

Experimental analysis of temperature evolution in a gamma irradiation chamber cooled with dry ice

Carlos A. Jiménez-Carballo¹; Walter Vargas-Segura²

^{1,2}Costa Rica Institute of Technology, Cartago, Costa Rica, carjimenez@itcr.ac.cr, walvargas@itcr.ac.cr

Abstract– *The main objective of this work was to develop a first-approximate method for determining the ideal amount of dry ice required to preserve biological samples below -5 °C during gamma irradiation processes in a self-shielded irradiator, ensuring their frozen state. To this end, four experiments were conducted in which the mass and spatial distribution of dry ice within a sample holder used in an irradiator were varied, and the temperature at the center of the holder was measured and recorded for approximately 30 hours. From this, the time during which the temperature remained below -5 °C was determined, and a linear least-squares model was constructed to relate the mass to the thermal preservation time. Furthermore, it was determined that the mass and its distribution are crucial factors for improving thermal control in gamma irradiators.*

Keywords– *gamma irradiation, dry ice, heat transfer, thermal control.*

Análisis experimental de la evolución temporal de la temperatura en una cámara de irradiación gamma enfriada con hielo seco

Carlos A. Jiménez-Carballo¹; Walter Vargas-Segura²

^{1,2}Costa Rica Institute of Technology, Cartago, Costa Rica, carjimenez@itcr.ac.cr, walvargas@itcr.ac.cr

Resumen— El objetivo principal de este trabajo fue el de desarrollar un método de primera aproximación para determinar la cantidad ideal de hielo seco que se requiere para conservar muestras biológicas por debajo de -5°C durante los procesos de irradiación gamma en un irradiador autoblandado, asegurando su estado congelado. Para esto se realizaron cuatro experimentos donde se varió la masa y distribución espacial del hielo seco dentro de un porta muestras que se utiliza en un irradiador y se midió la temperatura en el centro del porta muestras, registrándose durante aproximadamente 30 horas. A partir de esto se determinó el tiempo durante el cual la temperatura permaneció por debajo de -5°C y se construyó un modelo lineal mediante mínimos cuadrados para relacionar la masa con el tiempo de conservación térmica. Además, se determinó que la masa y su distribución son factores cruciales para mejorar el control térmico en irradiadores gamma.

Palabras clave—irradiación gamma, hielo seco, transferencia de calor, control térmico.

I. INTRODUCCIÓN

La irradiación gamma es un método de esterilización de tejidos y biomateriales con fines médicos, de gran utilidad porque permite inactivar microorganismos sin la necesidad de aumentar la temperatura del material tratado (como el uso de autoclave) y tiene una alta penetración [1]. En particular, la irradiación del tejido óseo para fines terapéuticos demanda un control meticuloso de las condiciones operativas, porque aspectos como la dosis absorbida, el tiempo de exposición y la temperatura pueden afectar de manera importante tanto la fiabilidad de los procesos de validación dosimétrica como la calidad final del tejido [2].

Estudios han demostrado que, si durante la irradiación se mantienen congeladas las muestras biológicas, eso contribuye a preservar sus propiedades mecánicas y fisicoquímicas, además de que se reducen los procesos de degradación inducidos por la radiación [3]. Sin embargo, mantener y conseguir condiciones de temperatura de congelamiento en una cámara de irradiación gamma es un reto técnico difícil, especialmente si el proceso de irradiación dura mucho tiempo o si la temperatura exterior es alta.

El enfriamiento pasivo por medio de hielo seco (CO_2 sólido) es una solución económica y práctica para disminuir la temperatura en el interior de las cámaras, en los laboratorios de servicios tecnológicos y en los centros de investigación que

usan instalaciones de irradiación autoblandadas [4]. Sin embargo, el uso de hielo seco presenta nuevas variables operacionales, como la cantidad de masa inicial requerida, su velocidad de sublimación y la dinámica de transferencia de calor entre el interior y el exterior del irradiador [5]. La falta de parámetros cuantitativos precisos para establecer la cantidad ideal de hielo seco puede llevar a usar el recurso de forma ineficiente y a tener temperaturas no adecuadas para asegurar que las muestras se mantengan congeladas.

En el Laboratorio de Irradiación Gamma del Centro de Investigación y Extensión en Ingeniería de los Materiales (CIEMTEC), investigaciones anteriores han evidenciado que la irradiación gamma es factible para esterilizar el tejido óseo con fines terapéuticos, lo que abre la posibilidad de brindar este servicio a bancos de tejidos y a la comunidad científica [6]. Sin embargo, se ha determinado que la optimización del control térmico durante la irradiación es un factor crucial para garantizar tanto la calidad del proceso como la reproducibilidad de los resultados, sobre todo cuando se tienen en cuenta etapas sucesivas de validación dosimétrica [7], [8].

Debido a lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es desarrollar un método que a primera aproximación permita determinar la cantidad óptima de hielo seco para mantener la temperatura de la muestra biológica por debajo de -5°C la mayor cantidad de tiempo posible en un irradiador, para garantizar que dichas muestras permanezcan congeladas. Específicamente, se desea desarrollar un experimento en un ambiente controlado de temperatura exterior para lo cual se utiliza un horno de vacío a 30°C , con la idea de simular la temperatura dentro del irradiador del Laboratorio de Irradiación Gamma del CIEMTEC. A partir de dicho experimento se analizará la evolución de la temperatura en función del tiempo dentro del porta muestras que utiliza el irradiador para determinar el tiempo que se mantiene el centro de porta muestras a una temperatura inferior a los -5°C . Finalmente, con ayuda del método de Mínimos Cuadrados se obtendrá una ecuación que permita determinar el tiempo o la cantidad de masa necesaria para mantener las muestras a una temperatura por debajo de los -5°C .

II. METODOLOGÍA

En este estudio para determinar la temperatura dentro del irradiador se utilizó una termocupla, pero para poder garantizar la reproducibilidad en la posición del sensor de temperatura debido a que el equipo es autoblandado, los experimentos se realizaron dentro de un horno de temperatura ajustable con el fin de simular las condiciones de temperatura dentro del irradiador.

Para analizar la evolución temporal de la temperatura en el interior de la cámara de irradiación bajo condiciones de enfriamiento pasivo se utilizaron los materiales de la TABLA I. El porta muestras es un cilindro de acero inoxidable, con una altura de 27 cm y un diámetro de 15 cm, con un espesor de 2 mm, y dentro de este el sistema estuvo compuesto por capas sucesivas de materiales dispuestas verticalmente tal y como se observa en la Fig. 1, donde las capas de cartón (de 2 mm de espesor), ubicadas tanto encima como debajo de la muestra, se utilizaron para dar soporte mecánico a la muestra y además reducir el contacto directo con el hielo seco, para evitar gradientes térmicos extremos que pudieran afectar la integridad del material. Asimismo, las capas de estereofón (2 cm de espesor) se ubicaron en las partes superior e inferior del porta muestras como aislamiento térmico para reducir la transferencia de calor entre el interior del porta muestra y el entorno externo. Entre las capas de estereofón se situaron capas de hielo seco, responsables de absorber el calor proveniente del interior de la cámara mediante sublimación.

TABLA I
LISTA DE MATERIALES UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

Ítem	Material / Equipo	Marca	Modelo / Especificación
1	Hielo seco (CO ₂ sólido)	—	—
2	Sensor de temperatura	PASCO	CI-6505B
3	Interfaz de adquisición de datos	PASCO	ScienceWorkshop 750
4	Balanza digital	Ohaus	Scout Pro (2000 g)
5	Porta muestras para irradiador de acero	—	—
6	Horno de vacío	Aken	AVO-50 Vacuum Dry Oven
7	Cartón	—	Espesor 3 mm
8	Estereofón	—	Espesor 2,54 cm

A. Medición de la temperatura

La temperatura en el interior del irradiador se midió en el centro de la cámara con ayuda del sensor de temperatura de acero inoxidable, seleccionado por su estabilidad mecánica y confiabilidad en rangos de baja temperatura. El sensor se introdujo verticalmente desde la parte superior del sistema, de manera que su punta quedara ubicada aproximadamente a la altura de la muestra, sin contacto directo con el hielo seco ni con las capas de cartón (ver Fig. 1).

El sensor se conectó a la interfaz de adquisición de datos ScienceWorkshop 750 de PASCO, y la recolección de información se realizó utilizando el software Capstone. La frecuencia de medición de la temperatura fue de 5 min, y se registró de forma continua a lo largo del tiempo durante 30 h aproximadamente, lo que permitió obtener las curvas de temperatura en función del tiempo para cada configuración experimental.

B. Condiciones térmicas externas

Para garantizar condiciones de reproducibilidad y controlar la transmisión de calor desde el medio ambiente, el porta muestras se introdujo en un horno de vacío el cual mantuvo la temperatura exterior del porta muestras constante en 30 °C (ver Fig. 2), durante cada uno de los experimentos. Esta condición se instituyó con la intención de crear una situación conservadora en la que el gradiente térmico entre el interior y exterior del irradiador promueve que el calor fluya hacia el porta muestras.

C. Protocolo experimental

Se realizaron cuatro experimentos independientes, en los cuales se varió la cantidad inicial total de hielo seco colocada en el interior del irradiador, manteniendo constante la configuración geométrica del sistema (Fig. 1) y las condiciones externas, salvo para el cuarto experimento donde se colocó una

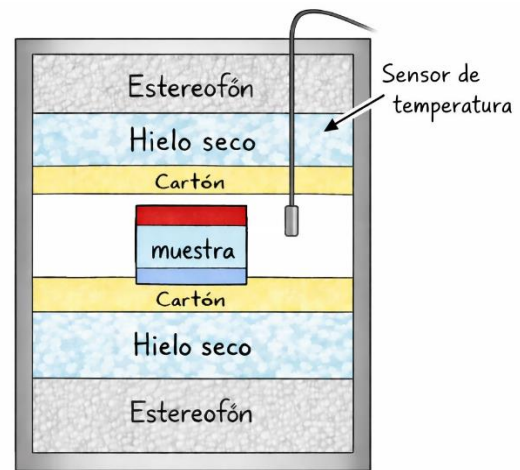


Fig. 1. Disposición de los materiales dentro del porta muestra

masa alrededor de la muestra, esto con el objetivo analizar si la muestra permanecía más tiempo a una temperatura por debajo de -5°C . En la TABLA II se pueden ver los valores de masa utilizados, para la parte de abajo, la de arriba, alrededor de la muestra (experimento 4) y la total. Una vez que el porta muestras se configuró según la Fig. 1, el porta muestras se introdujo en el horno con la temperatura controlada (ver Fig. 2).

D. Análisis de datos

A partir de los registros experimentales se obtuvieron curvas de temperatura en función del tiempo para cada experimento. Adicionalmente se determinaron los tiempos durante el cual la temperatura en el centro del porta muestras se mantuvo por debajo de -5°C . A partir de dichos valores de tiempo y los valores de las masas de la TABLA II y con ayuda del método de Mínimos cuadrados se encontró un modelo matemático que permite determinar a primer orden la cantidad de masa necesaria para mantener las muestras biológicas a una temperatura menor a -5°C la mayor cantidad de tiempo.

TABLA II
VALORES DE MASA DE HIELO SECO UTILIZADO EN CADA EXPERIMENTO.

Experimento	1	2	3	4
Masa arriba (kg)	0,5120	0,5138	0,2827	0,4842
Masa abajo (kg)	1,0293	0,8577	0,7643	0,6596
Masa alrededor de la muestra (kg)	0	0	0	0,5871
Masa total (kg)	1,5413	1,3715	1,0470	1,7309



Fig. 2: Configuración experimental del sistema.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se exponen los resultados más importantes del estudio experimental del cambio de la temperatura en función del tiempo en una cámara de irradiación gamma refrigerada con hielo seco.

A. Evolución temporal de la temperatura

La Fig. 3 muestra la evolución de la temperatura en función del tiempo para los cuatro experimentos realizados, donde se utilizó para cada uno de los experimentos las masas de hielo seco que se muestran en la TABLA II, tal. Para todos los casos se obtuvo un comportamiento cualitativamente similar, caracterizado por tres etapas bien definidas:

- un enfriamiento rápido inicial,
- el alcance de una temperatura mínima, y
- un incremento gradual de la temperatura hasta aproximarse a la temperatura del horno de 30°C .

El enfriamiento inicial ocurre en un intervalo de tiempo corto, en general para todos los experimentos, esta etapa duró menos de 5 minutos, esto se debe a que la sublimación del hielo seco en esta etapa domina la transferencia de calor.

Posteriormente, el sistema alcanza una temperatura mínima, donde en los tres primeros experimentos las temperaturas mínimas fueron semejantes (ver TABLA III), entre los -28°C y los -23°C . Lo anterior puede deberse a que las masas de hielo seco en la parte de debajo del porta muestras son semejantes en dichos experimentos. Para el caso del experimento 4, la temperatura mínima alcanzada fue de $-64,3^{\circ}\text{C}$, lo cual es significativamente más baja a la observada en los otros tres experimentos, esto se debe a la distribución del hielo seco en el porta muestras, lo que aumentó el área efectiva de transferencia

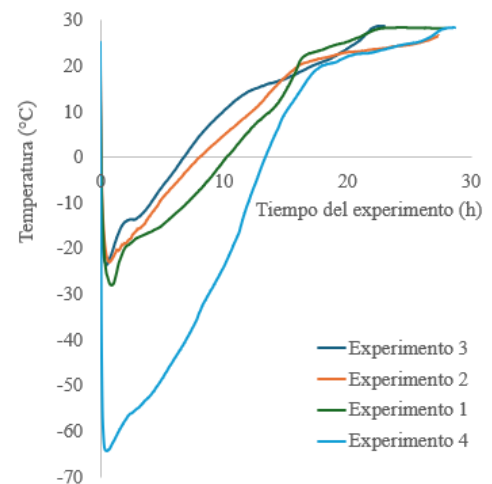


Fig. 3 Variación de la temperatura alrededor de la muestra (t) en función del tiempo (t)

TABLA III
TEMPERATURAS MÍNIMAS Y TIEMPOS DE ENFRIAMIENTO PARA LOS CUATRO
EXPERIMENTOS

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4
Temperatura mínima alcanzada (°C)	-28,0	-23,0	-23,4	-64,3
Tiempo que tardó en alcanzar la temperatura mínima (h)	0,917	0,750	0,500	0,500
Tiempo que tardó en bajar a menos de 0 grados (min)	< 5	< 5	< 5	< 5
Tiempo que tarda entre la temperatura mínima y -5° (h)	7,8	5,6	4,9	12,2

de calor y redujo la resistencia térmica general entre la muestra y el hielo seco en sublimación, lo que permitió que el sistema se acercara más a la temperatura de sublimación del hielo seco ($-78,5^{\circ}\text{C}$). Asimismo, el hielo seco absorbe calor de acuerdo con la expresión:

$$Q = m_s L_s, \quad (1)$$

donde L_s es el calor latente de sublimación (semejante 571 kJ/kg para el hielo seco) y m_s es la masa que se sublima. En el experimento 4 no solo aumentó la masa total dentro del porta muestras, sino que además se cambió la distribución espacial de esa masa. De acuerdo con la TABLA III el tiempo requerido para alcanzar la temperatura mínima para todos los experimentos fue inferior a una hora, con valores comprendidos entre $0,500 \text{ h}$ y $0,917 \text{ h}$, lo cual sugiere que el sistema alcanza rápidamente un régimen dominado por la sublimación del CO_2 .

B. Tiempo de conservación por debajo de -5°C

En la TABLA III se observa que la temperatura mínima alcanzada no se mantiene durante periodos prolongados, sino que corresponde a un estado transitorio, lo cual se debe a que la temperatura externa al porta muestras es la del horno (30°C). En la Fig. 4 se presenta la variación del tiempo (t_{-5}) que tarda la temperatura cerca de la muestra en pasar del valor mínimo hasta -5°C en función de la masa (m) abajo del porta muestras. En dicha figura se puede ver que al aumentar m también aumenta t_{-5} y además se presenta un ajuste lineal caracterizado por un coeficiente de determinación elevado ($R^2 = 0.981$). Si se considera que la fuente principal de enfriamiento dentro del porta muestras proviene de la sublimación del CO_2 (mL_s) y suponiendo que la tasa de transferencia de calor desde el entorno externo (el horno) permanece constante en el rango ($\dot{Q}$)

experimental analizado, el tiempo característico de enfriamiento se puede aproximar como:

$$t_{-5} \sim \left(\frac{L_s}{\dot{Q}} \right) m \quad (2)$$

lo cual predice una relación aproximadamente lineal entre la masa y el tiempo de conservación térmica. En este sentido, el comportamiento observado en la Fig. 4 es adecuado con el modelo físico esperado de acuerdo con la ecuación (2).

La pendiente de la ecuación de la Fig. 4 tiene como significado físico la proporción entre el calor latente de sublimación y la carga térmica efectiva del sistema lo cual se puede interpretar como el aumento incremental en el tiempo de conservación por debajo de cero por unidad de masa de hielo seco. El valor de la pendiente obtenida y su incertidumbre fue de $(11,3 \pm 1,5) \text{ h/kg}$. Asimismo, la intersección al ser negativa refleja que existe una cantidad mínima de masa de hielo seco necesaria para alcanzar el umbral de -5°C . El valor de la intersección y su incertidumbre fue de $(-3,8 \pm 1,4) \text{ h}$.

Asimismo, en la Fig. 5 se puede observar la variación de t_{-5} en función de la masa total (M) en el porta muestras. En dicha figura también se puede ver que al aumentar M también aumenta t_{-5} y para este caso se presenta un ajuste lineal caracterizado por un coeficiente de determinación $R^2 = 0.796$. La pendiente de la ecuación de la Fig. 5 y su incertidumbre fue $(5,4 \pm 2,8) \text{ h/kg}$, mientras que el valor de la intersección y su incertidumbre fue de $(-1,0 \pm 3,7) \text{ h}$.

La importancia de las ecuaciones de las Fig. 4 y Fig. 5 es que a partir de ellas se puede estimar a primer orden cual es el tiempo que tarda la temperatura cerca de la muestra en pasar del valor mínimo hasta -5°C para cualquier valor de masa debajo de la muestra, pero también podría pensarse en el sentido inverso, y calcular una cantidad de masa necesaria para que las muestras biológicas se mantengan congeladas el tiempo que sea necesario. No obstante, es importante mencionar que ambos modelos lineales se construyeron a partir de solo tres observaciones experimentales, lo que implica un grado de libertad residual. Por otro lado, a partir de los valores de R^2 se tiene que, dentro del rango experimental evaluado, el modelo matemático relaciona con m funciona como un mejor predictor de t_{-5} que aquel relacionado con M . Desde una perspectiva física, aunque la capacidad general de enfriamiento por sublimación depende de la masa total accesible, el comportamiento térmico observado en un lugar específico se ve significativamente afectado por el acoplamiento térmico y las resistencias internas del sistema. En esta configuración particular, la masa inferior m puede capturar mejor el control de temperatura local que rodea la muestra debido al gradiente térmico vertical y al canal efectivo de flujo de calor, lo que hace que m sirva como la principal barrera térmica contra la carga térmica incidente.

Finalmente, debe enfatizarse que ambos modelos se construyeron con solo tres observaciones experimentales, lo cual implica un grado de libertad residual $df = 1$. En consecuencia, los intervalos de confianza de la pendiente son amplios: para el modelo con m , la pendiente estimada presenta un intervalo de confianza (IC) del 95 % de confianza es $[-6.2, 28.5]$ h/kg, mientras que para un IC 90 % de $[2.6, 19.8]$ kg/h. Para el modelo con M , la pendiente estimada IC 95% de $[-29.3, 39.9]$ h/kg. Por tanto, aunque la tendencia creciente observada y la comparación de R^2 respaldan el uso de m como variable explicativa de primer orden, se recomienda ampliar el número de niveles de masa y repetir mediciones para fortalecer la validez estadística y reducir la incertidumbre en los parámetros estimados.

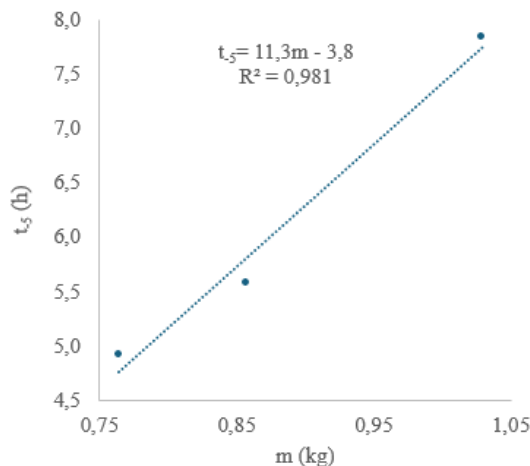


Fig. 4: Tiempo que tarda en pasar de la temperatura mínima a -5°C (t_{-5}) en función de la masa (m) en la parte de abajo del porta muestras.

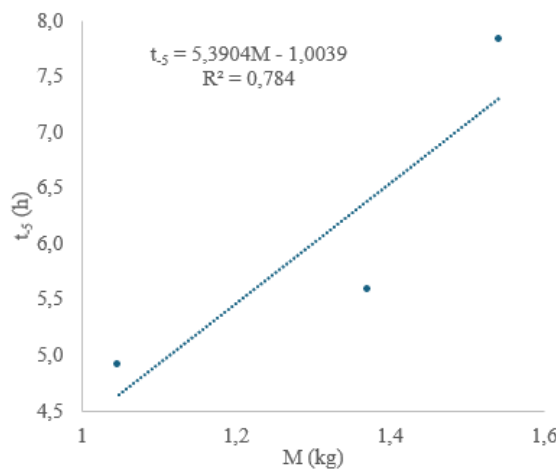


Fig. 5: Tiempo que tarda en pasar de la temperatura mínima a -5°C (t_{-5}) en función de la masa total (M) en el porta muestras.

C. Implicaciones prácticas y selección de la masa óptima

Desde una perspectiva aplicada, los resultados evidencian que el uso de masas pequeñas de hielo seco resulta insuficiente para mantener condiciones de congelación durante periodos prolongados, mientras que masas excesivamente grandes conducen a temperaturas extremadamente bajas que podrían no ser necesarias para el proceso de irradiación y que implican un mayor consumo de recurso. Además, se encontró que el acomodo de la masa dentro del porta muestras también puede influenciar en la temperatura cerca de la muestra, donde, por ejemplo, para el caso del experimento 4, no solo la temperatura mínima fue mucho menor, sino el tiempo que se mantuvo a una temperatura inferior a los -5°C .

En este sentido, el análisis conjunto de las curvas de temperatura y de la relación masa-tiempo permite identificar un rango óptimo de operación en el cual se garantiza que la temperatura se mantenga por debajo de -5°C durante el intervalo requerido, sin incurrir en un uso innecesario de hielo seco. Este criterio de optimización es particularmente relevante para la operación rutinaria de instalaciones de irradiación, donde la reproducibilidad del proceso y la eficiencia en el uso de recursos son aspectos clave.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló una metodología para analizar la evolución temporal de la temperatura dentro de un porta muestras utilizado en un irradiador gamma autoblandado, empleando hielo seco como mecanismo de enfriamiento pasivo bajo condiciones externas controladas a 30°C con ayuda de un horno de vacío.

A partir de los resultados obtenidos se encontró que el comportamiento térmico del sistema presenta tres etapas bien definidas: enfriamiento rápido inicial dominado por la sublimación del CO_2 , alcance de la temperatura mínima y posterior incremento gradual debido a la transferencia de calor desde el entorno externo, en este caso dominada por el horno de vacío. Se observó que la temperatura mínima lograda depende de la cantidad total de hielo seco y también de cómo está distribuido en el porta muestras. Para el caso de este trabajo, el experimento 4, en el cual el hielo seco se distribuyó tridimensionalmente alrededor de la muestra permitió alcanzar temperaturas significativamente menores ($-64,3^{\circ}\text{C}$), evidenciando que la configuración geométrica disminuye la resistencia térmica total del sistema y amplía el área efectiva de transferencia de calor. Este resultado demuestra que no solo la masa total, sino también su acomodo espacial, constituye un parámetro relevante en el diseño térmico del sistema.

Con ayuda de los resultados obtenidos de los experimentos 1, 2 y 3 se encontraron dos modelos matemáticos lineales que a primer orden permiten encontrar el tiempo para el cual una

muestra biológica se mantiene a una temperatura menor a -5°C mientras es irradiada; el primer modelo depende de la masa del hielo seco debajo de la muestra y el segundo depende de la masa total de hielo seco en el porta muestras. Es importante tener presente que dichos comportamientos lineales son coherentes con un balance energético de primer orden basado en el calor latente de sublimación del CO_2 . La pendiente del modelo obtenido tiene un significado físico asociado a la relación entre la capacidad de enfriamiento por unidad de masa y la carga térmica efectiva del sistema.

Es importante mencionar que los modelos lineales fueron contruidos a partir de únicamente tres observaciones experimentales, lo que implica un grado de libertad residual limitado y, por tanto, los intervalos de confianza son amplios en los parámetros estimados. Debido a lo anterior, aunque la tendencia observada es físicamente consistente y operacionalmente útil dentro del rango estudiado, se recomienda aumentar el número de experimentos de masa de hielo seco para fortalecer la validez estadística del modelo y mejorar su capacidad predictiva.

Desde un punto de vista aplicado, el análisis efectuado permite establecer un criterio preliminar para estimar la cantidad de hielo seco necesaria para mantener las muestras biológicas congeladas durante procesos de irradiación, evitando tanto el uso insuficiente como el sobredimensionamiento del recurso. Este enfoque ayuda a aumentar la eficiencia en las instalaciones de irradiación gamma y a que la reproducibilidad operativa sea mejor, sobre todo en lo que se refiere a los usos vinculados con la esterilización de tejidos y su validación dosimétrica subsiguiente.

Finalmente, los resultados obtenidos constituyen una base experimental sólida para el desarrollo futuro de modelos numéricos mediante el Método de Elemento Finito (FEM), que permitan simular la transferencia de calor en el irradiador bajo diferentes configuraciones geométricas y condiciones de operación.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) por financiar esta investigación bajo la actividad de fortalecimiento “Estudio de la distribución de las bajas temperaturas dentro de la cámara de irradiación y su efecto en la dosimetría PMMA en el irradiador autoblandado del CIEMTEC ubicado en el Campus Tecnológico Central del TEC” (código 1450029), al Laboratorio de Irradiación Gamma del Centro de Investigación y Extensión en Materiales del Tecnológico de Costa Rica (CIEMTEC). Al LEMIC (Laboratorio de Espectroscopía Molecular, Imagen y Color) de la Escuela de Física (ITCR) por colaborar con el equipo necesario en el proceso experimental.

REFERENCES

- [1] R. Singh, D. Singh, and A. Singh, “Radiation sterilization of tissue allografts: A review,” *World J. Radiol.*, vol. 8, no. 4, 2016, doi: 10.4329/wjr.v8.i4.355.
- [2] C. Centeno-cerdas, F. Somarribas-Brenes, W. Vargas-Segura, M. Jarquín-Cordero, A. Ulloa-Fernández, and L. Calvo-Castro, “Procesamiento y esterilización de tejido óseo para su uso terapéutico: bases preclínicas desde una universidad tecnológica,” *Revista Tecnología en Marcha*, 2024, doi: 10.18845/tm.v37i9.7625.
- [3] T. C. Y. Harmony, N. Yusof, S. Ramalingam, R. Baharin, A. Syahrom, and A. Mansor, “Deep-Freezing Temperatures During Irradiation Preserves the Compressive Strength of Human Cortical Bone Allografts: A Cadaver Study,” *Clin. Orthop. Relat. Res.*, vol. 480, no. 2, 2022, doi: 10.1097/CORR.0000000000001968.
- [4] B. Croonenborghs, A. Pratt, L. Bone, and M. Senescu, “Gamma Irradiation of Frozen Animal Serum: Dose Mapping for Irradiation Process Validation,” *BioProcessing Journal*, vol. 15, no. 3, 2016, doi: 10.12665/j153.croonenborghs.
- [5] Y. A. Cengel, *Heat and mass transfer: fundamentals & applications* / Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar. 2015.
- [6] C. Centeno-Cerdas *et al.*, “Tratamiento y validación pre-clínica de tejido óseo para uso terapéutico,” Cartago, Costa Rica, 2021.
- [7] International Organization for Standardization, “ISO/ASTM 51707:2015 Guide for estimation of measurement uncertainty in dosimetry for radiation processing,” 2015.
- [8] ASTM, “Standard Practice for Use of a Radiochromic Film Dosimetry System 1,” *Astm*, vol. 2004, no. I, 2015.