

Intercomparación de las dosis obtenidas con el sistema Fricke y en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica

Intercomparison of the doses obtained with the Fricke system and in the Secondary Standard Dosimetry Laboratory

Valeria Galeano¹, Yuly Meneses¹, Harvey Aguirre², Luis Peña¹, César Díaz¹, Julián Niño², Jormagn Abril²

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, 6, 110-117, 2022
Recibido: 7 de septiembre de 2022
Aceptado: 7 de diciembre de 2022
Publicado en línea: 28 de diciembre de 2022
Doi: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.6.2022.674>



Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0.

Citación: V. Galeano, Y. Meneses, H. Aguirre, L. Peña, C. Díaz, J. Niño y J. Abril, “Intercomparación de las dosis obtenidas con el sistema Fricke y en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica”, *Revista de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 6, pp. 110-117, 2022. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.6.2022.674>

Resumen

La dosimetría Fricke es una técnica con múltiples aplicaciones, desde la industria alimentaria hasta la medicina. En las actividades cotidianas de la planta de irradiación gamma del Servicio Geológico Colombiano (SGC) se usan diferentes sistemas dosimétricos para el estudio de las dosis absorbidas en los materiales, entre ellos el sistema dosimétrico Fricke. En este trabajo se realizó la comparación de la dosis absorbida determinada en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LSCD), a partir de patrones trazables calibrados en el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), y la aplicación del protocolo IAEA TRS 398, en el irradiador G100 Hopewell Design que contiene una fuente de Co-60, con las dosis obtenidas mediante el sistema Fricke usado rutinariamente. Se aplicaron los protocolos establecidos en la norma ISO-ASTM 51026 “Práctica estándar para el uso del sistema de dosimetría Fricke”. Se elaboró la curva de calibración de los dosímetros Fricke, de la cual se obtuvo el parámetro experimental para el cálculo de la dosis absorbida en las condiciones ambientales particulares de la instalación; el sistema mostró un comportamiento lineal en el rango de 100 Gy a 350 Gy. Teniendo en cuenta el valor experimental de dosis obtenido con dicho sistema, se realizó la intercomparación con la dosis conocida determinada en el LSCD obteniendo una diferencia en el rango de dosis mencionado no mayor al 3,7% y una incertidumbre del 3% con una confiabilidad del 95%.

Palabras clave: radiación ionizante, sistema dosimétrico Fricke, dosis absorbida.

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Facultad de Ciencias, Colombia.

² Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.

Autor de correspondencia: Claudia Valeria Galeano Farfán, valeriagf09@gmail.com

Abstract

Fricke dosimetry is a technique with multiple applications, from the food industry to medicine. In the daily activities of the gamma irradiation plant of the Servicio Geológico Colombiano (SGC), different dosimetric systems are used to study the absorbed doses in materials, among them the Fricke dosimetric system. In this work, a comparison was performed between the doses obtained by the routinely used Fricke system with the absorbed dose determined in the Secondary Dosimetric Calibration Laboratory (LSCD) from traceable standards calibrated at the International Atomic Energy Agency (IAEA) and the application of the IAEA TRS 398 protocol in the G100 Hopewell Design irradiator containing a Co60 source. The protocols established in ISO-ASTM 51026 “Standard practice for the use of the Fricke dosimetry system” were applied. The calibration curve of the Fricke dosimeters was elaborated, from which the experimental parameter was obtained for the calculation of the absorbed dose in the environmental conditions of the facility; the system showed a linear behavior in the range of 100 Gy to 350 Gy. Considering the experimental dose value obtained with this system, an intercomparison was made with the known dose determined in the LSCD, obtaining a difference in the mentioned dose range of no more than 3.7% and an uncertainty of 3% and a reliability of 95%.

Keywords: Ionizing radiation, Fricke dosimetry system, absorbed dose.

1. Introducción

La emisión o propagación de energía formada por fotones o partículas que al interactuar con la materia producen iones directamente o indirectamente se denomina *radiación ionizante* [1]. Estas emisiones, al tener la suficiente energía para ionizar la materia, pueden ser aprovechadas para la ionización de moléculas de material genético de elementos patógenos presentes en los materiales.

Gracias a esta cualidad, las radiaciones ionizantes se pueden aprovechar en varias aplicaciones como radioterapia, esterilización de material quirúrgico, desinfección de alimentos, variabilidad genética en especies vegetales, entre otros.

En la industria alimentaria, un proceso efectivo para el control y eliminación de microorganismos, especialmente patógenos presentes en los alimentos, es la irradiación gamma [1]. En la irradiación de alimentos, como en cualquier otro método que involucre la manipulación de productos para el consumo humano, es importante mantener y cumplir parámetros a partir de normas ya establecidas, como la norma ISO 14470 del 2011 “Requisitos para el desarrollo, validación y control rutinario del proceso de irradiación me-

dante radiación ionizante para el tratamiento de alimentos” [2]. Este método consiste en exponer durante un tiempo determinado al alimento a radiaciones ionizantes, con lo que se logra una incidencia directa sobre las moléculas de DNA en los microorganismos [3]. Al irradiar una sustancia, es necesario tener el control de las dosis absorbidas, es decir, la cantidad de energía absorbida por unidad de masa de un material, en este caso, del alimento [4].

La dosis absorbida (D) es una magnitud genérica, definida para cualquier tipo de radiación o material como la energía media impartida por la radiación ionizante ($d\bar{\epsilon}$) por unidad de masa (dm) [5]. Entonces se obtiene la ecuación (1):

$$D = d\bar{\epsilon}/dm \quad (1)$$

Para dosímetros químicos, como el Fricke (ecuación 2):

$$D = \frac{\Delta Abs}{e.G.p.d} \quad (2)$$

En donde: ΔAbs corresponde a la diferencia de la absorbancia del dosímetro antes y después de la irradiación.

e = coeficiente de absorción molar ($\text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$).
 G = rendimiento químico ($\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$).
 ρ = densidad de la solución dosimétrica, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 d = longitud de la trayectoria óptica en la solución, m

La unidad de dosis absorbida en el SI, es el Gray (Gy) (ecuación 3):

$$1 \text{Gy} = 1 \text{ J/kg} \quad (3)$$

La dosimetría se encarga de cuantificar la dosis absorbida por un sistema químico, físico o biológico; es decir, determina la cantidad de energía depositada en un material u objeto [6], [7]. Esto se realiza mediante un sistema dosimétrico compuesto por dispositivos (dosímetros) que al ser irradiados manifiestan un cambio cuantificable que se relaciona con la dosis absorbida en un material dado [8]. Este sistema también cuenta con instrumentos de medición junto con sus patrones de referencia y procedimientos para su uso [5].

La dosimetría es un método que se puede clasificar según las características inherentes del dosímetro. Se tienen dos tipos, tipo 1: de alta calidad metrológica, cuya respuesta se ve afectada por las magnitudes de influencia individuales de una manera bien definida que puede expresarse en términos de factores de corrección independientes; y tipo 2: la respuesta se ve afectada por las magnitudes de influencia de una forma compleja que no puede expresarse en términos de factores de corrección independientes [5].

La dosimetría se puede clasificar según su campo de aplicación, bien sea como estándar de referencia o como sistema de rutina; ambos pueden ser empleados para procesos de medición. A su vez, los sistemas de referencia son el patrón a seguir para los sistemas de rutina [5].

La dosimetría Fricke se puede aplicar en campos como la industria alimentaria, la medicina, la investigación nuclear, entre otros [6], [7].

El presente trabajo se centra en la preparación e intercomparación del sistema dosimétrico Fricke, para determinar la dosis absorbida en agua gracias a su alta precisión y trazabilidad. Su estandarización se encuentra en la norma ISO-ASTM 51026 [9], y su dispositivo de detección es un dosímetro conformado por una solución de sulfato de amonio ferroso hexahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (sal de Mohr) que indica la dosis absorbida por un aumento en la absorbancia óptica a una determinada longitud de onda por

la oxidación de los iones ferroso a férrico ($\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$) [10]. Es importante conocer que la solución es extremadamente sensible a las impurezas orgánicas y a las trazas de iones metálicos; al preparar la solución Fricke se debe recurrir a productos químicos de alto grado analítico junto con un agua de alto grado de pureza [11]. El oxígeno presente en la solución es el que da el límite del dosímetro Fricke, ya que para que ocurra la oxidación de los iones ferrosos —el cual es fundamento del dosímetro—, es necesaria la presencia de oxígeno. Se han estudiado ampliamente las aplicaciones de la dosimetría Fricke; debido a su facilidad de elaboración, bajo costo y fácil transporte, es aplicado en la irradiación de alimentos, esterilización de insumos médicos [12] y en el área de radioterapia [13]. Al ser un sistema dosimétrico de referencia, reporta dosis con una precisión del 0,1 % para los rayos γ y de ^{60}Co [5].

Cada dosímetro es irradiado con rayos gamma que, en este caso, son producto de la desintegración cobalto-60 (^{60}Co), usado como fuente de energía en el presente trabajo [10]. Los rayos gamma interactúan con la materia y colisionan con las capas electrónicas de los átomos con los que se cruzan, por lo que pierden lentamente su energía y pueden atravesar grandes distancias [14], [15]. Esta energía se transmite a uno de los electrones del átomo, y hace que este sea expulsado de las órbitas atómicas, lo que genera un reordenamiento en la estructura atómica y produce el cambio de estado del ion Fe^{2+} a Fe^{3+} [10]. Según la norma ISO-ASTM 51026 [9], el rango de dosis impartida al sistema dosimétrico Fricke debe ser de 20 a 400 Gy, el cual es el rango considerado en el presente trabajo. A partir de las aplicaciones de la dosimetría química en la metrología y en la irradiación de alimentos, se considera de interés su estudio.

El objetivo de este trabajo fue realizar una intercomparación entre la dosis absorbida hallada con el sistema dosimétrico Fricke, de acuerdo con la norma ISO-ASTM 51026 [9], sistema de rutina en la Planta de Irradiación Gamma del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la dosis absorbida determinada en el LSCD.

2. Metodología

Para la preparación y manipulación de la solución Fricke, siguiendo la norma ISO-ASTM 51026 [9], se empleó exclusivamente material de vidrio. En principio se preparó 1 L de

solución de ácido sulfúrico a 0,4M de la siguiente manera: se pesaron 41 g de ácido sulfúrico al 96,7% del fabricante Merck, para luego llevarlo a un matraz en donde se aforó a un volumen de 1 L con agua tridestilada. Esta disolución final fue el disolvente usado para la preparación de la solución Fricke.

Posteriormente, para preparar la solución Fricke se empleó un balón aforado de 1 L al cual se adicionó 0,392 g de sulfato de amonio ferroso hexahidratado $((\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ con un grado de pureza de grado analítico del fabricante Merck y 0,058 g de cloruro de sodio (NaCl) con un grado de pureza de grado analítico del fabricante Merck aforando a 1 L con la solución de ácido sulfúrico preparada anteriormente a 0,4 M. Se agitó durante 30 minutos para incorporar oxígeno a la solución. Una vez preparada la solución, se cubrió el balón con papel aluminio para impedir cualquier contacto con la luz y se refrigeró en la nevera a 4 °C.

Se lavaron con agua y jabón junto con un proceso de secado en horno aproximadamente 22 ampollitas de color ámbar para ser llenadas con la solución dosimétrica, es decir, la solución Fricke; se evitó dejar residuos de la solución en el cuello de la ampollita al envasar, se tapó su boquilla con papel adhesivo inmediatamente después de llenarlas. Se procuró manejar la solución en lugares oscuros para impedir la oxidación de la solución y se guardó en la nevera a una temperatura aproximada de 4 °C.

La irradiación de los dosímetros se realizó en condiciones controladas, a una temperatura constante de 18 °C (en el LSCD de la Dirección de Asuntos Nucleares del SGC), en un irradiador G100 Hopewell Designs. En la figura 1 se observa la configuración de los dosímetros frente a la fuente de irradiación de cobalto-60 en el irradiador G100 Hopewell Designs, ubicados a un metro de la fuente, con tasa de dosis de 40 Gy/h, obtenida con cámara de ionización con una incertidumbre del orden del 3 % (tabla 3); información suministrada por el personal del LSCD. A partir de esta, se calculó el tiempo necesario para que cada dosímetro alcanzara la dosis deseada. Se usó un campo de radiación de $10 \cdot 10 \text{ cm}^2$, donde solo se podían irradiar cuatro dosímetros a la vez, uno junto al otro, despreciando la dispersión que podría ocurrir entre ellos al ser un valor muy pequeño. A medida que la dosis deseada se acumuló en cada dosímetro, se reemplazó por uno nuevo hasta que este alcanzara su dosis respectiva. El rango de dosis fue 20 Gy a 350 Gy.



Figura 1. Fotografía del montaje de irradiación con los cuatro dosímetros dispuestos para cada dosis en el irradiador G100 Hopewell Designs

Una vez irradiados los dosímetros, se procedió con cinco mediciones de absorbancia de cada dosímetro, con el espectrofotómetro de alta precisión Beckman DU 640.

Se esperó aproximadamente dos horas hasta que la solución alcanzara la temperatura ambiente para comenzar la irradiación. Se separaron tres dosímetros que no fueron irradiados, para establecer la absorbancia control de la solución Fricke (A_0).

Para la medición de la absorbancia se ajustó el espectrofotómetro de alta precisión Beckman DU 640, con una temperatura de 18 °C con una cubeta de cuarzo en una región de lectura de 303 nm. Antes de empezar con la medición de la absorbancia de las soluciones, se midió el blanco, que corresponde la absorbancia de la cubeta de cuarzo sin solución dosimétrica, para ajustar el punto cero de medición. Se realizó entre cargas una purga; es decir, con la solución que se va a llenar la cubeta primero se hizo un enjuague exclusivamente con la solución, al menos dos veces, desechando esta solución para luego sí llenar con la solución a medir hasta la línea indicada en la cubeta. Una vez hecha la calibración, se midió la absorbancia de cada dosímetro en el espectrofotómetro, de lo cual se obtuvieron cinco lecturas que arrojaron el promedio de la absorbancia medida en cada dosímetro.

3. Resultados y discusión

En la tabla 1 se detalla el promedio de las mediciones, las cuales presentaron desviaciones estándar inferiores a 0,3 unidades de absorbancia; cifras que son aceptables si se tienen en cuenta las condiciones del laboratorio en que se preparó la solución, ya que en este no se pudieron controlar factores como temperatura y humedad, y que el laboratorio de dosimetría de alta tasa asociado a la planta gamma no requiere de estos controles para la medición rutinaria; sin embargo, no se contaba con otro lugar para la preparación de los dosímetros Fricke. Las condiciones ambientales sí fueron controlados en el LSCD al momento de la irradiación de los dosímetros. También se debe considerar la vejez del espectrofotómetro UV, hecho que puede ser un factor determinante en el resultado final, además de afectar la exactitud de la absorbancia medida. Se incluyó la absorbancia de la solución Fricke sin irradiar (dosis=0), la absorbancia total correspondiente a cada dosis de radiación y el delta de absorbancia (ΔAbs), que es la diferencia entre la absorbancia 0 y la absorbancia total ($\Delta Abs = A_0 - Abs_{total}$).

A partir de estos datos, se graficó el delta de absorbancia en función de la dosis aplicada a cada dosímetro (figura 2). Se observa que la curva de calibración muestra un coeficiente de correlación lineal de 0,999, que define una incertidumbre de 3% para la dosis (tabla 3) y de 1,1% para la absorbancia (tabla 4). Teniendo en cuenta que en la ecuación (1) los valores en el denominador (coeficiente de absorción molar, rendimiento químico, densidad de la solución y distancia) son fijos, se pueden asumir como una sola constante. De allí se esperaría que la función tuviera la forma 1/K, es decir, una curva con comportamiento lineal tal como se espera de acuerdo con la norma, lo que se evidencia experimentalmente en la figura 2. Gracias a que esta es una curva de intervalo abierto, se puede emplear un rango de 100 Gy a 350 Gy con una incertidumbre del 3%, valor dado por el LSCD en el irradiador G100 Hopewell Designs, rango que se encuentra reportado en la literatura [17] para el uso de la dosimetría Fricke. Así, la ecuación de la recta obtenida es óptima para su aplicación y reproducibilidad en la planta de irradiación.

Tabla 1. Dosis y absorbancia medidas en el laboratorio

Dosis (Gy)	Abs promedio	Desviación	ΔAbs
0	0,0055	0,0003	0,005
20	0,1397	0,0010	0,134
50	0,2747	0,0013	0,269
100	0,4680	0,0011	0,462
150	0,6847	0,0017	0,679
200	0,9269	0,0040	0,921
250	1,1679	0,0122	1,162
300	1,3967	0,2920	1,391
350	1,6805	0,0183	1,675

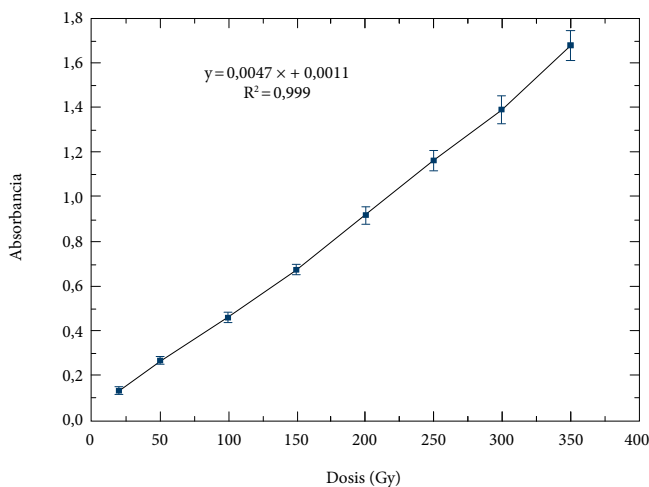


Figura 2. Δ Absorbancia en función de la dosis aplicada en el experimento en un rango de 20 a 350 Gy con incertidumbre del 3%

Al graficar la Δ Absorbancia en función de la dosis aplicada a cada dosímetro (figura 2), de la recta se obtuvo la ecuación (4):

$$\Delta Abs = 0,0047 (1/Gy) \cdot dosis + 0,0011 \quad (4)$$

Se invirtieron los ejes, representando dosis en función del Δ Absorbancia. Gracias a la ecuación de la figura 2 se obtuvo la constante que posibilitó el cálculo de la dosis suministrada. Así la ecuación (5) de la recta es:

$$Dosis (Gy) = 213,34 (Gy) \cdot \Delta Abs - 0,2069 (Gy) \quad (5)$$

Al reemplazar en la ecuación (2), la cual es la ecuación teórica que presenta la norma ISO-ASTM 51026 [9], se obtiene la constante teórica:

$$D = \frac{\Delta Abs}{e.G.p.d} = \frac{1}{K}$$

En donde,

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 219 \text{ m}^2 \cdot \text{mol}^{-1} \\ G &= 1,61 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{J}^{-1} \\ \rho &= 1,024 \cdot 10^3 \text{ kg/l} \\ d &= 0,001 \text{ m}\end{aligned}$$

Obteniendo,

$$D = \frac{1}{0,0036} \text{ kg} \cdot \text{J} \quad (6)$$

$$D = 277 \text{ kg} \cdot \text{J}$$

Se obtuvo una constante teórica de $277 \text{ kg} \cdot \text{J}^{-1}$ y una constante experimental de $213,34 \text{ kg} \cdot \text{J}^{-1}$, lo cual puede explicarse con la diferencia de condiciones ambientales de temperatura y humedad.

Para calcular la absorbancia de la solución Fricke, la norma ISO/ASTM 51026 brinda la ecuación (2) para una temperatura de 25°C y unos parámetros a dicha temperatura. Puesto que en el momento de la irradiación de los dosímetros en el LSCD la temperatura controlada fue de 18°C , es necesario corregir la temperatura, por cuanto se sabe que la absorbancia de la solución Fricke se ve afectada por esta condición ambiental [16], para cuyo fin se recurre a la ecuación (7):

$$D = \frac{\Delta Abs [1 + 0,0069(25 - T_{med})] \cdot [1 + 0,0012(25 - T_{irrad})]}{\varepsilon_{25} \cdot G_{25} \cdot \rho \cdot d} \quad (7)$$

En donde,

$$\begin{aligned}T_{med} &= 18^\circ\text{C} \\ T_{irrad} &= 18^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Teniendo en cuenta la temperatura en el LSCD y la temperatura a la que se encontraba el laboratorio al momento de realizar las mediciones de absorbancia, se reemplazan los valores en la ecuación (7). Así, se obtuvieron las dosis absorbidas calculadas, valores plasmados junto con los valores de las dosis experimentales en el LSCD y su diferencia en la tabla 2.

Se retomó la determinación de la dosis absorbida, esta vez no calculada por la constante teórica sino por la experimental dada a partir de la figura 2; se observó una disminución en la diferencia con respecto a la dosis reportada por el

LSCD, lo cual se encuentra dentro del objetivo de este trabajo, al crear un modelo que sea reproducible bajo las condiciones del SGC.

Tabla 2. Dosis absorbidas calculadas a partir de la constante experimental

Dosis LSCD	Dosis absorbida Fricke	Diferencia con respecto a dosis LSCD
20	28,5	37,2 %
50	57,2	14,4 %
100	98,2	-1,8 %
150	144,4	-3,7 %
200	195,9	-2,1 %
250	247,2	-1,1 %
300	295,9	-1,3 %
350	356,3	1,8 %

En la tabla 2 se observa una diferencia del 37,2 % a bajas dosis, por lo cual se decide tomar un rango de dosis de 100 a 350 Gy, en donde, al intercomparar el método Fricke con la dosis reportada por el LSCD, se obtiene diferencia inferior a 4 % con linealidad aceptable. Por debajo de los 100 Gy no se mantuvo dicha linealidad, pues la preparación del sistema dosímetro Fricke no se realizó bajo las condiciones estrictas de un sistema de dosimetría de referencia. Sin embargo, esta diferencia es aceptable para un sistema de rutina enfocado en la tecnología de alimentos, lo que permite que la dosis absorbida Fricke presente una incertidumbre del 4 % con respecto al LSCD, el cual se encuentra acreditado bajo la norma 17025/2015.

Analizando la diferencia en cada dosis de forma puntual (tabla 2), se observa un comportamiento demasiado alejado en el primer dato de 20 Gy, una diferencia del 37 %, lo que permitiría considerar problemas en la medición a tan bajas dosis para la dosimetría Fricke. Esto también se podría observar y deducir de la falta de la linealidad en la figura 3. Según la norma ISO-ASTM 51026 [9], la dosis absorbida a altas energías se encuentra en un rango de aplicación 20 a 400 Gy. Sin embargo, a través de un ejercicio intercomparativo entre las linealidades expresadas en las figuras, 2 y 3 específicamente, se concluye que, para beneficio y optimización en el objetivo de este artículo, se debe emplear un rango de 100 a 350 Gy, para una diferencia del 4 %.

Debido a que la constante deducida a partir de la ecuación (6) es calculada con las condiciones ambientales del LSCD, y siendo estas similares a las de la planta gamma, a diferencia de la constante de la ecuación (7) presentada bajo unas condiciones teóricas que requerirían una corrección

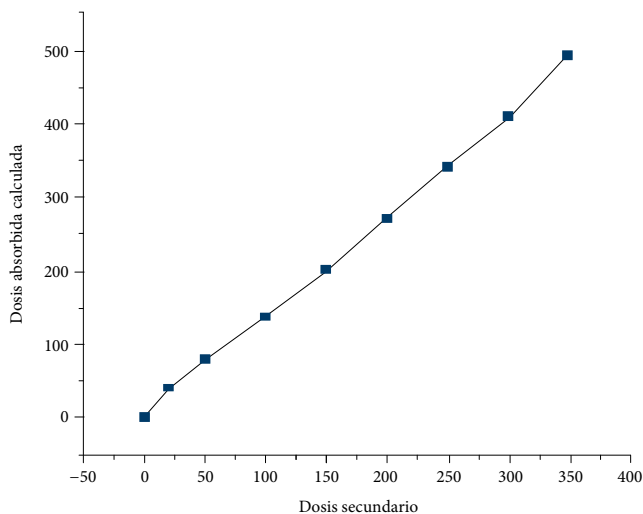


Figura 3. Dosis absorbida calculada a partir de la fórmula Fricke (ecuación 7) vs. dosis LSCD

por temperatura, se puede deducir que para la aplicación de la solución Fricke adaptada a las condiciones del trabajo en el SGC no es necesario llevar a cabo correcciones de temperatura, ya que dicha variable fue previamente calculada sobre la curva experimental presentada en la figura 2. Sin embargo, se recomienda realizar esta validación directamente en la planta en condiciones reales de irradiación con materiales.

Se podría adelantar un trabajo posterior de validación para así observar y determinar los factores que contribuyen a la incertidumbre de la medida y cuáles afectan la diferencia con respecto a la dosis reportada por el LSCD.

Por último, se realizó la estimación de la incertidumbre en la dosis suministrada por el LSCD y en la lectura de la absorbancia, tablas 3 y 4.

Tabla 3. Incertidumbre de la dosis suministrada (U_{DS}) por el LSCD

Fuente de incertidumbre	Incertidumbre %, k=1	Tipo
Tasa de Kerma Aire (U_{kair})	1	B
Homogeneidad del campo de irradiación (U_{Hom})	1	B
$U_{Distancia}$	0,5	B
U_{DS}	1,5 %	
$U_{DS}(k=2) = 3 \%$		

Tabla 4. Incertidumbre de lectura de absorbancia (U_{ABS})

Fuente de incertidumbre	Incertidumbre %, k=1	Tipo
S% de absorbancia	0,24	A
Resolución del equipo	<<0,1	B
Estabilidad del equipo	0,5	B
U_{ABS}	0,5 %	
$U_{ABS}(k=2) = 1,1 \%$		

Finalmente, se determinó la incertidumbre combinada a partir de los valores establecidos de incertidumbre en las tablas 3 y 4.

$$U \% = \sqrt{(U_{DS})^2 + (U_{ABS})^2} \tag{8}$$

Así, se obtuvo un valor de incertidumbre de la intercomparación realizada del 3 % con un factor de cobertura de $k=2$, para una confiabilidad del 95 %.

4. Conclusiones

La preparación de la solución dosimetría Fricke se llevó a cabo en el laboratorio de la Planta de Irradiación Gamma del SGC, en el cual no se presentan condiciones controladas de temperatura y humedad, lo que pudo generar la diferencia de la dosis reportada por el LSCD y la dosimetría Fricke.

Se obtuvo una curva de calibración con tendencia lineal entre el delta de absorbancia y la dosis impartida a cada dosímetro en el rango sugerido en la literatura. Se intercomparó la dosis obtenida en el laboratorio secundario con la dosis obtenida a partir de la ecuación (2) del sistema dosimetría Fricke de la cual se tomó un rango de dosis de 100 a 350 Gy, debido a la baja linealidad y alta diferencia presentada a bajas dosis. Por esta razón se recomienda la realización de estudios posteriores de 10 a 100 Gy en condiciones controladas de temperatura y humedad.

Se logró determinar el valor de la constante experimental que representa la pendiente de la curva Fricke para las condiciones de medición en el LSCD, en cumplimiento del objetivo del presente trabajo para su uso en sistemas de rutina. Se obtuvo un valor de $213 \text{ kg}\cdot\text{J}^{-1}$, valor inferior a la k teórica $277 \text{ kg}\cdot\text{J}^{-1}$, debido a condiciones de medición del laboratorio de alta tasa de dosis del SGC. En este sentido, se concluye que en la intercomparación se identifica un 3,7 % de diferencia entre la dosimetría Fricke y la dosis absorbida de referencia dada por el LSCD en un rango de 100 Gy a 350 Gy con una incertidumbre del 3 % para una confiabilidad del 95 %.

Referencias

[1] X. Ortega, J. Jorba, *Radiaciones ionizantes. Utilización y riesgos I*, vol. 1, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.

- [2] Food irradiation — Requirements for the development, validation and routine control of the process of irradiation using ionizing radiation for the treatment of food, ISO/ASTM 14470:2011(E)
- [3] J. Vargas, M. Vivanco, M. Maldonado *et al.*, “Aplicaciones de la radiación gamma en frutas y hortalizas: perspectivas agroindustriales para el espárrago peruano”, Lima, Perú, Informe científico tecnológico, pp. 123-128, vol. 4, 2004. Disponible en <https://repositorio.ipen.gob.pe/handle/20.500.13054/433>
- [4] L. Rossi, D. Watson, S. Escandari *et al.*, “La radiación en la mesa”, *Revista Chilena de Infectología*, vol. 26, n.º 4, pp. 318-330, ago. 2009. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-10182009000500003>
- [5] Standard practice for dosimetry in radiation processing, ISO 52628:2013(E).
- [6] X. Villalobos, *Validación de la dosimetría Fricke en una fuente de Co-60 como alternativa dosimétrica para aplicaciones industriales*, tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Puras y Naturales, UMSA, La Paz, Bolivia, 2016.
- [7] R. E. Echanique, *Dosimetría radiológica*, 1ª. ed. Quito: Edifarm, 2018. Disponible en https://issuu.com/robertoestevezechanique2017/docs/dosimetr_a_radiologica
- [8] G. Albarrán, E. Mendoza y E. Cruz-Zaragoza, “Dosimetría química de irradiadores gamma de ^{60}Co y ^{137}Cs de uso semiindustrial e investigación”, *Nova Scientia*, vol. 9, n.º 19, pp. 116, 2017.
- [9] Practice for using the Fricke dosimetry system, ISO/ASTM 51026:2015(E)
- [10] J. P. Gómez, *Diseño de un modelo digital en el programa MCNP para la simulación de la dosimetría de la fuente de cobalto-60 de la epn y validación del modelo mediante dosimetría Fricke*, tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2013.
- [11] J. Vargas, M. Vivanco y E. Castro, “Sistemas dosimétricos de altas dosis, tasa de dosis y uniformidad de dosis en alimentos y producto médico”, en *XIV International Symposium on Solid State Dosimetry ISSSD 2014*, Cusco, Perú, 2014.
- [12] X. Villalobos, *Validación de la dosimetría Fricke en una fuente de Co-60 como alternativa dosimétrica para aplicaciones industriales*, tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Puras y Naturales, UMSA, La Paz, Bolivia, 2016.
- [13] C. de Almeida y C. Salata, “Absorbed dose to water standard for ^{192}Ir HDR sources using Fricke Dosimetry”, *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 4, pp. 31-44, 2020. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.4.2020.565>
- [14] A. Romero, “Radiaciones”, *Revista Digital para Profesionales de la Enseñanza*, vol. 4, n.º 114, sep. 2009. Disponible en <https://www.feandalucia.ccoo.es/indicei.aspx?p=62&d=177&s=1>
- [15] J. Mager (dir.), *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*, 3.ª ed. Madrid: Oficina Internacional del Trabajo, 1998. Disponible en <https://www.insst.es/documents/94886/161958/Sumario+del+Volumen+I.pdf/18ea3013-6f64-4997-88a1-0aadd719faac?t=1526457520818>
- [16] K. Shortt, “Temperature dependence of G(Fe $^{3+}$) for the Fricke dosimeter”, *Physics in Medicine & Biology*, vol. 34, pp. 1923-1926, 1989. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/34/12/014>
- [17] R. Suárez, “Conservación de alimentos por irradiación”, *Invenio*, vol. 4, n.º 6, pp. 85-124, jun. 2001. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/877/87740608.pdf>