

Herramienta económica para evaluar alineación y colimación del haz de rayos X

Low-cost tool for evaluating X-ray beam alignment and collimation

David Vedia Pacheco ^a ✉; Shirley Natali Plaza Murillo ^b; Adelaida Cardozo Miranda ^c;
Yamil Ali Cruz ^d

^a Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca. Sucre, Bolivia
vedia.david@usfx.com.bo
<https://orcid.org/0009-0004-4838-8056>

^b Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca. Sucre, Bolivia
plaza.shirley@usfx.bo
<https://orcid.org/0009-0007-7244-2878>

^c Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca. Sucre, Bolivia
cmadelaida@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-7888-3407>

^d Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca. Sucre, Bolivia
yac69.13@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-3350-6261>



Resumen

Introducción: El control de calidad de los equipos de radiodiagnóstico requiere comprobar periódicamente la congruencia entre el campo luminoso y el campo de radiación, así como la perpendicularidad del rayo central. Sin embargo, los instrumentos comerciales pueden resultar poco accesibles para establecimientos con recursos limitados. **Objetivo:** Desarrollar y evaluar una herramienta económica para el control de la alineación y colimación del haz de rayos X. **Materiales y métodos:** Se realizó un estudio de desarrollo tecnológico con validación experimental y enfoque cuantitativo en tres equipos de radiografía computarizada, identificados como CR1, CR2 y CR3. Se fabricaron una placa de acrílico para evaluar la congruencia del campo y un dispositivo cilíndrico para verificar la perpendicularidad del rayo central. Los resultados fueron comparados con una herramienta comercial de referencia mediante análisis descriptivo. **Resultados:** Las desviaciones de colimación obtenidas con el prototipo oscilaron entre 1,0 y 1,5 cm, todas inferiores al límite de aceptación de 2 cm. La desviación promedio fue de 1,30 cm con el prototipo y 1,13 cm con la herramienta comercial, con una diferencia media absoluta de 0,17 cm. La alineación fue inferior a 1,5° en los tres equipos. El costo total de fabricación fue de USD 23. **Conclusiones:** El prototipo mostró viabilidad técnica y económica preliminar para apoyar controles básicos de constancia, aunque requiere validaciones adicionales antes de su utilización rutinaria.

Palabras clave: Control de calidad; Colimación; Fantoma; Radiografía computarizada; Radioprotección

Abstract

Introduction: Quality control of radiodiagnostic equipment requires periodically checking the congruence between the light field and the radiation field, as well as the perpendicularity of the central ray. However, commercial instruments may be difficult to access for facilities with limited resources. **Objective:** To develop and evaluate a low-cost tool for controlling X-ray beam alignment and collimation. **Materials and methods:** A technological development study with experimental validation and a quantitative approach was conducted on three computed radiography units, identified as CR1, CR2, and CR3. An acrylic plate was manufactured to assess field congruence, and a cylindrical device was built to verify central ray perpendicularity. The results were compared with a commercial

Cómo citar:

Vedia Pacheco D, Plaza Murillo SN, Cardozo Miranda A, Cruz YA. Herramienta económica para evaluar alineación y colimación del haz de rayos X. Vive Revista de Investigación en Salud. 2026;9(27).
<https://doi.org/10.33996/revistavive.v9i27.519>

Research Article
Peer-reviewed
Open Access



reference tool using descriptive analysis. **Results:** The collimation deviations obtained with the prototype ranged between 1.0 and 1.5 cm, all below the 2 cm acceptance limit. The average deviation was 1.30 cm with the prototype and 1.13 cm with the commercial tool, with a mean absolute difference of 0.17 cm. Alignment was below 1.5° in all three units. The total manufacturing cost was USD 23. **Conclusions:** The prototype demonstrated preliminary technical and economic feasibility to support basic constancy checks, although additional validations are required before routine use.

Keywords: Collimation; Computed radiography; Quality control; Radiation protection; Phantom

Introducción

El control de calidad constituye un componente esencial en los servicios de radiodiagnóstico, debido a que permite verificar el desempeño de los equipos, identificar desviaciones técnicas y mantener condiciones adecuadas para la obtención de imágenes clínicamente útiles. Entre las pruebas básicas aplicadas a los equipos de radiografía se encuentran la evaluación de la congruencia entre el campo luminoso y el campo de radiación, así como la comprobación de la perpendicularidad del haz central respecto al receptor de imagen. La ejecución periódica de estas pruebas contribuye a prevenir errores geométricos, repeticiones de estudios y exposiciones innecesarias a radiaciones ionizantes ^(1,2).

La protección radiológica del paciente requiere que cada procedimiento se realice con una exposición suficiente para alcanzar el objetivo diagnóstico, pero sin administrar una cantidad de radiación superior a la necesaria. Para ello, resulta indispensable integrar el control técnico de los equipos con el seguimiento de los parámetros de exposición y la evaluación de la calidad de la imagen. La estabilidad del generador, la geometría del haz, la respuesta del receptor y la correcta delimitación del campo forman parte de los elementos que influyen en la optimización de la práctica radiográfica ^(3,4).

Los niveles de referencia diagnósticos constituyen herramientas de apoyo para reconocer prácticas que pueden requerir revisión, aunque no sustituyen las pruebas físicas destinadas a comprobar el funcionamiento del equipo. En radiografía, la vigilancia continua debe considerar tanto la exposición administrada como la precisión geométrica del sistema. Una alteración en la colimación puede irradiar tejidos que no forman parte del área de interés, mientras que una desviación del rayo central puede provocar distorsión, recorte de estructuras anatómicas o necesidad de repetir la adquisición. Por esta razón, los programas de control de calidad deben incluir pruebas de aceptación, estado y constancia realizadas con criterios reproducibles ^(5,6).

La transición de los sistemas convencionales hacia la radiografía computarizada y digital ha ampliado la capacidad de procesamiento y visualización de las imágenes. Sin embargo, la amplia latitud de exposición de estos sistemas puede compensar visualmente ciertas

variaciones técnicas, de modo que una imagen aparentemente aceptable no siempre representa una exposición optimizada. Los indicadores de exposición y los índices de desviación permiten valorar la radiación recibida por el receptor, pero su interpretación debe complementarse con la revisión de la colimación, el centrado, el posicionamiento y las condiciones geométricas utilizadas durante el procedimiento ^(7,8).

El análisis de imágenes rechazadas también se ha incorporado como un indicador de desempeño en los programas de garantía de calidad. La repetición de una radiografía puede relacionarse con errores de posicionamiento, selección inadecuada de parámetros, movimiento, recorte anatómico o deficiencias en la colimación. Por ello, la estandarización de los registros y la evaluación periódica de las causas de rechazo permiten identificar oportunidades de mejora. Un programa integral debe combinar el análisis de la práctica clínica con comprobaciones físicas del equipo y procedimientos claramente definidos para actuar cuando los resultados se encuentren fuera de tolerancia ^(9,10).

Para realizar estas comprobaciones se emplean objetos de prueba o fantasmas que permiten evaluar la respuesta del sistema bajo condiciones controladas. Los estudios desarrollados con fantasmas comerciales y dispositivos fabricados localmente han demostrado que la configuración del objeto, el procesamiento de la imagen y los parámetros de exposición pueden influir en los resultados obtenidos. Asimismo, las evaluaciones automatizadas pueden disminuir la variabilidad de la interpretación visual, aunque requieren imágenes reproducibles, marcadores claramente identificables y protocolos estandarizados de adquisición ^(11,12).

Los avances recientes han favorecido la creación de procedimientos automatizados y remotos para el control de calidad de imágenes radiográficas. Estas propuestas permiten procesar un mayor número de evaluaciones, identificar variaciones de manera sistemática y ampliar la supervisión de equipos ubicados en distintos establecimientos. No obstante, su aplicación depende de infraestructura informática, conectividad, programas especializados y personal capacitado. En instituciones con recursos limitados, estas condiciones pueden no estar disponibles, por lo que continúan siendo necesarias herramientas físicas sencillas que faciliten la ejecución local de pruebas básicas ^(13,14).

La fabricación de fantasmas propios representa una alternativa para disminuir la dependencia de instrumentos comerciales y adaptar las pruebas a las necesidades de cada servicio. Los dispositivos elaborados mediante materiales disponibles localmente pueden alcanzar una geometría adecuada cuando se controlan sus dimensiones, estabilidad y visibilidad radiográfica. También se han desarrollado fantasmas geométricos multifuncionales capaces de integrar diferentes marcadores en una sola estructura, lo que facilita la evaluación de parámetros como el tamaño del campo, el centrado y la alineación del haz ^(15,16).

De manera complementaria, la impresión tridimensional y otras técnicas de fabricación digital han permitido producir ayudas para el control de calidad con diseños reproducibles y costos inferiores a los de algunos instrumentos especializados. Estas tecnologías facilitan la

adaptación de formas, escalas y marcadores a los requerimientos del equipo evaluado. Sin embargo, la utilidad de un dispositivo económico no puede determinarse únicamente por su costo o facilidad de construcción; es necesario compararlo con un instrumento de referencia, registrar sus diferencias y comprobar que permita identificar resultados dentro y fuera de los límites técnicos establecidos. La evolución de la física médica hacia modelos más orientados a la calidad y a la solución de problemas clínicos también respalda el desarrollo de recursos institucionales que respondan a necesidades concretas de los servicios de imagen ^(17,18).

A pesar de estos avances, los instrumentos comerciales destinados a evaluar la congruencia del campo y la perpendicularidad del rayo central pueden resultar poco accesibles para establecimientos con presupuestos restringidos. Esta limitación puede reducir la frecuencia de los controles o generar dependencia de evaluaciones externas. Frente a esta situación, la combinación de acrílico, materiales reutilizados, marcadores radiopacos y corte láser representa una alternativa para construir una herramienta de fácil interpretación y posible reproducción local. No obstante, su desempeño debe contrastarse con un dispositivo comercial bajo condiciones controladas antes de recomendar su incorporación a las pruebas rutinarias de constancia ^(1,15).

En este contexto, el objetivo del estudio fue desarrollar y evaluar una herramienta económica para el control de la alineación y colimación del haz de rayos X, mediante la comparación de sus mediciones con las obtenidas por un instrumento comercial de referencia en tres equipos de radiografía computarizada. Además, se determinó el costo de fabricación y la posibilidad de replicar el diseño mediante materiales disponibles en el entorno local.

Materiales y métodos

Se realizó un estudio de desarrollo tecnológico con validación experimental y enfoque cuantitativo, orientado al diseño, fabricación y evaluación de una herramienta económica para el control de la alineación y colimación del haz de rayos X. La fase experimental se efectuó durante 2025 en tres equipos de radiografía computarizada en funcionamiento, identificados como CR1, CR2 y CR3. Los equipos fueron seleccionados mediante muestreo no probabilístico intencional, considerando su disponibilidad operativa y la posibilidad de ejecutar las pruebas bajo condiciones geométricas controladas.

Las variables principales fueron la congruencia entre el campo luminoso y el campo de radiación, expresada mediante la desviación de los bordes del campo, y la perpendicularidad del rayo central respecto al plano del receptor de imagen. Como variables secundarias se evaluaron el costo de fabricación, la disponibilidad de los materiales y la posibilidad de replicar el diseño en establecimientos con recursos económicos limitados. Los resultados obtenidos con el prototipo se compararon con los registrados mediante una herramienta comercial utilizada como referencia técnica.

El dispositivo se estructuró en dos componentes. El primero correspondió a una placa para evaluar la congruencia entre el campo luminoso y el campo de radiación. Se utilizó una lámina de polimetilmetacrilato de 3 mm de espesor y dimensiones de 20 × 25 cm. Sobre su superficie se incorporó un rectángulo de referencia de 14 × 18 cm, un punto central, dos círculos concéntricos de ocho y 16 mm de diámetro, reglas graduadas de 10 y 12 cm y un marcador de orientación de 3 × 3 mm. Estos elementos permitieron identificar el centro del campo y medir las desviaciones producidas en los ejes longitudinal y transversal.

El segundo componente se destinó a evaluar la perpendicularidad del rayo central. Se construyó mediante una estructura cilíndrica transparente de 15 cm de altura, obtenida a partir de materiales reutilizados. En sus extremos se colocaron superficies planas con marcadores radiopacos alineados sobre un mismo eje. La superposición de ambos marcadores en la imagen indicó la adecuada perpendicularidad del haz, mientras que su separación permitió identificar una posible inclinación del tubo o una alteración en la nivelación del sistema.

El diseño de las escalas y figuras se realizó mediante software de dibujo vectorial. Posteriormente, las piezas fueron cortadas y grabadas con un equipo láser XTOOL S1 de 20 W, procurando conservar las dimensiones establecidas y favorecer la replicabilidad del prototipo. Las cavidades grabadas fueron acondicionadas con un material radiopaco de contraste, manipulado de acuerdo con las medidas institucionales de seguridad, para asegurar su visualización en las imágenes radiográficas. La fabricación se fundamentó en los criterios geométricos y de aceptación establecidos para las pruebas de constancia en equipos de radiodiagnóstico ^(1,6).

Para la evaluación de la colimación se utilizó un receptor de imagen de 24 × 30 cm, colocado sobre la mesa de exploración. La herramienta se situó en el centro del receptor y se estableció una distancia foco-receptor de 100 cm, verificada antes de cada exposición. El campo luminoso se ajustó al rectángulo de 14 × 18 cm marcado en la placa. Se realizaron dos exposiciones: la primera con el campo delimitado al área de referencia y la segunda con los colimadores abiertos para visualizar los límites completos del receptor y facilitar la identificación de los bordes del campo de radiación.

Para la herramienta comercial se emplearon parámetros de 60 kVp y 8 mAs. En el prototipo económico se utilizaron 50 kVp y 8 mAs, debido a que este ajuste permitió visualizar los marcadores radiopacos sin producir saturación en el sistema de radiografía computarizada. Las imágenes obtenidas se procesaron mediante el procedimiento habitual del servicio y posteriormente se analizaron en el monitor diagnóstico.

La desviación de la colimación se determinó midiendo la distancia, en centímetros, entre los bordes del campo luminoso señalado por la herramienta y los límites observados del campo de radiación. El resultado se comparó con el criterio de aceptación internacional, según el cual la suma de las desviaciones de los bordes opuestos no debe superar el 2 % de la distancia foco-receptor. Para una distancia de 100 cm, el límite máximo aceptado fue de 2 cm ^(1,3).

La prueba de perpendicularidad se realizó colocando el dispositivo cilíndrico sobre el centro del receptor de imagen. El rayo central se dirigió al punto de referencia y se verificó la superposición de los marcadores radiopacos. La alineación se clasificó como aceptable cuando la desviación angular fue inferior a $1,5^\circ$. El mismo procedimiento se aplicó en los equipos CR1, CR2 y CR3 utilizando tanto el instrumento comercial como el prototipo económico.

Los datos fueron organizados en una matriz comparativa en la que se registraron el equipo evaluado, el instrumento utilizado, la desviación de colimación, la alineación del rayo central y el cumplimiento de los límites técnicos. Se realizó un análisis descriptivo mediante valores absolutos y comparación directa entre ambos instrumentos. Debido al número reducido de equipos y al carácter preliminar del estudio tecnológico, no se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales ni se estableció equivalencia estadística entre los dispositivos.

El análisis económico se efectuó mediante el registro de los costos de los materiales, el diseño, el corte y grabado láser y los elementos utilizados en ambos componentes. Los valores se expresaron en bolivianos y dólares estadounidenses, tomando como referencia los precios locales correspondientes al periodo de fabricación. La replicabilidad se valoró de acuerdo con la disponibilidad de los materiales, la simplicidad del proceso de ensamblaje y la posibilidad de reproducir las dimensiones mediante fabricación digital.

No participaron pacientes ni se utilizaron datos clínicos o imágenes identificables. Las exposiciones se realizaron exclusivamente sobre los dispositivos y receptores de imagen, sin irradiación de personas. Durante las pruebas se respetaron las normas institucionales de protección radiológica y los principios de optimización aplicables al uso de radiaciones ionizantes. Por la naturaleza tecnológico-experimental del estudio, que no involucró participantes humanos ni datos clínicos identificables, no se requirió certificación de un comité de ética institucional.

Resultados

La evaluación comparativa se realizó en tres equipos de radiografía computarizada, identificados como CR1, CR2 y CR3. En todos los casos, tanto la herramienta comercial como el prototipo económico permitieron visualizar los límites del campo de radiación y comprobar la alineación del rayo central. Las marcas radiopacas incorporadas en la placa de acrílico presentaron un contraste suficiente para identificar los bordes del campo y efectuar las mediciones en el sistema digital.

Los valores de desviación de la colimación obtenidos con ambos instrumentos permanecieron por debajo del límite de aceptación de 2 cm, correspondiente al 2 % de la distancia foco-receptor de 100 cm. En el equipo CR1, ambos instrumentos registraron una desviación de 1,0 cm. En el equipo CR2, la herramienta comercial indicó 0,9 cm y el prototipo

económico 1,4 cm, con una diferencia absoluta de 0,5 cm. En el equipo CR3, ambos dispositivos registraron una desviación de 1,5 cm.

La desviación promedio fue de 1,13 cm con la herramienta comercial y de 1,30 cm con el prototipo económico. La diferencia media absoluta entre ambos instrumentos fue de 0,17 cm. Aunque se identificó una variación mayor en el equipo CR2, los valores obtenidos con los dos dispositivos se mantuvieron dentro del margen técnico establecido (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de las mediciones obtenidas con la herramienta comercial y el prototipo económico

Equipo	Herramienta	Desviación de colimación	Cumplimiento del límite de colimación	Alineación del rayo central	Cumplimiento
CR1	Comercial	1,0 cm	Cumple	< 1,5°	Cumple
CR1	Económica	1,0 cm	Cumple	< 1,5°	Cumple
CR2	Comercial	0,9 cm	Cumple	< 1,5°	Cumple
CR2	Económica	1,4 cm	Cumple	< 1,5°	Cumple
CR3	Comercial	1,5 cm	Cumple	< 1,5°	Cumple
CR3	Económica	1,5 cm	Cumple	< 1,5°	Cumple

Nota: CR: radiografía computarizada. El límite de aceptación para la colimación fue de 2 cm, equivalente al 2 % de una distancia foco-receptor de 100 cm. Elaboración propia.

En la prueba de perpendicularidad, los marcadores radiopacos del dispositivo cilíndrico se mantuvieron dentro del límite angular establecido en las tres unidades evaluadas. Tanto la herramienta comercial como el prototipo mostraron una desviación inferior a 1,5°, por lo que los equipos CR1, CR2 y CR3 fueron clasificados como conformes. La disposición concéntrica de los marcadores permitió reconocer visualmente la alineación sin recurrir a procedimientos matemáticos adicionales.

Las imágenes obtenidas con el prototipo mostraron una adecuada definición de las reglas graduadas, los círculos centrales y los límites del rectángulo de referencia. No se observaron deformaciones del material, desprendimiento de la mezcla radiopaca ni artefactos que impidieran la lectura de las mediciones durante las pruebas. Estos resultados evidenciaron que los materiales empleados proporcionaron la estabilidad y visibilidad necesarias para la evaluación preliminar de los parámetros geométricos.

El análisis económico determinó que la fabricación de los dos componentes requirió una inversión total de USD 23, equivalente a 144 bolivianos. La herramienta destinada a evaluar la congruencia entre el campo luminoso y el campo de radiación tuvo un costo de USD 14,50, mientras que el dispositivo para comprobar la perpendicularidad del rayo central representó USD 8,50 (Tabla 2).

Tabla 2. Costos de fabricación de las herramientas económicas

Componente	Descripción	Costo (Bs.)	Costo (USD)
Herramienta de congruencia	Acrílico, diseño, corte y grabado láser	75	11,00
Herramienta de congruencia	Pintura, material radiopaco, pinceles y diluyentes	24	3,50
Subtotal herramienta de congruencia		99	14,50
Herramienta de perpendicularidad	Estructura cilíndrica y marcadores	30	4,30
Herramienta de perpendicularidad	Pegamento, nivel y alambre	15	4,20
Subtotal herramienta de perpendicularidad		45	8,50
Costo total	Fabricación de ambos prototipos	144	23,00

Nota: Bs.: bolivianos; USD: dólares estadounidenses. Los valores corresponden a los precios locales registrados durante la fabricación. Elaboración propia.

La utilización de acrílico, recipientes plásticos reutilizados y materiales disponibles localmente permitió construir ambos componentes sin depender de piezas importadas. El diseño digital conservó las dimensiones establecidas y facilitó su reproducción mediante corte láser. En conjunto, el prototipo económico produjo mediciones dentro de los límites de aceptación en las tres unidades evaluadas y presentó resultados próximos a los obtenidos mediante la herramienta comercial, con un costo de fabricación reducido.

Discusión

La herramienta económica permitió evaluar la colimación y la perpendicularidad del haz central en los tres equipos de radiografía computarizada. Los valores obtenidos permanecieron dentro de los límites técnicos de aceptación y fueron próximos a los registrados con el instrumento comercial. La desviación media de colimación fue de 1,13 cm con la herramienta de referencia y de 1,30 cm con el prototipo, mientras que la diferencia media absoluta entre ambos dispositivos fue de 0,17 cm. Estos resultados respaldan la viabilidad preliminar de la herramienta para controles de constancia, aunque el diseño y el número de mediciones no permiten afirmar equivalencia estadística entre los instrumentos.

La coincidencia de los resultados en los equipos CR1 y CR3 demuestra que el diseño geométrico, las escalas grabadas y los marcadores radiopacos permitieron identificar los límites del campo de radiación. En CR2 se registró una diferencia de 0,5 cm entre la herramienta comercial y el prototipo económico; sin embargo, ambos valores permanecieron por debajo del límite de 2 cm establecido para una distancia foco-receptor de 100 cm. Esta variación podría relacionarse con pequeñas diferencias en el posicionamiento, la identificación visual de los bordes o el procesamiento de la imagen. Por

otro lado, el diseño y la calibración de los fantasmas influyen directamente en la confiabilidad de las mediciones radiográficas, por lo que la geometría y el protocolo de adquisición deben mantenerse estables durante las comparaciones ⁽¹⁹⁾.

Los resultados geométricos deben interpretarse como parte de un programa integral de garantía de calidad. En este sentido, se destacó la utilidad de establecer límites superiores e inferiores para el índice de exposición, debido a que permiten reconocer adquisiciones que se alejan de los valores esperados en radiografía digital ⁽²⁰⁾. De manera similar, otros autores comprobaron que la vigilancia del índice de desviación puede apoyar la optimización de los parámetros predeterminados de exposición ⁽²¹⁾. Aunque el prototipo desarrollado no mide directamente estos indicadores, su aplicación complementa el control de la exposición al verificar que el campo irradiado coincida con el área seleccionada y que el haz central mantenga una alineación adecuada.

La importancia de controlar la geometría del haz también se relaciona con la prevención de repeticiones radiográficas. Al respecto, en otros estudios se identificaron diferencias en las tasas y causas de rechazo entre dos departamentos de radiología, lo que evidencia que el desempeño puede variar según los procedimientos y condiciones de cada servicio ⁽²²⁾. A su vez, se observaron igualmente variaciones entre centros y tipos de salas, y se propusieron referencias locales para facilitar el seguimiento de las imágenes rechazadas ⁽²³⁾. Una colimación inadecuada o el recorte de estructuras anatómicas puede contribuir a la repetición del estudio; por ello, la disponibilidad de una herramienta sencilla para detectar desviaciones geométricas podría apoyar las acciones preventivas del servicio, aunque esta relación no fue evaluada directamente en la presente investigación.

Otros hallazgos denotan que los errores de posicionamiento y el recorte anatómico se encontraban entre las causas más frecuentes de rechazo en un departamento de radiografía digital, resaltando la necesidad de auditorías periódicas y retroalimentación al personal ⁽²⁴⁾. Asimismo, se demostró que el análisis de imágenes rechazadas permite reconocer oportunidades de optimización en radiografía digital y tomografía computarizada ⁽²⁵⁾. Estos antecedentes refuerzan la necesidad de integrar las pruebas físicas de colimación y alineación con el análisis de rechazos, los indicadores de exposición y la capacitación del personal. El prototipo no sustituye estas actividades, pero podría incorporarse como un recurso complementario para identificar fallos antes de que se manifiesten de manera repetida en estudios clínicos.

El empleo de acrílico, materiales reutilizados y marcadores radiopacos permitió construir una herramienta funcional con una inversión de 23 USD. Durante las pruebas, las reglas graduadas, los círculos centrales y los límites del rectángulo de referencia fueron visibles, sin que se observaran deformaciones o artefactos que impidieran la lectura. No obstante, la investigación con fantasmas debe describir con precisión los materiales, las dimensiones, el protocolo de exposición, el procedimiento de análisis y las limitaciones de las mediciones. Una guía propuesta, enfatiza que estos elementos son necesarios para favorecer la

transparencia, reproducibilidad y valoración crítica de los estudios con objetos de prueba ⁽²⁶⁾. En consecuencia, una futura versión del dispositivo deberá acompañarse de planos, tolerancias de fabricación y un manual estandarizado de utilización.

La fabricación digital representa una alternativa para producir dispositivos adaptados a las necesidades de los establecimientos. En esta dirección se señaló que la impresión tridimensional facilita la elaboración de fantasmas físicos reproducibles y con geometrías complejas, aunque su comportamiento depende de la resolución del equipo y de las propiedades del material empleado ⁽²⁷⁾. En este estudio se utilizó corte y grabado láser sobre acrílico, lo cual permitió incorporar escalas milimétricas y mantener una superficie rígida. Esta elección conserva el principio de fabricación digital, pero utiliza un procedimiento potencialmente más sencillo para diseños planos destinados a evaluar la congruencia del campo.

Los hallazgos coinciden con la tendencia de fabricar objetos de prueba dentro de las propias instituciones. Un ejemplo de ello fue un fantoma institucional desarrollado para comprobaciones rápidas en sistemas de radiografía computarizada y digital, aunque se reconoció la necesidad de realizar evaluaciones adicionales antes de establecer su uso hospitalario rutinario ⁽²⁸⁾. Por otro lado, en otra investigación se presentó un dispositivo de bajo costo fabricado mediante impresión tridimensional para efectuar pruebas de alineación en equipos clínicos de rayos X ⁽²⁹⁾. De manera semejante, el presente prototipo buscó reducir la dependencia de herramientas importadas mediante materiales disponibles localmente; sin embargo, su principal diferencia fue integrar una placa de colimación elaborada con acrílico y un dispositivo cilíndrico construido con elementos reutilizados.

La prueba de perpendicularidad clasificó los tres equipos dentro del límite de 1,5°, pero únicamente se registró el cumplimiento y no el ángulo exacto obtenido. Esta forma de reporte permitió identificar la conformidad técnica, aunque limitó la comparación cuantitativa entre los instrumentos. Para una validación más sólida se deberán realizar exposiciones repetidas, registrar valores angulares concretos, estimar la incertidumbre de medición y evaluar la reproducibilidad entre operadores. También convendría aplicar métodos de concordancia para determinar si las diferencias entre la herramienta económica y la comercial son aceptables. Estas medidas son consistentes con la necesidad de utilizar procedimientos repetibles y criterios definidos en las pruebas rutinarias de calidad ^(1,6).

Desde el punto de vista operativo, el prototipo podría emplearse en comprobaciones básicas realizadas entre las evaluaciones especializadas, particularmente en establecimientos con acceso limitado a instrumentos comerciales. Otros autores demostraron que las fantasmas simples pueden integrarse con sistemas de análisis remoto y automatizado para ampliar la vigilancia de los equipos de radiografía y mamografía en diferentes centros ⁽³⁰⁾. El dispositivo desarrollado todavía depende de la interpretación visual, pero su diseño podría evolucionar mediante la incorporación de plantillas digitales o procedimientos automatizados para medir la separación de los bordes y la posición de los marcadores.

Entre las limitaciones del estudio se encuentran el número reducido de equipos, la ausencia de mediciones repetidas, la utilización de parámetros de exposición diferentes para los dos instrumentos y la falta de un análisis estadístico de concordancia. Tampoco se evaluaron la estabilidad de la mezcla radiopaca, la resistencia del acrílico ante el uso continuo, la reproducibilidad entre evaluadores ni el desempeño del dispositivo en establecimientos con equipos de diferentes fabricantes. Estas limitaciones obligan a considerar los resultados como una validación técnica preliminar y no como evidencia definitiva de equivalencia con una herramienta comercial.

En futuras investigaciones deberá ampliarse la muestra, uniformarse la técnica de exposición y repetirse cada medición bajo las mismas condiciones. También será necesario evaluar la durabilidad, determinar valores exactos de desviación angular, comparar los resultados entre varios observadores y analizar el costo total incluyendo mano de obra y mantenimiento. A pesar de estas limitaciones, el bajo costo, la disponibilidad de los materiales y la facilidad de interpretación observada respaldan la continuidad de su validación como una alternativa local para fortalecer el control de calidad en servicios de radiodiagnóstico con recursos limitados.

Conclusiones

La herramienta económica desarrollada permitió evaluar la congruencia entre el campo luminoso y el campo de radiación, así como la perpendicularidad del rayo central, en los tres equipos de radiografía computarizada incluidos en el estudio. Los marcadores incorporados en la placa de acrílico y en el dispositivo cilíndrico presentaron una visibilidad suficiente en las imágenes obtenidas, lo que facilitó la identificación de los límites del campo y la comprobación de la alineación sin observarse artefactos que impidieran la lectura de los resultados.

Las desviaciones de colimación registradas con el prototipo económico se ubicaron entre 1,0 y 1,5 cm, valores inferiores al límite de aceptación de 2 cm correspondiente al 2 % de una distancia foco-receptor de 100 cm. De igual manera, la alineación del rayo central se mantuvo por debajo de 1,5° en los equipos CR1, CR2 y CR3. Por consiguiente, todos los equipos evaluados cumplieron los criterios técnicos aplicados tanto con la herramienta comercial como con el dispositivo desarrollado.

Las mediciones obtenidas con la herramienta económica fueron próximas a las registradas mediante el instrumento comercial de referencia. En los equipos CR1 y CR3 se observaron resultados coincidentes, mientras que en CR2 se presentó una diferencia de 0,5 cm. La diferencia media absoluta entre ambos instrumentos fue de 0,17 cm; sin embargo, debido al número reducido de equipos, la ausencia de mediciones repetidas y la falta de un análisis formal de concordancia, estos resultados representan una validación técnica preliminar y no permiten afirmar equivalencia estadística entre los dispositivos.

La herramienta desarrollada puede considerarse una alternativa preliminar para apoyar las pruebas básicas de constancia en servicios de radiodiagnóstico con recursos limitados, pero no sustituye los instrumentos certificados, las pruebas de aceptación ni las evaluaciones realizadas por profesionales responsables del control de calidad y la protección radiológica. Antes de recomendar su incorporación rutinaria, se requiere ampliar la validación a un mayor número de equipos, realizar mediciones repetidas, estandarizar los parámetros de exposición y evaluar la reproducibilidad entre operadores, la incertidumbre de medición y la durabilidad de los materiales empleados.

Acerca de

Contribución de los autores: Los autores contribuyeron en la conceptualización del estudio, desarrollo metodológico, análisis e interpretación de los datos, redacción del manuscrito y revisión crítica de su contenido intelectual. En la aprobación de la versión final para su publicación.

Financiamiento: Los autores declaran que no recibió financiamiento externo para la realización de la presente investigación.

Agradecimiento: Los autores agradecen a la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca por facilitar el acceso a los equipos de radiografía computarizada y a las instalaciones donde se desarrollaron las pruebas experimentales.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

Certificación ética: Por la naturaleza tecnológica y experimental del estudio, basado en la evaluación de equipos de radiografía computarizada, no se involucró la participación directa de seres humanos ni la recopilación de datos personales o sensibles. En consecuencia, no fue necesario obtener consentimiento informado ni aprobación de un comité de ética para investigación con seres humanos.

Historia del artículo: Artículo recibido 21 de mayo 2026 | Aceptado 16 de junio 2026 | Publicado 04 de septiembre 2026

Referencias

1. International Atomic Energy Agency. Handbook of Basic Quality Control Tests for Diagnostic Radiology. IAEA Human Health Series No. 47. Vienna: IAEA; 2023. <https://doi.org/10.61092/iaea.rhjo-8d0u>
2. International Atomic Energy Agency, International Labour Office, Pan American Health Organization, World Health Organization. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation. IAEA Safety Standards Series No. SSG-46. Vienna: IAEA; 2018. <https://www.iaea.org/publications/11102/radiation-protection-and-safety-in-medical-uses-of-ionizing-radiation>

3. International Atomic Energy Agency. Patient Radiation Exposure Monitoring in Medical Imaging. Safety Reports Series No. 112. Vienna: IAEA; 2023. <https://www.iaea.org/publications/14971/patient-radiation-exposure-monitoring-in-medical-imaging>
4. International Atomic Energy Agency. Diagnostic Radiology Physics: A Handbook for Teachers and Students. Vienna: IAEA; 2014. <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1564webNew-74666420.pdf>
5. Vañó E, Miller DL, Martin CJ, Rehani MM, Kang K, Rosenstein M, et al. ICRP Publication 135: Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. Ann ICRP. 2017;46(1):1-144. <https://doi.org/10.1177/0146645317717209>
6. Jones AK, Heintz P, Geiser W, Goldman L, Jerjian K, Martin M, et al. Ongoing quality control in digital radiography: Report of AAPM Imaging Physics Committee Task Group 151. Med Phys. 2015;42(11):6658-6670. <https://doi.org/10.1118/1.4932623>
7. Shepard SJ, Wang J, Flynn M, Gingold E, Goldman L, Krugh K, et al. An exposure indicator for digital radiography: AAPM Task Group 116 executive summary. Med Phys. 2009;36(7):2898-2914. <https://doi.org/10.1118/1.3121505>
8. Dave JK, Jones AK, Fisher R, Hulme K, Rill L, Zamora D, et al. Current state of practice regarding digital radiography exposure indicators and deviation indices: Report of AAPM Imaging Physics Committee Task Group 232. Med Phys. 2018;45(11):e1146-e1160. <https://doi.org/10.1002/mp.13212>
9. Little K, Reiser I, Apgar B, Dalal P, Dave J, Fisher R, et al. AAPM Task Group Report 305: Guidance for standardization of vendor-neutral reject analysis in radiography. J Appl Clin Med Phys. 2023;24(5):e13938. <https://doi.org/10.1002/acm2.13938>
10. Ireland T, Perdomo A, Lee KL, Jones A, Barnes P, Greig T, et al. ACPSEM position paper: Recommendations for a digital general X-ray quality assurance program. Phys Eng Sci Med. 2024;47(3):789-812. <https://doi.org/10.1007/s13246-024-01431-y>
11. Tsalaftoutas IA, AlKhazzam S, Tsapaki V, AlNaemi H, Kharita MH. Digital radiography image quality evaluation using various phantoms and software. J Appl Clin Med Phys. 2022;23(12):e13823. <https://doi.org/10.1002/acm2.13823>
12. Tsalaftoutas IA, AlKhazzam S, Tsapaki V, AlNaemi H, Kharita MH. Automatic image quality evaluation in digital radiography using for-processing and for-presentation images. J Appl Clin Med Phys. 2024;25(4):e14285. <https://doi.org/10.1002/acm2.14285>
13. Kleefeld C, Castillo Lopez JP, Costa PR, Fitton I, Mohamed A, Pesznyak C, et al. Automated quality control solution for radiographic imaging of lung diseases. J Clin Med. 2024;13(16):4967. <https://doi.org/10.3390/jcm13164967>
14. Hamzah NA, Tan LK, Tsapaki V, Ciraj-Bjelac O, Wong JHD. Optimising the IAEA remote and automatic quality control for digital radiography: Phantom design and reproducibility investigation. Phys Eng Sci Med. 2026;49(2):905-916. <https://doi.org/10.1007/s13246-026-01708-4>
15. Dukov N, Valkova VM, Yordanova M, Tsapaki V, Bliznakova K. Design and use of a custom phantom for regular tests of radiography apparatus: A feasibility study. J Imaging. 2024;10(10):258. <https://doi.org/10.3390/jimaging10100258>

16. Maharani NLS, Tungga Dewi IZ, Darma WM, Amalia AF, Rifai R, Suparta GB. A multifunctional geometric phantom for digital radiography assessment. *Radiography*. 2025;31(6):103193. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2025.103193>
17. Ogden KM, Morabito KE, Depew PK. 3D printed testing aids for radiographic quality control. *J Appl Clin Med Phys*. 2019;20(5):127-134. <https://doi.org/10.1002/acm2.12574>
18. Carver DE, Willis CE, Stauduhar PJ, Nishino TK, Wells JR, Samei E. Medical physics 3.0 versus 1.0: A case study in digital radiography quality control. *J Appl Clin Med Phys*. 2018;19(5):694-707. <https://doi.org/10.1002/acm2.12425>
19. Martinez C, de Molina C, Desco M, Abella M. Optimization of a calibration phantom for quantitative radiography. *Med Phys*. 2021;48(3):1039-1053. <https://doi.org/10.1002/mp.14638>
20. Funahashi M, Kashiyaama K, Nakamura T, Shiraishi J. Utilization of upper and lower limits of exposure index in clinical digital radiography. *Radiol Phys Technol*. 2022;15(4):349-357. <https://doi.org/10.1007/s12194-022-00674-2>
21. Creeden A, Curtis M. Optimising default radiographic exposure factors using deviation index. *Radiography*. 2020;26(4):308-313. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2020.02.009>
22. Bantas G, Sweeney JR, Mdletshe S. Digital radiography reject analysis: A comparison between two radiology departments in New Zealand. *J Med Radiat Sci*. 2023;70(2):137-144. <https://doi.org/10.1002/jmrs.654>
23. Serra D, Neep MJ, Ryan E. Multi-centre digital radiography reject analysis for different clinical room use types: The establishment of local reject reference levels for public hospital departments. *J Med Radiat Sci*. 2024;71(3):412-420. <https://doi.org/10.1002/jmrs.796>
24. Atkinson S, Neep MJ, Starkey D. Reject rate analysis in digital radiography: An Australian emergency imaging department case study. *J Med Radiat Sci*. 2020;67(1):72-79. <https://doi.org/10.1002/jmrs.343>
25. Haddad L, Saleme H, Howarth N, Tack D. Reject analysis in digital radiography and computed tomography: A Belgian imaging department case study. *J Belg Soc Radiol*. 2023;107(1):100. <https://doi.org/10.5334/jbsr.3259>
26. Gennaro G, Zanardo M, Ambrogi F, Sardanelli F. Phantom studies in medical imaging: A guide with recommendations and checklist. *Eur Radiol Exp*. 2025;9:105. <https://doi.org/10.1186/s41747-025-00641-7>
27. Filippou V, Tsoumpas C. Recent advances on the development of phantoms using 3D printing for imaging with CT, MRI, PET, SPECT and ultrasound. *Med Phys*. 2018;45(9):e740-e760. <https://doi.org/10.1002/mp.13058>
28. Muharam R, Lestariningsih I, Nurlily, Soejoko DS. Designing phantom in-house for quick check computed radiography and digital radiography systems. *J Phys Conf Ser*. 2020;1568(1):012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1568/1/012023>
29. Miranda EHA, Assunção MFM, Silva JO. Design and development of an alignment test device for clinical X-ray equipment with 3D print and low-cost materials. *Braz J Radiat Sci*. 2022;10(2A):1-11. <https://doi.org/10.15392/bjrs.v10i2A.2024>

30. Mora P, Pfeiffer D, Zhang G, Bosmans H, Delis H, Razi P, et al. The IAEA remote and automated quality control methodology for radiography and mammography. J Appl Clin Med Phys. 2021;22(11):126-142. <https://doi.org/10.1002/acm2.13431>
-



Este artículo está bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0).