REVISTA INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Irradiación de bienes patrimoniales en la planta de irradiación gamma y estado del arte

Irradiation of Heritage Assets at the Gamma Irradiation Plant and State of the Art

Natalia Muñoz Vásquez[1], Jormagn Israel Abril Murillo[1], Johana Gaitán Sánchez[1,a], María Robles Cifuentes[1], Giovanni Andrés Vela[1], Mauricio Andrés Tovar Mejía[1], Luis Eduardo Hernández Barón[1]

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, 8, 2026

Recibido: 17 de julio de 2026

Aceptado: 27 de octubre de 2026

Publicado en línea: 20 de noviembre de 2026

DOI: https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.8.2026.778

Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0.

Citación: N. Muñoz, J. I. Abril, I. J. Gaitán, M. F. Robles, G. A. Vela, M. A. Tovar, L. E. Hernandez, «Irradiación de bienes patrimoniales en la planta de irradiación gamma y estado del arte», *rev. investig. apl. nucl.*, n.º 8, nov. 2026.

Resumen

La irradiación gamma es una técnica eficaz para el control de agentes de biodeterioro en bienes culturales elaborados con materiales orgánicos. En Colombia, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) dispone de una instalación de irradiación con fuentes de ^{60}Co. No obstante, la aplicación sistemática de esta tecnología en la conservación patrimonial requiere criterios técnicos que garanticen el control dosimétrico y la preservación de las propiedades fisicoquímicas de los materiales. El objetivo de este estudio fue estructurar un procedimiento técnico para la aplicación de irradiación gamma en bienes patrimoniales en la Planta Gamma del SGC. La metodología se basó en la revisión de literatura científica y en el análisis documental de guías técnicas del Organismo Internacional de Energía Atómica, con el fin de identificar rangos dosimétricos y condiciones operativas para el control biológico en diferentes materiales culturales. Como resultado, se propone un procedimiento operacional que integra la evaluación inicial del material, la planificación del tratamiento, el control dosimétrico, la ejecución de la irradiación y el seguimiento posterior. El análisis comparativo identificó el intervalo de 3-10 kGy como una ventana operativa adecuada para el control biológico en la mayoría de los materiales orgánicos patrimoniales.

Palabras clave: Conservación del patrimonio, irradiación gamma, ^{60}Co, tecnologías radiactivas.

[1] Direccción de Asuntos Nucleares, Servicio Geológico Colombiano. Bogotá D.C. - Colombia

[a] Autor para correspondencia: igaitan@sgc.gov.co

Abstract

Gamma irradiation is an effective technique for controlling biodeterioration agents in cultural heritage objects made of organic materials. In Colombia, the Colombian Geological Survey (SGC) operates an irradiation facility equipped with cobalt-60 (^{60}Co) sources. However, the systematic application of this technology in heritage conservation requires technical criteria to ensure dosimetric control and the preservation of the physicochemical properties of the materials. The objective of this study was to develop a technical procedure for the application of gamma irradiation to cultural heritage objects at the SGC Gamma Irradiation Facility. The methodology was based on a review of scientific literature and a documentary analysis of technical guidelines from the International Atomic Energy Agency (IAEA), in order to identify dosimetric ranges and operational conditions for biological control in different cultural materials. As a result, an operational procedure is proposed that integrates initial material assessment, treatment planning, dosimetric control, irradiation execution, and post-treatment monitoring. Comparative analysis identified the 3–10 kGy interval as an appropriate operational window for biological control in most organic cultural heritage materials.
Keywords: Heritage Conservation, Gamma Irradiation, Cobal-60, Nuclear Technologies

Introducción

El patrimonio cultural colombiano constituye un componente fundamental de la identidad nacional. Su preservación es una responsabilidad del Estado, sustentada en un marco normativo que incluye la Ley 397 de 1997, modificada por la Ley 1185 de 2008 y reglamentada mediante decretos posteriores. A pesar de este marco institucional, una proporción significativa de los bienes patrimoniales (especialmente aquellos elaborados con materiales orgánicos como madera, papel, cuero y textiles) se encuentra expuesta a procesos continuos de biodeterioro causados por hongos, bacterias e insectos. Estos agentes comprometen progresivamente la estabilidad estructural, funcional y estética de los elementos [1], [2].

La radiación ionizante ha sido estudiada desde comienzos del siglo XX por su capacidad para inactivar microorganismos. Sin embargo, su aplicación sistemática en el ámbito de la conservación del patrimonio cultural se ha consolidado principalmente en las últimas décadas, impulsada por avances en dosimetría, modelación de campos de radiación y control de procesos de irradiación. En particular, la irradiación gamma con fuentes de cobalto (^{60}Co) se ha consolidado en el ámbito internacional como una técnica eficaz y no destructiva para la desinfección y desinfestación de bienes culturales [3], [4].

Aplicada bajo condiciones controladas, esta tecnología permite eliminar agentes biológicos sin generar residuos químicos ni inducir radiactividad en los objetos tratados, y que preserva sus propiedades físicas, químicas y estéticas [5], [6]. Estas características han favorecido su implementación en diversas instalaciones dedicadas al tratamiento de bienes culturales en Europa, Asia y América.

En Colombia, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) opera una Planta de Irradiación Gamma ubicada en Bogotá, equipada con un irradiador panorámico de ^{60}Co cuyo sistema de almacenamiento es en medio húmedo y está clasificado como tipo IV, de acuerdo con la SSF No. 8 del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

De acuerdo con la normativa nacional, establecida en las Resoluciones 18005 de 2008 y 40234 del 2024 del Ministerio de Minas y Energía, la instalación está clasificada en categoría 1 y nivel de seguridad A, y cuenta con las autorizaciones regulatorias necesarias para el uso de fuentes radiactivas.

Con una capacidad instalada de 3700 TBq (100 kCi), esta infraestructura ha respaldado el desarrollo de aplicaciones científicas en Colombia desde la década de 1970, particularmente en fitosanidad, conservación de alimentos y esterilización industrial. Estas aplicaciones han permitido consolidar la irradiación gamma como una herramienta tecnológica para el tratamiento de diferentes materiales y productos, mediante el uso controlado de radiación ionizante.

Actualmente, la instalación ofrece condiciones técnicas adecuadas para la aplicación de irradiación en procesos de conservación patrimonial, en concordancia con las recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y con los objetivos estratégicos institucionales [7], [8], [9], [10].

No obstante, la implementación sistemática de esta tecnología en el ámbito patrimonial requiere la adaptación de protocolos técnicos internacionales a las condiciones operativas de la instalación, así como las características materiales y dimensionales de los objetos presentes en las colecciones colombianas.

Un antecedente relevante en este procedimiento fue el tratamiento de la obra Tótems de la Serie Mutantes, del artista colombiano Carlos Arturo Rojas, perteneciente a la colección del Museo Nacional de Colombia. Esta intervención, realizada en 2022, constituyó una de las primeras aplicaciones de la irradiación gamma en el país para el tratamiento de una obra patrimonial de gran formato.

La obra está compuesta por trece elementos elaborados principalmente en madera y metal, en los cuales se evidenció actividad biológica asociada hongos e insectos xilófagos. El tratamiento se realizó en el Servicio Geológico Colombiano (SGC) a través de dosimetría de rutina basada en PMMA (Perspex) y dosimetría de referencia mediante pellets de alanina.

Como parte del procedimiento, se realizó un estudio preliminar de mapeo dosimétrico mediante diez posiciones de medición distribuidas dentro del volumen de irradiación, con el objetivo de caracterizar la distribución de dosis y optimizar la planificación del tratamiento. La irradiación se diseñó para una dosis objetivo de 8 ± 2 kGy, con un tiempo total aproximado de siete horas. El análisis dosimétrico permitió identificar las posiciones de dosis mínima dentro del sistema objeto-embalaje, las cuales se utilizaron como referencia para el ajuste del protocolo de irradiación.

La implementación de este procedimiento permitió la conservación efectiva de la obra y aportó al fortalecimiento de las capacidades técnicas nacionales para el tratamiento de objetos patrimoniales de gran formato [11].

De manera complementaria, entre 2019 y 2020, se desarrolló una experiencia experimental orientada a la desinfestación del tapiz *Gran Maraña Paramuna*, obra de la artista Olga de Amaral y perteneciente a la colección del Museo de Antioquia. El tratamiento se realizó también en el SGC bajo condiciones operativas equivalentes, mediante la aplicación de una dosis objetivo de 8 ± 2 kGy con control dosimétrico mediante sistemas PMMA y alanina.

Este estudio permitió evaluar la respuesta cromática de fibras textiles patrimoniales frente a la radiación gamma mediante mediciones colorimétricas en el sistema CIELAB, lo que aportó información preliminar sobre la estabilidad de tejidos de alto valor cultural sometidos a irradiación [12].

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo sistematizar el procedimiento técnico para la aplicación de irradiación gamma en bienes patrimoniales en la Planta de Irradiación Gamma del SGC, con la integración la experiencia operativa acumulada, la evidencia científica disponible y las recomendaciones metodológicas establecidas por el OIEA [13], [14].

Desde 2023, la instalación adelantó la modernización que culminó en 2026 y comprendió la actualización de la consola de mando. La última recarga de las fuentes se realizó en 2013 y, hasta agosto de 2026, la actividad total de las fuentes es de 17,107 kCi. Actualmente, se encuentran en desarrollo las actividades propias para una nueva recarga de las fuentes. En este contexto, se realizó una revisión del estado del arte internacional y de las experiencias disponibles en irradiación de bienes patrimoniales, con el propósito de consolidar criterios técnicos para la planificación y ejecución de tratamientos adaptados a las condiciones de la Planta de Irradiación Gamma en el Servicio Geológico Colombiano.

Como resultado de este análisis, se propone un procedimiento operacional para la planificación, ejecución y verificación dosimétrica y seguimiento de tratamientos de irradiación gamma aplicados a bienes patrimoniales. El procedimiento toma como referencia recomendaciones internacionales y las adapta a las condiciones técnicas y operativas de la instalación, con el propósito de establecer un marco técnico para el desarrollo de esta aplicación en Colombia.

Procedimiento

La aplicación de la irradiación gamma en la conservación de bienes patrimoniales se fundamenta en la interacción entre la radiación ionizante y los materiales que componen los objetos culturales, así como en la respuesta biológica de los agentes responsables del biodeterioro. El procedimiento

descrito a continuación integra estos fundamentos científicos con la experiencia operativa de la Planta de Irradiación Gamma del SGC y con las recomendaciones metodológicas reportadas en la literatura internacional.

Consideraciones técnicas sobre los materiales patrimoniales

La definición del protocolo requiere comprender la respuesta de los materiales frente a la radiación ionizante. La interacción de la radiación gamma con los materiales ocurre principalmente a través de procesos de ionización y excitación molecular que pueden generar radicales libres y desencadenar reacciones químicas como oxidación o escisión de cadenas poliméricas. La magnitud de estos efectos depende de la composición química del material, la dosis absorbida y las condiciones ambientales durante la irradiación.

En materiales lignocelulósicos como la madera, la presencia de lignina actúa como antioxidante natural, lo que proporciona cierta resistencia frente a procesos de degradación inducidos por radiación. Diversos estudios han demostrado que estos materiales pueden tolerar dosis de hasta 100 kGy sin alteraciones mecánicas significativas, mientras que modificaciones químicas menores pueden observarse únicamente respecto a dosis considerablemente superiores [15].

El papel, compuesto principalmente por celulosa, presenta mayor sensibilidad a la irradiación debido a la posible escisión de cadenas poliméricas y a la reducción del grado de polimerización. Por esta razón, para aplicaciones de control biológico se recomienda generalmente una dosis entre 5 y 10 kGy, rango en el cual es posible eliminar microorganismos e insectos sin provocar cambios sustanciales en sus propiedades mecánicas [16].

En materiales textiles, la respuesta depende de la naturaleza de la fibra. El algodón, también basado en celulosa, puede presentar degradación mecánica a partir de 4-10 kGy [17]. En contraste, la lana (compuesta por proteínas queratínicas) presenta mayor estabilidad estructural y puede tolerar dosis significativamente más altas antes de mostrar alteraciones perceptibles [3]. La seda, igualmente de naturaleza proteica, puede experimentar pérdida de elasticidad y resistencia cuando se aplican dosis superiores a aproximadamente 10 kGy [3].

En el caso de materiales pictóricos, los pigmentos inorgánicos suelen mostrar una alta estabilidad frente a la radiación gamma, permaneciendo inalterados incluso con dosis relativamente elevadas, de hasta aproximadamente 40 kGy [18]. Los colorantes orgánicos, por el contrario, pueden experimentar procesos de decoloración en rangos de dosis más bajos, entre aproximadamente 5 y 25 kGy, lo que hace necesaria una evaluación previa cuando estos materiales están presentes [19].

Los materiales de recubrimiento (incluyendo barnices, aglutinantes y adhesivos) presentan comportamientos variables dependiendo de su composición química. Aunque muchos de ellos permanecen estables dentro de los rangos de dosis utilizados para control biológico, algunos pueden manifestar cambios cromáticos a partir de 20 kGy [20]. De manera similar, ciertos materiales inorgánicos como vidrio y gemas pueden desarrollar centros de color inducidos por radiación, incluso en dosis relativamente bajas [21].

Otros materiales presentes en bienes culturales (como cuero, pergamino, momias, especímenes taxidérmicos, materiales fotográficos y polímeros sintéticos) presentan tolerancias específicas que deben considerarse durante la planificación del tratamiento e incluso, pueden requerir evaluaciones experimentales previas o la consideración de métodos alternativos de conservación [22], [23], [24], [25], [26].

En conjunto, estas consideraciones permiten definir ventanas de irradiación que equilibran la eficacia biocida del tratamiento con la preservación de la integridad física, química y estética del objeto patrimonial.

Planificación del tratamiento de irradiación

La planificación del tratamiento constituye una etapa crítica del procedimiento, ya que en ella se integran las consideraciones materiales, biológicas y operativas que determinan las condiciones de irradiación.

Las actividades comienzan con una evaluación técnica del objeto en su institución de origen, donde se realiza un diagnóstico del estado de conservación, la identificación de los agentes de biodeterioro presentes y la caracterización general de los materiales constitutivos del bien cultural.

Durante esta fase también se analizan variables como las dimensiones, la densidad y la configuración volumétrica del objeto. Estos factores influyen directamente en la atenuación de la radiación y en la distribución espacial de la dosis absorbida durante el tratamiento. La determinación de la dosis objetivo se basa en dos criterios fundamentales:

1. la radiosensibilidad de los agentes biológicos que se desea eliminar, y

2. la tolerancia radiológica de los materiales del objeto.

Dado que los rangos de dosis reportados en la literatura pueden variar según el tipo de material, el agente biológico estudiado y las condiciones experimentales de cada estudio, la selección de la dosis se realiza con la integración de la evidencia científica disponible y las condiciones operativas específicas de la Planta de Irradiación Gamma del SGC.

A partir de este análisis, se definen las condiciones de irradiación y los requerimientos de embalaje necesarios para el transporte del objeto hacia la instalación. Dado que la planta opera con una fuente gamma panorámica, como se indicó anteriormente, la planificación no contempla la definición de un tamaño de haz, un rango de apertura o una distancia fija de exposición, que son parámetros propios de sistemas basados en haces dirigidos. En este caso, las condiciones de tratamiento se establecen principalmente mediante la selección de la configuración de la carga y del tiempo de irradiación. Este último se determina a partir de la experiencia previa de la planta con materiales y configuraciones de características similares y, cuando corresponde, mediante la caracterización dosimétrica del objeto a irradiar.

Ejercicios del tratamiento y control del proceso de irradiación

Una vez el material llega a la instalación, se realiza la recepción técnica de la pieza o lote, seguida de la planificación operativa del tratamiento. Antes de la irradiación o configuraciones que no hayan sido caracterizadas anteriormente, se realiza una verificación o un mapeo dosimétrico, que se orientan a caracterizar la distribución de la dosis dentro del volumen de irradiación. Para ello, se ubican dosímetros de PMMA en posiciones representativas de la carga seleccionadas de acuerdo con sus dimensiones, densidad, geometría y con el modo de irradiación empleado. Estos estudios permiten identificar las posiciones de dosis mínima ($D_{mín}$) y máxima ($D_{máx}$) dentro del sistema objeto-embalaje y ajustar la configuración del procedimiento para que todas las regiones del objeto reciban al menos la dosis mínima requerida para el control biológico.

Posteriormente, se realiza la fase operativa de irradiación que incluye la carga segura del material en el irradiador panorámico de ^{60}Co, el monitoreo de los parámetros radiológicos de la instalación y el control del proceso bajo la supervisión del personal autorizado.

Una vez finalizado el tratamiento, se retiran y analizan los dosímetros de control utilizados durante la irradiación. Los valores obtenidos se comparan con la dosis objetivo y con las posiciones $D_{mín}$ y, cuando corresponde $D_{máx}$ determinadas durante la caracterización dosimétrica. De esta manera, se verifica experimentalmente que las posiciones representativas de menor dosis hayan alcanzado la cantidad mínima requerida para el tratamiento y que, en materiales sensibles a la radiación, la dosis máxima se mantenga dentro de los criterios establecidos. Cuando la dosis obtenida no cumple con el criterio de aceptación, se evalúa el ajuste de las condiciones de irradiación, de acuerdo con el procedimiento establecido para el tratamiento.

Finalmente, el bien cultural es devuelto a su institución de origen junto con el reporte técnico correspondiente. En esta etapa se recomienda realizar seguimiento del estado de conservación del objeto, con el fin de evaluar la eficacia del tratamiento y detectar eventuales situaciones de recontaminación biológica.

La definición de las dosis empleadas durante la planificación del tratamiento se fundamenta en los rangos reportados en la literatura científica para diferentes materiales patrimoniales y agentes de biodeterioro. Con el propósito de sintetizar esta información y facilitar su aplicación en la etapa de planificación, la Tabla 1 presenta una recopilación de rangos de dosis utilizados en estudios internacionales para el control biológico en distintos tipos de materiales culturales.

Tabla 1. Rangos recomendados para el control biológico en materiales patrimoniales, según literatura internacional.

Material	Dosis Efectiva	Referencias
Papel Archivos	**2–10 kGy** Desinfección fúngica e insecticida **20–30 kGy** Aplicaciones especiales **>50 kGy** Degradación estructural	[27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36]
Madera	**0.5–2 kGy** Insecticida **4–10 kGy** Desinfección fúngica **25–100 kGy** Aplicaciones especiales	[37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44]
Textiles	**3–10 kGy** Control biológico **10–25 kGy** Cambios mecánicos y cromáticos **21–74 kGy** Aplicaciones especiales	[45], [46], [47], [48], [49]
Cuero Pergamino	**3–10 kGy** Desinfección **Hasta 25 kGy** sin alteraciones significativas; **>70 kGy** Cambios reportados	[50], [51]

Pigmentos Policromía Pinturas	**3–10 kGy** Sin daño cromático **20–25 kGy** Aplicaciones especiales	[52], [53], [54], [55]
Esculturas Objetos mixtos	**3–10 kGy** Control biológico **Hasta 30 kGy** Aplicaciones especiales	[56], [57], [58]
Momias Restos biológicos	**18–25 kGy** para desinfección de hongos e insectos sin daños visibles	[59], [60], [61]
Material fotográfico Películas	**6–10 kGy** Sin daños significativos. Alteraciones reportadas **>25 kGy**	[62], [63]
Otros materiales	**0.5–10 kGy** Sin alteraciones reportadas hasta **200 kGy**	[64], [65], [66]
Cuarzo y piedras preciosas	Cambios de aspecto en cualquier rango de dosis	[67]

Resultados y discusión

El presente estudio integra evidencia reportada en la literatura internacional, recomendaciones metodológicas del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la experiencia técnica acumulada en la Planta de Irradiación Gamma del (SGC), con el fin de estructurar un procedimiento operacional para la aplicación de irradiación gamma de bienes culturales.

La revisión de estudios experimentales y aplicaciones documentadas en programas internacionales de conservación patrimonial muestra que la irradiación gamma constituye una técnica consolidada para el control de microorganismos e insectos en materiales culturales. Su capacidad de penetración, la ausencia de residuos químicos y la capacidad de aplicarse a objetos de geometría compleja han favorecido su implementación en archivos, museos y colecciones patrimoniales.

Desde el punto de vista dosimétrico, la mayoría de los estudios coincide que el control eficaz de microorganismos e insectos presentes en materiales orgánicos puede lograrse mediante dosis relativamente bajas. En la literatura reportan valores típicos entre 2 y 10 kGy, dependiendo del agente biológico y del material tratado. En este contexto, el intervalo 2 - 10 kGy representa una síntesis operativa de los rangos comúnmente utilizados en aplicaciones de conservación patrimonial.

Este intervalo se explica por la elevada radiosensibilidad de muchos de los agentes responsables del biodeterioro. Diversos estudios han demostrado que hongos filamentosos, bacterias y larvas de insectos pueden ser inactivados mediante dosis inferiores a 10 kGy, lo que permite la desinfección del material sin inducir alteraciones significativas en su estructura fisicoquímica. Dosis superiores suelen emplearse principalmente en estudios orientados a evaluar la resistencia de los materiales a la radiación, más que en tratamientos de conservación.

La comparación con protocolos aplicados en instalaciones internacionales permite contextualizar estos resultados. Diversas instalaciones especializadas reportan tratamientos en rangos similares, generalmente entre 2 y 8 kGy para control microbiológico y entre 5 y 10 kGy para desinfestación de insectos en madera y materiales lignocelulósicos. De manera consistente, los proyectos coordinados por el OIEA en el ámbito de la conservación del patrimonio cultural recomiendan intervalos dosimétricos comparables, lo que evidencia una convergencia internacional en torno a estos valores.

En este marco, la selección del intervalo 3–10 kGy adoptado en el presente trabajo responde a tres criterios principales: la eficacia biocida demostrada para una amplia variedad de agentes de biodeterioro, la estabilidad radiológica de la mayoría de los materiales orgánicos patrimoniales dentro de este rango de dosis y la compatibilidad con las condiciones operativas del irradiador panorámico de ^{60}Co del SGC.

Un aspecto particularmente relevante en la aplicación de esta tecnología es el diseño dosimétrico del tratamiento. La distribución espacial de la dosis depende de factores como la geometría del irradiador, la configuración del objeto, su densidad y la posición relativa respecto a las fuentes radiactivas. Por esta razón, la realización de estudios de mapeo dosimétrico constituye una etapa fundamental para identificar las posiciones de dosis mínima y máxima dentro del volumen de irradiación y asegurar que todas las regiones del objeto reciban la dosis mínima requerida para el control biológico.

A partir de este análisis, se propone un marco operativo para la aplicación de irradiación gamma en bienes patrimoniales, basado en la integración de evidencia científica, experiencia operativa y recomendaciones internacionales. Este esquema reúne las principales etapas del procedimiento (desde la evaluación inicial del objeto hasta el seguimiento posterior al tratamiento) y se encuentra adaptado a las capacidades técnicas de la Planta de Irradiación Gamma del Servicio Geológico Colombiano. La Tabla 2 presenta esta propuesta como una secuencia de actividades operacionales

de referencia para la planificación y ejecución de tratamientos de irradiación en bienes culturales.

Tabla 2. Propuesta de procedimiento operacional para la irradiación de bienes patrimoniales en la Planta de Irradiación Gamma.

Procedimiento operacional de Irradiación para la Conservación de Bienes Patrimoniales	
Preparación en Sitio de Origen	
Actividad – Responsable	**Procedimiento**
Evaluación Inicial – Área de conservación patrimonial	• Diagnóstico de conservación y tipo de biodeterioro. • Hoja de vida de la pieza o lote.
Separación y Selección – Área de conservación patrimonial	• Separación de piezas dentro del lote. • Retiro y protección de materiales sensibles contenidos en las piezas.
Embalaje de Piezas – Área de conservación patrimonial	• Elección de empaques, para el transporte y para la manipulación durante el tratamiento. • Etiquetado, identificación de las piezas y de sus empaques.
Preparación para el Transporte – Área de conservación patrimonial	• Control del medio de transporte. • Registros de contenido, ruta y responsables. • Coordinación con el personal de la Planta Gamma para recepción.
Procedimiento en Planta de Irradiación	
Actividad	**Procedimiento**
Recepción – Personal Planta Gamma	• Inspección de la integridad del embalaje y estado de la pieza o lote, con respecto a la información del formato de remisión. • Registro de entrada.
Custodia Temporal – Personal Planta Gamma	• Ubicación en sala de almacenamiento y segregación de objetos no irradiados de los irradiados.
Definición de Dosis y Parámetros de Tratamiento – Área de conservación patrimonial	• Estimación de la dosis mínima requerida y la dosis máxima aplicable para el tratamiento (kGy).
Definición de Dosis y Parámetros de Tratamiento – Personal Planta Gamma	• Planificación del protocolo de irradiación.
Ensayo de irradiación preliminar, (mapeo dosimétrico) – Personal Planta Gamma	• Selección del sistema dosimétrico y verificación de equipos. • Ensayo preliminar y mapeo dosimétrico (10-30% del tiempo estimado de irradiación para alcanzar la dosis mínima). • Obtención de ubicación de puntos de Dosis máxima y mínima $D_{máx}$ y $D_{mín}$, cálculo DUR. • Ajustes al protocolo según DUR. • Registro del protocolo de irradiación. • Definición del tiempo total de tratamiento.
Ejecución del protocolo de irradiación – Personal Planta Gamma	• Ubicación o reubicación de dosímetros. • Carga de Material en el irradiador. • Aplicación del procedimiento de irradiación. • Monitoreo de la operación. • Ejecución de rotaciones según protocolo.
Descarga y control dosimétrico – Personal Planta Gamma	• Lectura y registro de la dosis a partir de los dosímetros ($D_{máx}$ y $D_{mín}$ alcanzadas, DUR). • Análisis de las dosis alcanzadas • Definición de necesidad de reconfiguración final de las dosis
Devolución y reincorporación de la pieza/lote – Personal Planta Gamma	• Registro detallado del tratamiento • Emisión del reporte de irradiación • Verificación del estado de la pieza o lote y firma de aceptación.
Devolución y reincorporación de la pieza/lote – Área de conservación patrimonial	• Acondicionamiento para evitar recontaminación. • Ubicación adecuada durante el transporte.
Almacenamiento y post-tratamientos – Área de conservación patrimonial	• Control y monitoreo ambiental en lugar de almacenamiento y exposición al público. • Eliminación de residuos biológicos y limpieza mecánica. • Verificación del estado físico y funcional. • Evaluación de efectos secundarios. • Análisis secundarios (espectroscopía, resistencia, microbiología, etc.).

Conclusiones

Como resultado de este trabajo, se estructuró un procedimiento operacional que integra las etapas de evaluación del objeto, planificación dosimétrica, ejecución del tratamiento y seguimiento posterior. Este esquema fue adaptado a las condiciones técnicas de la Planta de Irradiación Gamma del Servicio Geológico Colombiano y se fundamenta en prácticas ampliamente documentadas en instalaciones internacionales dedicadas a la conservación patrimonial. La aplicación sistemática de estos procedimientos en el contexto colombiano abre oportunidades para el desarrollo de investigación aplicada en dosimetría y conservación de materiales culturales. La experiencia acumulada permitirá evaluar con mayor precisión la respuesta de distintos materiales patrimoniales frente a la radiación ionizante y ajustar los rangos de dosis reportados en la literatura a las condiciones específicas de tratamiento.

Asimismo, estos resultados evidencian el potencial de la irradiación gamma como herramienta científica para la conservación del patrimonio cultural en Colombia. La consolidación de protocolos técnicos y la generación de datos experimentales en condiciones reales de operación contribuirán a ampliar el conocimiento sobre los efectos de la radiación en materiales patrimoniales y a fortalecer el desarrollo de aplicaciones nucleares con fines culturales en la región.

Referencias

[1] C. Fellers, T. Iversen, T. Lindström, T. Nilsson, y M. Rigdahl, *Ageing/degradation of paper: A literature survey.* Stockholm, Sweden: 1989.

[2] P. Tiano, *Biodegradation of cultural heritage: Decay mechanisms and control methods.* Florence, Italy: 2002.

[3] M. Geba, G. Lisa, C. M. Ursescu, A. Olaru, I. Spiridon, y A. Leon, "Gamma irradiation of proteinbased textiles for historical collections decontamination," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 118, no. 2, pp. 997-1005, 2014.

[4] M. Adamo, G. Magaudda, P. Trionfetti Nisini, y G. Tronelli, "Susceptibility of cellulose to attack by cellulolytic microfungi after gamma irradiation and ageing," *Restaurator*, vol. 24, no. 3, pp. 145-151, 2003.

[5] L. C. Severiano, F. A. R. Lahr, M. A. G. Bardi, y L. D. B. Machado, "Evaluation of the effects of gamma radiation on thermal properties of wood species used in Brazilian artistic and cultural heritage," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 106, no. 3, pp. 783-786, 2011.

[6] R. Despot, M. Hasan, A. O. Rapp, y C. Brischke, "Changes in selected properties of wood caused by gamma radiation," in *Gamma Radiation*, 2012, pp. 281-304.

[7] J. I. Abril, G. A. Vela, M. F. Robles, N. Muñoz, y I. J. Gaitan, "Modernización de la Planta de Irradiación Gamma del Servicio Geológico Colombiano: Estado Actual y proyección a Corto Plazo," in *VIII Congreso Nacional de Ingeniería Física & III International Applied Physics, Engineering, and Innovation Conference*, Popayán, Colombia, 2025.

[8] J. I. Abril, "Introducción a la irradiación gamma de alimentos y desarrollo tecnológico en Colombia," *Rev. Investig. y Apl. Nucl.*, no. 2, pp. 5-14, Dec. 2018.

[9] IAEA, *Radiation safety of gamma, Electron and X ray Irradiation Facilities*, SSG No. 8. Vienna, Austria: IAEA, 2010.

[10] J. F. Morales, M. Z. D. Caow, *Plan Estratégico de Conocimiento Geocientífico y Nuclear 2023-2032* Available: https://www2.sgc.gov.co/Nosotros/Documents/Plan-estrategico-decenal-SGC-2023-2032.pdf

[11] J. I. Abril, F. H. A. Torres, M. A. T. Mejía, A. P. G. Uribe, M. C. Plazas, y V. A. G. Ángel, "Protocolo para el proceso de irradiación gamma de objetos de gran tamaño, caso de estudio: obra 'Tótem', serie 'Mutantes,'" in XI *Congreso Internacional de Materiales*, Santa Marta, Colombia, 2022, p. 21.

[12] G. Parrado, J. Garavito, M. P., y J. Abril, "Las Tecnologías Nucleares aplicadas a la caracterización, conocimiento, valoración y conservación del Patrimonio Geológico / Paleontológico y Cultural en Colombia," in X *Congreso Internacional de Materiales*, Bucaramanga, Santander, Colombia, 2019.

[13] IAEA, *Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation*. Vienna, Austria: IAEA, 2017, 264 p.

[14] IAEA, *Best Practices in Disinfection of Cultural Heritage Artefacts and Archives Using Ionizing Radiation*, Radiation Technology Series No. 6. Vienna, Austria: IAEA, 2025.

[15] L. C. Severiano, F. A. R. Lahr, M. A. G. Bardi, A. C. Santos, y L. D. B. Machado, "Influence of gamma radiation on properties of common Brazilian wood species used in artwork," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 52, pp. 730-734, 2010.

[16] I. V. Moise, I. Stanculescu, y V. Meltzer, "Thermogravimetric and calorimetric study of cellulose paper at low doses of gamma irradiation," J. *Therm. Anal. Calorim.*, vol. 115, pp. 1417-1425, 2014.

[17] H. A. Rutherford, *Radiation Effects on Organic Materials*. London, U.K.: 1963.

[18] D. C. Negut, C. C. Ponta, R. M. Georgescu, I. V. Moise, G. Niculescu, y A. I. M. Lupu, "Effects of gamma irradiation on the colour of pigments," in Proc. SPIE 6618, O3A: *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology*, Munich, Germany, 2007.

[19] S. M'Garrech y F. Ncib, "Colorimetric study of effect of gamma-radiation on the color of cotton fabric colored by 'henna' dye," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 67, pp. 2003-2006, 2009.

[20] M. E. F. Abdel-Halim, M. F. Ali, M. F. Ghaly, y A. A. Sakr, "Efficiency of antibiotics and gamma irradiation in eliminating Streptomyces strains isolated from paintings of ancient Egyptian tombs," *J. Cult. Heritage*, vol. 14, no. 1, pp. 45-50, 2013.

[21] C. Enokihara, P. R. T. Rela, y R. A. S. Guttler, "Gamma irradiation of quartz from Pannier basin, South

America," in INAC 2007 *International Nuclear Atlantic Conference: Nuclear Energy and Energetic Challenges for 21st Century*, Santos, Brazil, 2007.

[22] A. Nather, N. Yusof, y N. Hilmy, *Allograft Procurement, Processing and Transplantation: A Comprehensive Guide for Tissue Banks*. Singapore: World Scientific Publishing, 2010.

[23] NB. Service, *Guidelines for the Blood Transfusion Services in the United Kingdom*. London, U.K.: The Stationery Office, 2013.

[24] L. Balout, C. Roubet, y C. Desroches-Noblecourt, *La momie de Ramsès II: contribution scientifique à l'égyptologie*. France: 1985.

[25] J. Havermans y S. Abdul Aziz, *Gezondere verwerking en duurzamere opslag van archivalia middels Gamma-doorstraling* — Fase-2, 2009.

[26] A. Mitran, C. C. Ponta, y A. Danis, "Traitement antimicrobien des films cinematographiques au moyen du rayonnement gamma," in *La conservation à l'ère du numérique (4es journées internationales d'études de l'ARSAG)*, Paris, France, 2002, pp. 235-248.

[27] H. Horakova y F. Martinek, "Disinfection of archive documents by ionizing radiation," *Restaurator*, vol. 6, pp. 205-216, 1984.

[28] F. J. Butterfield, "The potential long-term effects of gamma irradiation on paper," *Studies Conserv.*, vol. 32, pp. 181-191, 1987.

[29] J. Wellheiser, *Nonchemical Treatment Processes for Disinfestation of Insects and Fungi in Library Collections*. Munich: K. G. Saur Press, 1992.

[30] S. C. Pavon Flores, "Gamma radiation as fungicide and its effects on paper," Bull. Am. *Inst. Conserv. Hist. Artistic Works*, vol. 16, pp. 15-44, 1976, doi: 10.1179/019713676806029384.

[31] Adamo M, Magaudda G, y A. Tata, "Radiation technology for cultutal heritage restoration," Restaurator 253 (2004), pp. 159-170. https://doi.org/10.1515/REST.2004.159

[32] J. B. G. A. Havermans, "The effects of 8 ± 2 kGy gamma disinfection treatment on mould infected paper materials in the Netherlands," in *Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation*, IAEA Radiation Technology Series No. 6, Vienna, Austria, 2017, pp. 121-129.

[33] I. V. Moise, I. Stanculescu, y V. Meltzer, "Thermogravimetric and calorimetric study of cellulose paper at low doses of gamma irradiation," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 115, pp. 1417-1425, 2014.

[34] S. Baccaro, A. Cemmi, y I. Di Sarcina, "Gamma irradiation Calliope facility at ENEA — Casaccia Research Centre (Rome, Italy)," ENEA, Rome, Italy, Tech. Rep. RT/2019/4/ENEA, 2019.

[35] G. Magaudda, M. Adamo, y F. Rocchetti, "Damage caused by destructive insects to cellulose previously subjected to gamma-ray irradiation and artificial ageing," *Restaurator*, vol. 22, pp. 242-250, 2001

[36] E. Bratu, I. V. Moise, M. Cutrubinis, D. C. Negut, y M. Virgolici, "Archives decontamination by gamma irradiation," *Nukleonika*, vol. 54, no. 2, pp. 77-84, 2009.

[37] S. Pointing, E. B. G. Jones, y A. M. Jones, "Decay prevention in waterlogged archaeological wood using gamma irradiation," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 42, pp. 17-24, 1998.

[38] K. Csupor, F. Divos, y E. Gonczol, "Radiation induced effects on wood materials and fungi," in *Proc. 12th Intl. Symp. Nondestructive Testing of Wood, Sopron*, Hungary, 2000.

[39] A. Unger, A. P. Schiewind, y W. Unger, *Conservation of Wood Artefacts: A Handbook, Berkeley, CA*; Berlin, Germany, 2001, pp. 346-348, 497-498, doi: 10.1007/978-3-662-06398-9.

[40] S. Curling y J. E. Winandy, "Comparison of the effects of gamma irradiation and steam sterilization on southern pine sapwood," *Forest Prod. J.*, vol. 58, no. 1/2, pp. 87-90, 2008.

[41] R. Despot, M. Hasan, A. O. Rapp, C. Brischke, M. Humar, C. R. Welzbacher, y D. Ražem, "Changes in selected properties of wood caused by gamma radiation," in *Gamma Radiation*, F. Adrović, Ed. Rijeka, Croatia: InTech, 2012, pp. 281-304.

[42] L. C. Severiano, F. A. R. Lahr, M. A. G. Bardi, y L. D. B. Machado, "Evaluation of the effects of gamma radiation on thermal properties of wood species used in Brazilian artistic and cultural heritage," *J. Therm. Anal. Cal.*, vol. 106, no. 3, pp. 783-786, 2011.

[43] D. Ražem y B. Katušin-Ražem, "Irradiation method for the protection of Croatian cultural heritage objects,"

presented at the Lecture Sem. *Irradiation Methods in the Protection of Cultural Heritage*, Zagreb, Croatia, 2011.

[44] C. C. Ponta, J. B. G. A. Havermans, y J. L. Boutain, "Disinfection of cultural artefacts using irradiation," in *Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation*, IAEA Radiation Technology Series No. 6, Vienna, Austria, 2017, pp. 93-103.

[45] M. Horio, K. Ogami, T. Kondo, y K. Sekimoto, "Effect of gamma irradiation upon wool fibers," *Bull. Inst. Chem.* Res., vol. 41, pp. 1-9, 1963.

[46] K. Millington, "Comparison of the effects of gamma and ultraviolet radiation on wool keratin," *Color. Technol.*, vol. 116, pp. 266-272, 2000.

[47] M. H. V. D. Sluijs y J. S. Church, "The effect of quarantine-level gamma irradiation on cotton fiber and its subsequent textile processing performance," *Text. Res. J.*, vol. 83, pp. 197-207, 2013.

[48] S. M'Garrech y F. Ncib, "Colorimetric study of effect of gamma-radiation on the color of cotton fabric colored by 'henna' dye," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 67, pp. 2003-2006, 2009.

[49] I. Vujcic, S. Masic, M. Medic, B. Milicevic, y M. Dramicanin, "The influence of gamma irradiation on the color change of wool, linen, silk, and cotton fabrics used in cultural heritage artefacts," *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 156, pp. 307-313, 2019.

[50] I. Nunes, I. Jenevin, N. S. Caetano, y L. M. Ferreira, "Bioburden assessment and gamma radiation inactivation patterns in parchment documents," *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 88, pp. 82-89, 2013.

[51] I. Stanculescu, V. Moise, L. Cortella, y T. Quoc-Khôi, "Decontamination of textile, leather and parchment artefacts by gamma irradiation," in *Proc. 3rd Int. Seminar and Workshop on Emerging Technology and Innovation for Cultural Heritage*, Sibiu, Romania, 2014, pp. 52-55.

[52] M. M. Rizzo, L. Silveira, y S. I. Borrely, "Effects of gamma rays on a restored painting from the XVIIth century," *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 63, pp. 259-262, 2002.

[53] C.-D. Negut, V. Bercu, y O.-G. Duliu, "Defects induced by gamma irradiation in historical pigments," *J. Cult. Heritage*, vol. 13, pp. 397-403, 2012.

[54] M. E. F. Abdel-Halim, M. F. Ali, M. F. Ghaly, y A. A. Sakr, "Efficiency of antibiotics and gamma irradiation in eliminating Streptomyces strains from paintings of ancient Egyptian tombs," *J. Cult. Heritage*, vol. 14, pp. 45-50, 2013.

[55] M. M. Manea, C. D. Negut, I. R. Stanculescu, y C. C. Ponta, "Irradiation effects on canvas oil painting: Spectroscopic observations," *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 81, pp. 1595-1599, 2012.

[56] F. Bouquet, F. Lelong, S. Marin, P. Martinetto, y A. Pinto, "Pietà – Dans l'atelier des sculpteurs savoyards à la fin du Moyen Âge," in *Artistes et artisans dans les Etats de Savoie au Moyen Âge, De l'or au bout des doigts*, Milan, Italy: Silvana, 2020, pp. 146-183.

[57] F. Barbet, S. Champdavoine, y F. Lelong, "Rapport de restauration, Intervention de conservation-restauration Statue équestre de saint Maurice, Vicq (Allier), Lauréat du Concours AMF-CEA 2015," ARC-Nucléart, Rep. No. 2020-111, 2020.

[58] H. Gaboriau, "Rapport de restauration, Etude et constat d'état d'une statue équestre de saint Maurice, Vicq (Allier), Lauréat du Concours CEA-AMF 2015," ARC-Nucléart, Rep. No. 2018-126, 2018.

[59] C. de Tassigny y M. Brouqui, "Adaptation à la désinfection de la momie de Ramses II du procédé de radio-stérilisation gamma," in *ICOM Committee for Conservation 5th Triennial Mtg, Preprints*, Zagreb, Croatia, 1978.

[60] L. Cortella, "Disinfection of the mummy of Ramses II (France 1977)," in *Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation*, IAEA Radiation Technology Series No. 6, Vienna, Austria, 2017, pp. 117-119.

[61] J. P. H. Hansen y H. C. Gullov, "Mummified Greenland Eskimos — the mummies from Qilakitsoq: Eskimos in the 15th century," *Meddelelser om Gronland: Man and Society, vol. 12, Polar Rec.*, vol. 27, p. 143, 1991.

[62] J. B. G. A. Havermans, "Post Ageing effect van bestraalde fotografische materialen," TNO Building Materials, Section on Conservation Science, Delft, Netherlands, Gamma Desinfectierapport 3, 2011.

[63] A. Mitran, C. C. Ponta, y A. Danis, "Traitement antimicrobien des films cinématographiques au moyen du rayonnement gamma," in *La conservation à l'ère du numérique, Actes des quatrièmes journées*

internationales d'études de l'ARSAG, Paris, France: Groupe Lienhart Press, 2002, pp. 235-248.

[64] A. C. Delgado Vieira, Y. Kodama, L. Otubo, P. S. Santos, y P. A. Vásquez Salvador, "Effect of ionizing radiation on the color of featherwork," *Braz. J. Radiat. Sci.*, vol. 9, no. 1A, 2021, doi: 10.15392/bjrs.v9i1A.1367.

[65] D. Lichtblau, "SurveNIR: A non-destructive evaluation of material conditions in conservation, actual and potential use," in *New Approaches to Book and Paper Conservation-Restoration*, P. Engel et al., Eds. Vienna, Austria: Verlag Berger Horn, 2011, pp. 603-616.

[66] P. Querner, "Insect pests and integrated pest management in museums, libraries and historic buildings," *Insects*, vol. 6, no. 2, pp. 595-607, 2015, doi: 10.3390/insects602059.

[67] E. H. M. Nunes y F. S. Lameiras, "The optical absorption of gamma irradiated and heat-treated natural quartz," *Mater. Res.*, vol. 8, pp. 305-308, 2005.