

# Uso del análisis por activación neutrónica de gammas inmediatos para la medición de cadmio corporal en seres vivos

Marco Munive <sup>a</sup> [mmunive@ipen.gob.pe](mailto:mmunive@ipen.gob.pe), José Solís <sup>a,b</sup>, Ángel Revilla <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Dirección General de Promoción y Desarrollo Tecnológico, Instituto Peruano de Energía Nuclear.

<sup>b</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería.

<sup>c</sup> Dirección General de Instalaciones, Instituto Peruano de Energía Nuclear.

## Resumen

El análisis por activación neutrónica de gammas inmediatos (PGNAA) es una técnica que tiene aplicaciones médicas. Utiliza una fuente de radiación emisora de neutrones ( $Cf-252$ ) para la detección de nitrógeno y de metales pesados a cuerpo completo y que posibilitan su empleo en este campo para medir el grado de contaminación de los metales incorporados al cuerpo. En el presente trabajo se muestra la medición de cadmio incorporado por ingestión a un grupo de ratones de laboratorio sometidos a diferentes dietas y medidos por la técnica de *in vivo* PGNAA. Las dosis de neutrones y gamma dadas en cada colección de espectro no superan los 2,5 mSv de dosis total.

## 1 Introducción

El análisis por activación neutrónica de gammas inmediatos (PGNAA) se basa en la detección de los fotones gamma producidos de la interacción de los neutrones con la materia y que tienen una vida media del orden de los  $10^{-15}$  s (Figura 1), lo que implica que no produce residuo radiactivo. Los fotones gammas inmediatos poseen energías típicas para cada elemento; por ejemplo, en el caso del hidrógeno y cadmio, emiten fotones

característicos de 2,24 MeV y 0,558 MeV, respectivamente [1,2,3]. La intensidad de los picos en el espectro gamma nos dará la concentración del elemento en la muestra.

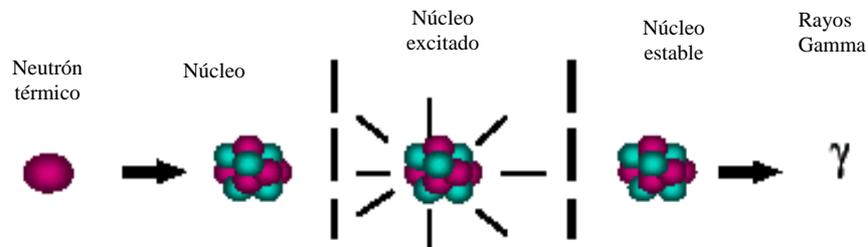
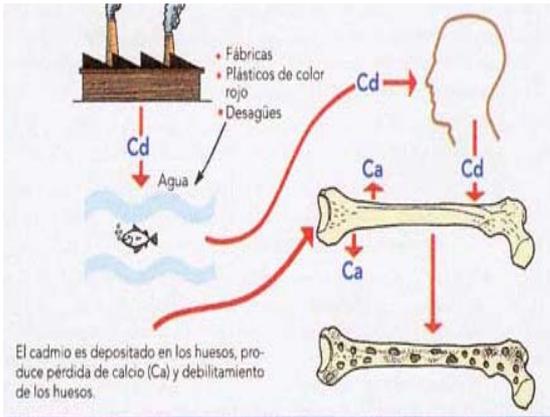


Figura 1. Secuencia de producción de los fotones gamma inmediatos.

La cuantificación de fotones gammas inmediatos, producto de la captura de neutrones en seres vivos es una de las posibilidades de medición no invasiva de determinados elementos componentes de la estructura humana, conocida como análisis por activación neutrónica en seres vivos (IVNAA); por ejemplo, nitrógeno, cloro, calcio, fósforo, cadmio. La incorporación de cadmio al cuerpo humano se realiza mediante varias vías, siendo el máximo permitido en el

cuerpo de 250  $\mu\text{g/g}$  [4], la mayoría de lugares de explotación minera y fundiciones incorporan mayor cantidad de cadmio de lo permisible y ello puede producir problemas pulmonares, de riñón y óseos (Figura 2).



**Figura 2.** Deposición de cadmio en los huesos y su origen en la vida cotidiana.

## 2 Materiales y Métodos

### 2.1 Sistema

La descripción del sistema implementado se puede resumir en la geometría fuente detector, el blindaje correspondiente, la fluencia de neutrones medida y muestra biológica

En relación con la geometría fuente receptor, se utilizó una fuente de Cf-252 con actividad de 0,1 GBq [5] y para la detección de los fotones gamma inmediatos se utilizó una cadena de espectrometría gamma con detector de centelleo tipo NaI (Tl) de 3"x3", siguiendo la configuración de la referencia [6].

### 2.2 Muestras biológicas

Las muestras biológicas irradiadas fueron ratones albinos que tenían un peso promedio de 38,8 gramos (Figura 3). Se formaron dos grupos con cinco miembros cada uno, cada grupo recibió la misma alimentación, pero solo a uno de los grupos se le suministró concentraciones de cadmio en el agua de su bebedero. El otro grupo fue considerado como control. La irradiación de cada muestra biológica se realizó cada dos días durante un lapso de cinco minutos por irradiación durante dos semanas, dándoles una dosis promedio de 2,5 mSv.

El cadmio se incorporó como  $Cl_2Cd$  en el agua que se suministró a los animales. El cadmio posee una sección eficaz a neutrones de 20600 barns (Cd-113) produciendo fotones característicos de 558,5 keV el cual se encuentra muy cerca al pico de aniquilación (511 keV), por ello la presencia

de cadmio en una muestra hará que el espectro obtenido tenga mayor ancho en el pico de aniquilación como se muestra en la Figura 4.



**Figura 3.** Muestras biológicas.

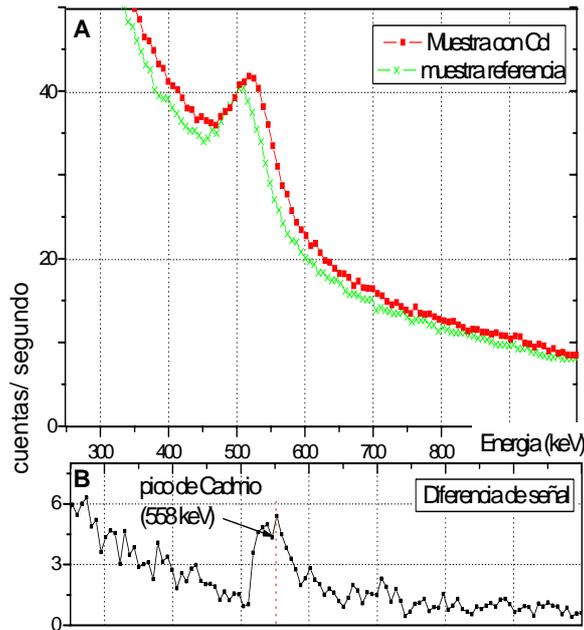
### 2.3 Metodología de cálculo

La calibración de concentración de cadmio se hizo en un maniquí de volumen y masa cercano a la muestra biológica, 38 gramos, siguiendo la metodología usada en experiencias de cálculo de nitrógeno corporal a cuerpo completo [6,7] se logra detallar la siguiente expresión adaptada para la determinación de cadmio a cuerpo completo.

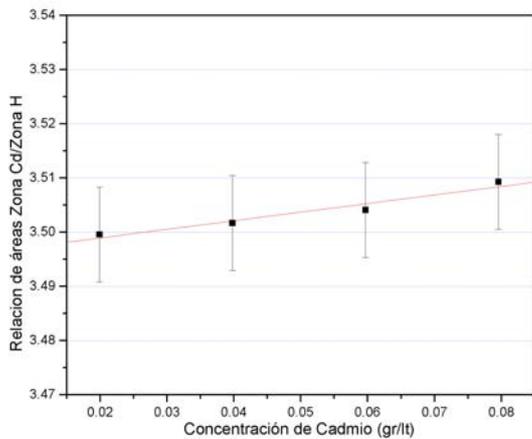
$$TBCd = (Cd/H)_f \times (H/Cd)_m \times (MCd/MH)_f \times MH_m$$

$$TBCd = (Cd/H)_f \times (H/Cd)_m \times (MCd/MH)_f \times 0.12 BW_m \quad (1)$$

Donde TBCd es el cadmio a cuerpo completo, (Cd/H) relación de zona de cadmio y zona de hidrogeno, esta razón es similar a PA/H ya que la zona de cadmio coincide con la zona de aniquilación de fotones PA, MCd es la masa de cadmio; la ecuación nos da la concentración de cadmio incorporado, usando los datos logrados previa calibración del sistema de cálculo mediante un maniquí (Figura 5).



**Figura 4.** **A:** Espectro gamma de muestra biológica con  $Cl_2Cd$  y muestra biológica de referencia, tiempo de colección de espectro 300 s, **B:** Diferencia de señales se nota el pico de cadmio (558.7 keV)



**Figura 5.** Razón de señales Cd/H, en relación con la concentración de cadmio para maniquí de calibración.

### 3 Resultados

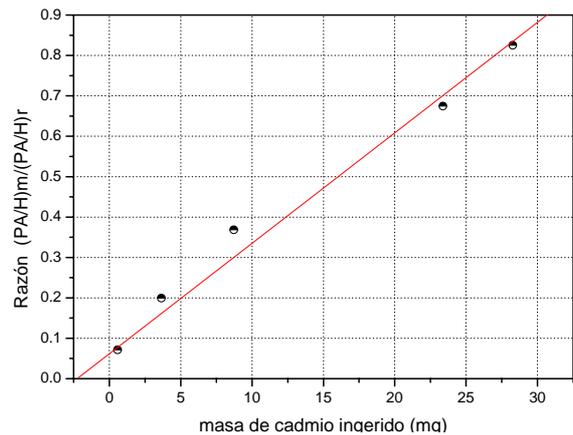
#### *Determinación de metales pesados a cuerpo completo*

La concentración de cadmio a cuerpo completo se midió con la configuración, siguiendo los datos logrados en calibración y mediante el calculo usando la ecuación 1, logrando determinar en calibración hasta 0.7 mg de cadmio en una muestra de peso promedio de 38 g lo cual lleva a decir que la

sensibilidad para detectar cadmio es cercano a 18,42 ppm. Diferente es la respuesta lograda con muestra biológica, según lo detallado en la tabla 1, se logra detectar cadmio en una estructura biológica desde 0,247 mg de cadmio en una matriz de 40,4 g pero con una aproximación muy mala mayor a 100% entre lo ingerido por la muestra y lo que refleja el cálculo; sin embargo, para valores por encima de 0,855 mg de cadmio en matriz de 39,66 g (21,3 ppm) se logra una aproximación de 8.5 % mejorando esta aproximación conforme se aumenta el volumen de cadmio en las matrices biológicas.

Esta diferencia en la sensibilidad de detección entre maniquí y muestra biológica se debe a la presencia de otros elementos diferentes a H, O, Cd presentes en la muestra biológica, que al ser impactados por los neutrones también emiten fotones gamma cercanos al rango de interés para la experiencia y los que se encontrarían en un maniquí de agua.

Cabe detallar que el cadmio no es bioabsorbible así que se va acumulando conforme su consumo (Figura 6). Además, se pudo percibir que conforme se ingería la solución el peso promedio del grupo disminuía, lo mencionado se representa en la tabla 1.



**Figura 6.** Razón de señales para muestra y referencia en función de cadmio incorporado,  $(Cd/H)_m$   $(Cd/H)_r$  son la relación con la incorporación de cadmio en muestra biológica.

**Tabla 1.** Incorporación de cadmio y medida de cadmio por ecuación (1)

Días ingeridos	Volumen de solución ingerido (ml) x animal	Concentración dada de $Cl_2Cd$ (mg/l)	Cantidad de Cd ingerido (mg)		Relación señal Cd /H promedio	Peso promedio (g) de muestra biológica	Cantidad de Cd medido (mg)	Aprox. % Cadmio ingerido y medido
			Día de medida	Acumulado				
2	2	47	0,115	<b>0,115</b>	6,199+-0,07	40,4	<b>0,247</b>	<b>114</b>
2	5	100	0,635	<b>0,788</b>	6,44+- 0,19	39,66	<b>0,855</b>	<b>8,5</b>
1	5	332	1,017	<b>1,746</b>	6,67+- 0,37	38,10	<b>1,83</b>	<b>4,8</b>
3	2	797	2,93	<b>4,677</b>	6,91+ - 0,67	38,04	<b>4,73</b>	<b>1,1</b>
1	2	797	0,97	<b>5,654</b>	6,96+- 0,69	37,74	<b>5,68</b>	<b>0,5</b>

#### 4 Conclusiones y comentarios

- La medida de elementos nocivos a cuerpo completo puede ser una aplicación viable, basándonos en la detección de cadmio corporal logrado en la experiencia, lo cual complementaria los estudios de intoxicación por metales pesados usados desde hace varios años, tales como análisis elemental en sangre, radiografía para detección de neomocnosis en personas que trabajan en la actividad minera e industrial.
- Se logró detectar cadmio incorporado en un grupo de animales de laboratorio contrastándolo con un grupo de referencia, estableciendo la posibilidad de registro del metal en concentraciones cercanas a las décimas de ppm. En el sistema de detección instalado se ha podido registrar valores de 18 ppm en calibración y 21 ppm en una muestra biológica, con aproximación menores al 10%.
- Si bien es cierto que el estudio esta concentrado en la determinación de cadmio, el análisis es en realidad multielemental, lo cual implica que en una sola irradiación se podría tener información de varios elementos de interés para tratamiento y terapias médicas (N, H, O, Cl, etc.), dando a la muestra biológica una dosis efectiva menor a 3 mSv en un período de cinco minutos.
- La incorporación de elementos tóxicos,  $Cl_2Cd$  en el grupo de estudio se refleja también por la pérdida de peso corporal registrada, esto confirma la presencia de cadmio en el cuerpo debido a que una de las principales afecciones de la incorporación esta asociada a desordenes de riñón que derivan en una mala asimilación de proteínas y pérdida de peso.

#### 5 Agradecimientos

A la Dirección de General de Instalaciones del IPEN, en la persona del Ing. Rolando Arrieta, por facilitar el uso de la sala experimental del reactor RP-10.

#### 6 Referencias

- [1]. East BW. In vivo nitrogen analysis using  $^{242}Am$  Be neutrons – a feasibility study for mobile facility. Clin. Phys. Physiol. Meas. 1983; 4(2): 217-221.
- [2]. Munive M, Solis J. Análisis por activación neutrónica de gammas inmediatos usando una fuente de neutrones de Am-Be.
- [3]. Thompson MN, Rassool RP. Application of neutron-capture to elemental analysis. The School of Physics. The University of Melbourne, Parkville Vic. Australia.
- [4]. Alessio L, Odone P, Bertelli G, Foa V. Cadmio, control biológico humano de una serie de compuestos químicos industriales. Consejo de sanidad Valencia: España.
- [5]. Martin RC, Knauer JB, Balo PA. Production, distribution, and applications of Californium-252 neutron sources. Chemical Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 3783 1-6385 U.S.A.
- [6]. Ruimei M, Dilmanian A, Rarback H. Recent upgrade of the in vivo neutron activation facility at Brookhaven National Laboratory, BNL-49461.
- [7]. Wang H. Investigation of factors affecting the background in the measurement of nitrogen IVNAA. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 1991; 151(2): 293-299.