REVISTA INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Actividad radiactiva de un electrodo de tungsteno toriado

Radioactive activity of a Thoriated Tungsten electrode

Alejandro Restrepo Giraldo[1], Juan Sebastián Ramírez Quintero[1]

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, 6, 90-101, 2022
Recibido: 4 de noviembre de 2021
Aceptado: 4 de febrero de 2022
Publicado en línea: 23 de marzo de 2022
Doi: https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.6.2022.632

Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0.

Citación: A. Restrepo Giraldo y J. S. Ramírez Quintero, "Actividad radiactiva de un electrodo de tungsteno toriado", *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.° 6, pp. 90-101, 2022. https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.6.2022.632

Resumen

Se analiza una muestra de torio contenida en un electrodo de soldadura, mediante el uso de un contador Geiger-Müller modelo GMC-600, una cámara de niebla y un centelleador Canberra de NaI. Se caracterizan el contador Geiger y la muestra a partir de las especificaciones del fabricante y las bases de datos de estructura nuclear. Se propone un montaje para la determinación del rango en aire y el número total de decaimientos de la fuente radiactiva, y se enfatiza en la influencia de radiación de fondo y la geometría del montaje. Una vez se realiza este montaje, se reportan medidas y se interpretan desde la teoría y fuentes bibliográficas. Por último, se tienen en cuenta aspectos del riesgo de la manipulación de este objeto.

Palabras clave: torio, contador Geiger-Müller, radiactividad, detección, cadena de decaimiento.

Abstract

A thorium sample contained in a welding electrode is analyzed using a Geiger-Müller counter model GMC-600, a cloud chamber, and a Canberra NaI scintillator. The Geiger counter and sample are characterized using the manufacturer's specifications and nuclear structure databases. A setup is proposed for determining the range in air and the total number of decays of the radioactive source, emphasizing the influence of background radiation and mounting geometry. This mounting is carried out, measurements are reported and interpreted based on theory and bibliographic sources. Finally, aspects of the risk of handling this object are considered.

Keywords: Thorium, Geiger-Müller counter, radioactivity, detection, decay chain.

[1] Instituto de Física, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Autor de correspondencia: Alejandro Restrepo, alejandro.restrepo19@udea.edu.co

1. Introducción

La radiactividad es un asunto que comúnmente se entiende como algo poco frecuente, peligroso, relacionado con accidentes y eventos desastrosos en otros tiempos, como se evidencia en [1] y [2]. De hecho, los eventos relacionados con radiación ionizante son muy comunes en la naturaleza y todo el tiempo estamos sometidos a dosis de radiación provenientes del ambiente y los rayos cósmicos del espacio exterior [3]. En [4] se explica que la corteza terrestre contiene átomos radiactivos, en especial de torio, uranio y radón. Estos se utilizan en aplicaciones particulares de la industria y la medicina, incluso con productos de relativamente fácil acceso. Uno de estos es el que se analiza en este artículo: un ejemplar de electrodo de aleación tungsteno-torio al 2 %, el cual se puede adquirir en tiendas de soldadura.

Debido a la asequibilidad de este objeto, se pretende caracterizar y estudiar el riesgo de su manipulación en condiciones previas a su uso, es decir, la muestra sólida sin ser aplicada por un soldador, de manera que la interacción con la radiación sea solamente externa, sin ingestión de gases emitidos o contaminación del entorno, como sucede en los procesos de soldadura.

En la actualidad, las bases de datos de estructura nuclear permiten consultar libremente los tipos de decaimientos, energías características y estructura de miles de isótopos; estas, en conjunto con bibliografía sobre teoría de decaimientos, detección de radiación, medidas y procedimientos de laboratorio adecuados, permiten un estudio extensivo de sustancias radiactivas para caracterizar muestras y evaluar procedimientos con ellas. Se recurre a esta información disponible para proponer y elaborar experimentalmente un montaje que tiene como principales objetivos medir el rango de la radiactividad y decaimientos por minuto de estos tipos de electrodos, para luego caracterizarlos y evaluar el riesgo de su manipulación.

2. Metodología

2.1. Contador Geiger-Müller y características

El modelo de contador Geiger-Müller usado es el GMC-600 del fabricante GQ Electronics. En [5] se especifica que este instrumento es sensible a radiación α, β, γ y rayos X. Contiene un tubo rectangular modelo SBT-11 de dimensiones 1,75 ± 0,05 cm × 3,30 ± 0,05 cm, con un tiempo muerto del orden de μs. Los niveles de radiación detectables son 3,0 MeV para decaimientos α, 100 keV para decaimientos β y 10 keV para radiación electromagnética. Este se observa en la figura 1. Además, permite el almacenamiento de datos y conexión a *software* especializado. Debido a estas características y a las de la cadena de decaimiento del ^{232}Th (véase sección de caracterización de la actividad de la muestra), este instrumento resulta adecuado para medir la actividad radiactiva de la muestra en cuestión.

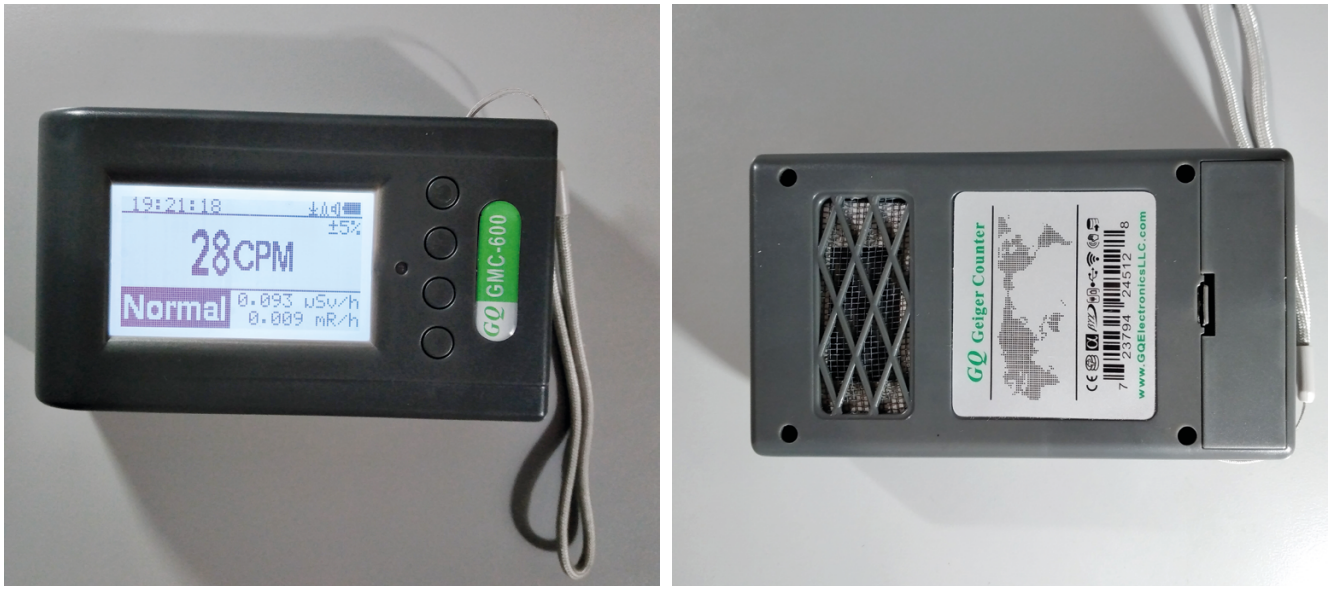


Figura 1. Contador Geiger-Müller GMC-600 vistas frontal y posterior



Figura 2. Muestra original y preparación

2.2. Muestra y preparación

La muestra es un electrodo de aleación de tungsteno-torio al 2 % de calibre 2,381 mm (3/32") y masa 14 ± 1 g. Para un proceso de medición adecuado se requiere que esta sea lo más aproximado posible a una fuente puntual de radiación o una forma geométrica compacta. Debido a esto, el electrodo se cortó en piezas de aproximadamente 1 cm para ubicarlas en un área rectangular acorde a la forma del tubo del contador. De no realizarse esta preparación, la forma extensa de este dificultaría una medida adecuada de las partículas emitidas debido a la absorción por el aire y la geometría del detector. Luego de esta preparación, no se perdió masa detectable en el orden de gramos ni se afectó la actividad por presencia de recubrimientos oscuros sobre las piezas originados en el proceso de corte. Se posicionaron las piezas en un área rectangular de dimensiones $1{,}75 \pm 0{,}05\,\text{cm} \times 2{,}70 \pm 0{,}05$ cm, lo más juntas posibles sin superponerlas. Así, se aproximó la muestra a una fuente radiactiva plana de forma rectangular. La preparación se evidencia en la figura 2.

2.3. Montaje y procedimiento

Cualquier instrumento para medir radiactividad posee dos tipos de eficiencias de detección: intrínseca y absoluta. Se definen como:

ε_{int} = Pulsos detectados/Cuanto de radiación incidente en el detector,

ε_{abs} = Pulsos detectados/Cuanto de radiación emitido por la fuente.

La primera se relaciona con la probabilidad de que una partícula incidente en el volumen sensible del aparato sea detectada; la segunda, con la probabilidad de que esta partícula incida en el volumen sensible debido a la distribución geométrica del aparato. En [3] se demuestra que se relacionan como:

$$\varepsilon_{abs} = \varepsilon_{int} \frac{\Omega}{4\pi} \tag{1}$$

Aquí, Ω es el ángulo sólido que subtiende el volumen sensible del detector respecto a la fuente. Si S es el número de cuantos de radiación emitidos, N el número de detecciones y si se asume que la emisión es isotrópica, se tiene:

$$S = \frac{\mathrm{N}}{\varepsilon_{abs}} = \frac{4\pi N}{\Omega \varepsilon_{int}} \tag{2}$$

El cálculo de Ω puede ser complicado, incluso para formas geométricas simples. Debido a que la forma del tubo es rectangular, se escogió preparar la muestra en la misma forma y tratarla como una fuente plana extendida.

El montaje consistió en localizar el detector sobre la muestra preparada, de tal manera que el centro del tubo y del contenedor de esta estuvieran alineados y los planos que los contenían fueran paralelos. Esto se logró mediante marcas sobre la mesa que soportaba el montaje y la fijación del contenedor D sobre ella. Esto se observó desde varias perspectivas (figura 3). El soporte E, de altura variable, medía el alcance de la radiación en el aire, y el computador F recopilaba los datos. El procedimiento de medida consistió en fijar la altura del detector con la muestra posicionada como se describió antes, conectar el contador por USB a un computador y, mediante el *software* libre *GeigerLog* [6], guardar, graficar

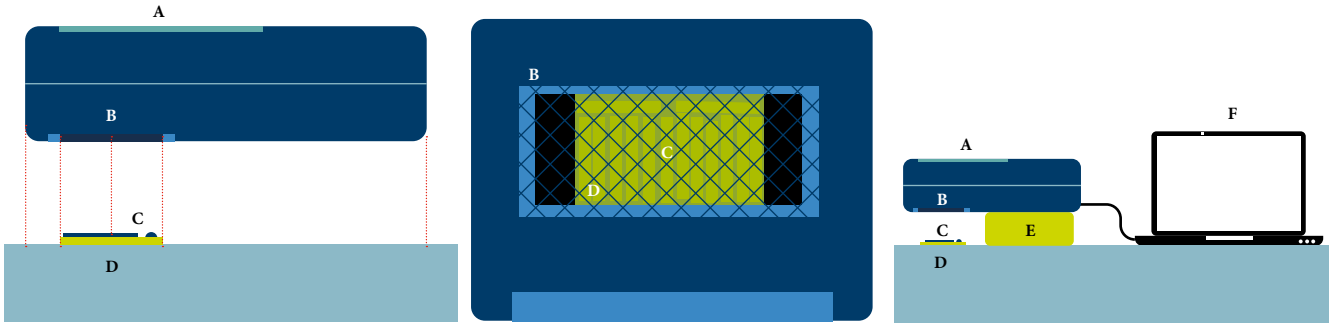


Figura 3. Montaje para las medidas

y procesar estadísticamente los datos recopilados durante un intervalo de tiempo definido. Posteriormente se aumentó la altura del contador respecto a la muestra y se repitió el proceso. Con este montaje, la radiación detectable fue aproximadamente el 50 % de la radiación total correspondiente a la emitida en dirección al detector. El otro 50 % sería absorbida por la mesa y no fue posible detectar. Esto acotó el ángulo sólido Ω a un valor máximo de 2π sr en la ecuación 2.

2.4. Caracterización de la actividad de la muestra

Como ya se describió, la muestra fue un electrodo de aleación de tungsteno-torio al 2 %. El torio decae espontáneamente y deja en su lugar isótopos hijos que a su vez decaen hasta llegar a un núcleo estable. El isótopo más abundante del torio en la corteza terrestre es el ^{232}Th, el cual tiene una abundancia natural en fracción molar de 0,9998(2) y se encuentra como el compuesto dióxido de torio ThO_2 [7]. La cadena de decaimiento se puede observar en la figura 4 con información del isótopo, tipo de decaimiento y vida media. Se desconocen muchas precisiones de la manufactura de la muestra; sin embargo, es factible asumir que inicialmente contenía en su mayoría ^{232}Th con cantidades despreciables de sus isótopos hijos y que fue fabricada hace menos de una década. Con estas suposiciones, se puede afirmar que esta se encuentra principalmente con presencia de ^{232}Th y comparando las vidas medias está alcanzando el equilibrio secular con el ^{226}Ra el cual a su vez se halla en equilibrio con el ^{228}Ac. Las energías características de cada decaimiento de la cadena se consultan en bases de datos de estructura nuclear, por ejemplo la NNDC [8] se utilizó en esta práctica. Para conocer el espectro de energía de la muestra se analizaron las intensidades absolutas de cada decaimiento en la cadena.

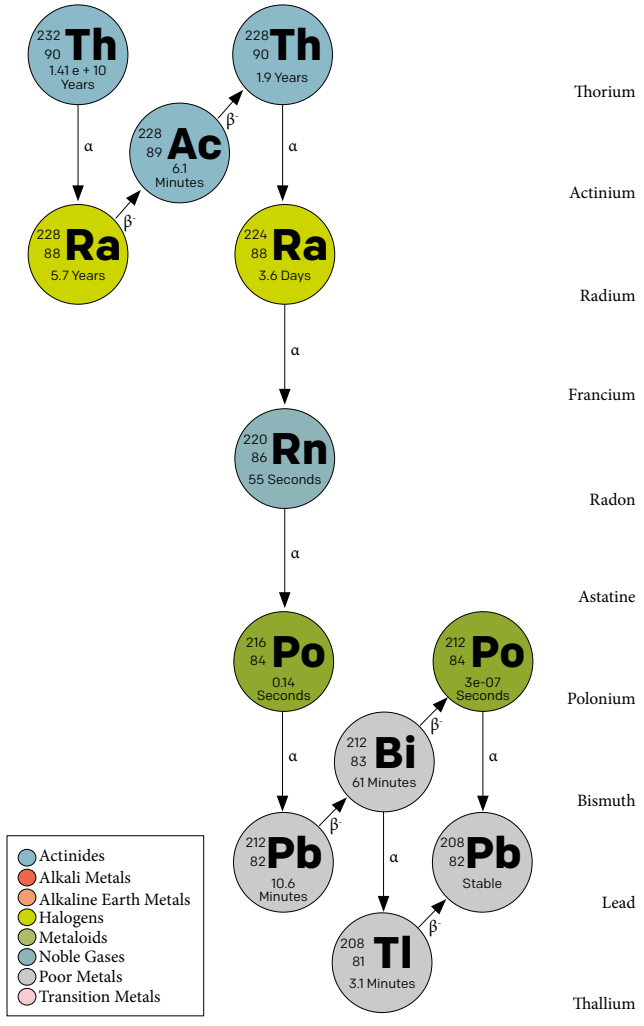


Figura 4. Cadena de decaimiento del torio
Fuente: Wikimedia Commons.

Además de decaimientos α y β, también existen decaimientos isoméricos o γ. Las intensidades absolutas y conversiones internas del espectro de toda la cadena se muestran en las figuras 5 y 6, respectivamente. Para la detección de rayos

γ con un contador Geiger-Müller son favorables las energías bajas [3]. Por tanto, las emisiones esperadas y detectables se encuentran en la región superior izquierda de la figura 5. Sin embargo, para los primeros isótopos de la cadena las intensidades son del orden de 10-6 a 101. Esto implica que la muestra tiene poca actividad γ y, por tanto, pocas conversiones internas. Otras emisiones posibles son rayos X provenientes de reconfiguraciones de los electrones en los átomos radiactivos. El contador fue sensible a estos decaimientos con alta eficiencia [3].

Para los decaimientos α y β, las emisiones esperadas y detectables se hallaron en la región superior a la derecha de la línea del nivel de radiación detectable de las figuras 7 y 8. Los decaimientos α de la muestra estuvieron totalmente cubiertos por el instrumento. Los decaimientos β fueron más complejos de detectar por su distribución energética entre 0 y una energía máxima $E_{máx}$. En la figura 8 se muestran las energías más probables E_{prob} siguiendo la teoría de Fermi [9] en donde se considera $E_{prob} = 0{,}34\, E_{máx}$. Observando esto, el contador no detectaría con alta eficiencia los decaimientos del ^{228}Ra y algunos de muy baja intensidad del ^{228}Ac. Salvo esta excepción, se concluye que el detector es sensible a las emisiones significativas de la muestra con alta eficiencia y se considera adecuado para su medición.

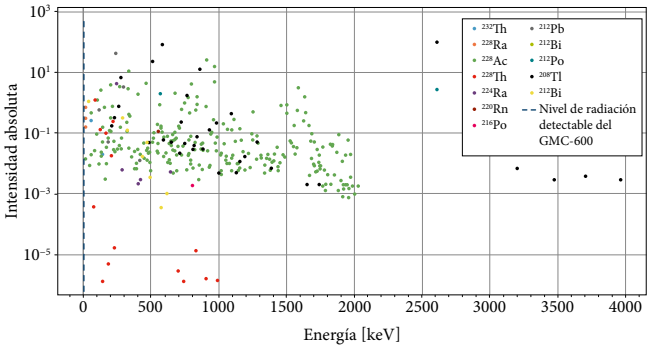


Figura 5. Intensidad absoluta del espectro γ de la cadena del ^{232}Th. Herramienta *Matplotlib*

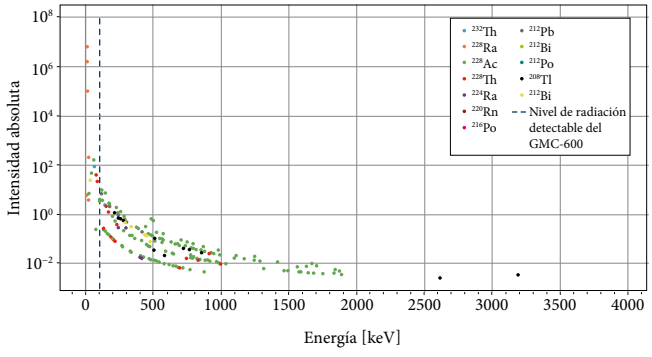


Figura 6. Conversiones internas de la cadena del ^{232}Th. Herramienta *Matplotlib*

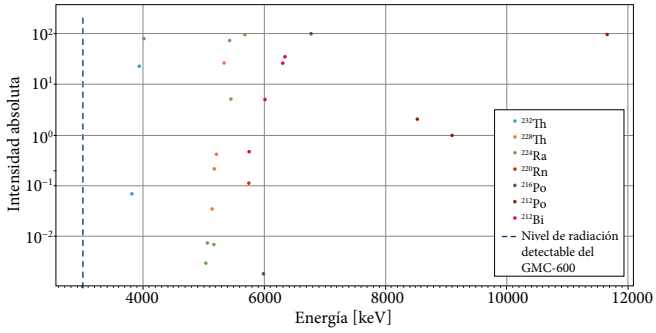


Figura 7. Intensidad absoluta del espectro α de la cadena del ^{232}Th. Herramienta *Matplotlib*

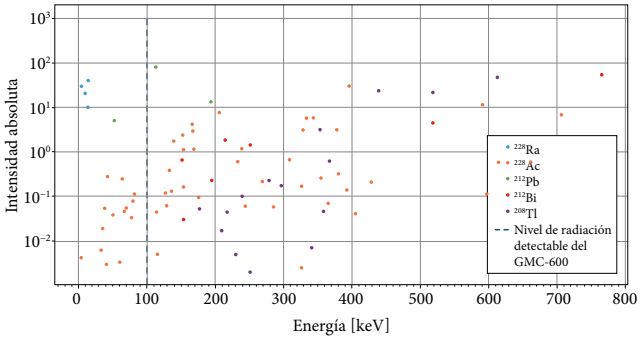


Figura 8. Intensidad absoluta de las energías más probables del espectro β de la cadena del ^{232}Th. Herramienta *Matplotlib*

3. Observaciones y medidas

3.1 Cámara de niebla y centelleador

Es factible observar la radiación de fondo y de muestras radiactivas con un montaje construido a partir de materiales relativamente fáciles de obtener. En este caso, una *cámara de niebla* es un instrumento que consiste en un entorno cerrado de gas saturado susceptible a condensación por las partículas cargadas que lo ionizan. Con esta se pueden identificar los distintos tipos de radiación proveniente de decaimientos de núcleos atómicos y partículas fundamentales creadas en interacciones de los rayos cósmicos con los gases atmosféricos.

Partiendo de esta idea se construyó una cámara de niebla basándonos en [10], donde se observaron e identificaron los tipos de radiación ionizante de una muestra radiactiva y de la radiación de fondo. Para la construcción se usaron materiales caseros: alcohol isopropílico al 99,6 % de concentración, hielo seco (CO_2) y, como muestra radiactiva, el electrodo de aleación de tungsteno-torio previo a la preparación descrita en la sección de muestra y preparación.

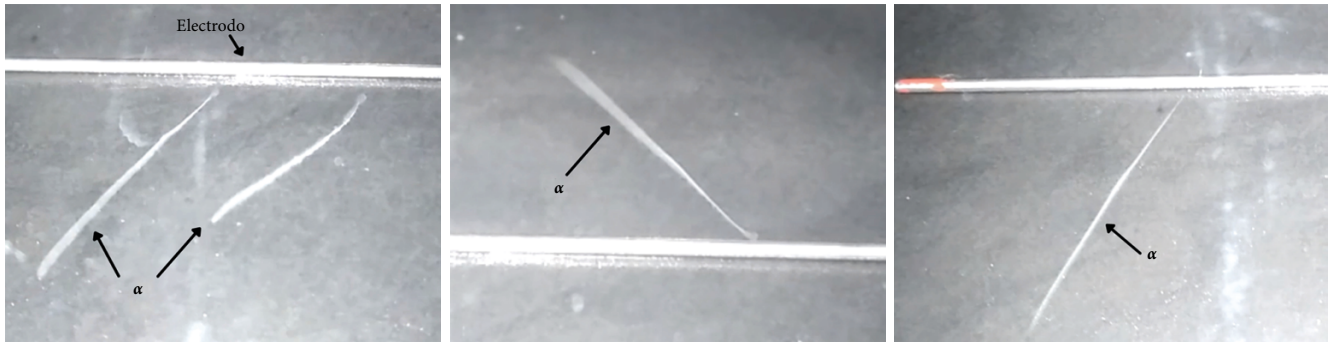


Figura 9. Decaimientos α de la muestra

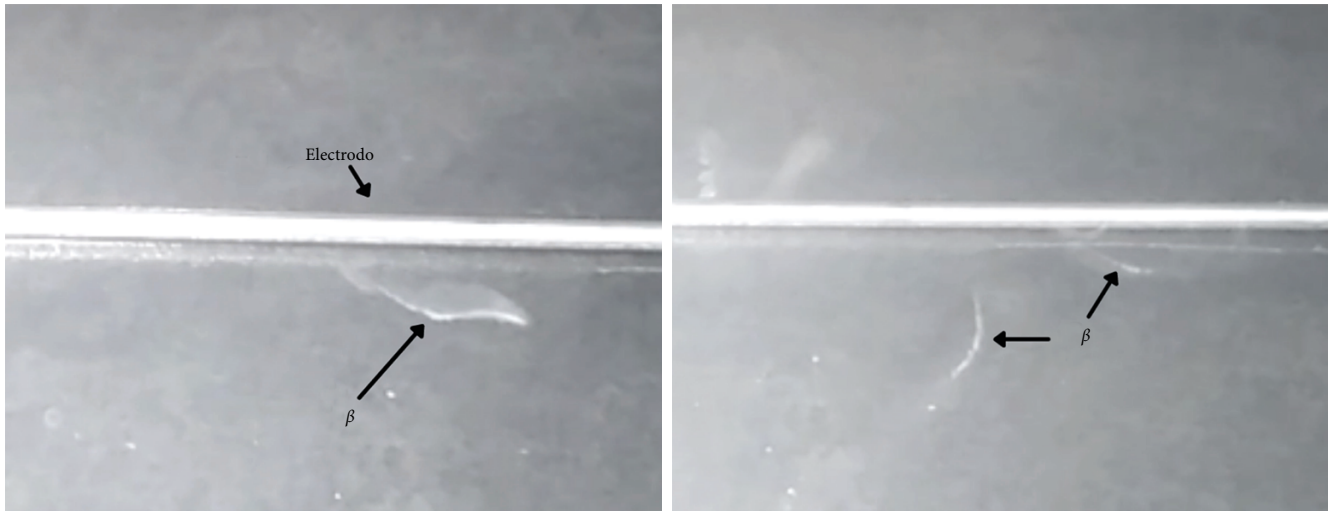


Figura 10. Decaimientos β de la muestra

Un recipiente de aluminio funcionó como estructura de la cámara sellada con celofán, el fieltro se localizó en las paredes de la lata y se utilizó como absorbente del alcohol. El hielo seco se ubicó debajo del recipiente para enfriar el alcohol que se evaporaba del fieltro y generaba una nube supersaturada de vapor en el interior de la cámara.

Cuando una partícula cargada y suficientemente energética interacciona con la nube de vapor, la ioniza. Los iones resultantes actúan como núcleos de condensación, formando gotas de alcohol que dan lugar a estelas, marcando así el camino de las partículas por un rastro de color blanco el cual permite identificar acorde a su forma que tipo de partícula atravesó la cámara. En esta se observaron las emisiones de partículas α que se visualizaban como estelas largas y rectas con un orden de centímetros de penetración en la niebla. La trayectoria de estas tuvo tal forma por su masa y energía relativamente alta. También se observaron unos posibles decaimientos β como estelas cortas y tortuosas (figuras 9 y 10).

El centelleador de yoduro de sodio (NaI) se calibró con 4 picos de fuentes de ^{133}Ba, ^{60}Co, y ^{137}Cs. La medida de la muestra se realizó en un intervalo de 30 minutos. El espectro γ se observa en la figura 11 con los isótopos correspondientes a los picos más intensos de acuerdo con la referencia [11].

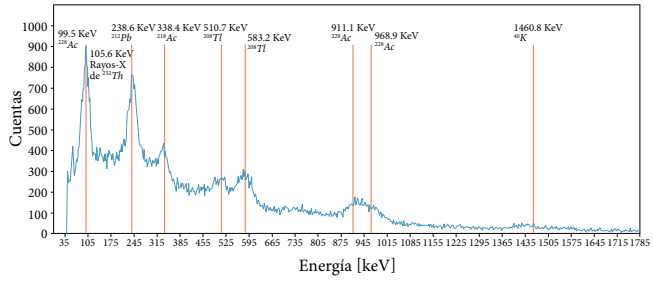


Figura 11. Espectro γ de la muestra con energías de mayor intensidad e isótopos correspondientes

3.2. Calibración del contador Geiger-Müller

El instrumento se garantiza calibrado por el fabricante en su proceso de manufactura. Sin embargo, usando la radiación de fondo es posible comparar con otros instrumentos en [12] donde se muestra un mapa de radiación de fondo en tiempo real. Este procedimiento sugiere un buen funcionamiento del detector.

3.3. Radiación de fondo

Al medir la actividad de una muestra en condiciones de un laboratorio común, la radiación de fondo interfiere en el proceso. El principal interés es la radiación natural del ambiente (la cual es de varios tipos provenientes de muchas fuentes [4]) y la de los materiales del propio instrumento. Esta es una contribución a la detección muy complicada de aislar por lo cual se optó por medidas independientes. El modelo GMC-600 posee varios modos de medida, los que se utilizaron en esta práctica fueron conteos por minuto (CPM) y de dosis equivalente en microsieverts por hora (µSv/h) que se podía computar para este instrumento particular con la expresión

$$X * \frac{\mu Sv}{h} = 0{,}0065 \frac{\mu Sv}{h * CPM} \, Y * CPM \qquad (3)$$

En donde X es la medida en $\frac{\mu Sv}{h}$ y Y la medida en CPM. La radiación reportada del propio instrumento es de <0,2 conteos por segundo, la cual se despreciará.

Para medir la radiación de fondo previamente a la radiación de una muestra usando un solo instrumento, es necesario que se hagan en la menor diferencia de tiempo posible y en el mismo lugar (o geográficamente aledaño dependiendo del caso). Esto, con el propósito de encontrar el valor de fondo evitando variaciones espaciales y temporales significativas [13], [14] que interfieren en el momento de la medición. Para el caso particular de esta práctica, se localizó el contador (*véase* figura 3) con la muestra ausente y aislada, de tal manera que no interfiriera en este proceso. Se realizaron 600 medidas durante 30 minutos en dos sesiones; una noche y una mañana con los respectivos valores de fondo medidos a 2σ de incertidumbre de $33{,}34 \pm 11{,}54$ CPM y $33{,}67 \pm 11{,}60$ CPM. Se observó que los valores medidos en un intervalo de cerca de 15 horas fueron equivalentes teniendo en cuenta la incertidumbre. El registro de estas medidas se muestra en la figura 12.

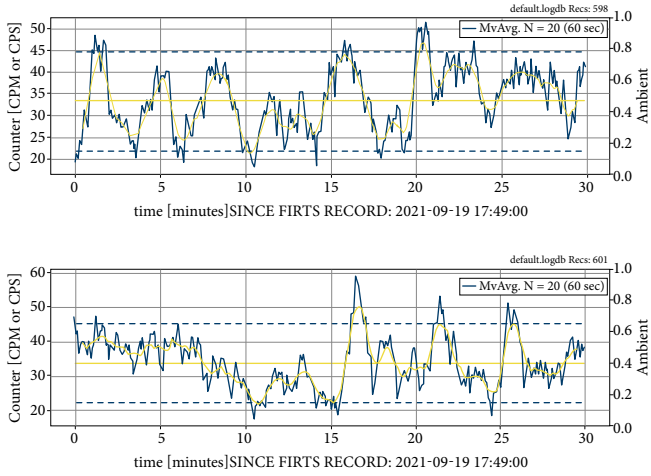


Figura 12. Medidas de la radiación de fondo en CPM de las dos sesiones. Herramienta *GeigerLog*

3.4. Actividad de la muestra en función de la distancia

Se localizó el contador como en la figura 3, con la muestra dispuesta de la manera descrita y se tomaron 600 medidas durante intervalos de 30 minutos para diferentes distancias de separación contador-fuente. Las medidas se realizaron en dos sesiones, por lo cual para los dos conjuntos de datos se utilizó la medida de radiación de fondo correspondiente. El tiempo entre medidas de la muestra no influye mucho debido a la larga vida media del torio que es de $1{,}41 \times 10^{10}$ años. Debido a que los tiempos de medida fueron iguales para el conteo de fondo A_F y el conteo neto muestra-fondo A_N, la actividad de la muestra A_M con 2σ de incertidumbre se reportó como en [3]:

$$A_M \pm 2\sigma_M = (A_M - A_F) \pm 2\sqrt{A_M + A_F} \qquad (4)$$

La ecuación 4 es independiente de las unidades usadas, en este caso aplica para CPM y μSv/h. Los datos obtenidos se pueden consultar libremente en [15]. Estos se resumen en las tablas 1 y 2, y en la figura 13. En esta última se observa que la actividad se ajusta mejor a una ley del inverso de la distancia que del inverso al cuadrado. Toda fuente isotrópica puntual de radiación, ya sea de partículas o radiación electromagnética, sigue la ley del inverso de la distancia al cuadrado en el vacío; discrepancia que se debe probablemente a la absorción de la radiación en el aire. Se tomaron medidas hasta una distancia en la que la detección en el contador era prácticamente la actividad de fondo; es decir, las partículas

Tabla 1. Radiación de la muestra en CPM en función de la distancia

Sesión	Distancia[cm]	A_N [CPM]	σ_N [CPM]	Fondo [CPM]	A_M [CPM]	σ_M [CPM]
1	0,0	372,65	38,61	33,34	339,31	40,30
1	0,9	233,46	30,56	33,34	200,12	32,67
1	1,9	152,50	24,70	33,34	119,16	27,26
1	3,0	98,90	19,90	33,34	65,56	23,00
1	4,1	75,73	17,40	33,34	42,39	20,89
1	5,5	58,72	15,33	33,34	25,38	19,19
1	6,4	50,78	14,25	33,34	17,44	18,34
1	7,5	49,22	14,03	33,34	15,88	18,17
1	8,5	44,86	13,40	33,34	11,52	17,69
2	10,5	42,15	12,98	33,67	8,48	17,41
2	12,4	40,10	12,66	33,67	6,43	17,18
2	14,3	34,59	11,76	33,67	0,92	16,52
2	15,5	34,48	11,74	33,67	0,81	16,51

emitidas eran absorbidas en su totalidad por cierta longitud de capa de aire.

3.5. Rango de la radiación y estimación de decaimientos totales

El rango es la distancia máxima desde la fuente a la que se detecta su actividad radiactiva. Se han desarrollado funciones simples a partir de la teoría de dispersión de partículas cargadas que describen el rango de estas en un medio particular como función de su energía. Claramente existe una dependencia del tipo de radiación también. Para partículas α en aire se tiene [16]:

$$R_\alpha[cm] = \begin{cases} 0{,}56\, E_\alpha & E_\alpha < 4\ MeV \\ 1{,}24\, E_\alpha - 2{,}62 & E_\alpha > 4\ MeV \end{cases} \quad (5)$$

Para partículas β en aire se tiene [17]:

$$R_\beta[cm] = \begin{cases} 0{,}412\, E_\beta^{\,1{,}265 - 0{,}0954 \ln(E_\beta)/\rho} & E_\alpha < 4\ MeV \\ 1{,}24\, E_\alpha - 2{,}62 & E_\alpha > 4\ MeV \end{cases} \quad (6)$$

en donde se consideró el valor de la densidad del aire $\rho = 1{,}293 \times 10^{-3}$ g/cm^3. Los rangos de rayos γ en aire son de órdenes mucho mayores que los característicos del montaje, pero debido a la poca actividad γ de la muestra, no se consideran en este análisis. Los rangos de los decaimientos con las energías de la cadena se exponen en las figuras 14 y 15. De la sección anterior se observa que el rango es de aproximadamente ≈16 cm. Los decaimientos α de los primeros isótopos de la cadena solo contribuyen a la actividad en los primeros 5 cm. De 0 a 16 cm contribuye la actividad β que es más penetrante, pero de caminos mucho más tortuosos debido a la poca masa de los electrones [3]. En particular se muestra que la actividad de los decaimientos del ^{228}Ac es la contribución más significativa en los últimos 5 cm de actividad detectable. Debido a que el rango medido es mucho menor que lo predicho por los isótopos más avanzados de la cadena, se puede afirmar que la muestra posee mayor cantidad de los primeros isótopos los cuales aportan mayoritariamente a la actividad total.

La unidad de medida decaimientos por minuto (DPM) hace referencia a los decaimientos de la muestra calculados, no necesariamente detectados. Dado que hubo indeterminaciones de Ω para la distancia igual a cero, este valor se aproximó directamente a 2π sr. El valor de ε_{intr} se tomó como 1, debido a que la mayoría del espectro energético de la muestra se encontraba por encima de los niveles detectables. Hay que tener en cuenta que esto es una simplificación adecuada, dada la poca actividad γ y las energías de los rayos α y β, con la excepción de los decaimientos β del ^{228}Ra los cuales fueron significativos. Con los análisis presentados, se puede hacer más énfasis en la eficiencia geométrica que la intrínseca, pues el contador Geiger-Müller usado cubrió la mayoría del espectro energético significativo en la muestra. Dicho esto, se estimaron los decaimientos totales como el producto entre la medida de la actividad a 0 cm multiplicado por 2, de acuerdo con la sección de montaje y procedimiento, resultando en 678,62 ± 80,6 DPM.

Tabla 2. Radiación de la muestra en μSv/h en función de la distancia

Sesión	Distancia[cm]	A_N [μSv/h]	σ_N [μSv/h]	Fondo [μSv/h]	A_M [μSv/h]	σ_M [μSv/h]
1	0,0	2,42	0,25	0,22	2,21	0,26
1	0,9	1,52	0,20	0,22	1,30	0,21
1	1,9	0,99	0,16	0,22	0,77	0,18
1	3,0	0,64	0,13	0,22	0,43	0,15
1	4,1	0,49	0,11	0,22	0,28	0,14
1	5,5	0,38	0,10	0,22	0,16	0,12
1	6,4	0,33	0,09	0,22	0,11	0,12
1	7,5	0,32	0,09	0,22	0,10	0,12
1	8,5	0,29	0,09	0,22	0,07	0,11
2	10,5	0,27	0,08	0,22	0,06	0,11
2	12,4	0,26	0,08	0,22	0,04	0,11
2	14,3	0,22	0,08	0,22	0,01	0,11
2	15,5	0,22	0,08	0,22	0,01	0,11

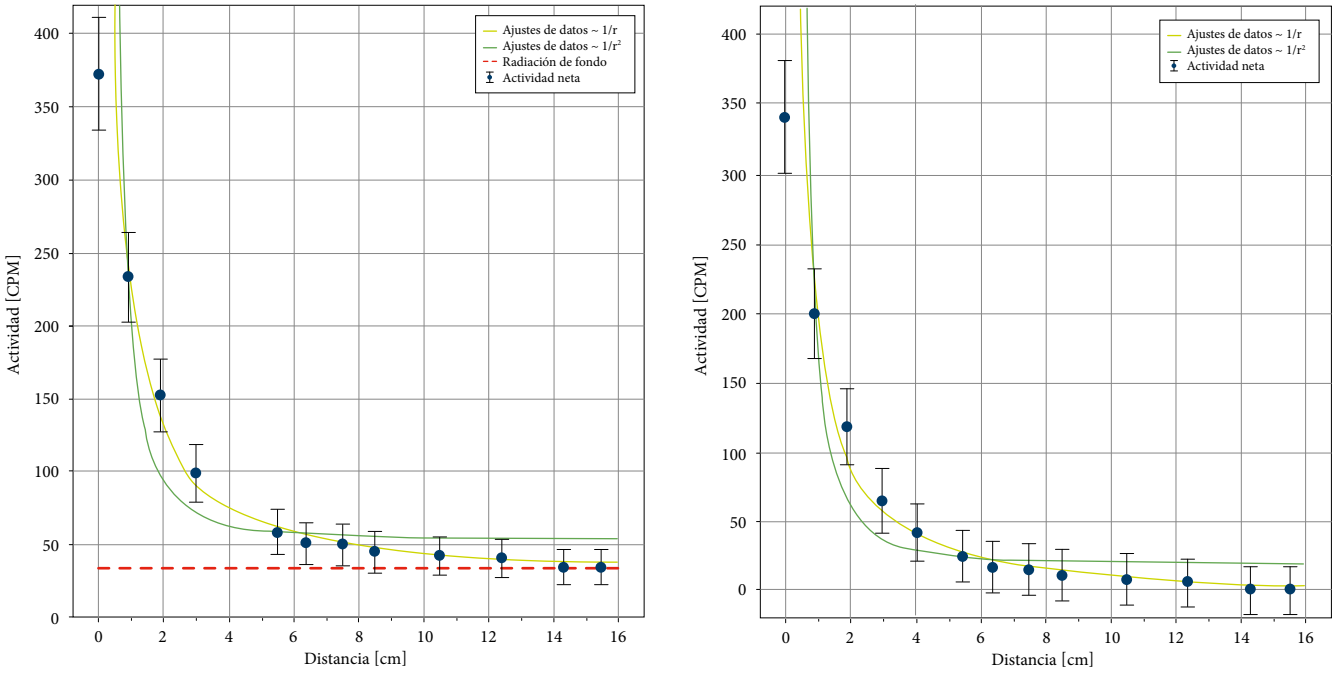


Figura 13. a) Actividad neta en CPM en función de la distancia y ajuste; b) actividad de la muestra en función de la distancia y ajuste. Herramienta *Matplotlib*

3.6. Manipulación y seguridad

Una observación para la cual no se reportan medidas consiste en la contaminación provocada por la muestra. Esta fue almacenada en contenedores plásticos que a su vez se ubicaban dentro de un contenedor de plomo para aislar completamente la radiación. No se encontró actividad en los contenedores ni en ningún material utilizado, lo que indicó que los átomos radiactivos estaban confinados en la aleación de tungsteno y no dejaban contaminación en lo que entraba en contacto con esta.

Respecto a la seguridad, la International Atomic Energy Agency (IAEA), en la guía *Application of the concepts of exclusion, exemption and clearance* [18], estipula que artículos con radionucleidos de origen natural diferente al potasio, como es el caso de la muestra estudiada, de actividad específica menor a 1 Bq/g generalmente son exentos de regulación, por lo que pueden ser comercializados libremente sin representar ningún riesgo para la salud, según los artículos 4.2, 4.3 y 5.1-5.4 en [18]. Con lo estudiado, el número estimado de decaimientos de la muestra (con el detector localizado justo sobre esta, es decir, la medida a 0 cm) fue de $678{,}62 \pm 80{,}60$ DPM, lo que corresponde a $11{,}31 \pm 1{,}34$ Bq para los 14 ± 1 g de la muestra. En actividad específica, esto fue $0{,}81 \pm 0{,}09$ Bq/g. La muestra tuvo una concentración menor del valor considerado como influyente en la salud. Por tanto, estos electrodos son fuentes débiles de radiactividad y no requieren regulación. En caso de superarse este

valor, se procede a una restricción gradual según los artículos 5.1-5.4 de [18]. Sin embargo, este resultado aplica solamente para exposición externa; para exposición interna, como son los procesos de soldadura –esto es, inhalación o ingestión de material radiactivo–, el análisis es más delicado. Se dejan para revisión las citas [19], [20] y [21] en las cuales se analizan las técnicas en que se hace uso de estos electrodos y se realizan bajo condiciones controladas para la obtención de medidas de la actividad radiactiva del aire en el lugar del proceso. También se analizan riesgos, normativas y se sugieren buenas prácticas para la manipulación de estos elementos.

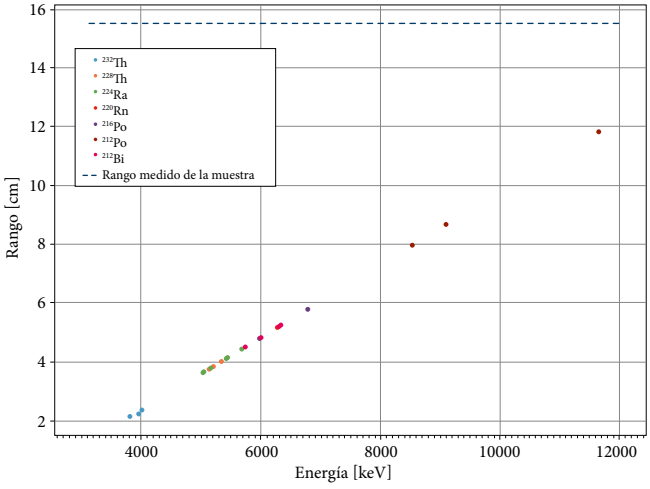


Figura 14. Rango de los decaimientos α. Herramienta *Matplotlib*

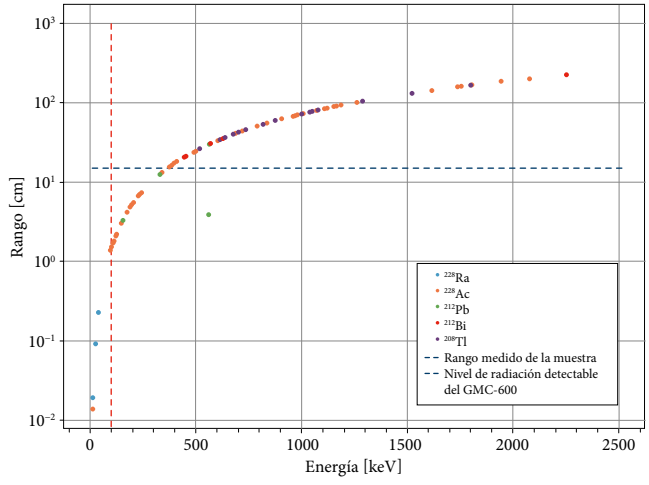


Figura 15. Rango de los decaimientos β con energías más probables. Herramienta *Matplotlib*



Figura 16. Almacenamiento de las muestras

4. Conclusiones

Se lograron los objetivos principales de determinación del rango de la muestra en aire con un valor aproximado de 16 cm, los decaimientos por minuto como 678 DPM y se resolvió que la muestra era menos activa como para causar efectos en la salud. En esta práctica se realizaron 9000 medidas en un montaje que consideró principalmente los efectos de la radiación de fondo y la geometría de su configuración, por lo que se descartaron efectos poco significativos como la radiación proveniente del instrumento, el *backscattering* de las partículas al llegar al detector, la autoabsorción de la muestra, entre otros.

Se propuso un procedimiento experimental y preparación de la muestra, de manera que pueda ser generalizado a otros instrumentos en prácticas similares. Esta fue caracterizada usando las bases de estructura y decaimientos nucleares, y se encontró principalmente actividad α y β en los rangos de 3-12 MeV y 0,001-2,3 MeV, respectivamente. Los alcances de los decaimientos α son de 2-12 cm y para los β de 0,01-900 cm. La muestra presentó actividad γ de baja intensidad con energías entre 0,01-4 MeV. La suposición de que solo los primeros isótopos de la cadena del ^{232}Th están presentes en cantidades significativas se refleja en que el alcance medido no superó los 16 cm aproximadamente.

Con el instrumento usado, se determinó la radiación de fondo en el lugar y momento de la práctica con un valor aproximado de 33 CMP. Mediante el ajuste de las medidas, se encontró que la emisión de esta muestra en particular se ajustaba a una ley 1/r, no $1/r^2$, como era de esperarse para fuentes emisoras puntuales de energía electromagnética y partículas en el vacío. Tal particularidad es probablemente debida a la atenuación de la radiación en el aire. Una caracterización más detallada sería la obtención del espectro γ mediante la cual se obtendría información de las concentraciones de cada isótopo y los decaimientos más significativos de este tipo.

5. Agradecimientos

El presente trabajo fue revisado por el docente José Patricio Valencia Valencia de la Universidad de Antioquia, de quien recibimos consejo y fue quien nos introdujo en el área de la física nuclear años atrás. Agradecemos a él, al Instituto de Física y a su cuerpo docente de quienes hemos aprendido todo lo relacionado a esta área. Agradecemos a la profesora Gloria María Díaz Londoño de la Universidad Nacional sede Medellín por su amabilidad y generosa colaboración en facilitarnos algunos de los instrumentos para esta práctica. Finalmente, pero no menos importante, agradecemos y dedicamos este trabajo a nuestras familias por su apoyo en nuestras carrearas.

Referencias

[1] G. Watts (2015, jul. 13). "Is your fear of radiation irrational?". [En línea]. Disponible en https://mosaicscience.com/story/your-fear-radiation-irrational/

[2] D. Ropeik (2017, jul. 5). "Fear of radiation is more dangerous than radiation itself". [En línea]. Disponible en https://aeon.co/ideas/fear-of-radiation-is-more-dangerous-than-radiation-itself

[3] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, Nueva York: John Wiley & Sons Inc., 2010.

[4] L. Cerrito, *Radiation and detectors: An introduction to the physics of radiation and detection devices*. Cham: Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53181-6

[5] *GQ GMC-600/GMC-600+ Geiger Counter User Guide*, GQ Electronics, Seattle, 2021. Disponible en https://www.gqelectronicsllc.com/GMC-600UserGuide.pdf.

[6] Ullix (2021 jul. 21). "GeigerLog: Python program for Geiger counters and Environmental Sensors". [En línea]. Disponible en https://sourceforge.net/projects/geigerlog/.

[7] Korea Atomic Energy Research Institute, "Table of Nuclides". [En línea]. Disponible en http://atom.kaeri.re.kr/nuchart/.

[8] National Nuclear Data Center [NNDC], "Evaluated Nuclear Structure Data File". [En línea]. Disponible en https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/

[9] S. G. Prussin, Nuclear Physics for applications, 1.ª ed, Weinheim: Wiley-VCH, 2007.

[10] *Cloud Chamber. Do-it-yourself manual* (Versión 7). [En línea]. S'Cool LAB. Disponible en https://scoollab.web.cern.ch/sites/default/files/documents/20200521_JW_DIYManual_CloudChamber_v7.pdf

[11] S. Sadasivan y V. M. Raghunath, "Intensities of gamma rays in the ^{232}Th decay chain", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. 196, n.° 2-3, pp. 561-563, 1981. https://doi.org/10.1016/0029-554X(82)90153-7

[12] GQ Electronics. "Real-Time Radiation World Map". [En línea]. Disponible en https://www.gmcmap.com/.

[13] S. Okabe, T. Nishikawa, M. Aoki *et al.*, "Looping variation observed in environmental gamma ray measurement due to atmospheric radon daughters", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 255, n.° 1-2, pp. 371-373, 1987. https://doi.org/10.1016/0168-9002(87)91132-6

[14] P. E. Keller y R. T. Kouzes, "Influence of extraterrestrial radiation on radiation portal monitor", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 56, n.° 3, pp. 1575-1583, 2009. https://doi.org/10.1109/TNS.2009.2019618

[15] A. Restrepo (2021, sep. 20). *Geiger Counter Project Measurements*. [En línea]. Disponible en https://drive.google.com/drive/folders/1dgHZWEi0MlC_Xkkd_Xud3W3fpmtiLN5O?usp=sharing

[16] W. H. Bragg y R. Kleeman, "On the α particles of radium, and their loss of range in passing through various atoms and molecules", *Philosophical Magazine Series*, vol. 10, n.° 58, pp. 318-340, 1905. https://doi.org/10.1080/14786440509463378

[17] L. Katz y A. S. Penzolo, "Range-energy relations for electrons and the determination of beta-ray end-point energies by absorption", *Reviews of Modern Physics*, vol. 24, n.° 1, pp. 28-44, 1952. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.24.28

[18] *Application of the concepts of exclusion, exemption and clearance*, International Atomic Energy Agency [IAEA], 2004.

[19] P. Carton, C. Dogan, J. Fortune *et al.*, "Thoriated tungsten welding electrodes - Radiation protection practical fact sheet", INIS-FR--19-0249, 2017.

[20] E. Stranden, "Doses from the use of welding electrodes alloyed with thorium oxide", SIS--1980:8, 1980.

[21] T. Ludwig, G. Seitz y K. E. Duftschmid, "Thorium exposure during welding and grinding with thoriated tungsten electrodes", *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 103, n.° 4, pp. 349-357, 2003. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006152