

# Caracterización de la respuesta de la dosis absorbida en agua a la variación de energías de radiodiagnóstico para dosímetros Fricke preparados bajo la norma ISO/ASTM 51026:2015

*Characterization of the response of the absorbed dose in water to the variation of radiodiagnostic energies for Fricke dosimeters prepared under the ISO/ASTM 51026:2015 standard*

Laura Guerrero<sup>1</sup>, Carlos Torres<sup>1</sup>, Camilo Calderón<sup>1</sup>, Fabián Aguirre<sup>2</sup>, César Díaz<sup>1</sup>, Luis Peña<sup>1</sup>

**Citación:** L. Guerrero, C. Torres, C. Calderón, F. Aguirre, C. Díaz y L. Peña, “Caracterización de la respuesta de la dosis absorbida en agua a la variación de energías de radiodiagnóstico para dosímetros Fricke preparados bajo la norma ISO/ASTM 51026:2015”, *Revista de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 7, 2023. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.7.2023.682>

## Resumen

El dosímetro Fricke es un dispositivo químico ampliamente utilizado en radioterapia; sin embargo, para aplicaciones en radiología diagnóstica existen muy pocos estudios sobre la respuesta de las soluciones Fricke a energías medias típicas manejadas en radiodiagnóstico. En este artículo se presentan los resultados de la caracterización de la respuesta en dosis absorbida en agua en función de la energía para dosímetros Fricke preparados según la norma ISO/ASTM 51026:2015, empleando las calidades de haz para radiodiagnóstico RQR (*radiation qualities radiology*) implementadas en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica del Servicio Geológico Colombiano. La caracterización de la respuesta de los dosímetros Fricke se realizó acumulando una dosis absorbida en agua de 10 Gy medida previamente con una cámara de ionización. La energía media de los haces estuvo entre 0,038 y 0,067 MeV. Los resultados obtenidos muestran diferencias de 5% a 80% de la dosis absorbida en agua medida por los dosímetros Fricke, frente a las dosis medidas con cámara de ionización para las energías medias utilizadas en radiodiagnóstico.

**Palabras clave:** dosímetro, dosis absorbida, sistema dosimétrico Fricke

Revista Investigaciones y Aplicaciones  
Nucleares, 7, 2023  
**Recibido:** 14 de octubre de 2022  
**Aceptado:** 16 de enero de 2023  
**Publicado en línea:** 29 de diciembre de 2023  
**Doi:** <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.7.2023.682>



Esta obra está bajo licencia internacional  
Creative Commons Reconocimiento 4.0.

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias y Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

<sup>2</sup> Dirección de Asuntos Nucleares, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.

**Autor de correspondencia:** Laura Daniela Guerrero, [ldguerreroz@correo.udistrital.edu.co](mailto:ldguerreroz@correo.udistrital.edu.co)

**Abstract**

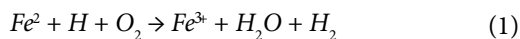
The Fricke dosimeter is one of the most widely used chemical devices in different applications, both clinical and industrial. Recent studies show that it can be used as a primary reference standard in high dose rate brachytherapy. However, for applications in diagnostic radiology, there are very few studies on the response of Fricke solutions to typical average energies used in diagnostic radiology. In this sense, this article shows the results of the characterization of the response as a function of energy for Fricke dosimeters prepared according to the ISO/ASTM 51026:2015 standard, using the implemented RQR (Radiation Qualities radiology) beam qualities for radiodiagnosis. in the Secondary Dosimetric Calibration Laboratory of the Colombian Geological Service. The characterization of the response of the Fricke dosimeters was carried out by accumulating an absorbed dose of 10 Gy in water, previously measured by an ionization chamber. The average energy variations were made from 0.038 to 0.067 MeV. The results obtained show differences of 5% to 80% of the average absorbed dose in water by the Fricke dosimeters, compared to the doses measured with the ionization chamber, for average energy variations used in radiodiagnosis.

**Keywords:** dosimeter, absorbed dose, Fricke dosimetric system

**1. Introducción**

La dosimetría es un método que permite determinar la dosis que absorben los materiales o productos que son sometidos directa o indirectamente a un campo de radiación. Estos valores de dosis se reportan en grays (Gy) [1]. La dosimetría Fricke proporciona un medio confiable para determinar la dosis absorbida en agua, basado en un proceso de oxidación de iones ferrosos a iones férricos en solución acuosa ácida por radiación ionizante [2].

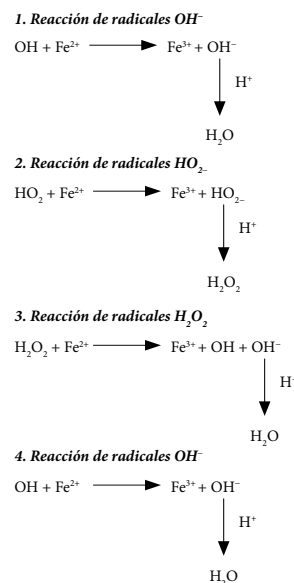
Para el uso de la solución Fricke se parte de la reacción general 1; en ella se establece la relación en el cambio de estado de oxidación del hierro en la solución, que pasa de Fe<sup>2+</sup> a Fe<sup>3+</sup>.



Este cambio en el estado de oxidación se puede observar más detalladamente en el mecanismo de reacción (figura 1), en el cual se observa la formación de los radicales libres generados por la radiación ionizante en la solución Fricke.

De acuerdo con la norma ISO/ASTM 52628, un dosímetro es un dispositivo que, cuando es irradiado, exhibe un cambio cuantificable que puede relacionarse con la dosis absorbida en un material dado usando

instrumentos y procedimientos de medición apropiados. Y la dosimetría es la medición de la dosis absorbida mediante el uso de un sistema de dosimetría [2]. En nuestro caso, el dosímetro contiene una solución saturada de aire de sulfato ferroso o sulfato de amonio ferroso que indica la dosis absorbida por un aumento en la absorbancia óptica a una longitud de onda específica. Normalmente, un espectrofotómetro calibrado con control de temperatura es usado para medir la absorbancia [2].



**Figura 1.** Mecanismos de reacción de radicales libres en la dosimetría Fricke. Modificado a partir de [1]

La dosimetría Fricke abarca, en su totalidad, la preparación, la prueba y el uso del sistema dosimétrico de la solución acuosa ácida de sulfato de amonio ferroso, para determinar la dosis absorbida en agua expuesta a la radiación ionizante [2].

El objetivo de este trabajo es caracterizar la respuesta en dosis absorbida en agua en función de la energía usando dosímetros Fricke preparados según la norma ISO/ASTM 51026:2015. Para ello se emplean las calidades de haz de radiodiagnóstico RQR (*radiation qualities radiology*), acu-mulando una dosis absorbida en agua de 10 Gy, medida previamente con una cámara de ionización. La dosis de 10 Gy se escogió por razones operativas del irradiador de rayos X.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Dosis absorbida en la solución Fricke

Para trabajar la terminología general utilizada en dosimetría se usan como referencias las normas ISO/ASTM 52628-13 Standard Practice for Dosimetry in Radiation Processing, e ISO/ASTM 51026:15 Standard Practice for Using the Fricke Dosimetry System. A partir de ellas se define la ecuación 2 para calcular la dosis absorbida en la solución del dosímetro Fricke:

$$D_F = \frac{\Delta A}{\varepsilon * G * \rho * d} \quad (2)$$

Donde:

$D_F$  = dosis absorbida de la solución Fricke (Gy)

$\Delta A$  = absorbancia neta a la longitud de onda óptima (303 nm)

$\rho$  = densidad de la solución dosimétrica ( $1,024 \times 10^{-3}$  kg/m<sup>3</sup> a 25 °C)

$\varepsilon$  = coeficiente de absorción lineal molar de los iones férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) m<sup>2</sup>/mol

$G$  = rendimiento químico de radiación de iones férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) mol/J

$d$  = longitud del camino óptico de la solución dosimétrica (m)

El procedimiento descrito en la norma ISO/ASTM 51026:15 Standard Practice for Using the Fricke Dosimetry System puede ser aplicado para radiación gamma, rayos X y electrones de alta energía [2].

Uno de los parámetros establecidos en dicho procedimiento es el coeficiente de absorción lineal molar ( $\varepsilon$ ) en la ecuación 3, el cual es una constante que relaciona la absorbancia espectrofotométrica ( $A_\lambda$ ) de una especie ópticamente absorbente a una longitud de onda determinada ( $\lambda$ ) por unidad de longitud de trayecto ( $d$ ) con la concentración molar de esa especie en solución ( $c$ ). Sus unidades son m<sup>2</sup>/mol [4].

$$\varepsilon = \frac{A_\lambda}{d * c} \quad (3)$$

Otro parámetro importante es el rendimiento químico de radiación  $G$  (ecuación 4), que está dado por el cociente de  $n_x$  por  $\bar{E}$ , donde  $n_x$  es la cantidad media de una entidad específica  $x$ , producida o modificada por la energía media impartida a la materia [2].

$$G_x = \left( \frac{n_x}{\bar{E}} \right) \quad (4)$$

El comportamiento del rendimiento químico es constante entre los valores de 20 y 400 Gy de dosis absorbida [2]. Sin embargo, por debajo de este rango, se observa una variación en la dosis absorbida debido al cambio en la energía media asociada con el voltaje aplicado al tubo de rayos X. Esta variación en el rendimiento químico tiene un impacto directo en la cantidad de dosis absorbida por la solución Fricke.

La respuesta dada por el dosímetro a una dosis de radiación determinada puede depender de la temperatura de irradiación y la temperatura de medición. Es posible aplicar una corrección al parámetro de rendimiento químico de radiación ( $G$ ) para la temperatura de irradiación, y al coeficiente de absorción lineal molar ( $\varepsilon$ ) para las temperaturas de medición. Este rendimiento químico de radiación depende del tipo y la energía de radiación empleados y cambia significativamente a bajas energías de fotones [4].

La respuesta del dosímetro es bastante sensible a las impurezas orgánicas que pueden estar presentes en la solución, incluso si las cantidades son mínimas, ya que estas impurezas pueden provocar un cambio detectable en la respuesta observada; trazas de iones metálicos también pueden afectar las soluciones dosimétricas irradiadas directamente en la respuesta del dosímetro, y una última

interferencia se produce por un aumento de la temperatura (por encima de los 25 °C), que puede ser significativa si transcurre un largo periodo de tiempo entre la preparación de la solución y la medición fotométrica [4].

Con este procedimiento se busca determinar la dosis absorbida, definida por el cociente de dE por dm, donde dE es la energía media impartida por la radiación ionizante, y dm, la masa [2] del material, que en nuestro caso son los dosímetros cargados con la solución Fricke.

Llamamos *sistema dosimétrico* al sistema utilizado para determinar la dosis absorbida, que consta no solo de dosímetros (instrumentos de medición), sino también de sus patrones de referencia y los procedimientos particulares relativos al uso del sistema.

Finalmente, para la presentación de los resultados es relevante la *función de respuesta*, que es la representación matemática de la relación entre la respuesta del dosímetro y la dosis absorbida en un sistema de dosimetría dado.

Podemos relacionar otros términos comunes usados en la dosimetría, como a) la dosimetría de rutina, que es un sistema de dosimetría calibrado a partir de un sistema de dosimetría estándar de referencia, y se emplea para mediciones de rutina de la dosis absorbida, incluso para mapear la dosis y monitorear el proceso; b) la trazabilidad, que es una propiedad del resultado de una medición, o el valor de un estándar por el cual se puede relacionar con referencias establecidas generalmente, estándares nacionales o internacionales a lo largo de una cadena ininterrumpida de comparaciones, todas con incertidumbres establecidas; c) la incertidumbre, que es un parámetro asociado con el resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían atribuirse razonablemente al mensurando o cantidad derivada [2].

## 2.2. Dosis absorbida en agua a partir de la dosis absorbida en la solución Fricke $D_w$

La dosis absorbida en agua  $D_w$  se deriva de la dosis absorbida en la solución de Fricke [3]. Para calcular  $D_w$  podemos utilizar la ecuación (ICRU 64), dada por

$$D_w = \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{Fricke}^{agua} P_{wall} D_F \quad (5)$$

Donde  $D_w$  es la dosis absorbida en agua,  $\left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{Fricke}^{agua}$  es la relación entre los coeficientes máxicos de absorción de energía del agua y la solución Fricke para una energía determinada,  $P_{wall}$  es el factor de corrección por el material del contenedor de la solución Fricke, y  $D_F$  es la dosis absorbida en Fricke.

## 2.3. Energías empleadas en radiodiagnóstico

Las energías medias empleadas en los procedimientos en los que intervienen imágenes diagnósticas con rayos X, específicamente de radiología convencional, varían desde 27 hasta 67 keV [4]. Para lograr un espectro con energías en este rango se debe encontrar un espesor de filtración adicional de aluminio que pueda filtrar ciertas energías bajas, para de esta manera conseguir las energías medias requeridas.

Una de las metodologías para establecer la filtración de aluminio adecuada en los diferentes voltajes aplicados al tubo de rayos X es descrita en la norma IEC 61267 [8].

La verificación de que este espesor de aluminio filtra las energías requeridas se realiza comparando el valor medido de la primera capa hemirreductora (1.ª CHR), que por definición es el espesor de cierto material específico que atenúa la intensidad inicial del haz a la mitad de su valor. La 1.ª CHR puede medirse haciendo una curva de atenuación, que puede obtenerse atravesando láminas de aluminio entre el haz primario y el detector, aumentando el espesor de las láminas al tiempo que se mide la intensidad del haz. Este procedimiento se conoce como *establecimiento de calidades de radiación*. En radiología convencional se implementan las calidades denominadas RQR (*radiation qualities in radiation beams emerging from the X-ray source assembly*), sigla establecida en la normativa [8], [9], [13].

Los parámetros que deben establecerse se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros para caracterizar el haz, según la norma IEC 61267 [13]

Calidad de radiación	Voltaje tubo de rayos X (kV)	Primera HVL (mm Al)
RQR4	60	2,19
RQR5	70	2,58
RQR6	80	3,01
RQR7	90	3,48
RQR8	100	3,97
RQR9	120	5,00
RQR10	150	6,57

#### 2.4. Dosis absorbida en agua a partir del kerma en aire medido con cámara de ionización.

La magnitud dosimétrica fundamental en radiodiagnóstico es el kerma en aire, definido como la energía cinética que adquieren las partículas cargadas cuando las partículas sin carga interactúan en el material, que en este caso es aire, por unidad de masa. La unidad en el Sistema Internacional (SI) de esta magnitud es J/kg, que en dosimetría se conoce como *gray* (Gy).

Para determinar el kerma en aire se realizan mediciones de carga colectada mediante una cámara de ionización que tiene como medio sensible el aire, y un electrómetro que registra la acumulación de esa carga. Con los valores promedio de la carga colectada y la utilización del coeficiente de calibración de la cámara se pueden obtener valores de la magnitud de la tasa de kerma en aire, que se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{k}_{\text{air}} = N_k \bar{M} k_{\text{mo}} k_{\text{TP}} \quad (6)$$

Donde  $\dot{k}_{\text{air}}$  es la tasa de kerma en aire, es decir, la variación del kerma en aire con respecto al tiempo;  $N_k$  es el coeficiente de calibración de la cámara;  $\bar{M}$  es el promedio de carga colectada por unidad de tiempo;  $k_{\text{mo}}$  es la corrección por variaciones de la intensidad del campo de radiación, y  $k_{\text{TP}}$  es la corrección por variaciones de la densidad de aire, que afecta la cantidad de carga acumulada producida por la ionización; este coeficiente puede ser calculado como

$$k_{\text{TP}} = \frac{P_0}{P} \frac{T}{T_0} \quad (7)$$

Donde  $P_0$  es la presión de referencia, tomada como 101 kPa;  $P$  la presión en el momento de la medición de la carga;  $T_0$  la temperatura de referencia, tomada como 273,15 K, y  $T$ , la temperatura medida.

En radiodiagnóstico se puede considerar que, para un material y un campo de radiación dados, la dosis absorbida y el kerma son numéricamente iguales cuando se establece el equilibrio de electrones secundarios [11].

Entonces, para determinar la dosis absorbida en agua a partir de la medición del kerma en aire en condiciones de equilibrio electrónico, podemos utilizar esta ecuación:

$$D_w = \left( \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{aire}}^{\text{agua}} D_{\text{aire}} \quad (8)$$

Donde  $D_w$  es la dosis absorbida en agua;  $\left( \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{aire}}^{\text{agua}}$  es la relación entre los coeficientes másicos de absorción del agua y el aire para una energía determinada,  $D_{\text{aire}}$  es la dosis absorbida en aire.

### 3. Materiales y métodos

#### 3.1. Preparación de la solución Fricke

La solución Fricke fue preparada siguiendo la Norma ISO/ASTM (ISO/ASTM,2015). Se preparó utilizando 0,392 g de sulfato de amonio ferroso grado analítico, ácido sulfúrico en una concentración de 0,4 M (solución sulfúrica ácida-acuos) con agua tridestilada, y 0,058 g de cloruro de sodio para el retiro de impurezas. Después de su preparación, la solución Fricke se dejó saturar y se almacenó a una temperatura baja ( $4 \pm 1$ ) °C, protegida de la luz [6].

#### 3.2. Irradiación de los dosímetros Fricke y $\Delta A$

La irradiación de los dosímetros se realizó con diferentes energías, usando un sistema compuesto por un tubo de rayos X con una tensión máxima de 320 kV y una configuración de filtros de aluminio, tal como se muestra en la figura 2.

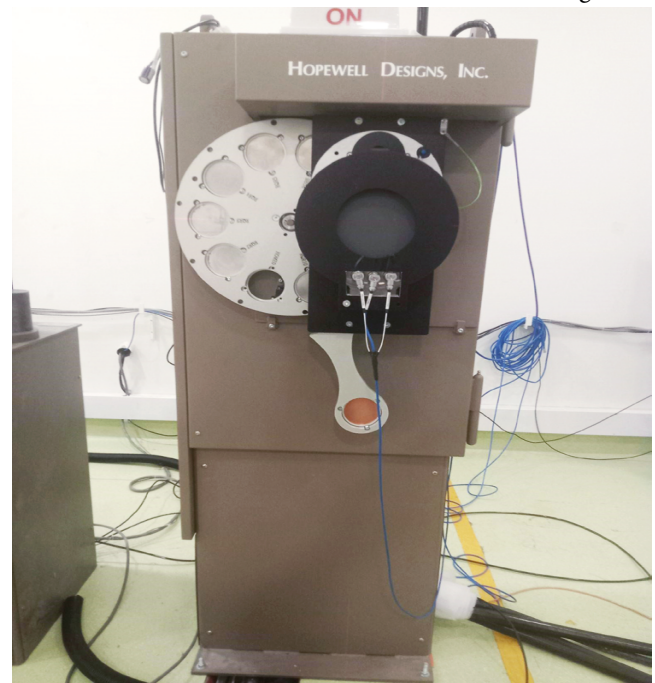
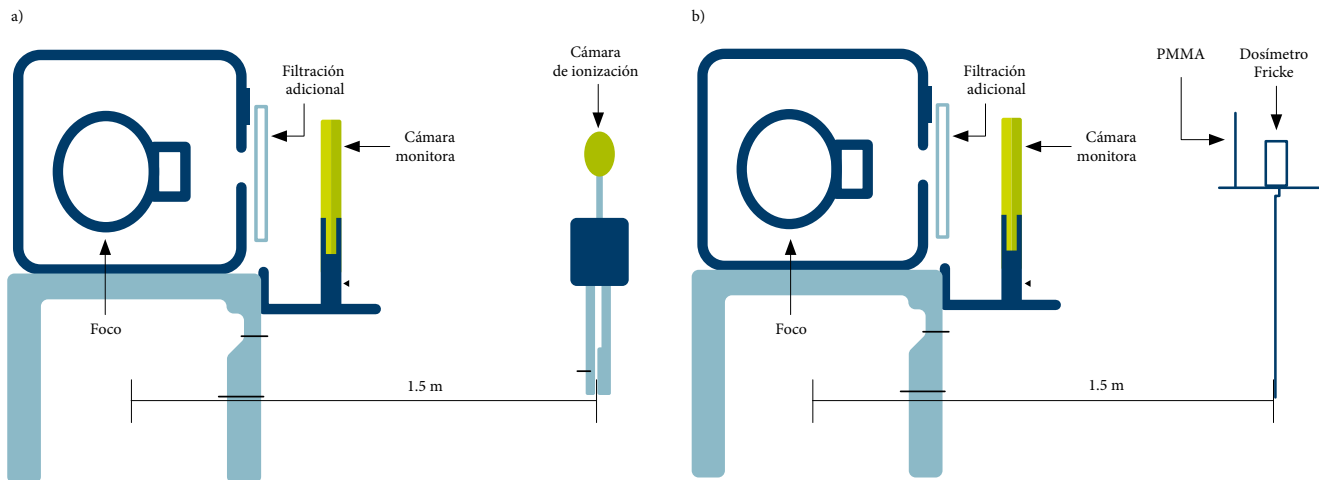


Figura 2. Sistema de irradiación para la caracterización de la respuesta en energía de los dosímetros Fricke preparados según la norma ISO/ASTM (ISO/ASTM, 2015)



**Figura 3.** a) Esquema general de posicionamiento de una cámara de ionización para el irradiador de rayos X. b) Esquema general del equipo de irradiación de rayos X en aire con pantalla de PMMA

En primer lugar, se establecieron las calidades de radiación RQR4 a RQR9, con las cuales se obtuvieron espectros siguiendo la metodología propuesta por la norma IEC 61267 [13]. En segundo lugar, se obtuvo la tasa de kerma en aire mediante la ecuación 7, de cada una de las calidades RQR, mediante una cámara de ionización plano-paralela calibrada en el año 2019 en las calidades RQR2 a RQR9, y cuyas mediciones son trazables en el Laboratorio Primario de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM, sigla de Bureau International des Poids et Mesures). También se realizaron verificaciones intermedias de la cámara con una fuente de chequeo de Sr-90. Para esto se posicionó la cámara a 1,5 m de distancia del foco del tubo de rayos X, tal como se muestra en la figura 3a. Posteriormente se midió la tasa de kerma en aire y se estableció el tiempo necesario para suministrar 10 Gy en cada una de las calidades de radiación RQR. Luego, a la misma distancia se colocaron los dosímetros Fricke dentro de ampollas circulares de vidrio ámbar de 7 ml, recubiertas con papel parafinado, y se irradió un dosímetro en cada configuración. Frente al dosímetro Fricke se colocó una pantalla de PMMA de 4 mm de espesor, con el fin de lograr el equilibrio electrónico y poder asumir la equivalencia entre kerma en aire y la dosis absorbida en aire (figura 3b).

### 3.3. Medición de absorbancia $\Delta A$

Para llevar a cabo un análisis de la solución dosimétrica se recomienda usar un espectrofotómetro de alta precisión;



**Figura 4.** Sistema dosimétrico compuesto por el espectrofotómetro BECKMAN DU-640 y los dosímetros de ampollita

en este caso se usó el espectrofotómetro Beckman DU 640, con cubetas de cuarzo y paso óptico de 10 mm, previamente calibrado en cada medición (figura 4). Al conjunto compuesto por espectrofotómetro y dosímetro se le denomina *sistema dosimétrico* [6]. Se tomaron las medidas de absorbancia a 303 nm antes y después de su irradiación, dejando tres controles iniciales sin irradiar, tal como se recomienda en la norma ISO/ASTM 51026:2015.

### 3.4. Determinación de la dosis absorbida en la solución Fricke

Primero se calcula una absorbancia media para los dosímetros no irradiados ( $A_0$ ). En nuestro caso, estos fueron sellados

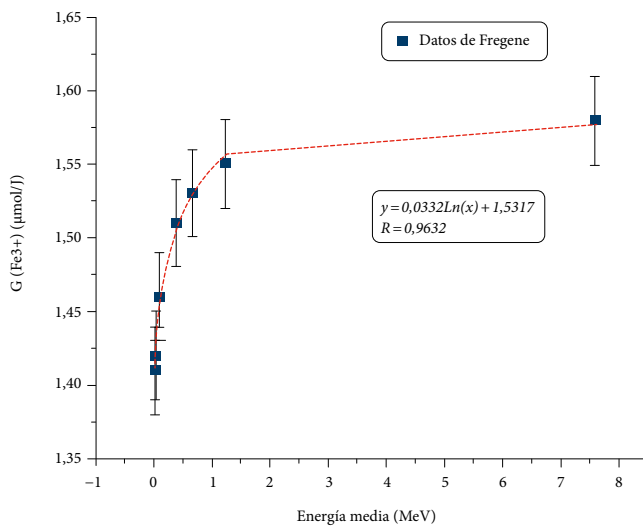
y almacenados a 4 °C en un refrigerador, para luego medir la absorbancia neta ( $\Delta A$ ) dada por la ecuación 9 en cada dosímetro irradiado, restando  $A_0$  de su absorbancia  $A_p$ , así:

$$\Delta A = A_i - A_0 \quad (9)$$

La temperatura dentro de la celda de cuarzo tiende a estabilizarse después de unos segundos. La temperatura dentro de los espacios fue controlada para que se mantuviera entre los 20 y 22 °C. La norma ISO/ASTM 51026:2015 establece que los parámetros son válidos para un rango de temperatura de irradiación de 10 a 60 °C, y para un rango de temperatura de medición de absorbancia de 15 a 35 °C [6].

#### 4. Resultados y discusión

Para encontrar la dosis absorbida en la solución Fricke  $D_p$ , en primer lugar se calcularon los rendimientos químicos de cada una de las energías medias asociadas con el voltaje aplicado al tubo de rayos X (tabla 3). Se utilizaron los valores de  $G(Fe^{3+})$  medidos por el método ionométrico, reportados por Fregene [7], donde se contemplan energías bajas de rayos X. Además, se realizó un ajuste de la curva, que se muestra en la figura 5.



**Figura 5.** Valores de rendimiento químico a partir de valores experimentales tomados de Fregene [7] y ajuste de curva con un coeficiente de correlación  $R=0,9632$

**Tabla 2.** Valores de rendimiento químico a partir de valores experimentales tomados de Fregene [7]

Energía media (MeV)	$G(Fe^{3+})$ ( $\mu\text{mol/J}$ )
0,03	1,42
0,04	1,42
0,45	1,43
0,66	1,43
1,23	1,44
7,60	1,58

Con los valores obtenidos de  $G(Fe^{3+})$ , y los valores reportados en la norma [6], para  $\epsilon$ ,  $d$  y  $\rho$ , se calcularon los valores de dosis absorbida en la solución Fricke  $D_F$  (ecuación 2).

Los datos obtenidos se muestran en la tabla 3. Las equivalencias de energía media y potencial del tubo correspondientes a cada calidad RQR trabajada se tomaron del trabajo de Rosado *et al.* [12].

Para calcular la dosis absorbida en agua  $D_w$  a partir de la dosis absorbida en la solución Fricke se utilizó la ecuación 5.  $P_{wall}$  se asume como 1, adaptando los datos de  $P_w$  calculados con simulación Monte Carlo por Rosado *et al.* [4], para energías bajas de rayos X, teniendo en cuenta que el material de las ampollitas es vidrio de 1 mm de espesor. Los valores de  $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{Fricke}^{agua}$  correspondientes a las energías medias se obtuvieron por interpolación de los valores de coeficientes de absorción de agua y Fricke de referencia reportados por el NIST [10]. Los valores de  $D_w$  obtenidos se muestran en la tabla 3.

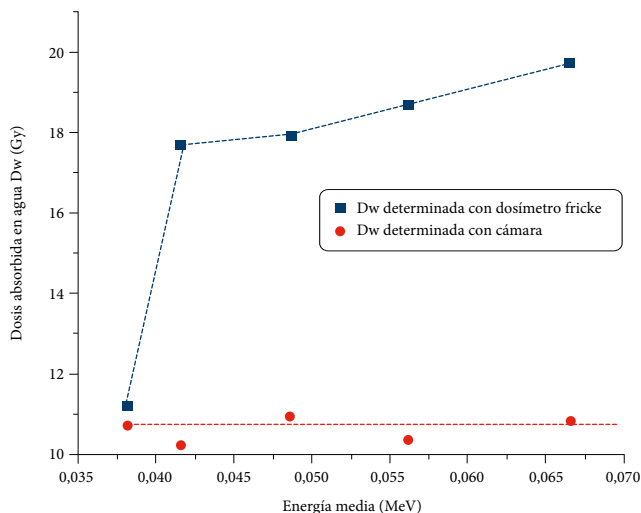
Posteriormente se realizó una gráfica que compara la respuesta en energía en función de la dosis absorbida en agua de los dosímetros que contenían la solución Fricke preparada, aplicando una radiación X de baja energía, usando la ecuación 5 y teniendo en cuenta los valores del rendimiento químico  $G(Fe^{3+})$ , mostrados en la tabla 3.

La dosis absorbida en agua  $D_w$ , determinada a partir de la medición del kerma en aire en condiciones de equilibrio electrónico, se calculó por medio de la ecuación 8, y la relación de los coeficientes de atenuación aire-agua se tomó de los datos reportados por el NIST [10].

Los valores de dosis Fricke son un promedio obtenido con mediciones por triplicado de cada energía media. En este caso, las incertidumbres asociadas a cada energía varían entre 5 % y 7 %, con una desviación estándar obtenida en todos los valores de energías aplicados a una dosis de 10 Gy de 3,118, que muestra uniformidad en los datos obtenidos de manera logarítmica.

**Tabla 3.** Valores de voltaje aplicados al tubo de rayos X y la correspondiente energía media, los valores de  $G(Fe^{3+})$  calculados a partir del ajuste de la curva de la figura 5, la dosis absorbida en la solución Fricke determinada por espectrofotometría, la dosis absorbida en agua  $D_F$  y  $D_w$ , a partir de la ecuación 5

Voltaje aplicado al tubo (kV)	Energía media (keV)	Filtración total mm Al	1 a CHR (mm Al)	Rendimiento químico $G(Fe^{3+})$ (mol/J)	Dosis Fricke Espectrofotómetro $D_F$ (Gy)	$D_F$ (Gy)	$D_w$ (Gy)
70	38,20	2,11	2,12	1,42	12,24	11,19	10,67
80	41,64	2,45	2,50	1,43	18,38	17,68	10,21
100	48,64	2,69	2,92	1,43	19,47	17,92	10,94
120	56,20	2,88	3,38	1,44	20,46	18,68	10,34
150	66,56	3,15	3,85	1,45	20,72	19,72	10,81



**Figura 6.** Respuesta de la dosis absorbida en agua  $D_w$  medida con dosímetros Fricke (cuadrados negros) y con cámara de ionización (puntos rojos), en función de la energía media

En la figura 6 se puede observar que, en función de la energía, la dosis absorbida en los dosímetros Fricke en el rango estudiado presenta diferencias notables que varían desde 5 % hasta 80 % con respecto a la dosis absorbida en agua, determinada a partir de la medición del kerma aire. También se puede apreciar que en valores mayores de 0,042 MeV, la respuesta en energía tiene una variación máxima de 5,13 % en una dosis absorbida en agua cercana a los 20 Gy, con rayos X generados con voltajes que variaron de 50 a 100 kV (rayos X de baja energía), y de 100 a 300 kV (rayos X de media energía).

Esto sugiere que con energías medias (voltajes aplicados de 100 a 300 kV) y energías altas (>300 kV) de rayos X, el comportamiento de la dosis absorbida en agua podría variar muy poco.

La temperatura en este caso fue controlada en los procedimientos de irradiación y medición espectrofotométrica, manteniéndola entre los 20 y 22 °C, debido a que se trabajó a una temperatura ambiente. Se tiene en cuenta que

esta variabilidad es despreciable, debido a que se tuvieron en cuenta los parámetros establecidos la norma ISO/ASTM 51026:2015 [6].

También observamos que el aumento de absorbancia está sujeto a la variación de energía, como resultado de la formación de radicales  $OH^-$  y  $HO_2^-$ , que produce un aumento de los iones  $Fe^{3+}$  debido a que el radical hidroxilo es una especie oxidante y puede usarse para oxidar y romper las moléculas orgánicas, por lo que tiene un papel predominante en el daño por radiación ionizante [1].

### 5. Conclusiones

La metodología aplicada en la preparación, medición e irradiación fue meticulosa en todos los pasos, y las muestras se mantuvieron empacadas y almacenadas a baja temperatura, controlando la misma en el momento de realizar cada uno de los ensayos, para lo cual se midieron nuevamente los dosímetros de control ( $A_0$ ) y se rectificó la temperatura en cada medición de absorbancia.

Los datos obtenidos revelan un comportamiento inesperado de la solución Fricke en dosis por debajo de los 10 Gy, ya que los valores alcanzados exceden significativamente las expectativas, siendo estos menores a los esperados. Sin embargo, al emplear los valores de  $G(Fe^{3+})$  reportados por Fregene (1,41-1,58  $\mu\text{mol/J}$ ), se observa un ajuste adecuado a la dosis utilizada.

A partir de dosis absorbidas de 12 a 20 Gy medidas con el espectrofotómetro se observa una variación atribuida al cambio en la energía media relacionada con el voltaje aplicado al tubo de rayos X, influenciando el rendimiento químico y, por ende, la cantidad de dosis absorbida por la solución Fricke.



En otras palabras, la cantidad de radiación absorbida por la solución Fricke se ve influenciada por el cambio en el comportamiento del rendimiento químico, especialmente en rangos de dosis más bajos.

De los resultados obtenidos relativos a la respuesta de la dosis absorbida en agua para las energías utilizadas en radiología diagnóstica, queda en evidencia que la solución Fricke preparada según los parámetros recomendados por la norma ISO/ASTM 51026:2015 presenta diferencias grandes con respecto a la dosis absorbida en agua medida con cámara de ionización, lo cual sugiere que con energías bajas y dosis absorbidas en agua cercanas a los 10 Gy, los dosímetros Fricke no tienen una buena respuesta en energía para el rango de radiodiagnóstico.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al personal del LSCD y de la Planta de Irradiación Gamma del SGC, así como a los funcionarios de los laboratorios de Física y Química de la Facultad de Ciencias y Educación de la Universidad Distrital, por su apoyo, seguimiento y el tiempo que dedicaron a nuestro trabajo.

### Referencias

- [1] G. Jayson, B. Parsons y A. Swallow, "The mechanism of the Fricke dosimeter", *International Journal for Radiation Physics and Chemistry*, vol. 7, n.os 2-3, pp. 363-370, abr. 1975. [https://doi.org/10.1016/0020-7055\(75\)90075-3](https://doi.org/10.1016/0020-7055(75)90075-3)
- [2] Standard practice for dosimetry in radiation processing, ISO/ASTM 52628, 2013.
- [3] C. E. de Almeida y C. Salata, "Absorbed dose to water standard for 192Ir HDR sources using Fricke Dosimetry", *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, vol. 4, n.os 31-44, 2020. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.4.2020.565>
- [4] P. H. Rosado, C. Salata, M. G. David et al. "Determination of the absorbed dose to water for medium-energy x-ray beams using Fricke dosimetry", *Medical Physics*, vol. 47, n.º 11, pp. 5802-5809, oct. 2020. <https://doi.org/10.1002/mp.14473>
- [5] *Determinación de la dosis absorbida en radioterapia con haces externos: Un código de práctica internacional para la dosimetría basada en patrones de dosis absorbida en agua*. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), Colección de Informes Técnicos n.º 398, Viena, abr. 2005.
- [6] Práctica para el uso del sistema de dosimetría Fricke, ISO/ASTM 51026, 2015.
- [7] O. Fregene, "Calibration of the ferrous sulfate dosimeter by ionometric and calorimetric methods for radiations of a wide range of energy", *Radiation Research*, vol. 31, n.º 2, jun. 1967, pp. 256-272.
- [8] C. E. Calderón, "Determinación de los parámetros característicos del haz de rayos X en radiodiagnóstico: Implementación calidad RQR 3", *Momento*, vol. 58, 2019, pp. 89-102. <https://doi.org/10.15446/mo.n58.73555>
- [9] C. C., Cavinato y L. L. Campos, "Preliminary results on energy dependence of the fricke gel dosimeter for low energy x-radiation", In: International Congress Of The International Radiation Protection Association, 12th, October 19-24, 2008, Buenos Aires, Argentina. Proceedings, 2008. <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/13185>
- [10] J. Hubbell y S. Seltzer, "Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest", NIST Physical Measurement Laboratory, 1995. <http://phys-ics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>
- [11] F. Pernička e I. D. McLean (dirs.), *Dosimetry in diagnostic radiology: An international code of practice*, Technical Reports Series n.º 457. Viena: International Atomic Energy Agency, 2007. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS457\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS457_web.pdf)

[12] P. Rosado, M. Nogueira, P. Squair *et al.* “Determination of the mean energy for attenuated and unattenuated IEC diagnostic X-ray beams”, International Nuclear Atlantic Conference (INAC), Santos, SP, Brasil, set. 29-oct. 5, 2007. Associação Brasileira de Energia Nuclear (ABEN).

[13] IEC, *Equipement de diagnostic médical à rayonnement X: Conditions de rayonnement pour utilisation dans la détermination des caractéristiques*, 12. <sup>a</sup> ed. Ginebra: IEC, 2005.