

ESPECTROMETRÍA GAMMA DE BAJA RESOLUCIÓN ANALIZADOR DE 1024 CANALES LUDLUM

Ibarra, C. J.¹ y Pabón, V. M.²

^{1,2} Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Licenciatura en Química
Grupo Investigación en Ciencia y Tecnología Nuclear
Bogotá, Colombia

RESUMEN

La espectrometría gamma de baja resolución es una técnica analítica nuclear no destructiva, apropiada para hacer inducción en esta tecnología. Este trabajo se realizó con el multicanal 732 "Ludlum" de 1024 canales, acoplado a un detector de NaI(Tl) del mismo fabricante; se centró en la *calibración*, que comprendió el establecimiento de parámetros como voltaje de trabajo (V_T), ganancia gruesa (CG), nivel inferior de discriminación (LLD), calibración en energía y resolución, así como la obtención de los *espectros de energía* del ^{241}Am , ^{60}Co y ^{226}Ra , de los cuales se analizaron los fotopicos, por último se obtuvo el *espectro de una fuente desconocida*.

1. INTRODUCCIÓN

Así como en química clásica, para estudiar un elemento o un compuesto se utilizan métodos analíticos clásicos e instrumentales, en química nuclear y radioquímica se utiliza instrumentación nuclear para identificar y cuantificar radionúclidos que emiten distintos tipos de radiaciones y que en este contexto se conocen como técnicas analíticas nucleares (espectrometría alfa, beta, gamma, de neutrones, etc.), las cuales, con el avance de la microelectrónica han pasado de los módulos NIM-BIN ("Nuclear Instrumentation Module") muy grandes, al uso de tarjetas que se insertan en un computador portátil, como la disponible en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (UD), Grupo Investigación en Ciencia y Tecnología Nuclear (C&TN) [1], cuya comparación se observa en la **Figura 1** [2].

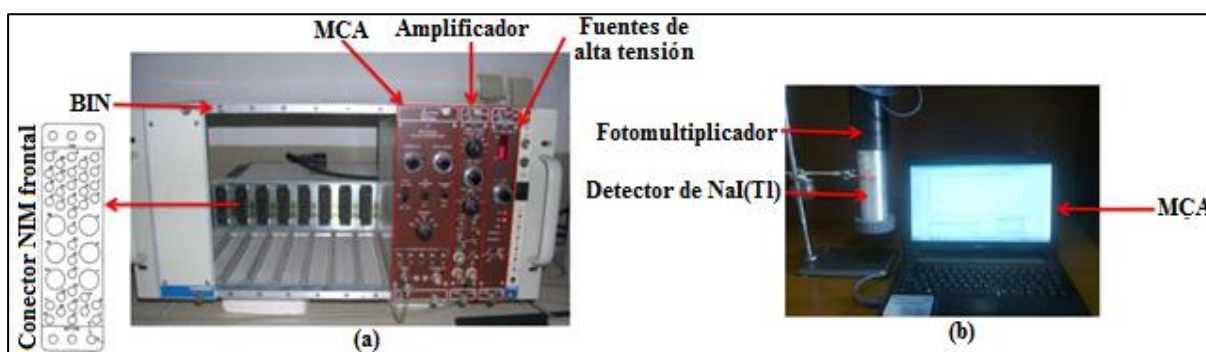


Figura 1. Comparación de instrumentación nuclear - (a) sistema NIM-BIN y (b) sistema moderno. Adaptado de [2]

¹cjibarrah@outlook.es; ²vitia01@hotmail.com

En Colombia se usa *instrumentación nuclear* que comprende distintos tipos de espectrómetros como los alfa, beta (contadores de centelleo líquido), gamma (monocanales, multicanales), de neutrones, también activímetros, detectores, monitores de radiación etc., en instituciones como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), actualmente encargado por el Gobierno Nacional de las actividades nucleares en el País, el Instituto Nacional de Cancerología (INC), en las facultades de ciencias de las universidades en especial en los departamentos de física, en centros de investigación que trabajan con moléculas marcadas, hospitales que prestan servicios de medicina nuclear, radiología y radioterapia (teleterapia y braquiterapia) y empresas que se encargan de radiografía industrial (gammagrafía y rayos-X) [1].

1.1. Radiaciones

Desde el punto de vista de un núclido inestable, la radiación es la emisión de partículas o fotones como consecuencia de la desintegración de su núcleo atómico, que implica cambios energéticos y variación en el número de nucleones, hasta llegar a un núclido estable. La radiación ionizante puede ser de origen nuclear o electromagnético, se puede producir también en equipos como los de rayos-x, y se clasifica en directa o indirectamente ionizante, como se observa en la Figura 2 (a) y (b) respectivamente, al interactuar con la materia; este trabajo se centra en la utilización de fotones gamma [2]-[5].

Radiación gamma: Es de origen electromagnético o nuclear, tiene gran poder de penetración al interactuar con la materia debido a su alta energía y ausencia de carga y masa, desplaza los electrones del átomo por los tres efectos (fotoeléctrico, Compton y producción de pares) **Figura 2 (b)**, según los cuales hay transferencia total o parcial de energía al medio[6].

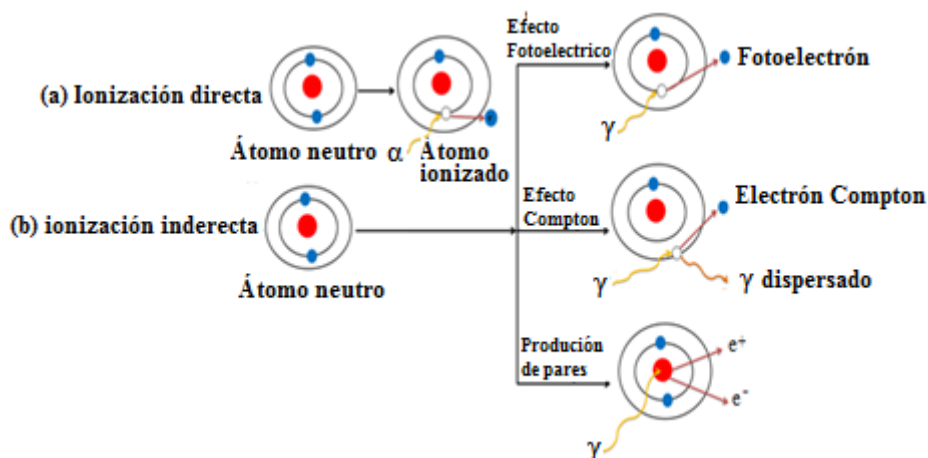


Figura 2. (a) Ionización directa; (b) Ionización indirecta. Adaptado de [6]

1.2. Detección de la radiación gamma

Cualquiera de las radiaciones, al interactuar con el material sensible de un detector, provoca su ionización o excitación, según la energía depositada en él; por esta razón existen diferentes tipos de detectores como los que cuentan partículas (α , β y n) o fotones (rayos-X y γ), los detectores acoplados a espectrómetros gamma como el de centelleo NaI(Tl), que se basa en la

excitación, o el detector semiconductor HpGe en la ionización, sistemas que constituyen la espectrometría gamma de baja y alta resolución respectivamente [1], [7]-[12].

1.3. Espectrometría gamma

Entre las técnicas analíticas nucleares, la espectrometría gamma es de las más importantes, por realizar un *análisis simultaneo* de muchos elementos y *no secuencial* como la absorción atómica. Puede caracterizar un radionúclido natural o artificial por su *espectro de energías* único para identificarlo, o cuantificarlo, para lo cual hay que establecer una curva de calibración en energías, $E_\gamma = f(\text{canal})$ [1], [4]-[11]. El análisis de altura de pulsos se puede hacer en un sistema monocanal (SCA, "Single Channel Analyzer") o en uno multicanal (MCA, "Multi Channel Analyzer").

2. METODOLOGÍA

Se utilizó un sistema de espectrometría gamma multicanal de 1024 canales, con detector NaI(Tl) 44-11 plano (2x2") "Ludlum", acoplado a un PMT de 14 pines y cadena electrónica asociada, conexión a un PC con Windows 7 versión Profesional, Microsoft Office 2013, Software de adquisición y análisis de espectros (SAAS) versión 1.0 [13].

Los parámetros de operación que se establecieron para el analizador multicanal, se indican de manera resumida en el diagrama de la **Figura 3**, así como los diferentes experimentos nucleares, de los cuales solo se presentan los resultados de los espectros de energía de ^{241}Am , ^{60}Co , ^{226}Ra y de una fuente gamma desconocida.

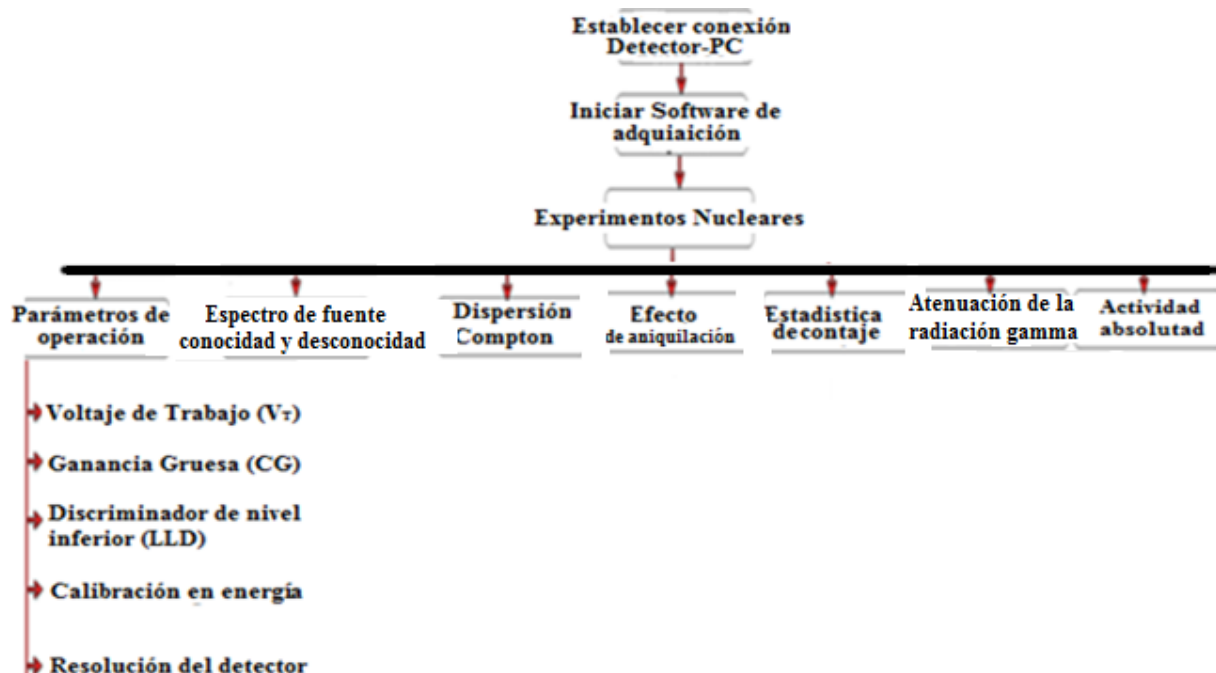


Figura 3. Diagrama, metodología de la investigación

3. RESULTADOS

El analizador de 1024 canales empleado en este estudio, comparado con uno de 8000, carece de algunos parámetros como la *ganancia fina (FG)*, el *nivel de discriminación superior (ULD)* y el *ajuste Pole/Zero*.

3.1. Calibración del multicanal

3.1.1. Voltaje de trabajo del detector NaI(Tl): Para su determinación primero se hicieron contajes cada 20 V con fuente de ^{60}Co , y una vez determinada la tasa de contaje máxima, se efectuaron cada 5 V durante 300 s, desde 470 hasta 540 V; se obtuvo un $V_T = 515$ V, que corresponde a la región donde se obtiene la mayor tasa de contaje (ver **Tabla 1** y **Figura 4**), el cual coincide con el sugerido por el fabricante del detector. Los datos que se reportan en la tabla son netos, y el tiempo muerto lo da el equipo.

**Tabla 1. Voltaje de trabajo detector NaI(Tl)
t contaje 300s; ^{60}Co**

V	Cuentas /300 s	CPM	Tiempo muerto, %	Tiempo muerto, s	Canal
480	460	92	0,82	1,014	398
485	512	102	0,90	1,090	428
490	536	107	0,97	1,75	468
495	563	113	1,12	1,293	501
500	633	127	1,15	1,353	541
505	658	132	1,27	1,466	578
510	785	157	1,35	1,575	628
515	912	182	1,39	1,666	672
520	890	178	1,45	1,775	723
525	811	162	1,55	1,889	776
530	712	142	1,65	2,023	832

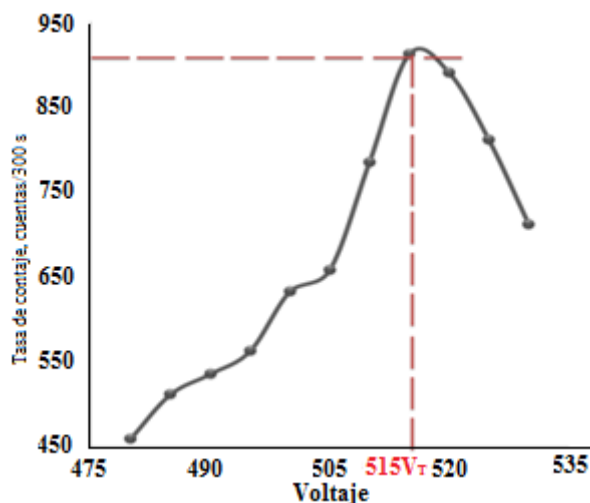


Figura 4. Voltaje de trabajo detector NaI(Tl)

3.1.2. Ganancia gruesa del amplificador (CG): El equipo permite establecer los factores de ganancia que afectan el desplazamiento del espectro. En la **Figura 5** se puede ver que para un factor de ganancia X2, el espectro se corre hacia la izquierda por lo que no es posible resolver con claridad los fotopicos. A medida que se aumenta dicho factor (X9, X16, X24, etc.), se desplaza a la derecha, pero si el factor de ganancia es $>X9$, los fotopicos se deforman y por tanto la resolución disminuye. Se estableció una ganancia ideal X9, porque incluye el mayor número de fotopicos, desde canal 0 hasta el 1023.

3.1.3. Nivel inferior del discriminador de la ventana (LLD): Es otro parámetro que afecta la visualización de los fotopicos en el espectro, al definir el número de canales en uso; para una fuente de ^{60}Co , con un factor X2 se pueden observar todos los picos en el espectro (el

pico de rayos-X a la izquierda y a la derecha los fotopicos de 1,17 y 1,33 MeV). Al aumentar el factor de LLD (X9, X16, X24, etc.), disminuye el número de canales, y como se muestra en la **Figura 6**, no se evidencia la presencia del pico de rayos-X.

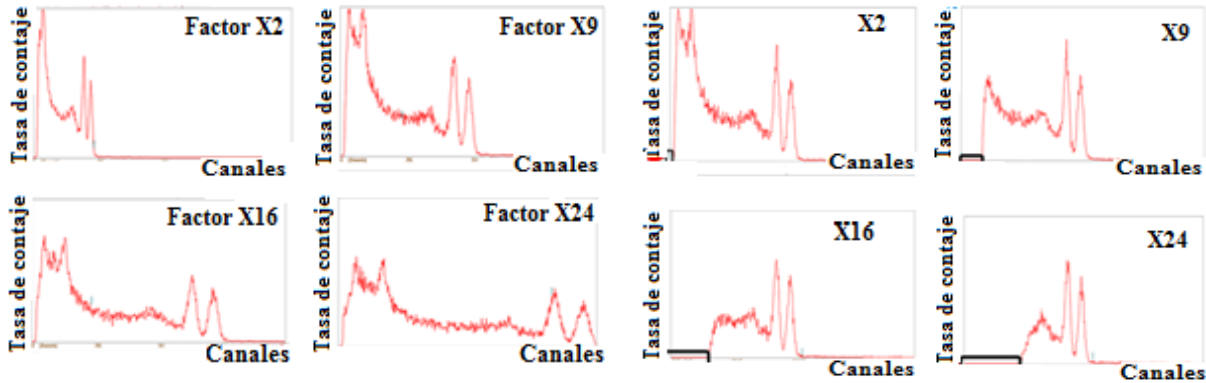


Figura 5. Factores de ganancia gruesa del MCA. Fuente ⁶⁰Co

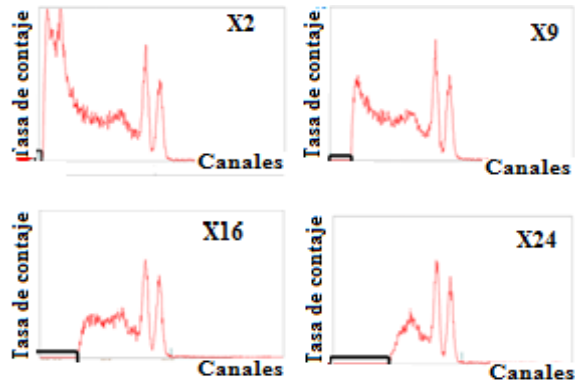


Figura 6. Factores de LLD en el MCA. Fuente ⁶⁰Co

3.1.4. Calibración en energías: La curva de calibración se realizó con las fuentes de ²⁴¹Am (0,060 MeV), y ⁶⁰Co (1,173 MeV y 1,332 MeV), ubicadas frente al detector, distancia de 5 cm y 300 s tiempo de contaje. La **Figura 7** relaciona las energías gamma de los fotopicos, con los canales de los centroides donde aparecen (**Tabla 2**), por lo que el rango de calibración va de 0,06 MeV-1,33 MeV, es decir, solo los picos que se encuentren entre este intervalo podrán ser visualizados y la ecuación de la recta corregida por regresión lineal, es:

$$E_{\gamma} = -0,0103 \text{ MeV} + (0,0028 \text{ MeV/canal})\text{canal}$$

Donde, E_{γ} = energía, MeV (variable dependiente); $-0,0103 \text{ MeV}$ = término independiente; $0,0028 \text{ MeV/canal}$ = pendiente de la recta; canal = variable independiente.

Tabla 2. Curva de calibración

Fuente	Energía (E_{γ}) MeV	Canal
²⁴¹ Am	0,060	25
⁶⁰ Co	1,173	416
⁶⁰ Co	1,332	475

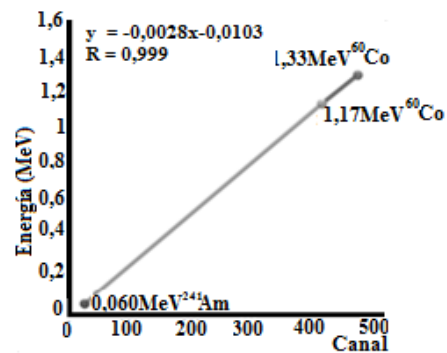


Figura 7. Curva de calibración en energía

3.1.5. Resolución del detector NaI(Tl): Para establecer la resolución de los tres fotopicos (Tabla 3), se definió la región de interés (ROI, “Region of Interest”), con el fin de conocer el canal de inicio (I), el de finalización (F) y el del centroide (C₀). En la Figura 8, se explica específicamente la resolución para el fotopico de mayor intensidad del ⁶⁰Co, cuyo valor fue de 4,761%, el cual se calculó con la siguiente ecuación, expresada de diferentes maneras según la literatura [8]:

$$\% R = \frac{\Delta C}{C_0} 100 = \frac{FWHM}{E_0} 100 = \frac{Y/2}{X} 100 \quad (1)$$

Donde, %, R = resolución en porcentaje; FWHM = Y/2 = ΔC = número de canales en el ancho a mitad del fotopico máximo (“Full Width at Half Maximum”); E₀ = X = C₀ = Número del canal en el centroide del fotopico, asociado a una energía.

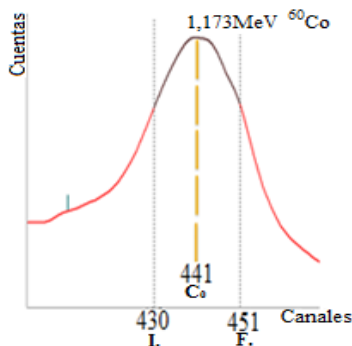


Figura 8. Espectro expandido del fotopico de 1,173 MeV, ⁶⁰Co

Tabla 3. Resolución del detector NaI(Tl) 44-11

Fuente	Energía, MeV	Cuentas/300s	Canales				Res. %
			I	C ₀	F	FWHM	
²⁴¹ Am	0,060	6520	23	26	29	0,230	23,076
⁶⁰ Co	1,173	1358	430	441	451	0,047	4,761
⁶⁰ Co	1,332	1024	488	499	511	0,046	4,609

3.2. Obtención y análisis de espectros de energía

Los espectros obtenidos permiten evidenciar los fotopicos de cada radionúclido y se presentan acompañados de su esquema de desintegración. Para el ²⁴¹Am en particular (Figura 9), se ajustó la ganancia X16, con el fin de observar el fotopico γ de 0,026 MeV, pues el de 0,060 MeV se observa con la ganancia X9, energías γ que son emitidas por las transiciones isoméricas (T.I.) del ²³⁷Np. En el espectro de ⁶⁰Co (Figura 10), se pueden observar sus dos fotopicos (1,173 MeV y 1,332 MeV), resultado de las T.I. del ⁶⁰Ni.

Por otra parte, la desintegración α del ²²⁶Ra a ²²²4mRn, y posterior emisión de fotones gamma por T.I., en el espectro solo se ven siete fotopicos (0,080; 0,191; 0,246; 0,297; 0,355, 0,609 y 1,375) MeV (Figura 11) debido a la baja resolución del detector NaI(Tl), pero con uno de GeHp se observarían muchos más, por su mayor resolución.

Finalmente, en el espectro de la mezcla de radionúclidos de ²⁴¹Am, ²²⁶Ra y ⁶⁰Co (Figura 12) se pueden observar los fotopicos de cada uno con sus energías.

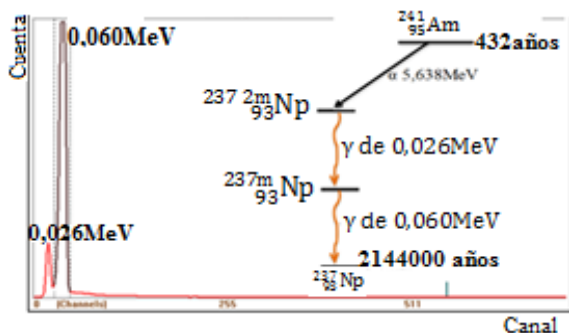


Figura 9. Espectro gamma ^{241}Am .
CG X16

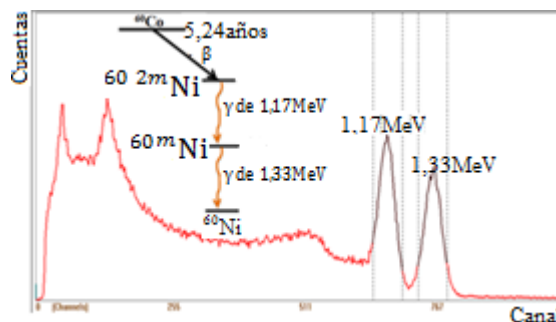


Figura 10. Espectro gamma ^{60}Co
CG X9

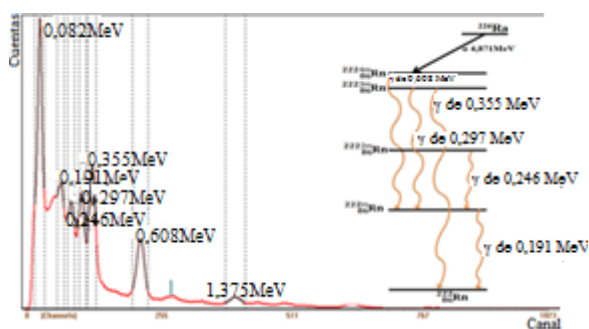


Figura 11. Espectro gamma ^{226}Ra
"Philip Harris" CG X9

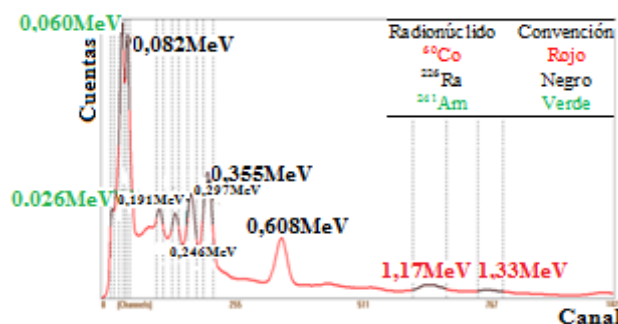


Figura 12. Espectro gamma ^{241}Am , ^{60}Co y ^{226}Ra . CG X9

3.3. Análisis de una fuente gamma desconocida

En la **Tabla 4** se comparan las energías de la *fente desconocida* con las de la fuente de ^{226}Ra "Philip Harris", observándose una coincidencia en la mayoría de los fotopicos, excepto los últimos dos, debido posiblemente a que tienen diferente geometría (moneda y cilíndrica), respectivamente. La fuente desconocida podría ser de ^{226}Ra , pues también se confirma al comparar los espectros de energías de las dos fuentes (**Figura 13**).

Tabla 4. Comparación energías de fotopicos de las fuentes desconocida y conocida

Fuente gamma	Energía, MeV					
Desconocida	0,082	0,299	0,353	0,609	1,137	1,738
^{226}Ra "Philip Harris"	0,082	0,297	0,355	0,608	-----	-----

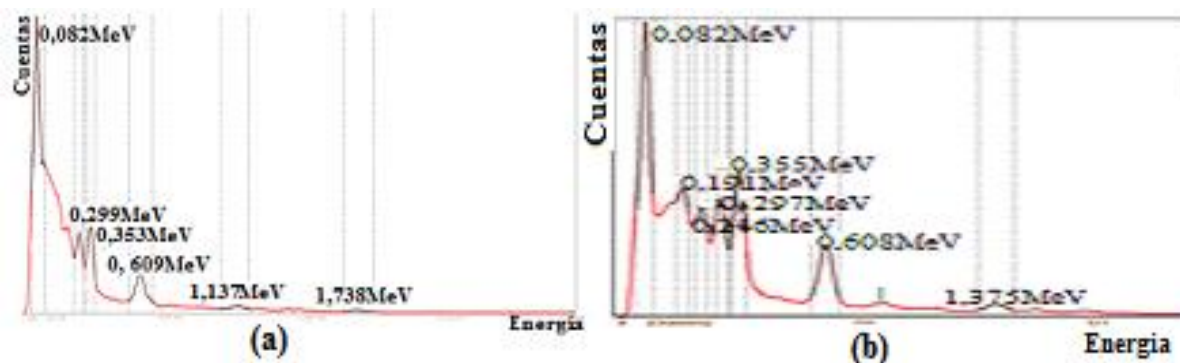


Figura 13. Espectro gamma fuentes (a) desconocida; (b) conocida ^{226}Ra “Philip Harris”

4. CONCLUSIONES

Los parámetros de operación obtenidos experimentalmente ($V_T = 515$ V; Ganancia gruesa = X9; LLD = X2), son los apropiados para el funcionamiento correcto del sistema de espectrometría gamma multicanal, ya que los espectros obtenidos no presentan los fotopicos desplazados a la izquierda o a la derecha, sino con una distribución ideal de canales lo que permite la visualización, por ejemplo en el caso de ^{60}Co , de la mayoría de los picos del espectro, como el pico de rayos-X, el de retrodispersión, aniquilación, borde Compton, los dos fotopicos del Co, y el pico suma.

La resolución del detector NaI(Tl) no es muy buena comparada con la de un semiconductor como el GeHp, sin embargo al modificar la ganancia de X9 a X16, para el caso del ^{241}Am , permite visualizar la energía muy baja de 0,026 MeV y la de 0,060 MeV. Cabe aclarar que la resolución del detector, está afectada por la energía del fotón gamma incidente, la geometría de contaje y la ganancia del amplificador (a menor ganancia, mayor resolución).

La espectrometría gamma de baja resolución, como es el caso en estudio, es una técnica sencilla, fácil de comprender, barata, con capacidad para identificar fuentes desconocidas emisoras gamma, si las energías de los fotopicos no son tan cercanas, pues de lo contrario se debe usar un detector semiconductor como el GeHp. También el sistema es fácil de calibrar en un amplio rango de energías gamma, para utilizarlo con fines de docencia si se dispone de fuentes con actividades a nivel de μCi , como las de ^{51}Cr (0,323 MeV), ^{137}Cs (0,662 MeV), ^{54}Mn (0,842 MeV), ^{60}Co (1,17 y 1,33 MeV) y ^{22}Na (1,27 y 1,52 MeV).

5. REFERENCIAS

1. Pabón, V. M., *"Apuntes personales de radioquímica"*, Licenciatura en Química, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá (2014).
2. Reguigui, N., "Gamma Ray Spectrometry. Practical Information", <http://www.cnstn.rnr.tn/afra-ict/NAT/gamma/html/Gamma%20Spec%20V1.pdf> (2006).
3. Travesi, A., *Análisis por activación neutrónica-teoría, práctica y aplicaciones*, Servicio de Publicaciones de la J.E.N., Madrid, España (1975).

4. Choppin, G. R. y Baisden, P., "Radiochemistry, ACS Audio Courses, Tallahassee, FL, Florida State University", <http://livingtextbook.oregonstate.edu/acsaud/media/book.pdf> (1979).
5. "ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry), Radiaciones ionizantes (Ionizing Radiation), Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU, Servicio de Salud Pública, División de Toxicología". http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts149.pdf (1999).
6. Kaplan, I., *Nuclear Physics*, 2ª ed., Addison-Wesley Publishing Company, London, UK (1977).
7. Choppin, G. R., Liljenzin, J.-O. y Rydberg, J., *Radiochemistry and Nuclear Chemistry*, 2ª ed., Butterworth-Heinemann Ltda, London, UK (2002).
8. "Sirajuddin, D., Gamma Spectroscopy, University of Michigan Nuclear Engineering & Radiological Sciences, Michigan, USA". <http://www.itcanbeshown.com/NERS315/Lab%206%20-20Gamma%20Spectroscopy.pdf> (2006).
9. Leo, W. R., *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer Verlag Berlin, Germany (1987).
10. Knoll, G. F., *Radiation detection and measurement*, John Wiley & Sons, New York, USA (1979).
11. Tsoulfanidis, N., *Measurement and Detection of Radiation*, 2º ed., Taylor and Francis Publishers 1798, Jefferson City, USA (1995).
12. Lutz, G., *Semiconductor Radiation Detectors*, 2ª ed., Springer, Munich, Germany (2007).
13. *Ludlum Model 730, 732 & 733 PC based Gamma Ray Spectroscopy System*, Ludlum, New York, USA (2012).