



Universidad
Zaragoza

Atenuación de la radiación gamma con blindajes de plomo y cobre

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

Autor:

Iván Coarasa Casas

Director:

Dr. Jorge Mario Puimedón Santolaria

Junio de 2015

Área de Física Atómica, Molecular y Nuclear
Departamento de Física Teórica
Facultad de Ciencias
Universidad de Zaragoza

RESUMEN

Los experimentos dedicados a sucesos poco probables, como la búsqueda de materia oscura o la doble desintegración beta, precisan de blindajes que protejan los detectores de la radiación gamma emitida por la radiactividad del entorno. Los materiales más utilizados son el plomo y el cobre.

Las medidas llevadas a cabo en este Trabajo Fin de Grado consisten en la comparación de un blindaje de plomo de 25 cm de espesor que rodea un detector de germanio hiperpuro, situado en el laboratorio subterráneo de Canfranc, con otro exactamente igual, pero sustituyendo los 10 cm internos del blindaje por cobre.

Hemos observado que los ladrillos de cobre constituyentes del blindaje han sido activados por los neutrones procedentes de los rayos cósmicos desde su fabricación hasta su llegada al laboratorio, produciendo el radioisótopo ^{58}Co ($T_{1/2} = 70.83$ días). Hemos estimado el tiempo de exposición en 66 ± 10 días a nivel del mar, y han sido suficientes unos 100 días tras la llegada del cobre al laboratorio para alcanzar la situación de fondo constante.

Las principales conclusiones obtenidas son: entre 20 y 100 keV es mejor el blindaje de cobre, pues en el de plomo aparecen los rayos X característicos del plomo, elevando el nivel de radiación. Entre 100 keV y 3.0 MeV el ritmo es mayor con el blindaje de cobre que con el de plomo por la presencia del ^{58}Co y la acumulación de ^{222}Rn ; pero, tras la desintegración del ^{58}Co y, utilizando ventilación forzada para reducir los niveles de ^{222}Rn , el ritmo con el blindaje de cobre es menor que con el de plomo. Entre 3.0 y 5.4 MeV el plomo produce más radiación de bremsstrahlung al tener un número atómico mayor, llegando a generar un nivel de radiación casi tres veces mayor que en el blindaje de cobre.

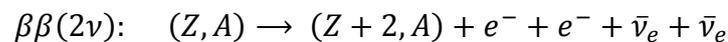
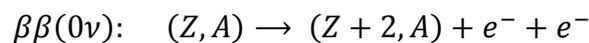
Índice general

1. Introducción.....	7
2. Dispositivo experimental.....	9
2.1. Calibración	10
3. Blindaje de plomo.....	13
3.1. Calibración	13
3.2. Elección de datos	14
4. Blindaje de cobre.....	19
4.1. Calibración	19
4.2. Elección de datos	21
4.3. Evolución temporal del pico de ^{58}Co	24
4.4. Análisis del pico compuesto de ^{56}Co y ^{214}Bi	27
5. Comparación de los blindajes de plomo y cobre.....	29
5.1. Alta, media y baja energía.....	30
5.2. Radiación primordial	33
5.3. Ventilación forzada del blindaje de cobre	39
6. Conclusiones.....	44
Bibliografía.....	46
Anexos	
Anexo A. Radiactividad natural	
Anexo B. Cota superior	
Anexo C. Activación neutrónica	

1. Introducción

El modelo estándar explica satisfactoriamente el comportamiento de las partículas, pero ya se vislumbran las primeras señales de una nueva física más allá. Entre ellas destacaremos la masa de los neutrinos y la materia oscura del universo.

- **La masa de los neutrinos.** Las observaciones de oscilaciones de neutrinos permiten medir sólo diferencias entre las masas de los neutrinos^[1]. Una de las formas de medir su escala de masas es la búsqueda de la desintegración $\beta\beta$ sin neutrinos, $\beta\beta(0\nu)$. No se ha observado todavía y establece un límite superior para la masa efectiva de los neutrinos^[2,3]. La observación de este fenómeno implicaría además que el neutrino es su propia antipartícula (partícula de Majorana). Lo que sí se ha observado es la doble desintegración beta con emisión de dos neutrinos, $\beta\beta(2\nu)$, que pueden distinguirse porque en este último caso el espectro de la energía total de los dos electrones es continuo (pues participan cuatro partículas) y en el $\beta\beta(0\nu)$ es un valor único (correspondiente a la diferencia de masas de los átomos inicial y final)^[4].



- **La materia oscura.** La sustancial evidencia observacional de que un 80% de la masa del Universo puede ser invisible, ha provocado una intensa búsqueda de candidatos a materia oscura^[5]. Uno de ellos son las WIMPs (partículas neutras débilmente interactuantes). Éstas podrían ser identificadas por su dispersión elástica con los núcleos, utilizando detectores sensibles a retrocesos nucleares de unos pocos keV^[2].

Los experimentos dedicados a sucesos muy poco probables, como la búsqueda de materia oscura o la doble desintegración beta^[2,4], precisan blindajes que protejan los detectores de la radiación gamma emitida por la radiactividad del entorno, tanto de origen natural como artificial. Los materiales más utilizados son el plomo y el cobre.

Las ventajas que presenta el plomo son: alta densidad $\rho = 11.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, coste razonable y baja sección eficaz de captura de neutrones. El principal inconveniente es que puede contener ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22.3$ años), cuyo hijo ^{210}Bi ($T_{1/2} = 5.01$ días), produce radiación de bremsstrahlung y rayos X característicos del plomo; lo que obliga a utilizar plomo de varios siglos de antigüedad.

El cobre ($\rho = 8.96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) no tiene isótopos radiactivos de larga vida media y puede conseguirse de alta pureza y libre de radiactividad natural. Su mayor inconveniente es que puede activarse al capturar neutrones rápidos producidos por los rayos cósmicos.

Cuando los rayos cósmicos primarios (90% protones, 9% partículas α y 1% núcleos pesados) atraviesan la atmósfera, generan radiación cósmica secundaria que a nivel del mar está compuesta de muones, neutrones, protones, electrones, positrones, piones y fotones; que constituyen un fondo inevitable para los experimentos realizados en la superficie terrestre. Se utilizan los laboratorios subterráneos para protegerse de los rayos cósmicos, pues tras unos pocos metros de roca sólo sobreviven muones y neutrones. La intensidad de los muones se reduce fuertemente con la profundidad, mientras que los neutrones alcanzan un flujo independiente de la profundidad debido a que son producidos por la fisión espontánea del ^{238}U y en reacciones (α, n) inducidas en la roca por los emisores α de las cadenas radiactivas naturales^[2].

El laboratorio subterráneo de Canfranc, LSC, es una instalación científica singular española (ICTS) situado en Canfranc-Estación (Huesca). Sus galerías están excavadas en la roca a 860 metros de profundidad, debajo del monte Tobazo de los Pirineos Aragoneses. La composición de la roca es principalmente carbonato de calcio con una densidad promedio de $2.85 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$, lo que sitúa a las distintas salas de experimentación a una profundidad de 2450 metros equivalentes de agua^a (m.w.e.)^[6]. A su vez, el flujo de muones en el laboratorio es de unos $25000 \mu \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ ^[7].

Las medidas llevadas a cabo en este Trabajo Fin de Grado consisten en la comparación de un blindaje de plomo de 25 cm de espesor que rodea un detector de germanio hiperpuro (HPGe), situado en el laboratorio subterráneo de Canfranc, con otro exactamente igual, pero sustituyendo los 10 cm internos del blindaje por cobre. El objetivo del experimento es averiguar cuál de las dos configuraciones actúa mejor a modo de blindaje, reduciendo el fondo de radiación natural (y/o artificial).

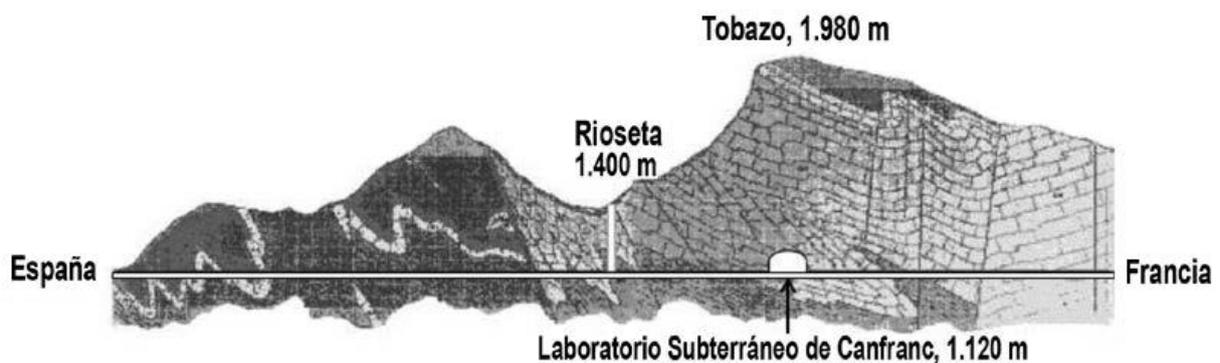


Figura 1.1. Situación del Laboratorio Subterráneo de Canfranc^[6].

^a El metro equivalente de agua es una medida estándar en la atenuación de los rayos cósmicos en laboratorios subterráneos. Un laboratorio a una profundidad de 1000 m.w.e. está blindado de los rayos cósmicos igual que un laboratorio bajo 1000 m de agua.

2. Dispositivo experimental

La Figura 2.1 muestra un esquema del blindaje utilizado en el experimento: un blindaje externo de plomo de 15 cm de espesor y un blindaje interno de plomo en primer lugar y de cobre en segundo de 10 cm de espesor. A la izquierda se encuentra la sección transversal (cuadrada) y a la derecha la sección longitudinal. El detector de germanio hiperpuro es de 1 kg, con 41% de eficiencia relativa^b [8]. Está polarizado en inversa^c a 4800 V y enfriado^d mediante nitrógeno líquido^[9]. A su vez, el nitrógeno evaporado recorre un tubo de teflón que va desde el dewar hasta el hueco interno del blindaje donde se encuentra el detector para evitar la acumulación de ²²²Rn^e.

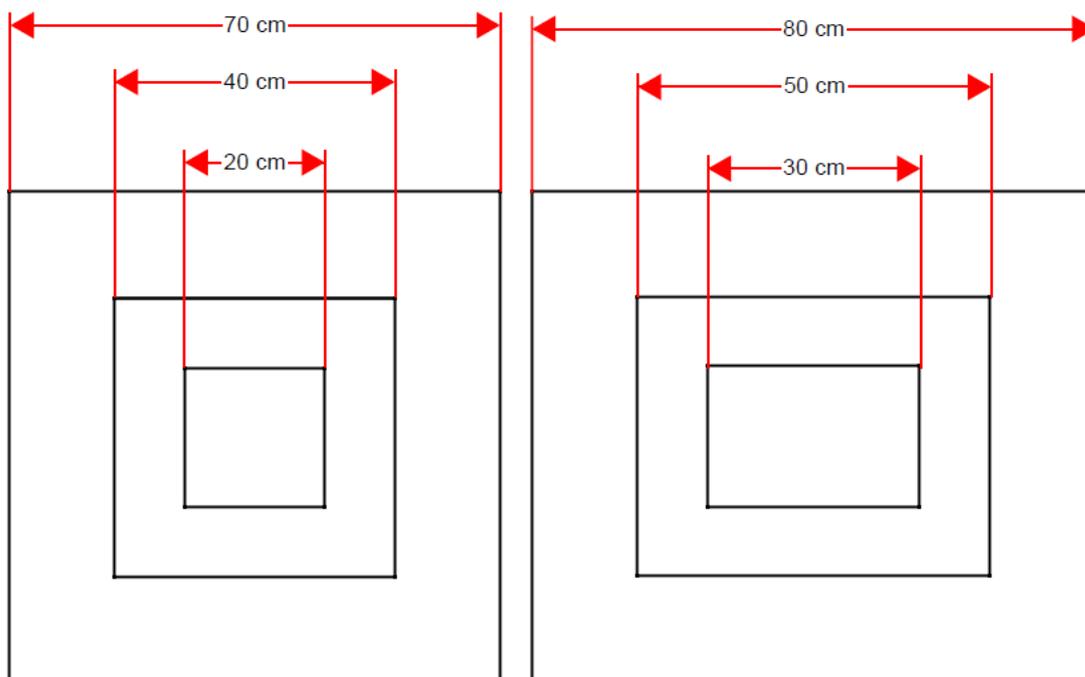


Figura 2.1. Esquema del blindaje: sección transversal cuadrada (a la izquierda) y sección longitudinal (a la derecha).

^b Eficiencia relativa a la señal medida a 1.33 MeV por un detector de centelleo de NaI(Tl) de 3'' x 3'' a 25 cm de una fuente de ⁶⁰Co.

^c La polarización inversa hace que se incremente la anchura de la zona de transición de la unión p-n, aumentando el volumen en el que se recogerán los portadores de carga producidos por la radiación.

^d Enfriando se disminuye la probabilidad de que un electrón de la banda de valencia adquiera la energía suficiente para saltar a la banda de conducción. Reduciendo así el ruido electrónico debido a las excitaciones térmicas de los electrones de la banda de valencia.

^e El ²²²Rn es un gas radiactivo hijo del ²²⁶Ra que puede filtrarse por los huecos que quedan entre los ladrillos de plomo y/o cobre que conforman el blindaje.

La Figura 2.2 es un esquema de los módulos electrónicos para la adquisición de datos: desde el detector HPGe hasta el ordenador donde se almacena la fecha del suceso y el canal del convertidor analógico digital (CAD) de 8192 canales, que es proporcional a la energía depositada por la partícula incidente.

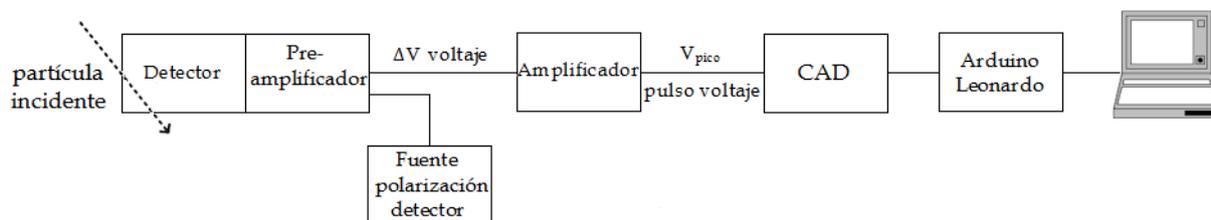


Figura 2.2. Sistema de adquisición de datos.

Los datos se recogen en bloques que contienen 226 sucesos cada uno. Normalmente la adquisición sólo se interrumpe para el rellenado de nitrógeno líquido, 1 vez a la semana aproximadamente. Los bloques de adquisición ininterrumpida los denominamos paquetes de datos.

La Tabla 2.1 resume los periodos de tiempo de las tres tomas de medidas que se han realizado. Como veremos más adelante, será necesario utilizar una ventilación forzada con el blindaje de cobre para evitar la acumulación de ^{222}Rn .

Blindaje interno	Fecha inicio	Fecha final	Tiempo efectivo (días)
Plomo	02/04/2014	28/06/2014	69.51
Cobre	09/07/2014	22/10/2014	92.35
Cobre (ventilación forzada)	22/10/2014	19/11/2014	26.62

Tabla 2.1. Duración de los tres experimentos.

2.1. Calibración

Utilizaremos ^{22}Na como fuente de calibración para encontrar la relación energía/canal del CAD. La fuente se lleva por un tubo de teflón junto al detector HPGe y se realizan dos calibraciones de 10 minutos, una antes y otra después del rellenado de nitrógeno líquido (Figura 2.3).

El ^{22}Na ($T_{1/2} = 2.6$ años) se desintegra β^+ el 90.2% de las veces y por captura electrónica el 9.7% al estado excitado del ^{22}Ne , que emite un fotón de 1274.5 keV^[10] (Figura 2.4). A su vez, los positrones liberados en la desintegración β^+ se aniquilan, una vez en reposo, con los electrones del medio produciendo dos fotones de 511 keV. Por tanto, utilizaremos estos dos picos gamma para calibrar: 511 keV y 1274.5 keV.

2. Dispositivo experimental

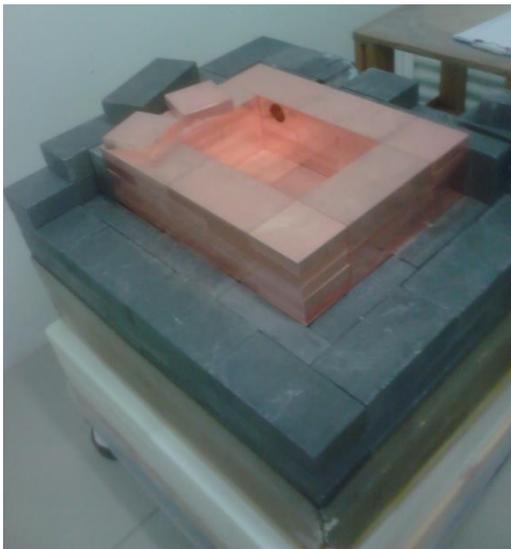


Figura 2.3. Rellenado de nitrógeno líquido (arriba a la izquierda), blindaje interno de plomo y detector de germanio (arriba a la derecha), blindaje interno de cobre (abajo a la izquierda) y dispositivo experimental completo (abajo a la derecha).

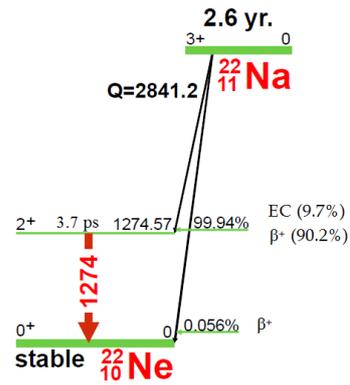


Figura 2.4. Esquema de desintegración del ^{22}Na [10].

La Figura 2.5 muestra un espectro típico de la calibración con ^{22}Na .

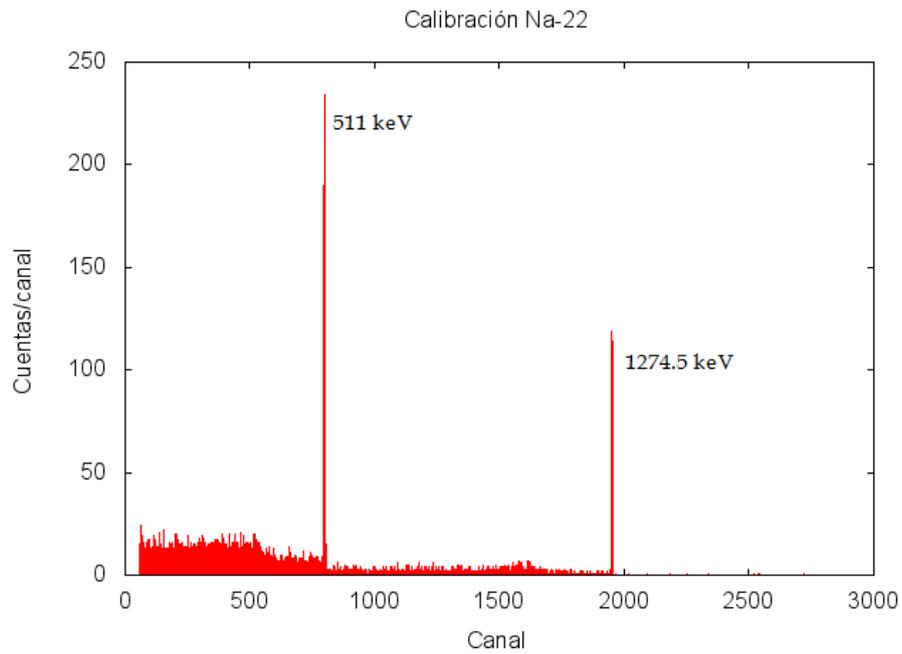


Figura 2.5. Espectro de calibración con ^{22}Na .

3. Blindaje de plomo

En primer lugar, utilizaremos un blindaje de plomo de 25 cm de espesor.

3.1. Calibración

Una vez comprobado que los picos de 511 y 1274.5 keV de las calibraciones anterior y posterior a cada paquete de datos apenas han variado su posición (dos canales en el peor caso), calculamos su valor promedio (Figuras 3.1 y 3.2). Las incertidumbres son menores que el tamaño del punto en ambas figuras.

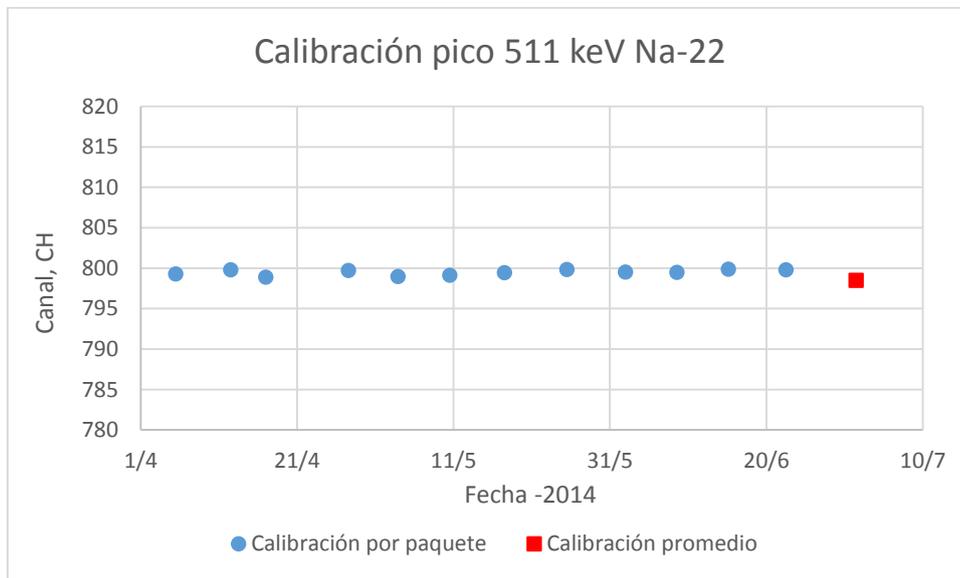


Figura 3.1. Calibración del pico de 511 keV con ^{22}Na .

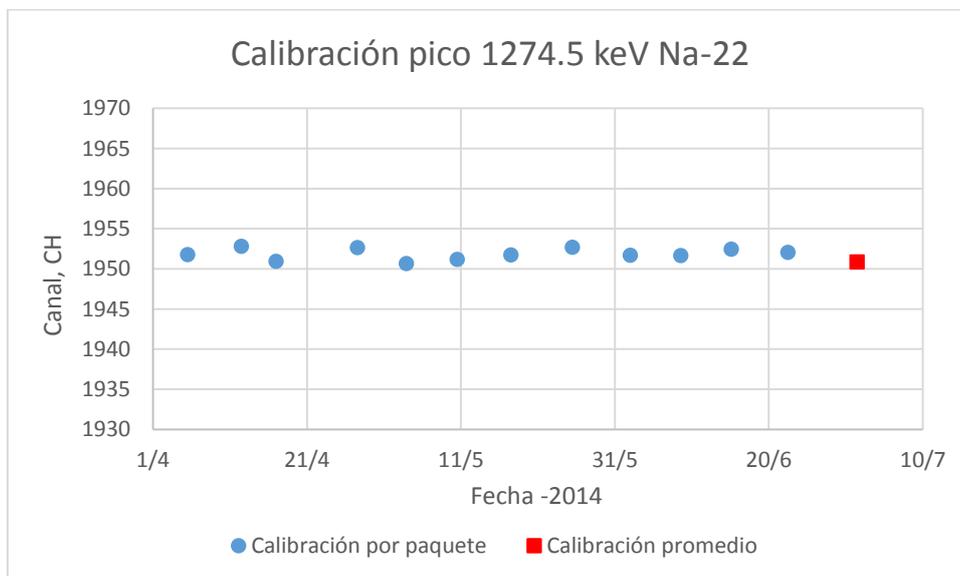


Figura 3.2. Calibración del pico de 1274.5 keV con ^{22}Na .

Los últimos puntos en cada Figura 3.1 y 3.2 son las posiciones promedio de 511 y 1274.5 keV, respectivamente, a lo largo de todo el experimento y son los que utilizamos para calcular la recta de calibración (Tabla 3.1).

Energía (keV)	Canal
511	798.47 ± 0.02
1274.5	1950.88 ± 0.03

Tabla 3.1. Recta de calibración.

$$E(\text{keV}) = (0.66253^{+0.00020}_{-0.00003}) \cdot CH - (18.00 \pm 0.07)$$

Podemos observar que las pequeñas variaciones del canal en ambos picos están correlacionadas (Figura 3.3), el incremento de la posición del pico de 1274.5 keV es el doble que la del pico de 511 keV, es decir, que ha cambiado la pendiente de calibración.

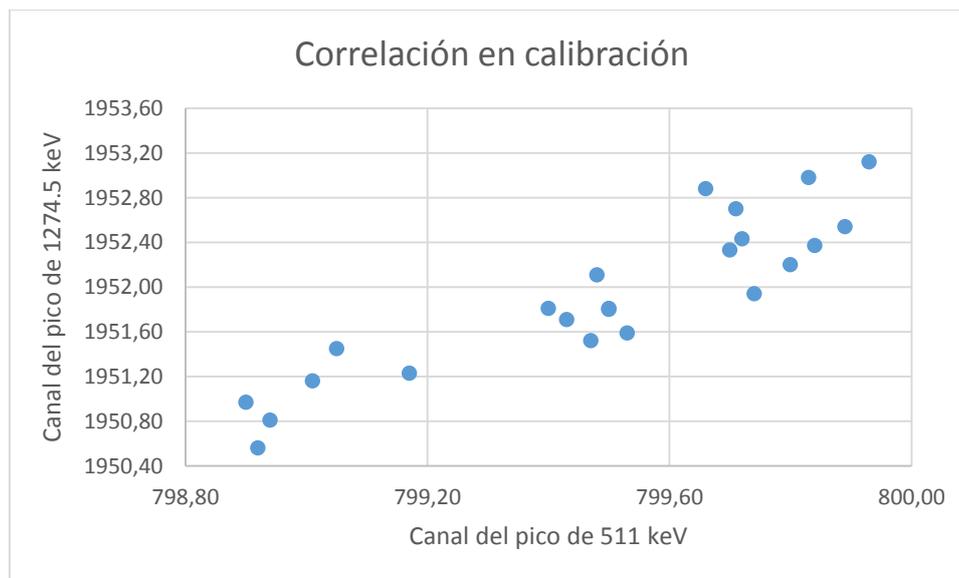


Figura 3.3. Correlación entre la calibración de los picos de 511 y 1274.5 keV con ^{22}Na .

3.2. Elección de datos

Disponemos de 12 paquetes de datos. El ritmo sufre variaciones no aleatorias debidas principalmente al ^{222}Rn que entra en el blindaje durante las calibraciones y, en algunas ocasiones, al ruido electrónico. Para excluir los ritmos anómalos entre los distintos bloques de un mismo paquete, realizamos un test χ^2 a una constante con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ (esto es, existe un 5% de probabilidad de rechazar la hipótesis de fondo constante siendo cierta).

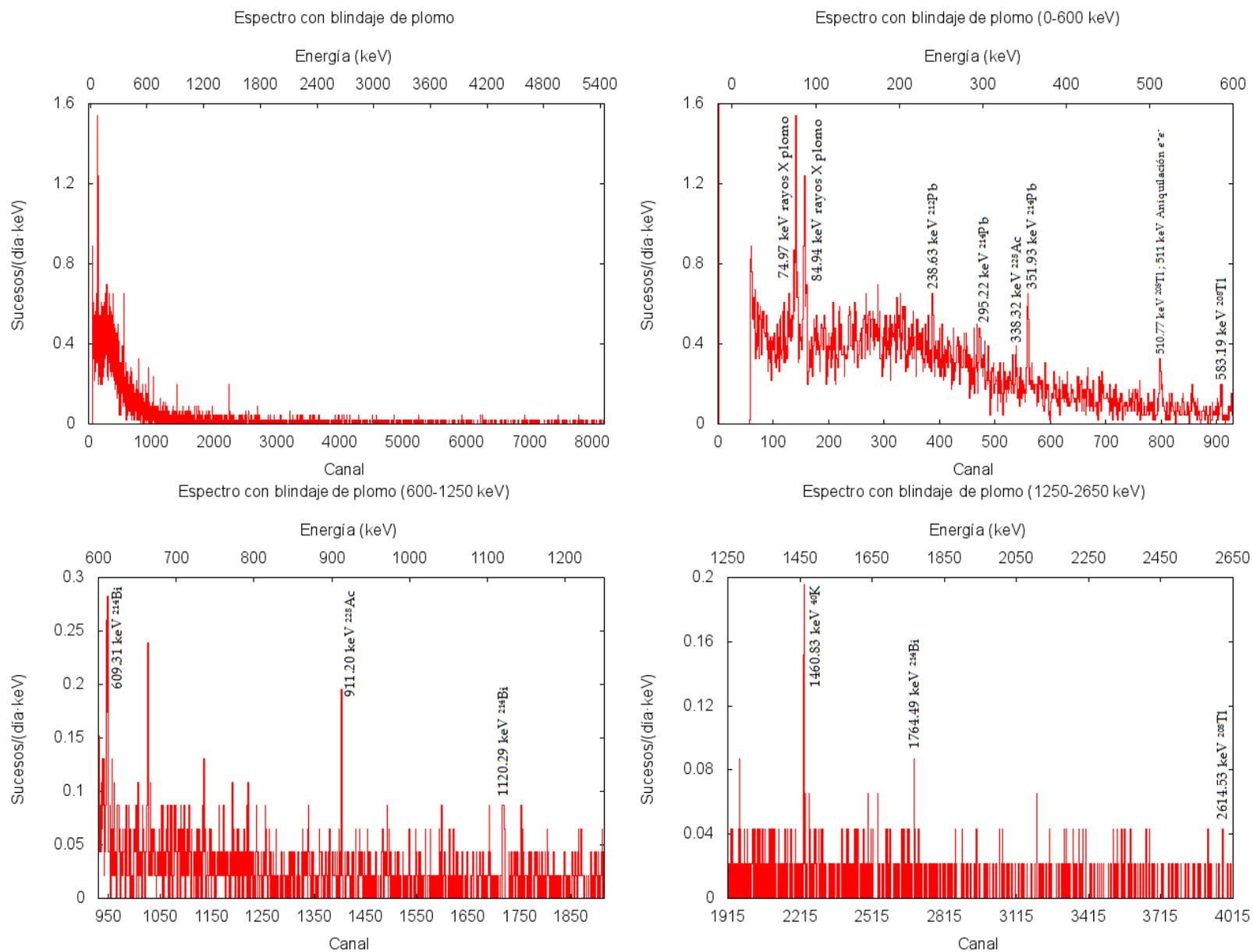


Figura 3.5. Espectro con blindaje de plomo.

3. Blindaje de plomo

En la Figura 3.5 se encuentran el espectro completo con el blindaje de plomo, y otros tres espectros que comprenden los rangos de energía 0-600 keV, 600-1250 keV y 1250-2650 keV para una mejor visualización, e incorporan la identificación de los picos de absorción total de la radiación gamma. No se ha ampliado la región 2650-5400 keV porque es un continuo sin picos.

A partir del espectro, calculamos las energías de los picos e identificamos de qué isótopo provienen (Tabla 3.3). También aparecen los rayos X del plomo^f ($K_{\alpha 1}$ y $K_{\beta 1}$).

Canal	Energía (keV)	Isótopo	Energía tabulada (keV)
140.33 ± 0.13	74.93 ± 0.09	Rayos X del plomo	74.97
155.33 ± 0.19	84.87 ± 0.13	Rayos X del plomo	84.94
387.17 ± 0.29	238.47 ± 0.19	²¹² Pb	238.63
472.73 ± 0.49	295.15 ± 0.32	²¹⁴ Pb	295.22
537.59 ± 0.44	338.12 ± 0.29	²²⁸ Ac	338.32
558.80 ± 0.20	352.18 ± 0.13	²¹⁴ Pb	351.93
799.07 ± 0.42	511.36 ± 0.28	²⁰⁸ Tl ; Aniquilación e^+e^-	510.77 ; 511.00
907.50 ± 0.43	583.20 ± 0.28	²⁰⁸ Tl	583.19
946.58 ± 0.36	609.09 ± 0.24	²¹⁴ Bi	609.31
1402.91 ± 0.20	911.42 ± 0.13	²²⁸ Ac	911.20
1718.40 ± 0.41	1120.44 ± 0.27	²¹⁴ Bi	1120.29
2231.59 ± 0.44	1460.44 ± 0.29	⁴⁰ K	1460.83
2689.62 ± 0.70	1763.90 ± 0.46	²¹⁴ Bi	1764.49
3972.00 ± 0.99	2613.51 ± 0.66	²⁰⁸ Tl	2614.53

Tabla 3.3. Identificación de picos gamma con blindaje de plomo.

^f Los rayos X observados se producen cuando los fotones absorbidos por efecto fotoeléctrico en el plomo del blindaje interno más cercano al detector arrancan electrones de su capa K, dejando una vacante que es llenada por electrones de las capas L o M emitiendo un fotón de 74.97 keV ($K_{\alpha 1}$) u 84.94 keV ($K_{\beta 1}$), respectivamente.

En la Tabla 3.4 están las energías, los ritmos (cuentas/día) y los isótopos identificados.

Cadena radiactiva	Isótopo	Energía (keV)	Cuentas/día
^{232}Th Cadena $4n$	^{212}Pb	238.63	0.54 ± 0.18
	^{228}Ac	338.32	0.31 ± 0.15
	^{208}Tl	583.19	0.35 ± 0.10
	^{228}Ac	911.20	0.17 ± 0.06
	^{208}Tl	2614.53	0.14 ± 0.05
^{238}U Cadena $4n+2$	^{214}Pb	295.22	0.32 ± 0.13
	^{214}Pb	351.93	0.91 ± 0.16
	^{214}Bi	609.31	0.47 ± 0.12
	^{214}Bi	1120.29	0.24 ± 0.06
	^{214}Bi	1764.49	0.18 ± 0.05
^{40}K	^{40}K	1460.83	0.45 ± 0.09

Tabla 3.4. Isótopos de radiación natural con blindaje de plomo.

4. Blindaje de cobre

Mantenemos la misma configuración, pero cambiamos el plomo de los 10 cm internos del blindaje por cobre. La fábrica informó que el cobre se había fundido el 9 de mayo de 2014 y se almacenó en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc el 19 de junio de 2014. Se observarán isótopos de producción cosmogénica y también que se acumula ^{222}Rn en el hueco interior en el que se encuentra el detector y recurriremos al uso de ventilación forzada para reducirlo.

4.1. Calibración

Procedemos de la misma manera que con el blindaje de plomo, volviendo a utilizar ^{22}Na como fuente de calibración. Las incertidumbres son menores que el tamaño del punto en las Figuras 4.1 y 4.2.

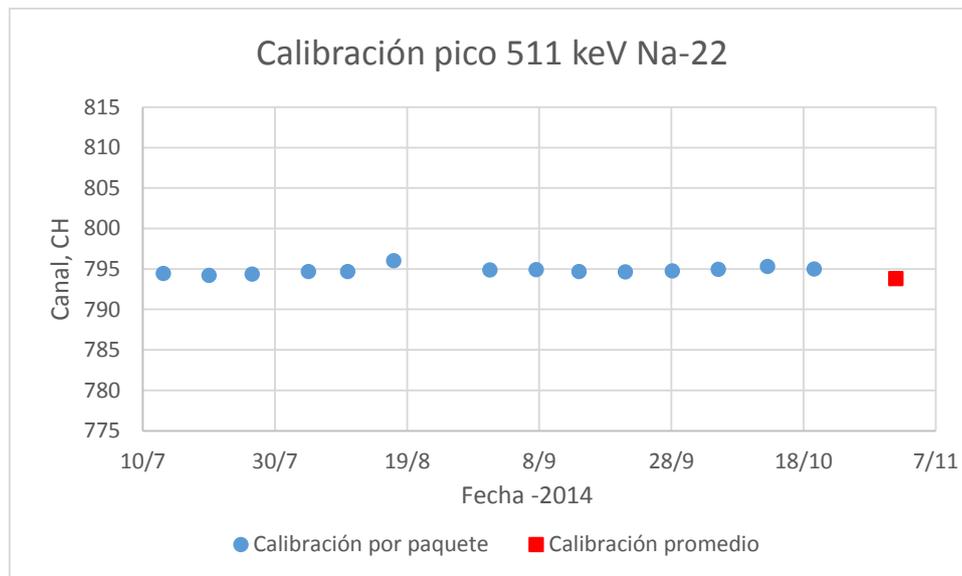


Figura 4.1. Calibración del pico de 511 keV con ^{22}Na .

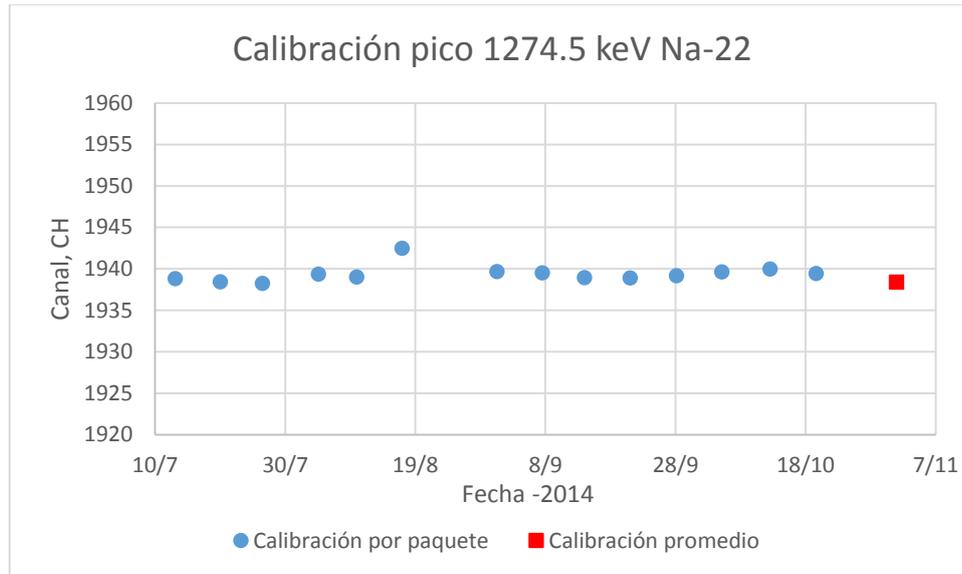


Figura 4.2. Calibración del pico de 1274.5 keV con ^{22}Na .

Al igual que en el blindaje de plomo se observa que las pequeñas variaciones de la ganancia están correlacionadas en ambos picos, aproximadamente un factor 2 en el pico de 1274.5 keV con respecto al de 511 keV.

En el sexto paquete se produjo un salto en la ganancia; sin embargo, al ser un salto pequeño (de cuatro canales en el de 1274.5 keV), sí que utilizaremos ese paquete de datos.

No hay datos del 20 al 27 de agosto porque por error no se arrancó la adquisición.

Los últimos puntos de las Figuras 4.1 y 4.2 representan el promedio de la calibración a lo largo de todo el experimento (Tabla 4.1) y es el que utilizamos para calcular la recta de calibración:

Energía (keV)	Canal
511	793.81 ± 0.03
1274.5	1938.39 ± 0.03

Tabla 4.1. Recta de calibración.

$$E(\text{keV}) = (0.66706_{-0.00001}^{+0.00002}) \cdot CH - (18.52 \pm 0.03)$$

4.2. Elección de datos

Durante el experimento se han tomado 15 paquetes de datos. Utilizamos el mismo criterio que con el blindaje de plomo: test χ^2 a una constante con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Bajo estas consideraciones, se han descartado 212 horas, un 8.7% del total.

En la Figura 4.3 representamos el ritmo integral entre 20 keV y 5.4 MeV. El último punto representa el ritmo integral promedio. Se observa que el ritmo decrece como consecuencia de la desintegración de núcleos de vida media corta, producidos en la activación del cobre desde su fabricación hasta su ingreso en el laboratorio.

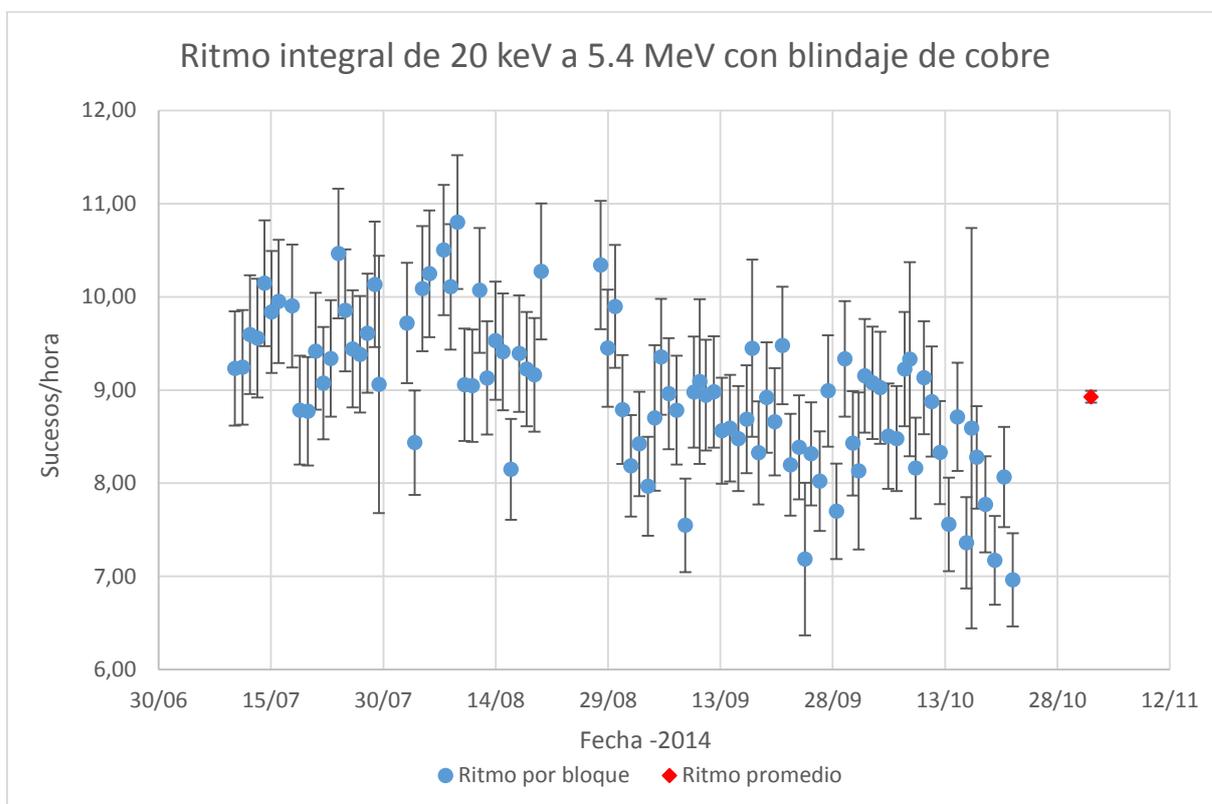


Figura 4.3. Ritmo integral de 20 keV a 5.4 MeV con blindaje de cobre.

En la Tabla 4.2 se recogen el número de sucesos totales, el tiempo efectivo de medida y el ritmo integral promedio entre 20 keV y 5.4 MeV.

Sucesos	Tiempo de medida (días)	Sucesos/hora
19740	92.35	8.91 ± 0.06

Tabla 4.2. Ritmo integral de 20 keV a 5.4 MeV con blindaje de cobre.

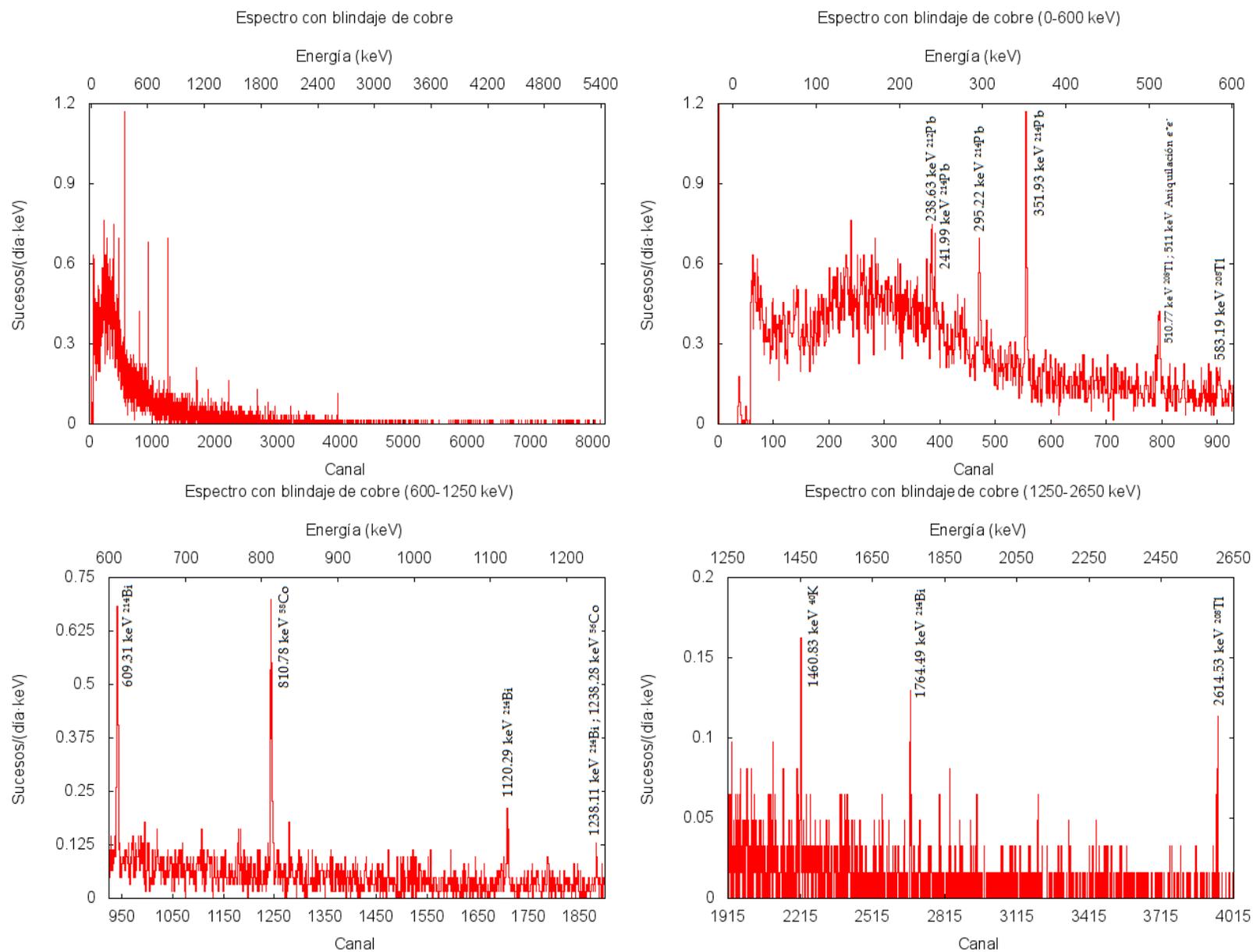


Figura 4.4. Espectro con blindaje de cobre.

4. Blindaje de cobre

Al igual que en el caso del blindaje de plomo, en la Figura 4.4 se hallan los espectros total (entre 20 keV y 5.4 MeV) y divididos en tres rangos de energía (0-600, 600-1250 y 1250-2650 keV) con el blindaje interno de cobre.

A partir del espectro, calculamos la posición de los picos e identificamos de qué isótopo proceden los fotones de dichas energías (Tabla 4.3).

Canal	Energía (keV)	Isótopo	Energía tabulada (keV)
385.23 ± 0.32	238.45 ± 0.21	²¹² Pb	238.63
390.80 ± 0.23	242.17 ± 0.15	²¹⁴ Pb	241.99
470.73 ± 0.27	295.48 ± 0.18	²¹⁴ Pb	295.22
555.30 ± 0.13	351.90 ± 0.09	²¹⁴ Pb	351.93
794.32 ± 0.36	511.34 ± 0.24	²⁰⁸ Tl ; Aniquilación e^+e^-	510.77 ; 511.00
902.85 ± 0.90	583.73 ± 0.60	²⁰⁸ Tl	583.19
941.34 ± 0.16	609.41 ± 0.11	²¹⁴ Bi	609.31
1243.52 ± 0.18	810.98 ± 0.12	⁵⁸ Co	810.78
1707.56 ± 0.48	1120.52 ± 0.32	²¹⁴ Bi	1120.29
1883.07 ± 0.42	1237.60 ± 0.28	²¹⁴ Bi ; ⁵⁶ Co	1238.11 ; 1238.28
2217.51 ± 0.43	1460.69 ± 0.29	⁴⁰ K	1460.83
2672.31 ± 0.37	1764.07 ± 0.25	²¹⁴ Bi	1764.49
3947.71 ± 0.36	2614.84 ± 0.24	²⁰⁸ Tl	2614.53

Tabla 4.3. Identificación de picos gamma con blindaje interno de cobre.

En la Tabla 4.4 aparecen tanto la energía como el ritmo (cuentas/día) de los isótopos de radiación natural separados por cadenas radiactivas. El ritmo de ⁵⁸Co es el promedio a lo largo del experimento.

Cadena radiactiva	Isótopo	Energía (keV)	Cuentas/día
²³² Th Cadena 4n	²¹² Pb	238.63	0.66 ± 0.17
	²⁰⁸ Tl	583.19	0.50 ± 0.13
	²⁰⁸ Tl	2614.53	0.34 ± 0.06
²³⁸ U Cadena 4n+2	²¹⁴ Pb	241.99	0.29 ± 0.13
	²¹⁴ Pb	295.22	0.88 ± 0.16
	²¹⁴ Pb	351.93	2.00 ± 0.19
	²¹⁴ Bi	609.31	1.22 ± 0.16
	²¹⁴ Bi	1120.29	0.35 ± 0.09
	²¹⁴ Bi	1764.49	0.38 ± 0.07
⁴⁰ K	⁴⁰ K	1460.83	0.38 ± 0.07
Cosmogénicos	⁵⁸ Co	810.78	1.68 ± 0.17
	⁵⁶ Co	1238.28	superpuesto ²¹⁴ Bi

Tabla 4.4. Isótopos observados con blindaje de cobre.

El ^{58}Co y el ^{56}Co son isótopos de origen cosmogénico que ya Laubenstein y Heusser observaron en la activación del cobre junto con otros radionucleidos^[11] (Tabla 4.5).

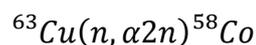
Radionucleido	Semivida, $T_{1/2}$	Actividad específica de saturación ($\mu\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) a 1000 m	Energía (keV)	Intensidad, I_γ (%)
^{56}Co	77.2 días	230 ± 30	847	99.94
			1238	66.9
^{57}Co	272 días	1800 ± 400	122	85.6
			136	10.7
^{58}Co	70.9 días	1650 ± 90	811	99.5
^{60}Co	5.27 años	2100 ± 190	1173	99.97
			1332	99.99
^{54}Mn	312 días	215 ± 21	835	99.98
^{59}Fe	44.5 días	455 ± 120	1099	56.5
			1292	43.2
^{46}Sc	83.8 días	53 ± 18	889	99.98
			1121	99.99
^{48}V	16.0 días	110 ± 40	984	99.98
			1312	97.48

Tabla 4.5. Radionucleidos cosmogénicos producidos en la activación del cobre.

Sólo hemos observado el pico de radiación gamma de 810.98 ± 0.12 keV del ^{58}Co (810.78 keV). Otros radionucleidos cosmogénicos que se producen en la activación del cobre no se observan en el espectro, a excepción del pico de 1238.28 keV del ^{56}Co , que puede pertenecer al ^{214}Bi , y que trataremos más adelante.

4.3. Evolución temporal del pico de ^{58}Co

La interacción de los neutrones procedentes de los rayos cósmicos puede producir la activación del cobre (ver Anexo C) mediante la reacción



Si suponemos que el cobre de los ladrillos ha estado expuesto un tiempo t_0 al flujo de neutrones cósmicos al nivel del mar, desde su fabricación hasta su llegada al laboratorio, existirá una actividad de ^{58}Co

$$A(t_0) = A_S \cdot (1 - e^{-\lambda t_0})$$

4. Blindaje de cobre

con A_S una actividad de saturación y λ su constante de desintegración. Al llegar al laboratorio subterráneo, deja de producirse ^{58}Co y, a partir de entonces, solamente se desintegra. Para confirmar que el pico de 810.98 ± 0.12 keV corresponde con el isótopo de ^{58}Co vamos a estudiar su evolución temporal (Tabla 4.6 y Figura 4.5)

Paquete	Tiempo inicial, t_i (días)	Tiempo final, t_{i+1} (días)	Cuentas	Cuentas/día
1	0.00	6.84	26.00 ± 5.52	3.80 ± 0.81
2	7.69	13.82	9.50 ± 3.64	1.55 ± 0.59
3	13.87	19.83	18.50 ± 4.72	3.10 ± 0.79
4	23.00	26.93	7.50 ± 2.87	1.90 ± 0.73
5	27.95	34.69	8.50 ± 3.91	1.26 ± 0.58
6	34.81	41.81	15.00 ± 5.05	2.14 ± 0.72
7	48.88	56.86	15.50 ± 5.02	1.94 ± 0.63
8	56.91	62.82	11.00 ± 3.74	1.86 ± 0.63
9	62.88	69.81	3.00 ± 3.00	0.43 ± 0.43
10	69.85	76.84	5.50 ± 3.28	0.79 ± 0.47
11	76.88	84.06	14.00 ± 4.30	1.95 ± 0.60
12	84.09	90.80	8.50 ± 4.09	1.27 ± 0.61
13	90.85	98.91	7.50 ± 4.33	0.93 ± 0.54
14	98.98	104.97	5.00 ± 3.32	0.83 ± 0.55

Tabla 4.6. Ritmo del pico de ^{58}Co .

En la Tabla 4.6: el “tiempo inicial t_i ” es el tiempo al que se empieza a medir ; el “tiempo final t_{i+1} ” es el tiempo al que se termina de medir; las “cuentas” son las cuentas netas descontando el fondo estimado; y la última columna es el ritmo.

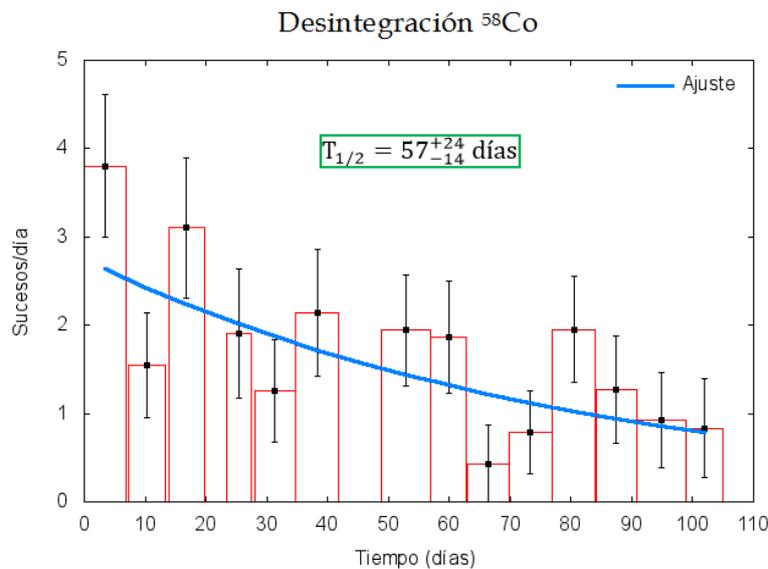


Figura 4.5. Evolución temporal del pico de ^{58}Co .

Según la ley de desintegración radiactiva, el ritmo de desintegración varía con el tiempo según la forma

$$R(t) = R_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

De esta forma podemos ajustar por mínimos cuadrados los datos experimentales R_j y sus incertidumbres σ_j , minimizando la función

$$\chi^2 = \sum_j \left(\frac{R_j - R_0 \cdot e^{-t/\tau}}{\sigma_j} \right)^2$$

obteniendo el periodo de semidesintegración:

$$T_{1/2} = (\ln 2)\tau = 57_{-14}^{+24} \text{ días}$$

que es compatible con el periodo de semidesintegración del ^{58}Co ($T_{1/2} = 70.83$ días). La incertidumbre es grande porque se tienen muy pocos sucesos.

Una vez confirmado que se trata de ^{58}Co , estimamos su actividad al comienzo de la medida teniendo en cuenta la constante radiactiva tabulada $\lambda = 9.79 \cdot 10^{-3} \text{ días}^{-1}$. El número de cuentas en un paquete i es

$$N_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} R_0 e^{-\lambda t} dt = R_0 \cdot \frac{e^{-\lambda t_i} - e^{-\lambda t_{i+1}}}{\lambda}$$

El número total de cuentas de ^{58}Co medidas sobre el espectro (Figura 4.4) son

$$N = \sum_i N_i = 155.00 \pm 15.46 \text{ cuentas},$$

y podemos obtener el ritmo inicial que presenta el ^{58}Co en cobre (cuando se comienza a medir):

$$R_0 = 2.74 \pm 0.27 \text{ cuentas/día}$$

No obstante, aunque se comenzó a medir el 9 de julio, fue el 19 de junio cuando el cobre ingresó en el laboratorio; entonces, el ritmo de ^{58}Co en el cobre al llegar al LSC era:

$$R(t_0) = 3.35 \pm 0.33 \text{ cuentas/día}$$

El área A (número de cuentas) de un pico es proporcional a: su actividad A_c , intensidad I_γ , a la eficiencia de detección ε y al tiempo de medida t . La intensidad y la eficiencia dependen de la energía.

$$A = A_c \cdot I_\gamma \cdot \varepsilon \cdot t$$

Teniendo en cuenta que el blindaje interno está constituido por 609 kg de cobre y que la intensidad del fotón de 810.98 keV del ^{58}Co es un 99.5% y la eficiencia del HPGe para su detección es $1.72 \cdot 10^{-4}$, la actividad inicial del ^{58}Co en cobre era:

$$A(t_0) = 372 \pm 37 \mu\text{Bq/kg}$$

Extraemos la actividad específica de saturación del ^{58}Co de la Tabla 4.5 y, la dividimos entre 2.1^[11] para conocerla a nivel del mar $785 \pm 43 \mu\text{Bq/kg}$.

Recurriendo a la expresión que nos da la actividad en función del tiempo durante la activación neutrónica, podemos estimar el tiempo equivalente de exposición de los ladrillos de cobre a los rayos cósmicos a nivel del mar.

$$A(t_0) = A_s \cdot (1 - e^{-\lambda t_0}) \Rightarrow t_0 = 66 \pm 10 \text{ días}$$

Este resultado nos dice que el cobre tuvo que ser fabricado en torno al 14 de abril de 2014, pero realmente debe haber sido fabricado más tarde, pues nuestra estimación ha sido realizada a nivel del mar. El almacenamiento y transporte ha sido a una altitud superior, donde el flujo de neutrones es mayor, por lo que se necesita menor tiempo para alcanzar la misma actividad. Es plausible que el cobre estuviera expuesto a los rayos cósmicos los 41 días que dijo el fabricante.

4.4. Análisis del pico compuesto de ^{56}Co y ^{214}Bi

El pico gamma medido con una energía de $1237.60 \pm 0.28 \text{ keV}$ puede ser una superposición de los fotones emitidos por ^{56}Co (1238.28 keV) y ^{214}Bi (1238.11 keV). Para discernir cuál es la cantidad de fotones procedentes de cada uno de estos isótopos, vamos a estimar qué cantidad de ^{214}Bi debe haber con energía 1238.11 keV teniendo en cuenta la intensidad, el área y la eficiencia de los picos 1120.29 keV y 1764.49 keV del mismo isótopo.

Para dos picos del mismo isótopo y medidos durante el mismo periodo de tiempo:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= A_c \cdot I_{\gamma 1} \cdot \varepsilon_1 \cdot t \\ A_2 &= A_c \cdot I_{\gamma 2} \cdot \varepsilon_2 \cdot t \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{A_1}{A_2} = \frac{I_{\gamma 1} \cdot \varepsilon_1}{I_{\gamma 2} \cdot \varepsilon_2}$$

Energía (keV)	Intensidad, I_γ (%)	Área (cuentas)
1120.29	15.1	39.86 ± 12.03
1238.11	5.8	20.91 ± 8.31
1764.49	15.4	26.76 ± 9.56

Tabla 4.7. Área e intensidad de los picos 1120.29, 1238.11 y 1764.49 keV.

§ Estimada por Monte Carlo por Y. Ortigoza.

Utilizando el primer y el tercer pico (Tabla 4.7), que son solamente del ^{214}Bi y no hay interferencias de otros núcleos:

$$\varepsilon_2 = (0.66 \pm 0.31) \cdot \varepsilon_1$$

Suponemos una relación lineal en escala logarítmica entre la eficiencia y la energía^[12] (Figura 4.6).

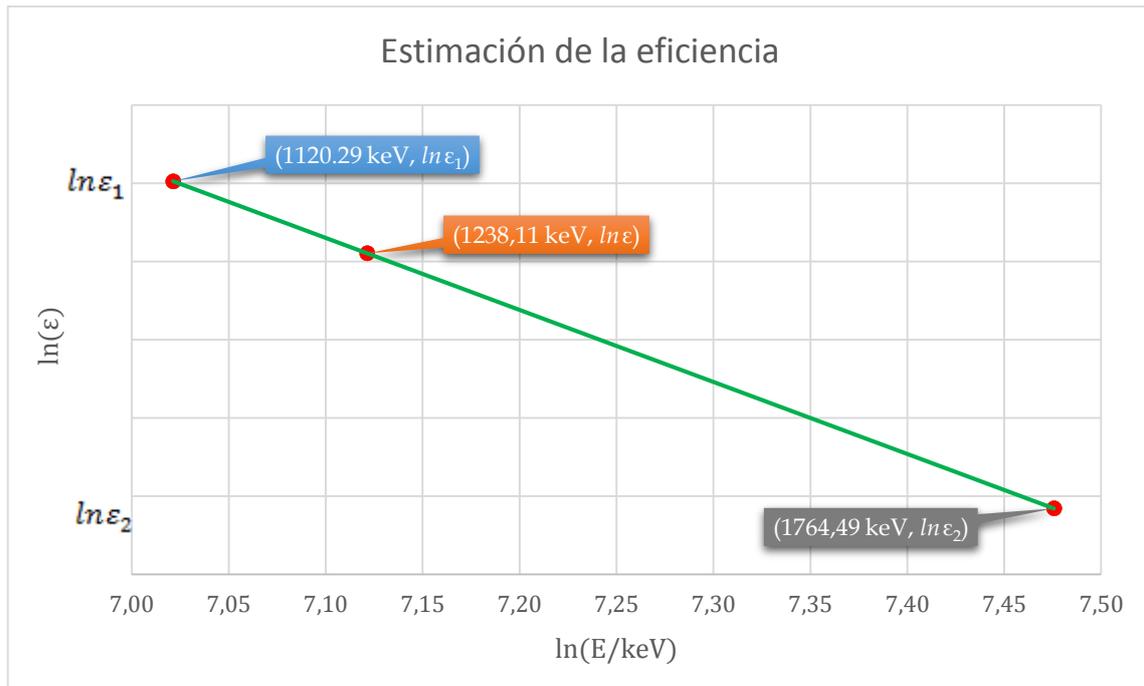


Figura 4.6. Eficiencia en función de la energía.

Así, la eficiencia para $E = 1238.11 \text{ keV}$ relativa a la eficiencia del pico de 1120.29 keV es

$$\varepsilon = (0.91 \pm 0.07) \cdot \varepsilon_1$$

Por tanto, el área que le corresponde al ^{214}Bi es:

$$\frac{A_1}{A} = \frac{I_{\gamma 1} \cdot \varepsilon_1}{I_{\gamma} \cdot \varepsilon} \Rightarrow A = 13.96 \pm 4.32 \text{ cuentas}$$

De esta manera se observa que de las 20.91 ± 8.31 cuentas que presenta el pico de $1237.60 \pm 0.28 \text{ keV}$: 13.96 ± 4.32 cuentas pertenecen al ^{214}Bi y 6.95 ± 9.37 cuentas residuales al ^{56}Co . El pico está compuesto principalmente por ^{214}Bi y una cota superior para el ^{56}Co son 23.5 cuentas, con un nivel de confianza del 95% (ver Anexo B).

5. Comparación de los blindajes de plomo y cobre

Una vez analizados los espectros obtenidos utilizando tanto plomo como cobre a modo de blindaje interno vamos a realizar una comparación entre los resultados obtenidos para ambos materiales.

En la Figura 5.1 representamos el ritmo integral entre 20 keV y 5.4 MeV para los dos blindajes. Observamos que con el blindaje de plomo el ritmo se mantiene constante, mientras que con el de cobre el ritmo va decreciendo.

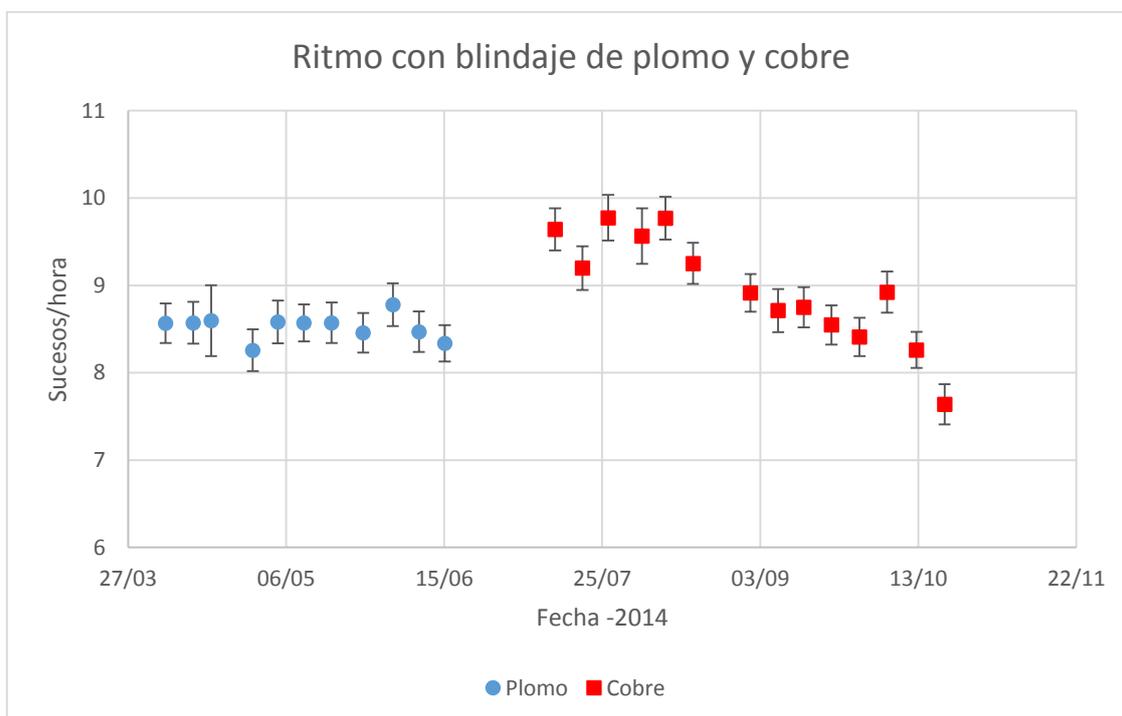


Figura 5.1. Ritmo integral entre 20 keV y 5.4 MeV con los blindajes de plomo y cobre interno.

En la Tabla 5.1 se recogen los sucesos/hora promedio entre 20 keV y 5.4 MeV para los dos tipos de blindajes internos.

Blindaje interno	Sucesos/hora
Plomo	8.52 ± 0.07
Cobre	8.91 ± 0.06

Tabla 5.1. Ritmo integral entre 20 keV y 5.4 MeV con los blindajes de plomo y cobre.

5.1. Alta, media y baja energía

Vamos a dividir los espectros obtenidos con el blindaje de plomo y con el blindaje de cobre en tres rangos de energía (Tabla 5.2 y Figura 5.2).

Con baja energía nos referimos al rango de energía entre 20 y 100 keV; la media energía comprende el rango de energía entre 100 keV y 3.0 MeV, en el que se encuentra la radiación gamma de los isótopos de radiación natural; y con alta energía hacemos referencia al rango de energía que está por encima de los fotones de radiación natural, en concreto entre 3.0 y 5.4 MeV.

Energía		Plomo	Cobre
		Cuentas/día	Cuentas/día
Baja	20-100 keV	39.94 ± 0.76	29.67 ± 0.57
Media	100 keV-3.0 MeV	160.37 ± 1.52	182.53 ± 1.41
Alta	3.0-5.4 MeV	4.07 ± 0.24	1.55 ± 0.13

Tabla 5.2. Ritmo con blindajes de plomo y cobre.

Podemos observar que el fondo radiactivo a baja energía es más alto con el blindaje de plomo que con el de cobre (aproximadamente un 35% superior). Con el blindaje interno de plomo aparecen dos picos adicionales correspondientes a los rayos X del plomo (74.97 y 84.94 keV), producidos por absorción fotoeléctrica de fotones con el plomo más cercano al detector. Los rayos X del cobre son de 8.05 y 8.91 keV ($K_{\alpha 1}$ y $K_{\beta 1}$, respectivamente), por lo que se encuentran por debajo del umbral de 20 keV.

En el rango de media energía se miden 22.16 ± 2.07 cuentas/día más en el blindaje de cobre que en el de plomo. La Tabla 5.3 recoge los ritmos medidos para los diferentes isótopos separados por cadenas radiactivas. El ritmo de ^{214}Pb (241.99 keV) en plomo y ^{228}Ac (338.32 y 911.20 keV) en cobre son cotas superiores calculadas con un nivel de confianza del 95% (ver Anexo B). En equilibrio radiactivo, la actividad del ^{208}Tl es un 35.94% de la del ^{212}Bi (ramificación del ^{212}Bi en ^{212}Po y ^{208}Tl , ver Anexo A)^[10].

Observando la Tabla 5.3 se tiene que:

- el ritmo de la cadena 4n es aproximadamente igual con ambos tipos de blindaje, excepto el ^{208}Tl (2614.53 keV) que es el doble con cobre que con plomo.
- el ritmo medido de los isótopos de la cadena 4n+2 es el doble en cobre que en plomo.
- el ritmo del radionucleido ^{40}K es el mismo con ambos blindajes.

5. Comparación de los blindajes de plomo y cobre

Cadena radiactiva	Isótopo	Energía (keV)	Intensidad, I_γ (%)	Plomo	Cobre
				Cuentas/día	Cuentas/día
^{232}Th Cadena 4n	^{212}Pb	238.63	43.3	0.54 ± 0.18	0.66 ± 0.17
	^{228}Ac	338.32	11.3	0.31 ± 0.15	< 0.20
	^{208}Tl	583.19	30.4	0.35 ± 0.10	0.50 ± 0.13
	^{228}Ac	911.20	25.8	0.17 ± 0.06	< 0.11
	^{208}Tl	2614.53	35.6	0.14 ± 0.05	0.34 ± 0.06
^{238}U Cadena 4n+2	^{214}Pb	241.99	7.43	< 0.30	0.29 ± 0.13
	^{214}Pb	295.22	19.3	0.32 ± 0.13	0.88 ± 0.16
	^{214}Pb	351.93	37.6	0.91 ± 0.16	2.00 ± 0.19
	^{214}Bi	609.31	46.1	0.47 ± 0.12	1.22 ± 0.16
	^{214}Bi	1120.29	15.1	0.24 ± 0.06	0.35 ± 0.09
	^{214}Bi	1764.49	15.4	0.18 ± 0.05	0.38 ± 0.07
^{40}K	^{40}K	1460.83	10.6	0.45 ± 0.09	0.38 ± 0.07

Tabla 5.3. Isótopos de radiación natural con blindajes de plomo y cobre interno.

Se observa que en la región de alta energía es más alto el fondo radiactivo que aparece con el blindaje de plomo.

Presentan una relación de ritmos

$$\frac{R_{\text{cobre}}}{R_{\text{plomo}}} = \frac{1.55 \pm 0.13}{4.07 \pm 0.24} = 0.38 \pm 0.04$$

La razón por la que existe un mayor nivel de radiación al utilizar plomo como blindaje interno es la radiación de bremsstrahlung producida por partículas cargadas que interactúan con los núcleos del blindaje, que es aproximadamente proporcional al número atómico del blanco y crece con el cuadrado de la energía cinética inicial de la partícula incidente^[13]:

$$I = kZE^2$$

con I la energía total de bremsstrahlung, E la energía cinética de la partícula incidente y k una constante cuyas dimensiones son de inverso de energía.

Por tanto,

$$\frac{I_{\text{cobre}}}{I_{\text{plomo}}} = \frac{Z_{\text{cobre}}}{Z_{\text{plomo}}} = \frac{29}{82} = 0.35$$

Observamos que el resultado extraído de la estimación de la energía total de bremsstrahlung I es compatible con el obtenido al comparar las cuentas medidas con el blindaje de plomo y con el de cobre.

5. Comparación de los blindajes de plomo y cobre

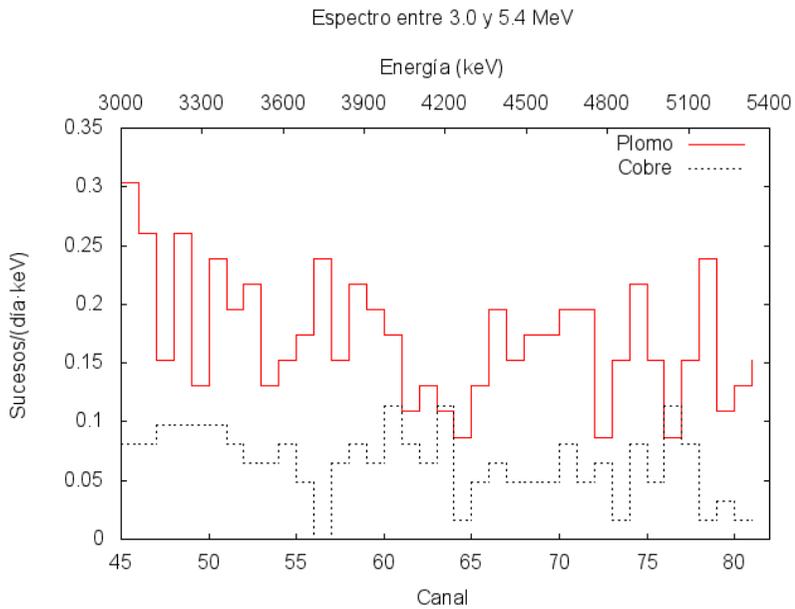
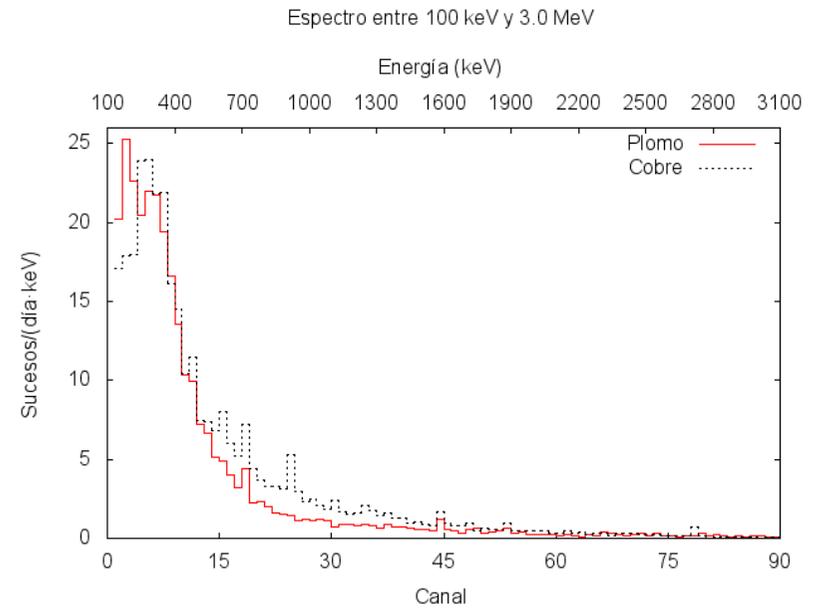
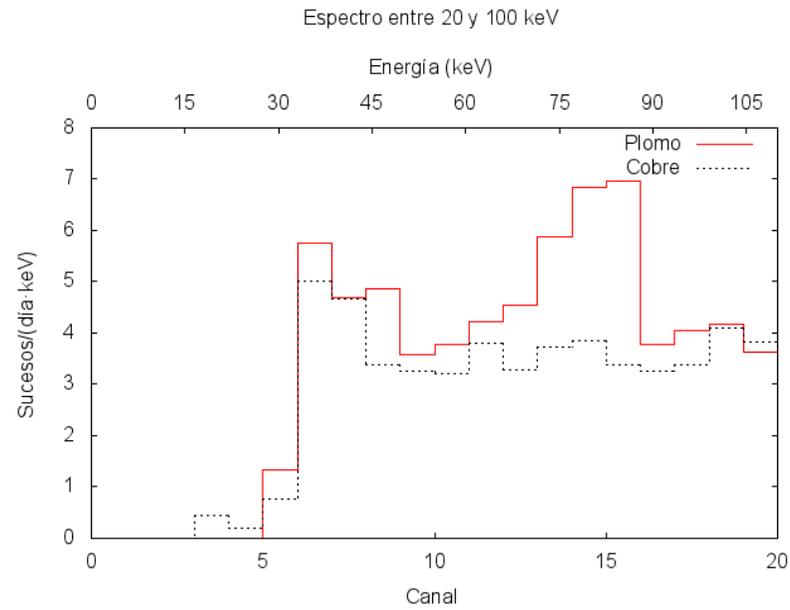


Figura 5.2. Espectros con blindajes de plomo y cobre.

5.2. Radiación primordial

Centrando nuestra atención en la Figura 5.1, estudiaremos a continuación cómo varía el ritmo en función del tiempo para el ^{40}K y las cadenas radiactivas naturales y para cada blindaje. Con cada blindaje, sumaremos las cuentas correspondientes a todos los isótopos de una misma cadena radiactiva.

En la Figura 5.3 se observa que los ritmos con el blindaje de plomo permanecen constantes. Los valores medios están recogidos en la Tabla 5.4. El ^{40}K ($T_{1/2} = 1.28 \cdot 10^9$ años) tiene una semivida tan larga que, a efectos de la duración del experimento, su actividad permanece constante. En los casos de las cadenas $4n$ y $4n+2$ se observan ritmos constantes de núcleos de pequeña semivida, por lo que tiene que haber núcleos predecesores de larga semivida que los generan continuamente: ^{232}Th o ^{228}Ra para la cadena $4n$ y ^{238}U o ^{226}Ra para la cadena $4n+2$.

De igual manera se obtienen, con el blindaje de cobre interno, los resultados plasmados en la Figura 5.4 y en la Tabla 5.5.

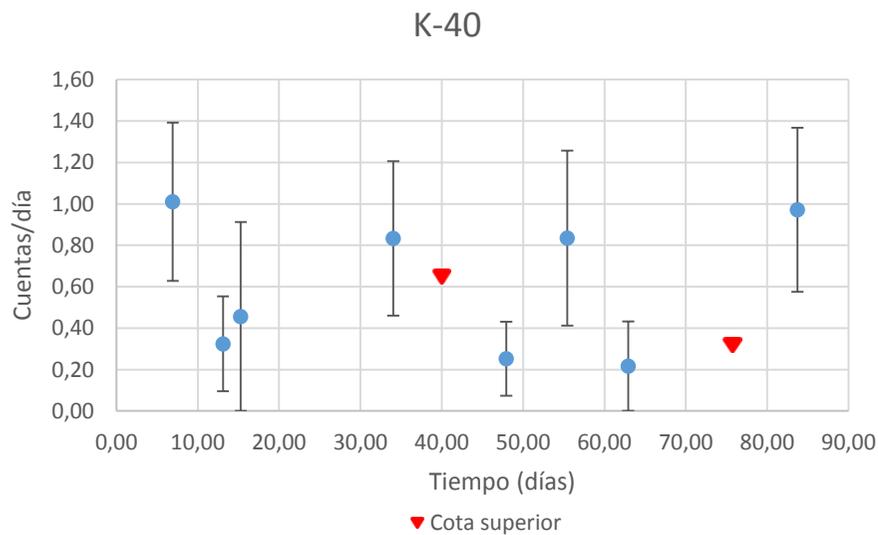
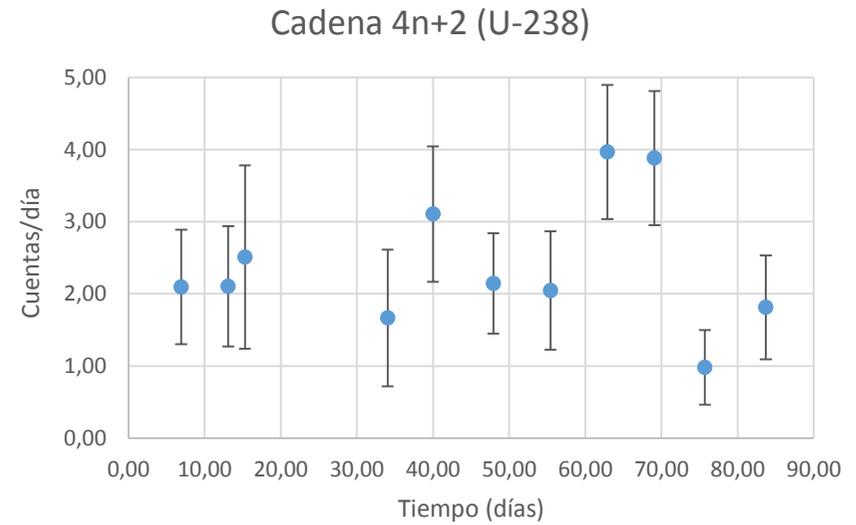
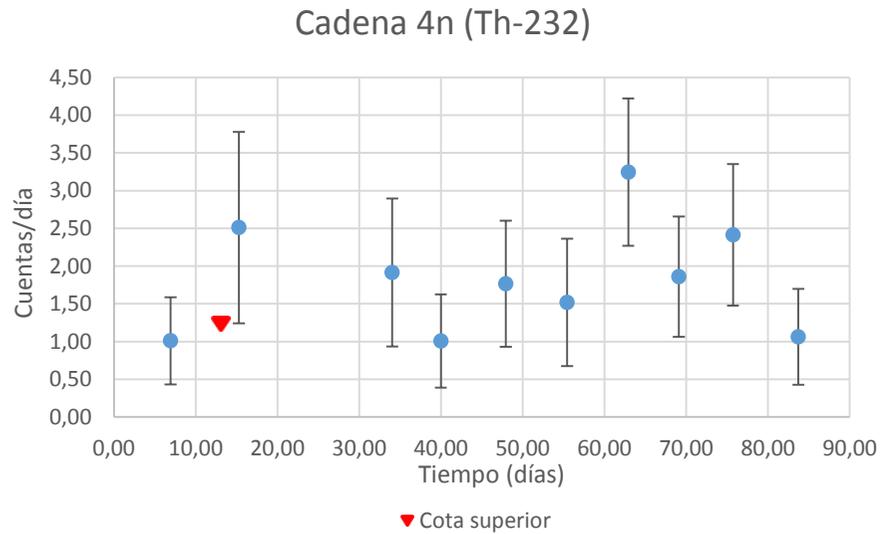


Figura 5.3. Cuentas/día de las cadenas 4n y 4n+2 y del ^{40}K con blindaje de plomo.

	Cuentas/día
Cadena 4n (^{232}Th)	1.52 ± 0.26
Cadena 4n+2 (^{238}U)	2.12 ± 0.25
^{40}K	0.45 ± 0.09

Tabla 5.4. Cuentas/día promedio de las cadenas 4n y 4n+2 y del ^{40}K con blindaje de plomo.

5. Comparación de los blindajes de plomo y cobre

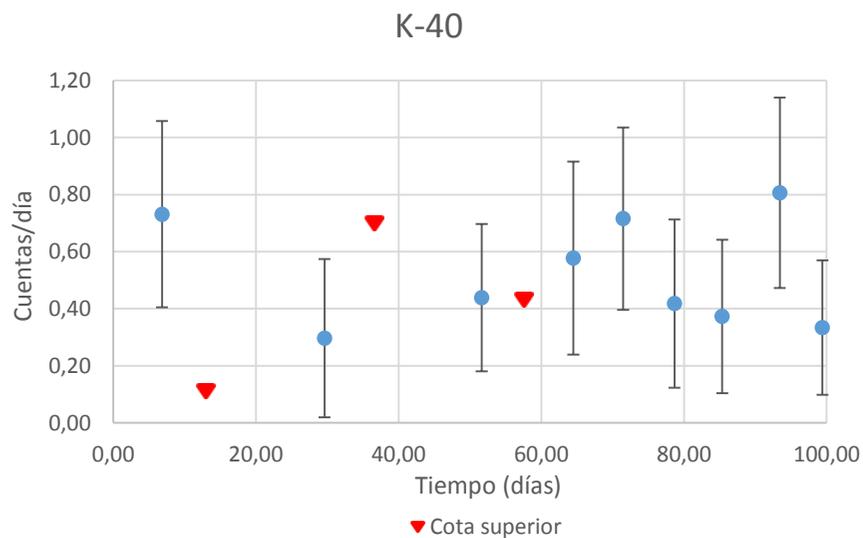
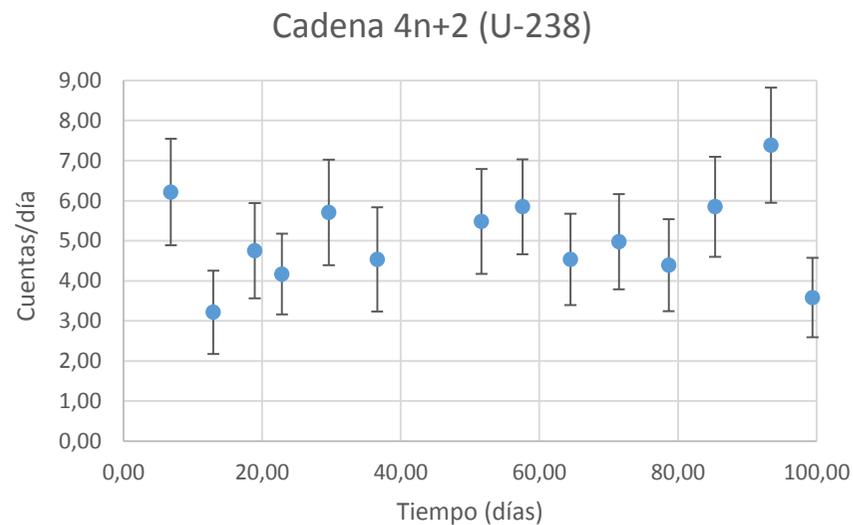
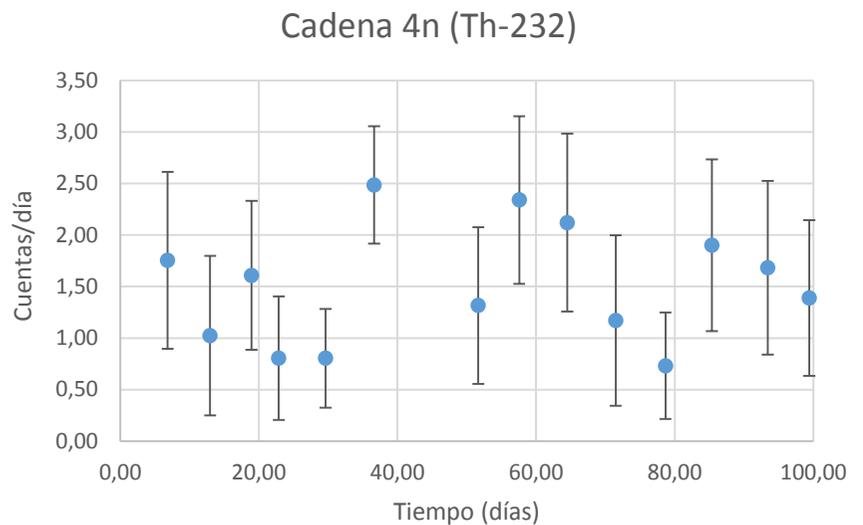


Figura 5.4. Cuentas/día de las cadenas 4n y 4n+2 y del ^{40}K con blindaje interno de cobre.

	Cuentas/día
Cadena 4n (^{232}Th)	1.49 ± 0.23
Cadena 4n+2 (^{238}U)	5.11 ± 0.34
^{40}K	0.38 ± 0.07

Tabla 5.5. Cuentas/día promedio de las cadenas 4n y 4n+2 y del ^{40}K con blindaje interno de cobre.

A partir del número de cuentas obtenido para la radiactividad natural intentaremos estimar la posición en la que se encuentran con respecto al blindaje.

Isótopo ^{40}K

En el caso del radionucleido ^{40}K , como se indica en la Tabla 5.3, se obtiene el mismo ritmo con ambas configuraciones; por lo que es razonable suponer que la mayor parte de la radiación procedente del ^{40}K proviene del hueco interior al blindaje en el que se encuentra el detector.

Cadena $4n+2$ (^{238}U)

En el caso de las cadenas radiactivas recordemos que el área A de un determinado pico es proporcional a su actividad A_c , intensidad I_γ , a la eficiencia ε y al tiempo de medida t .

$$A = A_c \cdot I_\gamma \cdot \varepsilon \cdot t$$

Para una energía E determinada y centrándonos en una cadena radiactiva concreta, la cantidad

$$\frac{A(E)}{I_\gamma(E) \cdot t} = A_c \cdot \varepsilon(E)$$

es el producto de la eficiencia $\varepsilon(E)$ del detector para el campo de radiación y la actividad de la cadena supuesto equilibrio radiactivo, A_c .

La dependencia de $A(E)/(I_\gamma(E) \cdot t)$ frente a la energía E indica una distribución de las fuentes de radiación. Como consecuencia de este hecho, observaremos cómo se modifica al sustituir el plomo interno por cobre.

En el caso de la cadena $4n+2$, ambas rectas son aproximadamente paralelas (Figura 5.5). Esto quiere decir que en ambos experimentos se tiene una eficiencia parecida. La eficiencia depende de la distribución fuente-detector, por lo que si obtenemos una eficiencia similar tras haber sustituido el plomo del blindaje interno por cobre, la radiación de ^{214}Pb y ^{214}Bi procede mayoritariamente de la zona interior al blindaje en el que se halla el detector. Ambos isótopos son hijos del ^{222}Rn un gas que puede filtrarse por los huecos que quedan entre los ladrillos del blindaje.

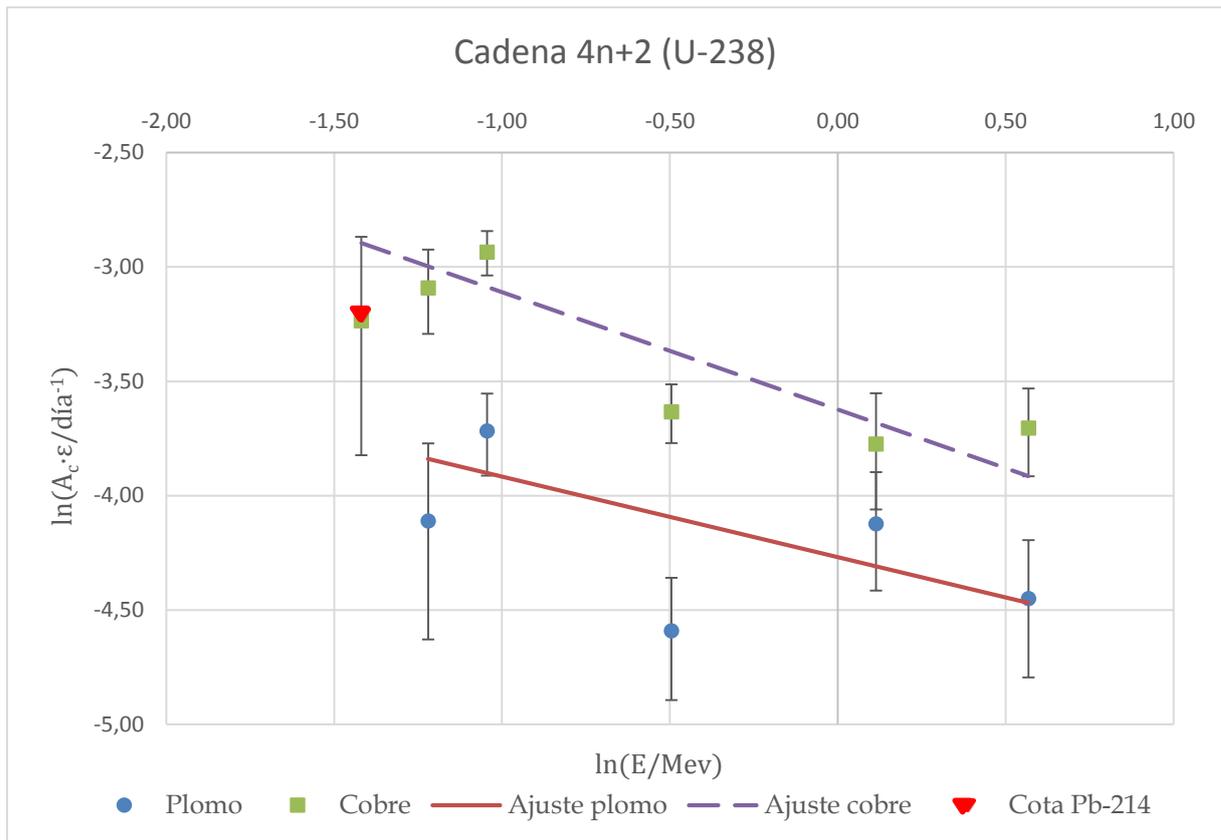


Figura 5.5. Actividad por eficiencia en función de la energía.

Entre ambas rectas existe aproximadamente un factor 2 que indica que la actividad con el blindaje interno de cobre es el doble que con el de plomo.

Cadena 4n (^{232}Th)

En la Figura 5.6 vemos que los valores de ^{212}Pb (238.63 keV) y ^{208}Tl (583.19 keV) son aproximadamente iguales con ambas configuraciones, podemos suponer que la mayor parte de la radiación de estos isótopos procede de la zona interior en la que se encuentra el detector. Sin embargo, el valor de ^{208}Tl (2614.53 keV) medido con el blindaje interno de cobre es superior al obtenido con el blindaje de plomo, es decir, que el ^{208}Tl no puede estar sólo en el interior. Esto podría explicarse si también hubiera ^{208}Tl (y por tanto su predecesor de larga vida media) en el plomo externo del blindaje; la contribución de los fotones de 238.63 y 583.19 keV sería prácticamente despreciable en ambos casos de 10 cm de plomo o cobre internos, pero no así el fotón de 2614.53 keV, cuya menor atenuación por el cobre sería observable (Tabla 5.6).

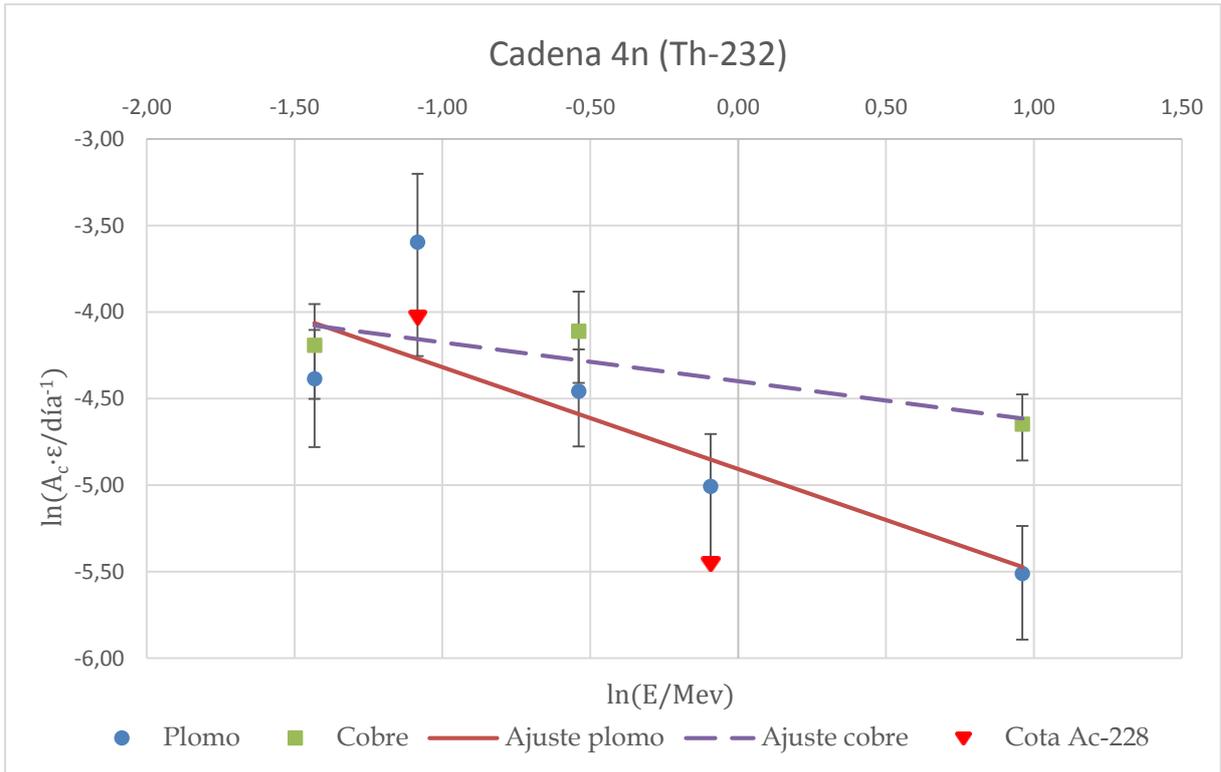


Figura 5.6. Actividad por eficiencia en función de la energía.

Energía (keV)	Recorrido libre medio (cm)	
	Plomo	Cobre
238.63	0.14	0.90
583.19	0.73	1.5
2614.53	2.1	3.0

Tabla 5.6. Recorrido libre medio de fotones en plomo y cobre ^[14].

5.3. Ventilación forzada del blindaje de cobre

Como hemos visto en los apartados 5.1 y 5.2 la actividad de la cadena $4n+2$ (^{238}U) es el doble en el experimento realizado con el blindaje de cobre que la que se obtenía con el blindaje de plomo. Lo más probable es que el responsable sea la acumulación de ^{222}Rn en el hueco interno del blindaje.

Partiendo de esta hipótesis vamos a proceder a una nueva toma de medidas con el blindaje de cobre realizando una ventilación forzada. Recordemos que en los experimentos anteriores, conforme el nitrógeno líquido del dewar empleado para refrigerar el detector de HPGe se evaporaba, se pasaba por un tubo hasta el hueco interior al blindaje en el que se encuentra el detector para ventilar el aire acumulado. Ahora, la sustituiremos por un flujo de $25 \ell/\text{h}$ de nitrógeno gas.

Calibración

Procedemos de la misma manera que con los experimentos anteriores, volviendo a utilizar ^{22}Na como fuente de calibración. Las incertidumbres son menores que el tamaño del punto en las Figuras 5.7 y 5.8.

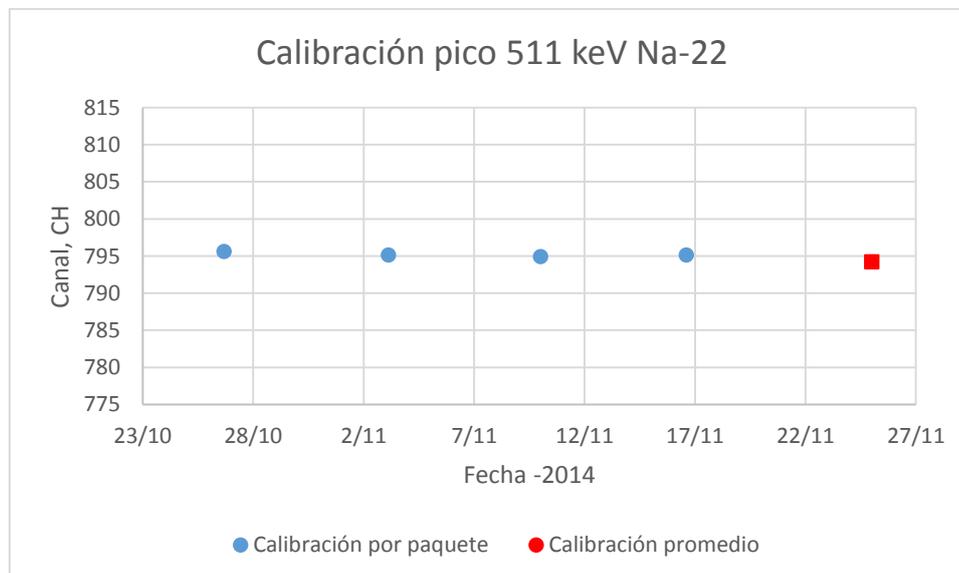


Figura 5.7. Calibración del pico de 511 keV con ^{22}Na .

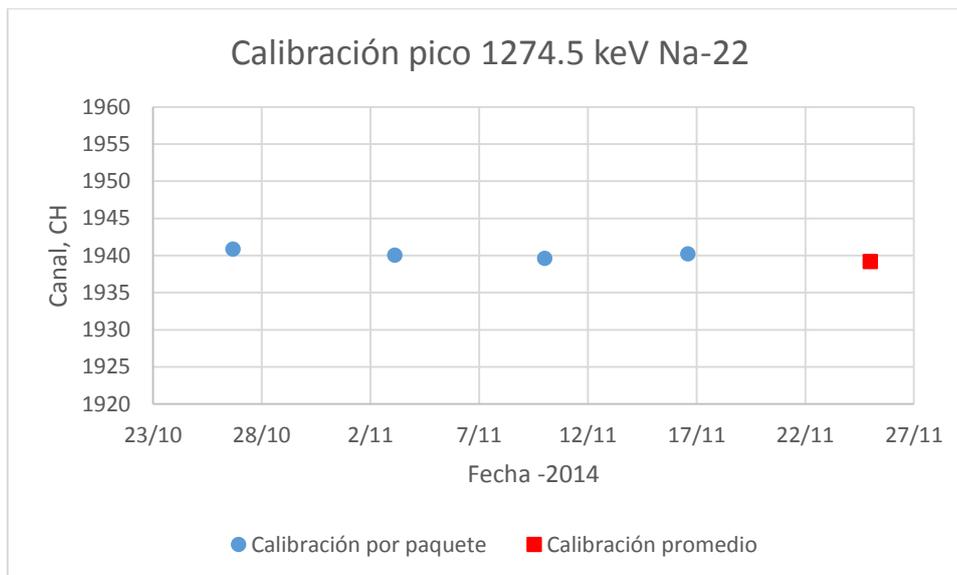


Figura 5.8. Calibración del pico de 1274.5 keV con ^{22}Na .

El último punto representa el promedio de la calibración a lo largo de todo el experimento (Tabla 5.7) y es el que utilizamos para calcular la recta de calibración:

Energía (keV)	Canal
511	794.18 ± 0.05
1274.5	1939.19 ± 0.06

Tabla 5.7. Recta de calibración.

$$E(\text{keV}) = (0.66681 \pm 0.00004) \cdot CH - (18.57 \pm 0.06)$$

Elección de datos

Durante el experimento se han tomado 4 paquetes de datos. Utilizamos el mismo criterio que con el blindaje de plomo: test χ^2 a una constante con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Bajo estas consideraciones, se han descartado 28 horas, un 4.2% del total.

5. Comparación de los blindajes de plomo y cobre

En la Figura 5.9 representamos el ritmo integral entre 20 keV y 5.4 MeV. El último punto representa el ritmo integral promedio.

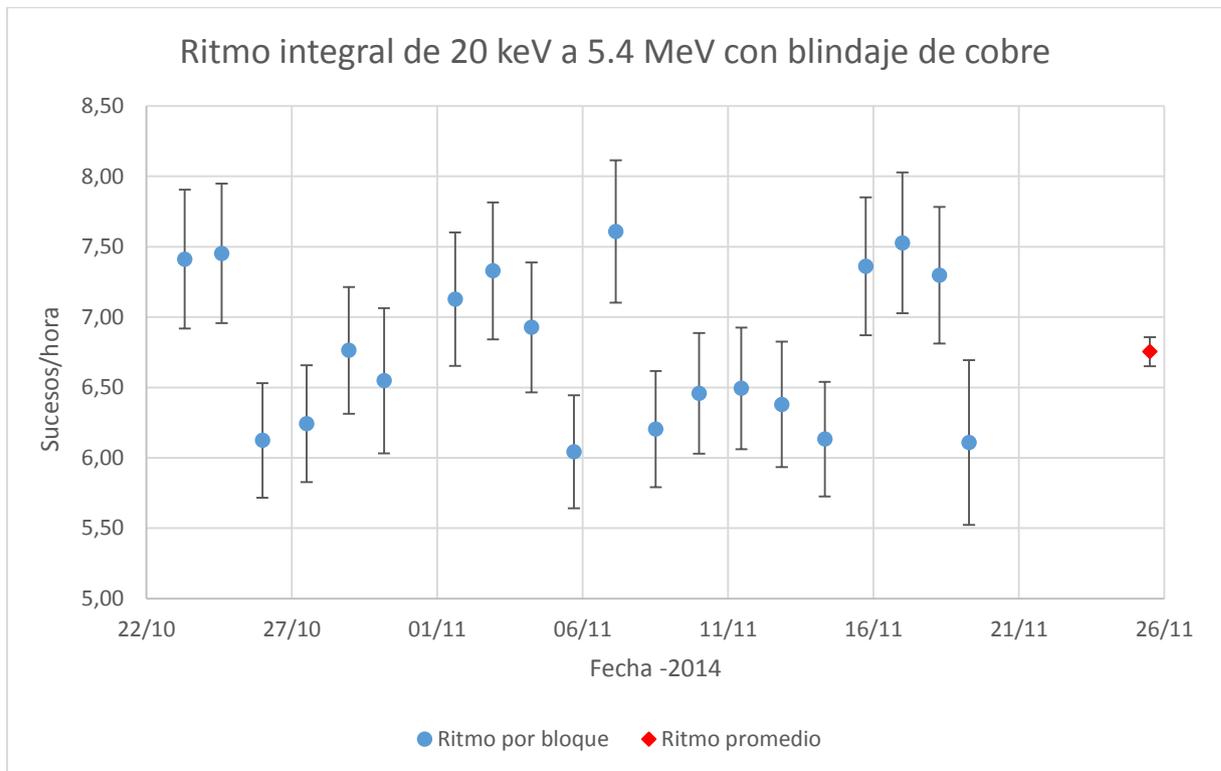


Figura 5.9. Ritmo integral de 20 keV a 5.4 MeV con blindaje de cobre ventilado.

En la Tabla 5.8 se recogen el número de sucesos totales, el tiempo efectivo de medida y el ritmo integral promedio entre 20 keV y 5.4 MeV.

Sucesos	Tiempo de medida (días)	Sucesos/hora
4316	26.62	6.75 ± 0.10

Tabla 5.8. Ritmo integral de 20 keV a 5.4 MeV con blindaje de cobre ventilado.

La Figura 5.10 corresponde al espectro completo con el blindaje de cobre con ventilación forzada y abarca todo el rango de energía.

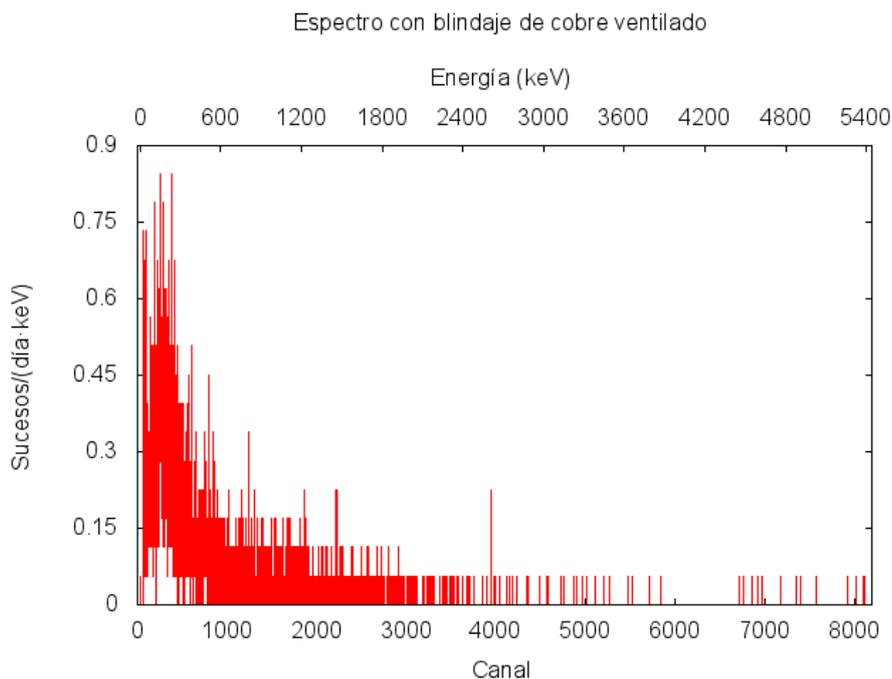


Figura 5.10. Espectro con blindaje de cobre ventilado.

Con estos nuevos datos para el blindaje de cobre procedemos de igual modo que en el apartado 5.2 representando cómo varía el número de cuentas detectadas en función del tiempo para cada cadena radiactiva natural. Sumaremos las cuentas correspondientes a todos los isótopos de una misma cadena radiactiva y representaremos conjuntamente los datos que se obtuvieron con el blindaje de cobre: los cuatro últimos puntos corresponden al periodo de ventilación forzada (Figura 5.11). Los valores medios están recogidos en la Tabla 5.9.

De esta manera observamos que la cantidad de radiación procedente de la cadena $4n$ y del radioisótopo ^{40}K permanece constante independientemente de la ventilación forzada. Sin embargo, la radiación que provenía de la cadena $4n+2$ se ha reducido un factor 4 aproximadamente.

Por tanto, hemos verificado nuestra hipótesis de que la evaporación del nitrógeno del dewar no es suficiente para eliminar el ^{222}Rn que se acumula en el hueco interior al blindaje en el que se encuentra el detector y, mediante la ventilación forzada, hemos conseguido eliminar gran parte de la radiación de la cadena $4n+2$.

Además, ya no se observa prácticamente el pico de absorción total de ^{58}Co , siendo el ritmo integral entre 100 keV y 3.0 MeV (rango de media energía) de 137.25 ± 2.27 cuentas/día, menor que con el blindaje de plomo (160.37 ± 1.52 cuentas/día, Tabla 5.2) en 23.12 ± 2.73 cuentas/día.

5. Comparación de los blindajes de plomo y cobre

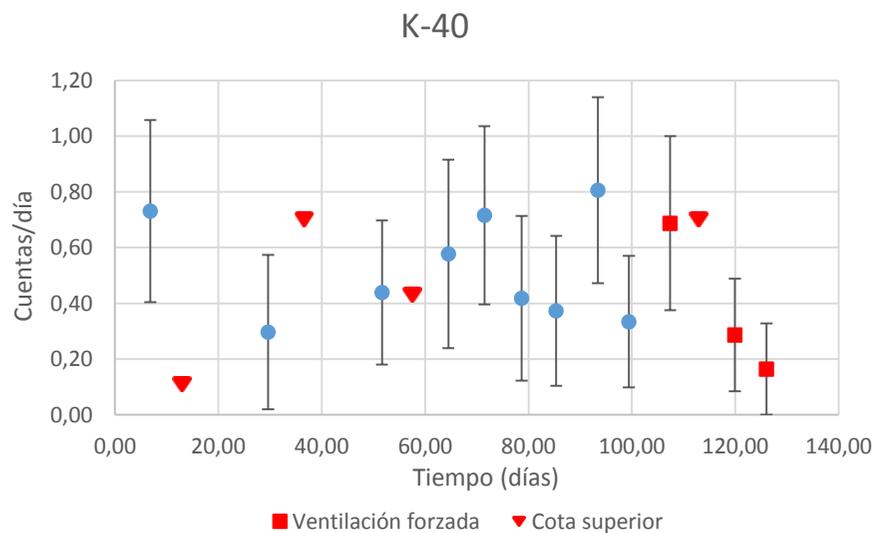
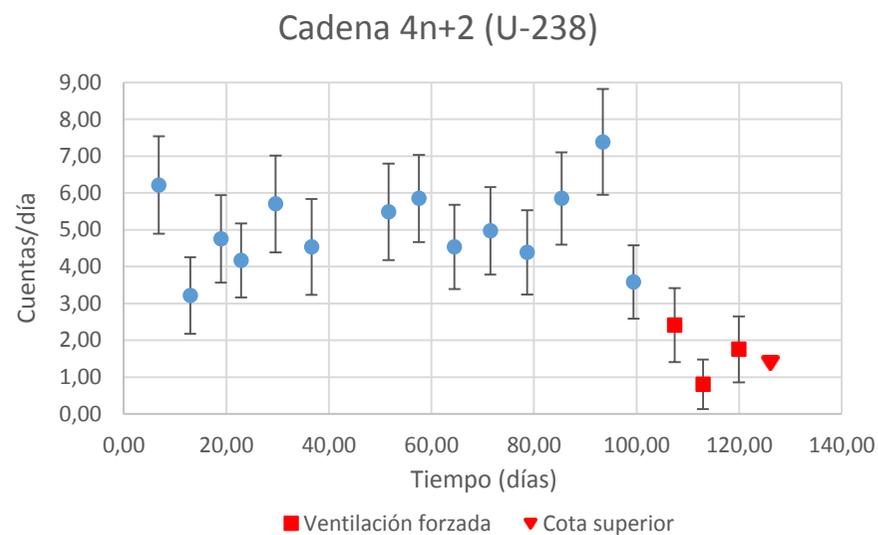
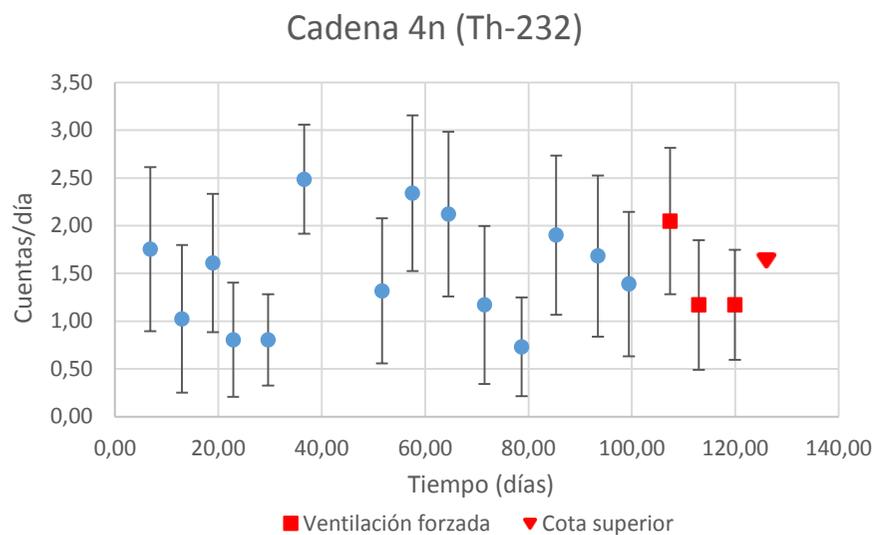


Figura 5.11. Cuentas/día de las cadenas 4n y 4n+2 y del ^{40}K con blindaje de cobre y cobre con ventilación forzada.

	Cobre	Cobre con ventilación forzada
	Cuentas/día	Cuentas/día
Cadena 4n (^{232}Th)	1.49 ± 0.23	1.11 ± 0.36
Cadena 4n+2 (^{238}U)	5.11 ± 0.34	1.18 ± 0.44
^{40}K	0.38 ± 0.07	0.36 ± 0.13

Tabla 5.9. Cuentas/día promedio de las cadenas 4n y 4n+2 y del ^{40}K con blindaje de cobre y cobre con ventilación forzada

6. Conclusiones

Tras la realización de un análisis de los niveles de radiación medidos por un detector de germanio hiperpuro HPGe en el interior de un blindaje constituido por 15 cm de plomo y 10 cm internos de plomo en el primer caso y de cobre en el segundo, podemos extraer las siguientes conclusiones.

- Desde su fabricación hasta su llegada al laboratorio, los ladrillos de cobre constituyentes del blindaje han sido activados por los neutrones procedentes de los rayos cósmicos. Sólo hemos observado el radioisótopo ^{58}Co ($T_{1/2} = 70.83$ días). Esto quiere decir que el cobre del blindaje ha estado poco tiempo expuesto a los rayos cósmicos; el cual hemos estimado en 66 ± 10 días a nivel del mar. La estimación del tiempo de exposición de los ladrillos de cobre a los rayos cósmicos a nivel del mar, ha servido para verificar la información del fabricante.
- Tras 105 días de medida (133 días si tenemos en cuenta el periodo de ventilación forzada), prácticamente ya no aparecen fotones de este isótopo. Por tanto, han sido suficientes unos 100 días tras la llegada del cobre al laboratorio para alcanzar la situación de fondo constante.
- La ventilación del hueco interior al blindaje en el que se encuentra el detector con tan sólo el nitrógeno evaporado del dewar ha sido peor con el blindaje interno de cobre que con el de plomo. Tras el uso adicional de una ventilación forzada, los niveles de radiación del ^{222}Rn disminuyen un factor 4 aproximadamente (Tabla 6.1).
- Durante la ventilación forzada del blindaje de cobre interno, los niveles medidos de radiación natural del ^{40}K y de la cadena $4n$ son compatibles con los obtenidos al utilizarlo sin ella (Tabla 6.1).

Blindaje interno	Cadena $4n$ ^{232}Th (cuentas/día)	Cadena $4n+2$ ^{238}U (cuentas/día)	^{40}K (cuentas/día)
Cobre	1.49 ± 0.23	5.11 ± 0.34	0.38 ± 0.07
Cobre (con ventilación forzada)	1.11 ± 0.36	1.18 ± 0.44	0.36 ± 0.13

Tabla 6.1. Cuentas/día promedio de las cadenas $4n$ y $4n+2$ y del ^{40}K con blindaje de cobre y cobre con ventilación forzada.

- El ritmo integral entre 20 keV y 5.4 MeV con el blindaje de cobre supera ligeramente al del blindaje de plomo durante la desintegración del ^{58}Co . Durante la ventilación forzada (tras 105 días, cuando ya se ha desintegrado la mayor parte del ^{58}Co), el ritmo integral con el blindaje de cobre es inferior al obtenido sin la ventilación forzada (Tabla 6.2).

Blindaje interno	Sucesos/hora
Plomo	8.52 ± 0.07
Cobre	8.91 ± 0.06
Cobre (ventilación forzada)	6.75 ± 0.10

Tabla 6.2. Ritmo integral entre 20 keV y 5.4 MeV con los blindajes de plomo, cobre y cobre en el periodo de ventilación forzada.

- En el rango de baja energía (20-100 keV) es mejor el blindaje de cobre, pues en el blindaje de plomo aparecen los rayos X característicos del plomo, elevando el nivel de radiación.
- En el rango de media energía (100 keV-3.0 MeV) se miden 22.16 ± 2.07 cuentas/día más en el blindaje de cobre que en el de plomo. Se debe principalmente al ^{58}Co y a la acumulación de ^{222}Rn . No obstante, durante el periodo de ventilación forzada, cuando ya se ha desintegrado la mayor parte del ^{58}Co y se han reducido los niveles de ^{222}Rn , se miden 23.12 ± 2.73 cuentas/día más en el blindaje de plomo que en el de cobre.
- En el rango de alta energía (3.0-5.4 MeV) el plomo produce más radiación de bremsstrahlung al tener un número atómico mayor, llegando a generar un nivel de radiación casi tres veces mayor que en el blindaje de cobre.

Bibliografía

- ¹ GONZALEZ-GARCIA, M.C. Global analyses of oscillation neutrino experiments. *Physics of the Dark Universe*, 2014, (4), 1-5.
- ² HEUSSER, G. Low radioactivity background techniques. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 1995, (45), 543-590.
- ³ PANDOLA, L. Status of double beta decay experiments using isotopes other than ¹³⁶Xe. *Physics of the Dark Universe*, 2014, (4), 17-22.
- ⁴ FORMAGGIO, J. A.; MARTOFF, C. J. Backgrounds to sensitive experiments underground. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2004, (54), 361-412.
- ⁵ BAUER, D.; BUCKLEY, J. et al. Dark matter in the coming decade: Complementary paths to discovery and beyond. *Physics of the Dark Universe*, 2015, (7-8), 16-23.
- ⁶ BÁNDAC, I.; BETTINI, A. et al. Radón y radiación ambiental en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC). *Radioprotección*, 2014, XXI(77), 24-29.
- ⁷ DEEP SCIENCE, A DEEP UNDERGROUND SCIENCE AND ENGINEERING INITIATIVE. *Underground Universe: Physics and Astrophysics* [online]. [viewed 13 February 2015]. Available from: http://www.deepscience.org/contents/underground_universe_pop03.shtml
- ⁸ REGUIGUI, N. *Gamma Ray Spectrometry. Practical Information* [online]. 2006. [viewed 13 February 2015]. Available from: <http://www.cnstn.rnrt.tn/afra-ict/NAT/gamma/html/Gamma%20Spec%20V1.pdf>
- ⁹ Semiconductor Diode Detectors. In: KNOLL, G. F. *Radiation Detection and Measurement*. 3rd ed. Michigan: John Wiley & Sons Inc., 2000, pp. 355, 373. ISBN: 978-0-471-07338-3.
- ¹⁰ IDAHO NATIONAL LABORATORY. *Gamma-ray spectrum catalogue Ge and Si detector spectra* [online]. Edited by R. L. HEATH; R. G. HELMER; J. R. DAVIDSON; R. J. GEHRKE. March 1999. [viewed 1 November 2014]. Available from: <http://www4vip.inl.gov/gammaray/catalogs/pdf/gecat.pdf>
- ¹¹ LAUBENSTEIN, M.; HEUSSER, G. Cosmogenic radionuclides in metals as indicator for sea level exposure history. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, (67), 750-754.
- ¹² Germanium Gamma-Ray Detectors. In: KNOLL, G. F. *Radiation Detection and Measurement*. 3rd ed. Michigan: John Wiley & Sons Inc., 2000, p. 449. ISBN: 978-0-471-07338-3.
- ¹³ Stopping of electrons by thick absorbers. In: R. D. EVANS. *The atomic nucleus*. New York: McGraw-Hill, 1955, pp. 614-615. ISBN: 0-758-18411-5.

¹⁴ NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY NIST. *X-Ray Mass Attenuation Coefficients* [online]. Edited by J. H. HUBBELL; S. M. SELTZER. 1989, 1990, 1996. [viewed 27 February 2015]. Available from: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>

¹⁵ IDAHO NATIONAL LABORATORY. *Scintillation spectrometry gamma-ray spectrum catalogue* [online]. Edited by R. L. HEATH. April 1997. [viewed 1 November 2014]. Available from: <http://www4vip.inl.gov/gammaray/catalogs/pdf/naicat.pdf>

¹⁶ KOREA ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE. *Table of gamma rays* [online]. 2000. [viewed 1 November 2014]. Available from: <http://atom.kaeri.re.kr/gamrays.html>