

INVESTIGACIÓN EN EL AULA 2025-2026

MINERALES Y ROCAS QUE HABLAN

¿Qué historia nos cuenta su radiactividad?



CENTRO: IES MANUEL DE FALLA(Maracena)

ÍNDICE

1.- Resumen.	2
2.- Introducción y justificación.	2
2.1.- Preguntas de investigación.	3
3.- Objetivos.	3
3.1.- Objetivo general.	3
3.2.- Objetivos específicos.	3
4.- Fundamento teórico.	4
4.1.- El detector Minipix Edu y el sensor Timepix.	4
4.2.- Radiactividad natural.	5
4.3.- Sustitución isomórfica en el apatito.	5
4.4.- Mecanismo de emisión en la moscovita.	5
4.5.- Equilibrio secular.	6
5.- Metodología.	6
5.1.- Instrumental.	6
5.2.- Protocolo de medida.	7
5.3.- Valores de referencia: radiación de fondo.	7
6.- Resultados.	8
6.1.- Minerales.	8
6.2.- Rocas.	11
7.- Discusión: Conexión mineral → roca.	15
8.- Evaluación de riesgo radiológico.	16
8.1.- Estimación de dosis.	16
8.2.- Escenarios de exposición.	16
8.3.- Recomendaciones para el centro.	16
9.- Conclusiones.	17
10.- Bibliografía y webgrafía.	18

1.- Resumen.

En este proyecto se ha investigado la radiactividad natural de 15 minerales y 7 rocas de la colección que tenemos en el laboratorio de ciencias del IES Manuel de Falla de Maracena (Granada). Se ha utilizado para ello el detector Minipix Edu. Este es un detector de partículas basado en la tecnología Timepix desarrollado por el CERN. En el trabajo se ha aplicado el método científico para responder a tres preguntas: si los minerales y rocas que tenemos en el laboratorio emiten una radiactividad significativa, cuál es el origen físico y geoquímico de esta radiactividad, y si existe algún riesgo para el alumnado y profesorado del centro educativo que usa el laboratorio.

Los resultados obtenidos muestran que la moscovita es el mineral más radiactivo de la colección seguida del apatito. En el caso de las rocas, el granito es el que presenta la mayor actividad, el gneis presenta el mismo patrón pero más atenuado por estar metamorfozado. El basalto también presenta radiactividad pero en este caso no hay señal de radiación gamma.

La emisión del apatito se explica por la sustitución isomórfica del ion Ca^{2+} por U^{4+} , esto es posible por su similitud de radios iónico (1,00-1,12 Å según número de coordinación, Shannon 1976). La moscovita combina dos fuentes independientes: el ^{40}K intrínseco a su composición y cadenas de U/Th en defectos de red. El equilibrio secular garantiza que el Minipix detecta toda la cadena de desintegración simultáneamente.

La evaluación de riesgos nos indica que la dosis estimada en condiciones normales de laboratorio es inferior a 50 $\mu\text{Sv/año}$, despreciable frente a los 2400 $\mu\text{Sv/año}$ de radiación de fondo natural en España.

2.- Introducción y justificación.

El laboratorio de ciencias del IES Manuel de Falla contiene una colección de minerales y rocas acumulada a lo largo de los años. El potencial didáctico de esta colección es muy grande pero también plantea ciertas preguntas sobre la seguridad en su manipulación sabiendo que determinados minerales presentan niveles significativos de radiactividad natural de origen primordial.

La radiactividad natural está documentada en numerosos minerales de uso habitual en la docencia: apatitos, circones, moscovitas, granitos, y rocas metamórficas, entre otros. Sin embargo, esta realidad rara vez se incorpora al currículo de educación secundaria de forma experimental y cuantitativa.

Este proyecto nació del préstamo que hizo el Parque de la Ciencias de Granada y durante su uso en el aula surgieron unas preguntas: ¿emiten radiactividad los minerales y rocas que tenemos en el centro? ¿son seguros para el alumnado y profesorado la manipulación de estas muestras? Para responderla de forma rigurosa y reproducible se aplicó el método científico, utilizando el detector Minipix Edu prestado por el Parque de las Ciencias. El Minipix Edu es un instrumento de medición de partículas ionizantes

basado en tecnología del CERN que permite clasificar los tipos de partículas (alfa, beta, muones y dots) a partir de la morfología de las trazas que deja en su sensor de silicio. Este proyecto de investigación genera datos experimentales propios, los contrasta con la teoría física y mineralógica, establece conexiones entre los resultados de minerales y rocas, y concluye con recomendaciones prácticas de seguridad para el centro educativo.

2.1.- Preguntas de investigación.

Las preguntas que nos hemos planteado en el siguiente proyecto de investigación son las siguientes:

1. ¿Emiten radiación los minerales y rocas que tenemos en el instituto por encima del fondo natural?
2. ¿Cuál es el mecanismo físico y geoquímico que produce esa emisión?
3. ¿Qué nivel de riesgo representa para el alumnado y profesorado que asiste al laboratorio?

3.- Objetivos.

3.1.- Objetivo general.

El objetivo general planteado es detectar, cuantificar e interpretar la radiactividad natural emitida por los minerales y rocas que hay en el IES Manuel de Falla, utilizando para ello el detector Minipix Edu, como herramienta de medición y obtención de datos experimentales, y emitir recomendaciones prácticas para una manipulación segura en el laboratorio.

3.2.- Objetivos específicos.

Los objetivos específicos planteados son los siguientes:

- Medir la radiación alfa, beta, muones y dots de una selección de 15 minerales y 7 rocas utilizando el detector Minipix Edu.
- Comparar los resultados con la radiación de fondo medida y calcular factores de elevación para determinar qué muestras presentan actividad significativa.
- Identificar los isótopos y mecanismos geoquímico responsables de la emisión en cada mineral que emite radiación.
- Establecer la relación entre la actividad de los minerales y de las rocas que los contienen, como validación cruzada del experimento.
- Evaluar el riesgo radiológico para el personal que asiste al laboratorio y formular recomendaciones de uso seguro basadas en datos comparativos.
- Contribuir al uso didáctico de la colección añadiendo contenidos de física nuclear a los propios de la materia de geología.

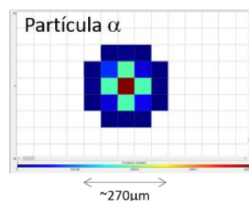
4.- Fundamento teórico.

4.1.- El detector Minipix Edu y el sensor Timepix.

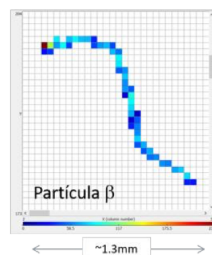
El Minipix Edu es un detector de partículas alfa, beta, muones y dots basada en la tecnología Timepix desarrollado en el CERN. Consiste en un sensor de silicio de 256×256 píxeles que registra la energía depositada por las partículas y la morfología de la traza que producen en el sensor, lo cual permite distinguir los siguientes tipos de partículas.



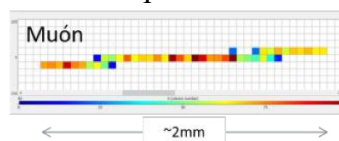
- **Partículas alfa (α):** muestra trazas cortas y compactas. Son núcleos de He-4 emitidos con energía de 4-9 MeV. Su alcance en el aire es de aproximadamente 5 cm. Su factor de ponderación biológico es $\times 20$.



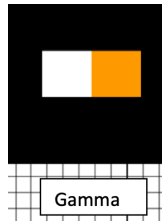
- **Partículas beta (β):** muestra trazas largas y sinuosas. Son electrones rápidos y son más penetrantes que las partículas alfas. Su factor de ponderación biológico es $\times 1$.



- **Muones (μ) cósmicos:** muestra trazas largas y rectas. Estas partículas proceden de la radiación cósmica. Su factor de ponderación biológico es $\times 1$.



- **Dots (radiación gamma, rayos X y otras partículas):** muestra puntos únicos en el sensor. Es radiación electromagnética muy penetrante. Su factor de ponderación biológico es $\times 1$.



4.2.- Radiactividad natural.

Los materiales de origen natural pueden contener isótopos radiactivos primordiales, presentes desde la formación del sistema solar. Los más relevantes en mineralogía son:

- **^{238}U** : tiene una vida media de 4,468 Ma. Se desintegra en cadena a través de 14 isótopos intermedios emitiendo 8 partículas α y 6 β hasta llegar al isótopo ^{206}Pb estable.
- **^{232}Th** : tiene una vida media de 14050 Ma. Se desintegra en cadena a través de 10 isótopos intermedios emitiendo 6 partículas α y 4 β hasta llegar al isótopo ^{206}Pb estable.
- **^{40}K** : tiene una vida media de 1250 Ma. El 0,012% del potasio natural es ^{40}K . Decae emitiendo partículas β y radiación γ de 1,46 MeV (11 %).

4.3.- Sustitución isomórfica en el apatito.

El apatito $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH})]$ concentra U y Th por sustitución isomórfica: el U^{4+} y el Ca^{2+} tienen radios iónicos muy similares (1,00 Å y 1,12 Å respectivamente, para número de coordinación CN=8, según Shannon 1967), dentro del margen de tolerancia de las reglas de Goldschmidt (< 15 % de diferencia). Esto permite que la red cristalina del apatito acepte U^{4+} en las posiciones del Ca^{2+} sin deformarse.

El Th^{4+} (1,05 Å) también puede sustituir al Ca^{2+} de forma similar.

Este proceso ocurrió durante la cristalización del mineral hace millones o cientos de millones de años, quedando el U y el Th atrapados en la estructura desde entonces.

4.4.- Mecanismo de emisión en la moscovita.

La moscovita $[\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2]$ presenta dos fuentes de radiación completamente independientes:

- Fuente 1 - ^{40}K intrínseco: El potasio es un elemento constitutivo de la moscovita (radio iónico del K^+ : 1,38 Å). El 0,012% del potasio natural es el isótopo radiactivo K-40, que emite partículas β y radiación γ de 1,46 MeV. Toda la moscovita es inherentemente radiactiva, sin necesidad de ningún proceso de contaminación o incorporación.
- Fuente 2 – U y Th en defectos de red: A diferencia del apatito, el K^+ (1,38 Å) no puede ser sustituido directamente por U^{4+} (1,00 Å) por exceso de diferencia de

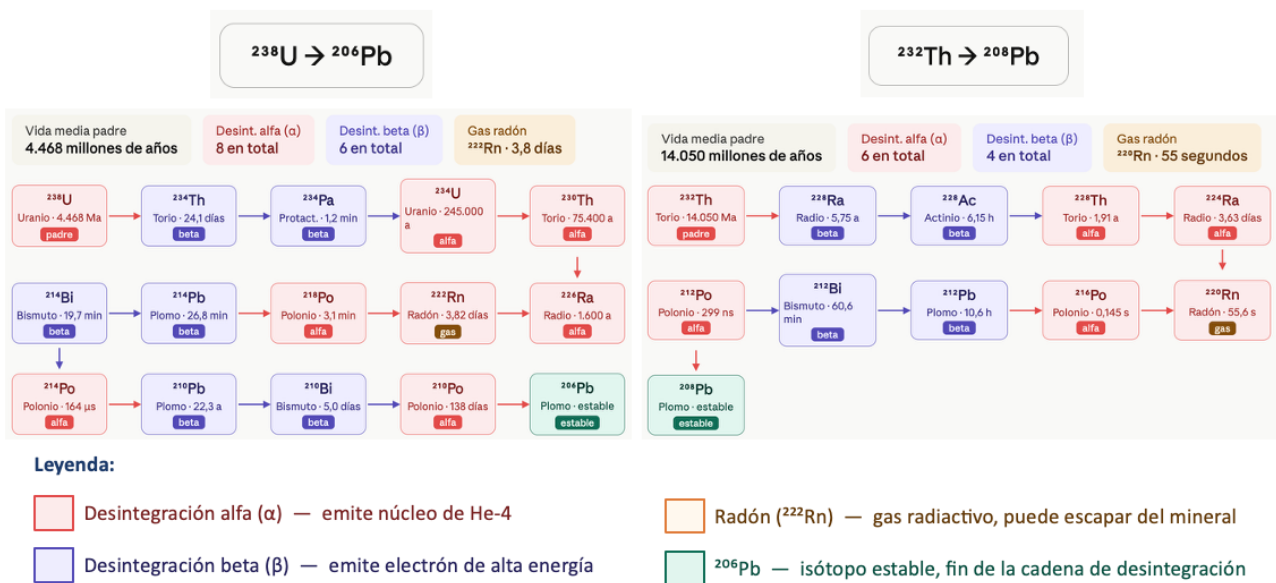
radio. Sin embargo, el U y Th quedan atrapados en defectos cristalinos, dislocaciones de la red laminar y microinclusiones de minerales accesorios entre las capas. Las cadenas de desintegración del ^{238}U y el ^{232}Th generan emisión alfa, beta y gamma adicional.

La coexistencia de estas dos fuentes independientes explica que la moscovita sea el mineral más activo de la colección, con una señal alfa 13,25 superior a la de la radiación de fondo.

4.5.- Equilibrio secular.

Cuando un mineral permanece sin alterarse durante un tiempo superior a varios tiempos de vida media del isótopo más longevo de la cadena, todos los isótopos intermedios, alcanzan el equilibrio secular: su actividad (desintegraciones por segundo) es idéntica a la del isótopo padre. En este estado, todos los isótopos de la cadena emiten partículas simultáneamente a la misma tasa.

Esto explica por qué el Minipix Edu detecta partículas alfa, beta y radiación gamma al mismo tiempo al analizar el apatito: no ves solo el uranio-238 sino toda la cadena en equilibrio, con sus ocho partículas Alpha y seis partículas betas, emitiendo de forma simultánea.



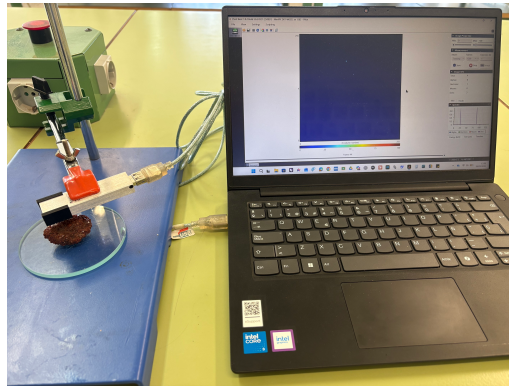
5.- Metodología.

5.1.- Instrumental.

Los recursos utilizados para llevar a cabo el proyecto fueron los siguientes:

- **Detector:** Minipix Edu.
- **Software de análisis:** Pixet Pro (Advacam) y software de diseño propio para tratar los datos.

- **Condiciones ambientales:** temperatura ambiente del laboratorio ($\sim 20^{\circ}\text{C}$), sin apantallamiento adicional.



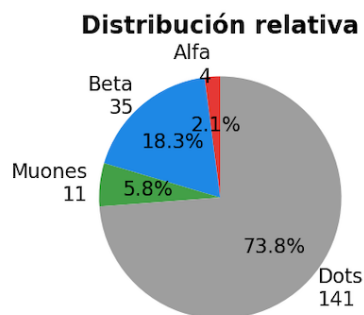
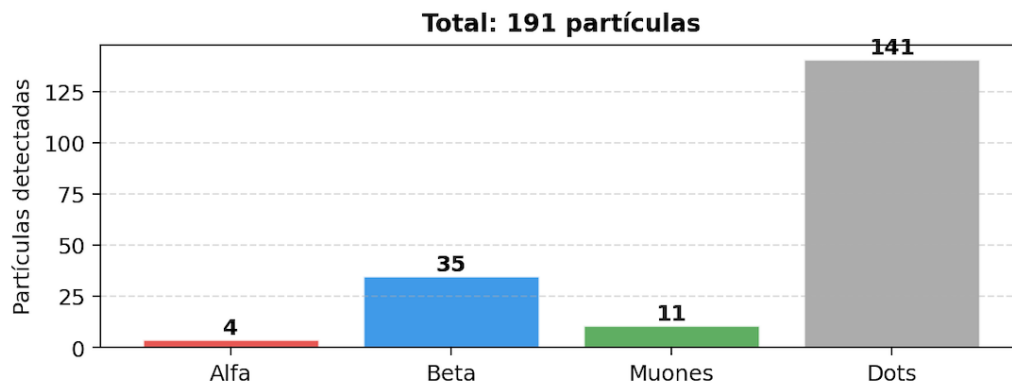
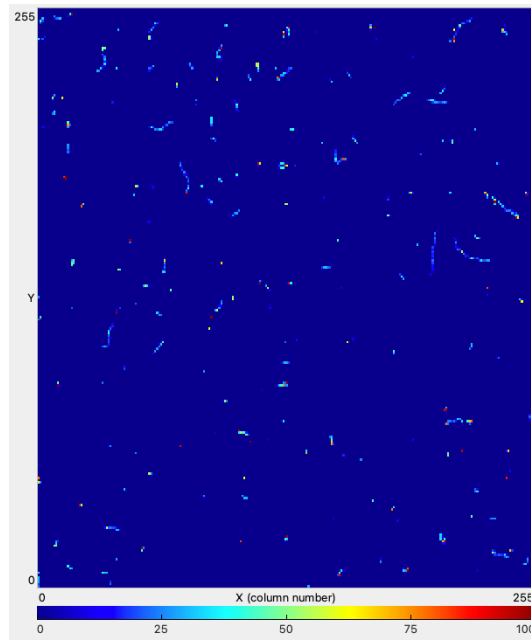
5.2.- Protocolo de medida.

Para realizar el análisis de las muestras se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- **Paso 1 - Medición de la radiación de fondo:** sin ninguna muestra presente. Establece la línea base de referencia para partículas alfa, beta, muones y dots (γ/X).
- **Paso 2 - Análisis de minerales:** se analizaron 15 minerales de la colección, individualmente, en las mismas condiciones: misma distancia, sensor-muestra (0,5 cm) y mismo tiempo de exposición (30 minutos).
- **Paso 3 - Análisis de rocas:** se analizaron siete rocas del laboratorio (granito, gneis, basalto, cuarcita (3 muestras) y mármol) en las mismas condiciones anteriores.
- **Paso 4 - Cálculo del factor de elevación:** $\text{factor} = (\text{conteo muestra}) / (\text{Conteo, fondo})$. Se considera actividad significativa cuando el factor supera 1,5 en algún tipo de emisión la radiación de fondo.

5.3.- Valores de referencia: radiación de fondo.

Los valores que se obtuvieron al medir la radiación de fondo en el laboratorio fueron:



6.- Resultados.

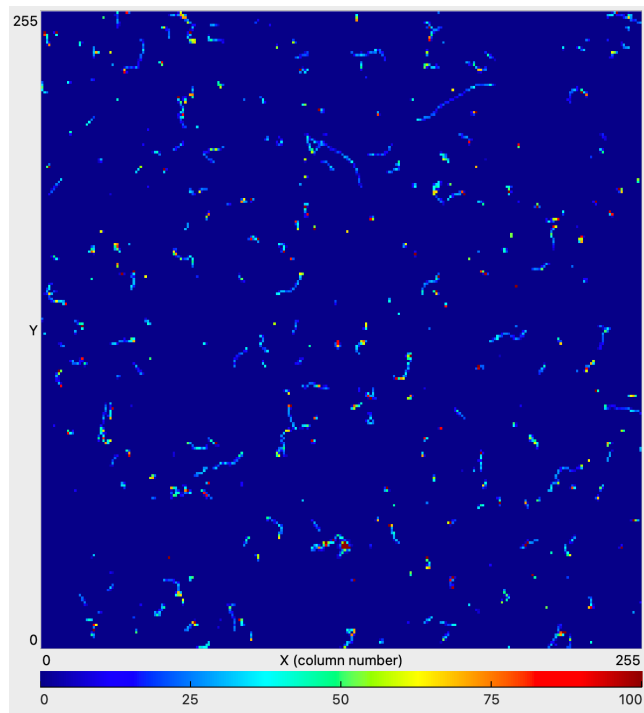
6.1.- Minerales.

La tabla siguiente recoge los resultados de los 15 minerales analizados. Se destacan en mayúsculas los minerales con actividad significativa.

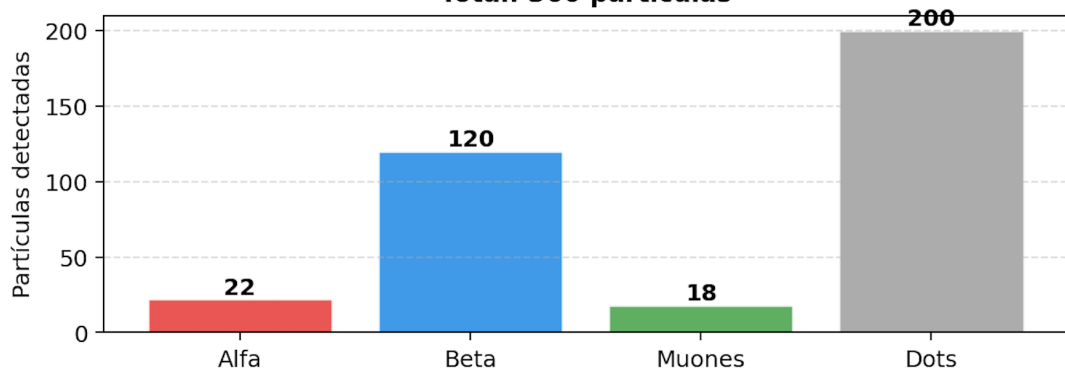
Mineral	Alfa	×fondo	Beta	×fondo	Muones	Dots (γ)	×fondo
Fondo (ref.)	4	—	35	—	11	141	—
APATITO	44	×11,0	196	×5,6	27	308	×2,2
MOSCOVITA	53	×13,25	100	×2,9	27	240	×1,7
Apofilita	5	×1,3	28	×0,8	7	159	×1,1
Aragonito	4	×1,0	28	×0,8	7	159	×1,1
Azurita	7	×1,8	45	×1,3	13	139	×1,0
Bauxita	8	×2,0	50	×1,4	8	146	×1,0
Berilo	7	×1,8	38	×1,1	12	152	×1,1
Crisocola	8	×2,0	52	×1,5	13	132	×0,9
Cuarzo (jacinto)	6	×1,5	32	×0,9	12	132	×0,9
Cuarzo	9	×2,3	29	×0,8	6	134	×1,0
Espejuelo	5	×1,3	34	×1,0	8	128	×0,9
Pirita	10	×2,5	42	×1,2	9	125	×0,9
Turmalina	3	×0,75	29	×0,8	10	133	×0,9
Yeso especular	10	×2,5	56	×1,6	8	135	×1,0

Hallazgos observados en los minerales:

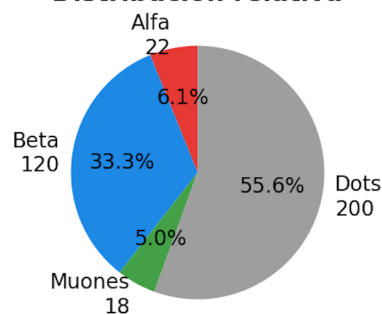
- Moscovita: es el mineral más radiactivo de la colección. Su emisión alfa supera incluso la del apatito. Se debe a la combinación de potasio-40 intrínseco del mineral y las emisiones de las series radiactivas del U/Th incrustados en defectos de red. Este resultado inesperado constituyó la mayor sorpresa del proyecto.



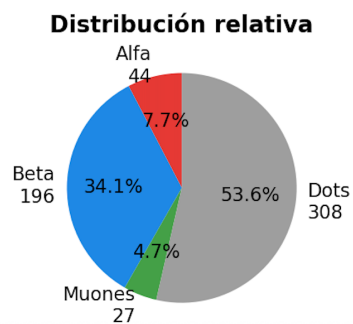
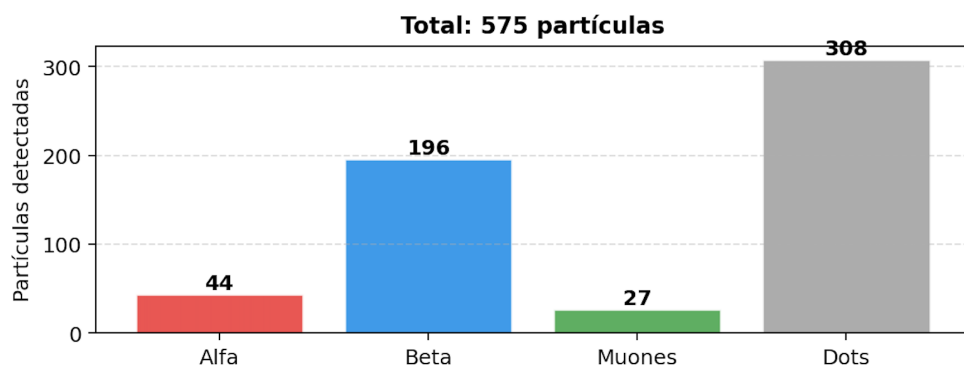
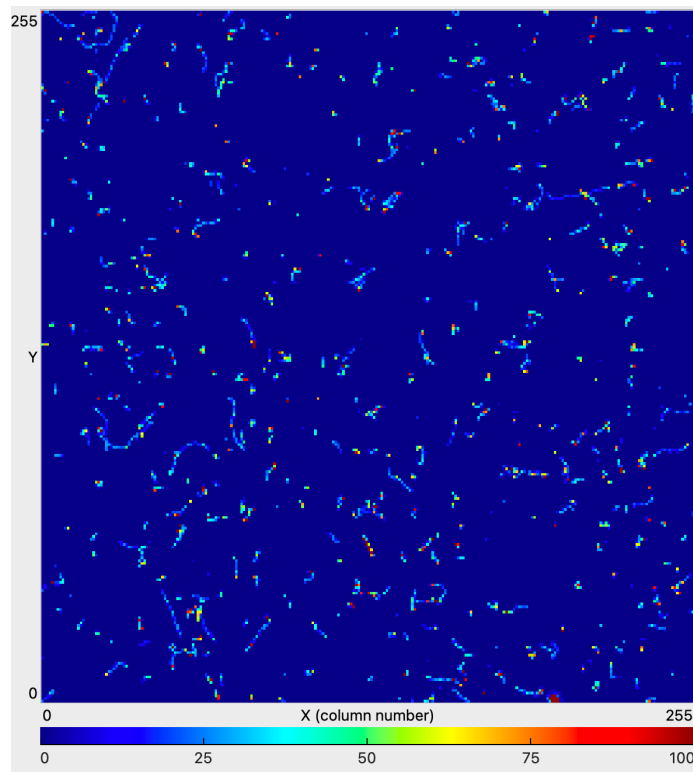
Total: 360 partículas



Distribución relativa



- Apatito: presenta emisión alfa, beta y gamma a la vez, característico del equilibrio secular de las cadenas de uranio-238 y torio-232. Destaca especialmente en radiación beta.



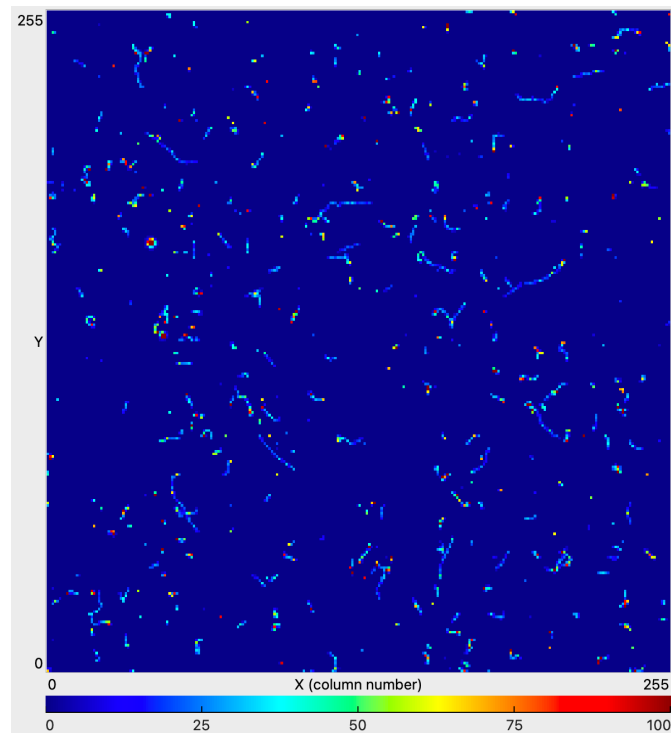
6.2.- Rocas.

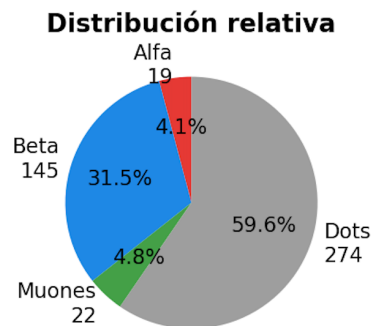
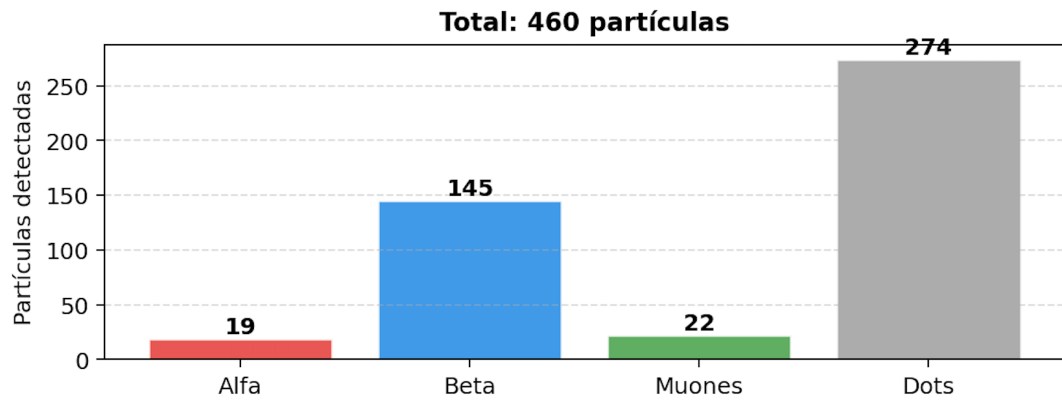
La tabla siguiente recoge los resultados de las 7 rocas analizadas. Se destacan en mayúsculas las rocas con actividad significativa.

Roca	Alfa	×fondo	Beta	×fondo	Muones	Dots (γ)	×fondo
Fondo (ref.)	9	—	31	—	8	131	—
GRANITO	19	×2,1	145	×4,7	22	274	×2,1
GNEIS	18	×2,0	84	×2,7	24	214	×1,6
BASALTO	22	×2,4	64	×2,1	14	145	×1,1
Mármol	5	×0,6	28	×0,9	11	123	×0,9
Cuarcita 1	11	×1,2	19	×0,6	10	130	×1,0
Cuarcita 2	11	×1,2	32	×1,0	9	162	×1,2
Cuarcita 3	11	×1,2	20	×0,6	11	162	×1,2

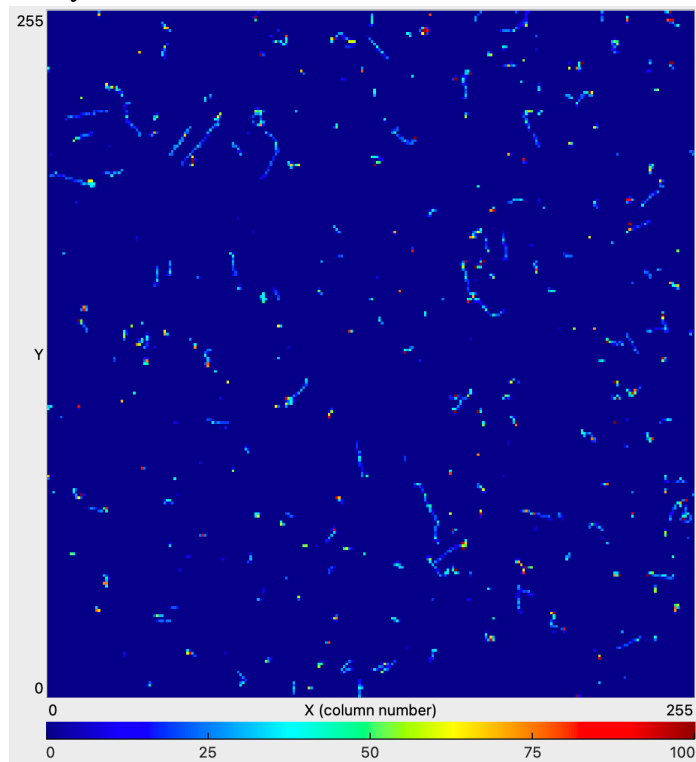
Hallazgos observados en las rocas:

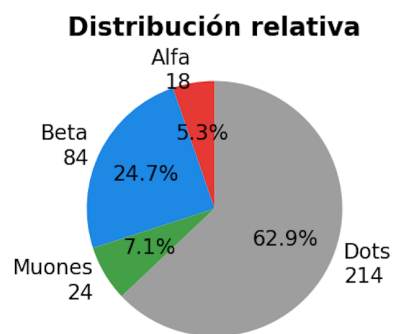
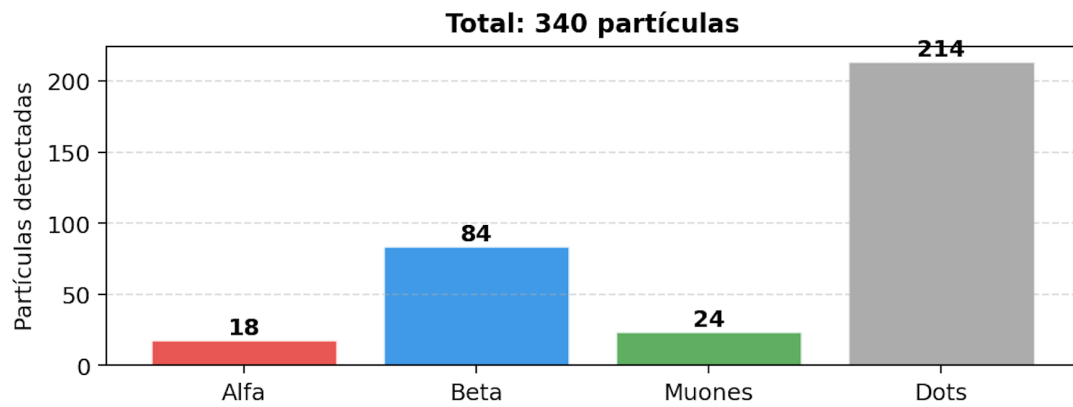
- Granito: Es la roca más que más emisiones presenta, con señal beta y gamma muy elevadas. Su fuente de radiación es doble: por un lado el potasio-40 del feldespato de potasio (KAlSi_3O_8) y por otro las cadenas de U/Th de los minerales accesorios (apatito, circón, monacita). Presenta el mismo mecanismo de emisión que la moscovita.



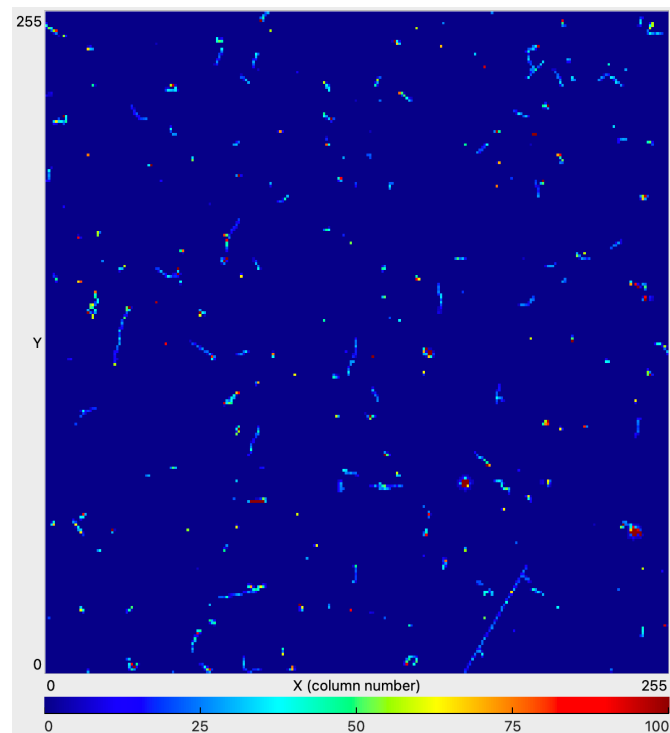


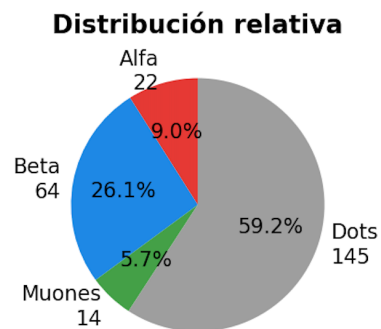
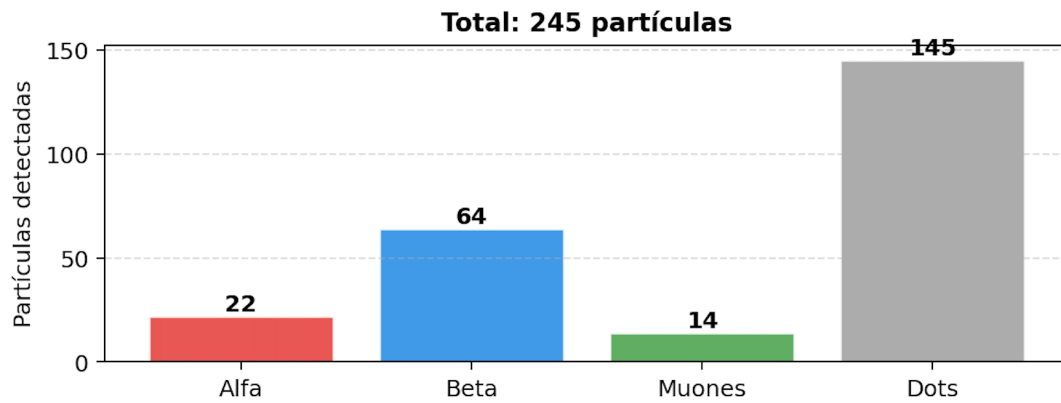
- Gneis: tiene el mismo patrón de emisiones que el granito, pero con valores más bajos. Es granito metamorfozado, por lo que el metamorfismo redistribuyó parcialmente el U y el Th sin eliminarlos.





- Basalto: presenta emisión de partículas alfa y beta elevadas. Al ser pobre en potasio (roca máfica sin feldespatos de potasio) no hay señal de potasio-40. Los óxidos de hierro y titanio (ilmenita y magnetita) incorporan trazas de U y Th siendo estos los responsables de las emisiones.





7.- Discusión: Conexión mineral → roca.

Uno de los resultados más valiosos del proyecto es la relación entre las rocas y minerales estudiados. La actividad de una roca puede predecirse y explicarse a partir de los minerales que la componen.

En la siguiente tabla se muestra dicha relación.

Mineral analizado	Emisión detectada	→	Roca equivalente	Resultado en roca
Apatito + Moscovita	$\alpha \times 11 / \times 13,25 \cdot$ $\beta \times 5,6 / \times 2,9 \cdot \gamma \times 2,2 / \times 1,7$	→	Granito	$\beta \times 4,7 \cdot \gamma \times 2,1$
Cuarzo	Inactivo (= fondo)	→	Cuarcita (×3)	Inactivo (= fondo)
Moscovita (⁴⁰K)	$\beta \times 2,9 \cdot \gamma \times 1,7 \cdot K$ radiactivo intrínseco	→	Granito felds.K	γ dominante $\times 2,1$
Apatito + Moscovita (presentes en gneis)	Mismos minerales activos · metamorfismo redistribuye U/Th	→	Gneis	$\beta \times 2,7$ (vs $\times 4,7$)

8.- Evaluación de riesgo radiológico.

8.1.- Estimación de dosis.

La dosis que recibe una persona por presencia habitual en el laboratorio con las muestras guardadas en vitrina es completamente despreciable en comparación con la radiación de fondo.

Fuente de dosis	Dosis estimada
Fondo natural España (media)	~2.400 $\mu\text{Sv/año}$
Radiación cósmica adicional (altitud Granada)	~100 $\mu\text{Sv/año}$ adicionales
Radiografía dental	~100 $\mu\text{Sv/exposición}$
Vuelo transatlántico	~40–80 $\mu\text{Sv/vuelo}$
Consumo de plátanos un año (^{40}K natural)	~36 $\mu\text{Sv/año}$
Apatito en vitrina a ~1 metro (estimación)	< 50 $\mu\text{Sv/año}$

8.2.- Escenarios de exposición.

Escenario	Nivel de riesgo	Recomendación
En vitrina cerrada	Despreciable	Sin precauciones especiales
Coger la muestra con las manos	Muy bajo	Lavarse las manos después
Manipulación frecuente	Bajo	Guantes de nitrilo
Mineral fragmentado o en polvo	Moderado	Bolsa hermética · mascarilla FFP2
Ingestión o inhalación de polvo	Alto	Evitar completamente

8.3.- Recomendaciones para el centro.

- **Conservación y señalización:** mantener las muestras que emiten en vitrinas con etiquetas identificativas como materiales NORM (materiales radiactivos de origen natural).
- **Manipulación:** es necesario el uso de guantes a la hora de la manipulación de estos materiales y lavarse las manos siempre al finalizar su uso.

- **Fragmentación:** si las muestras están fragmentadas o en polvo es necesario el uso de mascarillas FFP2. Es conveniente conservar estas muestras en bolsas herméticas si están en polvo, fragmentadas o deterioradas.
- **No retirar:** no es necesario retirar ninguna de las muestras del laboratorio ya que son unos recursos didácticos muy buenos y tomando las medidas de seguridad necesarias son inocuos.
- **Comunicar:** informar a la dirección del centro de los resultados obtenidos y de las medidas de seguridad que se deben llevar a cabo.

9.- Conclusiones.

- **Conclusión 1 – Emisión detectada.**

De los 15 minerales analizados, solo el apatito y la moscovita presentan actividad significativa y consistente. La moscovita, con un factor de elevación alfa de 13,25, es el mineral más radiactivo de la colección, superando al apatito (factor de elevación alfa de 11,0). El granito es una roca más activa (factor de elevación beta de 4,7).

- **Conclusión 2 – Origen de la radiación.**

En el apatito, la emisión se debe a la sustitución isomórfica del uranio que ocupa el lugar del calcio debido a la similitud de sus radios iónicos (Shanon, 1976). Las cadenas de desintegración del uranio-238 y del torio-232 en equilibrio secular generan partículas alfa, beta y radiación gamma simultáneamente.

En la moscovita actúan dos fuentes independientes de emisión de partículas: el potasio-40 propio de su composición química (0,012 % del potasio natural) y las partículas de U/Th que se encuentran en defectos de red.

- **Conclusión 3 - Conexión mineral → roca.**

La radiactividad de una roca puede predecirse y explicarse teniendo en cuenta los minerales que la componen. Los datos de los experimentos con minerales y rocas son coherentes con estas relaciones. Las emisiones del apatito y la moscovita predicen las emisiones del granito. Estos mismos minerales, redistribuidos por el metamorfismo en el gneis, explican su menor actividad frente al granito.

- **Conclusión 4 – Seguridad.**

La dosis estimada para el personal que entra en el laboratorio de forma habitual teniendo los minerales y rocas en vitrinas es inferior al 50 $\mu\text{Sv/año}$. Este valor es menor que la recibida por comer dos plátanos al día y despreciable si lo comparamos a los 2400 $\mu\text{Sv/año}$ que se recibe del fondo natural en España. Por esta razón no es necesario retirar estos materiales del laboratorio. Se estima que manteniendo los materiales en vitrinas y usando guantes para su manipulación el riesgo es despreciable. Se considera que estos materiales constituyen un recurso didáctico extraordinario pero debe conservarse, manipularse y aprovecharse de la forma adecuada.

10.- Bibliografía y webgrafía.

Libros y artículos científicos

- Knoll, G.F. (2010). Radiation Detection and Measurement (4ª ed.). John Wiley & Sons.
- Faure, G. & Mensing, T.M. (2005). Isotopes: Principles and Applications (3ª ed.). John Wiley & Sons.
- Deer, W.A., Howie, R.A. & Zussman, J. (2013). An Introduction to the Rock-Forming Minerals (3ª ed.). Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.
- Shannon, R.D. (1976). Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. Acta Crystallographica, A32, 751–767.
- Llopart, X. et al. (2007). Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 581, 485–494.
- ICRP Publication 103 (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP 37(2-4). Elsevier.
- Consejo de Seguridad Nuclear (2022). Materiales de origen natural con contenido significativo en radionucleidos naturales (NORM). csn.es

Recursos web

- IAEA Live Chart of Nuclides: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>
- Organización Mundial de la Salud — Radón y salud: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>
- WebElements — Radios iónicos de Shannon: https://www.webelements.com/periodicity/ionic_radius/
- Advacam Minipix: <https://advacam.com/camera/minipix/>
- Consejo de Seguridad Nuclear — Radiactividad natural: <https://www.csn.es>