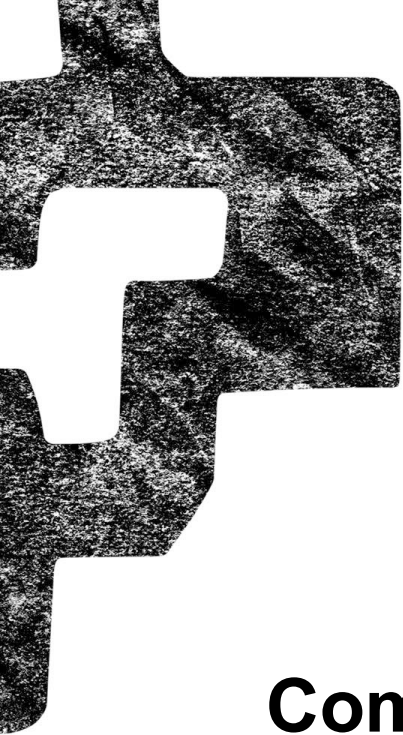


Comparativa entre nuevos sistemas de Espectrometría Gamma

C. Olondo

kontxi.olondo@ehu.eus

XIII Jornadas sobre la Calidad en el Control de la Radiactividad Ambiental
Santander, 2 - 5 de junio de 2026



Ingeniaritza
Energetikoa
Saila
Departamento
de Ingeniería
Energética

- 1. Introducción**
- 2. Objetivos**
- 3. Fundamentos de la espectrometría gamma**
- 4. Parámetros clave**
- 5. Tecnologías de detección**
- 6. Comparativa entre tecnologías actuales**
- 7. Tendencias tecnológicas**
- 8. Conclusiones**

1. Introducción

Ámbito de la vigilancia radiológica ambiental :

Incremento de requisitos regulatorios.

Desmantelamiento de instalaciones nucleares.

Mayor automatización de las Redes de Vigilancia Radiológica
(rapidez en la medida, en el análisis y reporte de resultados)

**Mayor resolución, portabilidad, automatización,
análisis en tiempo real y reducción de costes
operativos.**

La adaptación de las distintas tecnologías de determinación de actividad mediante espectrometría gamma esta situación ha hecho que se produzca la siguiente evolución:

Parámetros que afectan a la medida

- **Mayor resolución energética sin criogenia**
(detectores CZT)
- **Mayor velocidad de la señal de respuesta y de eficiencia de detección**
(LaBr_3 y CeBr_3)

Parámetros que afectan al análisis de esa medida

- **Menor tiempo de análisis y de emisión de resultados**
- **Digitalización avanzada e inteligencia artificial para el análisis espectral**

2.Objetivo

Revisión de las tecnologías de medida de emisión gamma

Comparativa entre sus prestaciones

Exposición de sus posibles aplicaciones

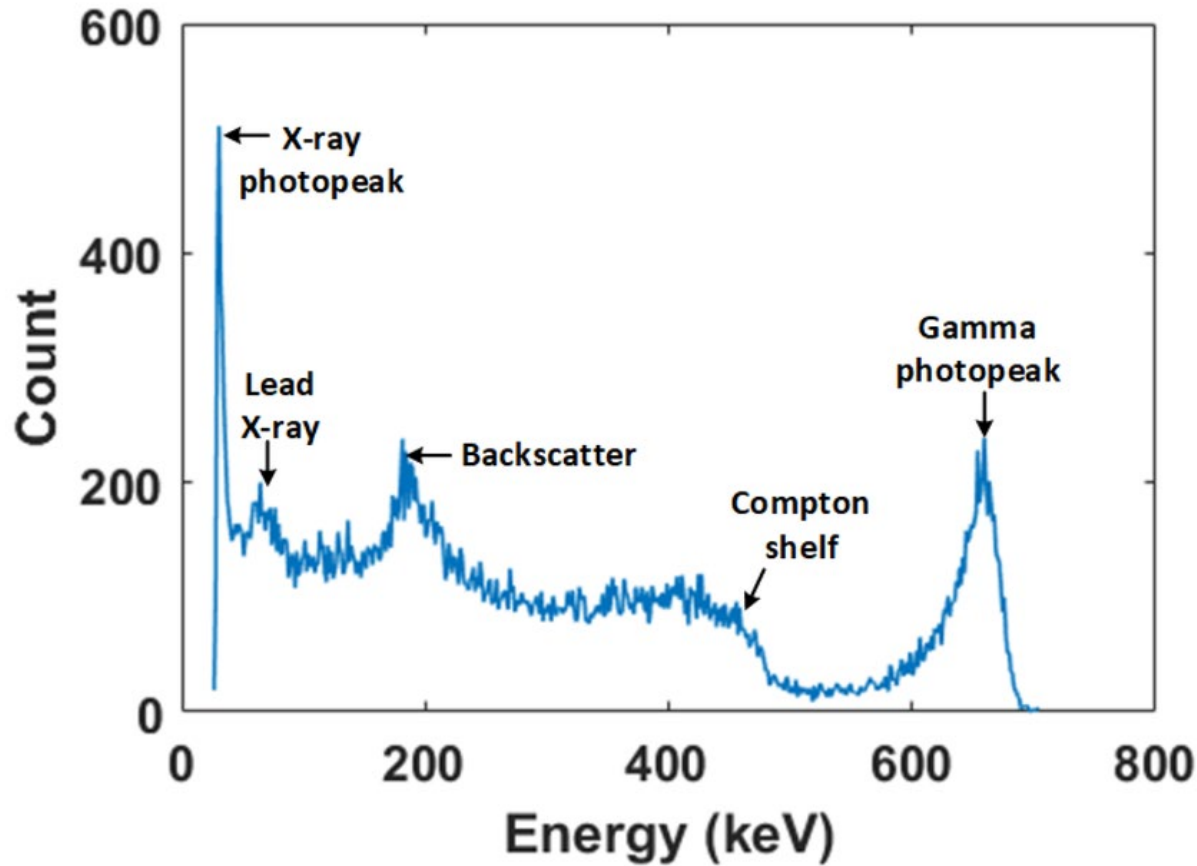
Señalar las tendencias actuales (2026-2030)

3. Fundamentos de la espectrometría gamma

Identificación y cuantificación de actividad mediante el análisis del espectro energético de radionucleidos emisores gamma

Los detectores de espectrometría gamma se fundamentan en la interacción que se produce entre las emisiones gamma y la materia:

- Efecto fotoeléctrico
- Dispersión Compton
- Producción de pares



4. Parámetros clave

- **Eficiencia de detección (ϵ)**
- **Resolución en energías (FWHM)**
- **Fondo (LID)**
- **Velocidad de respuesta
(tiempo de respuesta (subida) y tiempo muerto)**

5. Tecnologías de detección:

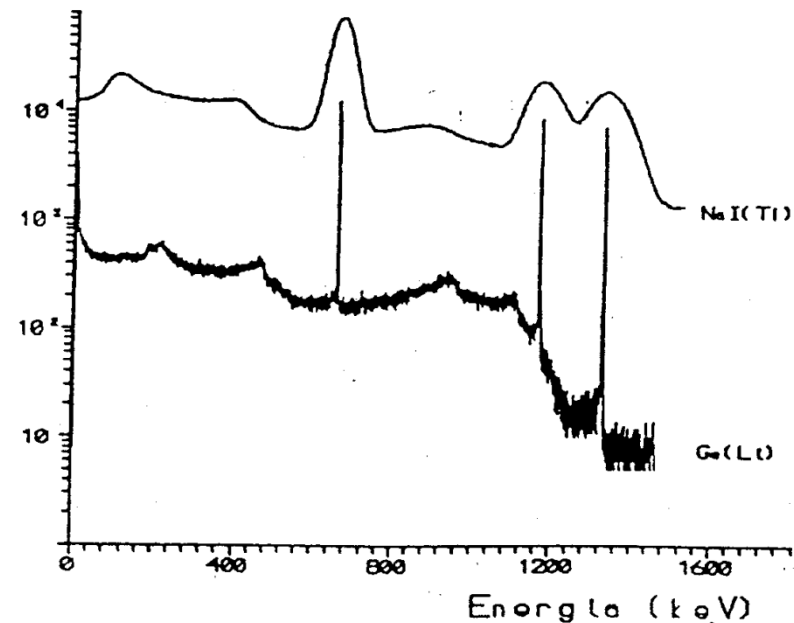
– Semi-conductores:

- **HPGe**
- CdTe
- CZT (CdZnTe)

– Centelleadores:

- NaI(Tl)
- LaBr₃(Ce)
- CeBr₃

Resolución



Emisiones del Cs-137 (662 keV) y Co-60 (1173, 1333 keV)

Semi-conductores: HPGe

Ventajas:

- Resolución excelente
- Electrónica digital más rápida
- Análisis isotópico automático

Desventajas:

- Baja eficiencia
- Coste elevado
- Temperaturas de trabajo criogénicas ($T < 120 \text{ K}$)
- Vacío
- Portabilidad reducida (no válidos para zonas de accesibilidad limitada o elevada contaminación radiactiva)



Realización de medidas in-situ: mayor portabilidad



Mayor portabilidad y reducción del coste

Incrementar la capacidad de detección a pesar de reducir el volumen del detector:

$Z \uparrow \rho \uparrow \rightarrow \text{volumen activo} \uparrow$

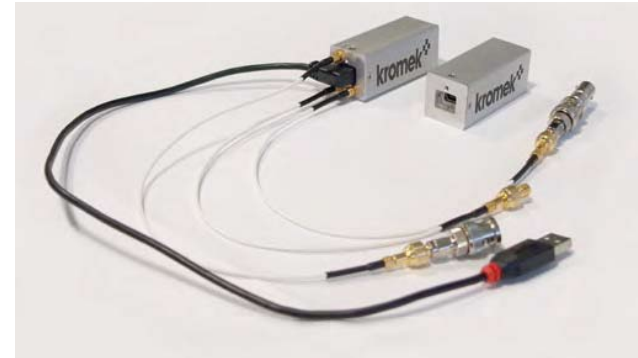
- CdTe
- CZT(CdZnTe)

Material	Ge	CdTe	CdZnTe
Número atómico	32	48/52	48/30/52
Densidad, g/cm ³	5.32	6.2	6

Medida a T^a ambiente



CZT de EURORAD



CZT de Kromek



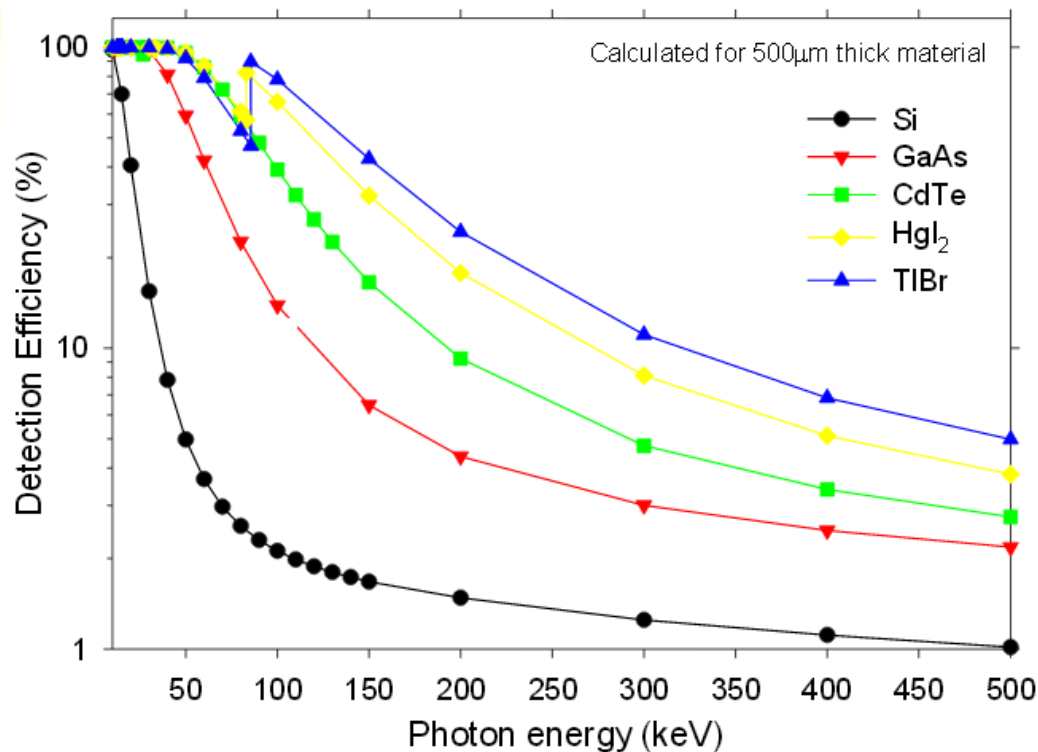
$Z \uparrow \rho \uparrow \rightarrow \text{volumen activo} \uparrow$

- CdTe (Peor resolución que CZT)
- CZT(CdZnTe)

Medida a T^a ambiente

Trabajan a T^a ambiente y su eficiencia de detección es buena, pero....
su resolución en energías no lo es.

RETO: mejora de la resolución en energías trabajando a T^a ambiente



$$\text{FWHM}_{\text{CdTe}} < \text{FWHM}_{\text{CZT}}$$

CZT(CdZnTe) es el principal competidor del HPGe y representan la innovación más relevante en espectrometría gamma portátil

Ventajas:

- Trabajan a T^a ambiente
- Resolución superior a la de los detectores de centelleo
- Equipos compactos y ligeros, apropiados para despliegues móviles
- Puesta en marcha inmediata

Desventajas:

- Menor eficiencia para altas energías
- Coste ↑↑ a volúmenes elevados

Centelleadores (cristales):

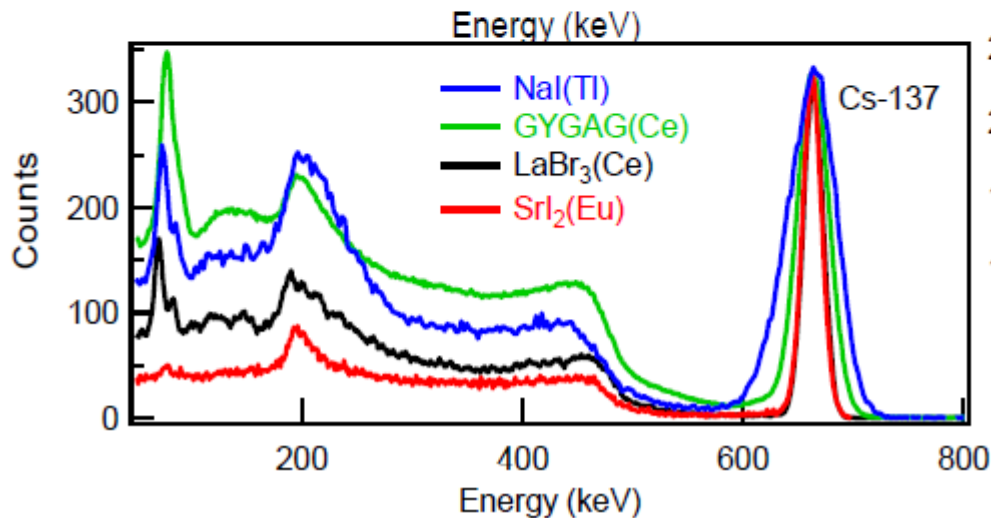
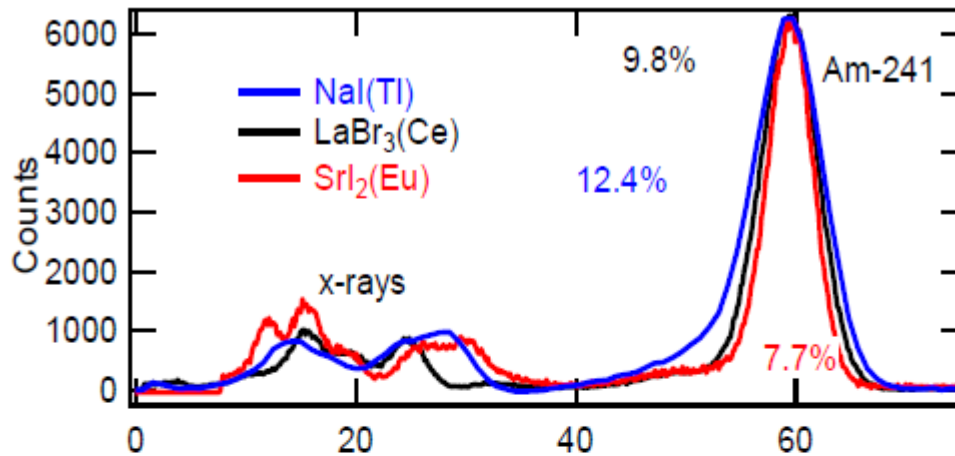
- NaI(Tl)
- CeBr₃
- LaBr₃

Aunque su resolución en energías es baja....

son válidos para la medida de baja actividad de espectros simples
Señal de respuesta rápida, apropiados para tasas de conteo elevadas

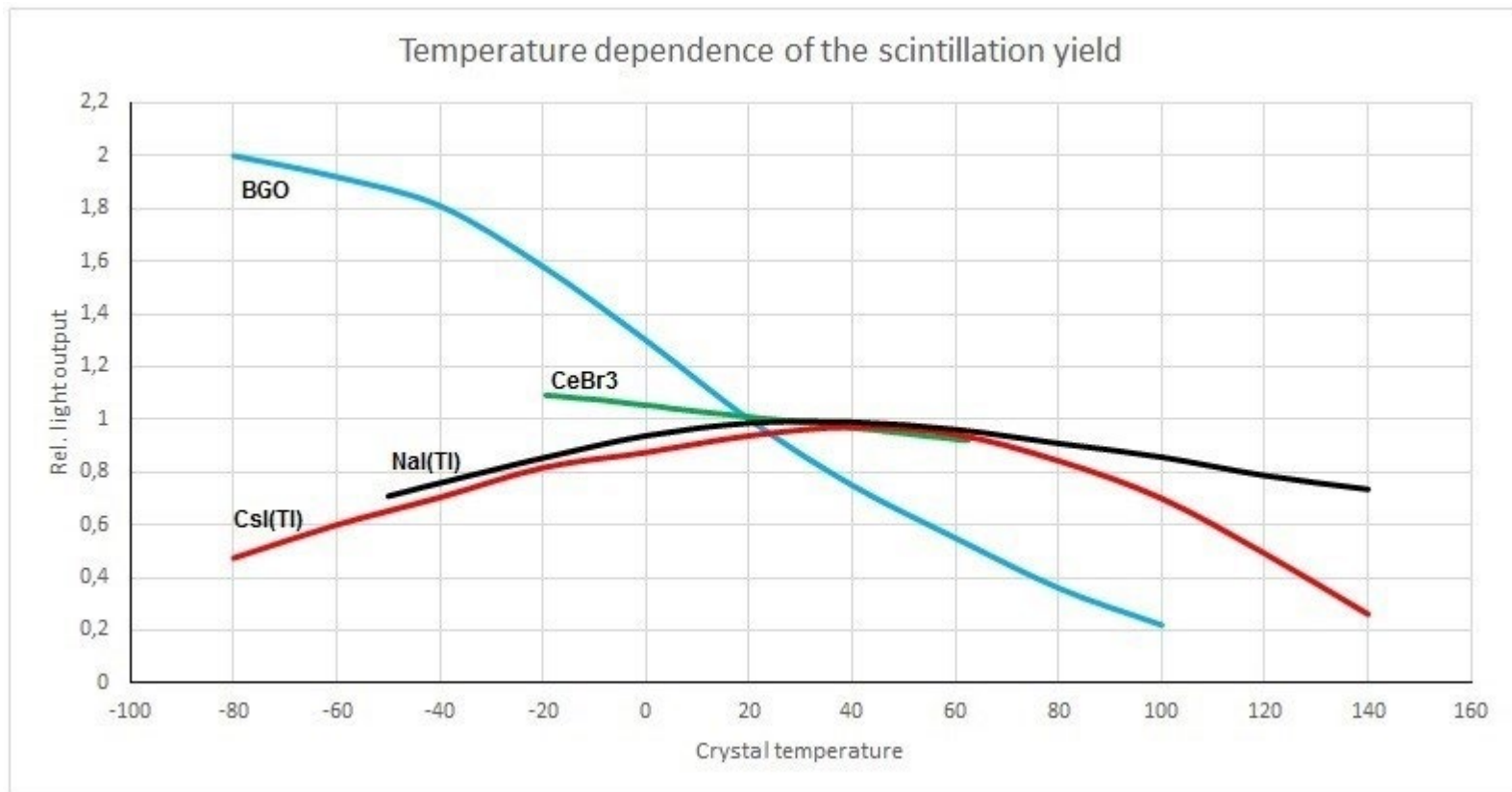
RETO: Incrementar su resolución manteniendo:

- **La linealidad de su respuesta (relación lineal entre energía depositada y luz emitida)**
- **Medida de actividad rápida**
- **Casi simetría de los picos**
- **Estabilidad termal**



Ref. Doc. LLNL -PRES-468519, 2011

Efectos de la temperatura





Tubos fotomultiplicadores
(SIEMENS Symbia)

Nal(TI):

Ventajas:

- Versatilidad (tamaño y geometrías)
- Eficiencia de detección ↑ ↑

Desventajas

- Resolución energética ↓↓
- Bajo temperaturas de trabajo diferentes (T^a ambientales), su respuesta es compleja
- Cristales higroscópicos (sellados para mantener un cierre hermético)
- Portabilidad reducida (no válidos para zonas de accesibilidad limitada o contaminación radiactiva)



Monitor NaI(Tl)



Detectores NaI(Tl)

LaBr₃:

Ventajas:

- Eficiencia de detección ↑ ↑
- Resolución energética ↑ ↑ (para ser un centelleador)
- Respuesta muy rápida, adecuado para medidas de campo
- De aplicación adecuada en lugares de acceso limitado

Desventajas:

- Cristales higroscópicos (encapsulados para mantener un cierre hermético)
- Tolerancia a la T^a y resistencia adecuada frente a la radiación
- **Fondo radiactivo intrínseco (La138)**
- Resolución en energías inferior a HPGe y CZT

CeBr₃:

Ventajas:

- Menor fondo intrínseco (LaBr₃) (Determinación de baja actividad)
- Muy adecuado como equipo portátil
- Respuesta muy rápida (medidas in-situ de campo)
- Tolerancia a la T^a y resistencia frente a la radiación
- Adecuados para lugares de acceso limitado

Desventajas

- Cristales higroscópicos (encapsulados)
- Resolución energética inferior a la del LaBr₃
- Coste superior a NaI(Tl)

Comparativa en resolución en energías

HPGe $\succ$ CZT $\approx$ LaBr₃ $\succ$ CeBr₃ $\succ$ NaI(Tl)

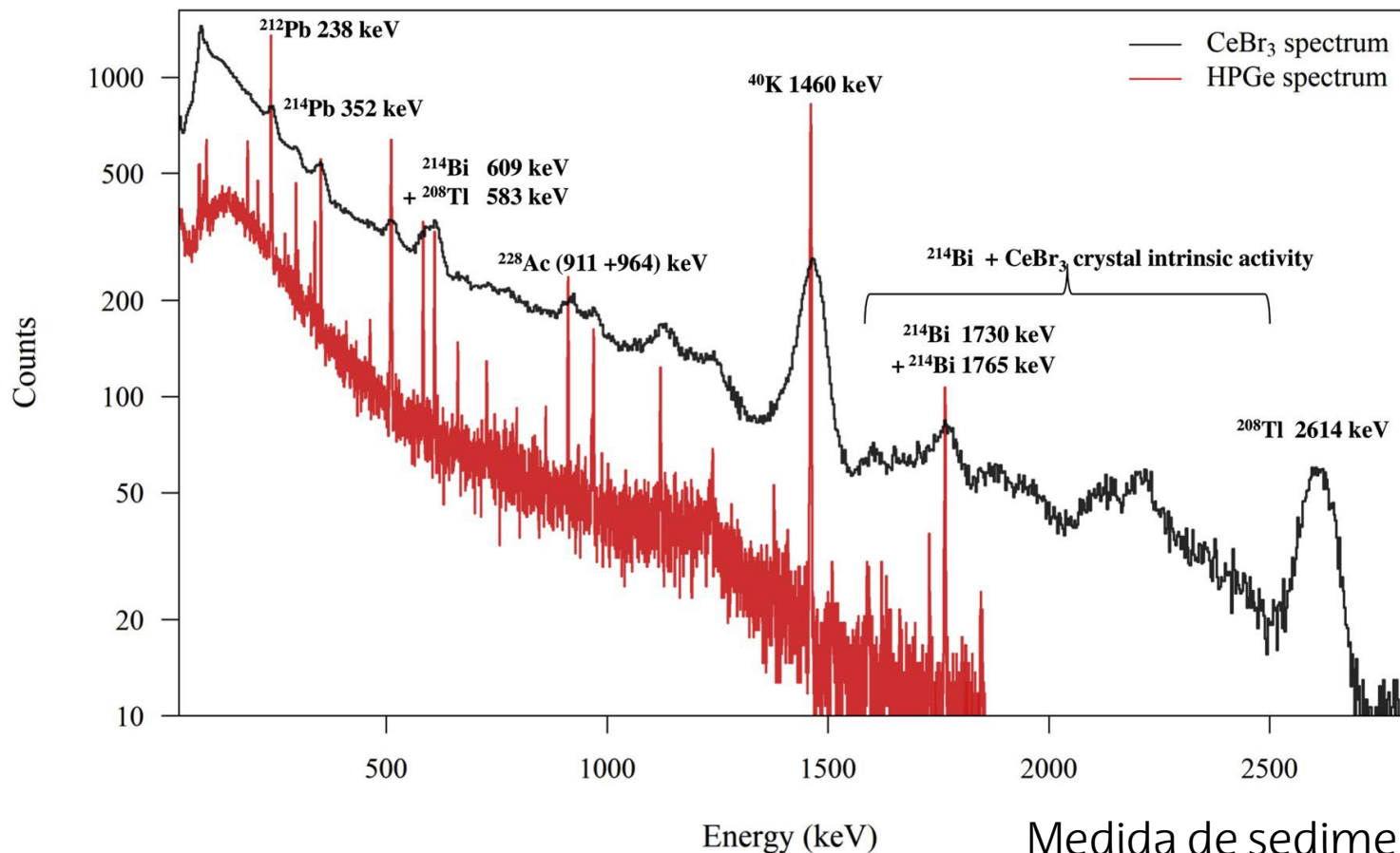
Comparativa en eficiencias (f (V, geometría, E_γ))

LaBr₃ $\succ$ CeBr₃ $\succ$ NaI(Tl) $\succ$ CZT $\succ$ HPGe

Comparativa en portabilidad

CZT (0.2 - 3.5 kg) y LaBr₃ (CeBr₃) (1.5 - 3.5 kg) lideran las aplicaciones móviles y de medida rápida (HPGe portátil (7-8 kg))

HPGe vs CeBr₃



Ref. Androurakaki et al., 2020

Medida de sedimentos
in-situ y laboratorio

HPGe vs CeBr₃

Ref. Idoeta et al., 2021

Medida de muestras ambientales
en el laboratorio

<i>Radionuclide</i>	<i>Energy in keV</i>	<i>1.5" x 1.5" CeBr₃ FWHM in keV</i>	<i>40% HPGe FWHM in keV</i>
²⁴¹ Am	59.54	8.02	0.76
¹⁰⁹ Cd	88.03	10.27	0.79
⁵⁷ Co	122.06	11.59	0.84
¹³⁹ Ce	165.86	13.61	0.88
²⁰³ Hg	279.2	18.94	1.02
¹¹³ Sn	391.7	22.64	1.13
⁸⁵ Sr	514	25.85	1.20
¹³⁷ Cs	661.66	30.75	1.33
⁸⁸ Y	898.04	35.11	1.54
⁶⁰ Co	1173.23	38.76	1.75
⁶⁰ Co	1332.49	42.66	1.86
⁸⁸ Y	1836.05	48.56	2.22

Resultados de la calibración
en energías

6. Comparativa

Tecnología	Resolución energética	Refrigeración	Eficiencia	Velocidad	Portabilidad	Aplicaciones principales
HPGe (Germanio hiperpuro)	Excelente ($\approx 0,1-0,3\%$)	Sí (eléctrica o LN)	Baja	Media	Baja	laboratorios nucleares, control radiológico de alta precisión y caracterización de residuos radiactivos
CZT (CdZnTe)	Muy alta ($\approx 0,8-2,5\%$)	No	Media	Alta	Muy alta	Seguridad nuclear. Inspección en campo. Drones y sistemas autónomos.
LaBr₃	Alta ($\approx 2-3\%$)	No	Muy alta	Muy alta	Alta	Vigilancia radiológica Monitorización ambiental, (identificación rápida)
CeBr₃	Alta ($\approx 3-4\%$)	No	Muy alta	Muy alta	Alta	Detección portátil, Prospección geológica

Inteligencia artificial y análisis automático:

- Identificación automática de radionúclidos.
- Reducción de anomalías
- Corrección espectral inteligente.
- Reducción del tiempo de adquisición.
- Modelado predictivo de espectros.

Sistemas híbridos

Integración de múltiples detectores para optimizar sensibilidad y discriminación isotópica. Cada vez son más frecuentes las combinaciones:

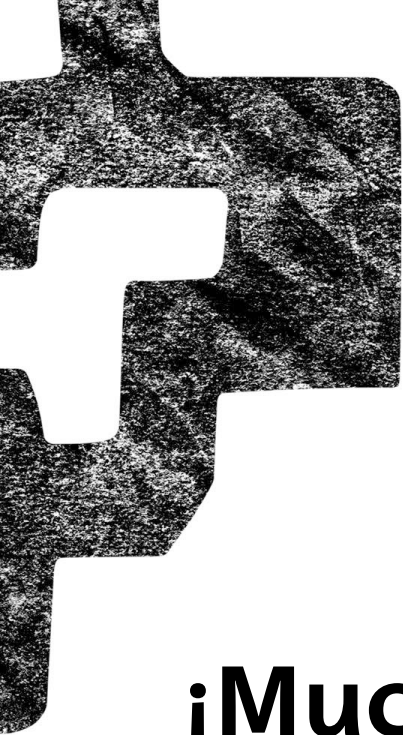
- HPGe + LaBr₃
- LaBr₃+ CeBr
- CZT multielemento

Portabilidad de la Instrumentación:

La tendencia dominante del mercado es disponer de:

- Menor peso.
- Mayor autonomía.
- Comunicación inalámbrica.
- Identificación isotópica en tiempo real

No existe una solución única; HPGe sigue siendo referencia, mientras CZT y LaBr3 ganan protagonismo para la realización de medidas de campo.



¡Muchas gracias por su atención!

Comparativa entre nuevos sistemas de Espectrometría Gamma

XIII Jornadas sobre la Calidad en el Control de la Radiactividad Ambiental
Santander, 2 - 5 de junio de 2026



Ingeniaritza
Energetikoa
Saila
Departamento
de Ingeniería
Energética