

# Instalación de la facilidad de análisis por activación neutrónica de gammas inmediatos

Marco Munive<sup>1,\*</sup>, José Solís<sup>1,2</sup>, Javier Gago<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dirección General de Promoción y Desarrollo Tecnológico, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Tupac Amaru 210, Lima, Perú

## Resumen

El análisis de activación neutrónica de gammas inmediatos (PGNAA) es una técnica analítica nuclear no destructiva para la determinación de elementos y su composición en el material. Cuando una muestra es irradiada con un haz de neutrones, se tiene que debido a la captura neutrónica instantáneamente se emiten rayos gamma. Esta técnica analítica se viene implementando en la sala experimental del reactor nuclear RP-10 en el conducto de irradiación N° 5. El haz de neutrones de dicha facilidad es filtrado y moderado por un cristal de zafiro. La muestra a analizar se coloca en un porta muestra de aluminio que esta revestida de blindaje neutrónico (LiF) y para detectar los rayos gamma inmediatos se cuenta con un sistemas de detección: con detector semiconductor de GeHP con una eficiencia de 35% en referencia a un NaI(Tl). Se lograron espectros de gammas inmediatos de muestras de ácido bórico y cloruro de sodio.

## Abstract

The prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA) is a non destructive nuclear technique for elemental analysis. The samples is irradiated by neutrons and due to the neutron prompt capture gamma rays are emitted. This technique is being implemented in the experimental room of the RP10 reactor in the irradiation facility No. 5. The neutron beam is filtrated and moderated with a Sapphire crystal. The sample is in a Al container that has a neutron shield (LiF) and the prompt gamma rays are detected with a GeHP detector with an efficiency of 35% respect to NaI(Tl). Prompt gamma spectra of the acid boric and sodium chloride has been obtained.

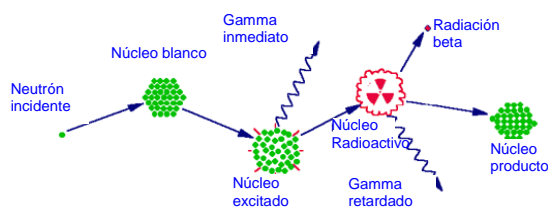
## 1. Introducción

El análisis elemental no destructivo de una muestra es sumamente importante en muchas aplicaciones y el análisis de activación neutrónica de gammas inmediatos (PGNAA) cumple con ese requisito. Las muestras son irradiadas con un haz de neutrones y se detectan los rayos gamma provenientes de la captura neutrónica (Figura 1). A diferencia del análisis por de activación neutrónica convencional (NAA), la irradiación y la detección son simultáneas. Las energías e intensidades de los picos son independientes del estado químico del material, por ende, no hay efectos de matriz. En contraste con muchas técnicas de análisis elemental, los neutrones como los rayos gamma son sumamente penetrantes dando la composición media de todo el volumen irradiado.

El PGNAA se basa en la detección de los fotones gamma producidos de la interacción de los neutrones con la materia y tienen una

vida media del orden de  $10^{-15}$  s, lo cual implica que no produce residuo radiactivo.

Los fotones gammas inmediatos poseen energías típicas para cada elemento; por ejemplo, en el caso del hidrógeno tiene fotones característicos de 2.24 MeV. La intensidad de los picos en el espectro gamma nos dará la concentración del elemento en la muestra.



**Figura 1:** Proceso de interacción neutrónica y producción de gammas [1].

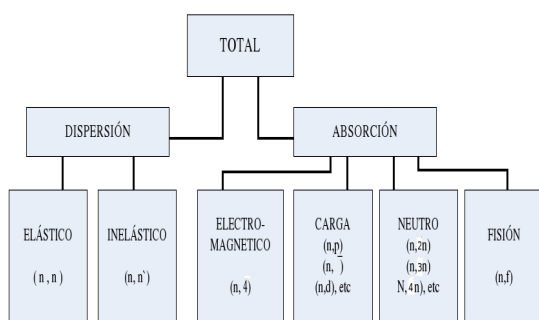
## 2. Fundamento teórico

Los neutrones son producidos en reactores nucleares, pero también se podría usar

\* Correspondencia autor: mmunive@ipen.gob.pe

fuentes radiactivas tales como  $^{252}\text{Cf}$  y  $^{241}\text{Am-Be}$ . Para lograr la emisión de gammas inmediatos de los elementos se requiere de neutrones térmicos; es decir, neutrones con energía promedio de 0.025 eV, esto se logra disminuyendo la energía de los neutrones usando moderadores o termalizadores.

La probabilidad de interacción de los neutrones con el núcleo esta representada por su sección eficaz y depende de la energía del neutrón. Los neutrones interactúan de varias maneras con los núcleos, tal como se observa en la Figura 2, pero en forma general podríamos decir que las interacciones son del tipo de absorción y dispersión [2].



**Figura 2:** Esquema de interacciones neutrón materia [2].

El tipo de interacción que interesa en la técnica PGNAA es la captura neutrónica (electromagnética) y la desexcitación del núcleo se realiza por la emisión de una radiación electromagnética ( $n, \gamma$ ). El tiempo de emisión del mismo puede ser instantáneo ( $10^{-13}$  s) o retardada ( $>10^{-13}$  s). La emisión instantánea se conoce como gammas inmediatos. En la Tabla 1 se presenta las secciones eficaces de algunos elementos [3].

**Tabla 1:** Secciones eficaces de captura y energía de rayos gamma inmediatos típicos, por elemento.

	$E\gamma$ (keV)	$\sigma\gamma$ (E $\gamma$ ) (b)		$E\gamma$ (keV)	$\sigma\gamma$ (E $\gamma$ ) (b)
H	2223	0.3326	Si	3538	0.1190
C	4945	0.00261	Cl	1164	8.91
O	870	1.77E-4	P	512	0.079
N	5269	0.0236	Mg	3916	0.0320
Na	90.99	0.235	Fe	7631	2.55
Ca	1942	0.352	Al	4259	0.0153

Como el análisis en la técnica de PGNAA se realiza durante la irradiación, esto requiere que el sistema de detección tenga un mayor blindaje radiológico para campos mixtos. Los neutrones podrían dañar el detector. Una forma de disminuir esto es atenuando lo mejor posible los neutrones que tienen una energía superior a los térmicos. La técnica PGNAA detecta elementos con secciones eficaces de captura grandes (B, Cd, Sm, y Gd), estos elementos decaen rápidamente y son de difícil detección por NAA [4].

Para realizar la determinación de las concentraciones de un elemento en una muestra, se requiere tener una calibración previa en energía y eficiencia usando fuentes de Cs-137 y Co-60. Para probar la calibración se requiere ubicar un fotopico de mayor energía cercana a 11 MeV, para lograrlo se usan muestras típicas capaces de generar fotones inmediatos de baja y alta energía, como muestras de boro y NaCl. [5]. Después de la calibración se procede a la estimación de la concentración de un elemento (ppm) en una muestra desconocida y comparar los resultados con los logrados para una muestra estándar, esta comparación se realiza calculando el área bajo el pico del espectro de fotones gamma registrado. Este pico corresponde a la posición de un fotón gamma característico de un elemento en la muestra, y se relaciona con los datos logrados con la muestra estándar.

$$\frac{A_{sam}}{A_{std}} = \frac{m_{sam} (e^{-\lambda T_d})_{sam}}{m_{std} (e^{-\lambda T_d})_{std}}$$

donde  $A$  es la actividad de la muestra ( $_{sam}$ ) y el Standard ( $_{std}$ ),  $m$  es la masa del elemento,  $\lambda$  es la constante de decaimiento por isótopo, y  $T_d$  es el tiempo de decaimiento.

### 3. Facilidad instalada

La técnica PGNAA se esta implementando en el conducto de irradiación N° 5. A la fecha, se han ejecutado las siguientes etapas:

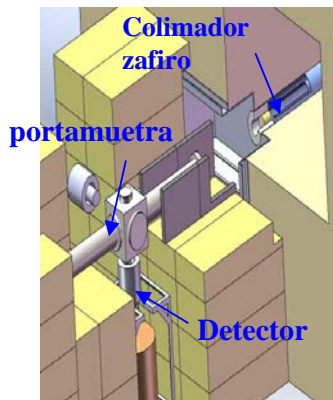
#### 3.1 Colimación interna

El conducto de irradiación N° 5 posee dos partes: una parte móvil que es un tubo de aluminio de 25 cm de diámetro y 100 cm de longitud que se encuentra sumergida en la piscina del reactor y un tubo cilíndrico de acero de 22 cm de diámetro y 220 cm de

longitud que se encuentra empotrado en la pared del reactor. En este tubo se colocó un colimador cilíndrico metálico hueco lleno con polietileno de 80 cm de longitud y 5 cm de diámetro. También se dispone de un cilindro de parafina de 15 cm de longitud y de la misma sección transversal, pero en la parte interna se coloca un cristal de zafiro de 5 cm de diámetro y 10 cm de longitud. Este dispositivo busca reducir la sección del haz de neutrones y al mismo tiempo filtra los neutrones rápidos y fotones gamma que emergen del conducto [6].

### 3.2 La colimación externa y blindaje radiológico

La colimación externa se realizó con un colimador de aluminio revestido de LiF y se tiene una región cúbica donde se coloca la muestra. Alrededor de esta región cúbica se tienen orificios sin blindaje por donde se puede detectar los fotones gamma producidos en la muestra, a continuación de estos orificios se coloca un blindaje para la radiación gamma para proteger el detector.



**Figura 3:** Arriba, esquema general de la instalación de facilidad, abajo fotografía de portamuestra de aluminio, con soporte de muestra y blindaje primario del detector de GeHP.

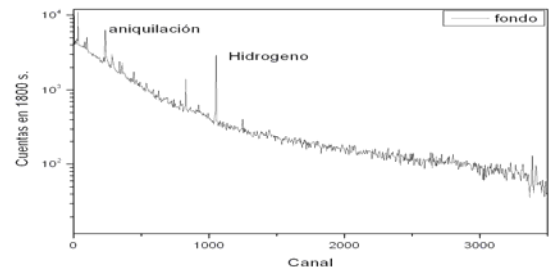
### 3.3 Sistema de detección y cadenas espectrometría

Se tiene un sistema de detección que consta de un detector semiconductor de GeHP, marca Ortec modelo GMX, tipo POP TOP, con una eficiencia de 35% de detección (referencia a NaI(Tl) 3"x3") y una cadena formado por una fuente de alta tensión (HV, marca Ortec), un amplificador, un convertidor análogo digital (ADC) y un multicanal modelo S100. El detector de GeHP posee una geometría de detección vertical y logra tener una resolución de 1.64 keV (Figura 3).

### 4. Resultados

El flujo de neutrones medido en la posición de la muestra es de  $3.2 \times 10^4 \text{ n cm}^{-2}\text{s}^{-2}$  a una potencia térmica de operación del reactor de 320 kW y las tasas de exposición en la posición de ambos detectores y del operador en el aire fue menor a 2,2 mR/h y 180  $\mu\text{R/h}$ , respectivamente.

Usando ambos sistemas de detección se logra apreciar picos de fotones gamma característicos, tales como el de aniquilación (511 keV) y el fotón del hidrogeno (2223 keV), este espectro se colecto en un tiempo de 1800 s y sin muestra (Figura 4).



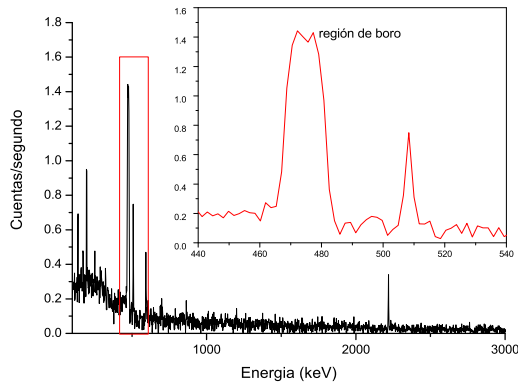
**Figura 4:** Espectro de fondo para el detector de GeHP.

Posteriormente, se midió el espectro de 5 g de ácido bórico enriquecido con boro 10 y se logro registrar los fotones que se encuentran alrededor de 470 keV provenientes de la reacción  $B(n,\alpha)Li$  (Figura 5).

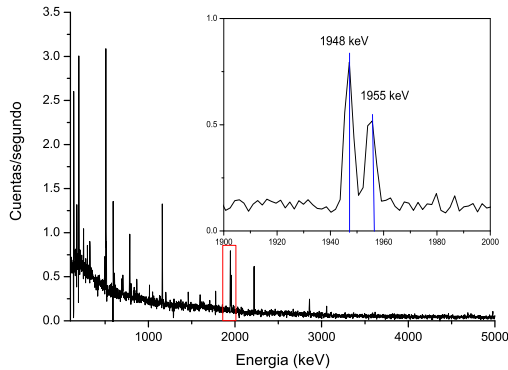
Para observar la respuesta del sistema a mayores energías se utilizó 20 g de NaCl porque el Cl tiene fotones gamma en 1161 keV, 1951 keV, 1959 keV y 6110 keV.

El sistema logra detectar los picos y tuvo la capacidad de resolver los picos correspondientes a los fotones de 1951 keV y

1959 keV con el sistema de detección vertical (Figura 6).



**Figura 5:** Espectro PGNAA del ácido bórico obtenido en 1 h. Se resalta la zona de boro en los alrededores de 470 keV.



**Figura 6:** Espectro PGNAA del NaCl obtenido en 1 h. Se resaltan los picos de cloro en 1951 keV y 1959 keV.

## 5. Comentarios y conclusiones

- Se ha logrado obtener un flujo de neutrones térmicos apropiado para la técnica PGNAA y se ha logrado disminuir la tasa de neutrones rápidos y fotones gamma provenientes del conducto.
- Se han obtenido espectros con buena resolución, lográndose distinguir picos que tienen una diferencia de 8 keV.
- Con algunas mejoras en la colimación de ambos sistemas de detección se podría pasar al estado de calibración final del sistema usando muestras patrones y determinar la concentración de los elementos en las muestras.

## 6. Agradecimientos

Al Sr. Rolando Arrieta y al staff de operadores del reactor nuclear RP-10. Al Sr. Yuri Hernández por el apoyo en la implementación del sistema.

## 7. Referencias

- [1] [http://web.missouri.edu/~umcreactorweb/pages/ac\\_naa2.shtml](http://web.missouri.edu/~umcreactorweb/pages/ac_naa2.shtml)
- [2] Rinard P. Neutron interactions with matter in passive nondestructive assay of nuclear materials. Reilly D, Ensslin N, Smith Jr. H. Eds. Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, (1991).
- [3] International Atomic Energy. Database of prompt gamma rays from slow neutron capture for elemental analysis. Vienna: Austria, 2007.
- [4] Alfassi Z, Chung, C. Prompt gamma neutron activation analysis. CRC Press, 1995.
- [5] Ordenes D, Silva A, Henriquez C, Pereda C. Optimización de la facilidad experimental PGNAA de reactor RECH-1. Nucleotecnica. 2005; 24(38): 51-64.
- [6] Munive M, Baltuano O. Análisis de transmisión de neutrones en zafiro como parte del colimador del difractor Amauta. En: Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informe Científico y Tecnológico 2004. Lima: Perú, 2005. p.71-73.