

# ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DE RECUPERACION DE LA FACILIDAD DE NEUTROGRAFIA DEL RA-3

**Bellino, A.N<sup>1,†</sup>, Rogulich, Lucila<sup>1,2,\*</sup>**

<sup>1</sup>Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) – Centro Atómico Ezeiza  
Presbítero Juan González y Aragón Nro.15  
(B1802AYA) Ezeiza, Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup>Universidad Nacional de General San Marín (UNSAM)  
Av. 25 de Mayo y Francia  
(1650) Buenos Aires, Argentina

†bellino@cae.cnea.gov.ar

\*rogulich@cae.cnea.gov.ar

## RESUMEN

La neutrografía es una técnica de ensayo no destructivo que permite obtener imágenes de una muestra mediante el registro de la atenuación que un haz de neutrones colimado sufre al atravesarla. Este trabajo tiene como propósito evaluar si es posible recuperar la operación de la facilidad de neutrografía del RA-3, operando en principio a baja potencia y mediante el método indirecto.

## RECOVERY OF THE RA-3 REACTOR NEUTRON RADIOGRAPHY FACILITY FEASIBILITY STUDY

**Bellino, A.N<sup>1,†</sup>, Rogulich, Lucila<sup>1,2,\*</sup>**

<sup>1</sup>Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) – Centro Atómico Ezeiza  
Presbítero Juan González y Aragón Nro.15  
(B1802AYA) Ezeiza, Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup>Universidad Nacional de General San Marín (UNSAM)  
Av. 25 de Mayo y Francia  
(1650) Buenos Aires, Argentina

†bellino@cae.cnea.gov.ar

\*rogulich@cae.cnea.gov.ar

## ABSTRACT

Neutron radiography is a non-destructive testing technique which creates an image of the sample by recording the attenuation of a collimated neutron beam when it passes through it. This study aims to assess the feasibility of recovering the RA-3 reactor neutron radiography facility, which would initially be operated at a low power and using an indirect method.

## 1- INTRODUCCIÓN

El RA-3 cuenta con una instalación de neutrografía situada en el canal de irradiación 3, diseñada y construída durante los años '70-'80 como mockup de la instalada en el RP-10<sup>[1]</sup>. Esta facilidad fue concebida originalmente para operar a una potencia de 3 MW y para obtener imágenes mediante el método indirecto con convertidor de disprosio.

La misma cayó en desuso años más tarde, entre otras cosas debido a la repotenciación del núcleo, lo que conllevó a un cambio en el espectro neutrónico del reactor y a un aumento de la tasa de dosis al utilizar el instrumento.

### 1.1 La facilidad de neutrografía del RA-3

Se encuentra emplazada en el canal 3 del reactor, el cual es radial.

A continuación se describen brevemente las piezas que la conforman.

- Colimador cónico de piletas: El objetivo de esta pieza es extraer los neutrones de las inmediaciones del núcleo y transportarlos hasta el canal 3, reduciendo a la vez la divergencia del haz de neutrones.

Esta pieza colimadora consiste en un tubo cónico de aluminio de diámetro  $D=3$  cm en su extremo más pequeño, recubierto en su interior por una fina capa de cadmio (1 mm). Entre el núcleo y el colimador hay 5 cm de Bi, cuyo objetivo es atenuar la radiación gamma. Se inserta entre el núcleo y la entrada del canal 3 cuando se desea operar la facilidad, permitiendo el paso de neutrones hacia el canal.

- Canal 3 y colimador: Consiste en 2 tubos coaxiales de aire recubiertos de boral. Desde el interior hacia el exterior sus medidas son: 20 cm de diámetro y 125,3 cm de longitud; 25 cm de diámetro y 107,2 cm de longitud. Al final del colimador, se halla el shutter el cual se abre durante la operación de la facilidad y se cierra luego de realizada de neutrografía bloqueando el paso del haz.
- Captador del haz: Esta formado por un blindaje móvil de sección cilíndrica que posee un agujero central de 30 cm de diámetro de hormigón seguido por 2 cm de boral para absorber los neutrones térmicos que reboten. Luego 30 cm de parafina seguidos nuevamente de 2 cm de boral para absorber los neutrones que se hayan termalizado con la parafina y por último 100 cm de hormigón para atenuar la radiación gamma y neutrónica restante.

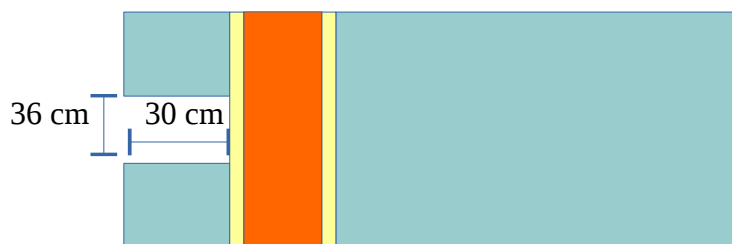


Figura 2: Esquema ilustrativo del captador del haz. Celeste: hormigón, amarillo: boral y naranja: parafina.

- Búnker: Construído con ladrillos de hormigón en los laterales y reforzado en la pared frontal al haz con ladrillos de parafina borada. La puerta de ingreso del búnker está asociada a la lógica de scram.

El sistema en conjunto da una divergencia  $L/D=122$ .

## 1.2 El método de detección

La facilidad fue diseñada para trabajar con el método indirecto. En esta modalidad se emplea una placa convertidora de  $^{165}\text{Dy}$ ; material que ante la presencia de neutrones térmicos sufre la reacción nuclear:  $^{165}\text{Dy} + n \rightarrow ^{165}\text{Ho} + \beta^-$ ,  $T_{1/2} = 2,334$  (6) h.

El convertidor de  $^{165}\text{Dy}$  es colocado posterior a la muestra y una vez terminada la irradiación se deja decaer impresionando una placa radiográfica. En este trabajo realizamos una modificación en el método de revelado, reemplazando la placa radiográfica por un film radiocrómico EBT-3<sup>[2]</sup>, el cual no requiere un revelado químico. Una prueba del sistema mostró buena respuesta del film EBT-3 a los electrones.

## 1.3 El método de digitalización de los films

Los films radiocrómicos utilizados en esta experiencia consisten en una base de plástico fino con una emulsión sensible a la radiación que recubre uniformemente una de sus caras. Al interactuar con la radiación esta emulsión sufre una reacción de polimerización y se oscurece. Al estabilizarse forma una imagen, en algunos casos visible a simple vista.

El instrumento empleado para su lectura es un densitómetro, el cual mide la transmisión de la luz como función de la opacidad de la película. Esta magnitud, puede ser medida en términos de densidad óptica (a partir de ahora OD), la cual está definida según<sup>[3]</sup>:

$$OD = \log_{10}(I_0/I)$$

donde  $I_0$  es una referencia arbitraria e  $I$  es la intensidad transmitida. Como la densidad de una película sin exponer no es cero en general, se utiliza la densidad óptica neta (nOD) que se obtiene restando a la OD a estudiar la OD de una película sin irradiar (con transmisión  $I_0$ ):

$$nOD = \log_{10}(I_0/I)$$

## 2- MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron una serie de experiencias con el objetivo de caracterizar el haz de neutrones y conocer las condiciones óptimas para la operación de la facilidad tal como está planteada. También se evaluó la factibilidad de obtener una neutrografía mediante el método indirecto.

### 2.1 Mapeos de tasa de dosis

Se realizó un mapeo de tasa de dosis gamma y de neutrones en los alrededores de la facilidad con el objetivo de definir cuál será la potencia de irradiación de muestras para la cual la operación de la facilidad resulte segura. Los puntos monitoreados se eligieron teniendo en cuenta viejos mapeos de tasa de dosis realizados cuando la facilidad estaba operativa. Dichas posiciones se muestran en la fig. 3.

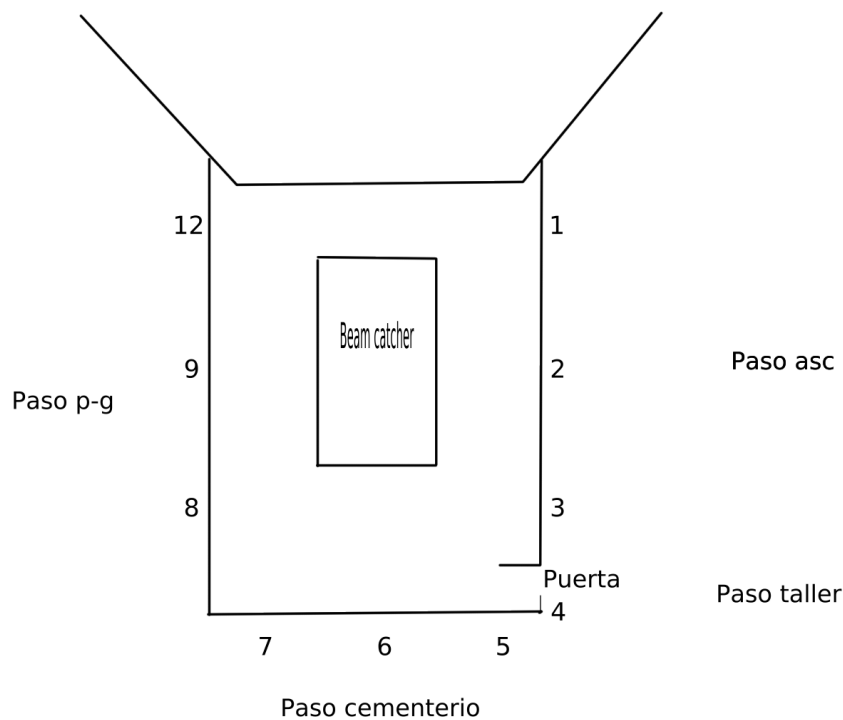


Figura 3

Se planteó un mapeo inicial con el reactor apagado con el colimador cónico de piletta sin insertar e insertado. A continuación se realizaron escalones de potencia a 100, 300 y 500 kW, registrándose los valores de tasa de dosis gamma medidos con un Teletector Automess 6150 AD S/H – PROBE 6150 AD - tH y los valores de tasa de dosis de neutrones medidos con un rémetro Nuclear Enterprises LTD NM213-341.

Por otra parte, con el reactor operando a 500 kW se realizó un mapeo de tasa de dosis gamma en el exterior del búnker y en las áreas de paso a sus alrededores.

### 2.2 Medición de los parámetros del haz y obtención de una imagen mediante método indirecto

Se realizó la irradiación de films radiocrómicos EBT-3 ubicados en la boca del captador del haz. Para garantizar la cobertura de todo el diámetro en la dimensión horizontal se emplearon dos films radiocrómicos, tal como muestra la fig 4.



Figura 4

El captador del haz se posicionó lo más cerca posible del canal de irradiación, con el objetivo de asegurar que se lo capta en su totalidad, de asegurar la alineación y de lograr una posición reproducible.

Una vez determinada la posición del captador del haz, se marcó la posición final de modo de lograr repetitividad en futuras experiencias.

Una vez ubicada la posición del haz y conocido su diámetro se realizó la medición de flujo neutrónico térmico en la boca del captador del haz. Se emplearon hojuelas de Mn-Cu, posicionadas en un arreglo circular tal como indica la fig 5.

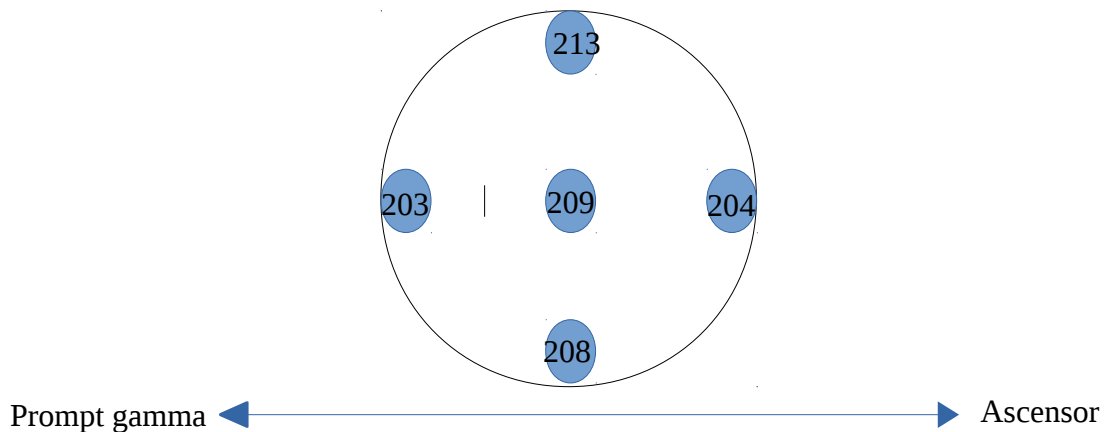


Figura 5

Las mismas fueron irradiadas a  $492 \pm 0,3$  kW y medidas luego en un detector HpGe previamente calibrado en energía y eficiencia.

Por último, se probó el film de  $^{165}\text{Dy}$  ubicándolo en la boca del captador del haz e irradiándolo a aproximadamente a 500 kW durante media hora. Luego se lo dejó decaer sobre una plancha de film radiocrómico durante 29 horas. El mismo fue digitalizado empleando un escáner de transparencias Epson 11000XL luego de 24 hs de estabilización.

### 3- RESULTADOS

De las mediciones de tasa de dosis descriptas en §2.1 se obtuvieron los siguientes valores.

Tabla 1: Tasa de dosis gamma en el interior del búnker a potencia 0 kW con y sin cono

Posición	Tasa de dosis gamma [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	
	Sin cono	Con cono
Costado del captador a la altura del eje lado PG	25	50
Costado del captador a la altura del eje lado pileta	35	80
Costado del captador a la altura del tangencial, pata más cercana al núcleo	100	200
Atrás del captador en contacto	3	7
Costado del captador a la altura del tangencial, pata más cercana a PG		100

Estos resultados muestran que la permanencia dentro del búnker es completamente segura con el reactor apagado, por ejemplo al momento de preparar la muestra.

Tabla 2: Tasa de dosis gamma y de neutrones alrededor del búnker

Posición	Tasa de dosis gamma [ $\mu\text{Sv/h}$ ]			Tasa de dosis neutrones [ $\mu\text{Sv/h}$ ]		
	100	300	500	100	300	500
Manija apertura shutter	15	35	50			
Puerta del búnker	25	80	140		180	300
Paso entre búnker y ascensor	6	20	30			
Paso entre búnker y PG	10	25	20			
Paso entre búnker y cementerio		40	45			
Paso entre búnker y taller caliente			25			

Se observa que las áreas de paso son seguras. La zona de la puerta (que no es un área de paso ni de permanencia) posee una tasa de dosis alta, con lo cual habrá que mejorar el laberinto.

Tabla 3: Tasa de dosis gamma en el interior del búnker con escalones de potencia

Posición	Punto	Tasa de dosis gamma [ $\mu\text{Sv/h}$ ]		
		100	300	500
Pared lado ascensor	1	40	130	200
	2	20	70	100
	3	7	20	25
Puerta búnker	4	25	65	100
	5	15	25	40
Pared cementerio	6	30	60	90
	7	10	15	30
	8	6	15	25
Pared lado PG	9	10	30	50
	12	20	60	100

Se puede observar que las tasas de dosis en contacto son aceptables, pero sería deseable disminuirlas. En principio, se pueden disminuir con poco esfuerzo aumentando ligeramente el espesor de las paredes del búnker.

## 2.2 Medición de los parámetros del haz y obtención de una imagen mediante método indirecto

### 2.2.1 Parámetros del haz

A simple vista, el film radiocrómico revela un haz de  $29,0 \pm 0,2$  cm de diámetro, uniforme, y con una penumbra de 1 cm, tal como se observa en la fig 6.

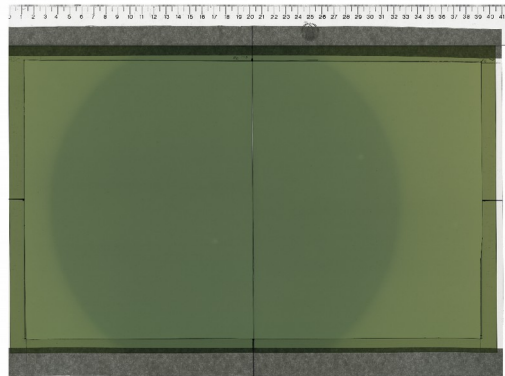


Figura 6 : Impronta del haz en el film radiocrómico EBT-3. Vista de frente al captador del haz.

En cuanto a la alineación, se concluye que debe ubicar el captador del haz unos 2,5 cm más hacia el lado del ascensor caliente para que el haz incida exactamente en el centro.

Por otra parte, las dimensiones del film de  $^{165}\text{Dy}$  son  $24 \times 10$  cm, con lo cual si se los sitúa en el centro el diámetro del haz garantiza la total cobertura de su superficie.

Adicionalmente, se realizó el escaneo del film radiocrómico y su posterior análisis. Las imágenes fueron procesadas con una rutina de matlab diseñada para este análisis y que realiza los siguientes pasos de procesamiento:

- Promedia las 10 imágenes del haz para mejorar la SNR de cada pixel.
- Calcula la densidad óptica del canal rojo con el  $I_0$  (film patrón sin irradiar) correspondiente a esta dirección de escaneo.
- Recorta los valores de densidad óptica menores a cero (corresponden a escrituras en los films y a zonas de oscuridad generadas en la unión entre ellos).
- Recorta los valores de densidad óptica excesivamente altos (corresponden a zonas de paso total de la luz en la unión de los films).
- Grafica el haz en falso color, de modo que permita ver claramente el perfil del haz.

En la fig. 7 se muestran los resultados del análisis con el script.

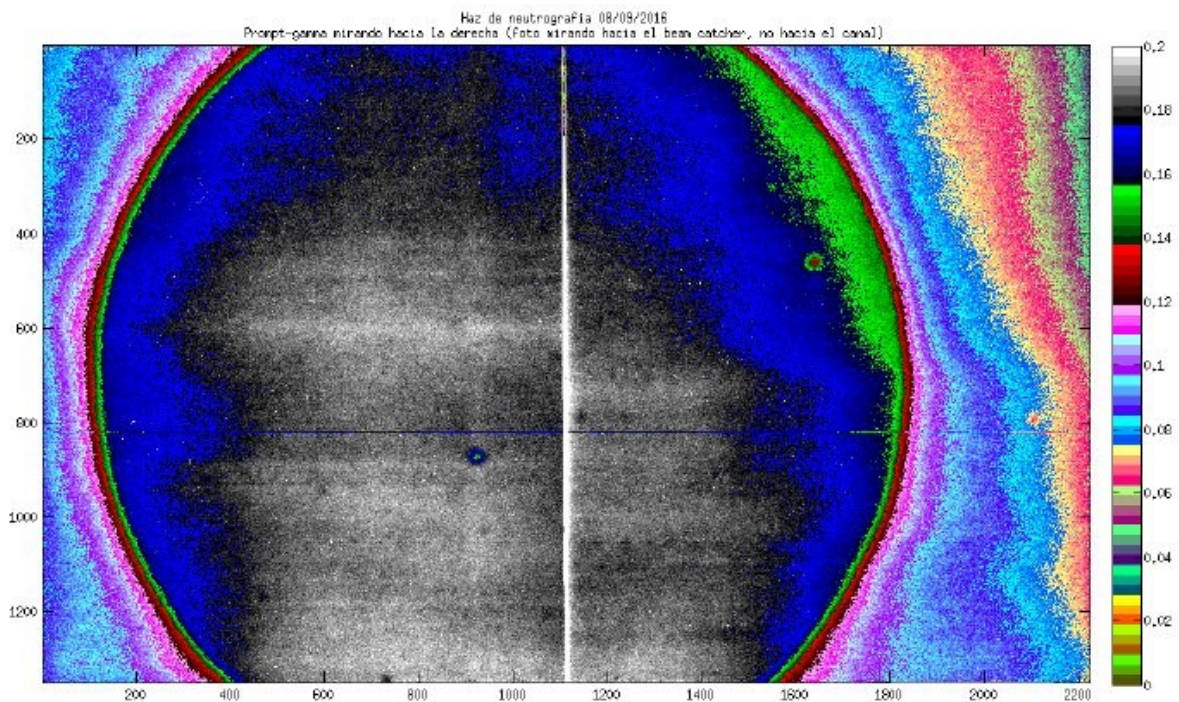


Figura 7: Líneas de contorno de densidad óptica del haz. Vista de frente al captador del haz.

En la fig. 7 se observa claramente que el haz está desviado hacia abajo y que tiene baja penumbra, excepto en la esquina superior del lado prompt-gamma.

En ambos casos, las manchas redondas pequeñas corresponden a zonas no reactivas de los films. La línea vertical es la unión entre ambos.

Respecto a la medición de flujo neutrónico del análisis de la activación de las hojuelas de Mn-Cu se obtuvieron los siguientes valores.

Tabla 4: Flujo neutrónico térmico en diferentes puntos del haz

Hojuela	$\Phi_{th}$ normalizado a 500 kW [n/cm <sup>2</sup> s]	$\Delta\%$
203	$(3,5 \pm 0,3)10^6$	2,9
213	$(3,4 \pm 0,6)10^6$	8,1
204	$(3,4 \pm 0,2)10^6$	
208	$(3,7 \pm 0,4)10^6$	
209	$(3,3 \pm 0,3)10^6$	2,9

Los valores de flujo medidos en esta experiencia son menores a los registrados por el sector Física del RA-3 en una medición realizada en 2009 en la brida del canal 3, todos del orden de  $4 \cdot 10^6$ . Esto es consistente con los resultados de la Tabla 4, obtenidos en la boca del captador del haz, más lejos del núcleo.

Los mismos confirman la tendencia en la distribución del flujo vista mediante el análisis de los films radiocrómicos, es decir, que el haz es homogéneo con variación porcentual del flujo menor al 10% entre sus extremos opuestos; sin embargo presenta una zona de máximo flujo en la mitad inferior.

## 2.2.2 Obtención de una imagen mediante método indirecto

El film impresionado por la placa convertidora de <sup>165</sup>Dy fue escaneado siguiendo el mismo procedimiento de escaneo que en el caso de los films de ubicación del haz y procesado utilizando una rutina elaborada para el software matlab.



La fig. 8 se obtuvo superponiendo la imagen del film de disprosio a la imagen del haz obtenida en la experiencia de localización, realizando una corrección en la resolución con el propósito de mejorar la visibilidad del haz.

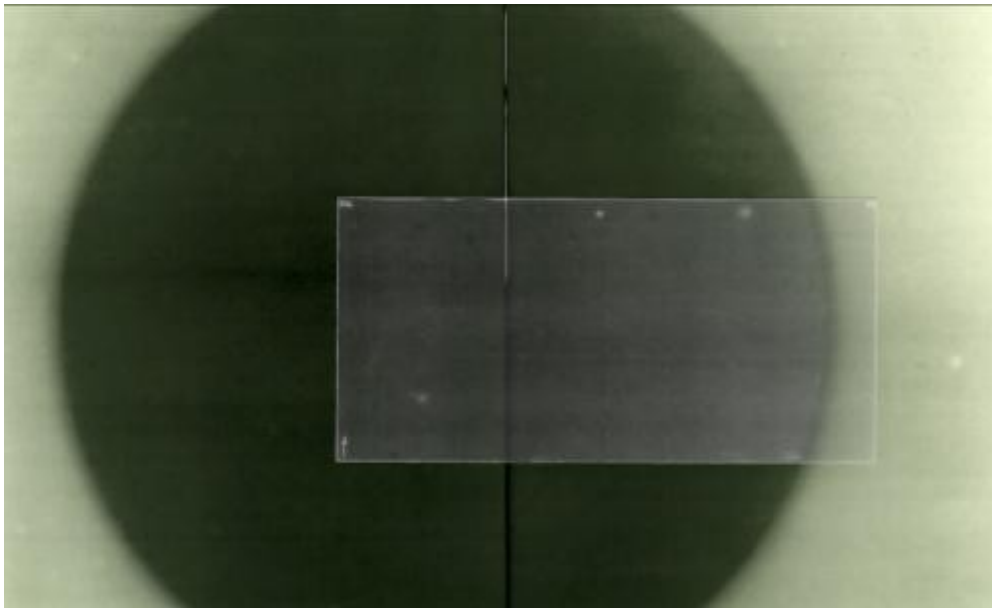


Figura 8: Superposición de la impronta del haz con la neutrografía del haz.

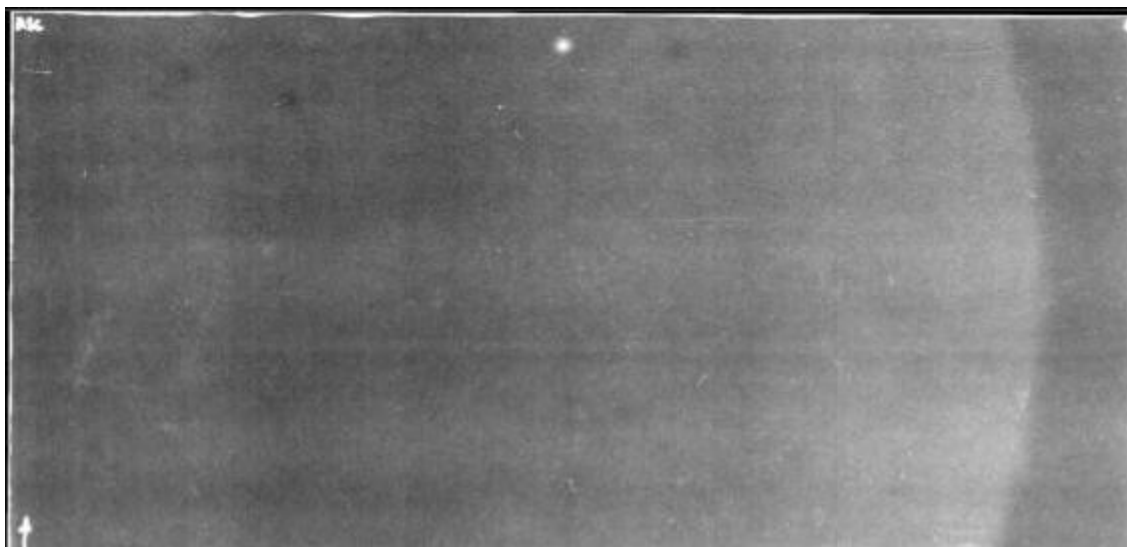


Figura 9: Neutrografía del haz.

Puede verse claramente en la figura 9 el borde del haz. El centro del haz se ve más oscuro de lo esperado (menor densidad óptica = menos activación), lo cual puede deberse a diferencias en la distancia de contacto entre el disprosio y el film radiocrómico.

#### 4- CONCLUSIONES

Las experiencias presentadas en este trabajo tuvieron como objetivo principal determinar si es posible reanudar la operación de la facilidad de neutrografía del RA-3 tal como fue planteada cuando se construyó, y de esta manera sentar el precedente inicial para futuras reformas y mejoras.

Se logró caracterizar el haz de neutrones, tanto en flujo neutrónico térmico como en características geométricas, hallándose un haz de 29 cm de diámetro que cubre completamente el convertidor de  $^{165}\text{Dy}$ . También se encontró la posición más adecuada para que el captador del haz absorba la totalidad del haz una vez irradiada la muestra.

Se comprobó que es posible obtener una imagen utilizando la placa convertidora de  $^{165}\text{Dy}$ , y también que resulta eficiente el revelado de la misma mediante films radiocrómicos, los cuales son independientes del revelado químico y permiten obtener imágenes digitalizadas de forma fácil y rápida. Sin embargo, este método resulta poco práctico debido a los tiempos que requiere para obtener una imagen son largos (del orden de días).

Respecto a las mediciones de tasa de dosis tanto gamma como neutrones, los valores medidos en la facilidad y sus alrededores con el reactor operando a una potencia promedio de 500 kW indican que se requieren modificaciones en el búnker. Es posible transitar por los alrededores de la facilidad durante su operación pero sería deseable mejorar el blindaje.

Como propuestas a corto plazo, quedan pendiente la caracterización del campo gamma de la facilidad, la medición de flujo neutrónico epitérmico y la medición de la resolución utilizando un patrón. A mediano plazo, se trabajará para realizar las modificaciones necesarias para adaptar el instrumento a la técnica directa, es decir utilizando una pantalla centelladora y una cámara CCD.

#### 5- AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al personal de operación y radioprotección del RA-3 por su colaboración y buena predisposición al momento de encarar estas tareas. Especialmente, a Dino Isolani por la técnica para poner de manera reproducible el colimador de piletta, y a Fernanda Gómez Borda y Gabriel Naccarato por la limpieza y descontaminación del búnker.

También agradecemos a la Lic. Silvia Thorp por su asesoramiento en las mediciones de flujo, y a Guillermo Estryk y Julián Pinto por brindarnos información muy útil para comenzar con el proyecto.

#### 6- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Informe interno, “Instalación de neutrografía RA-3 y RP-10”, PE01 069900010005-FG-004

[2] David Lewis, et.al, “An efficient protocol for radiochromic film dosimetry combining calibration and measurement in a single scan”, *Med Phys*, **39**(10), pp 6339-6350 (2012)

[3] P. Aberbuj, “Puesta a punto de una técnica dosimétrica con películas radiocrómicas para haces clínicos de fotones”, Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA (2011)