$D = \left(\frac{\Delta A \cdot N}{\rho \cdot G \cdot \{ \epsilon_{\text{Fe}^{3+}, 25^{\circ}\text{C}} (1 + \xi(t - 25)) \} \cdot d} \right) \frac{b}{k}$$

La temperatura de irradiación puede determinarse utilizando, por ejemplo, un pequeño termopar o termistor durante la irradiación. La ecuación final queda:

$$D_{\text{Fricke}} = \frac{2.75 \times 10^4 \Delta A}{1 + 0.007 (t - 25)} \text{ rad}$$

o

$$D_{\text{Fricke}} = \frac{2.75 \times 10^2 \Delta A}{1 + 0.007 (t - 25)} \text{ Gy}$$

Estabilidad.

La solución aireada de sulfato ferroso se oxida lentamente durante su almacenaje. Se recomienda almacenar la solución en la obscuridad y en matraces desecados, preferentemente en un refrigerador. Si se hace dosimetría ocasionalmente, debe prepararse solución fresca cada vez. Correcciones por auto-oxidación pueden obtenerse de blancos de la misma solución. Una auto-oxidación de pocos μM por día indica la presencia de impurezas orgánicas en la solución.

Precisión.

Pueden esperarse límites de precisión entre $\pm 1\%$ con apropiadas precauciones, especialmente de limpieza y pureza en el manejo de las soluciones, sustancias y contenedores.

Rango de dosis absorbida.

El rango usual del dosímetro de Fricke es de 4,000 a 40,000 rad (40-400 Gy). El límite superior lo impone el agotamiento del oxígeno y el límite inferior el método analítico.

Es posible medir dosis mayores de 40,000 rad (400 Gy) usando el dosímetro denominado super Fricke, el cual contiene diez veces más concentración de sulfato ferroso y oxígeno a saturación. Este sistema puede usarse hasta 200,000 rad (2 KGy) pero el aumento de oxígeno incrementa el valor $G_{Fe^{3+}}$ a 16.1.

Energía de radiación y razón de dosis.

La respuesta del dosímetro es cercanamente independiente de la energía de la radiación en el rango de 0.5 a 16 MeV.

La precisión en la medida de la dosis no se ve afectada por la razón de dosis, que puede variar entre 20 y 2×10^9 rad/seg (0.2 y 2×10^7 Gy/seg)^{7,12,17}.

2.5. Dosímetros secundarios y de rutina.

2.5.1. Dosímetros químicos.

En principio un gran número de sistemas tanto químicos como físicos se emplean para la dosimetría secundaria y de rutina. En particular los sistemas químicos se han desarrollado extensamente con resultados satisfactorios.

En la dosimetría química, la energía absorbida de la radiación se determina a partir de la medida cuantitativa de un cambio producido en el sistema químico usado como dosímetro. El cálculo de la energía absorbida requiere del conocimiento adecuado del valor G de la reacción o producto obtenido, el cual se encuentra calibrando previamente el dosímetro con un método absoluto.

La selección de un dosímetro químico depende de los siguientes factores.

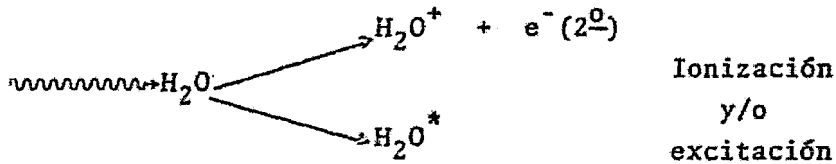
- a) Tipo y características de la radiación que se emplea, esto es, electrones, rayos gamma, neutrones, partículas alfa, etc.,
- b) Tipo y características de la muestra a irradiar, esto es, líquida, gas, sólida en forma de película, polvo, etc.
- c) Diseño de irradiación, o sea, tipo de contenedores, temperatura de irradiación, presión, etc.
- d) Materiales, reactivos e instrumental analítico con que se disponga?⁸

2.5.1.1. Radiólisis del agua.

Cuando se hace incidir radiación ionizante en el agua, se lleva a cabo la radiólisis de ésta, la cual tiene lugar en tres etapas.

I. Etapa Física.

En un tiempo de aproximadamente 10^{-17} seg, una partícula con energía muy alta atraviesa una molécula de agua transfiriéndole su energía en aproximadamente 10^{-16} seg. La interacción de la radiación con la molécula provoca entonces ionización y/o excitación.



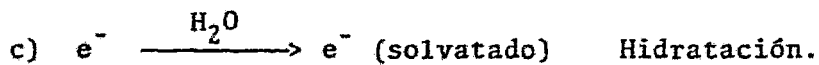
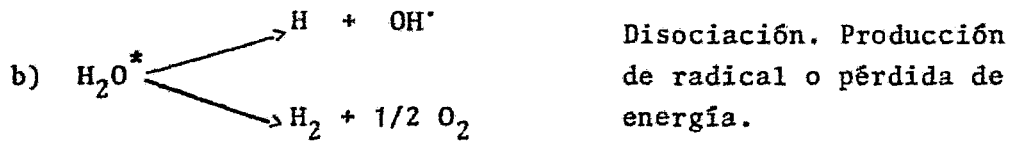
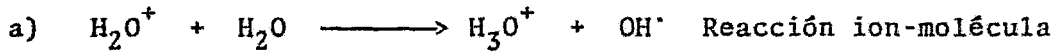
II. Etapa Fisicoquímica.

En un tiempo de aproximadamente 10^{-14} seg se efectúan reacciones ion-molécula. El agua iónica reacciona con una molécula de agua formando un radical libre (a).

Durante este período además, parte de la energía se transforma en energía vibracional. La molécula de agua en estado excitado se disocia originando un radical libre, o bien, perdiendo su energía (b).

Por último, los electrones secundarios pierden energía cinética y se transforman en electrones térmicos. En 10^{-11} seg, se

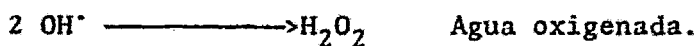
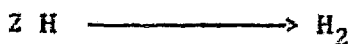
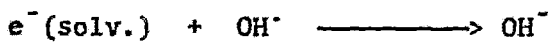
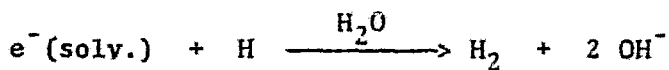
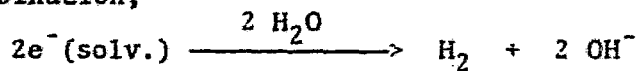
lleva a cabo la formación del electrón solvatado (hidratado) como resultado de la reacción del electrón secundario (c).



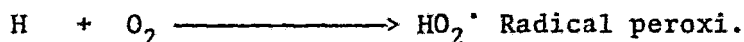
III. Etapa Química.

En un período de tiempo de aproximadamente 10^{-16} - 10^{-17} seg, existe una competencia entre radicales para combinarse y formar moléculas. Las reacciones son:

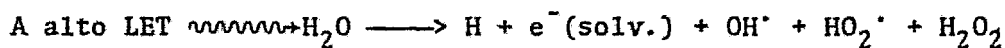
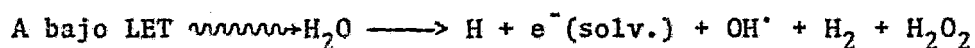
a) Combinación,



b) Recombinación.



Dependiendo de si la radiación es de bajo o alto LET (electrones de alta energía o rayos gamma, o partículas alfa respectivamente), las reacciones completas de radiólisis del agua son:²¹



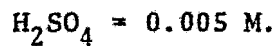
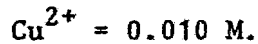
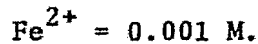
2.5.1.2. Dosímetro de sulfato ferroso/sulfato cúprico.

El dosímetro de sulfato ferroso/sulfato cúprico se basa en la oxidación de los iones ferrosos a iones férricos por la radiación ionizante. Es similar al dosímetro de Fricke, sin embargo, su sensibilidad es menor debido a la adición de sulfato cúprico en la solución dosimétrica. El método es más preciso para dosis absorbidas entre 2×10^5 y 8×10^5 rad (2,000 - 8,000 Gy) usando medición espectrofotométrica de la concentración de iones férricos a 305 nm.

Deben tenerse las mismas precauciones de limpieza y pureza que en el dosímetro de Fricke.

Sistema dosimétrico.

El sistema empleado es una solución oxigenada de sulfato ferroso amónico, sulfato cúprico y ácido sulfúrico en agua trides--tilada. Las concentraciones son:



Todos los reactivos deben ser grado reactivo analítico. La solución se satura con oxígeno por burbujeo durante 1/2 hora. La solución debe prepararse diariamente durante su utilización.

Dosimetría.

Llenar los contenedores con solución dosimétrica fresca e irradiarlos durante un período de tiempo cuidadosamente medido (la irradiación puede llevarse a cabo en ampolletas de vidrio selladas).

Debe asegurarse de que se establezcan condiciones de equilibrio electrónico y de que las posiciones de irradiación sean re--producibles con precisión.

Después de la irradiación, leer la absorbancia (A_i) de la solución irradiada en un espectrofotómetro al pico de absorción de 305 nm. Usar agua destilada como blanco de referencia. A dosis mayores de 4×10^5 rad (4×10^3 Gy), puede ser necesario diluir la solución irradiada con ácido sulfúrico 0.001 N para aumentar la precisión de la medición.

La ecuación para calcular la dosis absorbida en la solución dosimétrica es:

$$D = \left(\frac{\Delta A \cdot N}{\rho \cdot G \cdot \epsilon \cdot d} \right) \frac{b}{k}$$

Los términos de la ecuación anterior ya han sido explicados en el caso del dosímetro de Fricke. Para el dosímetro de sulfato ferroso/sulfato cúprico, ρ y G tienen otros valores:

$$\rho(\text{FeSO}_4 + \text{CuSO}_4) = 1.001 \text{ g/cm}^3 \quad (1.001 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3).$$

$$G(\text{FeSO}_4 + \text{CuSO}_4) = 0.66 \times 10^{-2} \text{ eV}^{-1} \quad (4.12 \times 10^{16} \text{ J}^{-1}).$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación anterior se tiene:

$$D_{\text{FeSO}_4/\text{CuSO}_4} = 6.65 \times 10^5 \Delta A \text{ rad} \quad \text{o} \quad D = 6.65 \times 10^3 \Delta A \text{ Gy}.$$

En el caso de efectuar dilución posterior a la irradiación (cuando los valores de absorbancia son mayores de 2.0), la ecuación correspondiente es:

$$D_{\text{FeSO}_4/\text{CuSO}_4} = 6.65 \times 10^5 \Delta A.s \text{ rad} \quad \text{o} \quad D = 6.65 \times 10^3 \Delta A.s \text{ Gy}$$

donde s es el factor de dilución definido anteriormente (ver dosímetro de Fricke).

Por último, si no es posible efectuar las mediciones de absorbancia a 25°C , pueden hacerse correcciones de la temperatura

utilizando, como en el caso del dosímetro de Fricke, el valor del coeficiente de temperatura para el coeficiente de extinción molar, resultando la ecuación:

$$D_{\text{FeSO}_4/\text{CuSO}_4} = \frac{.6.65 \times 10^5 \Delta A}{1 + 0.007 (t - 25)} \text{ rad}$$

o

$$D_{\text{FeSO}_4/\text{CuSO}_4} = \frac{6.65 \times 10^3 \Delta A}{1 + 0.007 (t - 25)} \text{ Gy}$$

donde t es la temperatura de medición.

Influencia de varios factores.

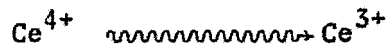
No se observan efectos en la precisión de las medidas con razones de dosis entre 20 y 10^9 rad/seg (0.2 y 10^7 Gy/seg). La confiabilidad del método no se ve influenciada por la variación de la temperatura entre 20 y 60°C durante la irradiación. La respuesta de este sistema muestra ser independiente de la energía de la radiación en el rango de 0.1 a 10 MeV.

El pH de la solución dosimétrica debe mantenerse constante dentro de un 10%, ya que el valor G y el coeficiente de extinción molar dependen de la concentración de $\text{H}_2\text{SO}_4^{7,12}$.

2.5.1.3. Dosímetro de sulfato cérico.

El uso del sulfato cérico en dosimetría se basa en la reduc-

ción de iones céricos a cerosos por influencia de la radiación.



La dosis absorbida se deriva de la diferencia de concentración de iones céricos antes y después de la irradiación.

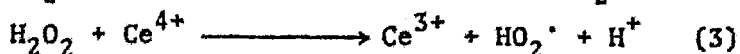
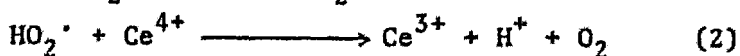
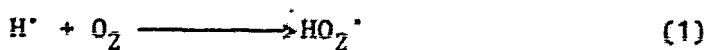
La respuesta del dosímetro es independiente de si existe o no oxígeno en el sistema, por lo que se le puede usar para medición de dosis altas, pero tiene la principal desventaja de requerir absoluta limpieza en todos los aparatos, así como de reactivos de extrema pureza para obtener buena reproducibilidad.

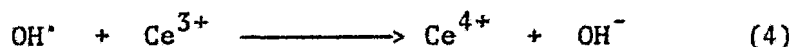
Pueden obtenerse diferentes límites de dosis en el rango de 10 Krad a 50 Mrad (0.1-500 KGy) variando las concentraciones de la solución, aunque el rango de dosis para trabajos de rutina es de 10 Krad-20Mrad (0.1-200 KGy).

El sistema empleado es una solución de sulfato cérico y sulfato céroso en ácido sulfúrico 0.8 N. La concentración inicial de sulfato cérico varía en el rango de 0.2 - 50 mM de acuerdo con la dosis total que se pretenda medir. La concentración inicial de sulfato céroso será igual a la escogida para el sulfato cérico.

Mecanismo de reacción.

El mecanismo de la reacción es el siguiente.





El oxígeno se consume durante el proceso, pero en ausencia de él, las primeras dos reacciones son suplidas por:



El valor $G(\text{Ce}^{3+})$ está dado por:

$$G(\text{Ce}^{3+}) = 2 G_{\text{H}_2\text{O}_2} + G_{\text{H}} - G_{\text{OH}^-}$$

Dosimetría.

La irradiación puede llevarse a cabo en ampollitas de vidrio Pyrex o material equivalente. Antes de llenar las ampollitas deben lavarse dos veces con la solución dosimétrica.

La determinación de la concentración de iones cericos se efectúa espectrofotométricamente a una longitud de onda de 320 nm. El coeficiente de extinción molar es de $5,610 \text{ l mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ($5.365 \text{ mol}^{-1} \text{ m}^2$) y no depende de la temperatura. Diluciones de las soluciones irradiadas y no irradiadas pueden ser necesarias en orden a obtener mayor precisión en la lectura de absorbancia.

El valor G para la reducción de iones céricos a cerosos varía con la concentración inicial de iones céricos de la manera siguiente:

Concentración inicial de $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2$ (mM)	$G(\text{Ce}^{4+})$
0.2	2.34
1.5	2.32
10.0	2.26
50.0	2.04

En base a los valores de G, la dosis puede calcularse mediante la ecuación:

$$D_{(\text{Ce}^{4+})} = \frac{\Delta A \cdot s}{G} \times 1.67 \times 10^5 \text{ rad}$$

o

$$D_{(\text{Ce}^{4+})} = \frac{\Delta A \cdot s}{G} \times 1.67 \times 10^3 \text{ Gy}$$

donde s es el factor de dilución y ΔA la diferencia de absorbancias.

Influencia de varios factores.

Los reactivos deben ser de alta pureza y el agua tridestilada. Es muy importante prevenir la introducción de cualquier impureza orgánica, ya que esto puede provocar cambios en los valores observados de G. Los recipientes que tienen contacto con la solución dosimétrica deben estar perfectamente limpios y desecados a 530°C durante 8 horas.

La solución es ligeramente sensible a la luz, por lo que es recomendable mantener la solución dosimétrica en la obscuridad.

El producto de irradiación es estable con la temperatura en el rango de 7-35°C^{7,12,20}.

2.5.1.4. Dosímetro de ácido oxálico.

El proceso empleado para la determinación de la dosis absorbida es la descomposición radiolítica del ácido oxálico en solución acuosa. La dosis absorbida se deriva de la diferencia de concentración de ácido oxálico antes y después de la irradiación. La precisión en la determinación depende de la calibración del dosímetro bajo las condiciones en que va a ser utilizado. La reproducibilidad es mejor del 3%.

El sistema empleado es una solución de ácido oxálico 25-100 mM, dependiendo del rango de dosis que se quiera emplear. Las concentraciones adecuadas son:

Concentración de ácido oxálico mM	Rango de dosis.	
	Mrad	(KGy)
25.0	0.5-5	(5-50)
50.0	1.0-10	(10-100)
100.0	2.0-20	(20-200)
200.0	4.0-35	(40-350)
600.0	10.0-100	(100-1,000)

El límite superior para una concentración en particular queda establecido por la acumulación de productos radiolíticos en solución, los cuales toman parte en el proceso. El límite inferior

lo establece el método diferencial de determinación.

La influencia de la razón de dosis puede menospreciarse en la región de $10^2 - 10^{10}$ rad/seg ($1 - 10^8$ Gy/seg). El producto de descomposición depende del tiempo total de irradiación, así como de algunos productos intermediarios (glioxal y ácido glioxílico) que reaccionan después de su formación cuando el período de irradiación es del mismo orden de magnitud o menor que el período de vida de estos productos, provocando la disminución del valor G_{ox} .

Experimental.

Para preparar la solución dosimétrica, se disuelve la cantidad apropiada de ácido oxálico grado reactivo analítico en agua destilada.

La irradiación puede llevarse a cabo en ampolletas de vidrio o de cuarzo.

La determinación de la dosis se efectúa usualmente por valoración del ácido oxálico con NaOH, tanto de la muestra irradiada como de la no irradiada. La normalidad de la solución de NaOH se escoge de la siguiente manera:

Densidad del ácido oxálico. g/ml	Concentración de ácido oxálico. mM	Normalidad de sol. de NaOH.
1.001	25	0.05
1.003	50	0.05
1.005	100	0.10
1.010	200	0.10
1.030	600	0.30

La valoración se efectúa como sigue:

Se toma una alícuota de muestra irradiada y se transfiere a un matraz Erlenmeyer de 50 ml de peso conocido con precisión. Obtener el peso del matraz más muestra con la misma precisión en una balanza analítica y deducir por sustracción, el peso de la alícuota (X_1). Añadir alrededor de 30 ml de agua destilada y hervir lentamente en un mechero de gas durante 30 min. Añadir agua fresca hervida de ser necesario, pues la muestra no debe llegar a sequedad. El matraz entonces, es retirado del calor y lavados los bordes con una pequeña cantidad de agua hervida. Se añaden dos gotas de fenolftaleína y se valora inmediatamente con solución estandar de NaOH al punto en que la coloración rosa persiste por 10 seg (T ml). Una muestra similar pesada (X_0) de solución dosimétrica no irradiada debe también diluirse, calentarse y valorarse (T_0 ml) de la misma manera.

Cálculo de la dosis.

La dosis absorbida se calcula de la expresión:

$$D_{(eV/ml)} = AC_0 \log (C_0/C).$$

donde A es un factor de proporcionalidad que se obtiene por calibración del sistema, por ejemplo, contra el dosímetro de Fricke. C_0 es la concentración de ácido oxálico en moléculas por ml y C es la concentración de ácido en moléculas por ml de la solución irradiada.

C_0 y C se calculan de las ecuaciones:

$$C_0 = \frac{T_0 N \times 10^{-3} \times 6.02 \times 10^{23} \rho}{X_0 \times 2} = \frac{T_0 N \rho 3.01 \times 10^{20}}{X_0}$$

$$C = \frac{T N \times 10^{-3} \times 6.02 \times 10^{23} \rho}{X \times 2} = \frac{T N \rho 3.01 \times 10^{20}}{X}$$

donde X es el peso de la muestra en gramos de solución irradiada, X_0 es el peso de la muestra en gramos de la solución no irradiada, T es el número de mililitros de NaOH usados para la valoración de X -gramos de solución irradiada, T_0 es el número de mililitros de NaOH usados para valorar X_0 -gramos de solución no irradiada, N es la concentración de la solución de NaOH expresada en equivalentes por litro y ρ es la densidad de la solución de ácido oxálico.

Influencia de varios factores.

El sistema no es sensible a pequeñas cantidades de impurezas, puede usarse hasta temperaturas de 60°C y es estable por varios meses^{12,17,20}.

2.5.1.5. Dosímetro de agua.

Este dosímetro se basa en la descomposición catalizada del agua. La reacción neta es:



La dosis se deriva de la medición de gas liberado a presión constante, como una función del tiempo en un simple sistema manométrico?

La solución dosimétrica consiste de una solución de yoduro de potasio 0.0001 M en agua tridestilada saturada de aire.

Se necesitan alrededor de 5 Mrad (50 KGy) para lograr la saturación de oxígeno en la solución inicial. La razón de dosis puede entonces medirse por el subsecuente estado de evolución de $\text{H}_2 + 1/2$ de O_2 . El límite superior de dosis no se ha determinado, pero se sabe que una pérdida de agua del 10% requiere de 10^{10} rad (10^8 Gy).

Razones de dosis entre 1 y 100 Mrad/h (10 - 1,000 KGy/h) son adecuados para el sistema. 1 Mrad (10 KGy) libera 13.4 cm^3 de gas por litro de solución dosimétrica.

Cálculo de la dosis.

La dosis se calcula de la ecuación:

$$D = \frac{\Delta M \times 9.64 \times 10^8}{G(\text{H}_2 + \text{O}_2) \rho} = \frac{\Delta v \times 4.34 \times 10^7}{G(\text{H}_2 + \text{O}_2) V} \text{ rad}$$

o

$$D = \frac{\Delta M \times 9.64 \times 10^7}{G(\text{H}_2 + \text{O}_2) \rho} = \frac{\Delta v \times 4.34 \times 10^5}{G(\text{H}_2 + \text{O}_2) V} \text{ Gy}$$

donde:

ΔM son las moles de gas involucradas.

$\Delta v = \text{cm}^3$ de gas recolectadas bajo condiciones estandar.

$\rho = 1 \text{ g/ml}$.

$V =$ volumen de la muestra irradiada.

$G(\text{H}_2 + \text{O}_2) = 0,575$ para rayos gamma de Co-60.

Influencia de varios factores.

La pureza del reactivo debe ser grado reactivo analítico.

El pH de la solución dosimétrica debe ser neutro.

El rendimiento $G(\text{H}_2 + \text{O}_2)$ es independiente de la temperatura en el rango de 8 a 90°C ?

2.5.1.6. Dosímetro de benceno-agua.

El proceso empleado para la determinación de la dosis absorbida, es la oxidación del benceno a fenol y a otros compuestos en solución acuosa neutra. La determinación se efectúa espectrofotométricamente.

Debido a que se forman muchos compuestos en el dosímetro irradiado, la respuesta del método analítico no puede atribuirse solamente al fenol. El fenol y el difenil son los principales productos de la reacción inducida por la radiación.

La solución dosimétrica es agua saturada con benceno y aire. La concentración de benceno a saturación con la fase acuosa es de 0.021 M a 20°C .

El rango de dosis absorbida que puede ser medido con este

sistema es de 5×10^3 a 7×10^4 rad ($50 - 7 \times 10^2$ Gy). El límite superior lo impone el consumo de oxígeno en el sistema durante la irradiación, y el límite inferior, el método analítico.

Razones de dosis entre 1 y 100 rad/seg (0.01 - 1 Gy/seg), tienen poca influencia sobre el producto de irradiación.

El sistema tiene las ventajas de ser relativamente insensible a impurezas y de ser estable antes y después de la irradiación, además de no ser corrosivo.

Experimental.

La solución dosimétrica se prepara agitando vigorosamente de 5 a 20 ml de benceno por litro de agua destilada o desionizada. La solución puede almacenarse por varios meses si se cubre con una capa de benceno,

Para la irradiación se retira la capa de benceno y se coloca en los contenedores que pueden ser de vidrio, metal, polietileno, polipropileno, etc.

La determinación de la dosis se hace espectrofotométricamente a 290 nm, añadiendo a una alícuota de una muestra irradiada dada, un volumen igual de solución de NaOH 0.06 N. La absorbancia de esta muestra se compara con la absorbancia de una muestra irradiada diluida de igual forma con agua destilada. Deben también efectuarse lecturas de absorbancia de muestras no irradiadas diluidas con NaOH y agua destilada.

Las muestras alcalinas deben dejarse reposar durante 10 min antes de leer las absorbancias, ya que en las muestras irradiada--

das la absorbancia se incrementa gradualmente después de la adición de la base hasta en un 10% superior al valor medido inmediatamente después de la adición.

Cálculo de la dosis.

La dosis absorbida se calcula por la ecuación:

$$D = \frac{s}{d\rho} \left\{ \{(A)_{AS} - (A)_{NS}\} - \{(A)_{AB} - (A)_{NB}\} \right\} (0.163 \times 10^6) \text{ rad}$$

o

$$D = \frac{s}{d\rho} \left\{ \{(A)_{AS} - (A)_{NS}\} - \{(A)_{AB} - (A)_{NB}\} \right\} (0.163 \times 10^4) \text{ Gy}$$

en donde:

s es el factor de dilución = $\frac{\text{volumen total de la muestra diluida}}{\text{volumen de la muestra no diluida}}$

d es la longitud del paso óptico de la celda utilizada.

ρ es la densidad de la solución dosimétrica en g/cm^3

$(A)_{AS}$ es la absorbancia de la muestra alcalina irradiada.

$(A)_{NS}$ " " " " " " neutra irradiada.

$(A)_{AB}$ " " " " " " alcalina no irradiada.

$(A)_{NB}$ " " " " " " neutra no irradiada.

Estos cálculos se basan en un coeficiente de extinción molar para el fenol de $2,520 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ a una longitud de onda de 290 nm y un valor G aparente de 2.35 moléculas/100 eV.

Influencia de varios factores.

La pureza de los reactivos debe ser: benceno libre de tiofeno, agua destilada o desionizada y grado reactivo analítico para el NaOH.

La concentración inicial de benceno en la solución dosimétrica puede ser de 60 a 100% de saturación (0.008 - 0.012 M). A menor concentración, el producto radiolítico disminuye.

El pH de la solución dosimétrica puede ser de 4 a 10. A menor pH, el rendimiento radiolítico del fenol se incrementa.

La presencia de oxígeno en solución es importante, ya que toma parte en la reacción. Normalmente el agua aereada es adecuada hasta 7×10^4 rad (7×10^2 Gy). Arriba de esta dosis, el oxígeno se consume rápidamente y el producto radiolítico decrece.

Para radiaciones ionizantes con alto LET (partículas alfa por ejemplo), el rendimiento radiolítico de fenol es menor de 0.2 moléculas/100 eV, por lo que el sistema puede emplearse para medir dosis de radiación gamma en campos de radiación mezclada.

2.5.1.7. Dosímetro de etanol-clorobenceno.

Este dosímetro será ampliamente discutido en los siguientes capítulos.

2.5.1.8. Otros dosímetros químicos.

Otros dosímetros químicos y sus características más importantes están dados en el cuadro número 1^{7,15,17,26}.

CUADRO NUMERO 1.

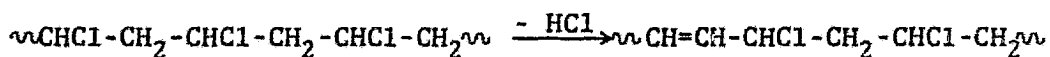
Otros dosímetros químicos y sus características.

Sistema	Rango de dosis	solución dosimétrica	Cambio químico y medición.
Formiato sódico.	$1 \times 10^6 - 8 \times 10^7$ rad $1 \times 10^4 - 8 \times 10^5$ Gy	Soluciones de HCOONa $5 \times 10^{-2} - 0.3$ M.	Descomposición del formiato Titulación con KMnO_4
Colorantes.	$10 - 10^5$ rad $0.1 - 10^3$ Gy	Sols. acuosas de Azul de metileno, Naranja de metilo, Indigo carmín.	Degradación del color. Espectrofotometría.
Hidrocarburos que liberan HCl.	$10 - 10^6$ rad $0.1 - 10^4$ Gy	Sols. acuosas de clo- roformo, tricloroetile- no, hidrato de cloral.	Formación de HCl. Colorimetría.
Tiocianato de potasio.	$10 - 10^4$ rad $0.1 - 10^2$ Gy	Sols. acuosas de KCNS 10^{-2} M saturadas con O_2 o N_2O .	Concentración de $(\text{CNS})_2^-$ for- mado. Espectrofotometría.
Ferrocianuro de potasio.	$10^2 - 10^4$ rad $1.0 - 10^2$ Gy	Sols. acuosas de $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ 5×10^{-3} M saturado con O_2 o N_2O	Concentración de ferricianuro formado. Espectrofotometría.

2.5.2. Plásticos y polímeros.

2.5.2.1. Dosímetro de Cloruro de polivinilo.

El proceso empleado para la determinación de la dosis absorbida, es el desarrollo de color en un homopolímero de cloruro de vinilo, probablemente mediante un mecanismo de deshidroclorinación seguida por la formación de un doble enlace. Como resultado, el átomo de cloro que sigue al doble enlace, viene a ser alílico y fácilmente removible:



El siguiente paso será la deshidroclorinación posterior, con la propagación del grupo alílico a lo largo de la cadena principal. Como resultado de las sucesivas deshidroclorinaciones, se desarrolla un sistema poliéxico conjugado.

El color, de un modo conceptual, se origina por la estructura de este cromóforo, que en un principio es verdoso, pero gradualmente se torna café-amarillento, café-rojizo o café oscuro, dependiendo de la dosis absorbida.

La dosis de radiación absorbida se deriva de la medición espectrofotométrica del cambio de absorbancia a 395 nm, después de un tratamiento térmico (1 h a 50°C o 5 - 10 min a 80°C).

El sistema empleado es un homopolímero de PVC en forma de película transparente de 0.015 pulgadas de espesor (0.038 cm). Esta puede cortarse en placas de 2.75x1x0.015 pulgadas (7x2.5x0.038 cm), o en cualquier otro tamaño adecuado para colocarlo convenientemen-

te en el contenedor del espectrofotómetro.

El rango de dosis absorbida que puede medirse es de 0.5 - 6 Mrad (5 - 60 KGy).

La precisión es mejor del 4% dependiendo del cuidado que se tenga en la manipulación del material seleccionado.

Cálculo de la dosis.

Puede determinarse la dosis absorbida en base a una curva estándar obtenida por comparación del cambio de absorbancia de dosis conocidas mediante un dosímetro primario, como por ejemplo, el dosímetro de Fricke.

Influencia de varios factores.

Las curvas obtenidas en una fuente de radiación, no pueden intercambiarse por las obtenidas en otras fuentes, por ejemplo, de una fuente de electrones a una fuente de rayos gamma.

El espesor de las placas dosimétricas de PVC afecta la absorbancia. Para un espesor de 0.015 pulgadas (0.038 cm) la absorbancia es 25% mayor que para un espesor de 0.01 pulgadas (0.025 cm)^{7,12,17.}

2.5.2.2. Dosímetro de Polimetilmetacrilato (PMMA).

El polimetilmetacrilato (PMMA) es un material plástico transparente utilizado usualmente en forma laminar y conocido comercialmente como Perspex, Lucita o Plexiglas.

El dosímetro se basa en el cambio de absorbancia en la región ultravioleta inducido por la radiación en el PMMA.

La precisión es del 2% y el rango de dosis que puede ser medido es de 0.1 a 5 Mrad (10 - 50 KGy). El dosímetro es independiente de la razón de dosis hasta 3×10^8 rad/seg (3×10^6 Gy/seg).

En orden a obtener resultados reproducibles con este dosímetro, deben efectuarse las siguientes indicaciones:

- El material debe limpiarse cuidadosamente antes de su uso.
- Debe evitarse la exposición a la luz durante y después de la irradiación.
- Debe evitarse tocar o rayar la superficie del dosímetro.
- Las mediciones deben efectuarse poco tiempo después de la irradiación.
- El dosímetro no debe usarse para periodos de irradiación muy prolongados, especialmente a temperaturas mayores de 35 °C, a menos de que se tomen precauciones para prevenir la difusión de oxígeno, la cual causa opacidad en las muestras.
- Deben evitarse temperaturas mayores de 60°C después de la irradiación.
- La irradiación debe efectuarse bajo condiciones de equilibrio electrónico.

El dosímetro de PMMA muestra un pico de absorción en la región ultravioleta entre 260 y 345 nm. La longitud de onda adecuada depende de la composición del polímero y del tipo de espectrofotómetro de U.V. utilizado.

Cálculo de la dosis.

El incremento de la absorbancia se calibra contra la dosis medida en algún dosímetro primario (obtención de una curva de calibración). Este incremento debe corregirse para el espesor (medido en un micrómetro) para cada muestra de PMMA, de tal forma que los resultados correspondan a un espesor estandar. La ecuación de corrección es:

$$A_{\text{corr.}} = (\Delta A) \frac{\text{Espesor nominal.}}{\text{Espesor medido.}}$$

La dosis absorbida de una muestra dada se deriva de la curva de calibración.

Influencia de varios factores.

Antes de la irradiación, los dosímetros pueden almacenarse aun por varios años sin cambio apreciable en la sensibilidad.

Los límites de dosis absorbida dependen del espesor de la lámina de PMMA. Por ejemplo, un espesor de 3 mm puede usarse para medir dosis absorbidas de 0.1 - 2.5 Mrad (1 - 25 KGy). Al límite superior, la absorbancia se acerca al valor de 1.5, por arriba de este valor, la absorbancia es difícil de medir y los valores superiores a 2 ya no son muy confiables. Si se reduce el espesor, el límite superior de dosis absorbida puede incrementarse hasta 5 Mrad (50 KGy)^{7,12,17.}

2.5.2.3. Dosímetro de Perspex Rojo.

El procedimiento para el dosímetro de Perspex rojo (acrílico rojo) es idéntico al de PMMA, excepto en que las medidas de absorbancia se hacen a una longitud de onda de 640 nm.

La relación absorbancia-dosis no es lineal, por lo que el sistema debe calibrarse, por ejemplo, contra el dosímetro de Fricke en una posición en particular de irradiación y bajo condiciones de equilibrio electrónico. Los límites de dosis cubiertos por este dosímetro son de aproximadamente 0.1 - 5 Mrad (1 - 50 KGy). No hay efectos de la razón de dosis hasta 10^8 rad/seg (10^6 Gy/seg).

La precisión que puede lograrse es del 3% si se tiene cuidado en la interpretación de la dosis, ya que el cambio de absorbancia puede aumentar o disminuir dependiendo de las condiciones de irradiación, temperatura y almacenaje posterior a la irradiación. Además, suele haber diferencias entre un lote de material y otro.^{7,12,17}

2.5.2.4. Dosímetro de Perspex Ambar.

El procedimiento para el dosímetro de Perspex ambar es similar al del PMMA. Las mediciones de absorbancia se hacen a dos longitudes de onda para extender los límites de respuesta del dosímetro.

La longitud de onda de 603 nm cubre lecturas de dosis de 0.1-2 Mrad (1 - 20 KGy) y es relativamente estable a los efectos de la temperatura. La longitud de onda de 651 nm en cambio, cubre dosis absorbidas entre 0.5 a 5 Mrad (5 - 50 KGy), pero es poco estable

con la temperatura.

La relación absorbancia-dosis no es lineal, por lo que debe calibrarse, por ejemplo, contra el dosímetro de Fricke en una posición en particular y bajo condiciones de equilibrio electrónico.

Como en el caso del dosímetro de Perspex rojo, el dosímetro de Perspex ámbar no es estable después de la irradiación y existe también el efecto de lote. La precisión que puede conseguirse es del 3%.^{7,12,17.}

2.5.2.5. Dosímetro de Acetato de celulosa.

El proceso empleado para la determinación de la dosis absorbida, es el cambio de absorbancia inducido por la radiación en la película de acetato de celulosa.

El dosímetro es una película coloreada de acetato de celulosa de tamaño conveniente. Se han utilizado más de 60 colores en láminas de 20×24×0.01 pulgadas (50.8×61×0.025 cm).

El rango de dosis absorbida que puede medirse es de 5×10^5 a 5×10^7 rad (5×10^3 - 5×10^5 Gy).

Las medidas del cambio de absorbancia se efectúan en un espectrofotómetro o en un densitómetro y filtros de colores. La longitud de onda conveniente depende del color utilizado. Por ejemplo, para el color rosa claro y el púrpura, las longitudes de onda adecuadas son de 530 y 437 nm respectivamente. La precisión que puede lograrse es del orden del 10%.

La dosis absorbida se determina de una curva de respuesta, por la diferencia de absorbancia antes y después de la exposición. En el color rosa claro disminuye la absorbancia después de la irradiación.

ción, mientras que en el color púrpura se incrementa.

Este dosímetro tiene ciertas desventajas, ya que variaciones en la concentración de colorante, introduce errores en la lectura y limita la precisión, además de que muy altas razones de dosis y energías de entrada, así como altas temperaturas, pueden destruir el dosímetro.¹²

2.5.2.6. Otros dosímetros de película plástica.

Existen, además de las ya mencionadas, muchas otras películas plásticas comercialmente disponibles para uso en dosimetría en el rango de Mrad (K Gy). Algunas de ellas son el tereftalato de polietileno, celulosa, triacetato de celulosa, acetato butirato de celulosa, policarbonato, fluoruro de polivinilo, plásticos de melanina, cloruro de polivinilideno, etc. El espesor conveniente es de 0.1 a 0.2 mm generalmente.

El efecto de la radiación que se aprovecha usualmente para la medición de la dosis absorbida es el cambio de absorbancia a una longitud de onda seleccionada en la parte azul o cerca del ultravioleta del espectro. El cuadro número 2 muestra, para algunos tipos de película, la longitud de onda adecuada para la medición espectrofotométrica del cambio de absorbancia y los límites aproximados de dosis absorbida.

La principal desventaja de estos dosímetros es que su reproducibilidad es pobre además de que son dependientes de la temperatura y de la razón de dosis aunque son lo suficientemente delgados para una adecuada medición de la distribución de dosis?¹⁷

2.5.3. Colorantes radiocrómicos.

Estos sistemas dosimétricos se basan en la producción de una coloración intensa permanente, cuando se exponen a la radiación soluciones incoloras de ciertos precursores colorantes, usualmente leuco-trifenilmetanos tales como cianuros, carbinoles, bases o metóxidos de pararrosanilina, verde malaquita, fucsina nueva, etc. Pueden también utilizarse geles, películas delgadas o papel impregnado.

La dosis se deriva de la medición espectrofotométrica del incremento en la absorbancia inducida por la radiación a una longitud de onda que varía con el colorante y solvente seleccionado.

Los sistemas radiocrómicos presentan varias ventajas como son:

- Larga vida de anaquel.
- Independencia de la razón de dosis hasta 10^{14} rad/seg (10^{12} Gy/seg).
- Bajo número atómico, y por ende, buena equivalencia-producto.
- Igual respuesta en aire, N_2 , vacío, etc.
- Poca dependencia de la temperatura en el caso de sistemas sólidos.
- Respuesta estable.
- No mucha sensibilidad a impurezas.
- Procedimientos sencillos de lectura.

Estos sistemas son sensibles a la luz ultravioleta, incluyendo a la luz del sol, y la respuesta de algunos de ellos puede verse afectada por alta humedad relativa.

CUADRO NUMERO 2.

Otras películas plásticas para dosimetría.

Tipo de película	Longitud de onda para medición del cambio de absorbancia (nm).	Rango aproximado de dosis absorbida.	
		Mrad	KGy
di- y triacetato de celulosa.	250,290,320.	5 - 80	50 - 800
Butirato acetato de celulosa.	325	5 - 80	50 - 800
Policarbonato.	290,300,325.	1 - 50	10 - 500
Tereftalato de polietileno.	325	5 - 80	50 - 800
Fluoruro de polivinilo.	315,352.	3 - 30	30 - 300
Cloruro de tetrazolio en alcohol polivinílico.	480	0.2 - 10	2 - 100

CUADRO NUMERO 3.

Soluciones de colorantes radiocrómicos 5.0 mM.

Derivado	Solvente	G (molec./100 eV)	C.I.*	ϵ ($\times 10^5 M^{-1} cm^{-1}$)	λ (nm)
Cristal violeta	N,N,dimetil formamida.	0.141	42555	1.18	597
Azul de antracina.	Isopropanol.	0.019	42075	0.86	612
Verde malaquita.	Metil celosolve.	0.425	42000	1.00	624,427.
Violeta de hexahidroxietyl.	Metil celosolve.	0.788	—	0.43	599
Verde etil.	Ac. acético acuoso.	0.890	42590	0.72	620,420.
Fucsina nueva.	Metil celosolve.	0.280	42520	1.13	558
Pararrosanilina.	Metil celosolve.	0.315	42500	1.39	549

* C.I.* Colour Index

Pueden distinguirse dos categorías principales; Sistemas radiocrómicos líquidos y sistemas radiocrómicos sólidos.

Sistemas radiocrómicos líquidos.

Estos sistemas se encuentran comercialmente disponibles en ampolletas selladas de vidrio de 5 ml, o pueden hacerse mediante diversos reactivos químicos.

El rango de dosis absorbida es de 10^3 a 10^6 rad ($10 - 10^3$ Gy). El valor exacto de G, así como el coeficiente de extinción molar y la longitud de onda para una lectura dada, dependerá de la concentración, tipo y lote de colorante radiocrómico utilizado. La precisión que puede lograrse es del 3%.

La respuesta de estos dosímetros es lineal para dosis de hasta 10^6 rad (10^4 Gy) si se usan bajo saturación de oxígeno o en presencia de algún oxidante débil (como por ejemplo, el nitrobenzeno a concentración 30 mM). Soluciones aereadas proveen lecturas de dosis absorbida en el rango de $10^3 - 10^5$ rad ($10 - 10^3$ Gy).

Debe recordarse que estas soluciones son sensibles a la luz del sol y a la luz fluorescente blanca, por lo que se recomienda almacenarlas en frascos de vidrio color ámbar, así como de utilizar luz amarilla o de poco voltaje además de plásticos absorbentes de luz ultravioleta sobre ventanas y fuentes de luz.

Sistemas radiocrómicos sólidos.

Este grupo de dosímetros comprenden películas incoloras o pa-

peles blancos impregnados en espesores de alrededor de 0.02 -- 0.1 mm, conteniendo hasta 10% de colorante radiocrómico.

La película plástica puede ser de nylon, butiral polivinilo, acetato de polivinilo, cloruro de polivinilo, triacetato de celulosa, celulosa, etc.

Estos dosímetros son útiles para medir dosis, razones de dosis y distribuciones de dosis entre límites de alrededor de 10^5 - 10^7 rad (10^3 - 10^5 Gy) con límites de precisión de $\pm 3\%$ si se controla el espesor.^{7,12,17}

2.5.4. Emulsiones fotográficas.

Diversos tipos de películas fotográficas son muy usadas como dosímetros de radiaciones X o gamma. La radiación impresiona una pequeña placa cuyo grado de transparencia, después de revelado con normas fijas, es medida por un fotómetro adecuado. De dicha transparencia se deduce la dosis total absorbida tras un calibrado previo de cada tipo de película.

El dosímetro consiste de una película plástica incolora cubierta por ambos lados por capas delgadas de emulsiones de halogenuro de plata. Estos dosímetros tienen gran aplicación en el campo de seguridad física y monitoreo personal.

Las ventajas de estos dosímetros son que la producción y procedimientos de evaluación están bien establecidos y estandarizados, son resistentes, la impresión es relativamente estable y la respuesta es independiente de la razón de dosis, excepto para pulsos muy cortos de alta intensidad. Sin embargo, el uso de la plata como

principal componente hace que las películas sean relativamente caras, el revelado requiere de un cuarto oscuro y sustancias químicas de procesado bajo condiciones controladas y consumo de tiempo, además de que la respuesta de las emulsiones es muy dependiente de la energía debido a la interacción fotoeléctrica con los constituyentes de alto número atómico (Ag, Br, I, etc.).

Conociendo aproximadamente el rango de exposición y escogiendo la combinación apropiada de película y tratamiento, pueden hacerse interpretaciones de exposición a rayos gamma en el rango de 1 mR a 100 mR. La tabla número 4 da una descripción de varios dosímetros de película fotográfica y su respuesta a rayos gamma.

Para haces de electrones, la dependencia de la energía con las películas fotográficas está en relación con la geometría del haz, esto es, si el haz es difuso, la dependencia de la energía no es tan intensa como en el caso de un haz recto. Esta es una situación familiar para todos los dosímetros de película delgada.

La respuesta fotográfica a los rayos X es independiente de la razón de dosis hasta 2×10^8 rad/seg (2×10^6 Gy/seg).

La reproducibilidad del sistema es de $\pm 5\%$. Las películas son calibradas usualmente en campos de rayos X y de rayos gamma en términos de lecturas en cámaras de ionización.

2.5.5. Termoluminiscencia (TLD).

Ciertos cristales inorgánicos almacenan energía en la forma de electrones atrapados. Bajo irradiación de los cristales, estos electrones son liberados y vuelven a atrapar en otros lados, dejando tras de sí cavidades cargadas positivamente. Si después de la irradiación

CUADRO NUMERO 4.

Respuesta a rayos γ y descripción de varios dosímetros de película fotográfica.

Rango. (Roentgens).		0.02 - 5	10 - 1,000	0.05 - 10	0.05 - 10	0.038 - 8.0
Diámetro del grano. (μm).		1.3	0.1 - 0.5	1 - 2	0.5 - 1.5	1 - 2
Espesor de emulsión. (μm)		30	—	20	10	—
Contenido de plata. (mg/cm^2).		9.0	0.6	1.6	2.2	2.0
Contenido de halógeno. (mg/cm^2).	Br	6.7	0.4	1.1	1.5	1.2
	I	0.17	0.03	0.03	0.06	0.04
	Cl	0.02	<0.01	0.02	0.01	0.02

se aplica un tratamiento térmico, los electrones se liberan nuevamente de sus sitios y se recombinan con las cavidades mencionadas, emitiendo luz durante el proceso. La cantidad de luz emitida es proporcional al número de electrones liberados durante el calentamiento y entonces relacionada con la dosis de radiación absorbida.

Existen comercialmente muchos tipos de unidades de lectura termoluminiscente, los cuales tienen un ciclo de calentamiento estrictamente controlado, en orden a proveer un pico en la emisión termoluminiscente a temperaturas entre 110 y 260 °C, dependiendo del material utilizado. El espectro de emisión tiene un rango generalmente entre 350 y 600 nm, Si se utiliza un fotomultiplicador en interfase con el sistema de calentamiento, es posible medir dosis muy pequeñas representadas por la emisión de niveles de luminiscencia extremadamente bajos. Dosis de hasta 10^{-4} rad (10^{-6} Gy) pueden medirse de esta manera.

Existen varios materiales termoluminiscentes y cada uno tiene sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, el fluoruro de litio (LiF) y el fluoruro de calcio activado con manganeso ($\text{CaF}_2:\text{Mn}$), muestran una dependencia mayor respecto a la energía de radiación que el borato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), sin embargo, éste último es higroscópico y puede provocar errores en las lecturas cuando existen humedades relativas altas.

Los materiales termoluminiscentes pueden utilizarse en forma de polvo suelto, encapsulados en plásticos-como teflón o polietileno- o en bulbos de vidrio sellados.

Pueden medirse dosis de hasta 10^6 rad (10^4 Gy) con buena reproducibilidad si se actúa cuidadosamente^{7,12,17,18}.

2.5.6. LioLuminiscencia.

Ciertos materiales emiten luz cuando se disuelven en agua después de la irradiación. Este efecto se denomina lioluminiscencia. Una medida de la luz emitida, provee una estimación de la dosis de radiación absorbida. Materiales orgánicos, especialmente azúcares como la manosa, trihalosa, glucosa, etc., pueden utilizarse para medir dosis de radiación entre 0.3 - 100 Krad (3 Gy - 1 KGy) con buena reproducibilidad. La respuesta de la dosis es casi lineal hasta que ocurre la saturación, alrededor de 150 Krad (1.5 KGy). Mayores dosis causan una disminución en la emisión de luz, sin embargo, algunos materiales pueden proveer medidas de dosis hasta de 500 Krad (5 KGy).^{7, 17}

2.5.7. Otros sistemas dosimétricos.

Existen en la actualidad una gran cantidad de sistemas dosimétricos además de los ya mencionados (consultar referencias 1,7,12, 14,17,22). Muchos de ellos aún están en investigación y otros tantos son poco empleados debido a sus características particulares. Tratar de describir todos los sistemas dosimétricos existentes sería una labor verdaderamente difícil y estaría fuera de los objetivos del presente trabajo. A continuación se enlistará a manera de tabla, sólo algunos otros sistemas dosimétricos más, dignos de mencionarse por su relativa importancia.

CUADRO NUMERO 5.

Otros sistemas dosimétricos.

Sistema	Efecto de la radiación	Lectura	Rango de dosis	Precisión
1.-Vidrios y cristales.	Desarrollo de color.	Densitometría. Espectrofotometría.	$10^4 - 10^8$ rad ($10^2 - 10^6$ Gy)	5%
2.-Vidrios y cristales.	Fotoluminiscencia.	Fluorimetría.	$1 - 1.5 \times 10^4$ rad ($10^{-2} - 1.5 \times 10^2$ Gy)	
3.-Aminoácidos y polímeros.	Cambio en el espectro RPE.	RPE.	$10^3 - 10^9$ rad ($10 - 10^7$ Gy)	2%
4.-Polímeros.	Degradación en el peso molecular. Pérdida e incremento de viscosidad.	Viscosimetría.	$10^4 - 10^7$ rad ($10^2 - 10^5$ Gy)	
5.-Reducción o activación de quelatos metálicos. (Co^{3+} -EDTA).	Reducción a Co^{2+} .	Espectrofotometría de U.V.	0.01 - 10 Mrad (0.1 - 100 KGy)	5%
6.-Azúcares. D-glucosa. Maltosa. Dextrosa.	Cambio en la actividad óptica.	Rotación óptica.	$1 - 5 \times 10^8$ rad ($10^{-2} - 5 \times 10^6$ Gy)	5%

CUADRO NUMERO 5.

Otros sistemas dosimétricos.

(Continuación).

Comentarios:

- 1.-Color inestable después de la irradiación, dependiente de la energía espectral, buena reproducibilidad entre lotes, posibilidad de re-uso, independiente de la razón de dosis hasta 10^6 rad/h (10^4 Gy/h).
- 2.-Respuesta no lineal a altas dosis por autoabsorción, dependiente de la energía espectral, inestabilidad con el tiempo, buena reproducibilidad, dependiente de la razón de dosis y de la temperatura durante la irradiación.
- 3.-Alto costo en equipo, respuesta lineal, estable varios días después de la irradiación.
- 4.-Respuesta no lineal con la dosis, sensible a la presencia o ausencia de oxígeno, diferencias entre lotes.
- 5.-Estable antes y después de la irradiación, variación entre lotes.
- 6.-Estable antes pero no después de la irradiación, independiente de la temperatura de irradiación.

CAPITULO III.

DOSIMETRO DE ETANOL-CLOROBENCENO.

3.1. Introducción.

El uso de soluciones de etanol-clorobenceno fue propuesto por Dvornik et al. en 1966^{2,3} Las características encontradas en este sistema dosimétrico, hicieron verlo desde entonces como uno de los más eficientes para calibrar fuentes radiactivas y controlar procesos industriales de irradiación.

En 1977 el Organismo Internacional de Energía Atómica (International Atomic Energy Agency), inició un proyecto de estandarización e intercomparación de sistemas dosimétricos para procesos de irradiación industrial. Los objetivos de este proyecto eran desarrollar y seleccionar sistemas adecuados de dosimetría para su implementación en un programa internacional de intercomparación^{2,4}

En orden a infundir confianza en el desarrollo de sistemas dosimétricos adecuados, una Comisión Mixta del Organismo Internacional de Energía Atómica y la Organización para la Agricultura y la Alimentación (OIEA-FAO), celebró en 1978 una serie de contratos y acuerdos con diversos organismos para realizar estudios de varios dosímetros recomendados por la comisión, encontrándose entre ellos el dosímetro de etanol-clorobenceno^{2,5}

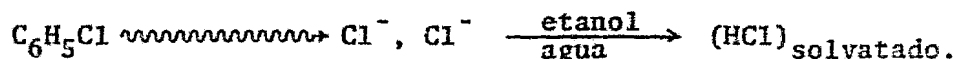
Desde entonces, el dosímetro de etanol-clorobenceno ha sido estudiado, y aún en la actualidad se sigue recabando información útil acerca de este sistema^{24,25,26,27}. Esto no debe parecer extraño, en

vista de que las condiciones de irradiación en una planta de procesamiento industrial pueden ser muy distintas a aquellas en que los sistemas dosimétricos son calibrados, resultando esencial que todos los efectos que puedan influenciar la respuesta de un sistema dado, sean completamente comprendidos antes de que pueda ser usado con absoluta confianza.

Como una contribución a la implementación de dosímetros químicos, el presente capítulo representa el estudio bibliográfico y experimental del dosímetro de etanol-clorobenceno.

3.2. Dosímetro de etanol-clorobenceno (CBA).

El dosímetro comprende una solución aerada de clorobenceno y agua en etanol, a la cual se añade una pequeña cantidad de acetona. La radiación induce la disociación del clorobenceno para producir ácido clorhídrico:



Han sido estudiadas soluciones con diversas concentraciones de clorobenceno, encontrándose que el uso de una concentración dada, dependerá del nivel de dosis y razón de dosis a utilizar. Por ejemplo, se recomienda una concentración de 4% en volumen de clorobenceno para dosis hasta de 1 Mrad (10 KGy) a razones de dosis superiores a 15 rad/seg (0.15 Gy/seg). Concentraciones entre 20 y 40% pueden utilizarse para dosis superiores a los 10 Mrad (100 KGy). Sin embargo, para fines prácticos en dosimetría, se recomienda una

solución conteniendo 100 ml de clorobenceno (10%), 40 ml de agua, 0.4 ml de acetona y aforo a 1,000 ml con etanol absoluto^{7,23}.

La precisión analítica del método es mejor del 1% y la exactitud mayor del 3%.

Dosis y razón de dosis.

El límite inferior lo impone el método analítico y es de alrededor de 40 Krad (400 Gy), sin embargo, por observación cuidadosa del punto final en el método volumétrico, o por detección espectrofotométrica, este límite puede bajarse hasta 20 Krad (200 KGy) sin pérdida de exactitud. El límite superior depende de la razón de dosis, encontrándose que, a medida de que se incrementa la razón de dosis, aumenta el rango de linealidad en el rendimiento del producto radiolítico. Esto se ilustra en el cuadro número 6 (para soluciones aereadas)^{7,28}.

Para campos de radiación no homogéneos, el límite superior queda determinado por la dosis absorbida límite superior correspondiente a la menor razón de dosis utilizada en la muestra⁷.

Determinación de la dosis absorbida.

La determinación de la dosis absorbida puede efectuarse en tres formas distintas; (a) titulación semiautomática de iones H^+ y Cl^- , (b) determinación espectrofotométrica de iones Cl^- y (c) determinación a alta frecuencia del cambio en la constante dieléctrica^{7,12}.

El método volumétrico involucra determinaciones químicas más o

menos laboriosas, en el cual, la concentración de HCl puede determinarse por titulación mercurimétrica o alcalimétrica de la muestra irradiada, en todo el intervalo de dosis!^{12,29}

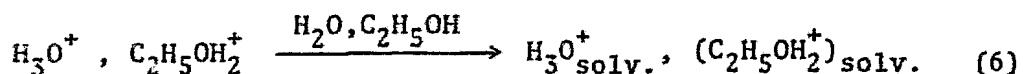
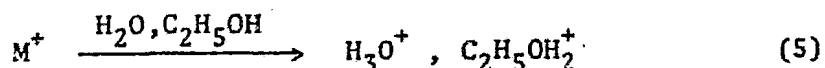
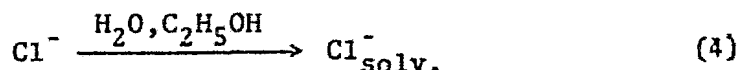
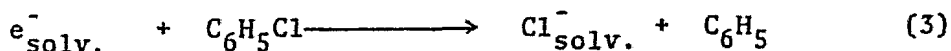
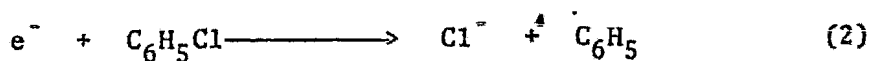
La determinación espectrofotométrica se efectúa a una longitud de onda de 460 nm en celdas de 1 cm de diámetro. Por este método se determina la coloración producida por la concentración de iones Cl^- en una solución de sulfato férricoamónico-tiocianatomercuríco.³¹

Para uso rutinario, el método oscilométrico es el más conveniente, ya que evita el manipuleo tedioso de las soluciones y permite una medición directa. Sin embargo, este método es muy sensible a los cambios en la capacidad de manipulación del operador.

La determinación a alta frecuencia de la conductividad de la solución no necesita de una conexión directa (contacto galvánico) con el circuito; la ampolleta sellada que contiene la solución a investigar es simplemente colocada entre dos platos de un circuito oscilatorio paralelo. La calidad del vidrio de las ampolletas utilizadas, así como el cambio de coloración sufrido en ellas debido a la irradiación, no interfiere en la exactitud de las determinaciones!^{12,17,29,30}

Mecanismo de formación del HCl.

Investigaciones del mecanismo de formación del HCl indican que un electrón disociante no térmico atrapado por la molécula de clorobenceno, es responsable de la mayor parte del HCl producido. Las principales reacciones son:



Las reacciones (1) a (6) representan la formación y estabilización del ácido clorhídrico en la etapa avanzada de radiólisis^{2*}

Características del dosímetro e influencia de varios factores.

En la forma soluble, el HCl es radiolíticamente estable, aún cuando se presenta en una concentración de 0.5 M. El clorobenceno se utiliza como fuente de cloruros debido a su alta estabilidad térmica y su resistencia a la oxidación. El etanol es un inhibidor de la oxidación en cadena y un excelente disolvente para el HCl. Debido a su alta afinidad protónica, el etanol reacciona eficientemente con los iones positivos generados radiolíticamente, reduciendo con esto, la energía de neutralización de carga^{2,3}

Es favorable una concentración de agua comparativamente alta, debido a que su efecto sobre la producción de iones cloruro es en-

tonces fácilmente controlable. Un incremento en la concentración de agua de 4 a 8% provoca un decremento del valor $G(Cl^-)$ de solamente 0.1.²³

El aumento en la concentración de oxígeno provoca, al principio, una disminución del valor $G(Cl^-)$, hasta llegar a un nivel en el que se mantiene constante (efecto de saturación).²⁸

El aumento en la concentración de clorobenceno, como es de esperarse, incrementa los valores de $G(Cl^-)$ para una misma dosis y razón de dosis, encontrándose los valores más altos en las muestras al vacío y más bajos en las muestras en equilibrio con aire o con oxígeno.²⁸

Debido a la acumulación de productos radiolíticos, los valores de $G(Cl^-)$ decrecen con la dosis en los sistemas al vacío. En los sistemas aereados, por otro lado, el consumo de oxígeno que inicialmente provoca una disminución en los valores de $G(Cl^-)$, vienen a incrementarse con la dosis. Estos efectos llegan a valores constantes cuando se llega a los niveles de saturación.²⁹

Bajo la irradiación se producen gases, esto puede ocasionar problemas en las ampollitas selladas. Se recomienda por tanto, un volumen libre en cualquier ampollita que no exceda de la mitad del volumen total.¹²

Cuando se almacena en la obscuridad, el sistema es estable aún por varios meses. El sistema expuesto a la luz del día genera cloruros a razón de 1.2 y 6.6×10^{-17} M/h en soluciones de clorobenceno al 4 y 40% respectivamente, resultando equivalente al efecto de 30 y 150 rad/h (0.3 y 1.5 Gy/h) de irradiación gamma a estas concentraciones.²³

Como dosímetro de laboratorio y uso industrial a niveles de dosis medias y altas, y para altas razones de dosis, el sistema de etanol-clorobenceno presenta grandes ventajas, a saber; amplio rango cubierto por una simple y rápida técnica analítica, alta precisión y baja sensibilidad a impurezas. Las limitaciones derivadas de los efectos de dosis a bajas razones de dosis, no son de tomarse en cuenta, ya que el dosímetro se emplea a razones de dosis relativamente altas.²³

El dosímetro cubre el rango de dosis que no puede cubrirse con el dosímetro de Fricke y puede aplicarse en lugar del dosímetro de sulfato cérico o el de ácido oxálico. El tiempo requerido para preparar el sistema (simple mezcla de componentes sin ninguna purificación especial), contenedores (sin un lavado laborioso) y análisis, es muchas veces más corto que para el sistema de sulfato cérico.³⁰

Considerando el problema de dosimetría de procesos, la aplicación del sistema de etanol-clorobenceno como un estandar secundario en lugar del método calorimétrico, puede ser posible, pero solamente después de una precisa calibración absoluta.³⁰

El dosímetro puede aplicarse con ventaja en el rango de dosis útil para propósitos de preservación de alimentos, por ejemplo, en la eliminación de Salmonella; 0.65 Mrad (6.5 KGy), esterilización del tocino; 1 - 5 Mrad (10 - 50 KGy), aumento en la vida de anaquel de la carne; 0.1 - 0.5 Mrad (1 - 5 KGy).²⁹

Una estimación de los valores de G(HCL) para irradiación gamma y electrones, permite demostrar la posibilidad de proveer una buena equivalencia a tejido o a material, empleando distintas concentraciones de clorobenceno (cuadro número 7).²⁹

CUADRO NUMERO 6.

Dosis superiores límite para el uso del dosímetro
de etanol-clorobenceno.^{a,12.}

Razón de dosis.								
rad/seg.	4.5	13	22	30	115	400	2,550	10 ⁹
(Gy/seg).	0.045	0.13	0.22	0.30	1.15	4.00	25.50	10 ⁷
Dosis límite.								
rad X 10 ⁶	0.2	1.0	1.5	2.0	6.0	>6.0	>6.0	20 ^b
(Gy X 10 ⁴)								

(a) Contenedores abiertos.

(b) Electrones pulsados de 10 MeV. Pulsos de 7 μ seg repetidos 300 veces por seg. Razón de dosis en el pulso de aproximadamente 10⁹ rad/seg (10⁷ Gy/seg).

CUADRO NUMERO 7.

Características de absorción de energía para el dosímetro de etanol-clorobenceno y algunos materiales^{2,9}

Conc. de CB (% en Vol.)	Dosímetro.				Material.	
	G(HCl) 0.1 - 10 Mrad (10 - 100 KGy)	$\rho_{20^{\circ}\text{C}}$ (g/cm ³)	Elec. por gramo (10 ²³ e/g)	μ/ρ (cm ² /g)	Elec. por gramo (10 ²³ e/g)	μ/ρ (cm ² /g)
4	4.00 ± 0.05	0.817	3.38	0.0300		
10	5.00 ± 0.05	0.836	3.36	0.0299		
14	5.36	0.848	3.34	0.0298		
18	5.60	0.861	3.33	0.0296	H ₂ O	3.34 0.0295
20	5.66 ± 0.05	0.867	3.32	0.0296	H ₂ SO ₄ 0.8 N.	3.33 0.0295
25	5.80	0.883	3.30	0.0292	Músculo.	3.36 0.0293
30	5.92	0.898	3.29	0.0292		
40	6.06 ± 0.06	0.929	3.26	0.0289	Poliestireno	3.24 0.0288
50	6.10	0.960	3.23	0.0287	Lucita.	3.24 0.0288
60	6.12	0.991	3.20	0.0284	Hueso.	3.00 0.0283

Se ha estudiado la respuesta a electrones de 10 MeV y comparado con la respuesta a rayos gamma de Co-60, tanto en muestras selladas al vacío como en muestras con acceso al aire, encontrándose una excelente correlación entre los valores de $(G_{\text{aire}})_{\text{gamma}}$ y $(G)_{\text{electrones}}$.³⁰

3.3. Parte experimental.

3.3.1. Resumen.

Se estudió el comportamiento de soluciones de clorobenceno en una solución de alcohol-agua (CBA), envasadas en ampollitas de vidrio color ámbar, selladas a fuego, irradiadas a niveles y razones de dosis variables de radiación gamma de Co-60, almacenadas en la oscuridad a temperatura ambiente, valoradas por titulación semiautomática de iones H^+ y Cl^- , y por espectrofotometría del ión Cl^- .

Como dosímetros de referencia se utilizaron solución de sulfato ferroso (dosímetro de Fricke) para dosis medias y dosímetros de polimetilmetacrilato teñido (PMMA), conocidos comercialmente como acrílico rojo o Perspex rojo para dosis altas, dentro de los límites de utilidad de ambos sistemas, empleando como contenedores el mismo tipo de ampollitas.

Los resultados muestran que es posible la implementación de un sistema dosimétrico a base de soluciones de etanol-clorobenceno, por evaluación volumétrica de iones H^+ y Cl^- para dosis totales de 0.05 - 10 Mrad (0.5 - 100 KGy) -pudiendo incrementar el

límite superior hasta 40 Mrad (400 KGy) aumentando la concentración de clorobenceno en la solución hidroalcohólica- empleando razones de dosis entre 110 rad/h y 3.1 Mrad/h (1.1 Gy/h y 31 KGy/h), y por evaluación espectrofotométrica de iones Cl^- para dosis totales de 10 - 100 Krad (100 - 1,000 Gy) a razones de dosis entre 120 rad/h y 3 Krad/h (1.2 Gy/h y 30 KGy/h).

3.3.2. Materiales y equipo.

Reactivos.

- 1.- Clorobenceno. $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$. Reactivo analítico J.T. Baker 9179.
- 2.- Alcohol etílico absoluto. $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. R.A. J.T. Baker 9001.
- 3.- Acetona. $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$. R.A. J.T. Baker 9006.
- 4.- Azul de bromofenol. R.A. J.T. Baker D293.
- 5.- Difencilcarbazona. R.A. J.T. Baker K617.
- 6.- Carbonato de sodio anhidro. Na_2CO_3 . R.A. J.T. Baker 3602.
- 7.- Nitrato mercúrico. $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$. R.A. J.T. Baker 2614.
- 8.- Acido nítrico. HNO_3 . R.A. J.T. Baker 9601.
- 9.- Cloruro de sodio. NaCl . R.A. J.T. Baker 3624.
- 10.- Hidróxido de sodio. NaOH . R.A. J.T. Baker 3722.
- 11.- Acido clorhídrico. HCl . R.A. J.T. Baker 9535.
- 12.- Rojo de metilo. R.A. J.T. Baker R086.
- 13.- Anaranjado de metilo. R.A. J.T. Baker 2699.
- 14.- Tetraborato sódico. Borax. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$. R.A.
- 15.- Sulfato férrico amónico. $\text{Fe}(\text{NH}_4)\text{SO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$. R.A. J.T. Baker 1988.

- 16.- Tiocianato mercúrico. $\text{Hg}(\text{SCN})_2$. R.A. Merck 5950667.
- 17.- Acido sulfúrico. H_2SO_4 . R.A. J.T. Baker 9681.
- 18.- Sulfato ferroso amónico. $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$. R.A. J.T. Baker 2054.

Equipo.

- 1.- Equipo normal de laboratorio (matraces, vasos de p.p., pipetas volumétricas, etc.).
- 2.- Ampolletas de vidrio color ámbar de 10 ml de capacidad.
- 3.- Equipo para titulación semiautomática (agitador magnético Thermolyne y buretas certificadas Assistent de 10 ml con divisiones de 0.020 ml.).
- 4.- Gammabeam-650 de la Atomic Energy of Canada Limited (AECL), fuente de cobalto-60 con una actividad calculada de 16,850 y 16,800 Ci (6.234×10^{14} y 6.216×10^{14} Bq) y una razón de dosis central de 3.1 Mrad/h y 3.034 Mrad/h (31.0 KGy/h, 30.34 KGy/h) en las fechas de su utilización.
- 5.- Gammacell-200 de la AECL, fuente de cobalto-60 con una actividad calculada de 706 Ci (2.612×10^{13} Bq) y una razón de dosis de 117 rad/h (1.17 Gy/h) en las fechas de su utilización.
- 6.- Espectrofotómetro Unicam, modelo SP-500.
- 7.- Celdas de absorción de 1 cm.
- 8.- Dosímetros a base de polimetilmetacrilato (PMMA) teñido (Perspex rojo o acrílico rojo).
- 9.- Lector de dosímetros de la AECL tipo BC-2. Dosímetros patrón y curva de calibración.

10.- Equipo para soldar vidrio a fuego.

3.3.3. Preparación de soluciones.

- 1.- Solución dosimétrica de Fricke (ver sección 2.4.3.).
- 2.- Solución de etanol-clorobenceno. En un matraz volumétrico se colocan 100 ml de clorobenceno, 40 ml de agua destilada, 0.4 ml de acetona y se afora a 1,000 ml con alcohol de 96°.
- 3.- Alkali estandar de Na_2CO_3 0.0025 N. Disolver 132.5 mg de Na_2CO_3 -previamente deshidratado por calentamiento a 260 - 270 °C durante 30 - 60 min- en 160 ml de agua destilada. Pasar a un matraz volumétrico y aforar con agua destilada a 100 ml.
- 4.- Solución de NaOH 0.15 N. Disolver 615 mg de NaOH y aforar con agua destilada a 100 ml.
- 5.- Indicador de azul de bromofenol (BPB). Disolver 100 mg de BPB en 100 ml de alcohol de 96°. Añadir 1 ml de NaOH 0.15 N.
- 6.- Indicador de difenilcarbazona (DPC). Disolver 1 g de DPC en 100 ml de alcohol de 96°.
- 7.- Solución de HCl 0.1 N. Se miden 8.4 ml de HCl y se afora a 1,000 ml con agua destilada.
- 8.- Solución de HCl 0.0025 N. Medir 25 ml de solución de HCl 0.1 N y aforar a 1,000 ml con agua destilada.
- 9.- Solución de NaCl 0.0025 N. Disolver 147.5 mg de NaCl y aforar a 1,000 ml con agua destilada.
- 10.- Solución de HNO_3 1 N. Medir 3 ml de HNO_3 y aforar a 100 ml agua destilada.
- 11.- Solución de HNO_3 0.04 N. Medir 40 ml de solución de HNO_3 1 N

- y aforar a 1,000 ml con agua destilada.
- 12.- Solución de Na_2CO_3 0.05 N. Disolver 1.325 g de Na_2CO_3 -previamente deshidratado por calentamiento a 260 - 270 °C durante 30 - 60 min- y aforar a 500 ml con agua destilada.
 - 13.- Solución de nitrato mercúrico 0.0025 N. Pesar 856.55 mg de $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ y añadir 40 ml de solución de HNO_3 1 N. Aforar con agua destilada a 100 ml y entonces agregar lentamente y agitando, alcohol de 96° hasta un aforo total de 1,000 ml. Guardar en un frasco color ámbar y proteger de la luz intensa.
 - 14.- Solución de HNO_3 -alcohólico 0.4 N. Medir 21.2 ml de HNO_3 y aforar a 1,000 ml con alcohol de 96°.
 - 15.- Alcohol de 90°. Medir 93.8 ml de alcohol de 96° y aforar a 100 ml con agua destilada.
 - 16.- Indicador rojo de metilo. Disolver 0.1 g de rojo de metilo en 60 ml de alcohol de 96° y aforar a 100 ml con agua destilada.
 - 17.- Indicador anaranjado de metilo. Disolver 0.05 g de anaranjado de metilo en agua caliente y aforar a 100 ml con agua destilada.
 - 18.- Solución de bórax 0.1 N. Pesar 9.45 g de bórax. Disolver y aforar a 500 ml con agua destilada.
 - 19.- Solución estándar de Cl^- . Pesar 1.6485 g de NaCl. Disolver en agua destilada y aforar a 1,000 ml. Tomar una alícuota de 10 ml y aforar a 1000 ml con agua destilada. Esta solución tendrá una concentración de 10 µg/ml (10 ppm).
 - 20.- Solución de sulfato férrico-amónico 0.25 M. Pesar 30.135 g de $\text{Fe}(\text{NH}_4)\text{SO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$. Disolver y aforar a 250 ml con ácido nítrico 9 M.

- 21.- Acido nítrico 9 M. Medir 150 ml de HNO_3 y aforar a 250 ml con agua destilada.
- 22.- Solución saturada de tiocianato mercúrico en etanol. En un volumen dado de etanol, disolver a saturación $\text{Hg}(\text{SCN})_2$.³⁶

3.3.4. Métodos.

Titulación de las soluciones reactivos.

Las soluciones reactivos se titularon de acuerdo con el cuadro siguiente:

Reactivo titulado.	Reactivo titulante.	Indicador.
HCl 0.0025 N.	Na_2CO_3 0.0025 N.	Naranja de metilo.
HCl 0.1 N.	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 0.1 N.	Rojo de metilo.
HNO_3 1 N.	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 0.1 N.	Rojo de metilo.
HNO_3 0.04 N.	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 0.1 N.	Rojo de metilo.
HNO_3 (alc.) 0.04 N.	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 0.1 N.	Rojo de metilo.
* Na_2CO_3 0.0025 N.	HCl 0.0025 N.	Azul de bromofenol.
Na_2CO_3 0.05 N.	HCl 0.1 N.	Naranja de metilo.
NaOH 0.15 N.	HCl 0.1 N.	Naranja de metilo.
** $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ 0.0025 N.	NaCl 0.0025 N.	Difenilcarbazona.

* y ** son titulaciones rutinarias para calibración de los reactivos, antes y después de su utilización.

Solución dosimétrica.

Se prepararon soluciones de clorobenceno al 10% en alcohol-agua, envasadas en ampollitas de vidrio color ámbar, selladas a fuego en atmósfera natural y almacenadas en la oscuridad.

Dosímetros de referencia.

Se utilizaron como dosímetros de referencia soluciones de sulfato ferroso (dosímetro de Fricke) y dosímetros de polimetilmetacrilato (Perspex rojo o acrílico rojo).³³

Irradiación.

Se irradiaron ampollitas con 5 ml de solución de CBA y ampollitas con 5 ml de solución de Fricke para dosis y razones de dosis medias en el Gammacell-200, y ampollitas también con 5 ml de solución de CBA, así como ampollitas cortadas por abajo del cuello con dosímetros de acrílico rojo, para dosis y razones de dosis altas en el Gammabeam-650 para irradiación central de las 12 fuentes con un diámetro interior fijo de 11.4 cm.^{31,32,33}

La irradiación se llevó a cabo en series de 8 ampollitas sobre una base circular de madera de 8 cm de diámetro, durante diferentes intervalos de tiempo.

Evaluación de las concentraciones de los iones H^+ y Cl^- en las muestras irradiadas.

Método volumétrico.

La determinación de las concentraciones de los iones H^+ y Cl^- se efectuó por titulación alcalimétrica e indicador de azul de bromofenol para el H^+ y por titulación mercurimétrica e indicador de difenilcarbazona en el caso del Cl^- de acuerdo con los siguientes procedimientos.

Titulación alcalimétrica de iones H^+ . Tomar una alícuota de solución irradiada de CBA y colocarla en un matraz Erlenmeyer de 100 ml. Agregar 4 gotas de BPB y cuanto baste para 10 ml de etanol absoluto. Titular con solución estándar de Na_2CO_3 0.0025 (2-4 gotas/seg) hasta el vire de color (amarillo claro a azul verdoso).

Titulación mercurimétrica de iones Cl^- . Acidificar la muestra anterior agregando 1 ml de solución de HNO_3 alc. 0.4 N. Agregar 8 - 10 gotas de DPC y titular con solución de nitrato mercuríco 0.0025 N hasta el vire de color (amarillo claro a rosa pálido)?

Los puntos exáctos de viraje pueden determinarse por idéntico tratamiento de una muestra no irradiada de concentración conocida.

Método espectrofotométrico.

Se determinó espectrofotométricamente la concentración de iones Cl^- en la solución dosimétrica irradiada de acuerdo con los siguientes procedimientos.

Curva de calibración. Colocar alícuotas de 0.1, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 y 10 ml de solución estandar de Cl^- (1 - 100 ppm de Cl^-) en matraces aforados de 25 ml. Añadir a cada muestra 2 ml de solución níttrica de sulfato férrico amónico, 2 ml de solución saturada de tiocianato mercúrico y aforar con alcohol de 96^o. Dejar reposar 10 min y leer la absorbancia a 460 nm en celdas de 1 cm. Utilizar como blanco alcohol de 96^o. Construir una gráfica de absorbancia contra concentración de Cl^- .^{34,35,36}

Evaluación de la concentración de Cl^- en las muestras irradiadas. Tomar una alícuota de solución dosimétrica irradiada y una alícuota igual de solución dosimétrica no irradiada. Aplicar los mismos procedimientos que en la curva de calibración y determinar la concentración a partir de ésta.

3.4. Cálculo de la dosis.

3.4.1. Método volumétrico.

Para la evaluación de la dosis absorbida en la determinación del ion H^+ puede emplearse una curva de calibración trazada con respecto a la dosimetría de referencia, o la alternativa de emplear

la ecuación:

$$D = \frac{12.37 \times 10^8 C}{\rho G} \quad (\text{rad})$$

Para la evaluación de la dosis absorbida en la determinación del ion Cl^- puede emplearse una curva de calibración trazada con respecto a la dosimetría de referencia, o la alternativa de emplear la ecuación:

$$D = \frac{7.78 \times 10^8 C}{\rho G} \quad (\text{rad})$$

en donde, para ambas ecuaciones:

D = Dosis absorbida en rad (o su equivalente en Gy).

ρ = Densidad de la solución dosimétrica de CBA empleada.

ρ = 0.836 g/ml.

G = G(HCl) = 5.0 \pm 0.05 para ampollitas selladas en atmósfera natural.

3.4.2. Método espectrofotométrico.

El valor de la dosis de radiación absorbida en Krad o en Gy (o las ppm de ión Cl^-) para cada ampollita con solución de CBA, se obtiene de la curva de calibración elaborada.

CAPITULO IV.

DISCUSION, RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

4.1. Discusión.

El dosímetro de Fricke es ampliamente usado en dosimetría debido a su alta precisión y confiabilidad, por ello -y porque la presente investigación trata de un dosímetro químico acuoso que recibe básicamente el mismo tratamiento y mismos procedimientos de lectura- este sistema es uno de los más adecuados para su utilización como dosímetro de referencia para evaluación de dosis medias.

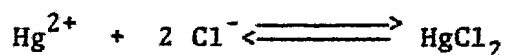
El dosímetro de acrílico rojo se empleó únicamente en el Gammabeam-650, irradiando ejemplares colocados dentro de las ampollitas, en posiciones horizontal y vertical alternadas.

Los dosímetros de acrílico rojo, fabricados por la Atomic Energy of Canada Ltd. (AECL), son cilindros de polimetilmetacrilato coloreado de 9.5 mm de diámetro y 10 mm de largo. Una vez irradiados cambian de color, pasando de un rojo claro a un rojo oscuro, por el cambio en su densidad óptica que se mide con un fotómetro de una sola longitud de onda (lector AECL,BC-2) el cual tiene una cavidad expresamente para los pequeños cilindros. De esta manera, la transmisión varía con el oscurecimiento del dosímetro. La luz que pasa es captada por una foto-resistencia,

la cual envía una señal correspondiente a un galvanómetro. Para cuantificar la lectura, se mueve un potenciómetro (con contador de tres dígitos) hasta colocar en cero al galvanómetro. La lectura permite determinar la dosis absorbida utilizando una gráfica calibrada para un lote dado.

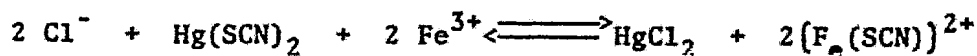
La determinación del ión H^+ involucra una reacción de neutralización del ácido libre formado, con una base estándar (alcalimetría) utilizando como indicador azul de bromofenol (BPB).

En la determinación del ión Cl^- ocurre la reacción:



que es esencialmente estequiométrica. El punto final se determina con indicador de difenilcarbazona (DPC) el cual forma un complejo azul-violeta con el mercurio (II). Sin embargo, debido a la combinación de indicadores BPB y DPC, el color final observado es rosa pálido.

El método espectrofotométrico de determinación del ion Cl^- se basa en la formación de un complejo colorido de tiocianato de fierro (III), formado por el desplazamiento del ion SCN^- por el ion Cl^- en el tiocianato de mercurio (II), en presencia de fierro (III):



4.2. Resultados.

En las figuras 14 y 15 se presentan las curvas de calibración para los iones H^+ y Cl^- respectivamente.

El cuadro número 8 conjunta los resultados de las dosis totales empleadas, sin importar las razones de dosis utilizadas y la correlación entre los sistemas de referencia (solución de Fricke y acrílico rojo) y los de las titulaciones alcalimétrica del ion H^+ y mercurimétrica del Cl^- .

En la figura 16 se presenta la curva de calibración del ion Cl^- o dosis total absorbida en Krad Vs. Densidad óptica.

En el cuadro número 9 se presentan los resultados de las mediciones de la Densidad óptica de las soluciones de cloruro de sodio equivalentes a concentraciones en ppm de ion Cl^- y las dosis de radiación en Krad y en Gy, medidas con los dosímetros de referencia.

En la figura 17 se presenta la curva de calibración para los dosímetros de acrílico rojo.

4.3. Conclusiones.

La diferencia en valores de dosis totales entre los sistemas de referencia (solución de Fricke- acrílico rojo), pueden atribuirse

irse a errores de manipulación y al empleo de dos fuentes de radiación con actividades y sus correspondientes dosis y razones de dosis muy diferentes.

Los coeficientes de correlación lineal para las columnas de datos de CBA ion H^+ y CBA ion Cl^- , en el cuadro numero 8, con valores de 0.88 y 0.87 dan una validez del 99% para ambos casos, lo que da una magnífica indicación de la precisión de las técnicas analíticas respectivas, empleando la misma solución dosimétrica en ambas determinaciones.

En la determinación espectrofotométrica es posible duplicar el límite superior del sistema propuesto, empleando el doble de reactivos y del volumen de aforo ($\mu g/50$ ml).

Los límites inferior y superior, quedan determinados por las sensibilidades analíticas en la determinación de cada ion.

Por los resultados obtenidos, se ha llegado a la conclusión de que es perfectamente factible la implementación de un sistema dosimétrico a base de soluciones acuosas de CBA para dosis medias y altas.

Se propone para estudios futuros:

- a) Análisis espectroscópico de ampollitas irradiadas y sin irradiar, por U.V., V e I.R., RMN y E.M. en orden a la

elucidación de un posible mecanismo de reacción.

- b) Análisis conductimétrico a alta frecuencia de las ampollitas.
- c) Comportamiento del dosímetro a electrones acelerados utilizando contenedores plásticos delgados.
- d) Comportamiento del dosímetro a mezcla de radiaciones.

CUADRO NUMERO 8.

Resultados de las dosis medidas (KGy) con los diferentes sistemas dosimétricos.

Nº	Soln. Fricke	Acrílico rojo	CBA ion H ⁺	CBA ion Cl ⁻
1	0.19	0.20	-----	-----
2	0.38	0.40	0.40	0.40
3	0.48	0.50	0.50	0.40
4	0.91	1.00	1.10	1.10
5	1.92	2.00	2.00	2.00
6	3.20	3.30	3.10	3.50
7	4.90	5.10	5.20	4.90
8	10.00	10.30	10.30	9.90
9	19.70	20.50	21.30	20.00
10	20.60	21.40	21.20	20.90
11	40.00	41.40	41.40	41.80
12	60.00	60.80	60.00	60.90
13	77.20	80.30	80.00	80.10
14	<u>98.80</u>	<u>102.70</u>	<u>-----</u>	<u>-----</u>
	0.87	0.87	0.88	0.87

Coefficiente de correlación lineal*

*Una "validez" de 100% la de un coeficiente de correlación de ± 1.37

100 KGy

Fig. 14. Curva de calibración para
iones H^+

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

0

5

10

15

20

25

30

35

10 KGy

8

6

4

2

0

0

1

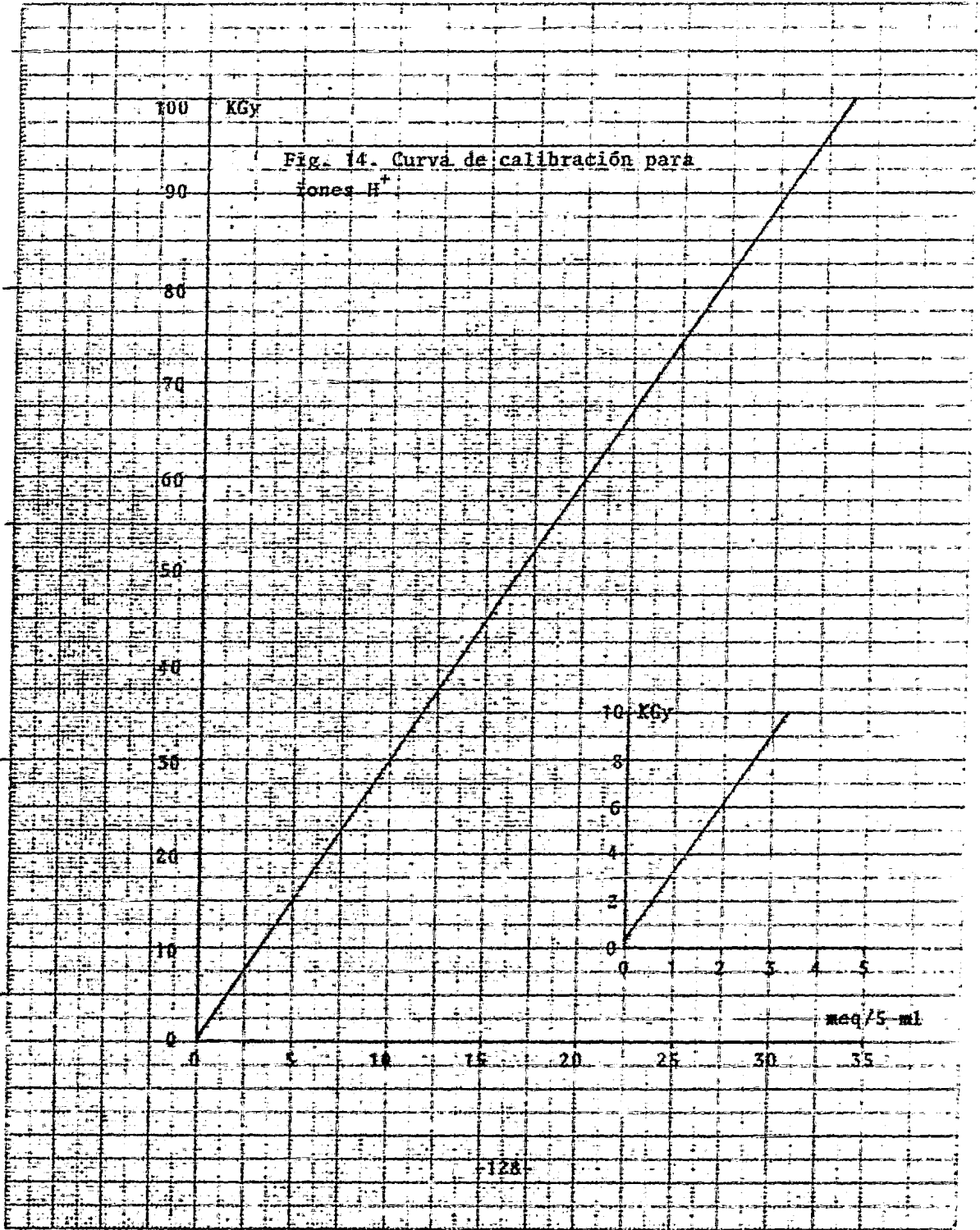
2

3

4

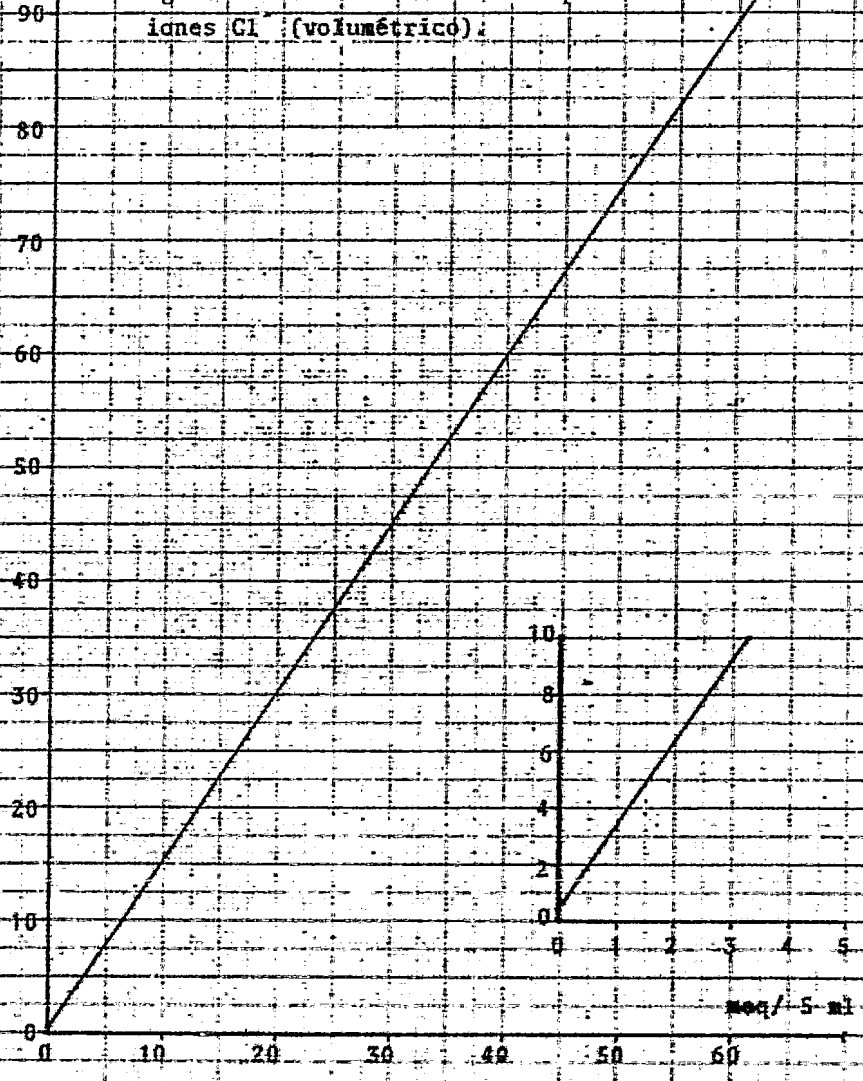
5

meq/5-ml



100 KGy

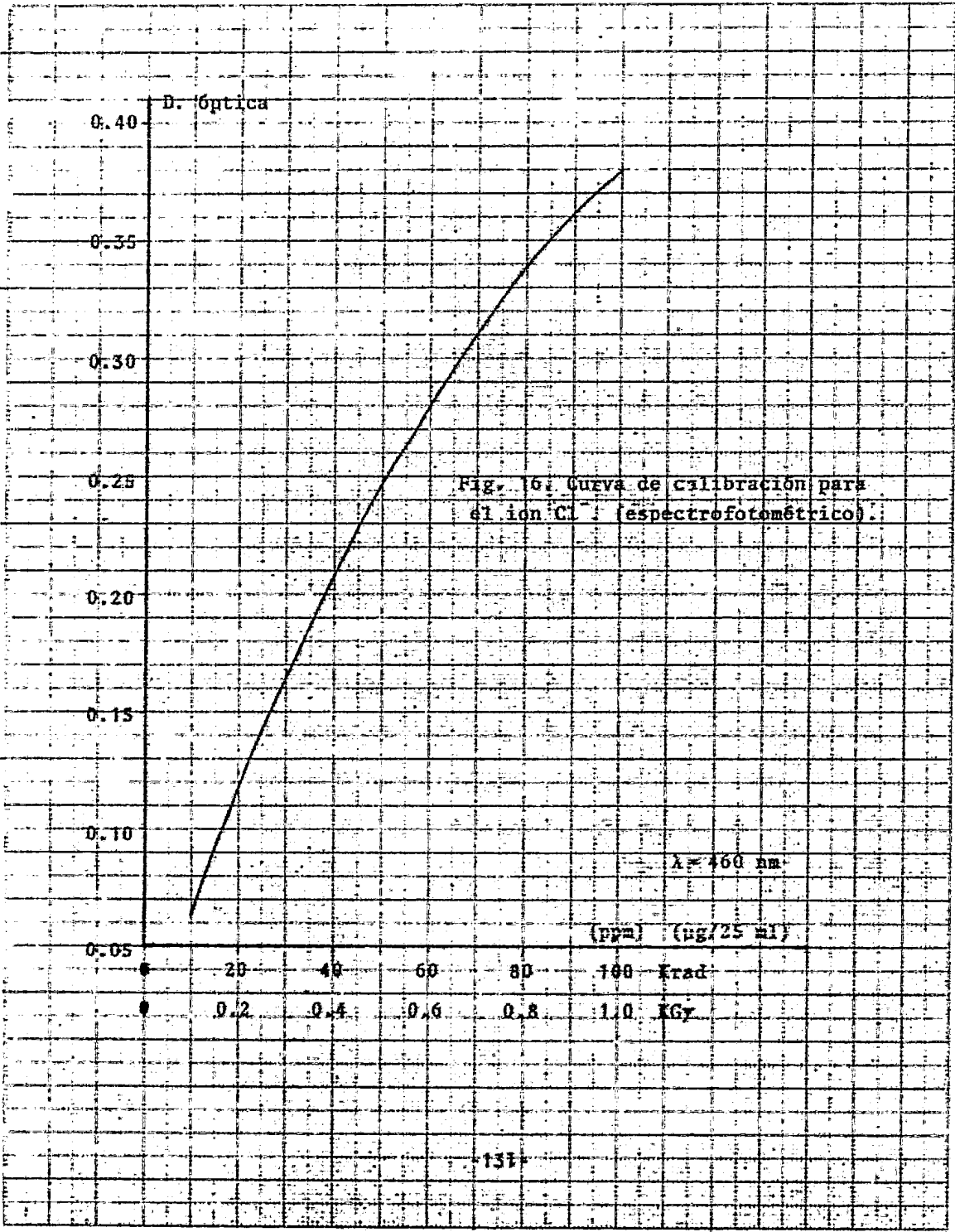
Fig. 19. Curva de calibración para iones Cl⁻ (volumétrico):

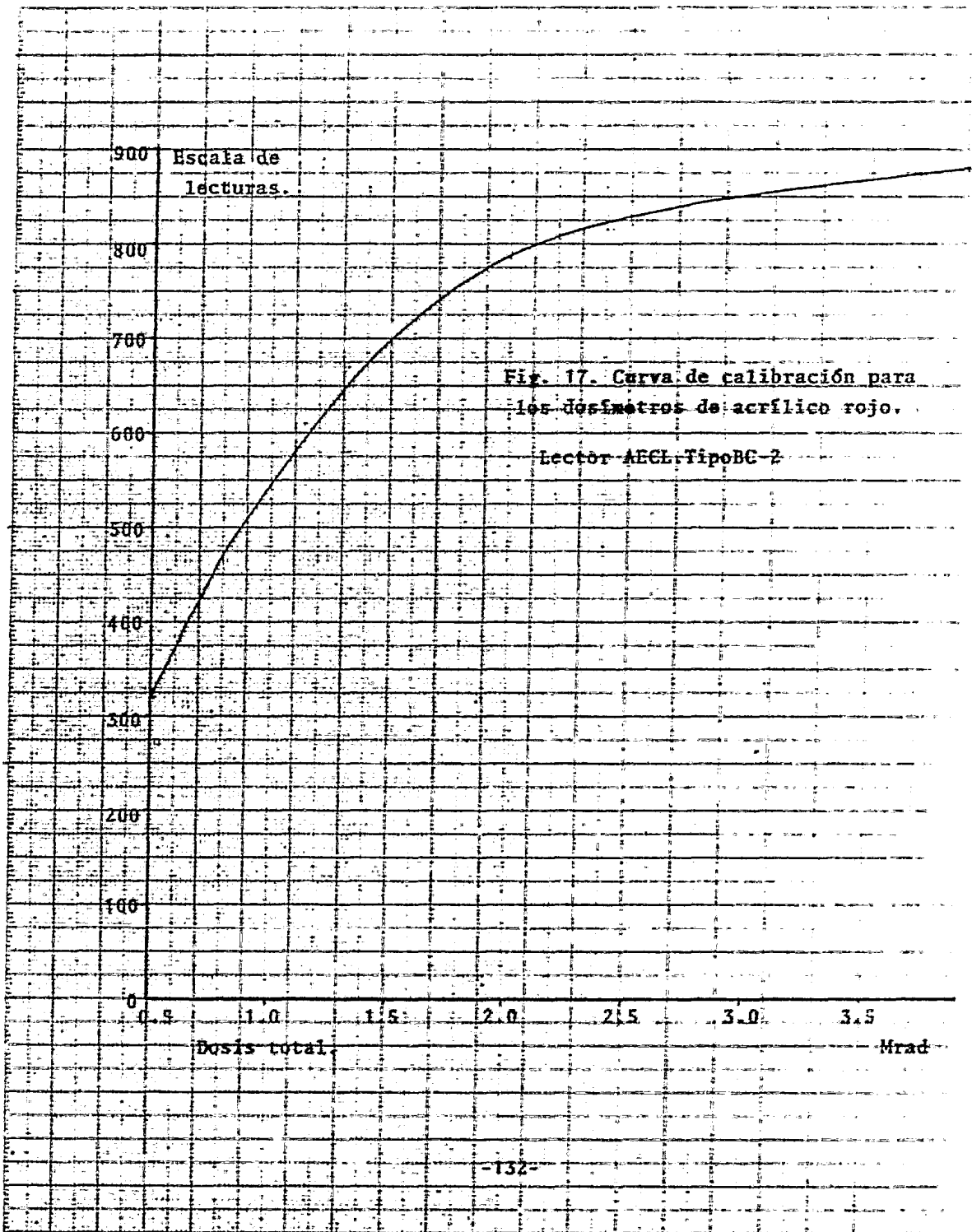


CUADRO NUMERO 9.

Resultados de las mediciones de la Densidad óptica de las soluciones de ion Cl^- y de los niveles de dosis de radiación absorbidos.

Muestra N°	460 nm	D. óptica 460 nm	ppm Cl^- (25 ml)	Dosis Krad	Total Gy
1	100.0	0.000	Blanco.	0	0
2	86.3	0.064	10	10	100
3	78.0	0.108	20	20	200
4	70.4	0.162	30	30	300
5	63.1	0.200	40	40	400
6	57.4	0.241	50	50	500
7	54.0	0.268	60	60	600
8	48.6	0.313	70	70	700
8	45.4	0.343	80	80	800
10	43.1	0.366	90	90	900
11	41.7	0.380	100	100	1,000





CAPITULO V.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Attix F., Roesch W., Radiation Dosimetry., Volume I., Academic Press Inc., N.Y., U.S.A., 1969.
- 2.- Bleuler E., Goldsmith G.J., Experimental Nucleonics., Holt Rinehart and Winston., N.Y., U.S.A., 1960.
- 3.- Navarrete M., Cabrera L., Introducción al estudio de los radioisótopos., C.F.E., Ed. Mexicana., México D.F., 1979.
- 4.- Mann W.B., Garfinkel S.B., Radiactividad y su medida., Centro Regional de Ayuda Técnica., A.I.D., México D.F., 1968.
- 5.- Ajuria Garza S., Los radioisótopos. Sus propiedades, manejo y utilización en Ingeniería Química., Tesis profesional., Facultad de Química., U.N.A.M., México D.F., 1962.
- 6.- Kaplan I., Nuclear Physics., Addison-Wesley Publishing Company Inc., N.Y., U.S.A., 1964.
- 7.- Holm N.W., Berry R.J., Manual on Radiation Dosimetry., Marcel Dekker., N.Y., U.S.A., 1970.
- 8.- Physical Aspects of Irradiation., I.C.R.U., Handbook 85., Report 10b., U.S.A., 1962.
- 9.- Clason W.E., Dictionary of nuclear science and technology., Elsevier Publishing Company., Amsterdam., The Netherlands., 1970.
- 10.- Markus J., Diccionario de electrónica y técnica nuclear., Marcombo S.A., de Borxareu Ed., Barcelona , España., 1972.
- 11.- Linear Energy Transfer., I.C.R.U., Report 16., Washington, D.C., U.S.A., 1970.

- 12.- Manual of Food Irradiation Dosimetry., I.A.E.A., Technical Reports Series No. 178., Vienna, Austria., 1977.
- 13.- White E.H., Introducción a la Física Atómica y Nuclear., Ed. Alhambra S.A., Madrid, España., 1970.
- 14.- Attix F., Roesch W., Radiation Dosimetry., Volume III., Academic Press Inc., N.Y., U.S.A., 1960.
- 15.- Training Manual on Food Irradiation Technology and Techniques., I.A.E.A., Technical Reports Series No. 114., Vienna, Austria., 1970.
- 16.- Jefferson S., Massive Radiation Techniques., John Wiley & Sons Inc., N.Y., U.S.A., 1964.
- 17.- Mclaughlin L.W., Topics in radiation dosimetry., Notas de Física., Vol. 4, No. 2., Instituto de Física, UN.A.M., México D.F., 1981.
- 18.- Tanarro S.A., Instrumentación nuclear., Publicaciones Científicas de la Junta de Energía Nuclear., Madrid, España., 1970.
- 19.- Dosimetria de la radiación ionizante e instrumentación asociada., Notas del curso de capacitación para la Comisión Nacional de Energía Nuclear. Enero 1968.
- 20.- Loyola V.M., Apuntes sobre Química Nuclear y Radioquímica., Escuela de Ciencias Químicas., Universidad Autónoma de Querétaro., México., 1974.
- 21.- Allen A.O., The Radiation Chemistry of water and aqueous solutions., D. Van Nostrand Company Ltd., N.J., U.S.A., 1961.
- 22.- Hine Gerald J., Radiation Dosimetry., Academic Press Inc., N.Y., U.S.A., 1956.
- 23.- Dvornik I., Zec U., Ranogajec F., The ethanol-chlorobenzene

- system as a new high-level dosimeter for routine measurements., Food Irradiation. (Proc. Symp. Karlsruhe, 1966)., I.A.E.A., Vienna, Austria., 1966.
- 24.- Food Irradiation Newsletter., Joint FAO/IAEA., Vol. 1, No.3, 15-23, Vienna, Austria., 1977.
- 25.- Food Irradiation Newsletter., Joint FAO/IAEA., Vol. 4, No.1, 24-28, Vienna, Austria., 1980.
- 26.- Food Irradiation Newsletter., Joint FAO/IAEA., Vol. 3, No.1, 18-25, Vienna, Austria., 1979.
- 27.- Food Irradiation Newsletter., Joint FAO/IAEA., Vol. 5, No.3, 17-29, Vienna, Austria., 1981.
- 28.- Razem D., Dvornik I., Application of the ethanol-chlorobenzene dosimeter to electron-beam and gamma radiation dosimetry: II. Cobalt 60 gamma rays., Dosimetry in Agriculture, Industry, Biology and Medicine. (Proc. Symp. Vienna, 1972)., Vienna, Austria., 1973.
- 29.- Razem D., Dvornik I., Application of the ethanol-chlorobenzene dosimeter to electron-beam and gamma radiation dosimetry: III. Tissue-equivalent dosimetry., Radiation Preservation of Food. (Proc. Symp. Bombay, 1972)., I.A.E.A., Vienna, Austria., 1973.
- 30.- Dvornik I., Razem D., Baric M., Application of the ethanol-chlorobenzene dosimeter to electron-beam dosimetry: pulsed 10 MeV electrons., Large Radiation Sources for Industrial Processes. (Proc. Symp. Munich, 1969)., I.A.E.A., Vienna, Austria., 1969.
- 31.- Instruction Manual Gammabeam-650 AECL Co-60 Type IR 31 Irra-

- diation Unit., Ottawa, Canada.
- 32.- Instruction Manual Gammacell-200 AECL Co-60 Irradiation Unit., Ottawa, Canada.
 - 33.- Instruction Booklet for AECL Dosimeter Reader System Type BC-2., Ottawa, Canada., 1978.
 - 34.- Instruction Manual Spectrofotometer Unicam SP-500.
 - 35.- Fisher R.B., Peters D.G., Análisis Químico Cuantitativo., Ed. Interamericana., México D.F., 1970.
 - 36.- Vogel A.I., Textbook of Quantitative Inorganic Analysis., Longman Inc., N.Y., U.S.A., 1978.
 - 37.- Calculator Decision-Making Sourcebook. Texas Instruments Inc., 1977.