



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE  
RADIOGRAFÍA DIGITAL CON APLICACIONES EN  
EL ESTUDIO DEL PATRIMONIO CULTURAL**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**FÍSICO**

**P R E S E N T A:**

**RODRIGO TLACUILO GONZÁLEZ**



**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. OSCAR GENARO DE LUCIO MORALES**

**Ciudad de México, Noviembre 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno  
Tlacuilo  
González  
Rodrigo  
55 82 19 49  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Física  
310679992
2. Datos del tutor  
Dr.  
Oscar Genaro  
de Lucio  
Morales
3. Datos del sinodal 1  
Dr.  
Alipio Gustavo  
Calles  
Martínez
4. Datos del sinodal 2  
Dr.  
José Luis  
Ruvalcaba  
Sil
5. Datos del sinodal 3  
Dr.  
Roberto Ysacc  
Sato  
Berrú
6. Datos del sinodal 4  
Fís.  
Luis  
Flores  
Morales
7. Datos del trabajo escrito  
Caracterización de un sistema de radiografía digital con aplicaciones en el estudio  
del patrimonio cultural.  
118 p  
2018

*Para los 6 de Silos*

# AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Oscar de Lucio por recibirme como su estudiante en este proyecto, por su paciencia, disposición y consejos. El tiempo que he estado con usted ha sido muy valioso y me ha ayudado a ser mejor físico y mejor persona.

Al Dr. José Luis Ruvalcaba, cuyo arduo trabajo ha hecho posible la existencia del LANCIC. Todo mi respeto y admiración por su dedicación a este proyecto.

A Isaac Rangel por el apoyo en la toma de fotografías, el procesamiento de imágenes y todo problema que surgía.

Al Dr. Héctor Alva Sánchez por su apoyo en el análisis del cálculo de la producción de fluorescencia de rayos X.

Al técnico académico, el Dr. Alejandro Mitrani Viggiano, por el apoyo en las labores realizadas para hacer posible esta tesis.

A mis sinodales por la revisión de este trabajo y las observaciones que hicieron para mejorarlo.

A los miembros del LANCIC-IF por hacer de mi tiempo en el laboratorio una experiencia más que disfrutable.

A mi familia por apoyarme en todo momento, por enseñarme a ser feliz e impulsarme a seguir este sueño que es convertirme en físico.

A mi madre, por apoyarme en mi interminable lucha con las matemáticas, y por nuestras eternas discusiones de cómo resolver problemas de cálculo y geometría.

A Memo, Jessica, Alan, David y Félix, por su amistad y apoyo incondicional a lo largo de estos 6 años. De no ser por ustedes, la carrera hubiera sido una experiencia mucho menos valiosa, y los logros que he tenido en este tiempo no serían posibles.

A Abril y Ana, por su apoyo durante este último tramo para llegar hasta aquí.

Al proyecto PAPIIT IN116916 por el apoyo económico parcial para el desarrollo de esta tesis, y a los proyectos CONACYT INFRA224237, LN279740, LN293904, CB239609; así como PAPIIT UNAM IN110416 y UNAM IN112018, que apoyaron el desarrollo de la tesis en el Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural LANCIC del Instituto de Física de la UNAM.

Las siguientes fotografías fueron tomadas por el Licenciado en diseño y comunicación visual Isaac Rangel: Figura 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 4.9, 4.10, 4.11, 4.17, 4.18, 5.3 a), 5.4, 5.6 a), 5.8 a), 5.9 a), A1.1, A1.2, A1.3, A1.4, A1.5, A1.6, A1.7, A1.8 a), A1.8 b), A1.9, A1.10, A1.11, A1.12, A1.13, A1.14, A1.15, A1.16.

# CONTENIDOS

<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Resumen.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
<b>Capítulo 2. Fundamentos físicos.....</b>	<b>7</b>
2.1 Mecanismos de producción de rayos X.....	7
2.1.1 Bremsstrahlung.....	7
2.1.2 Rayos X característicos.....	8
2.2 Funcionamiento de un tubo de rayos X.....	10
2.3 Mecanismos de interacción de rayos X con la materia.....	11
2.3.1 Efecto fotoeléctrico.....	11
2.3.2 Dispersión Compton.....	12
2.3.3 Producción de pares.....	13
2.3.4 Dispersión Rayleigh.....	13
2.3.5 Atenuación de rayos X con la materia.....	14
2.3.6 Producción de fluorescencia secundaria.....	16
2.4 Funcionamiento de detectores de rayos X para la producción de imágenes.....	18
2.4.1 Cristales centelladores inorgánicos.....	18
2.4.2 Detectores planos de centelleo.....	19
<b>Capítulo 3. Desarrollo experimental.....</b>	<b>21</b>
3.1 Descripción del dispositivo.....	21
3.1.1 Fuente de rayos X.....	21
3.1.2 Detector de rayos X.....	23
3.1.3 Unidad de adquisición.....	24
3.2 Determinación del haz efectivo de radiación.....	25
3.3 Respuesta del detector.....	27

3.4 Resolución del detector.....	29
3.5 Separación de la aproximación de haces paralelos.....	29
3.6 Radiografía de baja energía.....	29
3.6.1 Disminución de la energía con un filtro.....	30
3.6.2 Radiografía con fluorescencia de rayos X.....	31
<b>Capítulo 4. Resultados y análisis.....</b>	<b>33</b>
4.1 Determinación del haz efectivo de radiación.....	33
4.1.1 Medición con una distancia irradiador-detector de (1.000±0.0005)m.....	33
4.1.2 Medición con una distancia irradiador-detector de (2.000±0.0005)m.....	37
4.2 Respuesta del detector.....	42
4.3 Resolución del detector.....	48
4.4 Separación de la aproximación de haces paralelos.....	50
4.5 Radiografía de baja energía.....	52
4.5.1 Disminución de la energía con un filtro.....	52
4.5.2 Radiografía con fluorescencia de rayos X.....	59
<b>Capítulo 5. Algunos ejemplos de aplicaciones de la radiografía digital en el estudio del patrimonio cultural mexicano.....</b>	<b>65</b>
<b>Capítulo 6. Conclusiones.....</b>	<b>77</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>81</b>
<b>Anexo 1. Descripciones y protocolos de trabajo para el sistema de radiografía digital PXM-40BT.....</b>	<b>83</b>
<b>Anexo 2. Cálculo del coeficiente de atenuación del papel (celulosa).....</b>	<b>97</b>
<b>Anexo 3. Perfiles de grises para la determinación del haz efectivo de radiación.....</b>	<b>99</b>
<b>Anexo 4. Manejo de XOP 2.3.....</b>	<b>109</b>
<b>Anexo 5. Manejo de Vidisco Xbit Pro.....</b>	<b>113</b>
<b>Anexo 6. Manejo de Image J.....</b>	<b>115</b>

# 1. Introducción

---

El objetivo de este trabajo fue la optimización de la adquisición de radiografías en el Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural del Instituto de Física de la UNAM (LANCIC-IF) a partir de la caracterización del sistema de radiografía digital PXM-40BT de la marca POSKOM y el sistema de adquisición de imágenes de la marca Vidisco modelo FlashX Pro con los que se cuenta en el laboratorio. Se buscó lograr esto a través de cinco experimentos: determinación del haz efectivo de radiación, respuesta del detector, resolución del detector, separación de la aproximación de haces paralelos y radiografía de baja energía.

Este primer trabajo de caracterización ha permitido determinar los alcances y limitaciones del dispositivo de radiografía digital del LANCIC-IF.

A continuación se presenta un resumen de los experimentos realizados y algunos antecedentes de la radiografía digital y su aplicación en el estudio del patrimonio cultural. En el capítulo 2 se dan los fundamentos físicos detrás de los mecanismos de producción de rayos X, el funcionamiento de un tubo de rayos X, su interacción con la materia, y su detección para la formación de imágenes. En el Capítulo 3 se da una descripción de los dispositivos que componen el sistema de radiografía digital y el desarrollo experimental que se siguió en los cinco experimentos mencionados previamente. En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos y el análisis de los mismos. En el Capítulo 5 se dan ejemplos particulares de aplicaciones de la radiografía digital en el estudio de objetos pertenecientes al patrimonio cultural. En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo. En la sección de anexos se presentan los protocolos de trabajo para el sistema de radiografía digital, el cálculo de coeficientes de atenuación de papel, la obtención de perfiles de grises para la determinación del haz efectivo de radiación y el manejo de los softwares XOP2.3, Vidisco Xbit Pro e Image J.

## 1.1 Resumen

Para determinar un área efectiva de radiación para un mejor análisis de los objetos de estudio, se realizó una radiografía del haz completo con una distancia irradiador-detector de 1 y 2 m.

Dada la gran variedad de objetos de análisis con los que se trabaja en el LANCIC-IF, se requiere una forma de conocer la respuesta del detector en función de la energía utilizada,

independientemente del material que se está analizando. Para esto, se tomaron radiografías de 4 distintos materiales con distintos grosores (Tabla 3.2) a distintas condiciones de voltaje y exposición (Tabla 3.3)

Con el objetivo de verificar la resolución dada por el fabricante, se tomó la radiografía de una malla de cobre compuesta por hebras de  $5.588 \times 10^{-3}$  mm y se obtuvo el perfil de grises de una hebra utilizando el programa ImageJ.

Para conocer a qué distancia irradiador-detector se puede considerar el cono de radiación de rayos X como un haz de rayos paralelos, se tomó la radiografía de un disco de carbono de  $(17.40 \pm 0.05)$  mm de diámetro y  $(12.00 \pm 0.05)$  mm de grosor a 0.5, 1, 1.5 y 2 m con el disco pegado al detector. Utilizando el programa ImageJ se obtuvo el perfil de grises en el área comprendida por el disco y se analizó la razón de cambio en el tono de gris al inicio y final del disco.

Con el objetivo de realizar análisis radiográficos a objetos de estudio delgados y de baja densidad como pergaminos, códigos o páginas de libros, se realizaron dos experimentos para obtener distribuciones de baja energía a partir del sistema portátil de rayos X PXM-40BT. En el primer experimento se utilizó el fenómeno de los bordes de absorción para “cortar” la distribución de energía del tubo de rayos X de 40 kV a una energía más baja. En el segundo se utilizaron los rayos X secundarios producidos por una película de cobre como fuente principal para tomar la radiografía.

## 1.2 Antecedentes

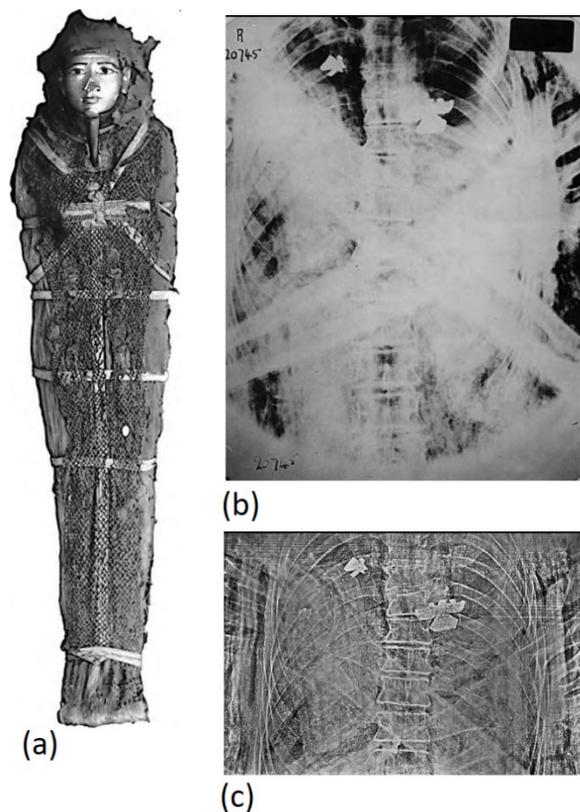
Con el objetivo de establecer protocolos de investigación, desarrollar materiales de conservación, y generar nuevas metodologías para la conservación del patrimonio, con apertura al análisis de otros objetos que forman parte de la cultura en el mundo, en agosto de 2014 se conformó el Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del patrimonio cultural (LANCIC), un espacio interdisciplinario de alto nivel para caracterizar técnicas y materiales que constituyen objetos culturales únicos<sup>1</sup>.

Una de las técnicas de imagenología utilizadas en el estudio del patrimonio cultural es la radiografía digital, la cual utiliza la radiación de rayos X para formar una imagen con sensores digitales. El uso de la radiografía en el estudio de objetos culturales y arqueológicos nos permite responder preguntas sobre la manufactura, función, estado de preservación, entre otras.

<sup>1</sup><http://labunam.unam.mx/micrositio/LANCIC/antecedentes.php>

El uso de la radiografía inicia con el descubrimiento de los rayos X por Wilhelm Conrad Röntgen en 1895 en la Universidad de Würzburg, Baviera. Notó que algunos cristales de platinocianuro de bario, cerca de un tubo de descarga envuelto completamente en papel oscuro, se hacían luminiscentes cuando ocurría la descarga. Al examinar las sombras proyectadas por los rayos, Röntgen rastreó el origen de los rayos a las paredes del tubo de descarga.

El primer registro del uso de rayos X para el estudio del patrimonio cultural es de un artículo del Dr. Charles Leonard de 1898 [1], en el cual se muestran las radiografías producidas de una momia peruana (Figura 1.1) y otros artefactos del Museo de la Universidad de Pensilvania.



**Figura 1.1 [1] (a) Momia del periodo Ptolemaico radiografiada en un soporte de madera. (b) Radiografía en película radiográfica clásica del tórax anteroposterior la cual muestra un objeto cilíndrico en el hemitórax derecho, un pequeño halcón en el pectoral y dos amuletos (ojos udjat). La radiografía sufre de un contraste exagerado y una zona opacificada. (c) Xerorradiografía que muestra claramente los amuletos, incluyendo un pilar djjet en la zona torácica baja.**

A partir de este trabajo se ha diversificado la aplicación de la radiografía a una gran variedad de objetos, sobre todo en el caso de pintura de caballete y sobre tabla, objetos metálicos, piezas cerámicas, escultura polícroma, manuscritos, etc. La fuente de radiación es determinante en función de las dimensiones y composición del objeto de estudio.

El uso de la imagenología digital comenzó en 1980 con la introducción al uso clínico de la angiografía experimental de sustracción digital. Para la radiografía en general, las imágenes de rayos X fueron adquiridas de manera digital por primera vez a finales de 1980 utilizando placas de imagen de almacenamiento de fósforo basadas en casetes [2], sin embargo, los altos requerimientos técnicos y los costos financieros retrasaron diez años su transferencia al uso cotidiano.

El primer sistema de radiografía digital fue el sistema de escaneo de ranura CCD (dispositivo acoplado de carga por sus siglas en inglés) que apareció en 1990. En 1994 fueron publicadas las investigaciones sobre el sistema de selenio de radiografía digital. Los primeros detectores planos de sistema de radiografía digital basados en silicio amorfo y selenio amorfo fueron introducidos en 1995. Los centelladores de oxisulfuro de gadolinio fueron introducidos en 1997 y han sido utilizados en los detectores planos portátiles desde el 2001 [2].

Los detectores planos fueron desarrollados inicialmente para ser detectores integrados en los equipos radiográficos, pero hoy en día se encuentran como detectores no integrados que funcionan de manera tanto inalámbrica como no inalámbrica.

La diferencia de la radiografía digital con la radiografía tradicional, es la adquisición en formato digital de las imágenes por medio de detectores digitales, en vez de utilizar películas fotográficas. Las ventajas de la radiografía digital sobre la tradicional son la capacidad de procesar la imagen en tiempo real, mejorar el contraste digitalmente, reducción de la dosis, almacenamiento y transmisión digital y la eliminación del procesamiento químico de las placas fotográficas.

Como se mencionaba anteriormente, algunos de los elementos del patrimonio cultural que pueden estudiarse a través de la radiografía digital son las pinturas y los objetos metálicos.

En la Figura 1.2 [1] se presenta un ejemplo de análisis de pintura. Las partes perdidas de la pintura usualmente se muestran como parches distintivos que se observan más claros u opacos que el resto, con bordes bien definidos, aun cuando hayan sido rellenados y tapados en alguna restauración. La razón es que los materiales utilizados en la reparación interactúan de manera distinta con los rayos X a los utilizados por el artista. La tiza es la base de la mayoría de los rellenos, y dado que los rayos X la atraviesan con facilidad, las pérdidas rellenadas se verán con facilidad como zonas más oscuras.

Todas las pinturas presentan una red de grietas al envejecer la pintura y volverse quebradiza, y esto se muestra en la radiografía como un patrón de finas líneas negras. Las

grietas más amplias generalmente son causadas por la pintura de aceite secándose lentamente [1].



Figura 1.2 [1] Maestro de Groote, Adoración, Escenas de la Vida de un Obispo (detalle del panel izquierdo. La radiografía muestra que hay pequeñas pérdidas por todo el rostro del Obispo donde la pintura y las capas bases se han escamado. Aunque el restaurador las ha llenado y retocado para que sean invisibles a simple vista, se muestran en la radiografía como figuras negras.

En la Figura 1.3 [1] se muestra un ejemplo de análisis de un objeto metálico: una vasija esmaltada. La radiografía nos permite observar que las secciones superiores e inferiores de la vasija fueron unidas con pequeñas trenzas de alambre antes de asegurar la unión mediante soldadura fuerte con una aleación de alto punto de fusión (probablemente cobre/plata). El asa, la base y la sección del pico superior también fueron soldadas, lo cual debió llevarse a cabo antes de esmaltar. También se pueden apreciar reparaciones posteriores.



Figura 1.3 [1] Radiografía la cual muestra los alambres asegurando las secciones superior e inferior, las juntas soldadas, las reparaciones de soldadura blanda, la construcción del asa a partir de lámina enrollada. Las variaciones en el grosor del esmalte en el lado de la vasija son visibles en la unión del asa. El detalle enfocado ha sido procesado para mostrar las trenzas de alambre y las variaciones den la capa de esmalte en las juntas.

## 2. Fundamentos físicos

### 2.1 Mecanismos de producción de rayos X

#### 2.1.1 Bremsstrahlung

En la Figura 2.1 se muestra la generación de rayos X en un tubo de rayos X. Como podemos observar, los rayos X se generan cuando un haz de electrones, emitidos por un filamento incandescente o cátodo, después de haber sido acelerados con un potencial eléctrico, interactúan con un ánodo formado por una placa metálica. Como se ve en la Figura 2.2, al llegar al ánodo los electrones son frenados al pasar por las proximidades de los núcleos atómicos, transformándose parte de su energía cinética en energía electromagnética, esta radiación se conoce como *bremsstrahlung* (radiación de frenado), la cual se caracteriza por una distribución continua (Gráfica 2.1) que se hace más intensa y se desplaza hacia frecuencias más altas, cuando se incrementa la energía de los electrones incidentes.

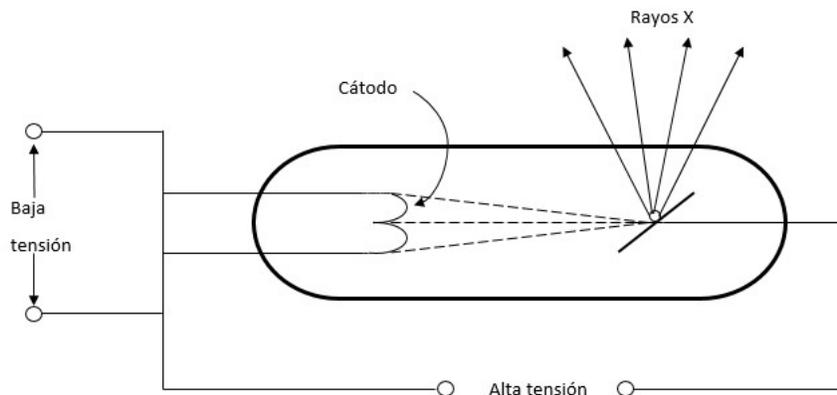


Figura 2.1 Esquema de un tubo de rayos x

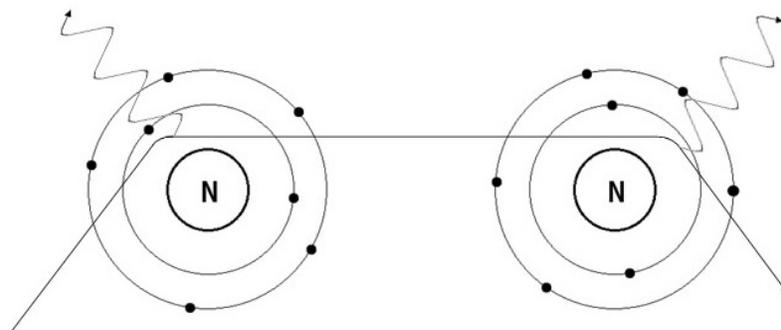
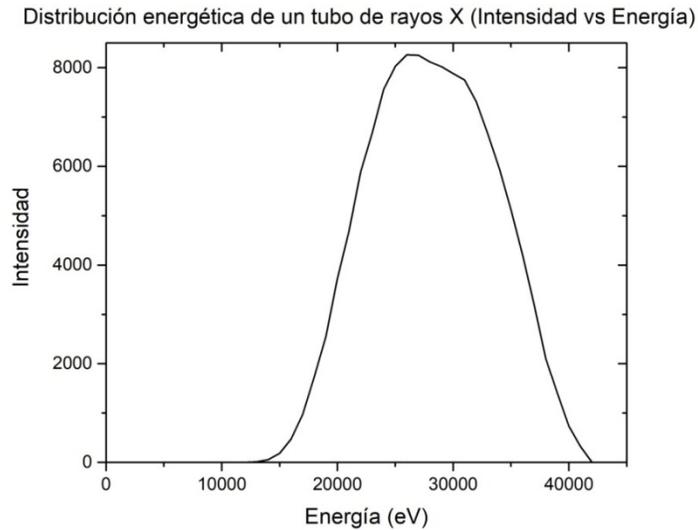


Figura 2.2 Diagrama del proceso de producción de bremsstrahlung. Se observa el cambio en la trayectoria de un electrón al pasar por las proximidades de un núcleo atómico



**Gráfica 2.1** Distribución energética de un tubo de rayos X con energía de 40 kV, un filtraje inherente de 0.8 mm de Al y un blanco de W (simulación realizada con xop)

La distribución energética para un tubo de rayos X sin filtraje inherente está modelada por la siguiente ecuación [3]:

$$I_{\nu} = C[Z(\nu_0 - \nu) + bZ^2] \quad (2.1)$$

donde  $C$  y  $b$  son constantes de proporcionalidad,  $\nu$  es la frecuencia,  $Z$  es el número atómico del ánodo y  $\nu_0$  es la frecuencia de corte ( $\nu_0 = c/\lambda_{min}$ )

### 2.1.2 Rayos X característicos

La producción de rayos X característicos involucra transiciones de los átomos en el material blanco entre los niveles de energía permitidos en capas atómicas internas. Cuando un electrón es expulsado de la capa K por un bombardeo electrónico o por la absorción de un fotón, el átomo se ioniza y el ión se queda en un estado de alta energía. Este exceso de energía que el ión tiene sobre el estado normal del átomo es igual a la energía de enlace requerida para remover el electrón K a un estado de reposo fuera del átomo. Si la vacancia dejada por este electrón se llena por un electrón proveniente de un nivel L, la transición es acompañada por la emisión de una línea de rayo X conocida como línea  $K_{\alpha}$ . Este proceso deja una vacancia en la capa L. Por otro lado, si el átomo contiene suficientes electrones, la capa K puede ser llenada por un electrón proveniente de un nivel M que es acompañado por la emisión de una línea  $K_{\beta}$ . Los iones de estados L o M que permanecen pueden también llevar a una emisión si las vacancias de los electrones son llenadas por electrones provenientes de órbitas más lejanas.

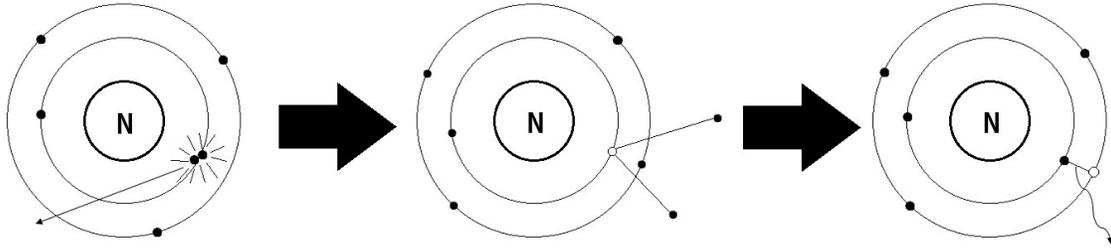


Figura 2.3 Diagrama de producción de rayos x característicos

Todas las transiciones desde la capa K producen líneas de la llamada serie K, las transiciones de la capa L producen líneas de la serie L y así sucesivamente. Existe un número limitado de transiciones permitidas. Las líneas más intensas crean la radiación de dipolo eléctrico. Las transiciones son gobernadas por las reglas de selección para el cambio de números cuánticos [4]:

$$\Delta l = \pm 1 \quad (2.2)$$

$$\Delta j = 0, \pm 1 \quad (2.3)$$

La transición de  $j = 0 \rightarrow 0$  está prohibida.

Estas reglas de selección son iguales a las correspondientes a un electrón en un átomo monoeléctrico. El conjunto completo de rayos X emitidos por dichas transiciones constituyen el espectro de líneas de rayos X de un átomo. En la Figura 2.4 podemos observar las series K, L y M.

Definamos la energía  $E_i$  de un estado involucrado en la transición de rayos X como la energía del estado electrónico, donde el átomo tiene una vacancia en la  $i$ -ésima subcapa. Dejando de lado transiciones electrónicas no radiativas, entonces la transición  $i \rightarrow f$  de un estado inicial  $i$  a un estado final  $f$  de menor energía lleva a la emisión de un cuanto de rayos X con energía  $E_i - E_f$ . Este cuanto corresponde a la emisión de radiación con una frecuencia  $\nu$ , una longitud de onda en el vacío  $\lambda$  y un número de onda  $k$ . Entonces, tenemos que [5]:

$$E_i - E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = hck \quad (2.4)$$

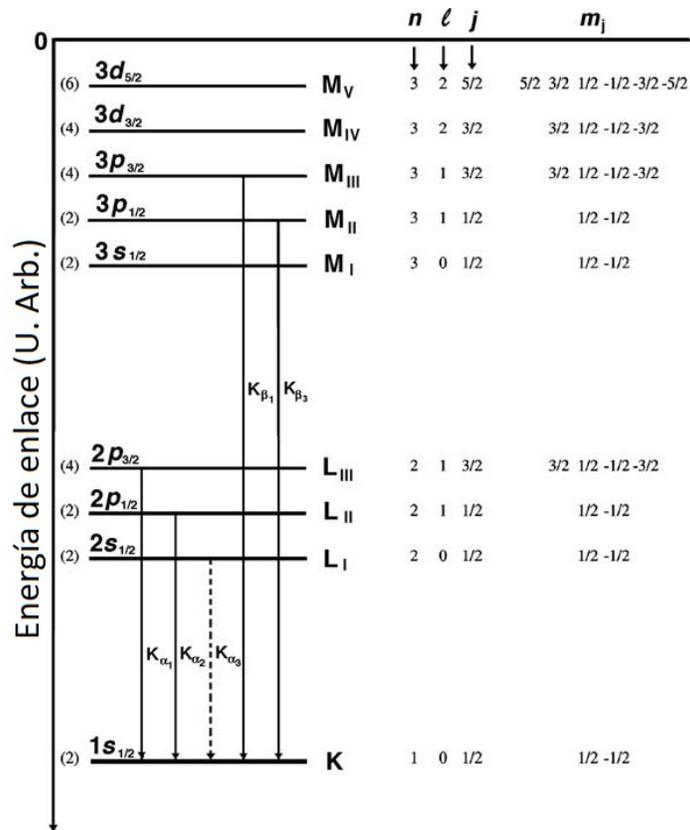


Figura 2.4 [6] Diagrama de Grotrian para las transiciones de rayos X de la serie K. Las líneas sólidas caracterizan transiciones de dipolos, mientras que las punteadas transiciones de multipolaridades más altas.

## 2.2 Funcionamiento de un tubo de rayos X

En la Figura 2.5 se muestran los componentes principales de un tubo de rayos X. Este tipo de dispositivos constituyen la fuente de rayos X más usual para el uso de radiografía con sensores digitales.

Como se explicó en la sección 2.1, un filamento calentado libera electrones los cuales son acelerados por una diferencia de potencial hasta golpear un blanco. Al haz de electrones acelerados se le conoce como corriente del tubo. Los rayos X son generados al impactar los electrones en el blanco. Estos salen del blanco en todas direcciones, por lo cual se requiere el uso de colimadores para obtener un haz efectivo. Se debe mantener un vacío dentro del recubrimiento de vidrio para evitar que los electrones interactúen con moléculas de gas.

El filamento debe ser de un metal con un punto de fusión alto. El tungsteno (punto de fusión de  $3370^{\circ}\text{C}$ ) es el material de elección en la mayoría de los tubos de rayos X. Se utiliza una corriente de bajo amperaje para calentar el filamento, la razón a la que se liberan

los electrones aumenta con la corriente del filamento. El filamento se encuentra montado dentro de una copa de enfoque cargada negativamente

Se conoce como punto focal al volumen del blanco dentro del cual los electrones son absorbidos y los rayos X son producidos. Entre más fino sea el filamento, el punto focal será menor y la radiografía será más clara.

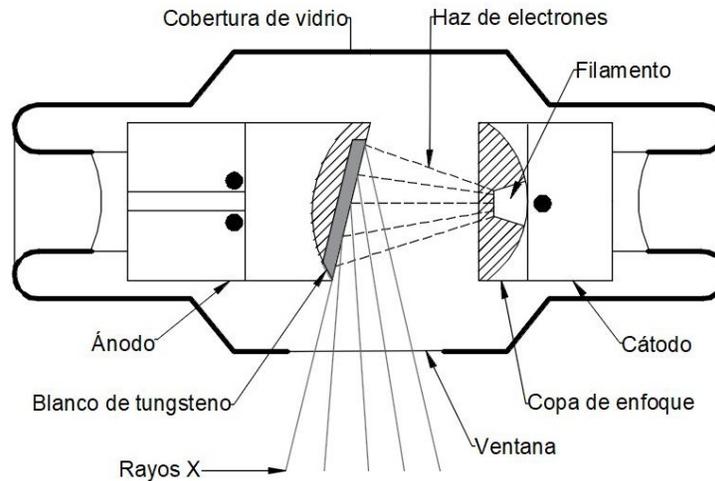


Figura 2.5 Componentes principales de un tubo de rayos X

## 2.3 Mecanismos de interacción de rayos X con la materia

### 2.3.1 Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es la expulsión de un electrón de un átomo por la absorción de un fotón incidente. Al electrón expulsado se le conoce como fotoelectrón. La emisión de rayos X característicos puede ser precedida por la ionización de capas atómicas internas por medio del efecto fotoeléctrico.

La energía cinética del fotoelectrón está dada por la diferencia entre la energía del fotón incidente ( $E = h\nu$ , donde  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  la frecuencia del fotón) y la energía atómica de enlace del electrón.

Para energías lejos del borde de absorción y dentro del rango no relativista, la sección eficaz  $\tau_k$  para la expulsión de un electrón de la capa K está dada por [7]:

$$\tau_k = \frac{32\sqrt{2}}{3} \pi r_0^2 \frac{Z^5}{(137)^4} \left(\frac{m_0 c^2}{h\nu}\right)^{7/2} \quad (2.5)$$

### 2.3.2 Dispersión Compton

La dispersión Compton (Figura 2.6) es el proceso por el cual un fotón es dispersado por un electrón de capas externas, resultando en un fotón menos energético y un electrón dispersado con la energía perdida por el fotón.

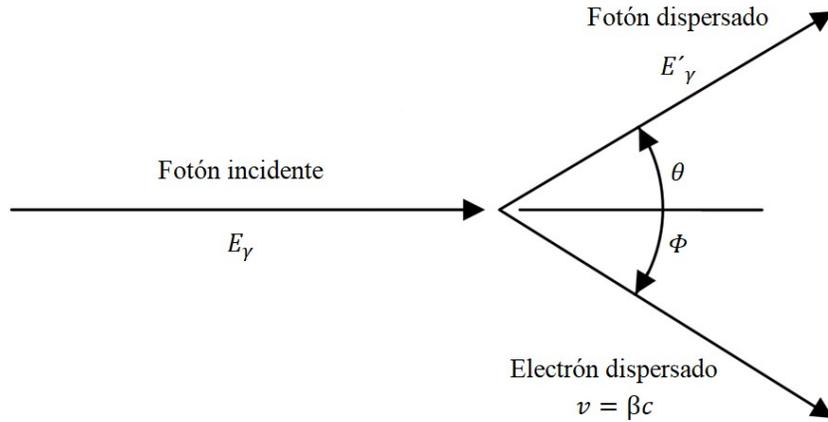


Figura 2.6 Dispersión Compton

Consideremos al electrón que interactúa como un electrón libre y en reposo (una buena aproximación ya que la energía del fotón es generalmente muy grande comparada con las energías orbitales de los electrones atómicos de capas externas débilmente unidos). La conservación del momento lineal y de la energía nos dice qué [8]:

$$\frac{E_\gamma}{c} = \frac{E'_\gamma}{c} \cos(\theta) + \frac{mc\beta \cos\Phi}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (2.6)$$

$$0 = \frac{E'_\gamma}{c} \sin(\theta) - \frac{mc\beta \sin\Phi}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (2.7)$$

$$E_\gamma + mc^2 = E'_\gamma + \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (2.8)$$

Si observamos al fotón dispersado podemos eliminar las variables no observadas  $\beta$  y  $\Phi$ , obteniendo así la fórmula de dispersión de Compton:

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + (E_{\gamma}/mc^2)(1 - \cos\theta)} \quad (2.9)$$

### 2.3.3 Producción de pares

La producción de pares es el proceso por el cual un fotón con una energía mínima de 1.022 MeV pierde toda su energía ( $h\nu$ ) al encontrarse en la cercanía de un núcleo atómico, creando un electrón y un positrón (el par) y proporcionándoles una cierta energía cinética (Figura 2.7).

Dado que la masa del núcleo es muy grande, podemos ignorar la energía que toma el retroceso del núcleo, de tal manera que el balance de energías queda de la siguiente manera [9]:

$$h\nu = E_{-} + E_{+} = (m_0c^2 + K_{-}) + (m_0c^2 + K_{+}) = K_{-} + K_{+} + 2m_0c^2 \quad (2.10)$$

donde  $E_{-}$  y  $E_{+}$  son las energías relativistas totales del electrón y el positrón respectivamente,  $K_{-}$  y  $K_{+}$  son las energías cinéticas y  $m_0c^2$  la energía en reposo tanto del electrón como del positrón.

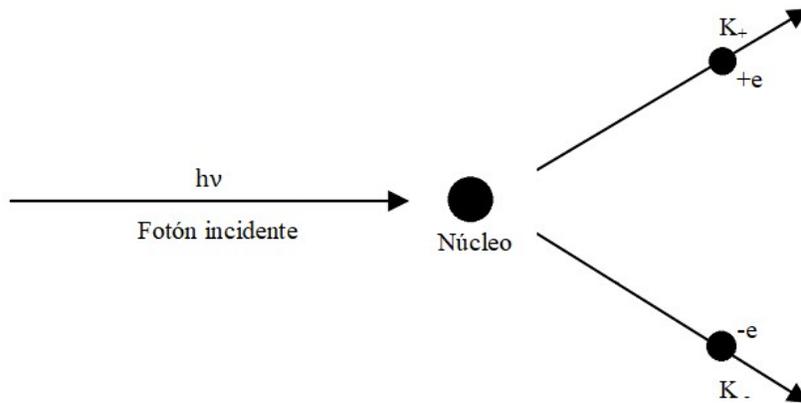


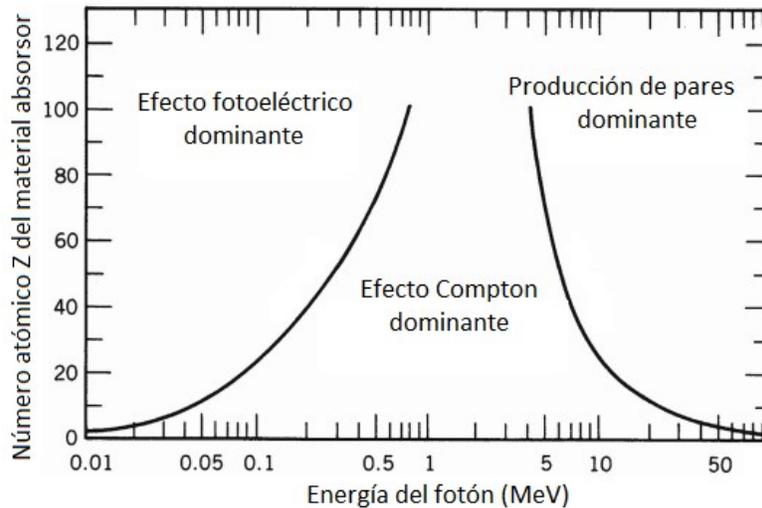
Figura 2.7 Proceso de producción de pares

### 2.3.4 Dispersión Rayleigh

La dispersión Rayleigh es el proceso por el cual un fotón es dispersado por los electrones de un átomo. El átomo no es excitado ni ionizado como resultado de esta interacción y después de la interacción los electrones regresan a su estado original, es decir, la dispersión es elástica y no existe transferencia de energía al átomo. Al aumentar el número atómico del átomo la dispersión Rayleigh se hace más probable.

### 2.3.5 Atenuación de rayos X con la materia

Consideremos un haz colimado de rayos X monoenergético (fotones de la misma energía). Al incidir en un material este será atenuado. Los fotones pueden interactuar con el material por medio de dispersión Compton, efecto fotoeléctrico o producción de pares. En la Gráfica 2.2 se muestran las regiones de energía del haz incidente y número de protones del material atenuador en que cada proceso predomina.



Gráfica 2.2 [10] Regiones de energía del haz incidente y número de protones del material atenuador en que cada proceso predomina.

La ley de Lambert nos dice que *camino iguales en el mismo medio absorbente atenúan fracciones iguales de radiación* [11]. Supongamos que para la longitud de camino  $dx$ , la intensidad  $I$  es reducida en  $dI$ . Entonces,  $dI/I \propto dx$ , ó [11]

$$\frac{dI}{I} = -\mu_1 dx \quad (2.11)$$

entonces

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.12)$$

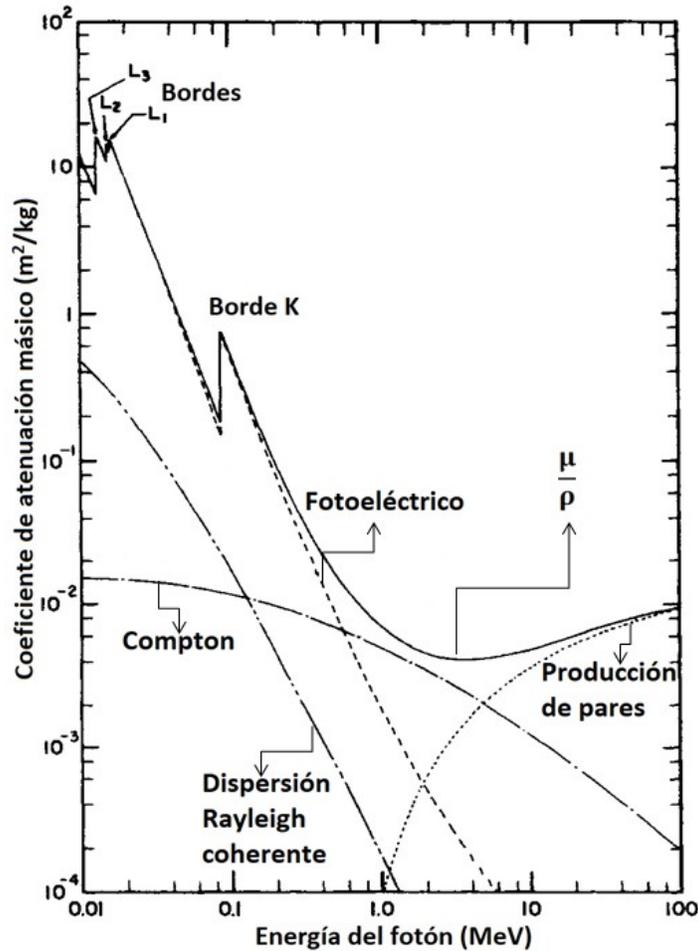
donde  $\mu$  es el coeficiente lineal de atenuación, el cual representa la probabilidad total por energía de longitud de remover un fotón y está dado por la suma de las respectivas probabilidades de absorción por efecto fotoeléctrico ( $\tau$ ), dispersión Compton ( $\sigma$ ) y producción de pares ( $\kappa$ ) [8]:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (2.13)$$

En los casos en que se requiere expresar la atenuación de la radiación en función de la masa encontrada en vez de la distancia recorrida, se utiliza el coeficiente de atenuación

másica  $\frac{\mu}{\rho}$ , el cual se obtiene al dividir el coeficiente de atenuación lineal entre la densidad del material atenuador.

En la Gráfica 2.3 podemos observar las contribuciones de los 3 procesos mencionados en el coeficiente de atenuación lineal para plomo.



Gráfica 2.3 [12] Coeficiente de atenuación másico del plomo. Se indican las contribuciones de cada uno de los procesos involucrados.

Las discontinuidades en la curva de  $\frac{\mu}{\rho}$  se conocen como bordes de absorción y ocurren cuando la energía del fotón incidente es igual a la energía de enlace de alguno de los electrones en las capas internas.

### 2.3.6 Producción de fluorescencia secundaria

A la emisión de rayos X característicos por parte de un material que ha sido excitado por irradiación de rayos X se le conoce como fluorescencia de rayos X o rayos X secundarios (Figura 2.8).

En una muestra uniforme, la parte del efecto fotoeléctrico del coeficiente lineal de atenuación ( $\mu$ ) es proporcional al número de fotones fluorescentes que salen de la muestra.

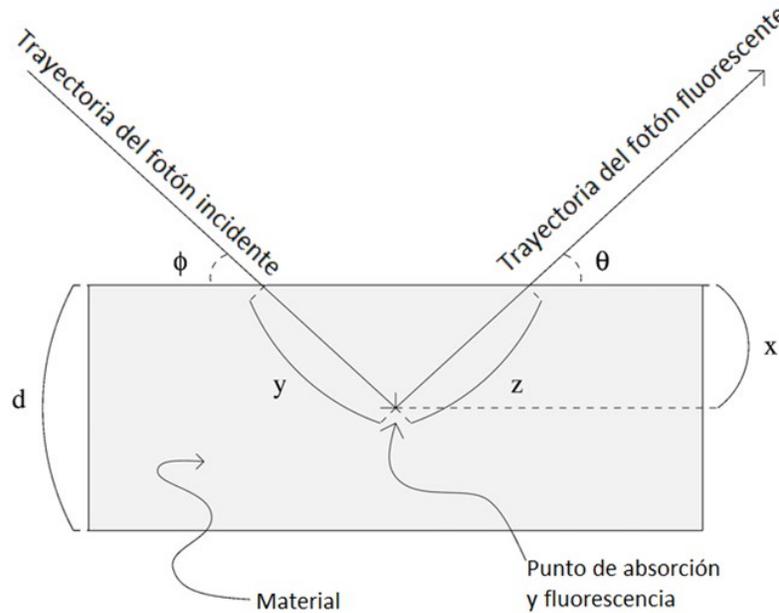


Figura 2.8 [13] Geometría de producción de fluorescencia

A continuación calculamos la intensidad de fluorescencia generada por un material con un grosor  $d$  en el cuál incide un fotón a un ángulo  $\Phi$ , se absorbe y se produce la fluorescencia a una profundidad  $X$  y se emite el fotón fluorescente a un ángulo  $\theta$  (Figura 2.8). La eficiencia de producción de fluorescencia en el punto de absorción es proporcional a la intensidad de los rayos incidentes.

De la ecuación (2.12) sabemos que la intensidad a una profundidad  $y$  está dada por:

$$I = I_0 e^{-\mu(E)y} \quad (2.14)$$

Al producirse los fotones fluorescentes, estos deben escapar de la muestra. El flujo de fluorescencia desde este punto en la muestra está dado por [13]:

$$I_f = I_0 e^{-\mu(E)y} e^{-\mu(E_f)z} \varepsilon_a(E) \mu(E) \quad (2.15)$$

donde  $\varepsilon_a(E)$  es la eficiencia de fluorescencia por unidad de ángulo sólido, E es la energía del haz incidente y  $E_f$  es la energía de los fotones fluorescentes. La ecuación (2.15) sólo es válida para una y y una z particular, por lo que debemos integrar [13]:

$$dI_f = I_0 \varepsilon_a \mu(E) e^{-(\mu_T y + \mu_f z)} dy \quad (2.16)$$

donde  $\mu_T = \mu(E)$  y  $\mu_f = \mu(E_f)$ . Las variables y y z son dependientes por medio de  $y \sin \Phi = z \sin \theta = x$ . Cambiando las variables tenemos que [13]:

$$dI_f = I_0 \varepsilon_a \mu(E) \frac{1}{\sin \Phi} e^{-\left(\frac{\mu_T}{\sin \Phi} + \frac{\mu_f}{\sin \theta}\right)x} dx \quad (2.17)$$

integrando de ambos lados [13]:

$$I_f = I_0 \varepsilon_a \mu(E) \frac{1}{\sin \Phi} \int_0^d e^{-\left(\frac{\mu_T}{\sin \Phi} + \frac{\mu_f}{\sin \theta}\right)x} dx \quad (2.18)$$

resolviendo la integral ( $\frac{\mu_T}{\sin \Phi} + \frac{\mu_f}{\sin \theta} = \alpha$ )

$$\int_0^d e^{-\alpha x} dx = -\frac{1}{\alpha} \int_0^d e^{-\alpha x} (-\alpha) dx = \frac{1}{\alpha} [1 - e^{-\alpha d}] \quad (2.19)$$

sustituyendo (2.19) en (2.18)

$$I_f = \frac{I_0 \varepsilon_a \mu(E)}{\mu_T + g \mu_f} [1 - e^{-\left(\frac{\mu_T}{\sin \Phi} + \frac{\mu_f}{\sin \theta}\right)d}] \quad (2.20)$$

donde  $g \equiv \sin \Phi / \sin \theta$

## 2.4 Funcionamiento de detectores de rayos X para la producción de imágenes

### 2.4.1 Cristales centelladores inorgánicos

Se conoce como un cristal centellador a los cristales que presenta el fenómeno de centelleo al ser expuesto a radiación ionizante (es decir, fluorescen). Existen centelladores orgánicos e inorgánicos. A continuación se explica el proceso de centelleo en los cristales inorgánicos aislantes, los cuales son de interés para este trabajo.

Debido a la estructura de una red cristalina, las dos bandas energéticas extremas son la de conducción y la de valencia, las cuales se encuentran separadas por una “banda prohibida” (Figura 2.9) En un material aislante los estados energéticos de la banda de valencia se encuentran generalmente llenos, mientras que los de la banda de conducción se encuentran vacíos. La radiación incidente puede excitar un electrón y hacerlo saltar de la banda de valencia a la de conducción, haciéndolo atravesar la banda prohibida; eventualmente, este electrón emitirá energía y regresará a la banda de valencia.

Con el fin de evitar la autoatenuación del fotón y aumentar las probabilidades de emisión del mismo, se contamina el cristal con impurezas llamadas activadores. Los activadores proveen estados energéticos a la banda prohibida y la emisión de luz se lleva a cabo entre los estados de los activadores.

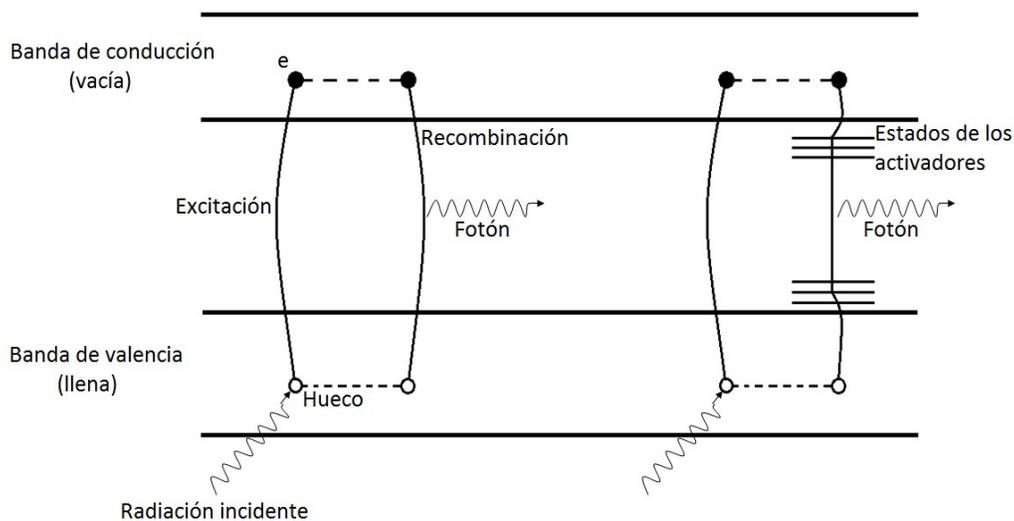


Figura 2.9 Bandas de energía en un cristal sin activadores (izquierda) y con activadores (derecha)

## 2.4.2 Detectores planos de centelleo

Los detectores planos de centelleo de rayos X están dispuestos de la siguiente manera: primero se encuentra una película de un material centellador que se encarga de transformar los rayos X incidentes en luz por medio del efecto de fluorescencia. A contacto con la película se encuentra un arreglo de fotodiodos de silicón amorfo (a-Si) que convierten la luz en electrones. Cada fotodiodo tiene asociado un interruptor de transistor de películas finas (TFT por sus siglas en inglés). La carga producida por los fotodiodos es leída activando los interruptores TFT asociados. Para este propósito, los arreglos de los detectores planos son acoplados en dos bordes opuestos para escanear chips que activan secuencialmente filas de TFTs (líneas de escaneo). La información electrónica generada en este proceso es convertida a una señal digital que es recibida por la computadora y el software convierte esta información en una imagen de alta calidad.

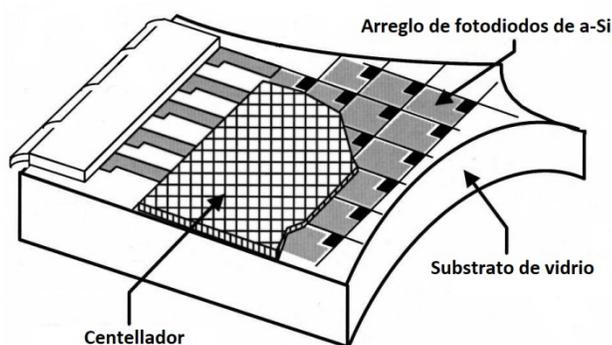


Figura 2.10 [14] Diagrama de un detector plano de centelleo



## 3. Desarrollo experimental

### 3.1 Descripción del dispositivo

En esta sección se describen las características del dispositivo de radiografía digital utilizado en el LANCIC del IFUNAM.

#### 3.1.1 Fuente de rayos X

La fuente de rayos X es el sistema portátil de rayos X PXM-40BT de la marca POSKOM con las siguientes características reportadas por el fabricante

- Intervalo de voltaje del tubo: 40 – 100 kV ( $\pm 7\%$ ) en pasos de 1 kV
- Intervalo de corriente del tubo: 0.4 – 100 mAs ( $\pm 10\%$ ) en 35 pasos.
- Punto focal del tubo: 1.2 x 1.2 mm
- Ángulo del blanco:  $16^\circ$
- Filtraje inherente: 0.8 mm de Al
- Contenido calórico del ánodo: 14 kJ
- Máxima razón de disipación de calor del ánodo: 14 kJ
- Mínimas dimensiones del campo de rayos X: 5x5 cm a 100 cm del detector.
- Máximas dimensiones del campo de rayos X: 47x47 cm a 100 cm del detector.

El irradiador consiste de las siguientes partes y dispositivos:

- Disparador de mano.

El disparador de mano (Figura 3.1) es un interruptor blanco que se conecta directamente al cuerpo principal del irradiador.



Figura 3.1 Disparador de mano

Su operación está compuesta por dos etapas:

— Modo PREP (ver Figura 3.2)

Este modo se obtiene al bajar únicamente la primera sección del interruptor. Nos permite revisar que esté funcionando y enciende la luz del colimador.

— Modo Exposición (ver Figura 3.3)

Este modo se obtiene al oprimir por completo el interruptor, al hacerlo se realiza la exposición de rayos-X.



Figura 3.2 Modo PREP



Figura 3.3 Modo exposición

- Cuerpo principal del irradiador (Figura 3.4)

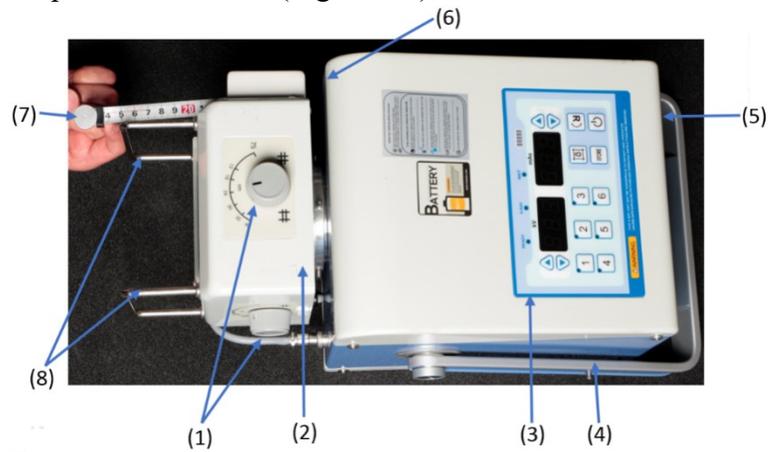


Figura 3.4 Cuerpo principal del irradiador

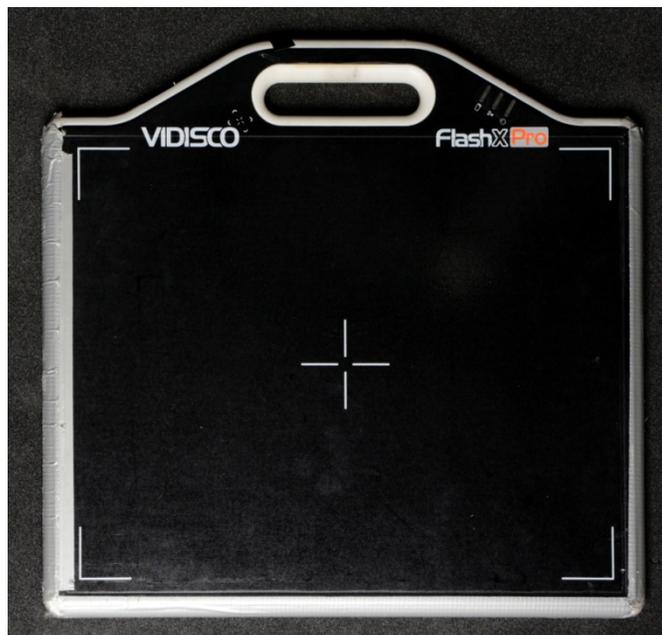
**Tabla 3.1 Partes del irradiador**

(1)	Perillas del colimador
(2)	Colimador
(3)	Panel de operación
(4)	Asa de metal
(5)	Conector de carga
(6)	Conector del interruptor manual
(7)	Cinta métrica
(8)	Guía

### 3.1.2 Detector de rayos X

El detector de rayos X (Figura 3.5) es el Imager FlashX Pro de la marca Vidisco, un detector plano de centelleo de a-Si con oxisulfuro de gadolinio ( $Gd_2O_2S$ ) como cristal centellador. Con las siguientes características (de acuerdo al fabricante):

- Área de imagen: 34.2 cm x 43.2 cm
- Rango dinámico: 16 bits (65 535 tonos de gris)
- Resolución: ~3.5 lp/mm
- Tamaño de pixel: 144  $\mu m$



**Figura 3.5 Detector de centelleo plano FlashX Pro**

### 3.1.3 Unidad de adquisición

- ICU: es la unidad de control del Imager (Imager Control Unit)- ver Figura 3.6 Funciona como la interfaz en tiempo real entre el detector y la laptop.

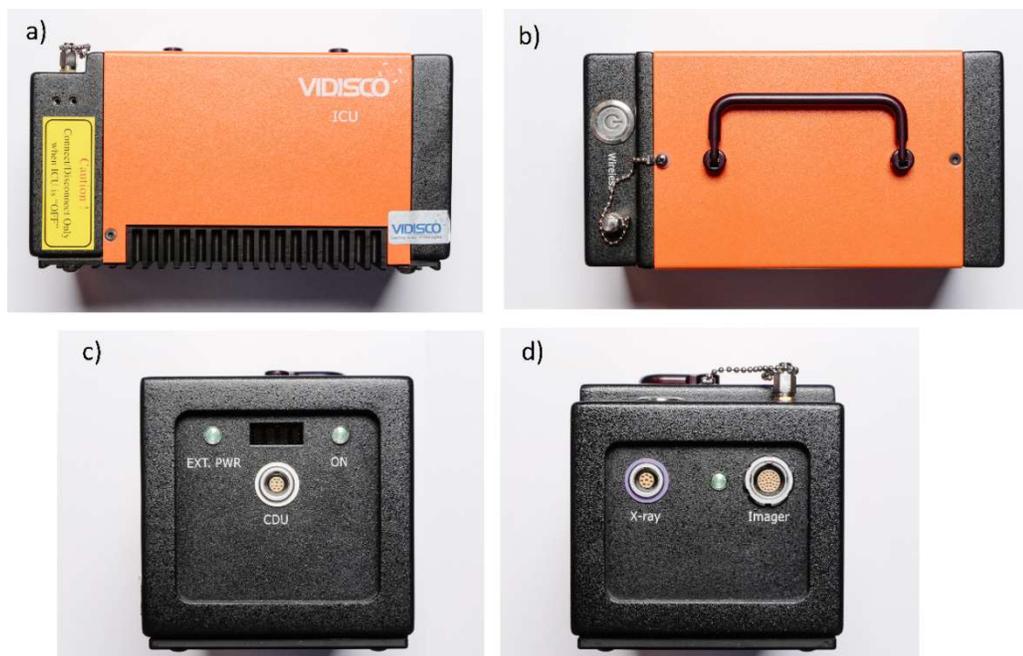


Figura 3.6 a) Vista lateral del ICU. b) Vista superior del ICU. c) Vista posterior del ICU; se observa la entrada de pines del CDU, la luz indicadora de encendido y del cable de corriente. d) Vista frontal del ICU; se observan las entradas de pines del detector, del cable X-ray y la luz indicadora de conexión del detector.

- Computadora de control: se comunica con el ICU a través de una caja de interfaz (Figura 3.7). Estos dos se conectan a través de un cable extensible de 50 m. La computadora cuenta con el software Vidisco Xbit Pro, el cual permite el análisis inmediato de la radiografía.



Figura 3.7 Unidad de adquisición. Se muestran la computadora de control, la interface box y el cable de 50 m con el cual esta se conecta al ICU.

Para una descripción completa de todos los componentes del sistema radiografía digital y los protocolos de trabajo, ver Anexo 1.

### 3.2 Determinación del haz efectivo de radiación

Durante los análisis previos de elementos con superficies grandes, se observó que existía una diferencia considerable entre la luz guía del colimador y el área efectiva de radiación. Además de que en la zona izquierda de las imágenes los tonos de gris tienden al blanco más rápido que del lado derecho, por lo que podemos afirmar que la intensidad en esta zona del cono de radiación es menor. En la Figura 3.8 se muestra la radiografía de una pintura (San Jerónimo) En ella se presentan 3 rectas sobre las cuales se realizó un perfil de grises. Podemos observar en las gráficas como el tono de gris decae en esta zona.

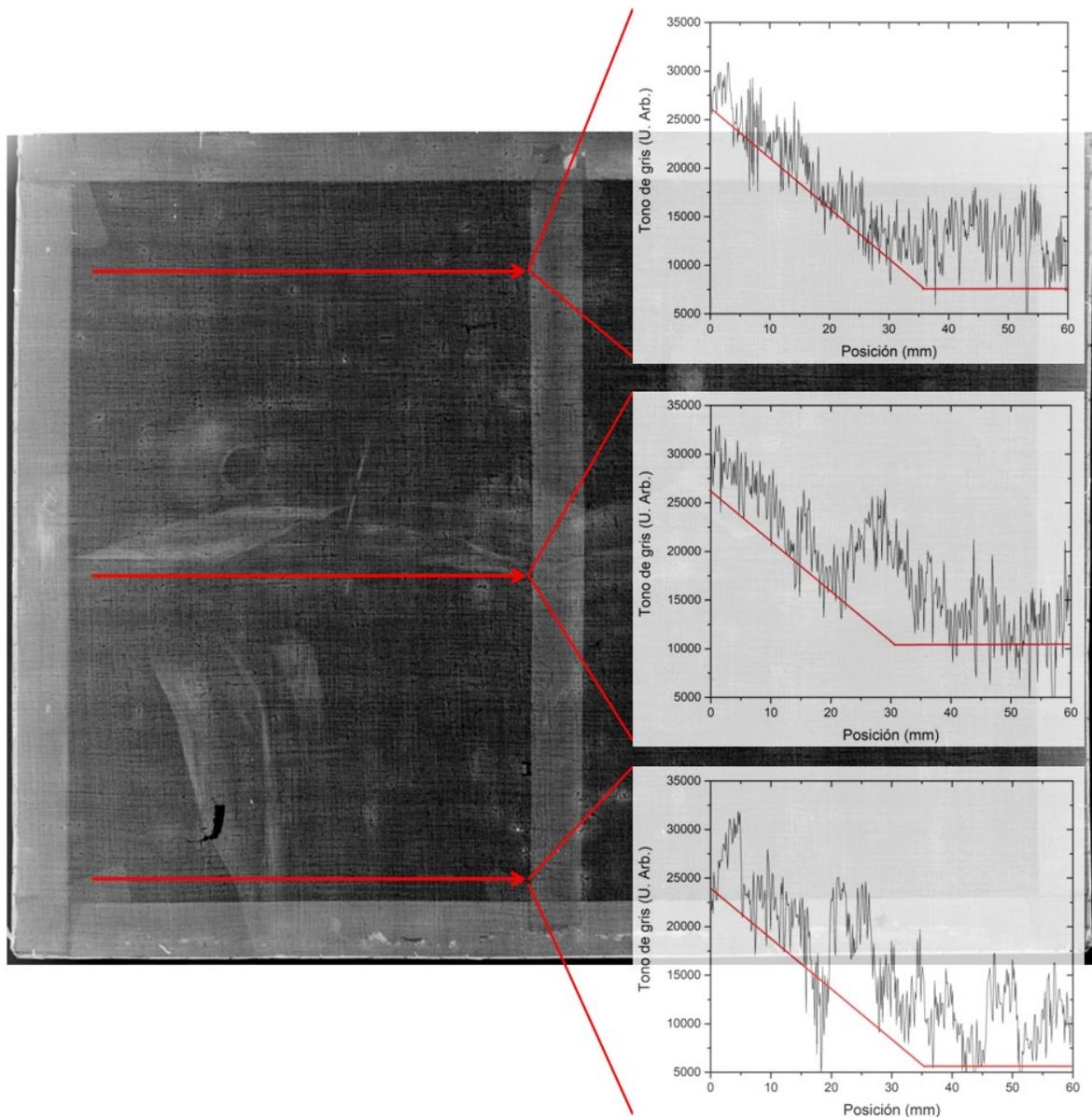


Figura 3.8 Radiografía de San Jerónimo (catedral de Puebla). Se presenta el perfil de grises de 3 rectas sobre el lado izquierdo de la pintura. Las rectas en las gráficas representan la línea base del gradiente.

Con el objetivo de determinar un área efectiva de radiación para un mejor análisis de los objetos de estudio, se realizó una radiografía del haz completo con una distancia irradiador-detector de 1 y 2 m.

Se utilizó un riel para desplazar horizontalmente el detector y dos tripiés con pinzas para desplazarlo verticalmente. Se colocaron referencias horizontales y verticales con distintas piezas metálicas. Se tomaron las radiografías necesarias en cada distancia para cubrir el área comprendida por la luz guía del irradiador (Figura 3.9 y 3.10). Después, utilizando las referencias metálicas se ensamblaron las radiografías para obtener una imagen del haz de radiación.

4	5	6
3	2	1

Figura 3.9 Guía que nos muestra en qué posición y órdenes se tomaron las radiografías para formar la imagen del cono de radiación a una distancia de 2 m.

22	23	24	25	26	27	28
21	20	19	18	17	16	15
8	9	10	11	12	13	14
7	6	5	4	3	2	1

Figura 3.10 Guía que nos muestra en qué posición y órdenes se tomaron las radiografías para formar la imagen del cono de radiación a una distancia de 2 m.

Se utilizó el programa Photoshop CS3 para empalmar las radiografías y obtener la imagen completa. Después, utilizando el programa ImageJ, se determinó un área en donde los tonos de gris fueran uniformes.

Los resultados de este experimento se presentan en la sección 4.1.

### 3.3 Respuesta del detector

Dada la gran variedad de objetos de análisis con los que se trabaja en el LANCIC-IF, se requiere una forma de conocer la respuesta del detector en función de la energía utilizada, independientemente del material que se está analizando. Para esto, se tomaron radiografías de los elementos que se muestran en la Tabla 3.2 a las corrientes y voltajes que se muestran en la Tabla 3.3

**Tabla 3.2 Materiales utilizados para conocer la respuesta del detector. El grosor asociado al Cu es el reportado por el fabricante, el cual no reporta ninguna incertidumbre.**

Material	C	Al	Cu	Ni
Grosor (mm)	1.15±0.05	1.90±0.05	0.025±0.001	0.006±0.001
	3.15±0.05	2.90±0.05	0.050±0.001	0.012±0.001
	5.07±0.05	3.90±0.05	0.075±0.001	0.018±0.001
	6.95±0.05	4.60±0.05		
	8.90±0.05	6.50±0.05		
	10.00±0.05			
	12.00±0.05			
	1.15±0.05			

**Tabla 3.3 Condiciones de irradiación utilizadas para conocer la respuesta del detector.**

Corriente (mAs)	1.6±0.2	2.5±0.3	4.5±0.5	9.0±0.9	21.0±2.1
Voltaje (kV)	90±6.3	75±5.3	60±4.2	50±3.5	40±2.8
	93±6.5	78±5.5	63±4.4	53±3.7	43±3.0
	96±6.7	81±5.7	66±4.6	56±3.9	46±3.2
	99±6.9	84±5.9	69±4.8	59±4.1	
	100±7.0	87±6.1	72±5.0		

Utilizando el programa ImageJ, se obtuvieron los tonos de grises de cada material para cada condición utilizada. Después se hizo una normalización para cada grosor de cada material de la exposición con el fin de obtener una nube de datos del tono de gris en función de la energía. Por último, se juntaron todos los datos para obtener una curva de respuesta del detector en función de la energía.

Los resultados de este experimento se presentan en la sección 4.2.

### **3.4 Resolución del detector**

Con el objetivo de verificar la resolución dada por el fabricante, se tomó la radiografía de una malla de cobre compuesta por hebras de  $5.588 \times 10^{-3}$  mm y se obtuvo el perfil de grises de una hebra utilizando el programa ImageJ.

Los resultados de este experimento se presentan en la sección 4.3

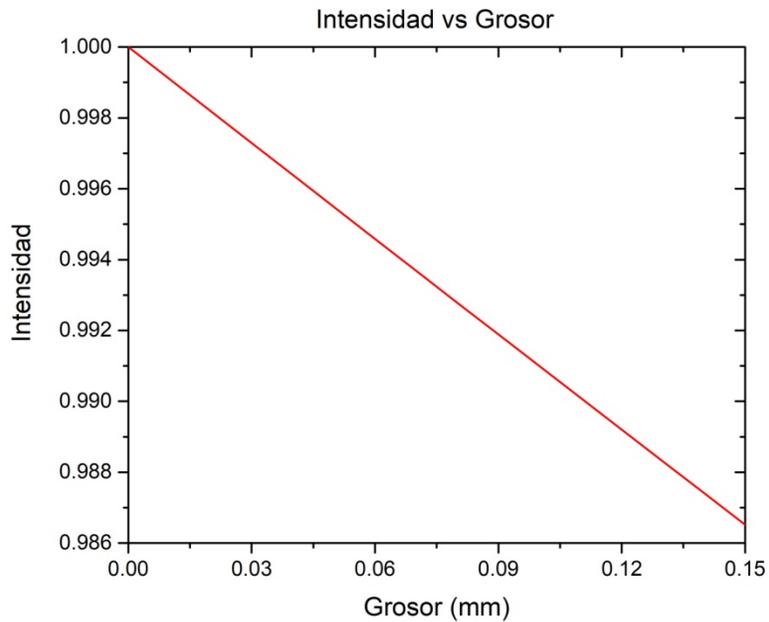
### **3.5 Separación de la aproximación de haces paralelos**

Con el objetivo de conocer a qué distancia irradiador-detector se puede considerar el cono de radiación de rayos X como un haz de rayos paralelos, se tomó la radiografía de un disco de C de  $(17.40 \pm 0.05)$  mm de diámetro y  $(12.00 \pm 0.05)$  mm de grosor a 0.5, 1, 1.5 y 2 m con el disco pegado al detector. Utilizando el programa ImageJ se obtuvo el perfil de grises en el área comprendida por el disco y se analizó la razón de cambio en el tono de gris al inicio y final del disco.

Los resultados de este experimento se presentan en la sección 4.4.

### **3.6 Radiografía de baja energía**

Como se explicó en la sección 2.3.5, la atenuación de los rayos X con la materia, y con esta la creación del contraste en una imagen radiológica, depende de la energía de los rayos X y el grosor del material blanco (entre otros factores). Esto hace que resulte imposible obtener una radiografía con el suficiente contraste de elementos con poco grosor como pergaminos, códigos o páginas de libros, con una energía de 40 kV (la mínima que permite el irradiador PXM-40BT). En la Gráfica 3.1 se observa el cálculo de la atenuación de rayos X (ecuación 2.12) de 40 kV al pasar por papel (suponemos una composición de celulosa ( $C_6H_{10}O_5$ )) con una densidad de  $3.75 \text{ g/cm}^3$ . En el Anexo 2 se muestra el cálculo del coeficiente de atenuación del papel.



**Gráfica 3.1** Gráfica de Intensidad vs Grosor (mm) que muestra la atenuación de rayos X de 40 kV al pasar por papel (celulosa) con una densidad de  $3.75 \text{ g/cm}^3$

De esta gráfica podemos ver que, tomando un papel con un grosor de 0.15 mm, obtenemos una atenuación menor al 2%

Con el objetivo de realizar análisis radiográficos a elementos con las características previamente mencionadas, se realizaron dos experimentos para obtener distribuciones de baja energía a partir del sistema portátil de rayos X PXM-40BT.

### 3.6.1 Disminución de la energía con un filtro

En este experimento el objetivo es utilizar el fenómeno de los bordes de absorción (sección 2.3.5) para “cortar” la distribución de energía del tubo de rayos X de 40 kV a una energía más baja. Primero se realizaron simulaciones de atenuación de rayos X con el programa XOP 2.3 para materiales que tuvieran un borde de absorción entre 16 y 26 keV y que fuera posible conseguir películas del mismo:

**Tabla 3.4 [5]** Materiales con bordes de absorción entre 16 y 26 keV de los que es posible conseguir películas.

Material	E (keV)
Ag	25.52
Pd	24.35
Mo	20.00
Zr	18.00
Sr	16.107

A partir de estas simulaciones se determinó el material para el cual la distribución energética de rayos X de baja energía predomina.

Teniendo la película, se construyó un marco para la misma que permitiera fijarla y removerla con facilidad de la ventana del irradiador. Se tomaron radiografías de la página de un libro utilizando el filtro.

### 3.6.2 Radiografía con fluorescencia de rayos X

Como se explicó en la sección 2.3.6, un material que ha sido excitado por un bombardeo de rayos X puede emitir rayos X secundarios. El objetivo de este experimento es utilizar los rayos X secundarios (que sean de menor energía que los rayos X incidentes) como fuente principal para tomar la radiografía. En la Figura 3.11 se muestra la configuración del experimento. Utilizando la ecuación 2.20 y tomando en cuenta la energía de los rayos X  $K_{\alpha}$ , se determinó cual sería la película que produzca la distribución energética más adecuada.

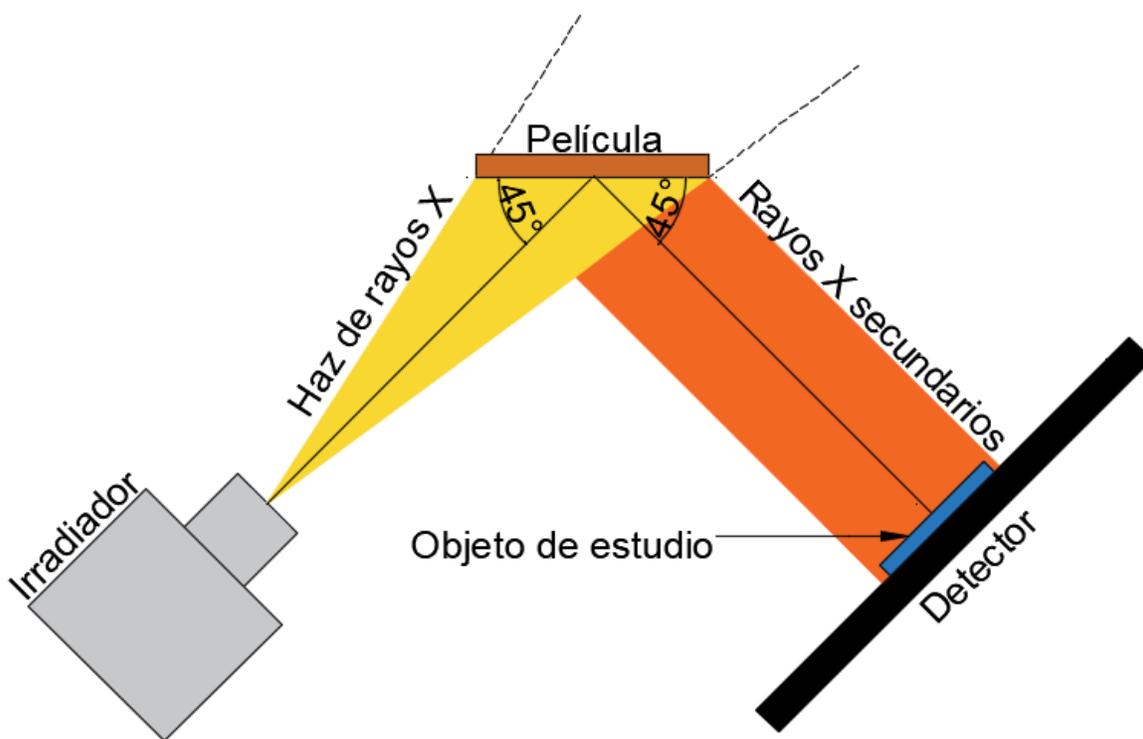


Figura 3.11 Configuración del experimento de radiografía por fluorescencia de rayos X.

Se hizo la prueba de tomar la radiografía de una página de un libro y una rondana.

Los resultados de estos experimentos se presentan en la sección 4.5.



## 4. Resultados y análisis

Tal como se describe en el capítulo previo, el sistema de radiografía digital se caracterizó a través de cinco experimentos: determinación del haz efectivo de radiación, respuesta del detector, resolución del detector, separación de la aproximación de haces paralelos y radiografía de baja energía. En este capítulo se presentan los resultados.

### 4.1 Determinación del haz efectivo de radiación

#### 4.1.1 Medición con una distancia irradiador-detector de $(1.000 \pm 0.0005)\text{m}$

En la Figura 4.1 se muestra la radiografía del haz de radiación del irradiador con una distancia irradiador-detector de  $(1.000 \pm 0.0005)\text{m}$

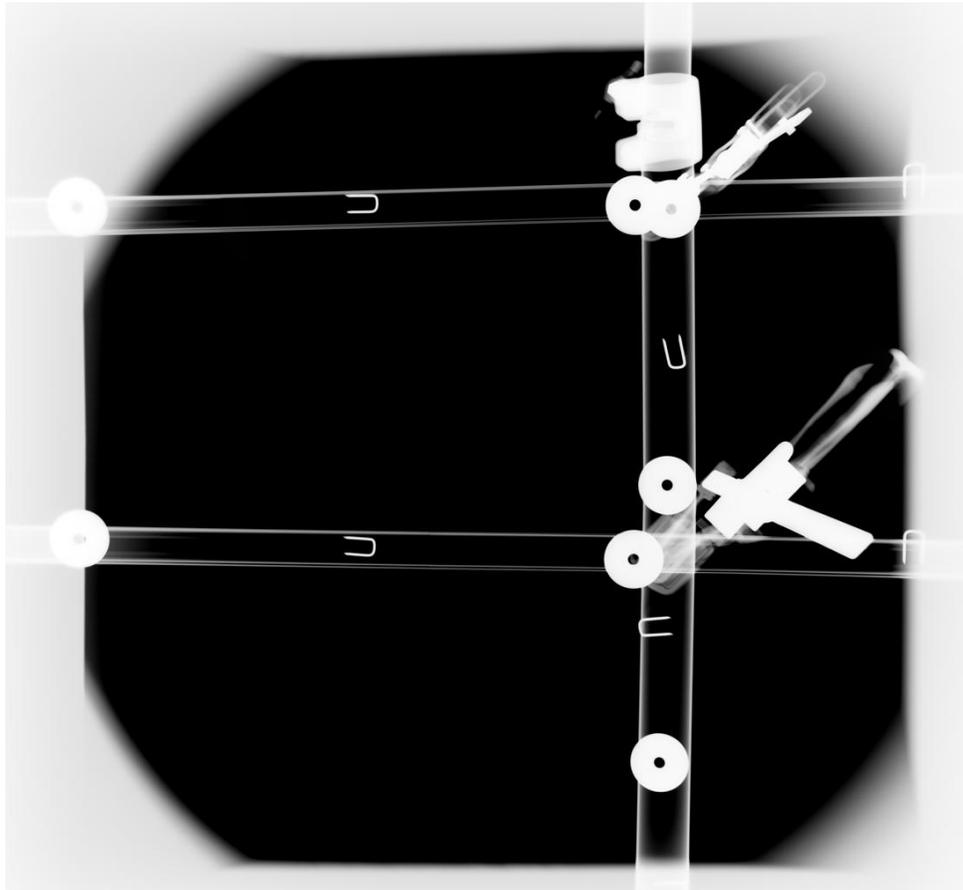


Figura 4.1 Radiografía a una distancia irradiador-detector de  $(1.000 \pm 0.0005)\text{m}$  del haz de radiación, formada por 6 mosaicos. En la imagen se observan las referencias utilizadas para ensamblar los mosaicos.

Como se mencionó en la sección 3.1.2, el detector forma una imagen con 65535 tonos de gris, donde el negro es 0 y el blanco es 65535 (imagen negativa). Esto quiere decir que

cuando el tono de gris es 0, ha llegado al detector el máximo de radiación, mientras que cuando es 65535 no se ha detectado radiación.

Primero se estableció un perímetro en la radiografía en el cual no se rebasara el 200 en tono de gris. En la Figura 4.2 se muestra el perímetro obtenido junto con su perfil de grises (Tono de gris vs Posición). La posición cero se marca en la Figura 4.2 a) y avanza en el sentido que muestran las flechas. Los picos que se muestran en la gráfica son los puntos en que las referencias cruzan el perímetro. Se logró establecer un perímetro en donde no se alcanza el 150 en tono de gris (sin contar los picos de las referencias)

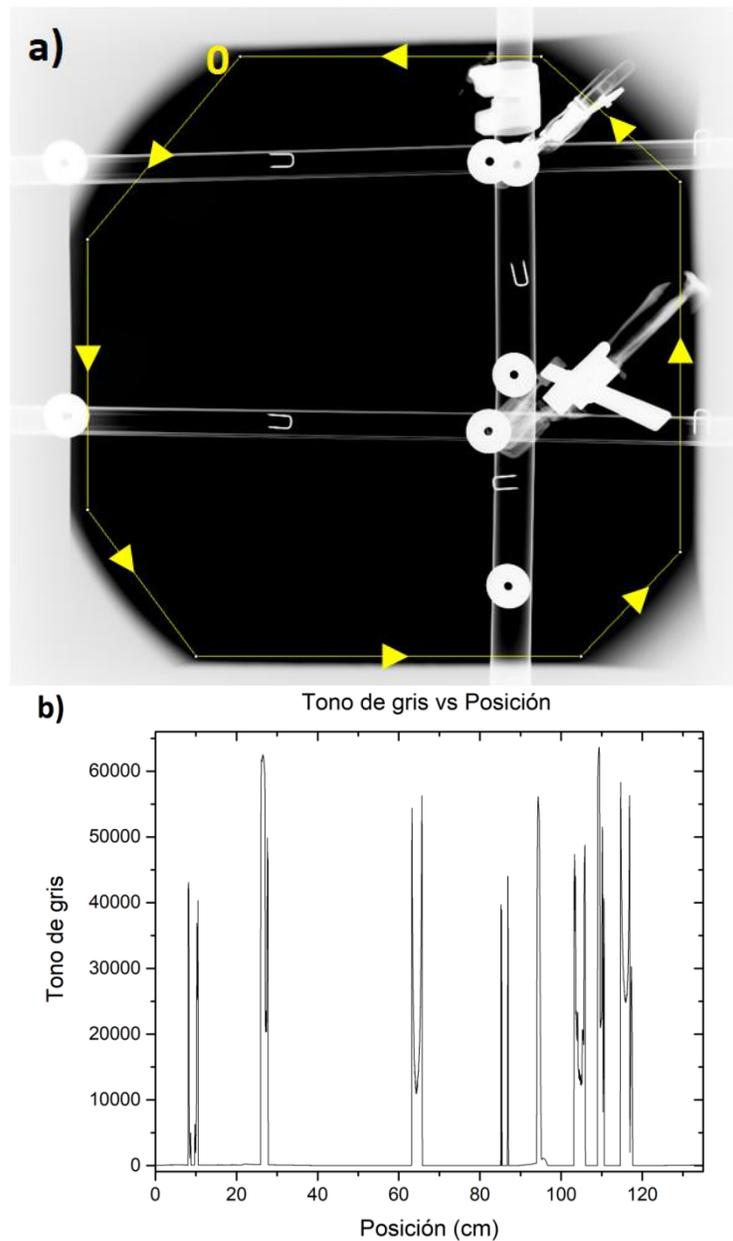


Figura 4.2 a) Perímetro en el cual no se rebasa el tono de gris 150. b) Perfil de grises correspondiente al perímetro (Tono de gris vs Posición (cm)) Los picos corresponden al punto en el que el perfil de gris cruza las referencias.

Después se realizaron 10 perfiles de grises dentro del perímetro para asegurar que no rebasara el tono de gris 200 en ningún punto. Estos perfiles se pueden ver en el Anexo 3. Se encontró que, al igual que en el perímetro, no se rebasa en ningún punto el 150.

Habiendo establecido que dentro del perímetro de la Figura 4.2 a) tenemos una distribución de radiación uniforme que nos permite realizar radiografías de calidad, se determinó un área rectangular dentro de este perímetro, haciendo que el área fuera lo más grande posible (rectángulo rojo en la Figura 4.3) La razón para buscar un área rectangular es la facilidad de poder determinarla de forma práctica con un sistema de láseres.

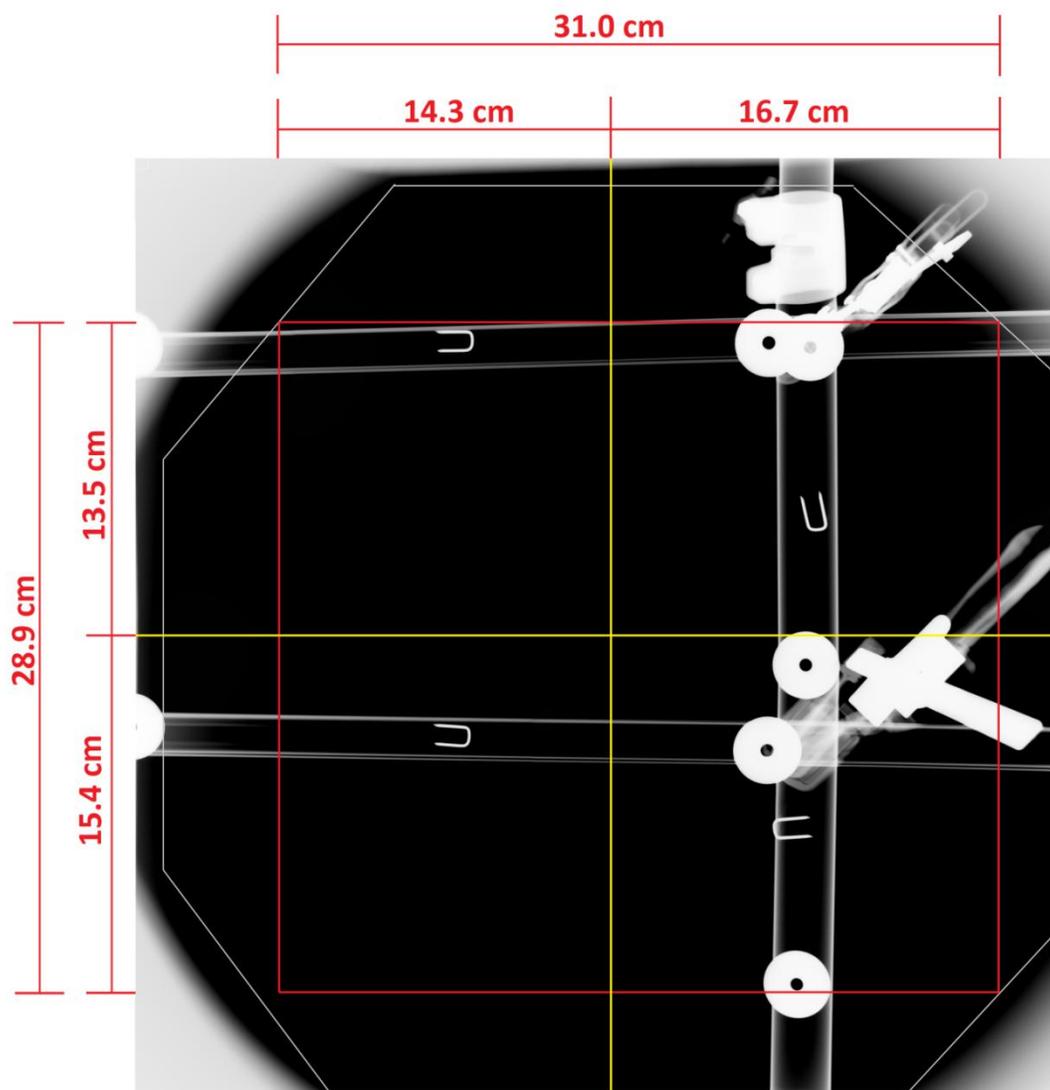


Figura 4.3 Rectángulo dentro del área de radiación efectiva. Se muestra el centro del haz de radiación con una cruz amarilla.

Podemos ahora hacer una comparación entre el área indicada por la luz guía del colimador  $(52.0 \pm 0.05) \text{ cm} \times (52.0 \pm 0.05) \text{ cm}$ , el área efectiva dada por el fabricante  $(47 \times 47$

cm con una distancia irradiador-detector de 1 m) y el área calculada ( $31.000 \pm 0.311$ )cm x ( $28.900 \pm 0.290$ )cm (Figura 4.4)

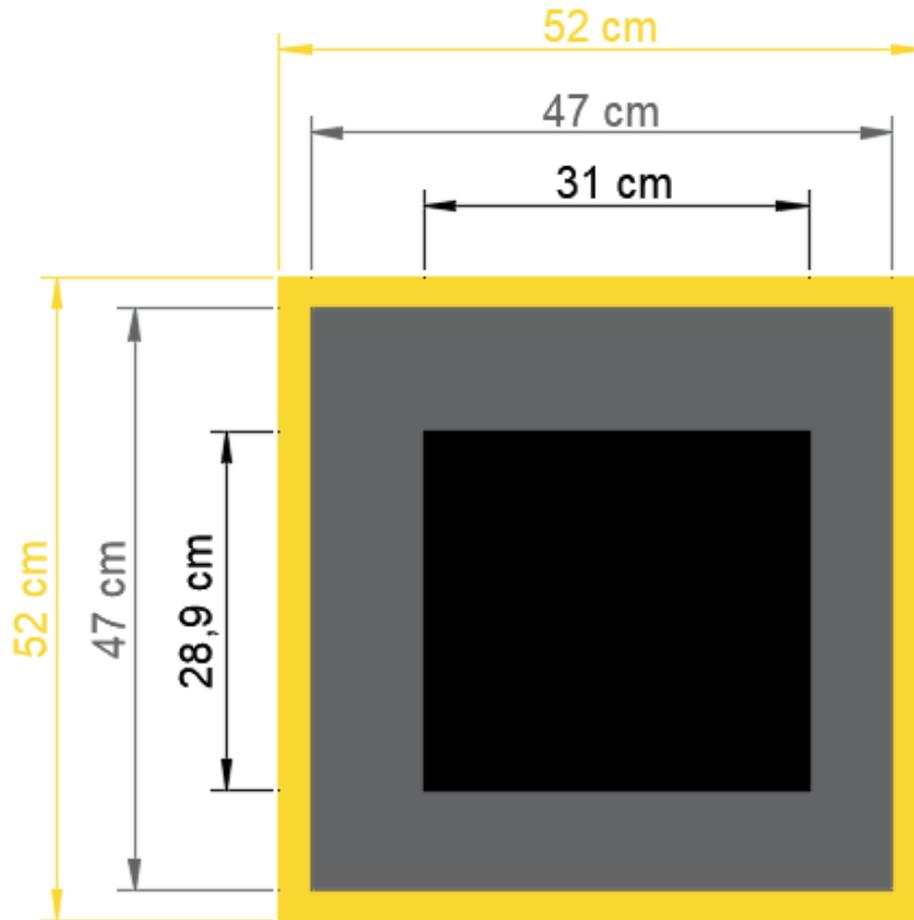


Figura 4.4 En amarillo se muestra el área dada por la luz guía del colimador, en gris el área efectiva reportada por el fabricante y en negro el área calculada.

El área efectiva de radiación presenta una diferencia del 66.9% con la luz guía del colimador y del 59.4% con el área reportada por el fabricante.

#### 4.1.2 Medición con una distancia irradiador-detector de $(2.000\pm 0.0005)\text{m}$

En la Figura 4.5 se muestra la radiografía del haz de radiación del irradiador con una distancia irradiador-detector de  $(1.000\pm 0.0005)\text{m}$

Al ser el doble de la distancia que en el caso anterior, hay mayor dispersión y atenuación de los rayos X con el aire, por lo que el menor tono de gris alcanzado se encuentra alrededor del 19000. Se buscó que en el perímetro no se alcanzara el tono de gris 30000. En la Figura 4.6 se muestra el perímetro obtenido junto con su perfil de grises (Tono de gris vs Posición). La posición cero se marca en la Figura 4.6 a) y avanza en el sentido que muestran las flechas. Los picos que se muestran en la gráfica son los puntos en que las referencias cruzan el perímetro. Se logró establecer un perímetro en donde no se alcanza el tono de gris 29000 (sin contar los picos de las referencias).

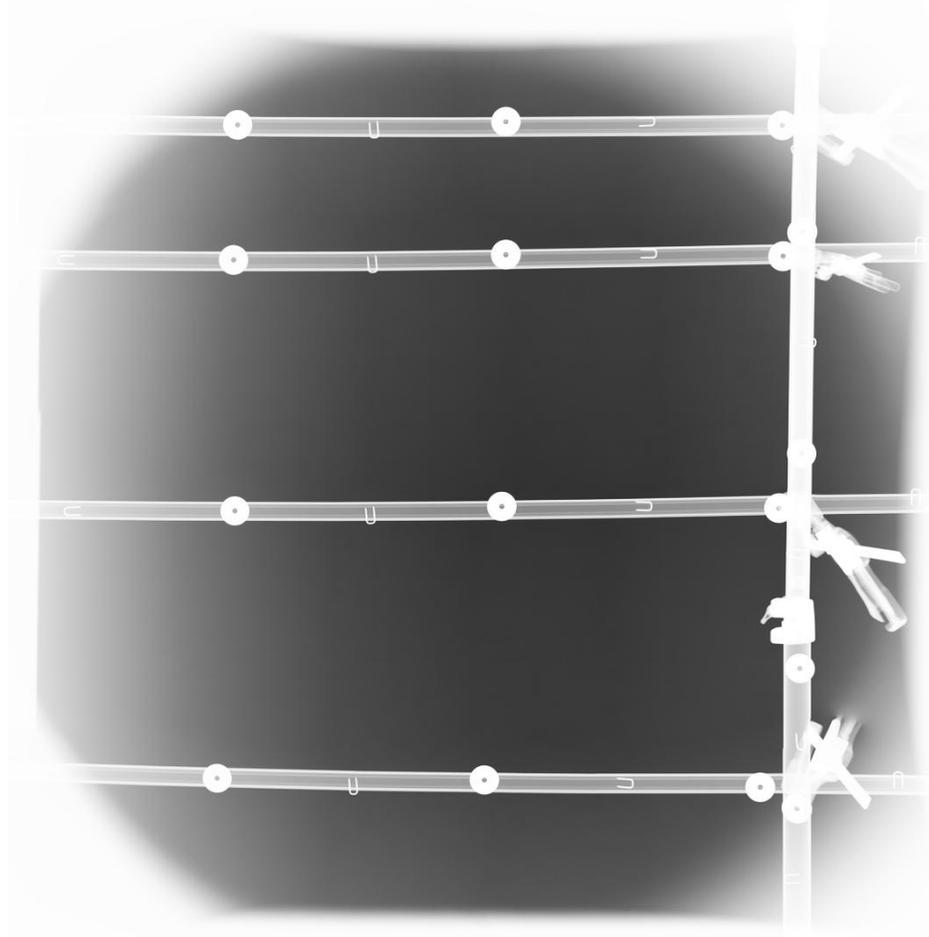


Figura 4.5 Radiografía a una distancia irradiador-detector de  $(2.000\pm 0.0005)\text{m}$  del haz de radiación, formada por 22 mosaicos (imagen tratada para mejorar el contraste). En la imagen se observan las referencias utilizadas para ensamblar los mosaicos.

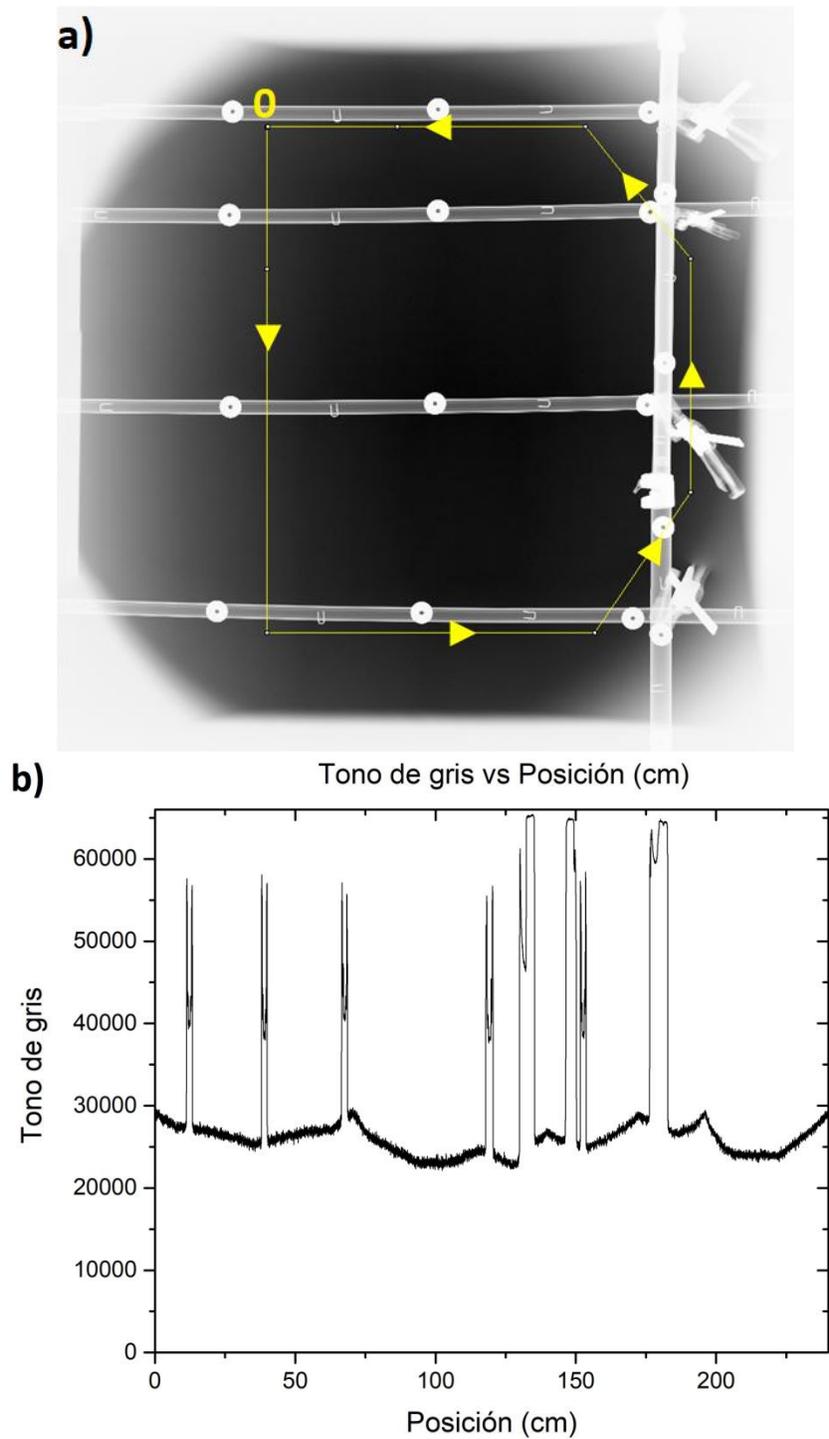


Figura 4.6 a) Perímetro en el cual no se rebasa el tono de gris 150. b) Perfil de grises correspondiente al perímetro (Tono de gris vs Posición (cm)) Los picos corresponden al punto en el que el perfil de gris cruza las referencias.

Después se realizaron 10 perfiles de grises dentro del perímetro para asegurar que no se rebasara el tono de gris 30000 en ningún punto. Estos perfiles se pueden ver en el Anexo 3. Se encontró que no se rebasa en ningún punto el 27000.

Análogamente a la sección 4.1.1, habiendo establecido que dentro de nuestro perímetro tenemos una distribución de radiación uniforme que nos permite realizar radiografías de calidad, se procedió a determinar un área rectangular dentro de este perímetro. (Figura 4.7)

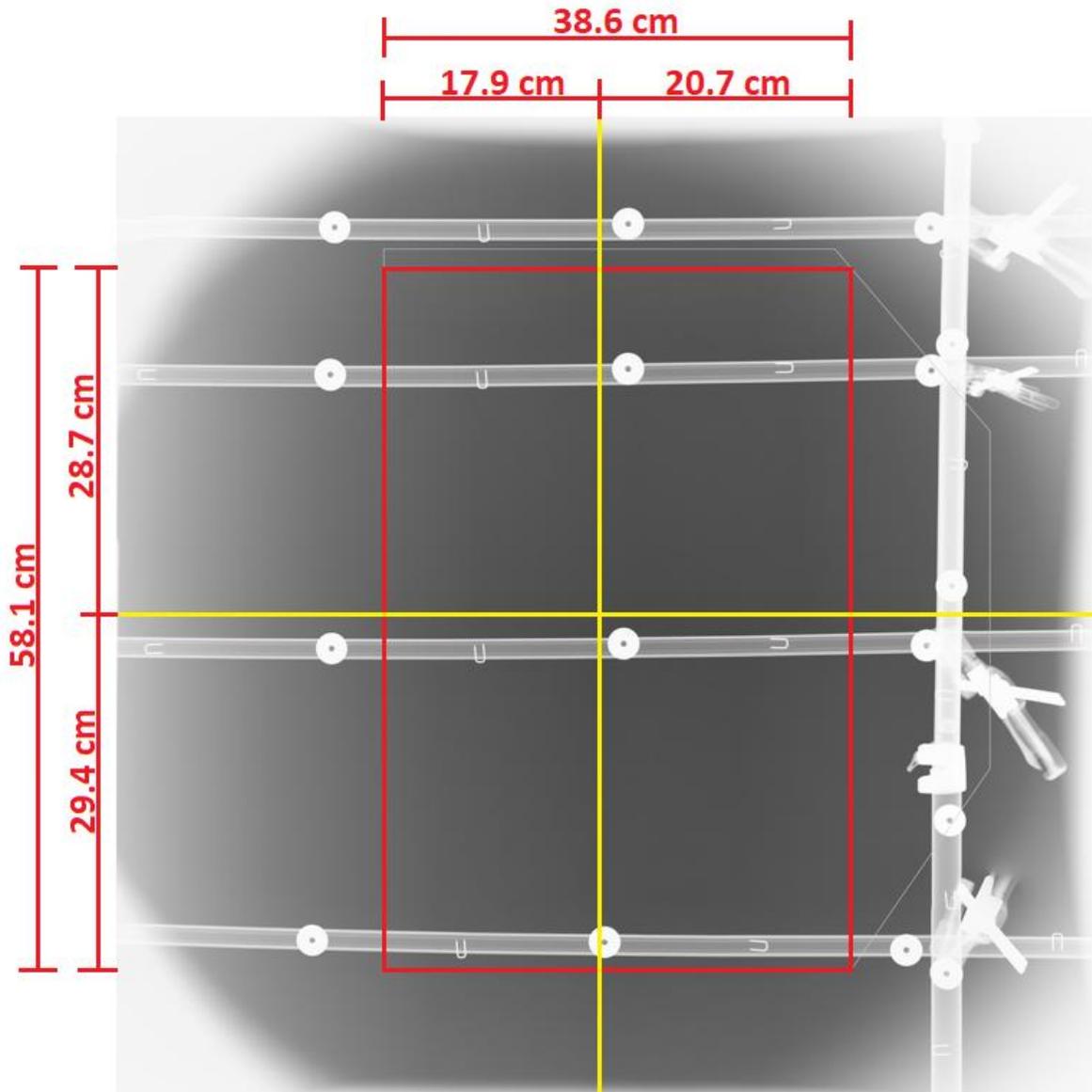
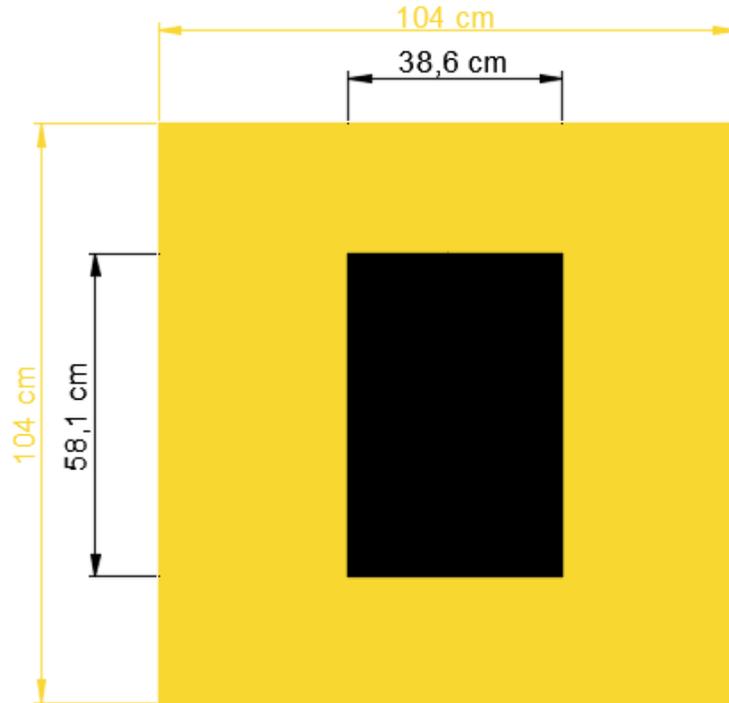


Figura 4.7 Rectángulo dentro del área de radiación efectiva. Se muestra el centro del haz de radiación con una cruz amarilla.

De igual manera, podemos hacer una comparación entre el área indicada por la luz guía del colimador  $(104.0 \pm 0.05) \text{ cm} \times (104.0 \pm 0.05) \text{ cm}$  y el área calculada -  $(58.100 \pm 0.582) \text{ cm} \times (38.600 \pm 0.387) \text{ cm}$  – ver Figura 4.8. El fabricante no reporta un área efectiva para una distancia distinta de 2 m.



**Figura 4.8** En amarillo se muestra el área dada por la luz guía del colimador y en negro el área calculada.

Existe una diferencia del 79.3% entre el área efectiva de radiación y la luz guía del colimador.

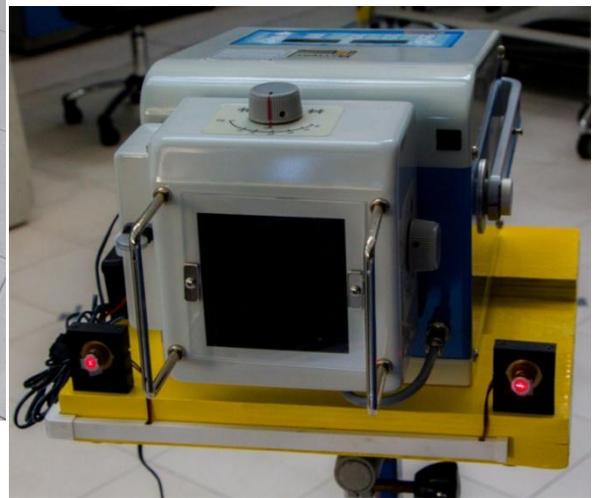
Conociendo el área efectiva a utilizar para la toma de radiografías, y su posición en función de la luz guía del colimador, se procedió a construir una base para el irradiador, que además de proveer mayor estabilidad para la colocación del mismo en el trabajo de campo, se le incluyó un sistema de láseres, el cuál puede ser ajustado para marcar el área efectiva de radiación para la distancia irradiador-detector a la que se trabajará (Figuras 4.9, 4.10, 4.11)



**Figura 4.9 Base para el irradiador con sistema de láseres apuntadores montada sobre tripié.**



**Figura 4.10 Irradiador montado en la base.**



**Figura 4.11 Sistema de láseres apuntadores.**

## 4.2 Respuesta del detector

Habiendo tomado las 21 radiografías listadas en la Tabla 3.3 (ver Figura 4.12) se obtuvo la media de gris de cada grosor de cada material en cada radiografía. Después, para cada grosor de cada material se hizo una normalización con el fin de quitar la dependencia con la exposición y obtener así una gráfica del tono de gris en función de la energía (Gráficas 4.1 a 4.5)

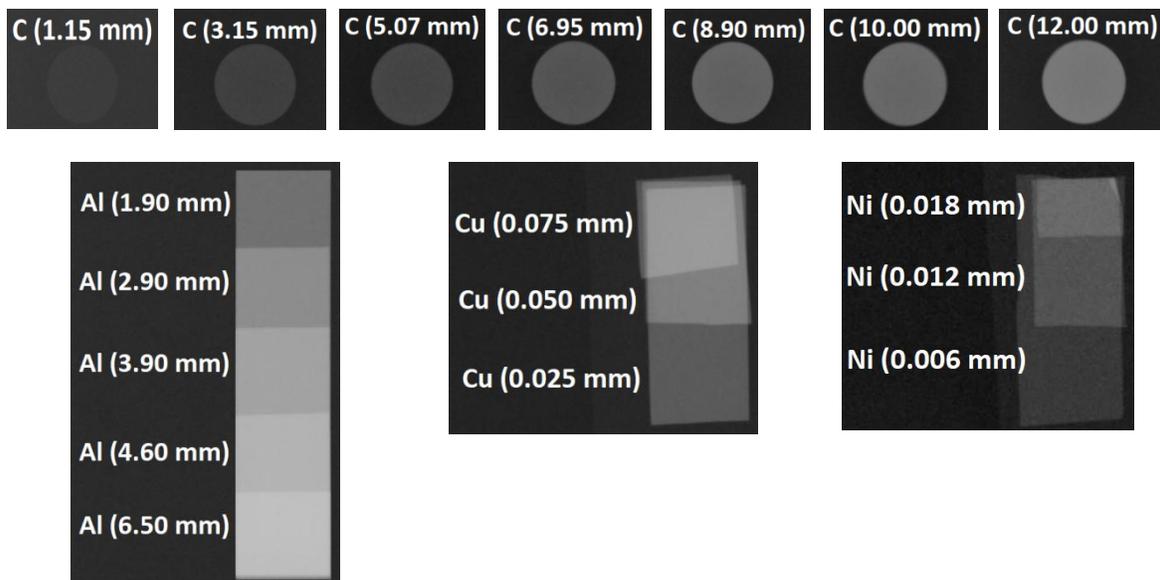
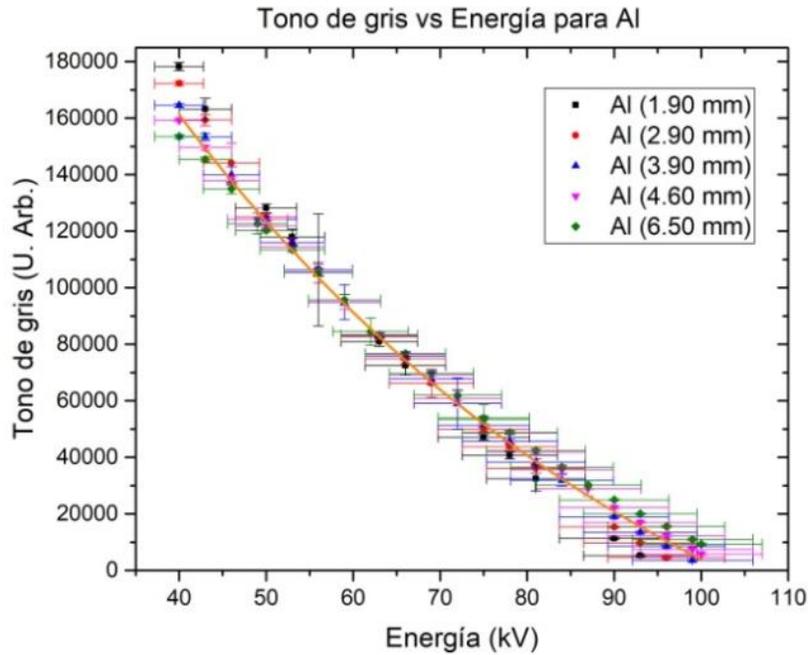
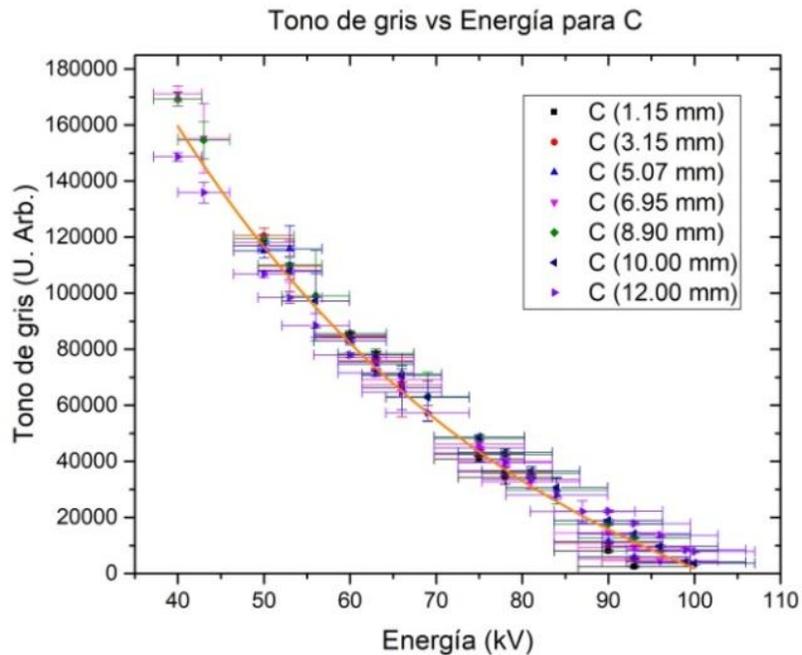


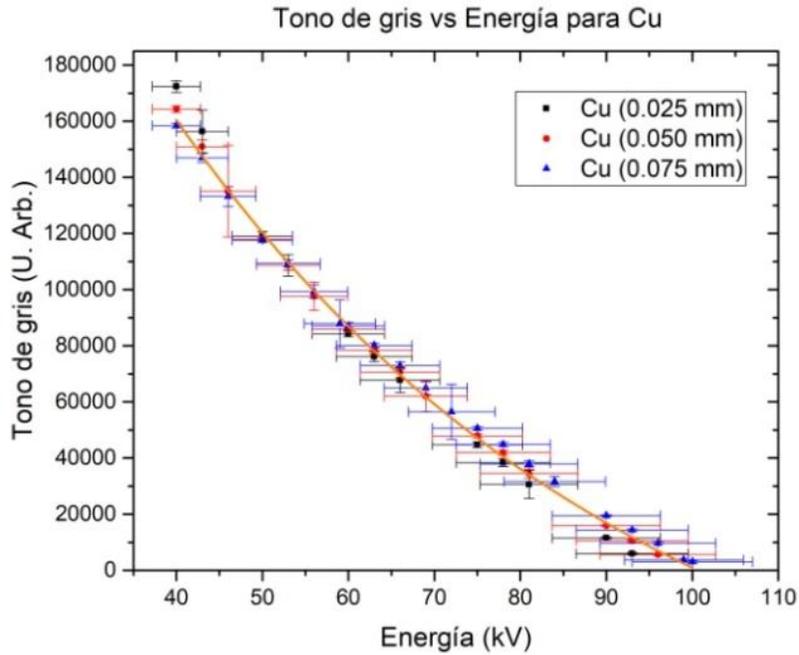
Figura 4.12 Radiografías ( $(40 \pm 2.8)$ kV,  $(21.0 \pm 2.1)$ mAs) de los materiales utilizados para el análisis de la respuesta del detector.



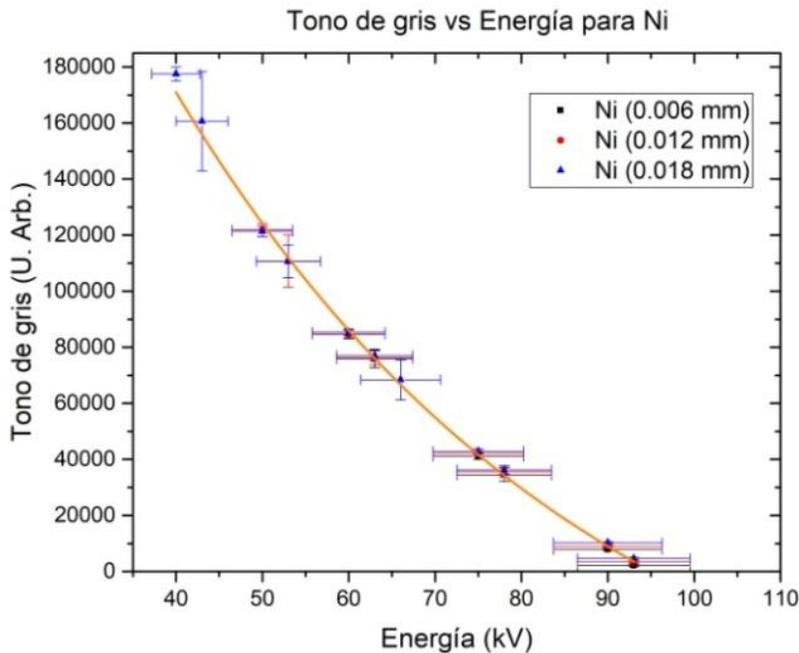
Gráfica 4.1 Tono de gris (U. Arb) vs Energía (kV) para todos los grosores de Al. Se realizó una normalización para quitar la dependencia del tono de gris con la exposición. La incertidumbre de la energía corresponde a la reportada por el fabricante. La incertidumbre del tono de gris corresponde a la desviación estándar. Se agregó un ajuste exponencial de la forma  $y = y_0 + Ae^{-\frac{x}{\tau}}$



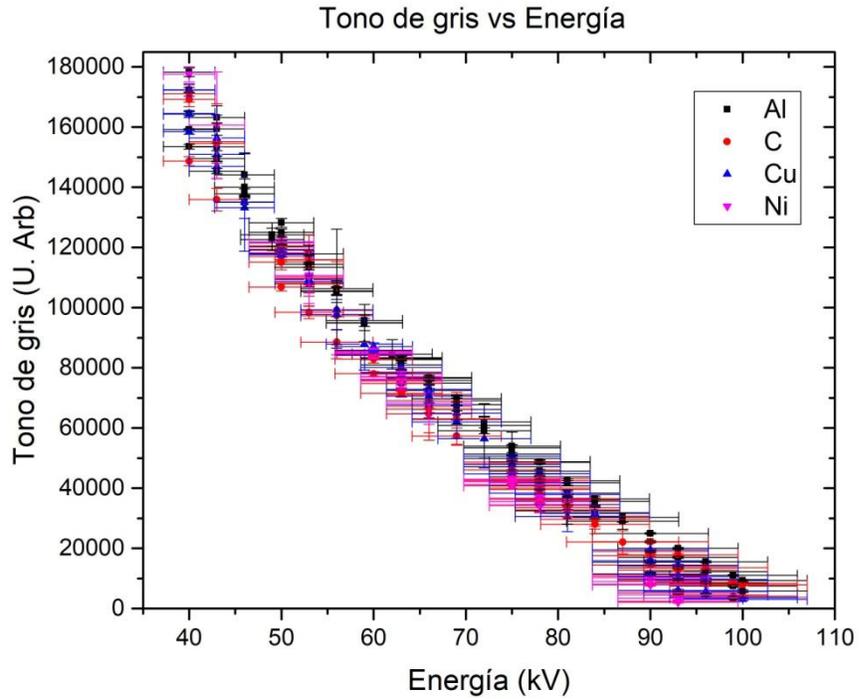
Gráfica 4.2 Tono de gris (U. Arb) vs Energía (kV) para todos los grosores de C. Se realizó una normalización para quitar la dependencia del tono de gris con la exposición. La incertidumbre de la energía corresponde a la reportada por el fabricante. La incertidumbre del tono de gris corresponde a la desviación estándar. Se agregó un ajuste exponencial de la forma  $y = y_0 + Ae^{-\frac{x}{\tau}}$



Gráfica 4.3 Tono de gris (U. Arb) vs Energía (kV) para todos los grosores de Cu. Se realizó una normalización para quitar la dependencia del tono de gris con la exposición. La incertidumbre de la energía corresponde a la reportada por el fabricante. La incertidumbre del tono de gris corresponde a la desviación estándar. Se agregó un ajuste exponencial de la forma  $y = y_0 + Ae^{-\frac{x}{\tau}}$

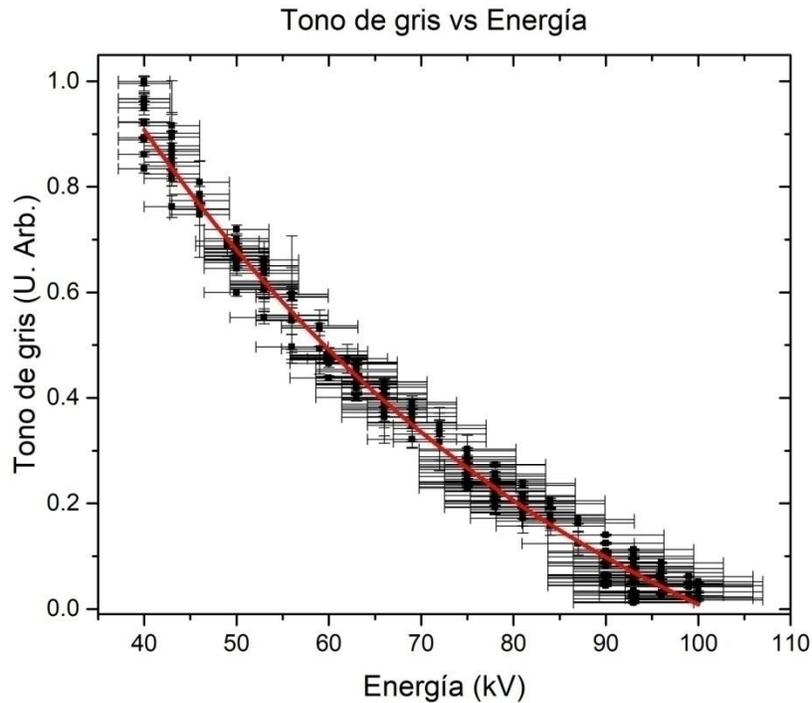


Gráfica 4.4 Tono de gris (U. Arb) vs Energía (kV) para todos los grosores de Ni. Se realizó una normalización para quitar la dependencia del tono de gris con la exposición. La incertidumbre de la energía corresponde a la reportada por el fabricante. La incertidumbre del tono de gris corresponde a la desviación estándar. Se agregó un ajuste exponencial de la forma  $y = y_0 + Ae^{-\frac{x}{\tau}}$



Gráfica 4.5 Tono de gris (U. Arb) vs Energía (kV) para todos los materiales utilizados. Se realizó una normalización para quitar la dependencia del tono de gris con la exposición. La incertidumbre de la energía corresponde a la reportada por el fabricante. La incertidumbre del tono de gris corresponde a la desviación estándar.

Se normalizó el tono de gris en la Gráfica 4.5 a 1 y se realizó un ajuste exponencial:



Gráfica 4.6 Normalización y ajuste exponencial de la Gráfica 4.5

Se obtuvo la siguiente ecuación para el ajuste:

$$y = y_0 + Ae^{-\frac{x}{t}} \quad (4.1)$$

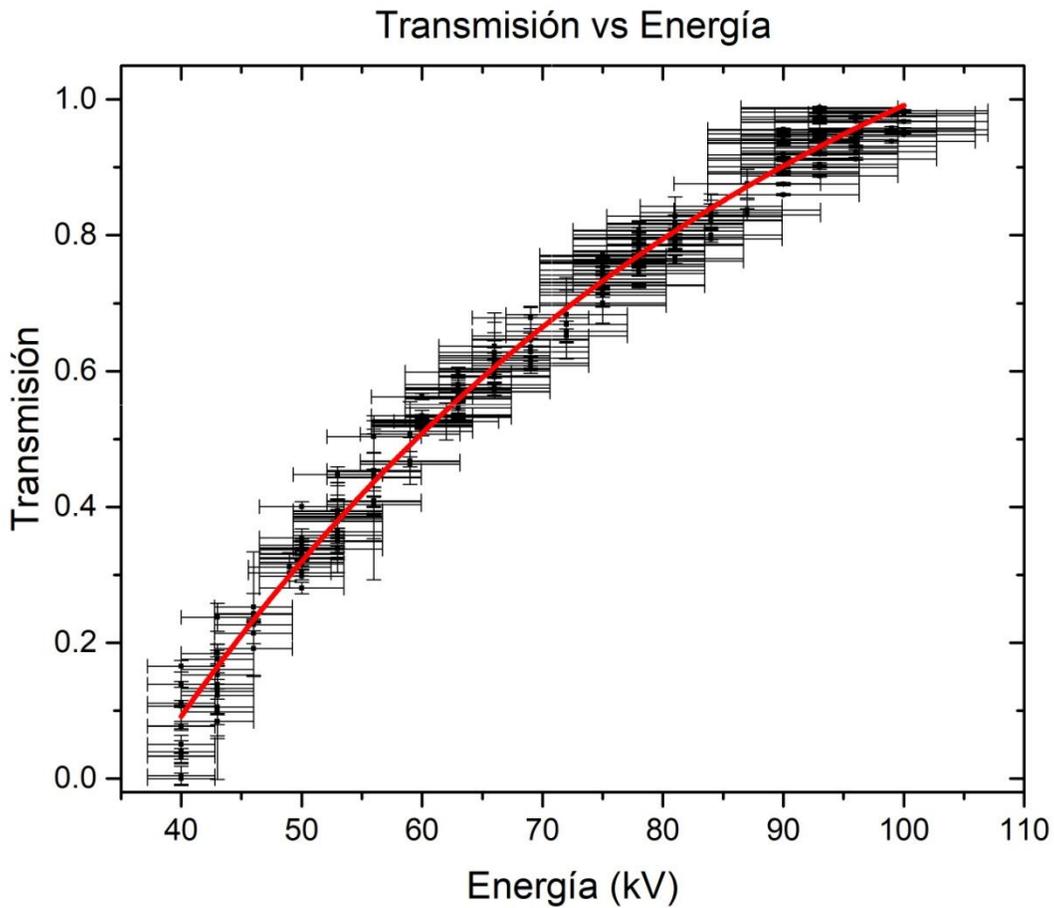
con un coeficiente de determinación  $R^2=0.9819$  y los siguientes valores para las constantes:

**Tabla 4.1 Valores del ajuste exponencial (ecuación 4.1)**

Constante	Valor	Error estándar
$y_0$	-0.4233	0.04304
$A$	2.8196	0.04899
$t$	53.3115	3.08783

Se busca un ajuste exponencial en la recta ya que es de esperarse que la dependencia del tono de gris con la energía tenga una dependencia similar a la ley de atenuación exponencial (ecuación 2.12)

La ecuación 4.1 representa la respuesta en tono de grises de nuestro detector en función de la energía, eliminando la dependencia con el material y la corriente. Sin embargo, debemos recordar que estamos trabajando en imagen negativa. El tono máximo de gris (el blanco) representa una absorción total de la radiación en el material, mientras que el tono mínimo de gris (el negro) representa una transmisión total al detector. Es por esto que para entender el fenómeno físico, debemos reacomodar los valores de tono de gris de la Gráfica 4.6. Al sacar el valor absoluto de la resta del tono de gris menos uno, obtenemos la transmisión en función de la energía:



Gráfica 4.7 Transmisión vs Energía (kV) con ajuste exponencial

Se obtuvo un ajuste exponencial para la Gráfica 4.7:

$$y = y_0 + Ae^{-cx} \quad (4.2)$$

con un coeficiente de determinación  $R^2=0.9819$  y los siguientes valores para las constantes:

Tabla 4.2 Valores del ajuste exponencial (ecuación 4.2)

Constante	Valor	Error estándar
$y_0$	1.4233	0.04304
$A$	-2.8196	0.04899
$c$	0.018	0.00109

Podemos ver que la ecuación 4.2 tiene casi la misma forma que la ley de atenuación exponencial (ecuación 2.12).

### 4.3 Resolución del detector

Habiendo obtenido la radiografía de la malla de cobre (Figura 4.13a)) se tomó el perfil de grises del grosor de una hebra individual (Figura 4.13b) y Figura 4.13c))

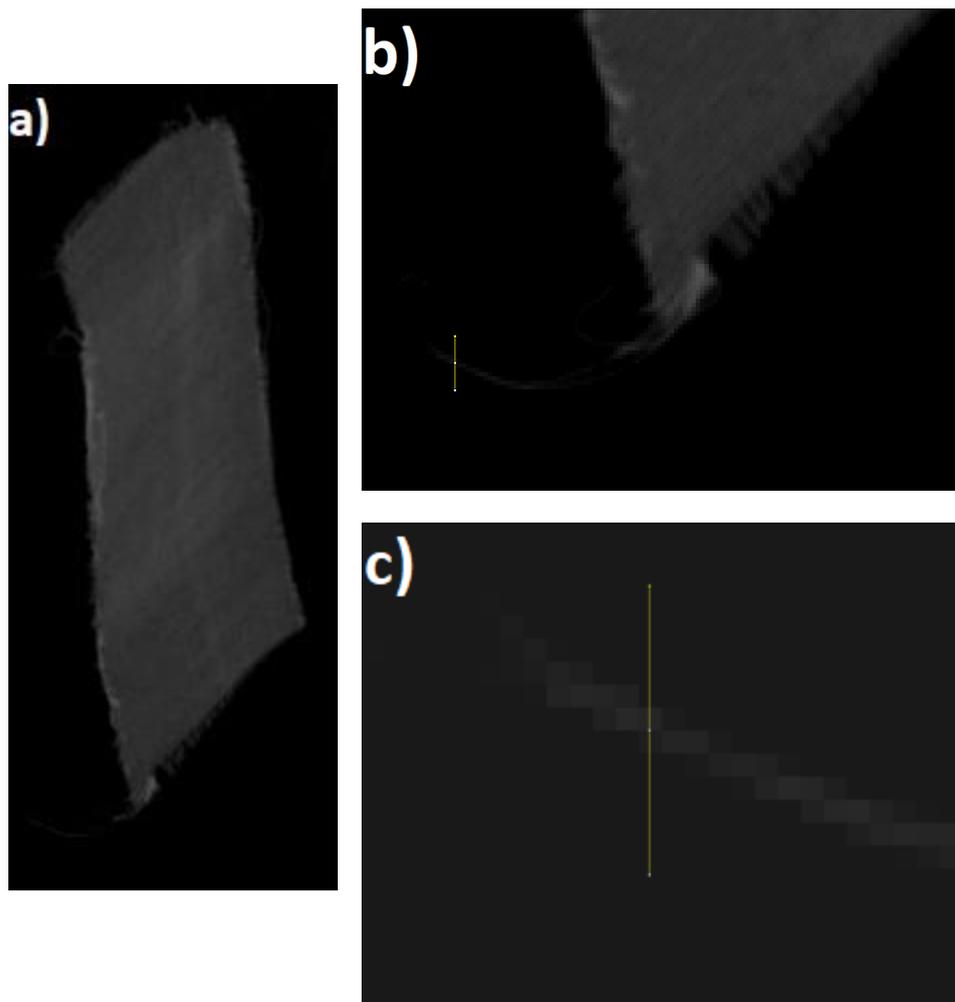


Figura 4.13 a) Radiografía a  $(40\pm 2.8)$  kV y  $(2.0\pm 0.2)$  mAs de una malla de cobre compuesta por hebras de  $5.588 \times 10^{-3}$  mm. b) Captura del perfil de grises de una hebra. c) Acercamiento a la hebra. Se trataron las imágenes para mejorar el contraste.

En la Gráfica 4.8 se muestra el perfil de grises de la hebra con un ajuste gaussiano:

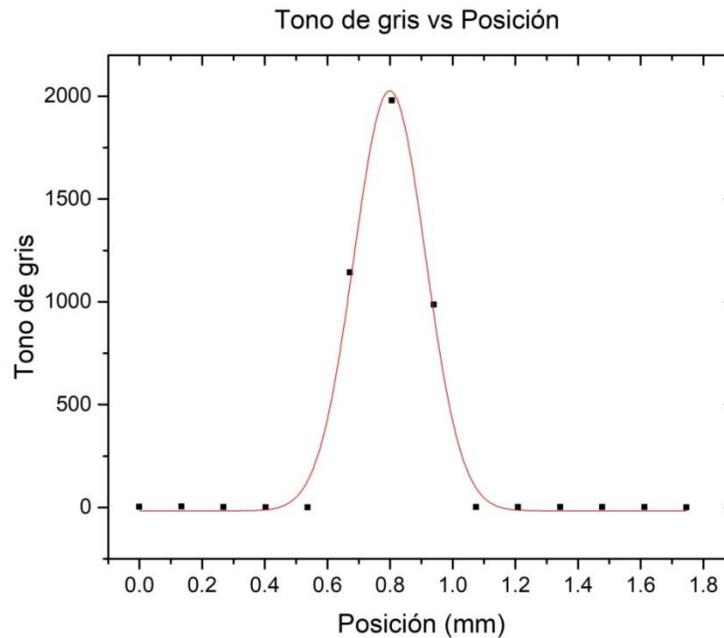
$$y = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\frac{\pi}{4 \ln(2)}}} e^{-4 \frac{(x-x_c)^2}{w^2} \ln(2)} \quad (4.3)$$

con un coeficiente de determinación  $R^2=0.99032$  y los siguientes valores para las constantes:

Tabla 4.3 Valores del ajuste gaussiano.

Constante	Valor	Error estándar
$y_0$	-16.26804	19.6751
$A$	584.78882	20.80308
$w$	0.26897	0.00939
$x_c$	0.79916	0.00396

donde  $w$  es el FWHM. En la Figura 4.13c) podemos observar que el perfil de grises de la hebra está compuesto por dos pixeles.



Gráfica 4.8 Tono de gris vs Posición (mm) de una hebra de cobre con ajuste gaussiano.

El valor del FWHM (Tabla 4.3) obtenido del ajuste gaussiano (ecuación 4.3) nos indica que la dimensión de estos dos pixeles es de  $(0.269 \pm 0.01)$  mm, de tal manera que la dimensión de un solo pixel es de  $(135 \pm 10)$   $\mu$ m, lo cual representa una diferencia del 6.25% con lo reportado por el fabricante.

#### 4.4 Separación de la aproximación de haces paralelos

Se tomó el perfil de gris del área rectangular que comprende al disco en cada una de las radiografías mostradas en la Figura 4.14

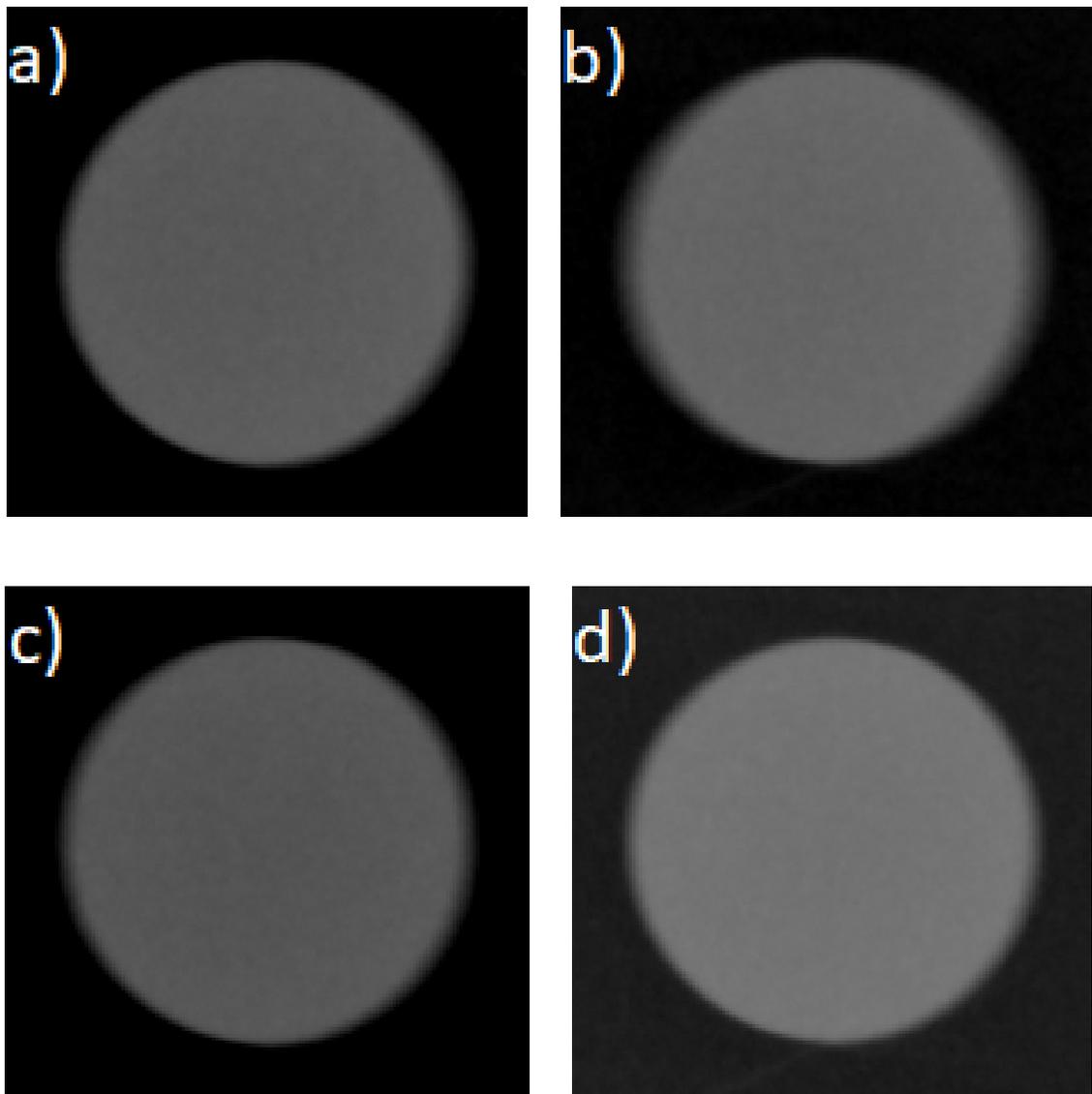
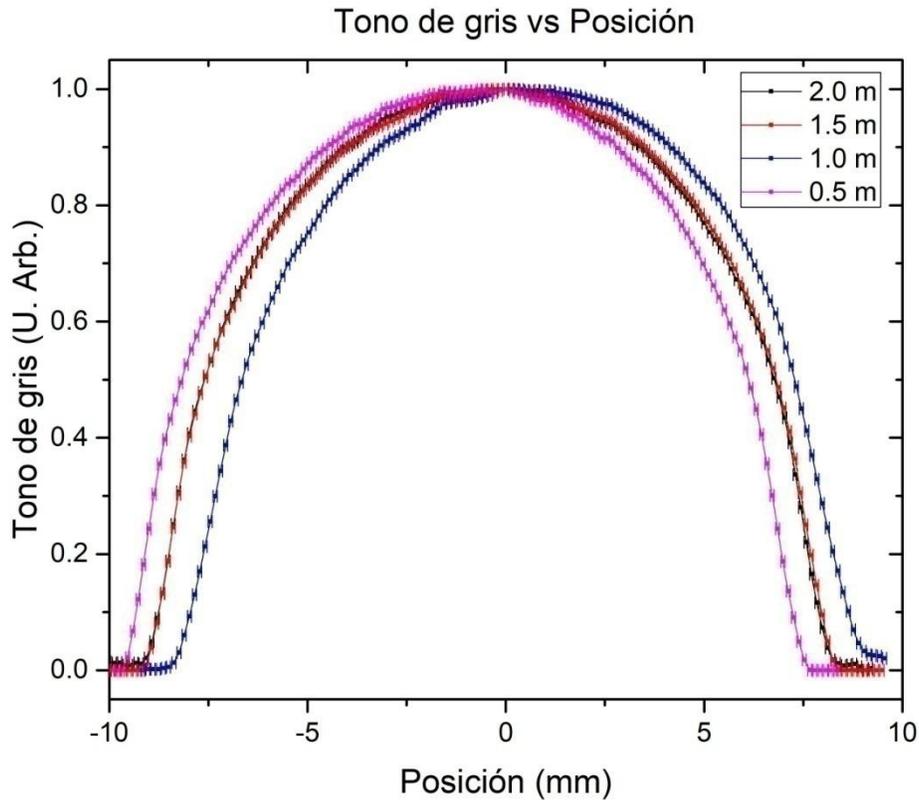


Figura 4.14 Radiografía a  $(40\pm 2.8)$ kV de un disco de carbono de  $(17.40\pm 0.05)$ mm de diámetro y  $(12.00\pm 0.05)$ mm de grosor a las siguientes distancias y exposiciones: a)  $(0.500\pm 0.0005)$ m a  $(2.0\pm 0.2)$ mAs. b)  $(1.000\pm 0.0005)$ m a  $(6.4\pm 0.6)$ mAs. c)  $(1.500\pm 0.0005)$ m a  $(15.0\pm 1.5)$ mAs. d)  $(2.000\pm 0.0005)$ m a  $(21\pm 2.1)$ mAs.

A continuación se muestra el radio del disco por la izquierda (distancia del inicio del disco al centro (tono de gris máximo) de acuerdo a la Gráfica 4.9), el radio del disco por la derecha (distancia del centro (tono de gris máximo) al final del disco de acuerdo a la Gráfica 4.9), la diferencia porcentual entre estos radios, el diámetro total del disco y la diferencia porcentual con la medida del diámetro  $(17.40\pm 0.05)$ mm.



Gráfica 4.9 Perfiles de gris para las radiografías mostradas en la Figura 4.14. Se hizo una traslación de la posición en las cuatro curvas para que el máximo coincidiera con el 0. Se hizo una traslación del tono de gris en las cuatro curvas para que el mínimo de cada una coincidiera con el 0. Por último se normalizó a 1 el tono de gris en cada curva.

Tabla 4.4 Datos obtenidos de la Gráfica 4.9 del radio del disco por la izquierda, radio del disco por la derecha, diámetro del disco y diferencia porcentual del diámetro con la medida ( $17.40 \pm 0.05$ )mm.

Distancia irradiador – detector ( $\pm 0.0005$ )m	Radio del disco por la izquierda ( $\pm 0.05$ )mm	Radio del disco por la derecha ( $\pm 0.05$ )mm	Diferencia porcentual entre los radios	Diámetro del disco ( $\pm 0.05$ )mm	Diferencia porcentual del diámetro ( $\pm 0.004$ )
2.0	9.20	8.52	7.39	17.72	1.84
1.5	9.22	8.39	9.00	17.61	1.21
1.0	8.77	9.16	-4.45	17.93	3.05
0.5	9.67	7.66	20.79	17.33	-0.40

Podemos observar que para ninguna de las 4 distancias existe una diferencia importante entre el diámetro medido del disco y el obtenido a través del perfil de grises, siendo la mayor diferencia a 1.0 m (3.05%) y la menor a 0.5 m (-0.4%).

La principal diferencia de las medidas a las distintas distancias es la intensidad de la radiación con respecto al centro del disco. Un radio mayor del centro a la izquierda (2.0, 1.5

y 0.5 m) nos indica una mayor densidad de radiación por la derecha que por la izquierda, mientras que un radio mayor del centro a la derecha (1.0 m) nos indica una mayor densidad de radiación por la izquierda que por la derecha. No podemos atribuir estos cambios al ángulo de incidencia ya que de ser así, veríamos una mayor diferencia porcentual entre el diámetro medido del disco y el obtenido a través del perfil de grises.

La disminución de la diferencia porcentual entre los radios de 2.0 m a 1.5 m y de este a 1.0 m nos muestra como la energía de los rayos X va disminuyendo conforme nos alejamos del centro del haz. El cambio de signo en la diferencia porcentual a 1.0 m, y el corrimiento de la curva en la Gráfica 4.9 con respecto a las curvas de 2.0 y 1.5 m se puede interpretar como un cambio de la posición del irradiador. De acuerdo a los datos, se movió el irradiador ligeramente hacia la izquierda al acercarlo a la posición de 1.0 m.

El aumento drástico en la diferencia porcentual entre los radios a 0.5 m y el corrimiento de la curva en la Gráfica 4.9 con respecto a las curvas de 2.0 y 1.5 m nos indica que el irradiador se movió considerablemente hacia la derecha con respecto a la posición utilizada a 2.0 y 1.5 m.

## 4.5 Radiografía de baja energía

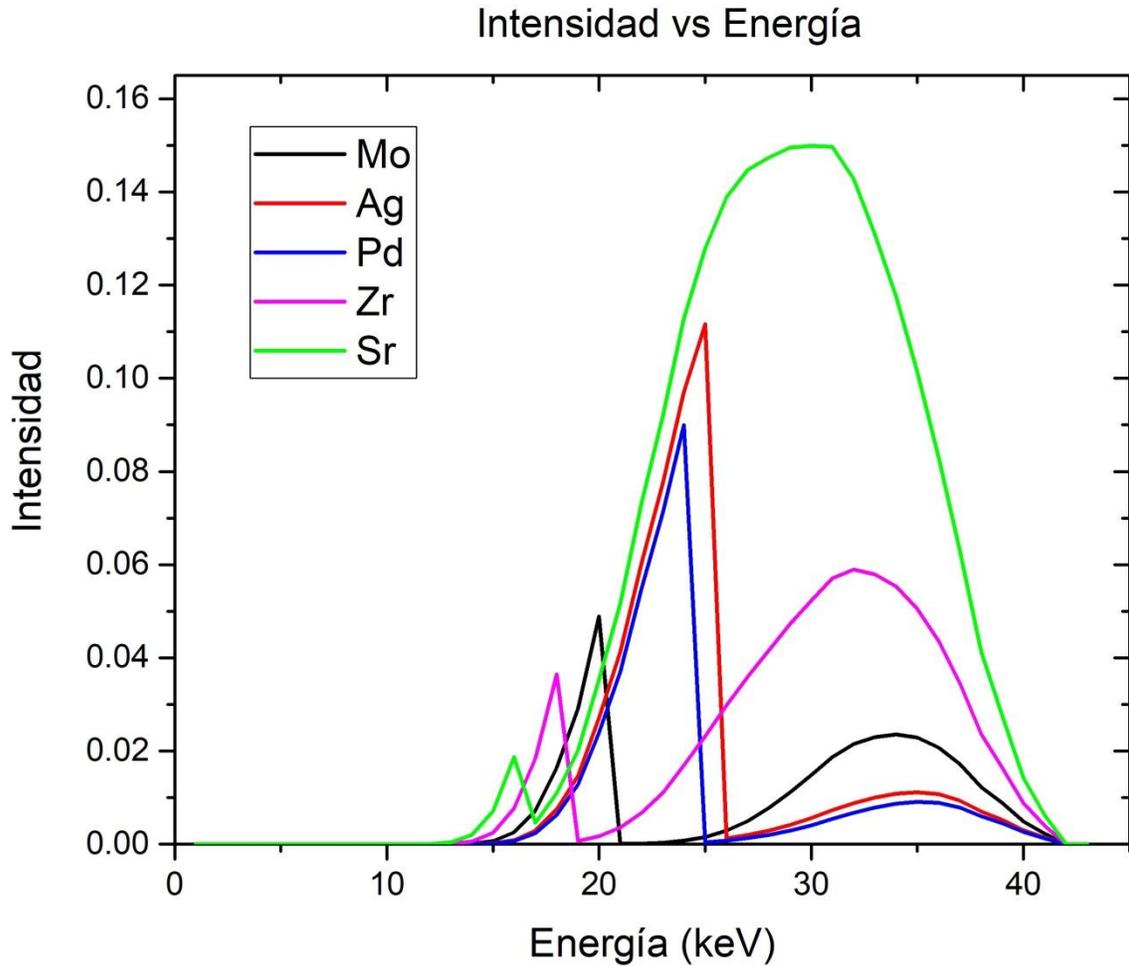
### 4.5.1 Disminución de la energía con un filtro

En la Gráfica 4.10 se muestran las simulaciones hechas con el programa XOP 2.3 de la atenuación de una distribución de rayos X de un tubo de 40kV (Gráfica 2.1) por filtros de 100  $\mu\text{m}$  de Mo, Ag, Pd, Zr y Sr.

En las 5 distribuciones podemos ver claramente la discontinuidad causada por los bordes de absorción. Se realizaron 3 cálculos por cada distribución: la energía promedio de la zona antes del borde (baja energía), la energía promedio de la zona después del borde (alta energía) y la razón entre la densidad de baja energía entre la de alta energía.

**Tabla 4.5 Energía promedio de la zona antes del borde (baja energía), energía promedio de la zona después del borde (alta energía) y razón entre la densidad de baja energía entre la de alta energía para las distribuciones de los 5 materiales mostradas en la Gráfica 4.10.**

Material	Baja energía (kV)	Alta energía (kV)	Cociente de baja energía/alta energía
Mo	19.098	33.477	0.47
Ag	22.942	34.093	4.37
Pd	22.285	34.277	3.71
Zr	17.331	31.516	0.10
Sr	15.600	29.214	0.01



Gráfica 4.10 Simulación de la atenuación de una distribución de rayos X de un tubo de 40kV (Gráfica 2.1) por filtros de 100  $\mu\text{m}$  de Sn, Mo, Ag, Pd, Zr y Sr.

A partir de los datos de la Tabla 4.5 se determinó que el filtro de plata es la mejor opción, ya que aunque es el que presenta una mayor energía promedio en la zona previa al borde de absorción, es por mucho el que tiene una mejor razón entre la zona de baja y alta energía.

Teniendo la película de plata, se construyó el marco para colocarla en la ventana del irradiador. El marco consiste de dos secciones entre las cuales se coloca la película (Figura 4.15 a 4.17). Ya puesta, se atornillan las dos secciones y se atornilla el marco al irradiador (Figura 4.18)

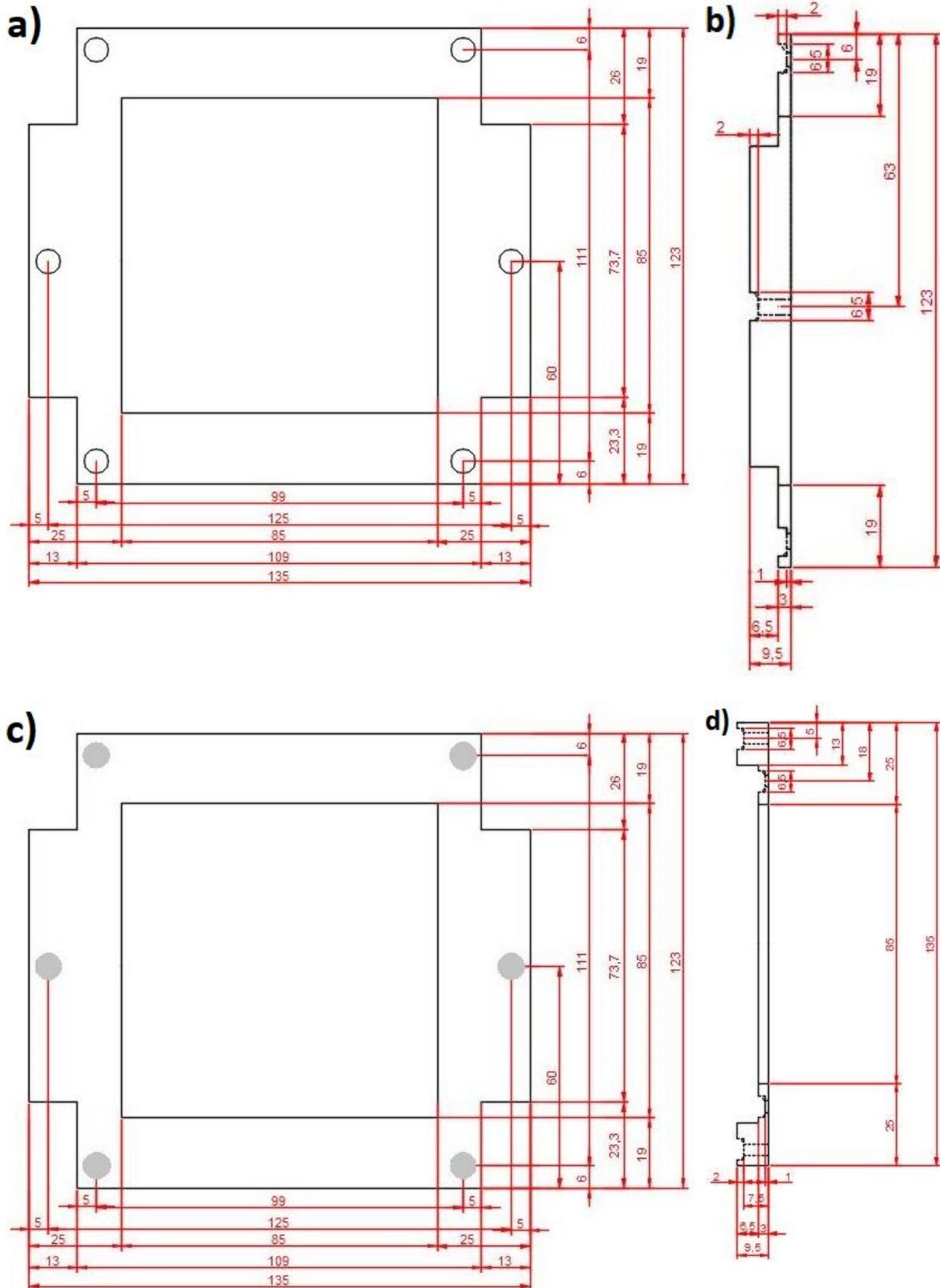


Figura 4.15 a) Vista frontal de la pieza 1. b) Vista lateral de la pieza 1. c) Vista posterior de la pieza 1. d) Vista superior de la pieza 1. Unidades de las medidas: cm.

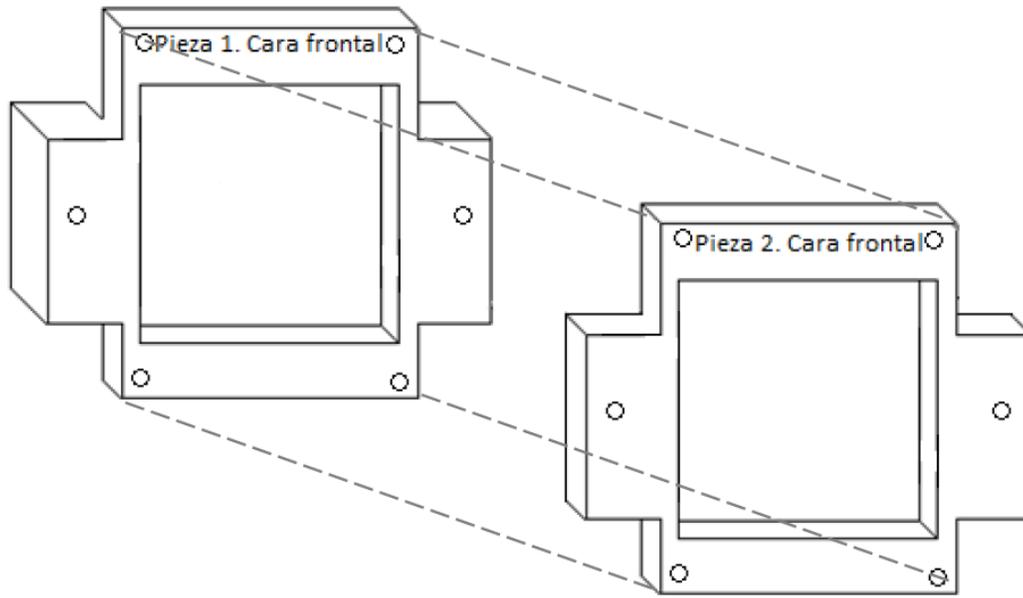


Figura 4.16 Diagrama de las dos piezas que componen el marco para la película de Ag

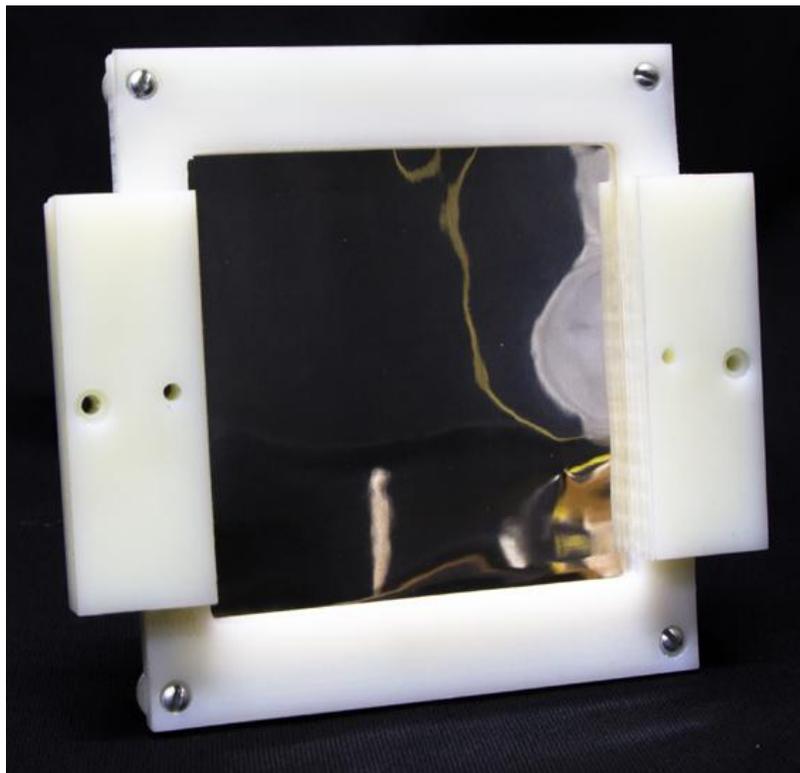


Figura 4.17 Filtro de Ag montado en su marco.

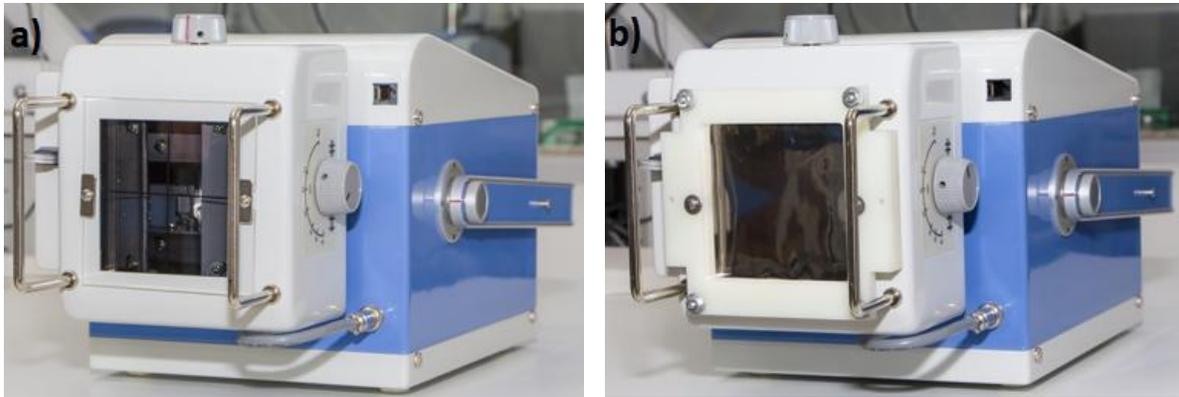


Figura 4.18 a) Irradiador con los colimadores abiertos a la mitad. b) Irradiador con el filtro montado.

Como prueba del dispositivo, se tomó la radiografía de la primera página de “*EL DEVOTO PEREGRINO Y VIAGE DE TIERRA SANTA*” como se muestra en las Figuras 4.19 y 4.20.



Figura 4.19 Arreglo irradiador-libro-detector

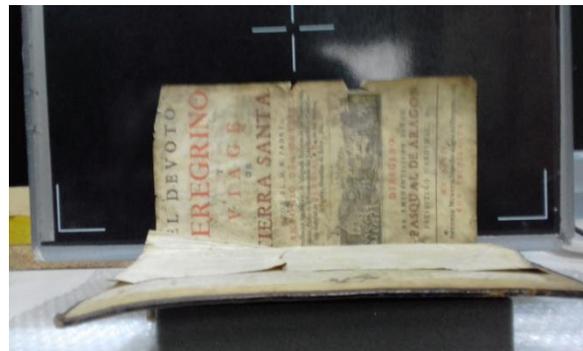


Figura 4.20 Primera página del libro pegada al detector

En las Figuras 4.21 y 4.22 se muestran las radiografías obtenidas. Se tomaron los siguientes perfiles de grises para cada radiografía (Figuras 4.23 y 4.24).

Si bien el cambio en la distribución de energía al utilizar el filtro de Ag es notable (resultaría imposible formar una imagen como la de la Figura 4.22 sin el filtro con esas mismas condiciones de energía y corriente) podemos ver en las Gráficas 4.11 y 4.12 que el contraste obtenido no solo no es el suficiente como para hacer un análisis del objeto, si no que no es algo que no se pueda lograr con la energía mínima del irradiador de 40 kV bajando la corriente a casi el mínimo posible.

En la Gráfica 4.12 no es posible identificar la posición en la cual cambiamos del vacío a la hoja del libro. Los cambios en el tono de gris al cruzar las interfaces tinta-papel son apenas visibles.



Figura 4.21 Radiografía sin el filtro de Ag a  $(40\pm 2.8)$ kV y  $(2.0\pm 0.2)$ mAs con una distancia irradiador detector de  $(0.700\pm 0.0005)$ m



Figura 4.22 Radiografía con el filtro de Ag a  $(40\pm 2.8)$ kV y  $(21.0\pm 2.1)$ mAs con una distancia irradiador detector de  $(0.700\pm 0.0005)$ m

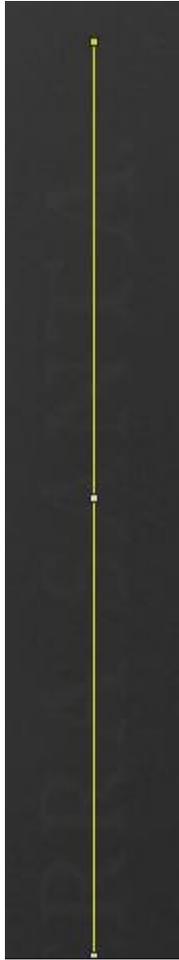


Figura 4.23 Sección de la radiografía mostrada en la Figura 4.21 (sin filtro de Ag) de la cual se tomó el perfil de grises. Imagen tratada para mejorar el contraste.

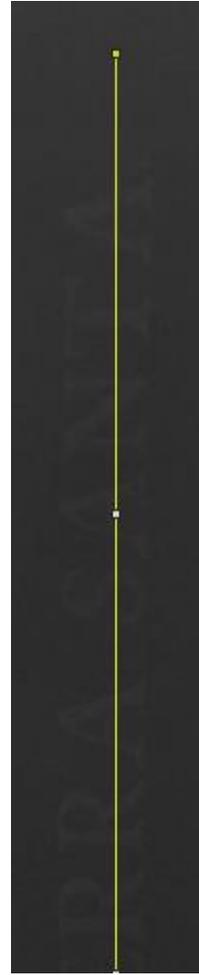
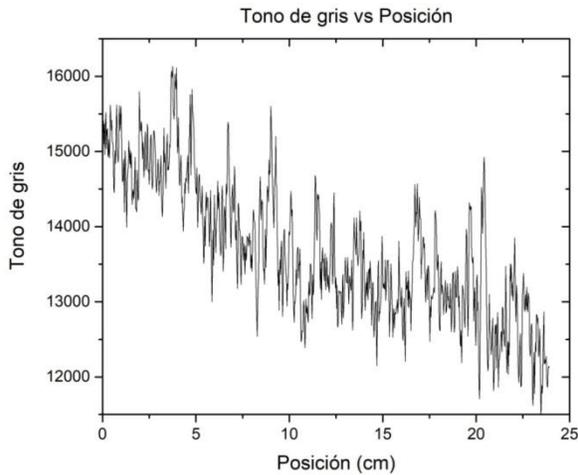
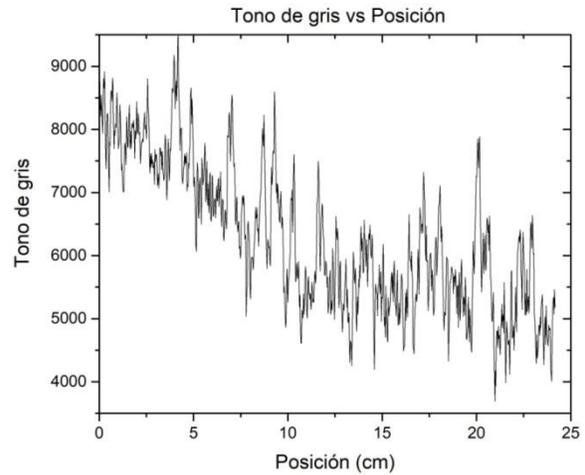


Figura 4.24 Sección de la radiografía mostrada en la Figura 4.22 (con filtro de Ag) de la cual se tomó el perfil de grises. Imagen tratada para mejorar el contraste.



Gráfica 4.11 Perfil de grises de la Figura 4.23



Gráfica 4.12 Perfil de grises de la Figura 4.24

#### 4.5.2 Radiografía con fluorescencia de rayos X

En la Tabla 4.6 se muestran las energías de los rayos X  $K_{\alpha}$  de los materiales disponibles.

Tabla 4.6 Materiales disponibles y las energías de los rayos X  $K_{\alpha}$  obtenidas de <http://amptek.com/periodic-table-and-x-ray-emission-line-lookup-chart/>

Material	Energía $K_{\alpha}$ ( keV)
Al	1.49
Mo	17.48
Cd	23.17
Cu	8.05
Pd	21.18
Nb	16.61
Rh	20.21
Ag	22.16

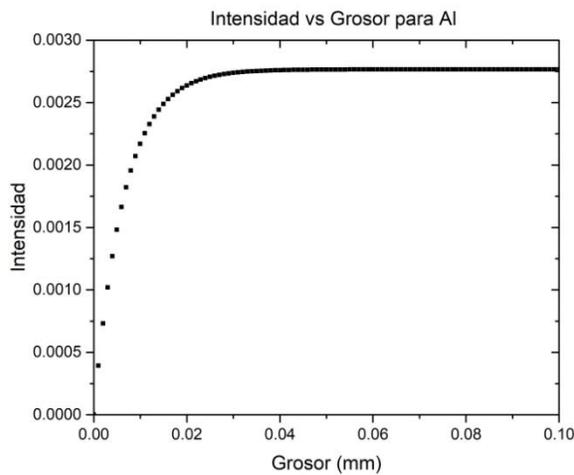
Con nuestro experimento anterior, logramos obtener una distribución de rayos X con una energía promedio de 22.942 keV utilizando un filtro de Ag, por lo que descartamos los filtros cuyas  $K_{\alpha}$  son mayores a 20 keV.

A continuación se presentan los valores de  $\mu_T = \mu(E)$  y  $\mu_f = \mu(E_f)$  utilizados para hacer el cálculo de la intensidad de fluorescencia de cada material utilizando la ecuación 2.20.

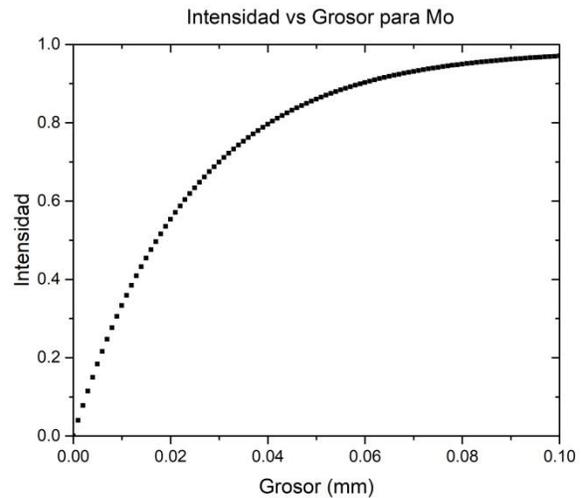
Tabla 4.7 Coeficientes de atenuación  $\mu_T$  y  $\mu_f$  para los materiales a analizar. Los coeficientes fueron calculados utilizando los coeficientes de atenuación másica obtenidos de <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html> y las densidades obtenidas de <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab1.html>

Material	$\mu_T$ (cm <sup>-1</sup> )	$\mu_f$ (cm <sup>-1</sup> )
Al	3.0438	1085.71
Mo	287.138	291.671
Cu	97.826	470.847
Nb	228.441	228.986

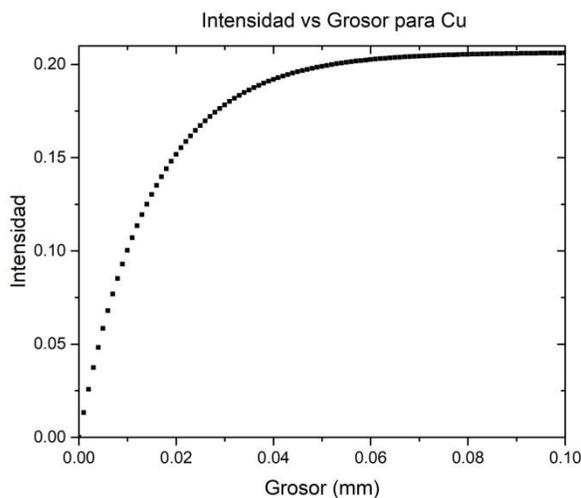
Utilizando estos coeficientes, fijando  $\varepsilon_a(E) = 1$  y  $\theta = \Phi = \pi/4$ , se obtuvieron las siguientes simulaciones para cada material (Gráficas 4.13 a 4.16)



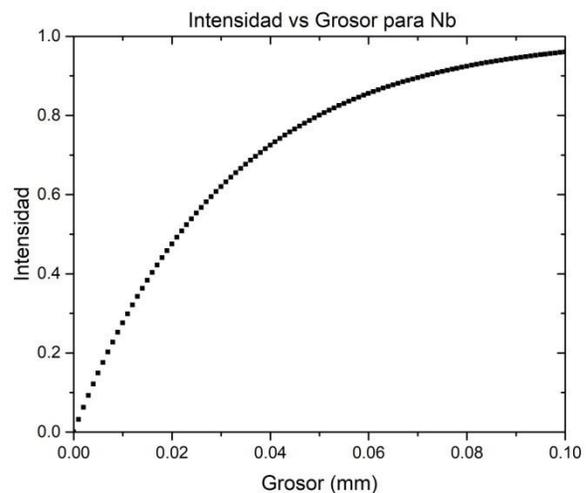
Gráfica 4.13 Intensidad vs Grosor para aluminio



Gráfica 4.14 Intensidad vs Grosor para molibdeno



Gráfica 4.15 Intensidad vs Grosor para cobre



Gráfica 4.16 Intensidad vs Grosor para niobio

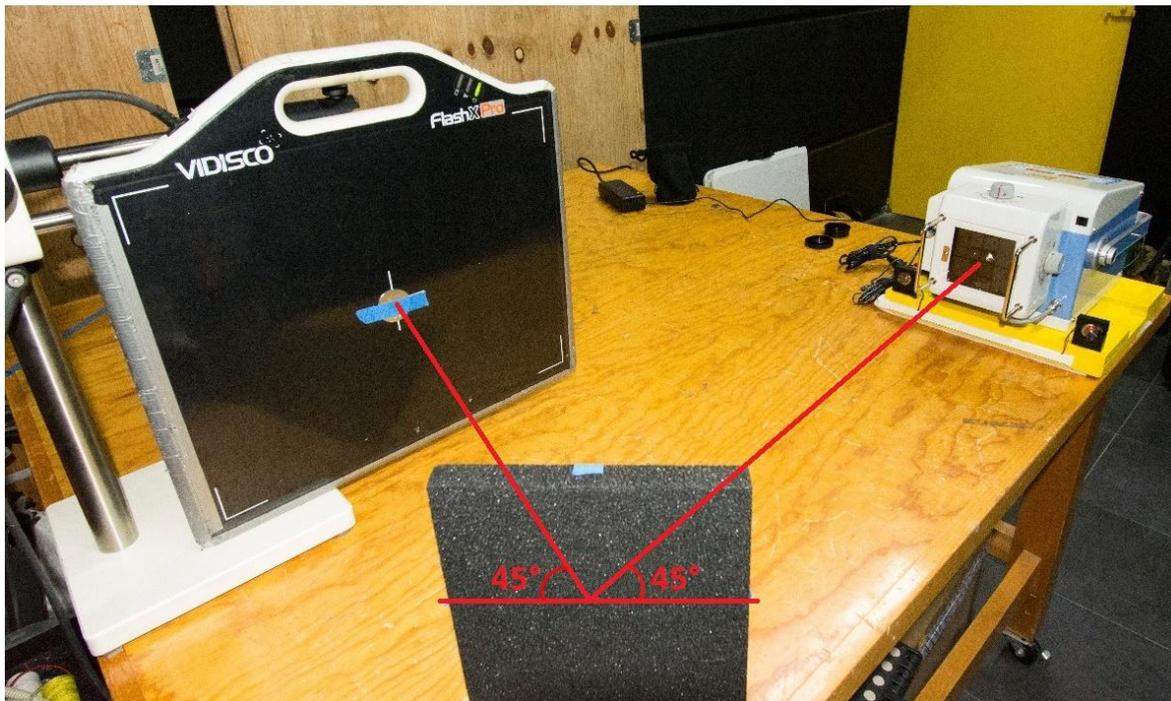
En la siguiente tabla se presenta la intensidad de fluorescencia y la energía de las  $K_{\alpha}$  para los 5 posibles filtros.

**Tabla 4.8 Intensidad de fluorescencia y energía de las  $K_{\alpha}$  para los 5 posibles filtros.**

Material	Grosor (mm)	Intensidad	Energía $K_{\alpha}$ (keV)
Aluminio	0.025	0.00271	1.49
Aluminio	0.050	0.00276	1.49
Molibdeno	0.025	0.63375	17.48
Cobre	0.025	0.16721	8.05
Niobio	0.025	0.55340	16.61

Podemos observar que el Mo y el Nb presentan la mayor intensidad de fluorescencia, sin embargo, la energía de su  $K_{\alpha}$  resulta un poco alta para obtener una imagen con el contraste buscado. Las  $K_{\alpha}$  del Cu son las que tienen la mejor energía para nuestro objetivo, y su intensidad no es tan baja, por lo que se procedió a trabajar con el filtro de Cu.

Se armó el arreglo que se muestra en la Figura 4.25, con una distancia película-detector de  $(0.245 \pm 0.0005)\text{m}$ , una distancia irradiador-película de  $(1.450 \pm 0.0005)\text{m}$ , un ángulo de  $45^{\circ}$  entre el detector y la película y  $45^{\circ}$  entre la película y el irradiador.



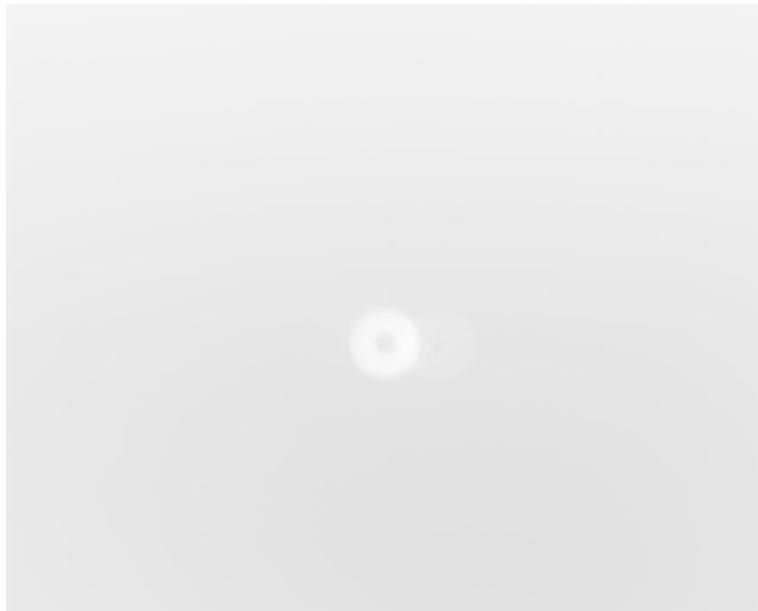
**Figura 4.25 Arreglo experimental para la radiografía de fluorescencia de rayos X. Los rayos X del irradiador inciden a un ángulo de  $45^{\circ}$  en la película de Cu, la cual se encuentra a  $45^{\circ}$  del detector**

No se logró formar una imagen de la página del libro, por lo que se pasó a tomar la radiografía de la rondana.

Primero se tomó una radiografía sin la película generadora de fluorescencia (Figura 4.26) y después se tomó la radiografía utilizando la fluorescencia (Figura 4.27)



**Figura 4.26 Radiografía sin película generadora de cobre a  $(70\pm 4.9)$ kV y  $(50.0\pm 5.0)$ mAs**



**Figura 4.27 Radiografía con película generadora de cobre a  $(70\pm 4.9)$ kV y  $(50.0\pm 5.0)$ mAs**

El problema central de este experimento es formar una distribución de rayos X con una energía suficientemente baja para formar una radiografía de una hoja, sin embargo, el no haber logrado atravesar la página del libro con los rayos  $K_{\alpha}$  de 8.05 keV de la película de Cu nos da una primera cota mínima para la energía necesaria.

En la Figura 4.26, la radiografía sin película generadora de fluorescencia, podemos ver que se forma una imagen doble de la rondana. Al no haber ningún elemento en la posición donde se coloca la película de Cu, sabemos que esta imagen no es formada por ningún tipo de radiación secundaria. Los colimadores en el irradiador fueron ajustados para que no llegaran rayos X al detector, por lo que en principio, no debería llegarle radiación al detector. Sin embargo, dada la geometría de nuestro arreglo, y la forma en que se formó la imagen doble, podemos asumir que hay una “fuga” de rayos X del armazón del irradiador.

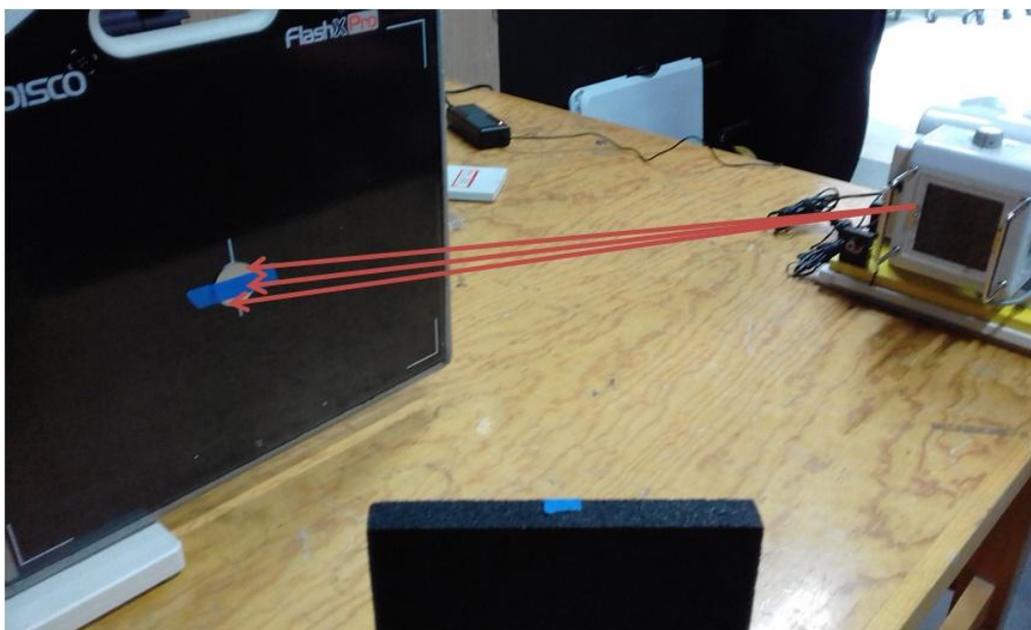


Figura 4.28 Posible fuga de rayos X del irradiador.

La diferencia entre las Figuras 4.26 y 4.27 nos demuestra que en verdad estamos formando una imagen a partir de la fluorescencia del Cu, sin embargo, la poca resolución de la imagen y el hecho de que siga apareciendo la segunda imagen de la rondana, nos indica que la intensidad de fluorescencia es muy baja. Por lo tanto, el experimento presentó dos defectos: muy baja energía y muy baja intensidad.

El problema de la energía se debió a la aproximación de suponer al papel como compuesto 100% de celulosa y con una densidad de  $3.75 \text{ g/cm}^3$ . Ya sea que la hoja que se intentó analizar tenga una mayor densidad, o que el material del que está compuesto tenga

un coeficiente de atenuación másica mayor que la celulosa, se requeriría de una mayor energía para obtener una imagen con contraste.

Por otra parte, se tomó la decisión de utilizar la eficiencia de fluorescencia por unidad de ángulo sólido  $\varepsilon_{\alpha}(E) = 1$  para todos los materiales, dado que todos se encuentran bajo la misma geometría.

Se volvieron a realizar los cálculos, esta vez utilizando los valores de eficiencia de fluorescencia  $\omega_K$  de [15] y se obtuvo lo siguiente:

**Tabla 4.9 Energía de las  $K_{\alpha}$ , eficiencia de fluorescencia e intensidad de fluorescencia para los 5 posibles filtros.**

Material	Grosor (mm)	Energía $K_{\alpha}$ (keV)	$\omega_K$	Intensidad
Aluminio	0.025	1.49	0.0387	0.00271
Aluminio	0.050	1.49	0.0387	0.00276
Molibdeno	0.025	17.48	0.742	0.63375
Cobre	0.025	8.05	0.441	0.16721
Niobio	0.025	16.61	0.724	0.55340

La energía de las  $K_{\alpha}$  de Mo y Nb son mayores que las de Cu, por lo que utilizando estos materiales podría resolverse el problema de no lograr atravesar el papel. La eficiencia de producción de fluorescencia del Mo es un 68% mayor que la del Cu, mientras que la del Nb es del 64%. Al tener una mayor intensidad de rayos X más energéticos, se podría mejorar la calidad de imagen. Es por esto que el Mo y el Nb serían ideales para volver a realizar el experimento.

## 5. Algunos ejemplos de aplicaciones de la radiografía digital en el estudio del patrimonio cultural mexicano

La caracterización del equipo facilitó su aplicación a diversos problemas y objetos. A continuación se muestran algunos ejemplos de análisis del patrimonio cultural en diferentes tipos de piezas.

En la Figuras 5.1 (cascabeles de cobre prehispánicos del Templo Mayor de Tenochtitlán) y 5.2 (radiografía de los mismos) podemos ver un ejemplo de cómo la radiografía digital ayuda a determinar la estructura física de objetos metálicos. A través de la toma de imágenes en diversas condiciones de irradiación se realiza un barrido de energías y podemos conocer la condición de la pieza y obtener información que lleve a la determinación del proceso de producción; así como del deterioro del metal en su contexto arqueológico. En las figura se observan las regiones de mayor densidad donde aún hay metal, las zonas corroídas dejan de ser contrastadas en las imágenes cuando se aumenta la energía de irradiación a 60 kV.



**Figura 5.1 Cascabeles de cobre prehispánicos del Templo Mayor de Tenochtitlán montados frente al detector de rayos X sobre una superficie radiotransparente. Trabajo hecho en colaboración con el Taller de Metales de la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía (ENCRyM) del Instituto Nacional de Antropología e Historia.**

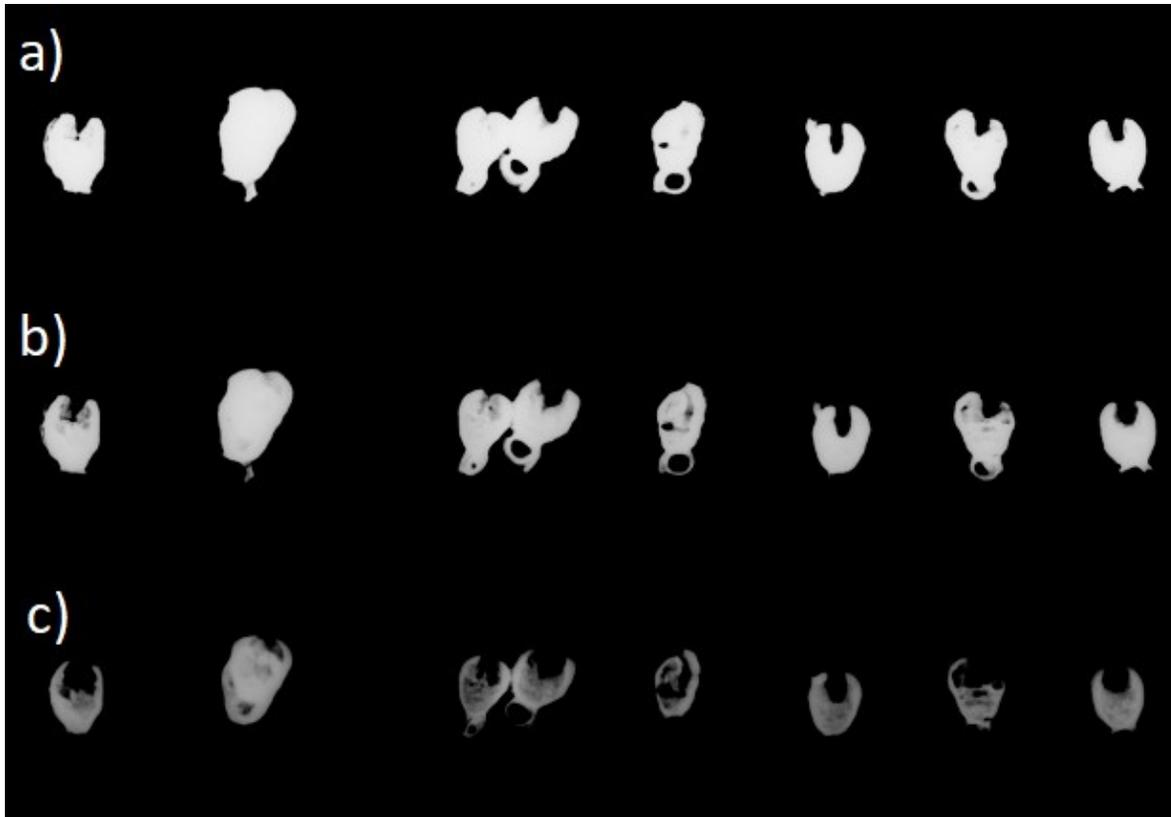


Figura 5.2 Radiografías de los cascabeles mostrados en la Figura 6.5 a ( $30.0\pm 3.0$ )mAs y a) ( $40\pm 2.8$ )kV, b) ( $50\pm 3.5$ )kV, c) ( $60\pm 4.2$ )kV, con una distancia irradiador-detector de ( $1.30\pm 0.005$ )m). El barrido de energías de las piezas nos permite apreciar la estructura física de los cascabeles. Trabajo hecho en colaboración con el Taller de Metales de la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía (ENCRyM) del Instituto Nacional de Antropología e Historia.

En el caso de la pintura, utilizando las condiciones adecuadas de energía y exposición (( $40\pm 2.8$ )kV y ( $45.0\pm 4.5$ )mAs), la radiografía digital nos permite observar los trazos originales realizados por el artista, así como detalles de la pintura que se han perdido debido a restauraciones o un mal cuidado de la obra. En la Figura 5.3 a) se muestra la pintura de La crucifixión. En la Figura 5.3 c) podemos observar una fractura en la madera, así como los trazos originales del rostro y el cabello de Cristo. En la Figura 5.3 e) podemos observar los trazos originales en el rostro de la Virgen de la obra, así como una aureola que ya no es apreciable en el visible (Figura 5.3 d)).

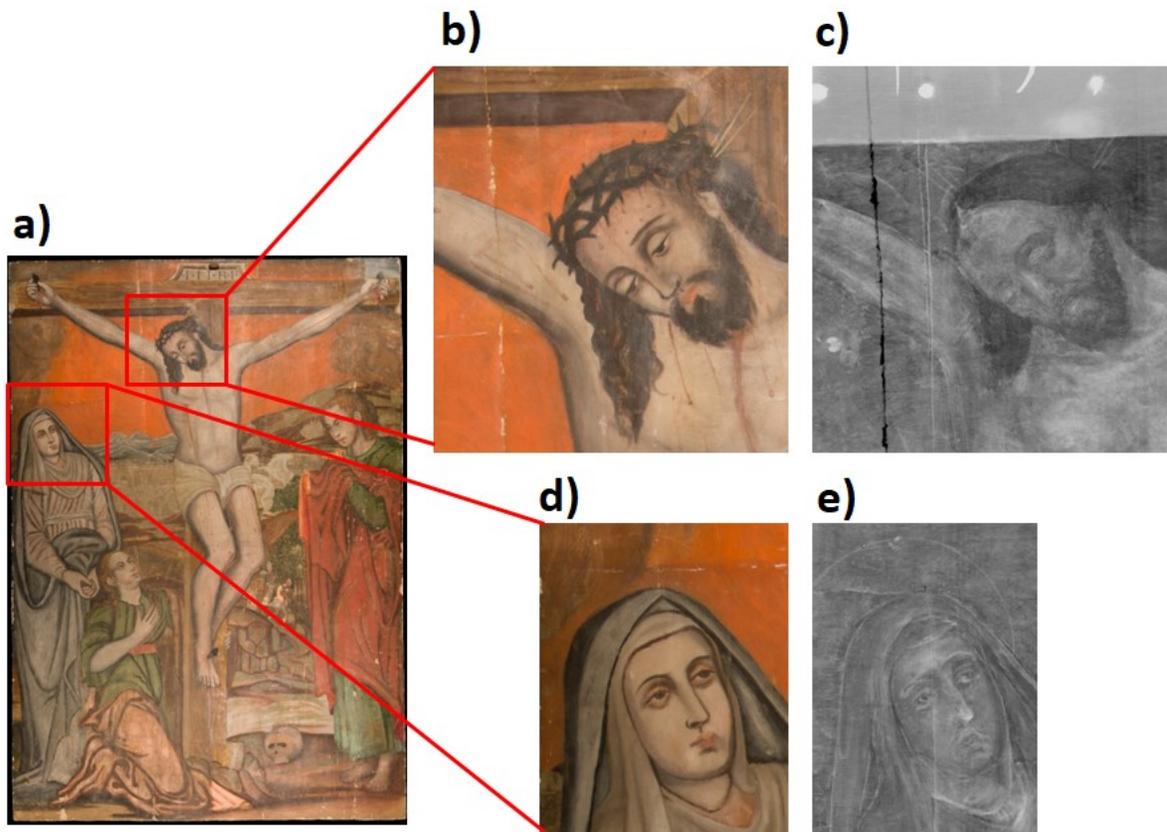


Figura 5.3 a) Fotografía en el visible de La crucifixión, proveniente del ex convento de Acolman, ubicada en la Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural. b) Detalle de la obra donde se muestra el rostro de Cristo. c) Radiografía a  $(40\pm 2.8)\text{kV}$  y  $(50.0\pm 5.0)\text{mAs}$  con una distancia irradiador-detector de  $(3.00\pm 0.005)\text{m}$  de la zona mostrada en b). d) Detalle de la obra donde se muestra el rostro de la Virgen. e) Radiografía a  $(40\pm 2.8)\text{kV}$  y  $(50.0\pm 5.0)\text{mAs}$  con una distancia irradiador-detector de  $(3.00\pm 0.005)\text{m}$  de la zona mostrada en d).

En la Figura 5.4 tenemos la pintura de El Pentecostés de Baltasar de Echave Orio. En la Figura 5.5 se presenta su radiografía, tomada a  $(45\pm 2.8)\text{kV}$  y  $(50.0\pm 5.0)\text{mAs}$  con una distancia irradiador-detector de  $(3.28\pm 0.005)\text{m}$ . Se observan varias características del soporte de la pintura, como los clavos que la sostienen, los travesaños, los bastidores, agrietamientos en la madera y el daño hecho en esta por insectos xilófagos.



Figura 5.4 El Pentecostés de Baltasar de Echave Orio. Museo Nacional de San Carlos.

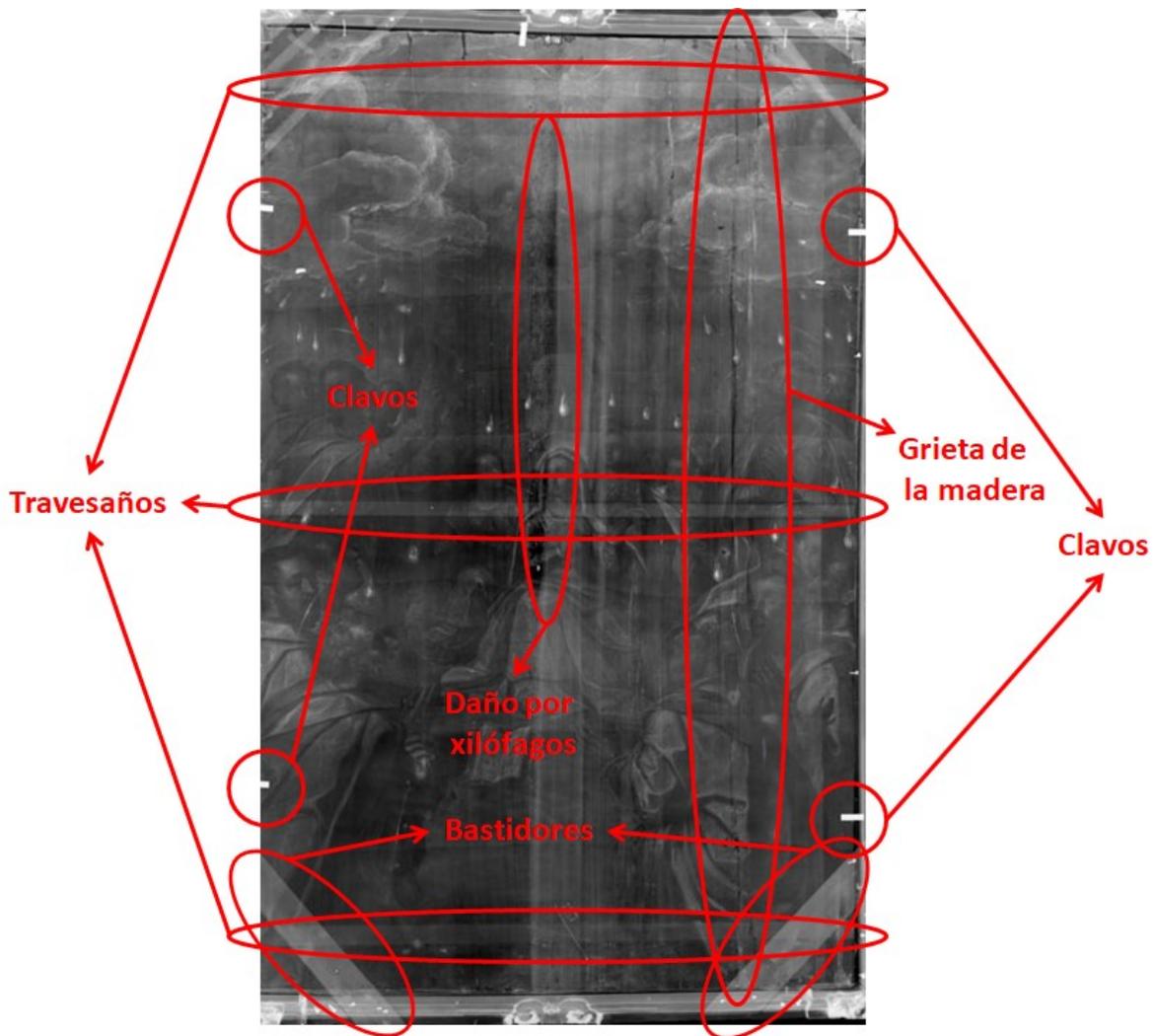


Figura 5.5 Radiografía de El Pentecostés de Baltasar de Echave Orio tomada a  $(45\pm 3.2)$ kV y  $(50.0\pm 5.0)$ mAs con una distancia irradiador-detector de  $(3.28\pm 0.005)$ m. En la imagen se resaltan los bastidores, travesaños, clavos y daño por xilófagos.

En la Figura 5.6 vemos una copia histórica del Entierro de Cristo de Caravaggio junto con su radiografía (tomada a  $(40\pm 2.8)$ kV y  $(45.0\pm 4.5)$ mAs, con una distancia irradiador-detector de  $(1.30\pm 0.005)$ m). En el caso del análisis en pinturas, la radiografía digital nos permite observar la condición y la colocación del soporte de la misma (Fig. 5.6 c)) En la Figura 5.6 d) podemos observar algunas de las restauraciones previas que se le han realizado a la obra.

a)



b)



c)



d)



Figura 5.6 a) Fotografía en el visible del Entierro de Cristo (copia de la obra de Caravaggio). Museo Nacional de San Carlos. b) Detalles de la pintura. c) Radiografía del Entierro de Cristo a  $(40 \pm 2.8)$  kV y  $(45.0 \pm 4.5)$  mAs, con una distancia irradiador-detector de  $(3.28 \pm 0.005)$  m. d) Restauraciones a la pintura

En el caso de la cerámica, la radiografía digital brinda información sobre la preparación de la pasta de la cerámica, la manera en que se manufacturó la pieza y su estructura. A través de esta información se puede determinar las técnicas de producción y el avance tecnológico que existía al hacerla.

A través del barrido de energías que se presenta en la pieza de cerámica de la Figura 5.7, podemos observar que la orilla del recipiente es más radio opaca, al mantener un tono de gris claro a lo largo de todo el barrido. Al alejarnos de la orilla hacia el centro de la pieza, podemos ver como las tonalidades se vuelven más oscuras, lo que nos indica que existe un adelgazamiento en el material.

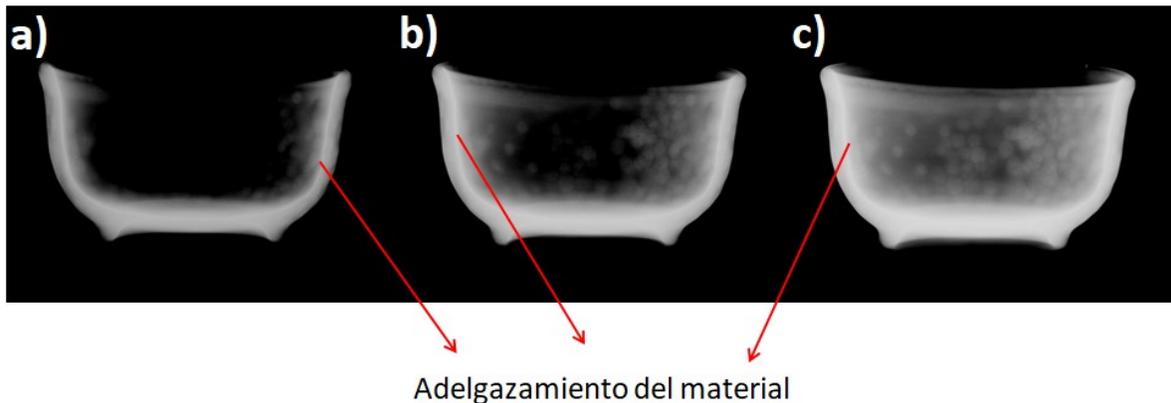


Figura 5.7 Radiografías de una pieza de cerámica tomadas a: a)  $(60\pm 4.2)\text{kV}$  y  $(50.0\pm 5.0)\text{mAs}$ , b)  $(50\pm 3.5)\text{kV}$  y  $(45.0\pm 4.5)\text{mAs}$ , c)  $(40\pm 2.8)\text{kV}$  y  $(40.0\pm 4.0)\text{mAs}$ , con una distancia irradiador-detector de  $(2.00\pm 0.005)\text{m}$ . El barrido de energías nos permite estudiar la estructura de la pieza.

En la Figura 5.8 b) se logran observar los pigmentos utilizados para la decoración de la pieza. Las líneas horizontales que atraviesan la pieza en la radiografía son debidas a cómo se fabricó usando un torno, lo que nos indica la técnica de manufactura, y el cambio en el espesor de la pared a media altura. También se observan los colores azules de superficie.

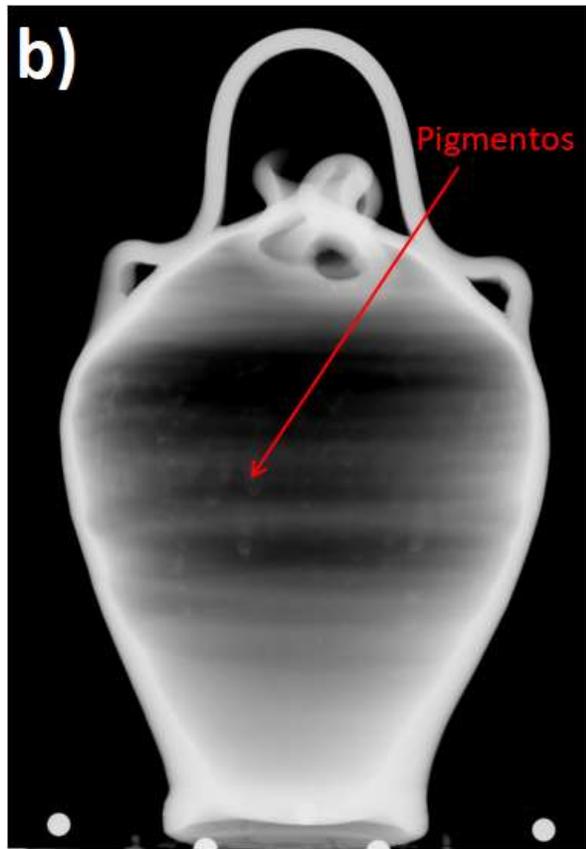


Figura 5.8 a) Vasija de cerámica. b) Radiografía tomada a  $(45\pm 3.2)$ kV y  $(45.0\pm 4.5)$ mAs con una distancia irradiador-detector de  $(2.00\pm 0.005)$ m donde se aprecian detalles de los pigmentos y la técnica de manufactura.

En la Figura 5.9 b) se observa como el asa de la tetera es una pieza que fue adherida al cuerpo principal. También podemos ver la diferencia de densidad del asa con el resto de la pieza y la manera en que se hizo la boquilla.

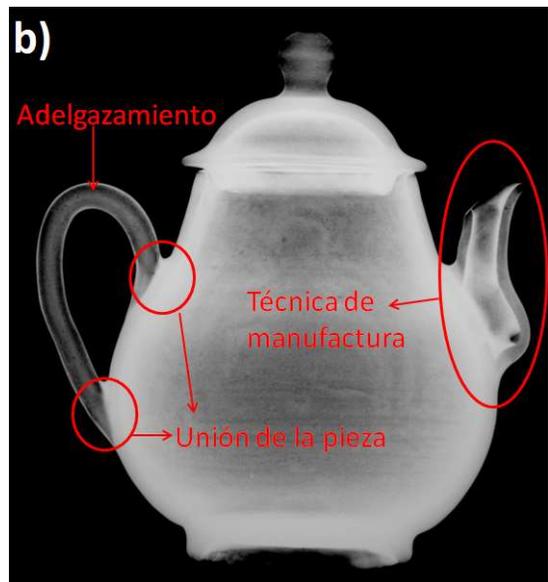


Figura 5.9 a) Tetera de cerámica. b) Radiografía tomada a  $(45\pm 3.2)$ kV y  $(45.0\pm 4.5)$ mAs con una distancia irradiador-detector de  $(2.00\pm 0.005)$ m donde se aprecian técnicas de manufactura

Como se mencionó en el capítulo 1, una de las ventajas de la radiografía digital es la posibilidad del tratamiento de las imágenes, de tal manera que se pueda recuperar información de radiografías con un contraste limitado. A continuación se presentan algunos ejemplos de imágenes procesadas utilizando el software Lucis Pro 6 SA.

Lucis utiliza un Procesamiento de Histéresis Diferencial (DHP por sus siglas en inglés), un sofisticado algoritmo de procesamiento de imágenes, para extraer y resaltar patrones dentro de una imagen digital caracterizada por las variaciones en la intensidad de la misma. Esta capacidad mejora y revela detalles que de otra manera no serían perceptibles a simple vista. Lucis logra esto procesando matemáticamente la imagen como un arreglo bidimensional de información numérica, detectando selectivamente y haciendo énfasis en ciertos aspectos de la información visual y convirtiendo el resultado de vuelta a una imagen [16].

En la Figura 5.10 se muestra la radiografía de la rondana obtenida en la sección 4.5.2 con la fluorescencia de rayos X producida por una película de Cu. (Figura 4.27). En la Figura 5.11 tenemos la misma imagen procesada utilizando el software Lucis Pro. Podemos observar que el contraste mejora en gran medida y la rondana puede apreciarse más fácilmente.



**Figura 5.10** Radiografía de una rondana generada a través de la fluorescencia producida con una película de cobre a  $(70\pm 4.9)\text{kV}$  y  $(50.0\pm 5.0)\text{mAs}$

**Figura 5.11** Radiografía (Figura 5.10) procesada digitalmente con el software Lucis Pro para mejorar el contraste

En la Figura 5.12 se muestra la radiografía de la primera página de “*EL DEVOTO PEREGRINO Y VIAGE DE TIERRA SANTA*” obtenida utilizando un filtro de Ag sobre el irradiador (sección 4.5.1, Figura 4.22). En la Figura 5.13 tenemos la misma imagen después

de ser procesada. A diferencia de la radiografía original, en esta imagen podemos apreciar claramente todas las letras, y con más facilidad la interfaz papel-aire.



Figura 5.12 Radiografía generada con un filtro de Ag a  $(40\pm 2.8)\text{kV}$  y  $(21.0\pm 2.1)\text{mAs}$  con una distancia irradiador detector de  $(0.700\pm 0.0005)\text{m}$

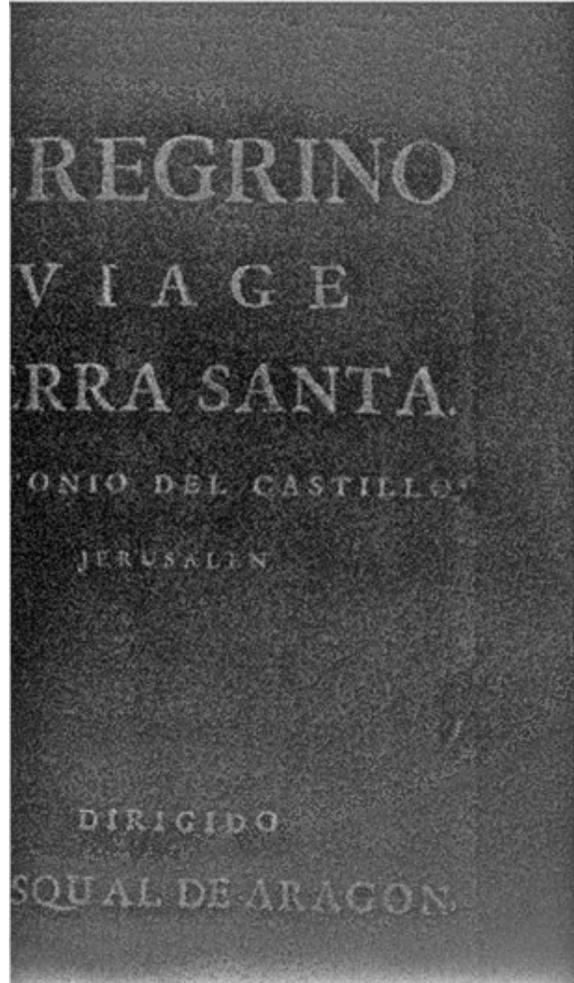


Figura 5.13 Radiografía (Figura 5.10) procesada digitalmente con el software Lucis Pro para mejorar el contraste.

En la Figura 5.14 se tiene un caracol con una lámina de oro incrustada, proveniente del Templo Mayor de Tenochtitlán. En la Figura 5.15 a) se encuentra la radiografía de esta pieza tomada a  $(40\pm 2.8)\text{kV}$  y  $(30.0\pm 3.0)\text{mAs}$ , con una distancia irradiador detector de  $(1.30\pm 0.005)\text{m}$ . En la Figura 5.15 b) tenemos esta misma radiografía procesada digitalmente.

Podemos observar como en la Figura 5.15 b) recuperamos información perdida en la imagen original, como son detalles de la estructura interna del caracol y la manera en que se encuentra incrustada la lámina de oro.



Figura 5.14 caracol con una lámina de oro incrustada, proveniente del Templo Mayor de Tenochtitlán. Trabajo hecho en colaboración con el Taller de Metales de la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía (ENCRyM) del Instituto Nacional de Antropología e Historia.

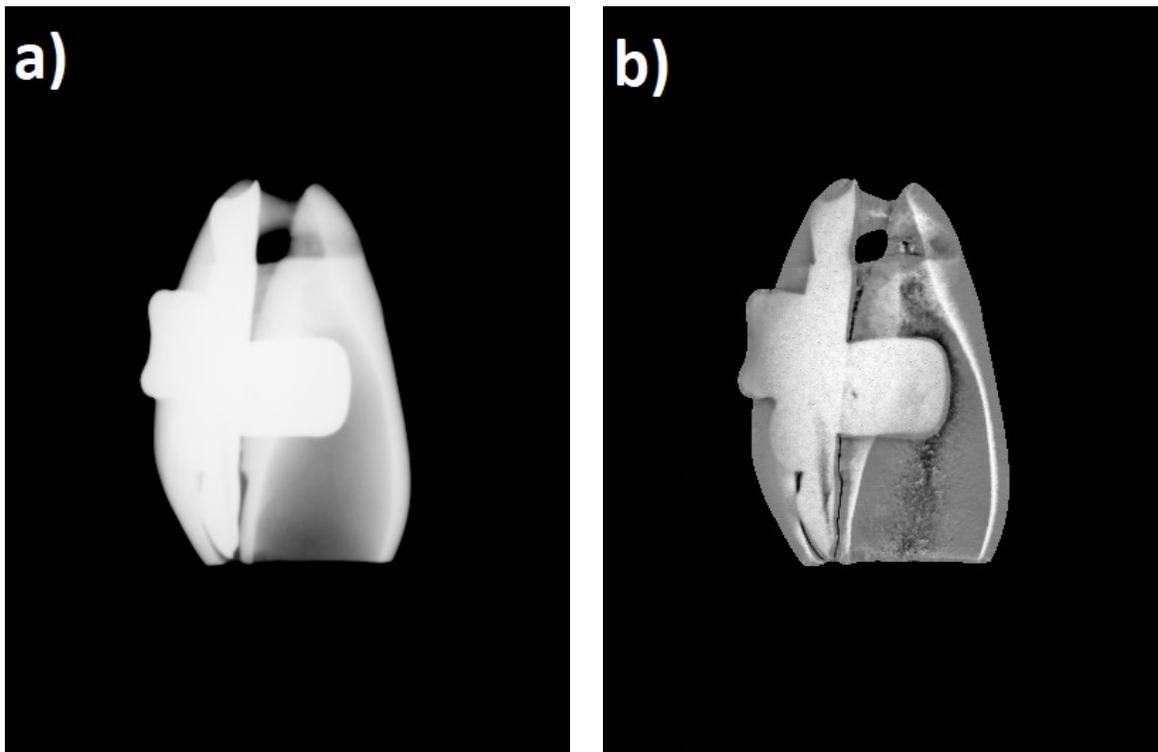


Figura 5.15 a) Radiografía de la pieza mostrada en la Figura 5.14 tomada a  $(40\pm 2.8)$  kV y  $(30.0\pm 3.0)$  mAs, con una distancia irradiador detector de  $(1.30\pm 0.005)$  m. b) Radiografía procesada digitalmente con el software Lucis Pro para mejorar el contraste.

A partir de estos ejemplos, podemos decir que la radiografía digital es una técnica no destructiva, no invasiva y que puede ser aplicada *in situ*; que nos permite analizar una gran variedad de objetos. El tener un tiempo de adquisición de imagen muy corto nos ayuda a realizar interpretaciones preliminares en el momento. En el caso del equipo del LANCIC-IF, la portabilidad del mismo permite fácilmente el estudio de objetos que no pueden ser trasladados al laboratorio, llevando el equipo al lugar en el que se requiera.

La radiografía digital es una técnica exploratoria global no puntual, por lo que, a diferencia de otras técnicas, podemos obtener una imagen del objeto de estudio hasta en una sola toma. Sin embargo, solos nos permite observar estructuras, no nos ofrece información elemental o de composición.

También cabe resaltar que nos encontramos acotados por el intervalo de energía del equipo (40 kV – 100 kV) de tal manera que los objetos de estudio deben tener ciertas características en su composición, densidad y grosor para así poder obtener una imagen de calidad.

## 6. Conclusiones

En este trabajo fue posible realizar una adecuada caracterización del equipo de radiografía digital compuesto por el irradiador PXM-40BT de la marca POSKOM y el sistema de adquisición de imágenes de la marca Vidisco modelo FlashXPro.

En el experimento de la determinación del haz efectivo de radiación con una distancia irradiador-detector de 1 m se encontró que la dimensión del área efectiva es de  $(31.000 \pm 0.311)$ cm x  $(28.900 \pm 0.290)$ cm, lo cual representa una diferencia del 66.9% con la luz guía del colimador y del 59.4% con el área reportada por el fabricante.

Para una distancia irradiador-detector de 2 m se encontró que la dimensión del área efectiva es de  $(58.100 \pm 0.582)$ cm x  $(38.600 \pm 0.387)$ cm, lo cual representa una diferencia del 79.3% con la luz guía del colimador.

A una distancia de 1 m, el área dada por el fabricante es de cierta manera correcta, ya que toda el área está comprendida por el cono de rayos X, sin embargo, no considera el gradiente que existe dentro de este mismo cono, lo cual compromete la calidad de la radiografía. A una distancia de 2 m, la única referencia que se tiene (la luz guía del colimador) no muestra de ninguna forma el área efectiva de radiación.

En el experimento de la respuesta del detector se obtuvo la siguiente curva de respuesta.

$$y = y_0 + Ae^{-cx} \quad (6.1)$$

con un coeficiente de determinación  $R^2=0.9819$  y los siguientes valores para las constantes:

**Tabla 6.1 Valores del ajuste exponencial (ecuación 6.1)**

Constante	Valor	Error estándar
$y_0$	1.4233	0.04304
$A$	-2.8196	0.04899
$c$	0.018	0.00109

Nuestro objetivo se cumplió y se ve englobado en la ecuación 6.1. La ley de atenuación depende explícitamente de la distancia recorrida e implícitamente de la energía incidente a través del coeficiente de atenuación. Nosotros hemos logrado caracterizar la respuesta del detector con una única dependencia explícita de la energía, sin la necesidad de recurrir a la respuesta de atenuación a la energía individual de cada elemento.

En el experimento de la resolución se obtuvo que la resolución del detector es de  $(135\pm 10)\mu\text{m}$ , valor con una diferencia de tan solo el 6.25% con lo que reporta el fabricante ( $144\mu\text{m}$ ).

El experimento de separación de la aproximación de haces paralelos no arrojó ningún resultado que indique una deformación de la imagen por el ángulo de los rayos X incidentes en función de la distancia irradiador-detector, pero sí mostró el efecto que tiene en la imagen la posición del irradiador en esta. Al no mantener el irradiador completamente paralelo al disco en las cuatro radiografías, podemos ver una diferencia en la cantidad de radiación que llega al objeto a lo largo del diámetro. Se podría utilizar a futuro un riel para mantener la posición paralela del irradiador.

En ninguno de los dos experimentos de radiografía a baja energía se logró obtener una imagen adecuada, pero se encontraron resultados interesantes.

En la disminución de la energía con un filtro logramos observar el fenómeno del borde de absorción claramente. Generalmente, cuando pasamos una distribución de rayos X por un filtro, esperamos que exista un endurecimiento del haz, es decir, que se atenúe la región de la distribución de baja energía y tengamos un haz con una energía promedio mayor, lo cual, en el caso de un objeto de estudio como el papel, no brindaría un mejor contraste. Sin embargo podemos ver en las figuras 4.21 y 4.22 que el contraste mejora utilizando el filtro, aunque este no es el suficiente para poder hacer un estudio del objeto.

En la radiografía con fluorescencia de rayos X las aproximaciones de la composición del papel y el valor de  $\varepsilon_a(E)$  fueron los factores determinantes para no haber logrado el objetivo. La presencia de rayos X saliendo por la armazón del irradiador también es algo que nos impide formar una imagen, ya que aunque la intensidad de estos es muy baja como para que se note su presencia al tomar radiografías a 40 kV, a energías bajas como las que buscamos utilizar aquí, estos estropean la imagen. Sin embargo, el hecho de haber logrado formar imágenes con fluorescencia, da lugar a intentar seguir trabajando a futuro con este arreglo, utilizando las correcciones mencionadas al final de la sección 4.5.2 y buscando crear un blindaje extra que evite fugas de radiación que incidan en el detector.

A través de estos resultados se ha logrado dar una caracterización al funcionamiento del sistema de radiografía digital del LANCIC-IF, lo cual permitirá generar imágenes radiográficas con una calidad óptima para los diversos tipos de objetos de estudio que puedan presentarse. Conociendo los parámetros obtenidos aquí, se podrá trabajar de forma eficiente para los diversos tipos de objetos de estudio que puedan presentarse.

Los primeros resultados obtenidos en los experimentos de radiografía a baja energía abren la puerta a la posibilidad de analizar una nueva gama de objetos del patrimonio cultural (de baja densidad o espesor delgado). Complementariamente a esto se estableció una técnica de tratamiento de imágenes para estos objetos.

Como trabajo a futuro, se puede partir de los resultados obtenidos en los experimentos de radiografía a baja energía para continuar realizando cálculos y así determinar filtros y geometrías óptimas para mejorar la calidad de las radiografías, obteniendo imágenes que puedan interpretarse incluso sin la necesidad de un tratamiento digital.



# Bibliografía

---

- [1] Lang, J., Middleton, A. *Radiography of cultural material*. Segunda edición (2005) Editorial Elsevier.
- [2] Korner, M., Weber, C. H., Wirth, S., Pfeifer, K. J., Reiser, M. F., & Treitl, M. (2007). *Advances in digital radiography: physical principles and system overview*. *Radiographics*, 27(3), 675-686.
- [3] Tertian, R., Broll, N. *Spectral Intensity Distributions from X-Ray Tubes. Calculated Versus Experimental Evaluations*. *X-Ray Spectrometry*, 13(3), 134-141
- [4] Van Grieken, R., Markowicz, A. *Handbook of X-Ray Spectrometry*. Segunda edición (2002) Editorial Marcel Dekker, Inc. pp. 21, 22.
- [5] Zschornack, G. *Handbook of X-Ray Data*. Primera edición (2007) Editorial Springer. p. 24
- [6] Podgorsak, E.B. *Radiation Physics for Medical Physicists*. Segunda edición. Editorial Springer.
- [7] Estevez, S. *Protección radiológica. Parte I: Conceptos Generales*.
- [8] Krane, K. *Introductory Nuclear Physics*. Segunda edición. (1998) Editorial John Wiley & Sons. pp. 199-202
- [9] Eisberg, R., Resnick, R. *Física cuántica*. (2002) Editorial Limusa Wiley. p. 65
- [10] *Interaction of Gamma Radiation with Matter*. Publicación en línea obtenida el 5 de marzo del 2018 de <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/interaction-radiation-matter/interaction-gamma-radiation-matter/>
- [11] Agarwal, B.K. *X-Ray Spectroscopy. An introduction*. Segunda edición (1979) Editorial Springer-Verlag. p 144
- [12] Attix, F. H. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. (1986) John Wiley & Sons. p. 147
- [13] Booth, C. H., Bridges, F. (2005). *Improved self-absorption correction for fluorescence measurements of extended X-ray absorption fine-structure*. *Physica Scripta*, 2005(T115), 202.

- [14] Granfors, P. R., Aufrichtig, R. (2000). *Performance of a 41× 41-cm<sup>2</sup> amorphous silicon flat panel x-ray detector for radiographic imaging applications*. *Medical physics*, 27(6), 1324-1331.
- [15] Hubbell, J. H., Trehan, P. N., Singh, N., Chand, B., Mehta, D., Garg, M. L., et al. (1994). *A Review, Bibliography, and Tabulation of K, L, and Higher Atomic Shell X-Ray Fluorescence Yields*. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 23(2), 339-364.
- [16] *Lucis Pro*. Publicación en línea obtenida el 10 de septiembre del 2018 de <https://www.lucispro.com/science-medical-apps.html>
- [17] Zenobio, M. A. F., Zenobio, E. G., da Silva, T. A., & do Socorro Nogueira, M. (2015). *Mass attenuation coefficient ( $\mu/\rho$ ), effective atomic number ( $Z_{eff}$ ) and measurement of x-ray energy spectra using based calcium phosphate biomaterials: a comparative study*.
- [18] Lança, L., & Silva, A. (2013). *Digital radiography detectors: a technical overview*. In *Digital imaging systems for plain radiography* (pp. 9-19). Springer, New York, NY
- [19] Hendee, W. R., & Ritenour, E. R. *Medical Imaging Physics*. (2003) John Wiley & Sons.
- [20] Byun, S. H. (2014). *Radioisotopes and Radiation Methodology*. *Med. Phys.* 4R06/6R03, version, 15.
- [21] Pincu, R., & Kleinberger, O. *Leading X-ray technologies for NDT*.
- [22] Cherry Jr., Robert N. 24 de marzo del 2011. *Sources of Ionizing Radiation*. Publicación en línea obtenida el 23 de marzo del 2018 de <http://www.iloencyclopaedia.org/part-vi-16255/radiation-ionizing/48/sources-of-ionizing-radiation>
- [23] Greene, A. F., Hartley, C. W., Dupuy, P. D., & Chinander, M. (2017). *The digital radiography of archaeological pottery: Program and protocols for the analysis of production*. *Journal of Archaeological Science*, 78, 120-133.

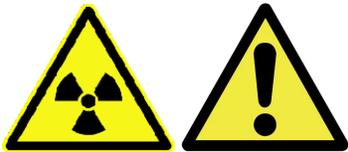
# Anexo 1.

## Descripciones y protocolos de trabajo para el sistema de radiografía digital PXM-40BT

---

### **ADVERTENCIA**

El uso de radiación de rayos-X puede resultar peligroso si no se siguen las medidas de seguridad adecuadas. No utilice el equipo sin estar seguro de su funcionamiento y operación adecuado. Las siguientes descripciones y protocolos no pretenden sustituir una lectura a fondo del manual de operación provisto por el fabricante.



**BAJO NINGUNA CIRCUNSTANCIA SE COLOQUE USTED O PERMITA QUE CUALQUIER PERSONA O SER VIVO SE ENCUENTREN FUERA DE LA POSICIÓN SEGURA (2 METROS DETRÁS DEL IRRADIADOR) AL REALIZAR IRRADIACIONES.**

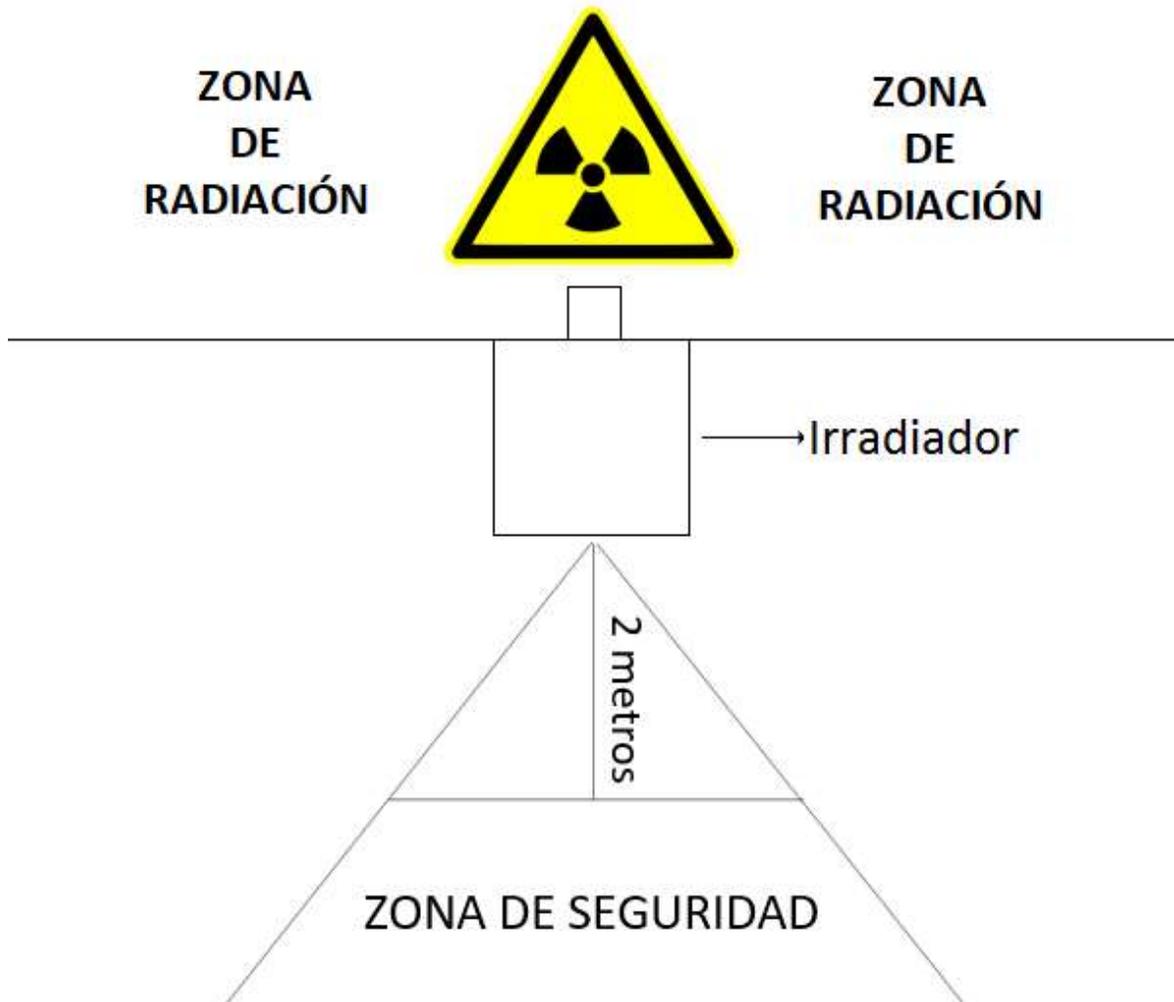
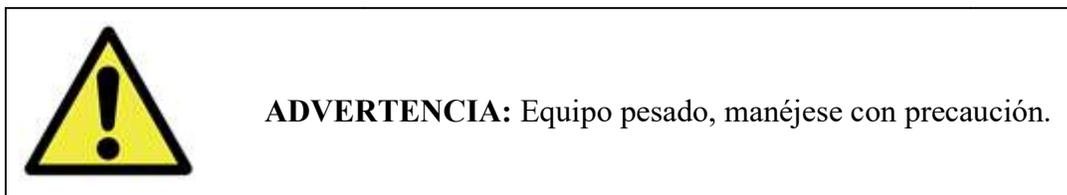


Diagrama A1.1 Zona de seguridad al realizar irradiaciones

## Descripción del equipo

1. Irradiador PXM-40BT



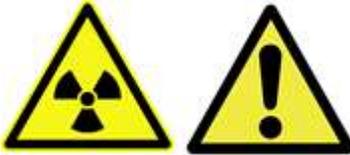
El irradiador consiste de las siguientes partes y dispositivos, las cuales se encuentran dentro del estuche de aluminio (adicionalmente, dentro de estuche se encuentra la bitácora)

- Disparador de mano.

El disparador de mano es un interruptor blanco que se conecta directamente al cuerpo principal del irradiador.



Figura A1.1 Disparador de mano



**ADVERTENCIA** Una vez conectado el disparador, existe la posibilidad de realizar exposiciones, por lo que se debe manejar con cuidado, dejar en lugares seguros donde se tenga la certeza de que no exista la posibilidad de que se presione por accidente y mantener conectado solo el tiempo que sea necesario.

Su operación está compuesta por dos etapas:

— Modo PREP (Ver Figura A1.2)

Este modo se obtiene al bajar únicamente la primera sección del interruptor. Nos permite revisar que esté funcionando y enciende la luz del colimador.

— Modo Exposición (ver Figura A1.3)

Este modo se obtiene al oprimir por completo el interruptor, al hacerlo se realiza la exposición de rayos-X.



**CUIDADO** Antes de utilizar el modo de exposición asegúrese de que no haya ningún ser vivo fuera de la posición segura (VER DIAGRAMA A1.1)



Figura A1.2 Modo PREP



Figura A1.3 Modo exposición

- Extensión del disparador de mano.

Cable enroscado que se conecta por un extremo al cuerpo principal del irradiador, mientras que por el otro extremo se conecta el disparador. Esta extensión permite realizar irradiaciones desde la posición segura.

- Cargador.



Figura A1.4 Cargador del irradiador

- Cable de alimentación principal.
- Cuerpo principal del irradiador.

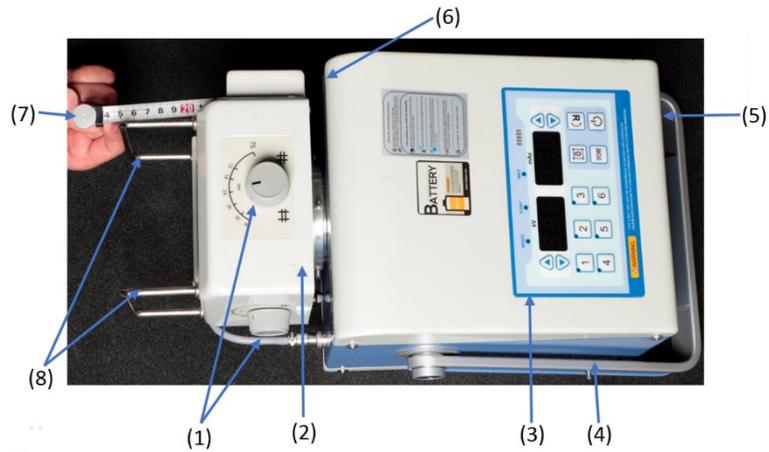


Figura A1.5 Cuerpo principal del irradiador

(1)	Perillas del colimador
(2)	Colimador
(3)	Panel de operación
(4)	Asa de metal
(5)	Conector de carga
(6)	Conector del interruptor manual
(7)	Cinta métrica
(8)	Guía

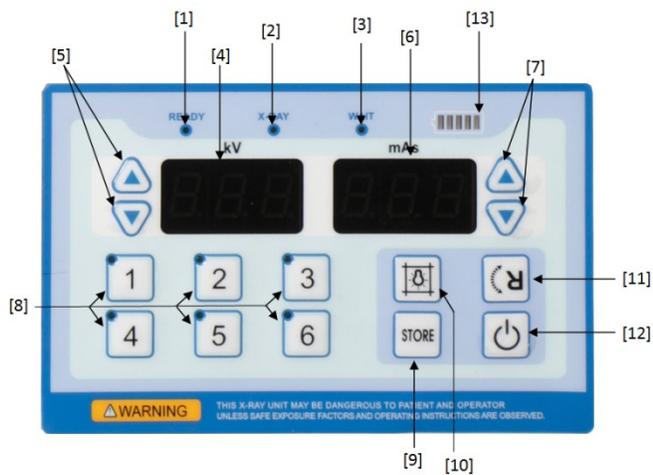


Figura A1.6 Panel de control

[1]	Lámpara preparada	[8]	Interruptor APR (1-6)
[2]	Lámpara de rayos-X	[9]	Interruptor de almacenamiento APR
[3]	Lámpara en espera	[10]	Interruptor de encendido /almacenamiento de la lámpara
[4]	Pantalla de kV	[11]	Interruptor de visualización inversa
[5]	Interruptor para subir/bajar kV	[12]	Interruptor de encendido/apagado
[6]	Pantalla de mAs	[13]	Indicador de batería
[7]	Interruptor para subir/bajar mAs		

[1] Lámpara preparada

Este LED se enciende cuando la exposición de rayos-X está lista al presionar la primera etapa del interruptor manual (modo PREP)

[2] Lámpara de rayos-X

Este LED se enciende durante la exposición de rayos-X un segundo después de la segunda etapa del interruptor manual (exposición) se presiona.

[3] Lámpara en espera

Este LED se enciende por 0.5 segundos para la protección del tubo de rayos-X hasta que la siguiente exposición esté disponible.

[4] Pantalla de kV

La pantalla de lectura de kV muestra los valores técnicos de kV del tubo para radiación de rayos-X.

[5] Interruptor para subir/bajar kV

Este botón ayuda a colocar los ajustes de kV del tubo. Un toque mueve 1 kV a la vez.

[6] Pantalla de mAs

La pantalla de lectura de mAs muestra los valores técnicos de mAs del tubo para radiación de rayos-X.

[7] Interruptor para subir/bajar mAs

Este botón ayuda a colocar los ajustes de mAs del tubo. Un toque mueve 1 mAs a la vez.

[8] Interruptor APR (1-6)

Opción para restablecer algún ajuste APR

[9] Interruptor de almacenamiento APR

Opción para guardar hasta 21 ajustes de kV y mAs

[10] Interruptor de encendido /almacenamiento de la lámpara

Este botón enciende la lámpara del colimador y el apuntador láser.

Luz de la lámpara del colimador encendida: presione el botón de encendido/almacenar de la lámpara cuando la lámpara del colimador esté apagada.

[11] Interruptor de visualización inversa

Este botón ayuda a la fácil lectura de los valores de kV y mAs estando al revés. Se utiliza dependiendo de si el equipo se encuentra montando en una mesa o en el tripié.

[12] Interruptor de encendido/apagado

Este interruptor enciende o apaga el equipo.

[13] Indicador de batería

Este LED muestra la cantidad de batería. El FND “bt\_Lo” aparecerá en la pantalla de lectura cuando la batería sea insuficiente, y la potencia de la máquina se apagará automáticamente dentro de 3 segundos. La batería debe ser cargada durante 30 minutos en este caso.

## 2. Sistema de radiografía digital

El sistema de radiografía digital consiste de las siguientes partes y dispositivos, las cuales se encuentran dentro del estuche naranja.

- ICU

El ICU es una caja naranja con un asa en la parte superior. Tiene tres entradas: una para conectarse con la interface box (*CDU*), una para conectarse al detector (*Imager*) y una para conectarse con el sistema de rayos-X. Si bien esta última conexión no se utiliza, se requiere conectar el cable para el correcto funcionamiento del sistema.

El ICU tiene luces indicadoras que nos permitirán saber si hay un correcto funcionamiento del sistema.



Figura A1.7 a) Vista lateral del ICU. b) Vista superior del ICU. c) Vista posterior del ICU; se observa la entrada de pines del CDU, la luz indicadora de encendido y del cable de corriente. d) Vista frontal del ICU; se observan las entradas de pines del detector, del cable X-ray y la luz indicadora de conexión del detector.

- Detector (*Imager*)  
El detector es un panel plano con un asa y una entrada cubierta con una tapa para el cable ICU-detector. A la altura de la conexión se encuentran 3 focos, los cuales nos indicarán si la conexión se ha logrado exitosamente.

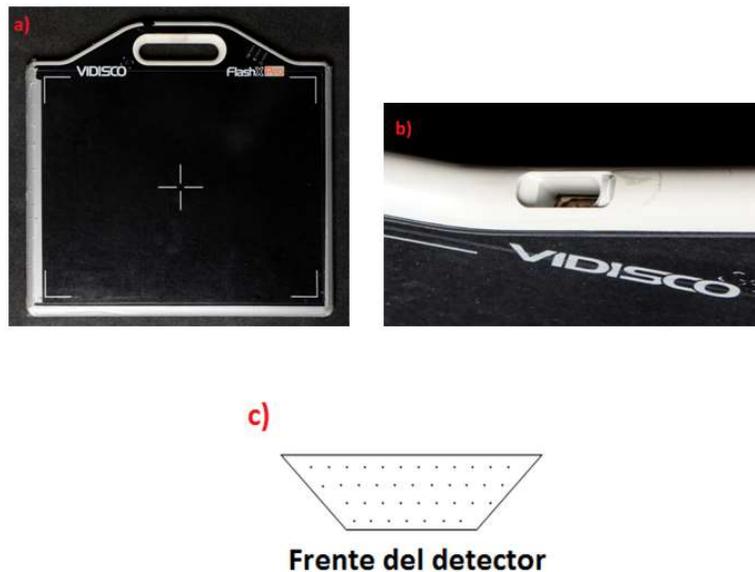


Figura A1.8 a) Cara frontal del detector. b) Entrada del cable ICU-detector en la parte superior del detector. c) Diagrama de la conexión del cable ICU-detector con la leyenda "Frente del detector" indicando la orientación en la que debe enchufarse dicho cable.



**PRECAUCIÓN:** el detector es un dispositivo delicado, por lo que debe manejarse con cuidado y asegurarse de que se coloque de tal manera de que se encuentre estable.

- Cable ICU-detector

El extremo que se conecta al detector tiene una forma trapezoidal (se debe verificar que se está introduciendo correctamente para evitar dañar el cable y la entrada) El otro extremo es una conexión de pines, la cual va a su entrada correspondiente en el ICU (guiarse por el código de colore de las entradas y los cables)



Figura A1.9 Cable ICU - detector



Figura A1.10 Conexión del cable ICU-detector al detector



Figura A1.11 Conexión del cable ICU-detector al ICU

- Cable ICU-X-ray

Solo es necesario conectar la entrada del cable (conexión de pines, extremo morado) que va a su entrada correspondiente en el ICU (guiarse por el código de colore de las entradas y los cables) debido a que, si bien no se

hace uso de esta opción, el programa no funciona adecuadamente si no se detecta que el cable se encuentre conectado al ICU



Figura A1.12 Cable ICU – X-ray



Figura A1.13 Conexión del cable ICU – X-ray al ICU

- Cable 50m  
Este cable se encuentra enrollado en un carrete sujeto al estuche naranja. Para conectar el extremo correspondiente al ICU (conexión de pines), se debe desenrollar primero la cantidad necesaria de cable para alcanzar el ICU sin problemas. El otro extremo del cable (sujeto al centro del carrete) debe conectarse a la caja de interface.

**IMPORTANTE:** Cada una de las conexiones de pines tiene un punto rojo en la parte superior, el cual debe alinearse al momento de conectarse con el punto rojo de su entrada correspondiente. Es importante asegurarse de que estén alineadas antes de enchufar, ya que de no estarlo se puede dañar el cable y la entrada.

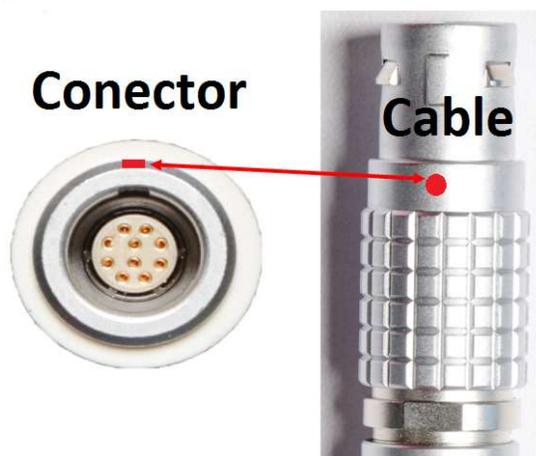


Figura A1.14 Señalización para la correcta conexión de las entradas de pines

- Cable de alimentación principal  
Cable de corriente que se conecta a la caja de interface y a la toma de corriente.
- Laptop (computadora de control)  
Computadora sujeta con velcros y una banda de seguridad. En ella se encuentra el programa para manejar al detector de rayos-X.



Figura A1.15 Cable de 50m, interface box y laptop

- Interface box  
Caja negra fija en el estuche naranja en la cual se conecta el cable de corriente y el cable de 50m

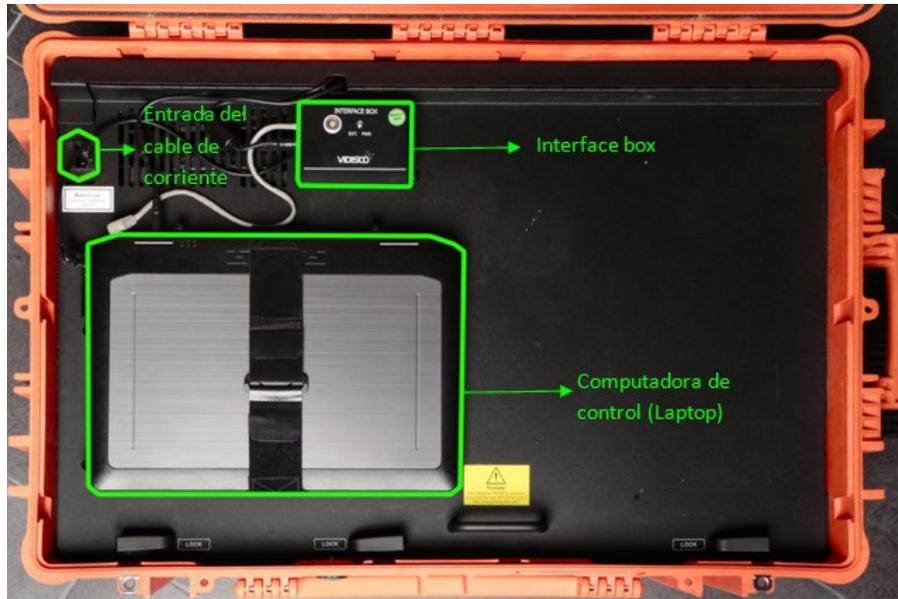


Figura A1.16 Entrada del cable de corriente, interface box y laptop

## Protocolo de salida

Antes de salir a realizar trabajo de campo, se debe verificar que se llevan todos los elementos necesarios.

Una vez en el área de trabajo, se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Armar el tripié con ruedas.
- Colocar y asegurar el soporte al tripié.
- Colocar y asegurar el irradiador al soporte.



**ADVERTENCIA: equipo pesado, manéjese con precaución.**

- Conectar cargador del irradiador a la toma eléctrica.
  - Encender el irradiador.
- Mientras se completa el ciclo de carga, realizar los siguientes pasos:

Sistema de radiografía digital

- Colocar el estuche naranja en la mesa de trabajo.
- Quitar los seguros y abrir la tapa.
- Colocar el detector en la posición de trabajo y alinear.
- Conectar el cable ICU-detector al ICU.
- Conectar el otro extremo al detector.
- Conectar el cable ICU-X-ray al ICU.

- Extender el cable de 50m desde el estuche naranja una distancia adecuada para conectar al ICU; conectarlo.
- Conectar el otro extremo del cable de 50m a la Interface box.
- Conectar cable de corriente a la entrada de corriente y a la Interface box.
- Encender computadora de control.
- Ejecutar programa Vidisco Xbit (hay un acceso directo en el escritorio)
- Acceder con credenciales predeterminadas.
- Las luces indicadoras en el detector y el ICU deben estar verdes para un correcto funcionamiento.
- Probar adquisición de imagen (Alt + F1)
- Si aparece un cuadro blanco, la prueba fue exitosa.

#### Irradiador

- Conectar la extensión del disparador al irradiador y el disparador a esta.

	<p><b>PRECAUCIÓN: a partir de este punto, existe la posibilidad de realizar exposiciones de rayos-X. Mantenga el disparador en un lugar seguro donde esté seguro de que no exista peligro de que se oprima el interruptor accidentalmente</b></p>
--	---

- Ajustar posición del irradiador y apertura de los colimadores tomando como referencia la luz guía/cruz (posición PREP mode del disparador)
- Alinear láseres guía.
- Oprimir el disparador en modo PREP (verificar que la luz del colimador esté encendida)

	<p><b>PRECAUCIÓN: asegúrese de que no haya nada vivo fuera de la posición de seguridad (ver Diagrama 1) al momento de realizar la exposición</b></p>
---	--

- Activar el detector de rayos-X en el programa (Alt + F1), inmediatamente oprimir el disparador a modo de disparo (exposición) y mantenerlo oprimido.
- Una vez que se haya formado la imagen soltar el disparador.
- Anotar las condiciones experimentales en la bitácora (kV y mAs) (medir distancia del irradiador al objeto de estudio y al detector (cuando sea posible)

Para guardar la imagen:

- En el programa, oprimir Ctrl+F2

- Escribir la información relevante.
- Guardar el archivo en la carpeta correspondiente.
- Al final del experimento exportar todas las imágenes obtenidas en formato tif o jpg.

#### Apagado y guardado

- Desconectar disparador del irradiador.
- Cerrar programa Vidisco X-bit.
- Apagar computadora.
- Verificar que el ICU esté apagado (LED verde apagado).



**ADVERTENCIA: no desconectar nada hasta estar seguro de que el ICU se encuentre apagado**

- Desconectar cable de alimentación principal.
- Desconectar cable del Interface box y sujetar al carrete.
- Desconectar cable 50m –ICU y enrollar al carrete.
- Desconectar cable ICU-X-ray.
- Desconectar cable ICU-detector del ICU.
- Desconectar cable ICU-detector del detector.
- Cerrar tapa del conector del detector.
- En el estuche naranja, asegurar la computadora.
- Guardar los cables.
- Guardar el ICU.
- Guardar el detector.
- Colocar los seguros de la tapa interior negra.
- Verificar la posición de los cables para que estos no se dañen al cerrar la caja.
- Cerrar la caja.
- Poner los seguros de la caja.
- Apagar el irradiador.
- Desconectar el cargador del irradiador de la toma eléctrica.
- Desmontar el irradiador y guardar.
- Guardar el disparador.
- Desmontar el soporte y guardar.
- Guardar el tripié.
- Guardar las ruedas del tripié.

## Anexo 2.

# Cálculo del coeficiente de atenuación del papel (celulosa)

---

Sabemos que el coeficiente de atenuación másico  $\frac{\mu}{\rho}$  de un compuesto está dado por [17]:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{comp} = \sum (W_i) \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (A2.1)$$

donde  $W_i$  es el peso fraccionado de los elementos de la composición y  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$  es el coeficiente de atenuación másico de cada elemento individual. Para la celulosa ( $C_6H_{10}O_5$ ) tendremos que:

$$W_{tot} = 6A_w(C) + 10A_w(H) + 5A_w(O) \quad (A2.2)$$

donde  $A_w$  es el peso atómico, entonces

$$\sum (W_i) \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i = \frac{6A_w(C)}{W_{tot}} \left(\frac{\mu}{\rho}(C)\right) + \frac{10A_w(H)}{W_{tot}} \left(\frac{\mu}{\rho}(H)\right) + \frac{5A_w(O)}{W_{tot}} \left(\frac{\mu}{\rho}(O)\right) \quad (A2.3)$$

sustituyendo utilizando los valores de  $A_w$ <sup>1</sup> y  $\frac{\mu}{\rho}$ <sup>2</sup>

$$\begin{aligned} \sum (W_i) \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i &= \frac{6(12.011u)}{162.141u} \left(0.2076 \frac{cm^2}{g}\right) \\ &+ \frac{10(1.008u)}{162.141u} \left(0.3458 \frac{cm^2}{g}\right) \\ &+ \frac{5(15.999u)}{162.141u} \left(0.2585 \frac{cm^2}{g}\right) \end{aligned} \quad (A2.4)$$

entonces tenemos que

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{celulosa} = 0.2413 \frac{cm^2}{g} \quad (A2.5)$$

multiplicando por la densidad utilizada para el papel ( $3.75g/cm^3$ )

$$\mu_{celulosa} = 0.90cm^{-1} \quad (A2.6)$$

<sup>1</sup> Krane, K. *Introductory Nuclear Physics*. Segunda edición. (1998) Editorial John Wiley & Sons. Estados Unidos de América.

<sup>2</sup> Obtenida en línea de <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>



## Anexo 3.

# Perfiles de grises para la determinación del haz efectivo de radiación

### A3.1 Medición con una distancia irradiador-detector de $(1.000 \pm 0.0005)m$

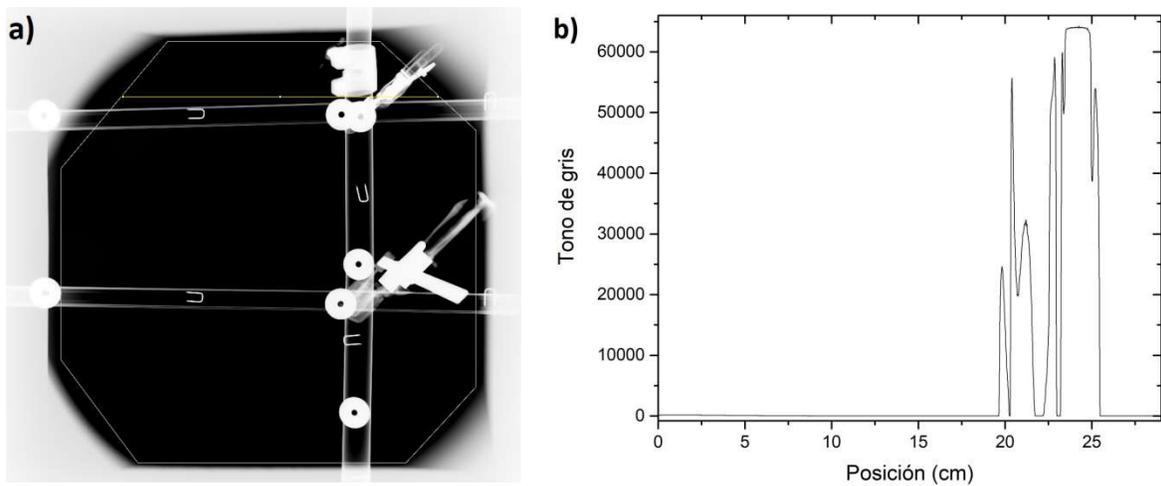


Figura A3.1 a) Primer perfil de gris horizontal. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

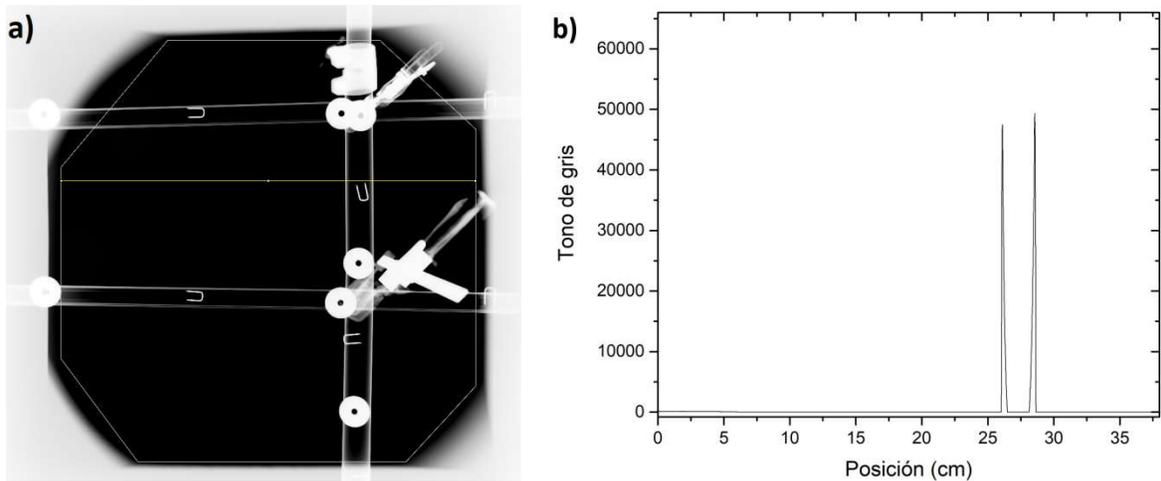


Figura A3.2 a) Segundo perfil de gris horizontal. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

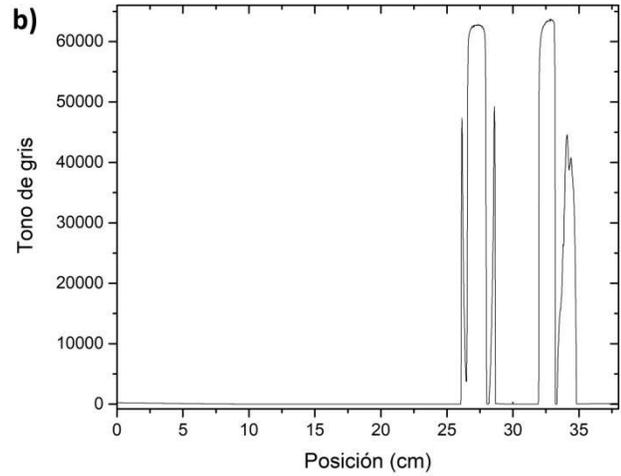
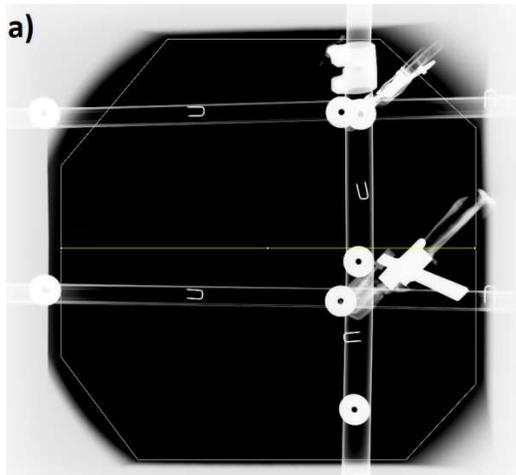


Figura A3.3 a) Tercer perfil de gris horizontal. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

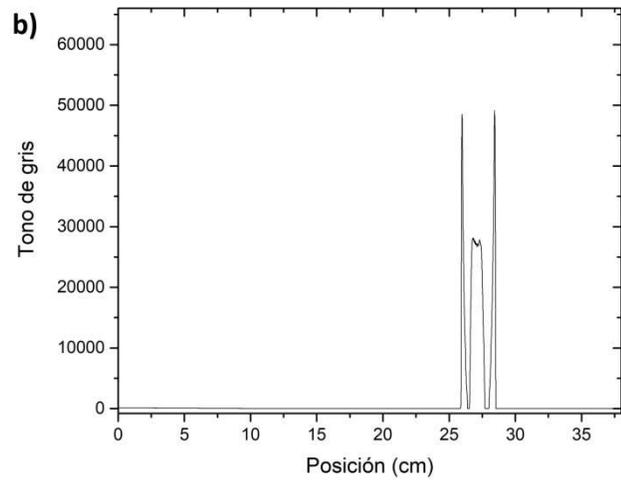
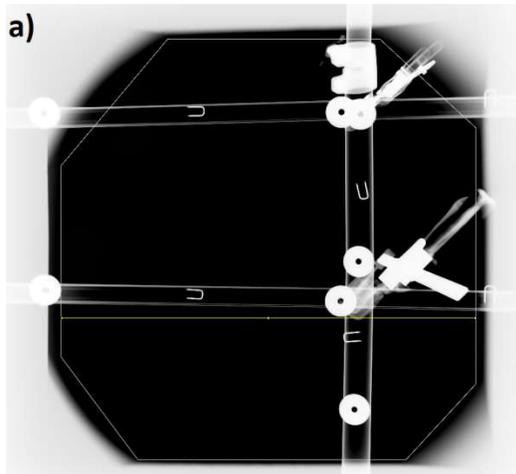


Figura A3.4 a) Cuarto perfil de gris horizontal. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

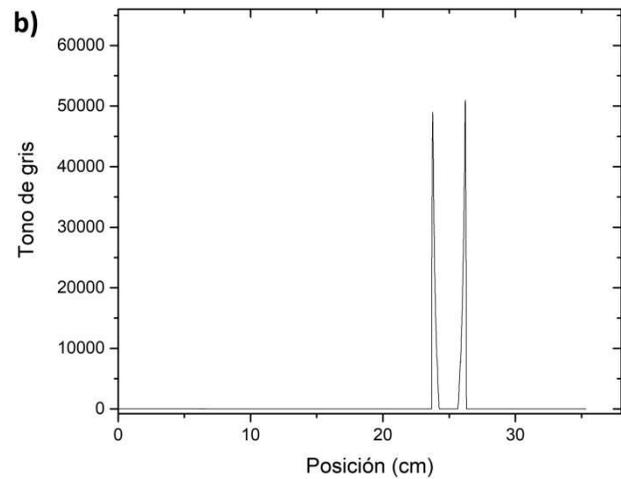
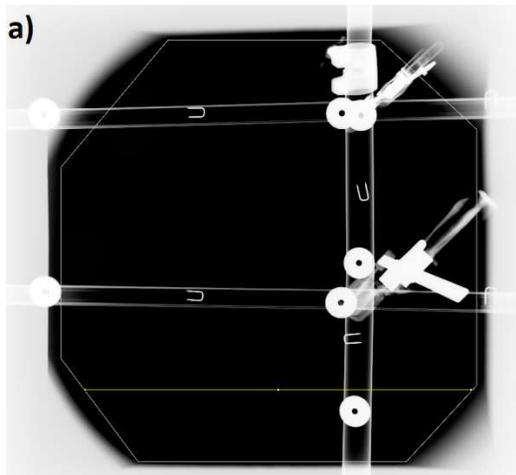


Figura A3.5 a) Quinto perfil de gris horizontal. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

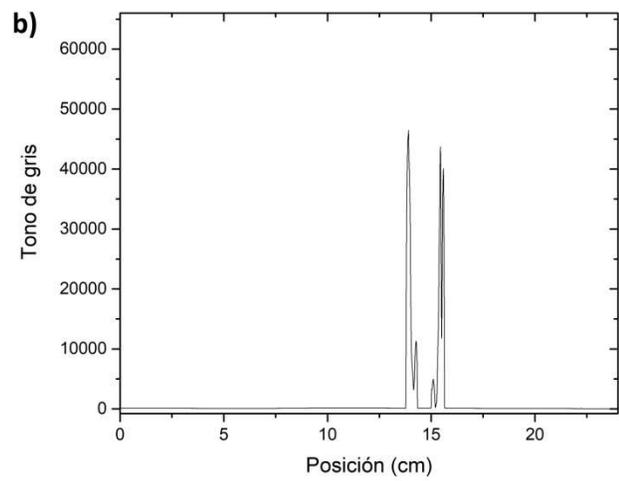
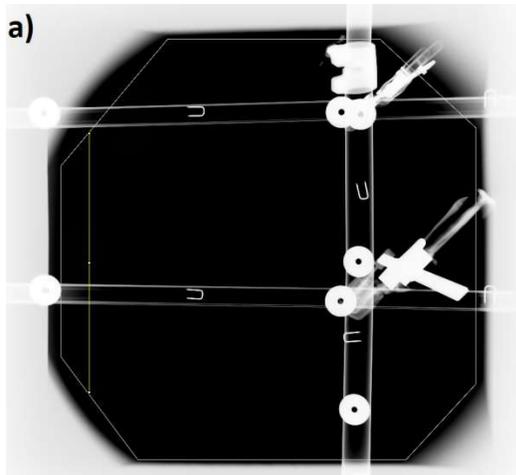


Figura A3.6 a) Primer perfil de gris vertical. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

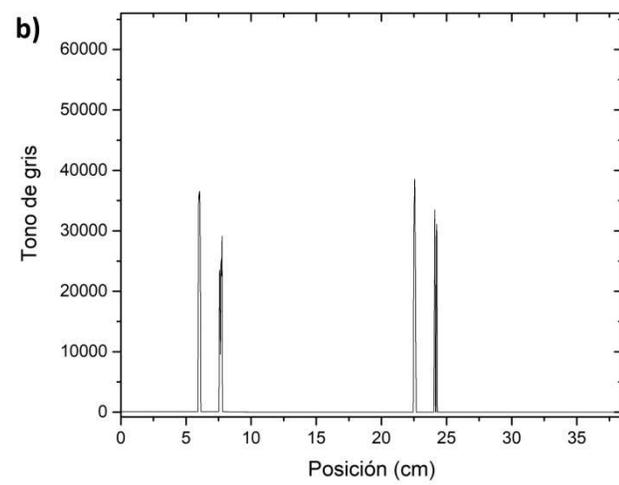
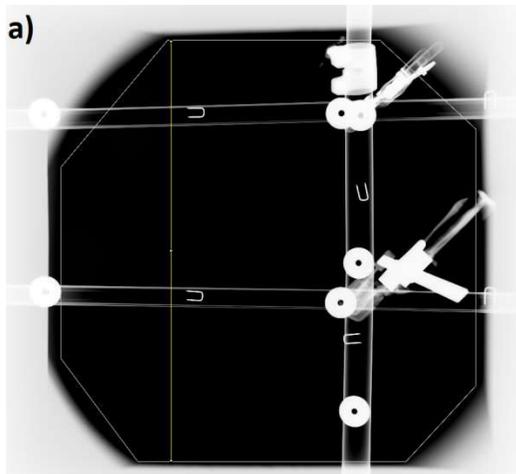


Figura A3.7 a) Segundo perfil de gris vertical. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

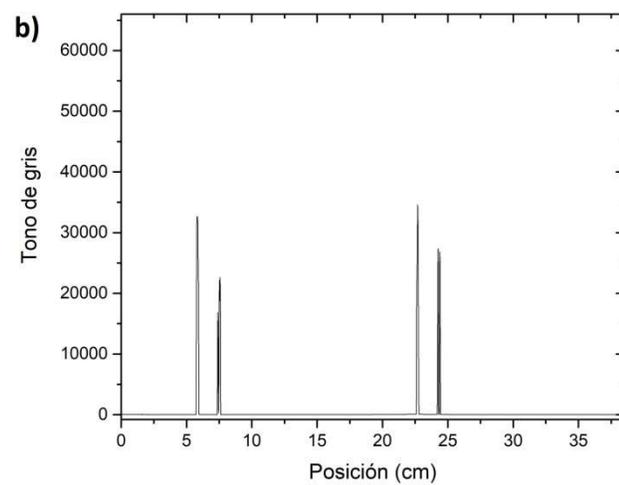
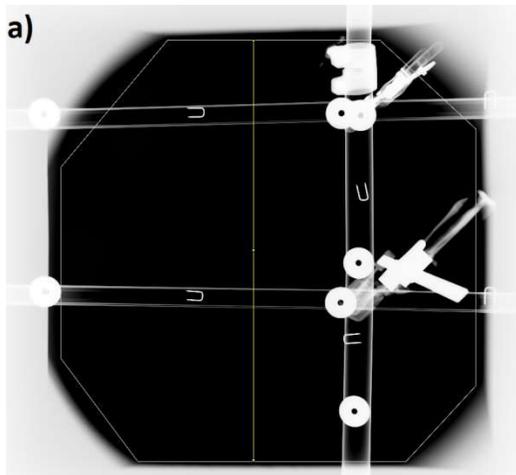


Figura A3.8 a) Tercer perfil de gris vertical. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

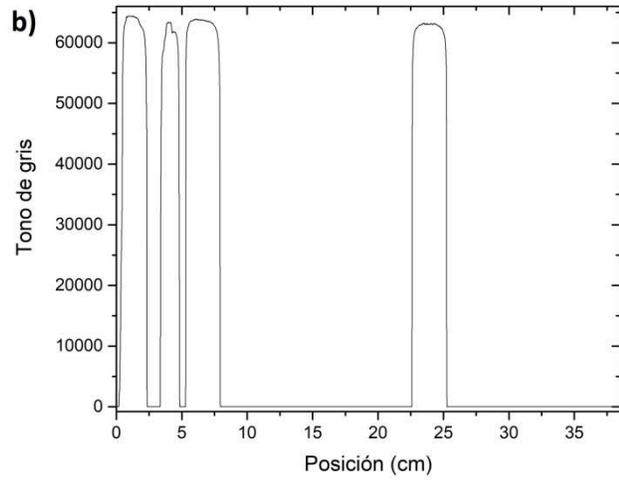
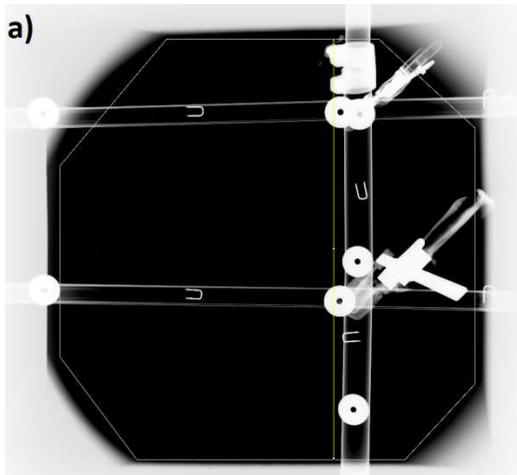


Figura A3.9 a) Cuarto perfil de gris vertical. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

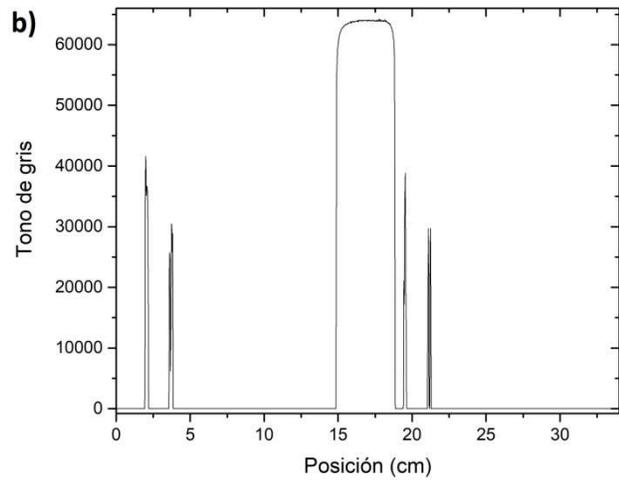
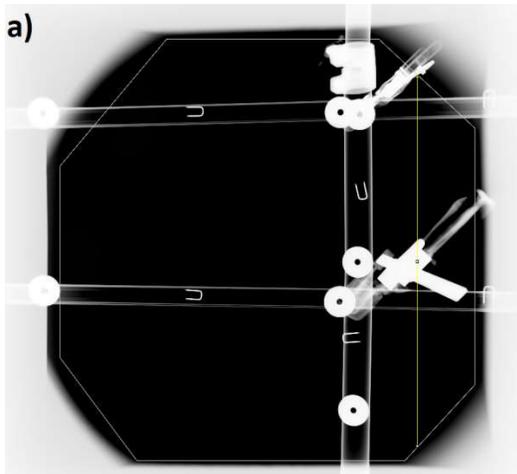


Figura A3.10 a) Quinto perfil de gris vertical. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

### A3.2 Medición con una distancia irradiador-detector de $(2.000 \pm 0.0005)\text{m}$

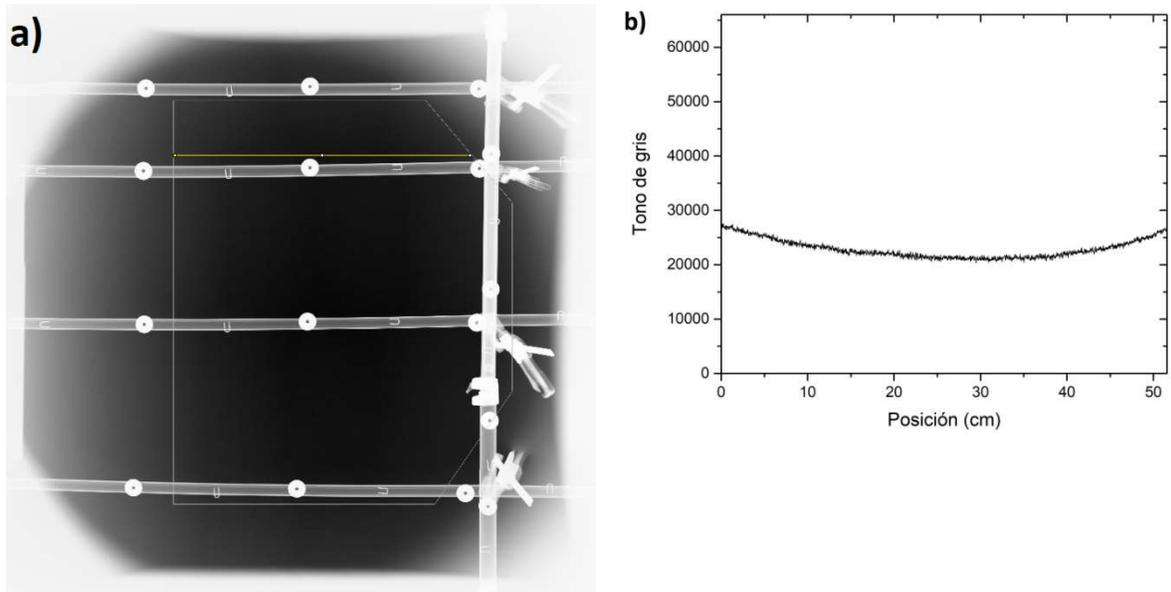


Figura A3.11 a) Primer perfil de gris horizontal. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

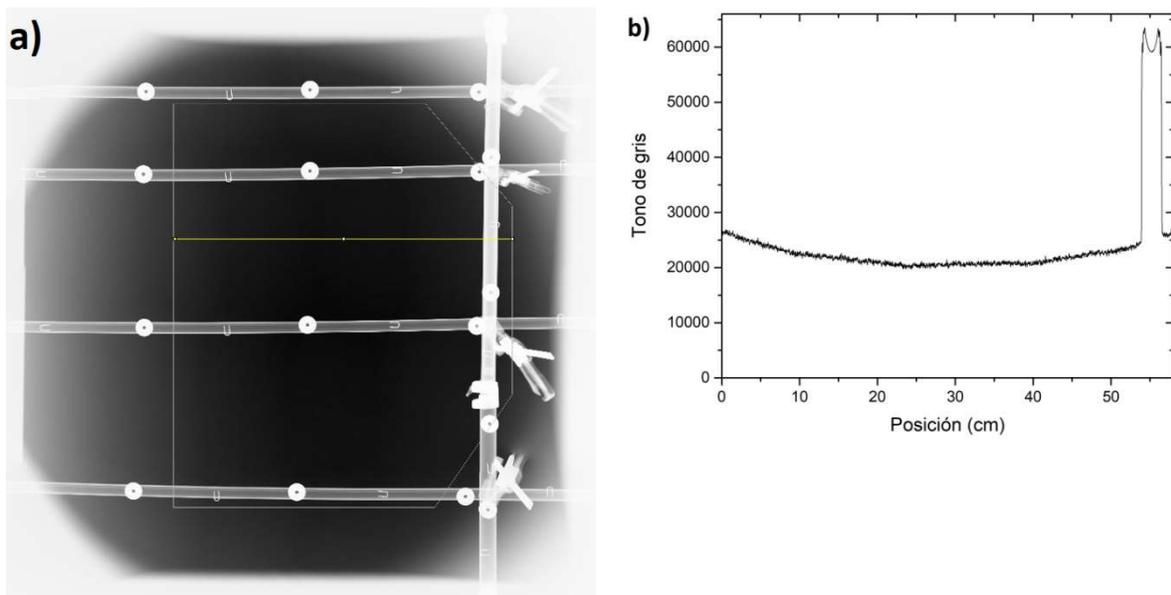


Figura A3.12 a) Segundo perfil de gris horizontal. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

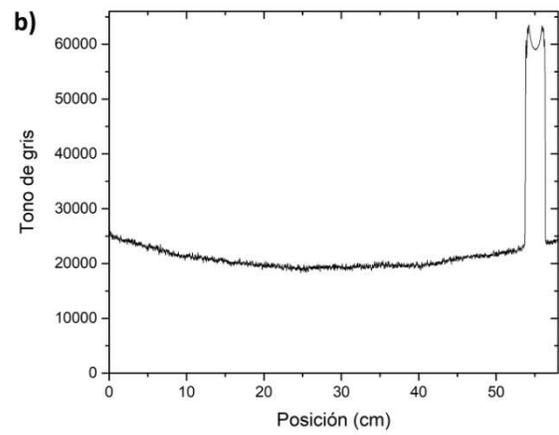
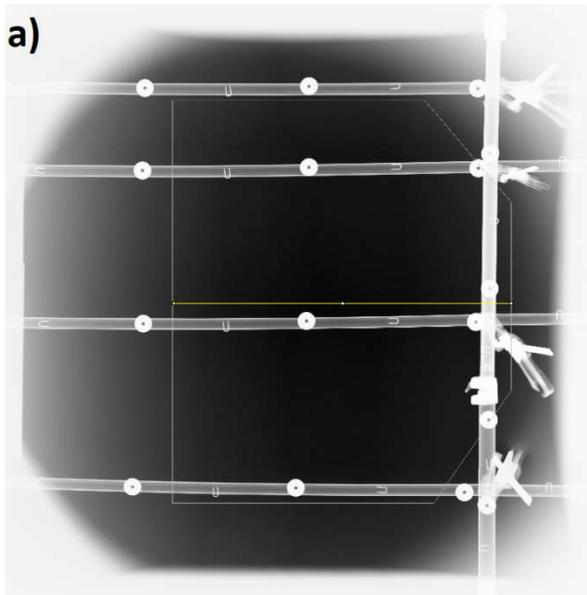


Figura A3.13 a) Tercer perfil de gris horizontal. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

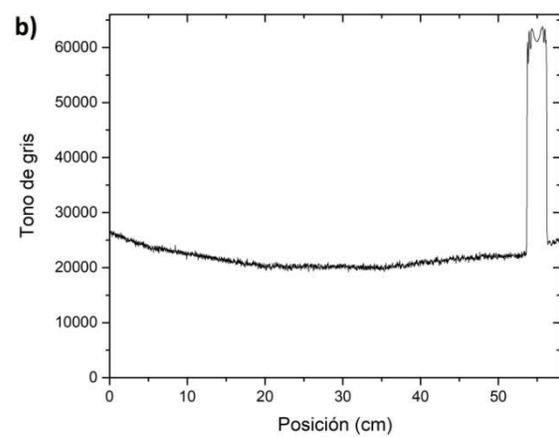
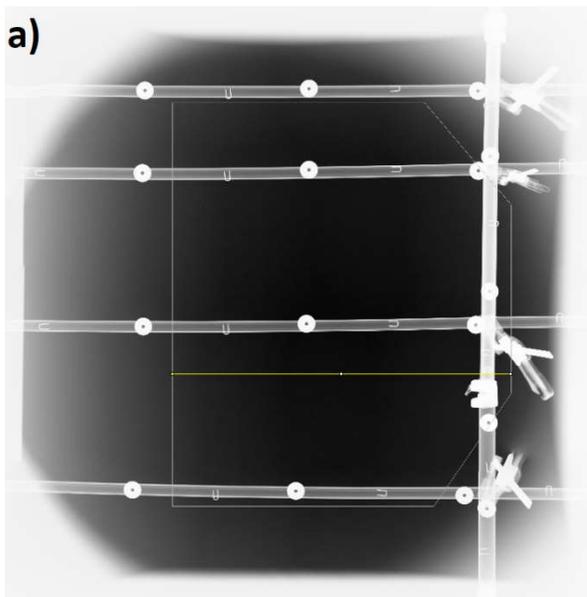


Figura A3.14 a) Cuarto perfil de gris horizontal. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

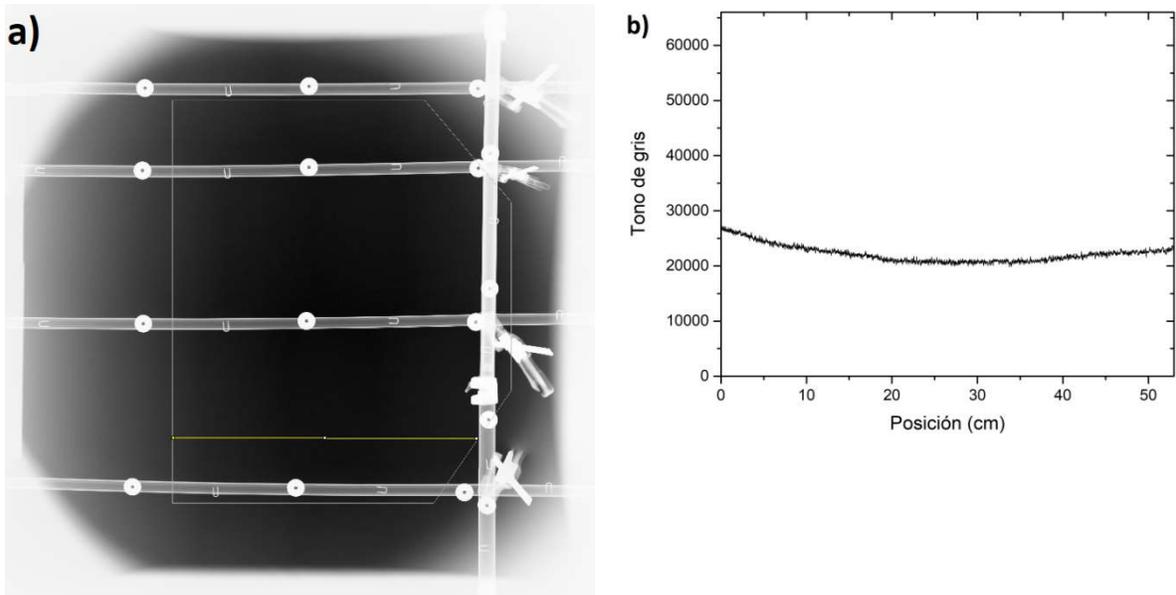


Figura A3.15 a) Quinto perfil de gris horizontal. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

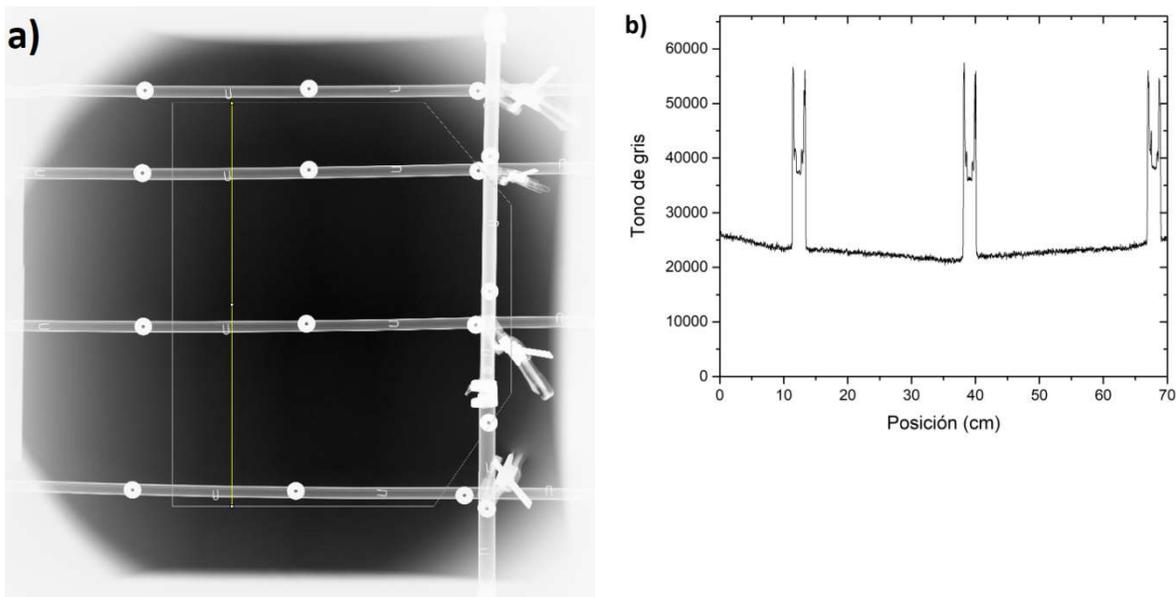


Figura A3.16 a) Primer perfil de gris vertical. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

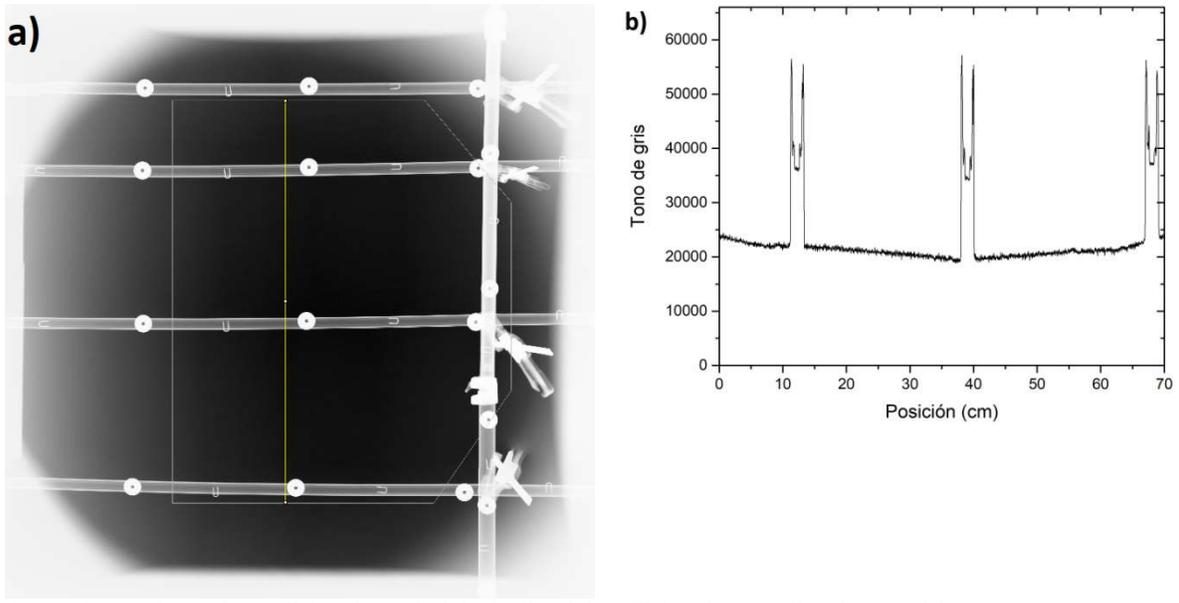


Figura A3.17 a) Segundo perfil de gris vertical. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

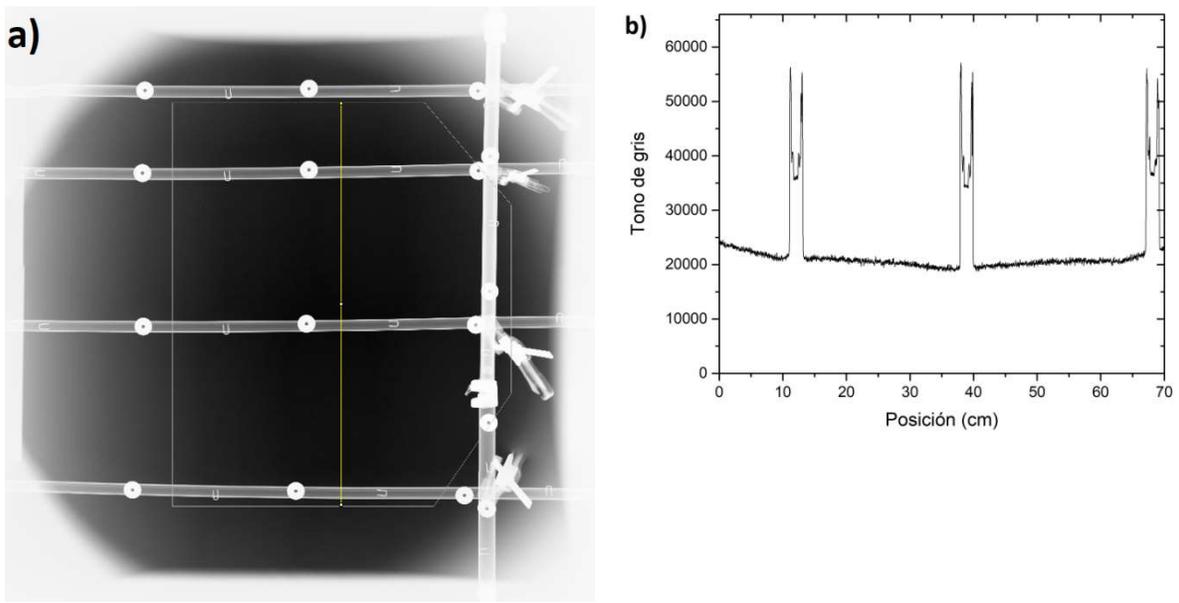


Figura A3.18 a) Tercer perfil de gris vertical. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

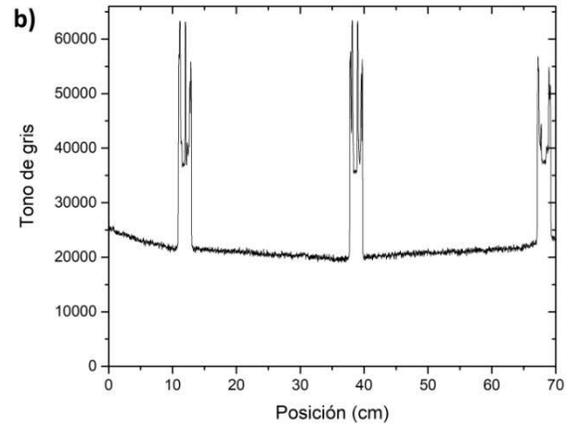
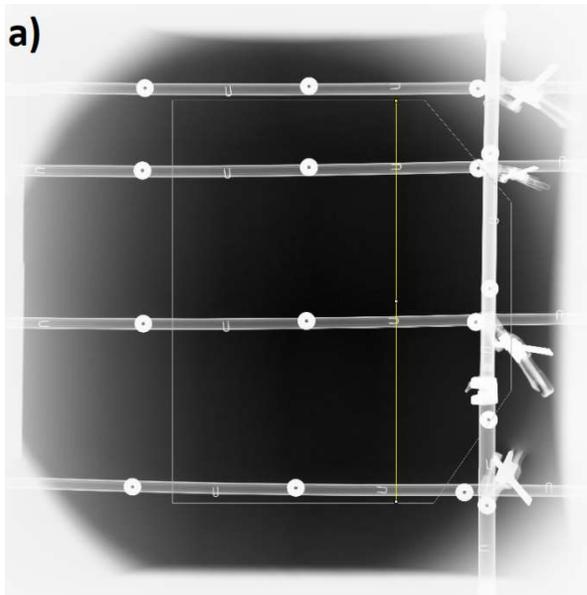


Figura A3.19 a) Cuarto perfil de gris vertical. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))

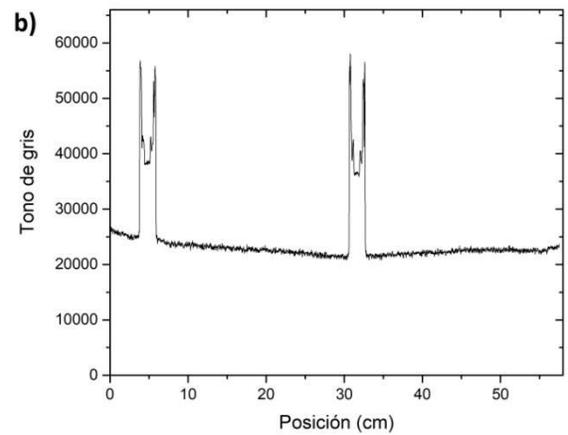
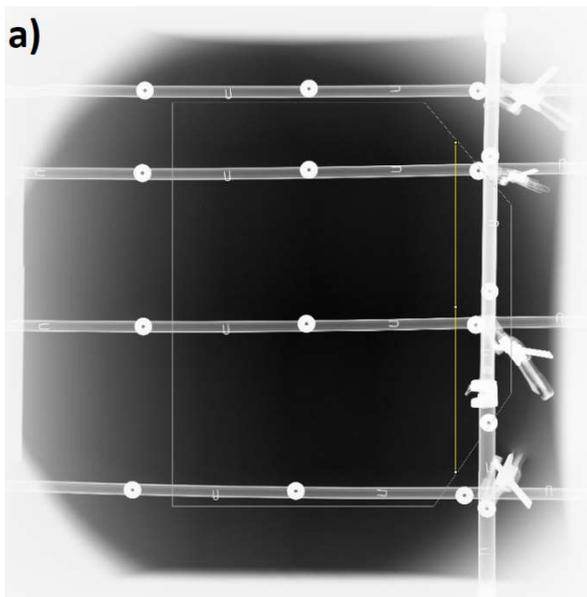


Figura A3.20 a) Quinto perfil de gris vertical. b) Gráfica del perfil de gris (Tono de gris vs Posición (cm))



## Anexo 4. Manejo de XOP 2.3

XOP 2.3 (X-ray Oriented Programs) es un widget que nos permite realizar simulaciones de fuentes de rayos X y óptica de rayos X (filtros, espejos, cristales) entre otras funciones. En este Anexo se muestra cómo utilizar este software para los análisis que se realizaron en este trabajo.

- Para generar una distribución de rayos X, seleccionamos el menú desplegable *Source* → *X-Ray tube generator*. Aquí seleccionamos el tubo de acuerdo al material del ánodo que nos interese.

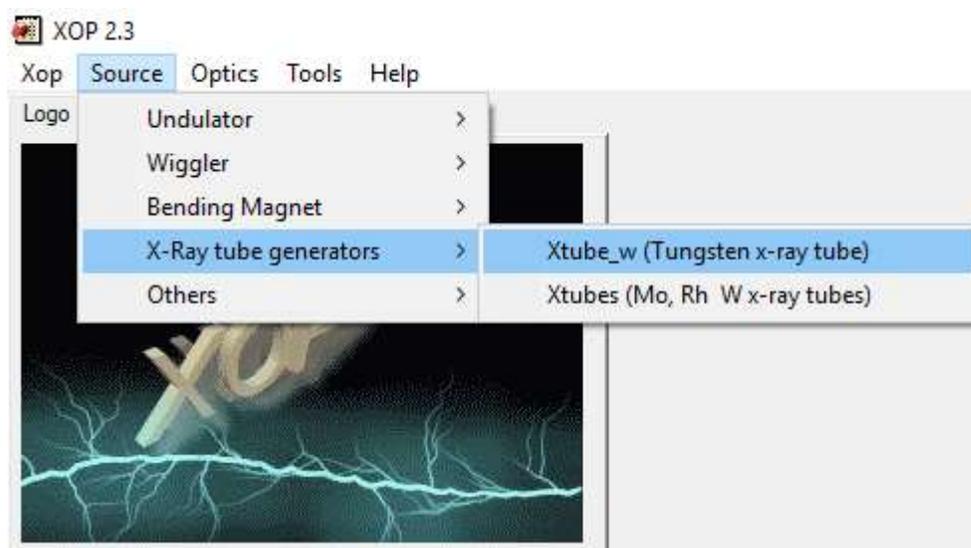


Figura A4.1 Generación de una fuente de rayos X.

- Se abrirá un nuevo menú. En este seleccionamos *Set Parameters* para determinar las condiciones del tubo.

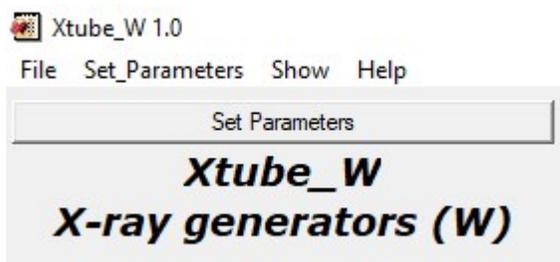


Figura A4.2 Selección de parámetros de la fuente de rayos X.

- Habiendo hecho lo anterior, podemos mostrar la distribución de energía seleccionando *Show* → *Plot Results*.

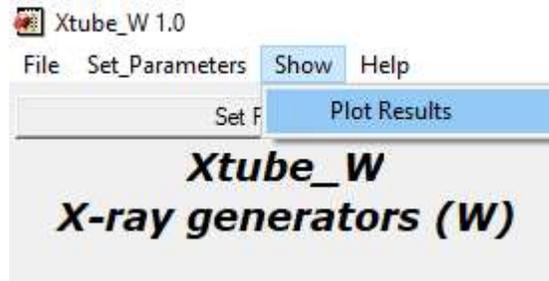


Figura A4.3 Mostrar gráfica de la distribución de rayos X.

- Para guardar la gráfica de la distribución, seleccionamos *File* → *Export ASCII or EXCEL file*.

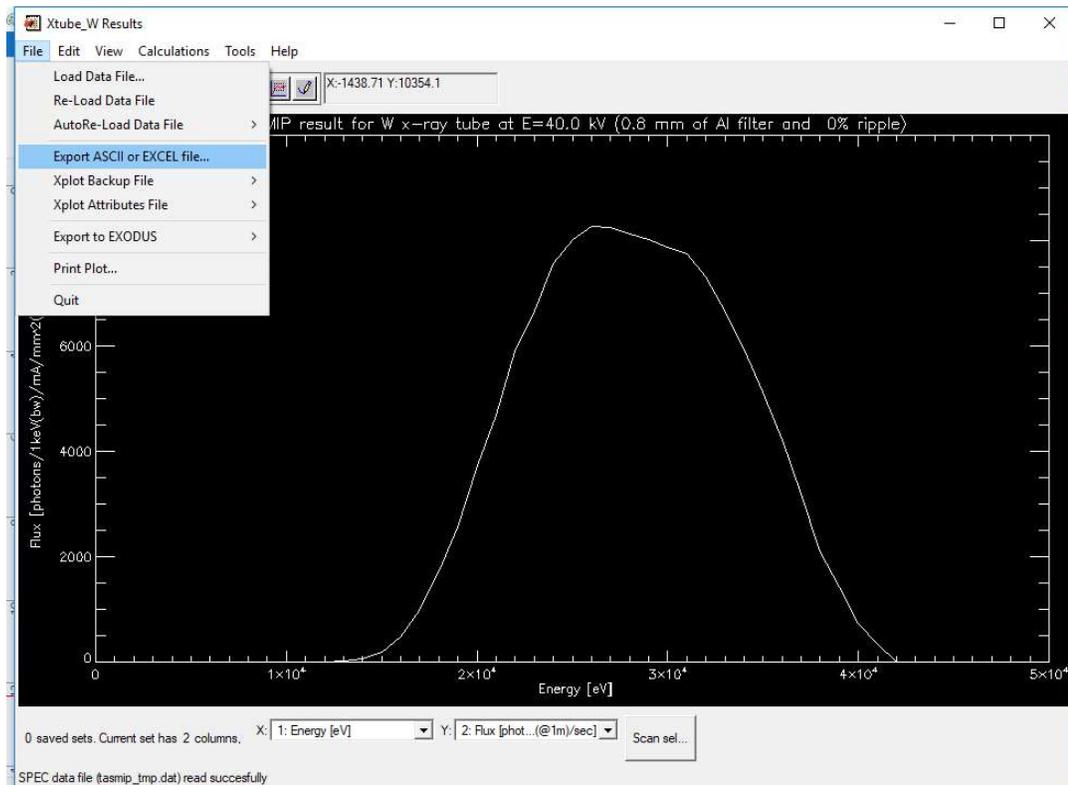


Figura A4.4 Salvar gráfica de la distribución de rayos X.

- Para guardar la distribución y utilizarla para simulaciones de atenuación, regresamos al menú del tubo de rayos X, seleccionamos *File* → *Write files for xop/Optics*. Si aparece la ventana mostrada en la FIGURA AH! significa que la información se guardó correctamente.

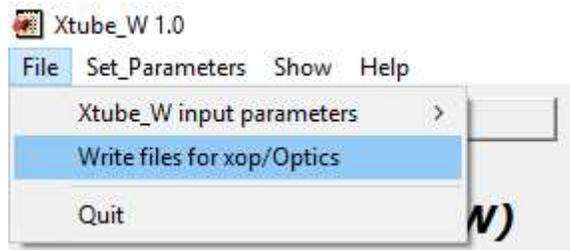


Figura A4.5 Salvar distribución de rayos X para futuras simulaciones.

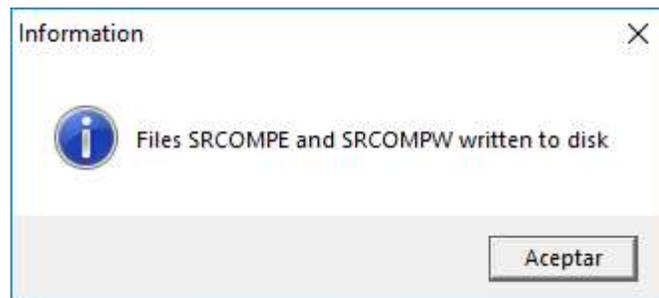


Figura A4.6 Mensaje que nos indica que la distribución fue guardada.

- Para realizar cálculos de atenuación, regresamos al menú principal y seleccionamos Optics → Mirrors and Filters → XPOWER (Attenuation/Reflectivity in Media)

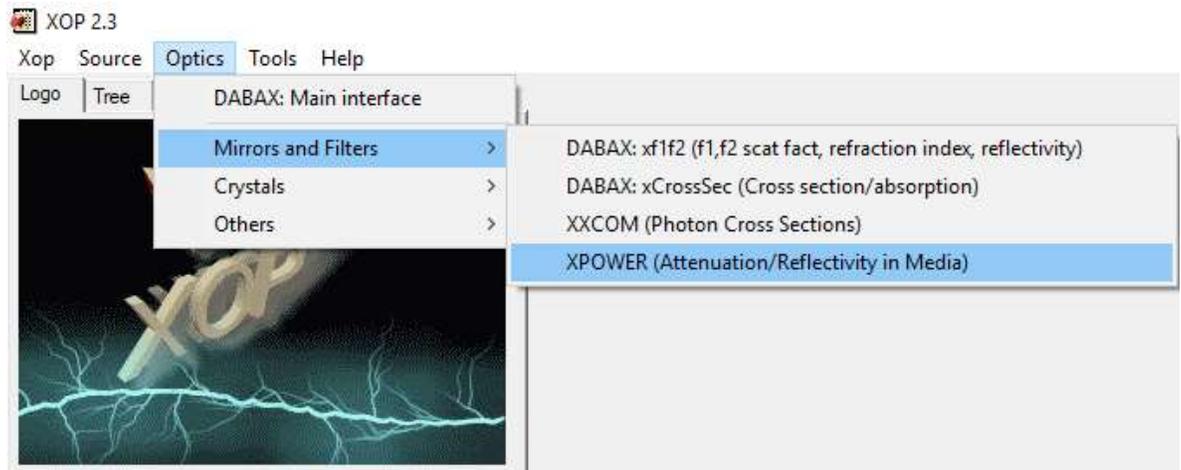


Figura A4.7 Generación de filtros.

- Aparecerá una nueva ventana donde podremos seleccionar el número de elementos, los elementos, el grosor y la densidad. Para utilizar la distribución de rayos X previamente generada debemos seleccionar *xop/source Flux (file: SCROMPE)* en la opción *Source*.

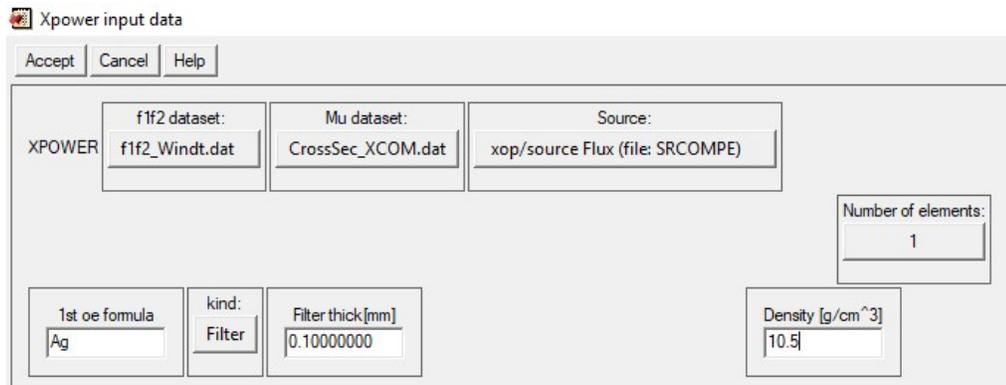


Figura A4.8 Selección de parámetros de los filtros.

- Para mostrar la distribución generada, seleccionamos en el menú anterior *Show* → *Cumulative transmission*.

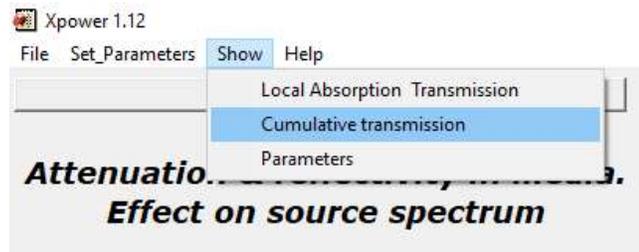


Figura A4.9 Mostrar gráfica de la nueva distribución de rayos X.

- Para guardar la gráfica de la distribución, seleccionamos *File* → *Export ASCII or EXCEL file*. En la opción *File Type* de la siguiente ventana, se debe dejar la opción *ASCII*

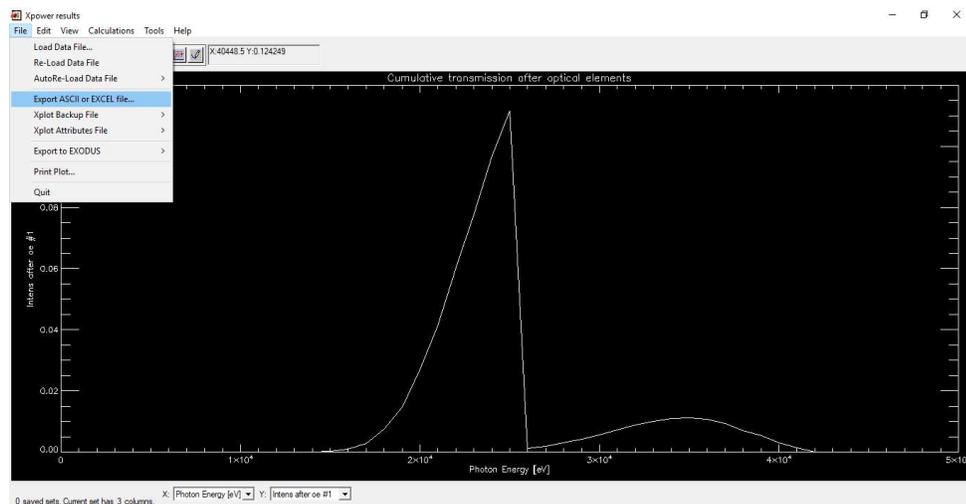


Figura A4.10 Salvar gráfica de la nueva distribución de rayos X.

# Anexo 5. Manejo de Vidisco Xbit Pro

Vidisco Xbit Pro es el software que incluye la computadora de control del sistema de radiografía digital PXM-40BT para la adquisición y almacenamiento de las imágenes. A continuación se muestran los pasos para utilizar este software en el sistema del LANCIC-IF.

- Ejecutar programa Vidisco Xbit (hay un acceso directo en el escritorio)
- Acceder con credenciales predeterminadas.

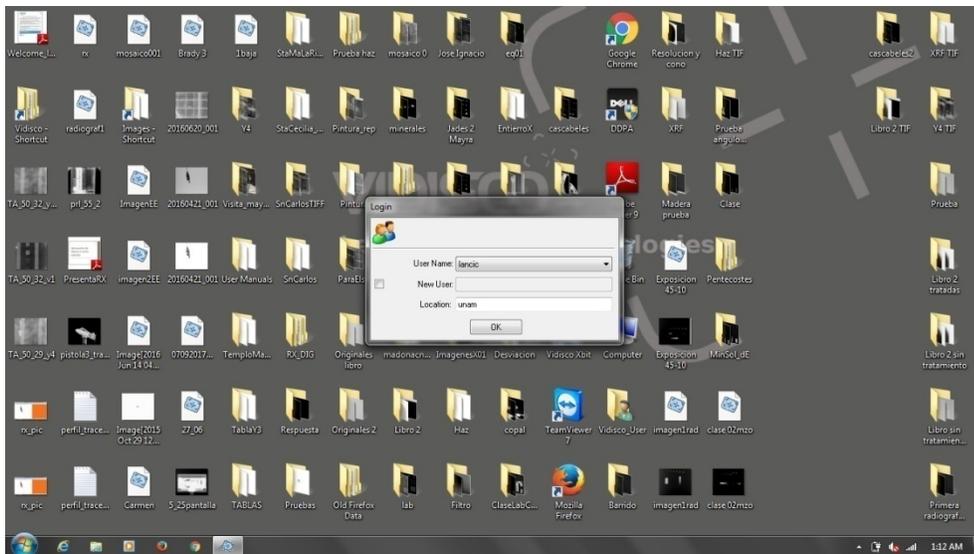


Figura A5.1 Ingreso al programa Vidisco Xbit Pro

- Las luces indicadoras en el detector y el ICU deben estar verdes para un correcto funcionamiento.
- Probar adquisición de imagen oprimiendo Alt + F1. No se debe utilizar radiación en esta etapa.
- Si aparece un cuadro blanco, la prueba fue exitosa.

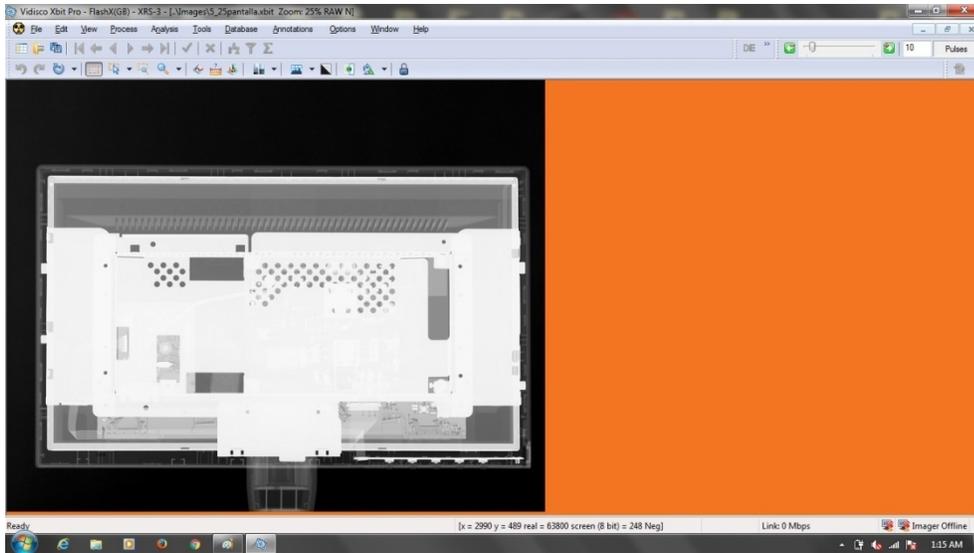


Figura A5.2 Ejemplo de radiografía adquirida en el programa.

- Para guardar la imagen, oprimir Ctrl + F2. Se debe ingresar la información relevante (kV, mA, descripción)

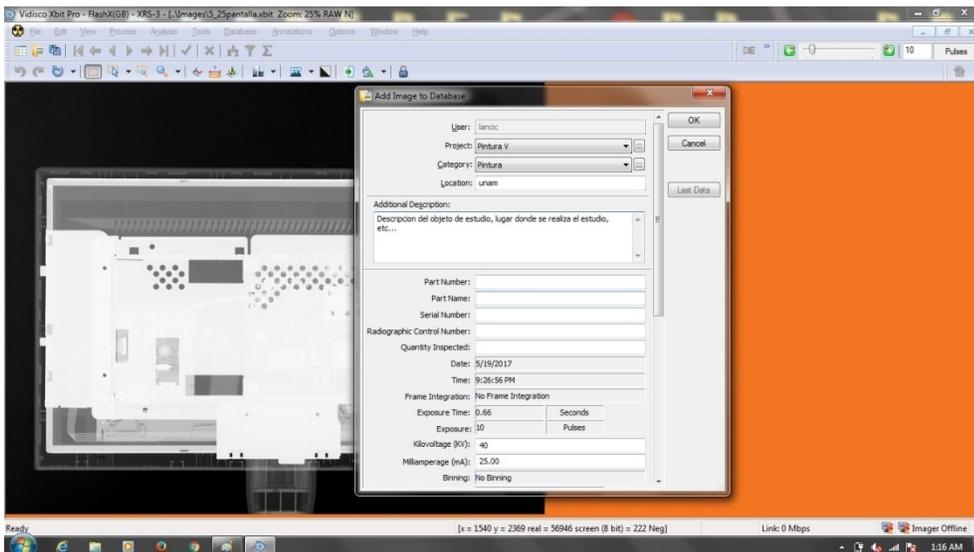


Figura A5.3 Pantalla para salvar la imagen.

## Anexo 6. Manejo de ImageJ

ImageJ es un programa libre para el procesamiento de imágenes para el análisis de imágenes científicas. En este Anexo se muestra cómo utilizar este software para los análisis que se realizaron en este trabajo.

- Para seleccionar la imagen a analizar, abrimos el menú desplegable *File* → *Open*.

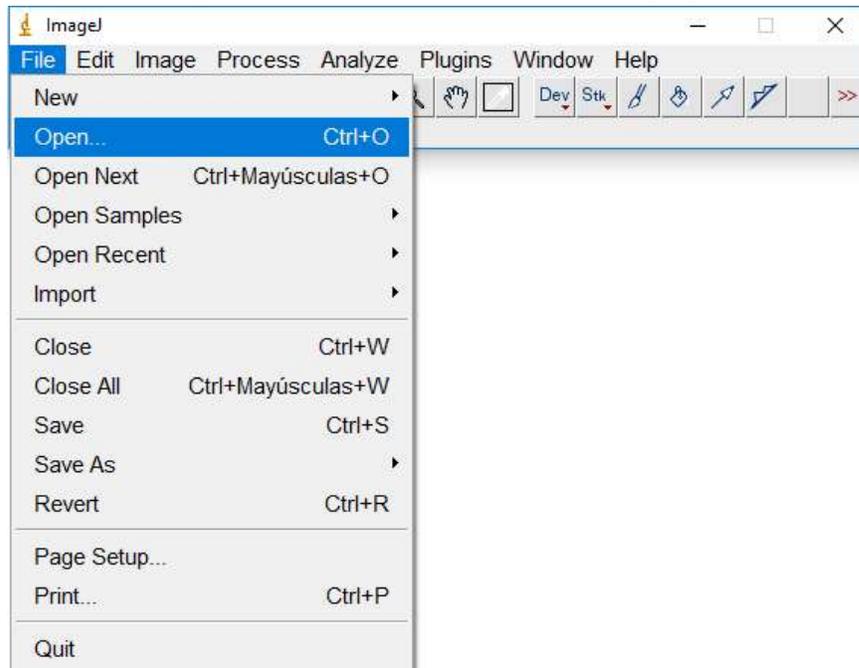


Figura A6.1 Abrir la imagen a analizar.

- Ya abierta la imagen, se debe indicar la escala de la misma. Para esto podemos utilizar la herramienta *Magnifying glass* para hacer zoom en la referencia que se utilizará.
- Utilizando la herramienta *Straight*, trazamos una recta sobre nuestra referencia de medida. Para estar seguros de que la recta está derecha, podemos ver el ángulo de la misma en la parte de debajo de nuestra menú principal mientras esta es trazada.

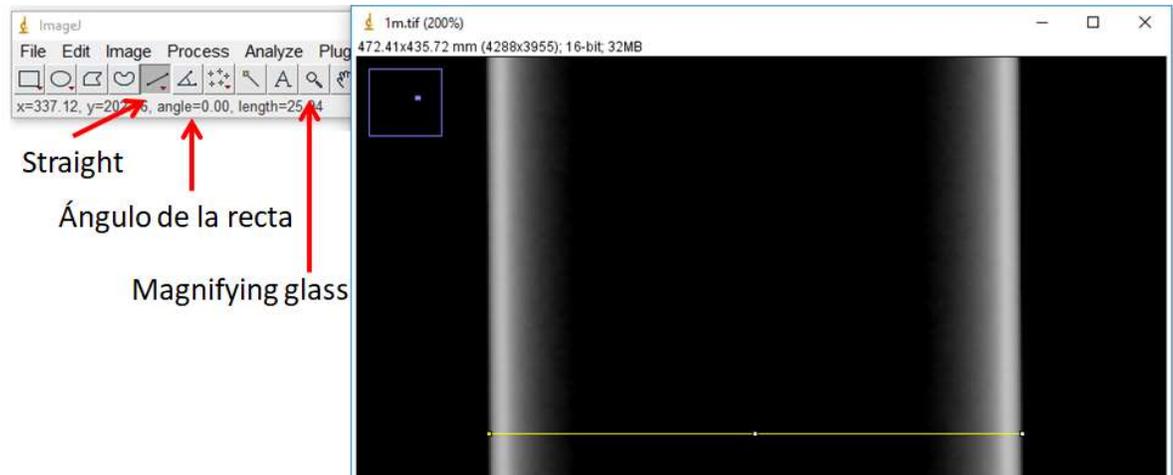


Figura A6.2 Selección de la referencia de medición.

- Seleccionamos *Analyze* → *Set Scale*.
- Ingresamos la medida de nuestra referencia en *Known distance* y la unidad de la misma en *Unit of length*, después seleccionamos *OK*.

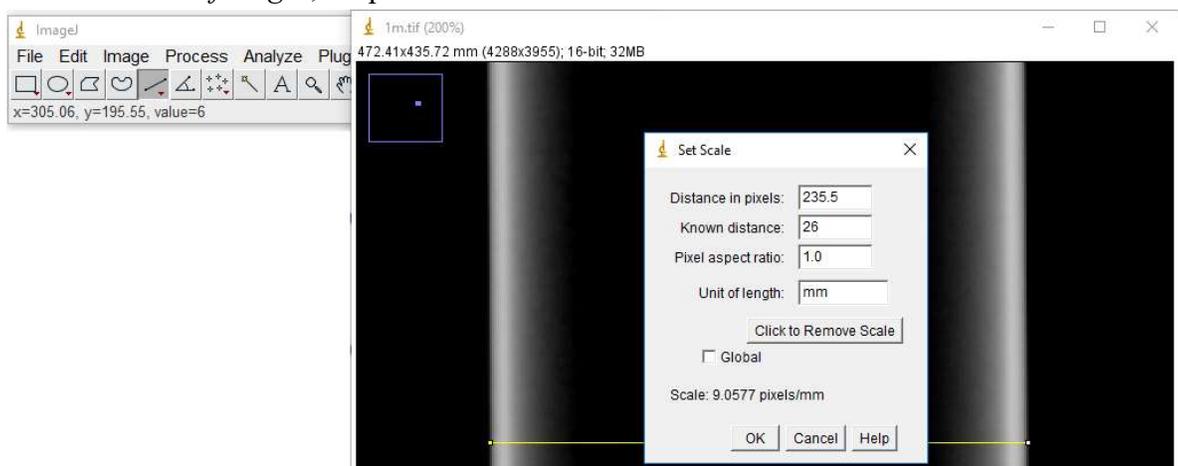


Figura A6.3 Menú para establecer la escala.

- Para obtener un perfil de grises en la imagen (Tono de gris vs Distancia) trazamos una recta con la herramienta *Straight* sobre la línea que queremos analizar. Después, seleccionamos *Analyze* → *Plot Profile*. También podemos utilizar el shortcut *Ctrl+K* después de haber trazado la recta.
- Se abrirá una nueva ventana con el perfil de grises. Para observar los cambios en distancia y gris al mismo tiempo que cambiamos nuestra recta, debemos seleccionar la opción *Live* debajo del gráfico. Para salvar los datos de la gráfica, seleccionamos *Save*.

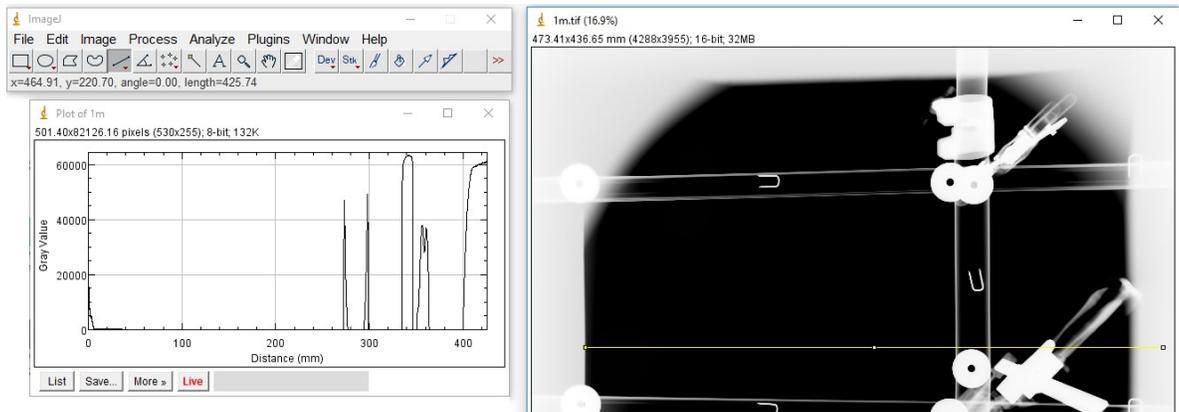


Figura A6.4 Histograma de una línea preseleccionada.

- Para obtener un histograma de grises de un área en la imagen, seleccionamos la herramienta de selección de área (*Rectangle*, *Oval*, *Polygon selections*, *Freehand selections*) que mejor se ajuste al área de interés y trazamos nuestra figura. Después, seleccionamos *Analyze* → *Histogram*. También podemos utilizar el shortcut **Ctrl+H** después de haber trazado el área.

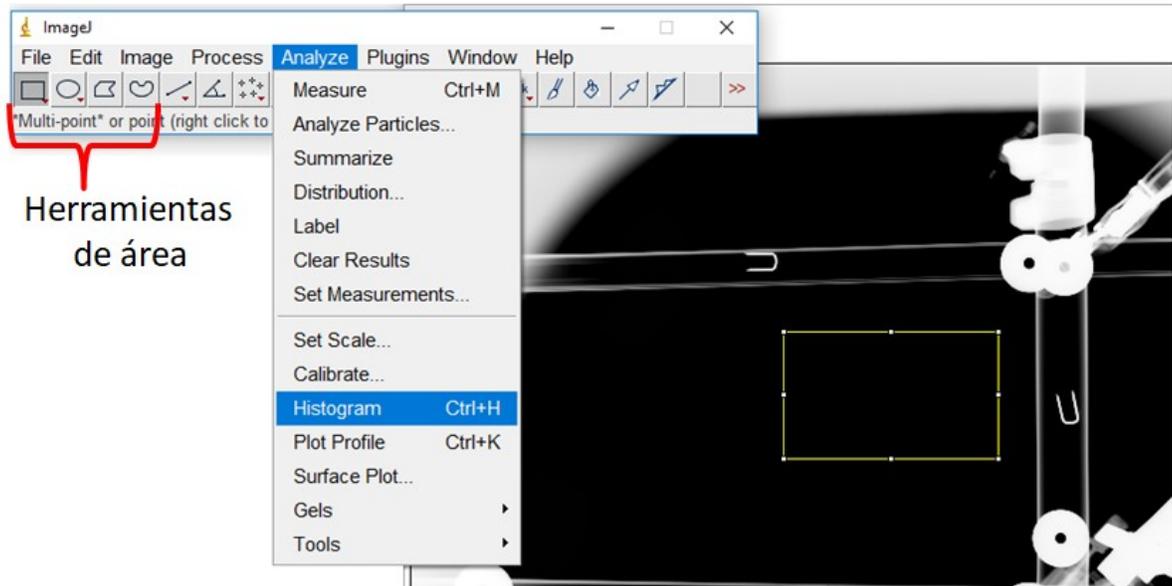


Figura A6.5 Selección de un área para realizar un histograma.

- Se abrirá una nueva ventana con el histograma, donde también se mostrará el número de cuentas, la media, desviación estándar, bins, mínimo, máximo, modo, y ancho de bin. Para observar los cambios en el mismo al mismo tiempo que cambiamos nuestra área, debemos seleccionar la opción *Live* debajo del histograma.

Para salvar el histograma seleccionamos *List*. Se abrirá una nueva ventana con los datos del histograma, en esta seleccionamos *File* → *Save as*.

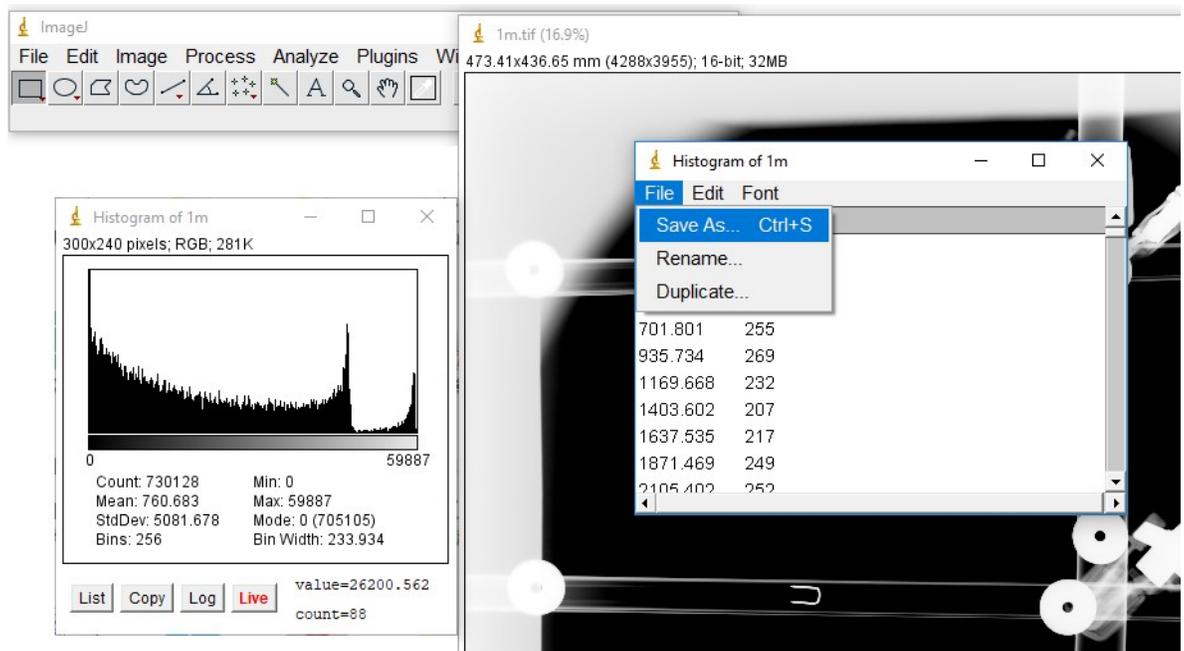


Figura A6.6 Salvar el histograma