



Muografía de scattering para exploración mineral: estudio de resolución y usos de un hodoscopio de muones en depósitos minerales

Luisa Maria Sanchez Rhenals

Escuela de particulas 2026

Índice

1 Estudios previos

2 Motivación

3 El detector

4 Metodología de
reconstrucción

5 Escenarios de
simulación

6 Resultados
relevantes

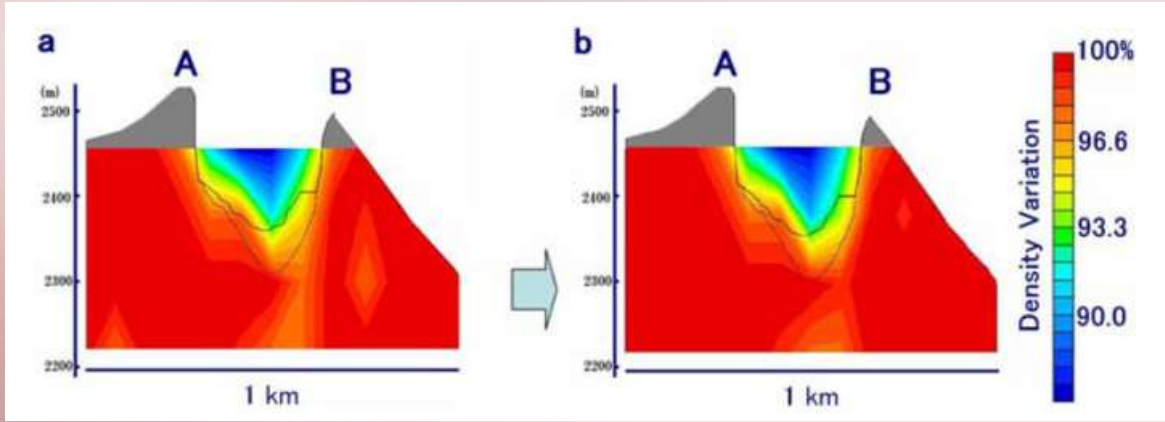
7 Conclusiones

8 Trabajo futuro

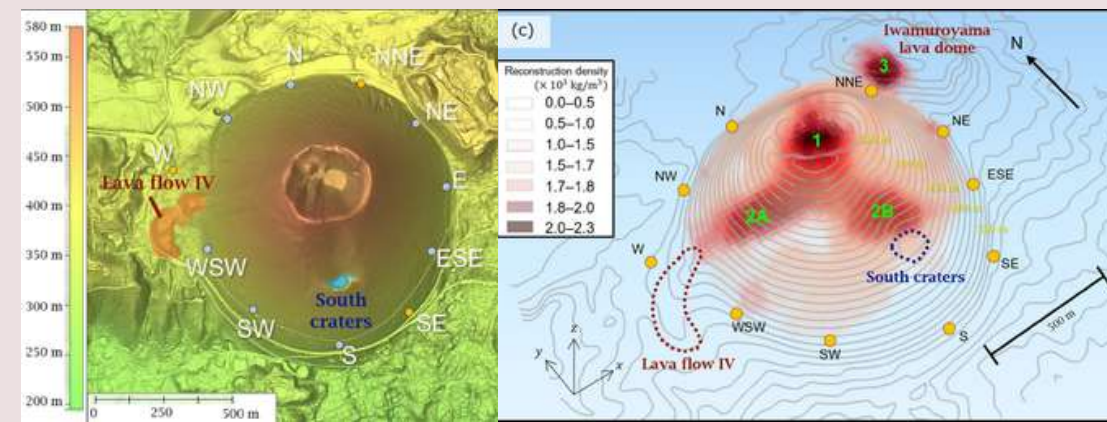
Muografía en geociencias

Al rededor del mundo

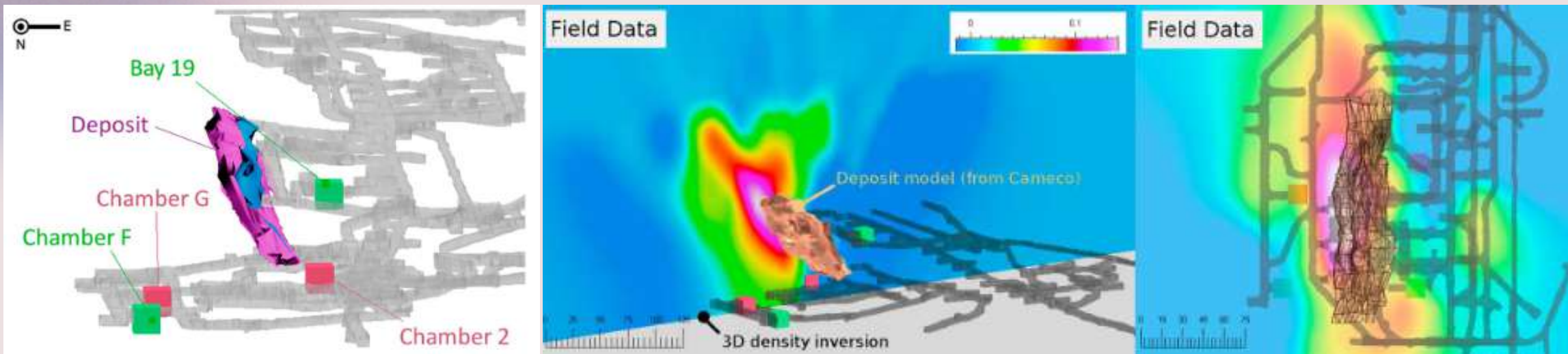
Tomado de [1]



Tomado de [2]



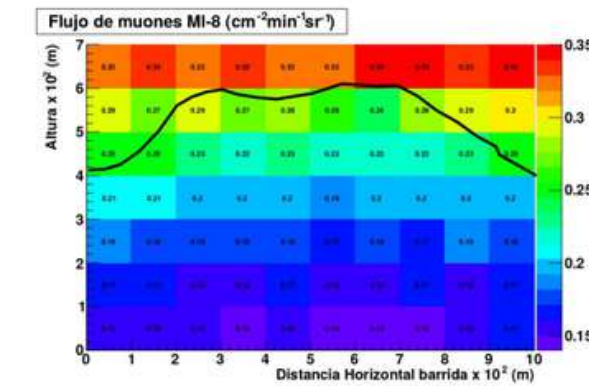
Tomado de [3]



Tomado de [4]



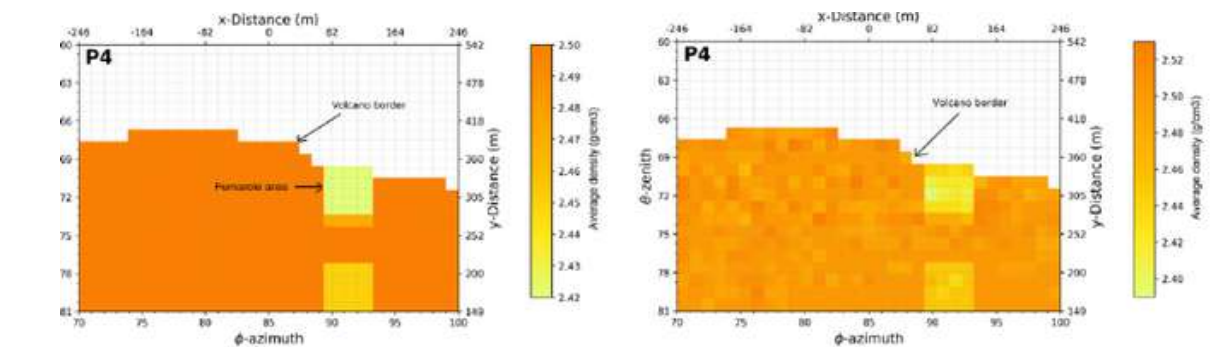
Colombia y LATAM



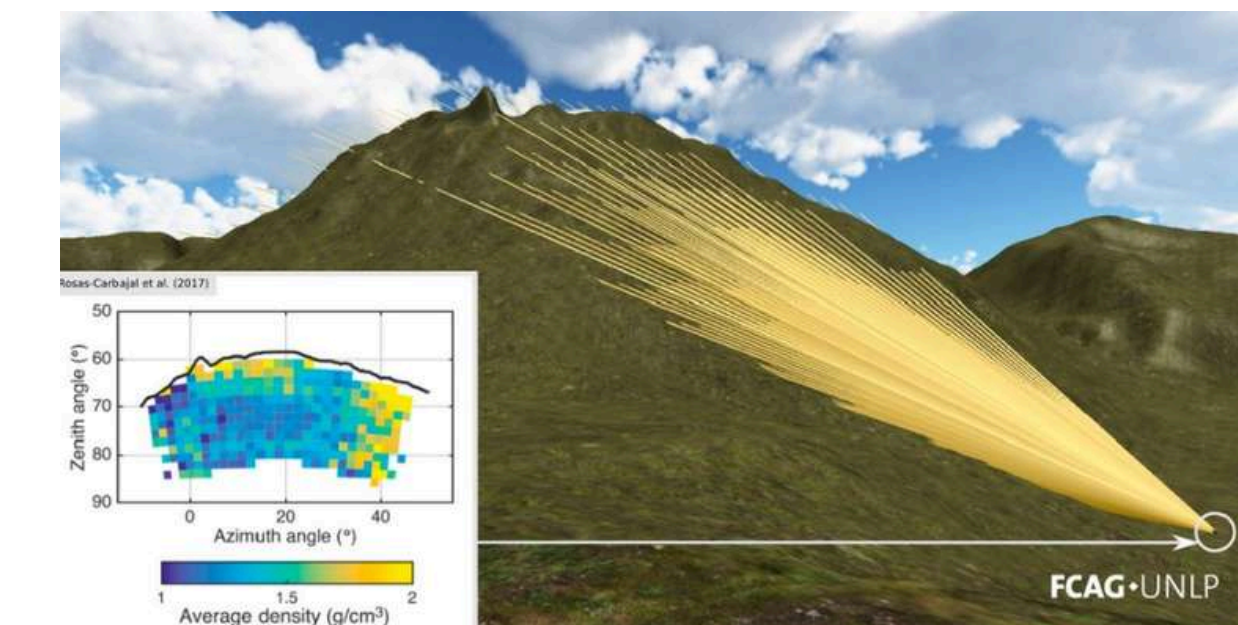
Monserrate density mapping (2018) Jairo Fajardo



Tomado de [5]

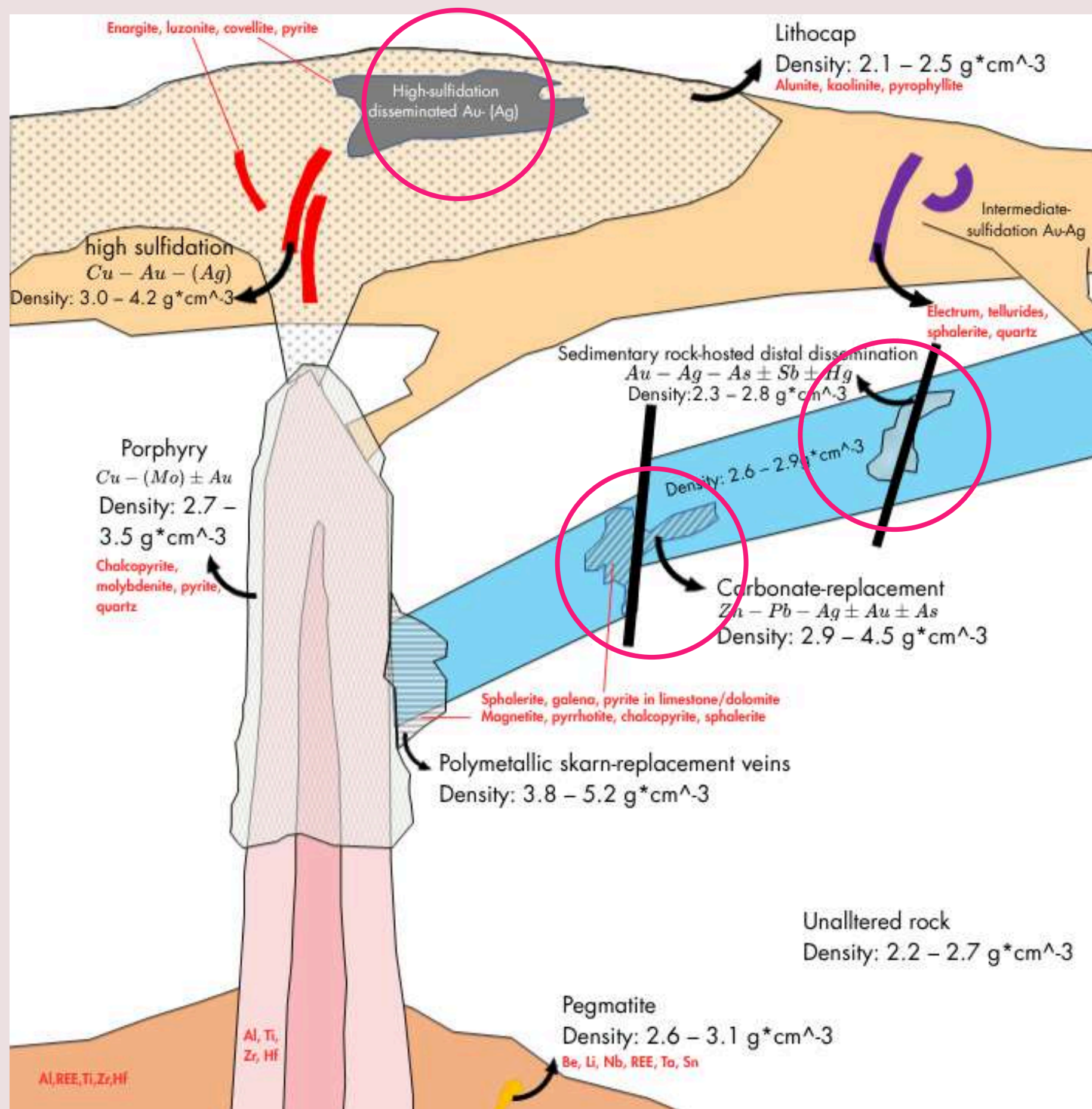


Tomado de [6]

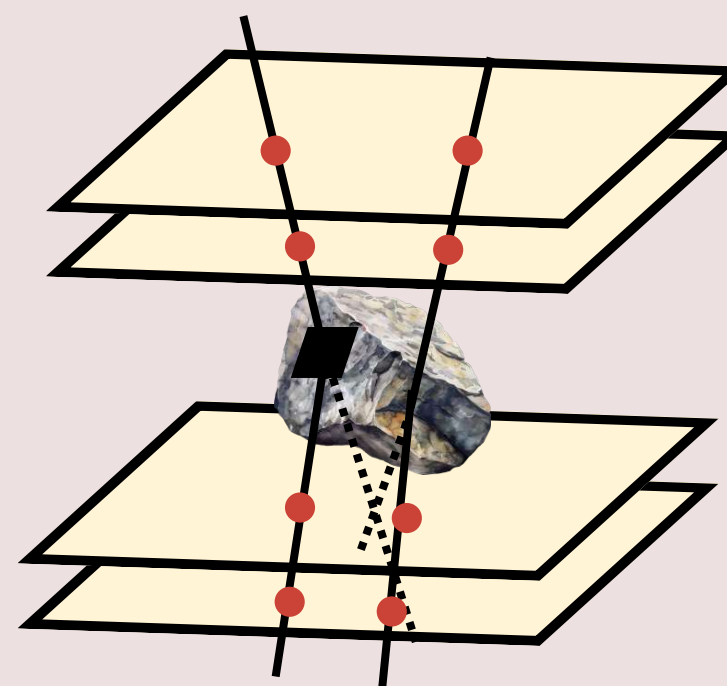


Tomado de [7]

Motivación



¿Por qué muografía de scattering?

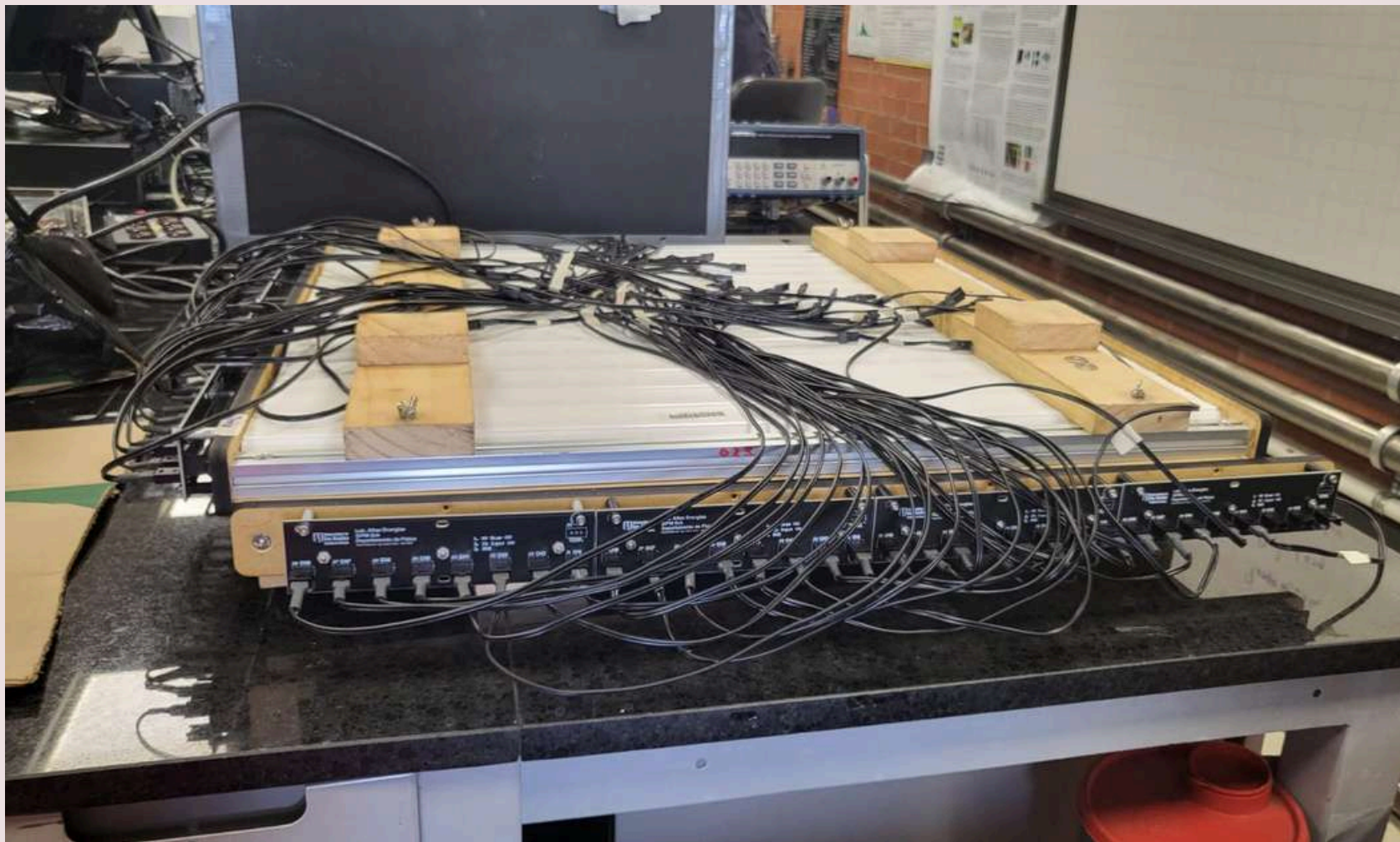


- Contraste de densidad suficiente para producir señal detectable.
- Escala del target compatible con la resolución del método.
- Técnica no invasiva, pasiva, sin fuente artificial de radiación.

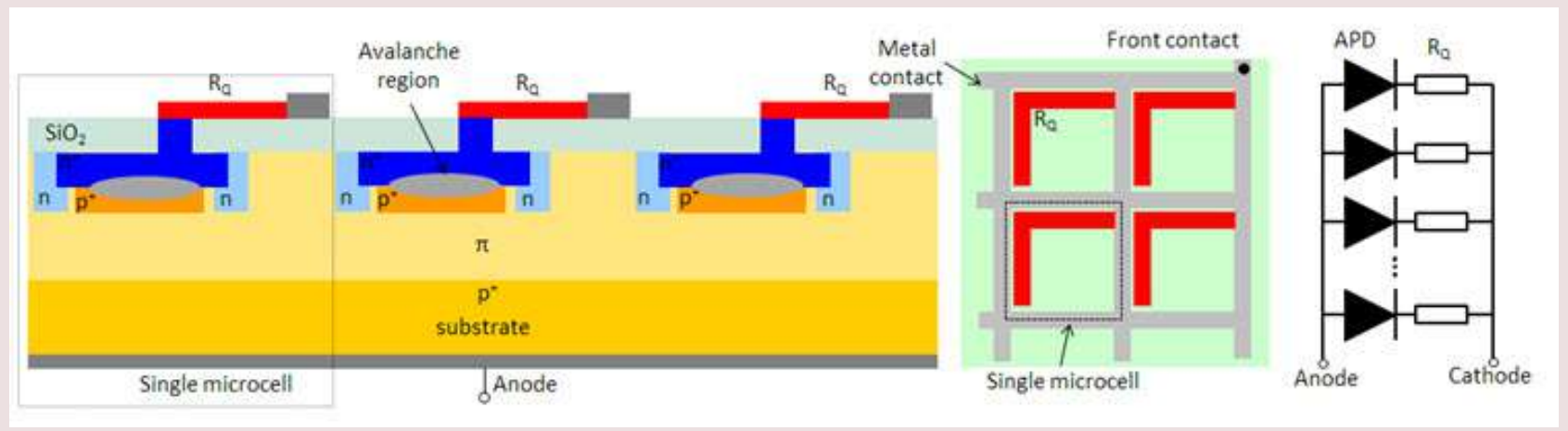
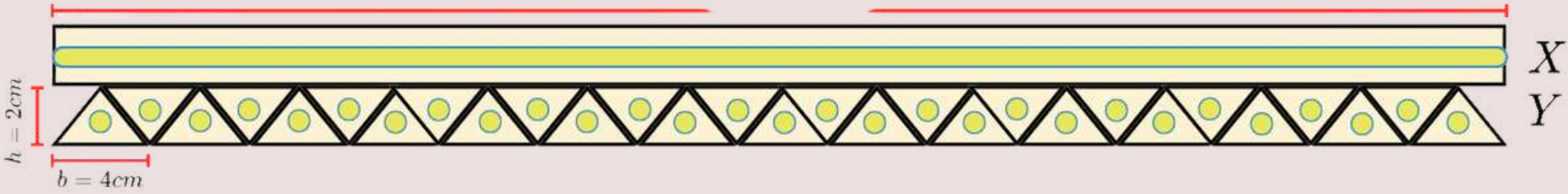
- La formula dispersión de Highland depende de ρ y Z del material lo cual permitiría estimar ambas informaciones del mineral.
- Reconstrucción 3D posible con solo toma de un plano.
- Metodos tradicionales o son muy costosos o muy ruidosos.

Ante las limitaciones de la geofísica tradicional, se propone la tomografía de muones como una **técnica alternativa de alta penetración**. Mediante el desarrollo de un hodoscopio de centelladores y SiPM, validado con simulaciones en Geant4, **proponemos una solución compacta, de bajo costo y alta resolución para detectar depósitos minerales densos** en entornos complejos.

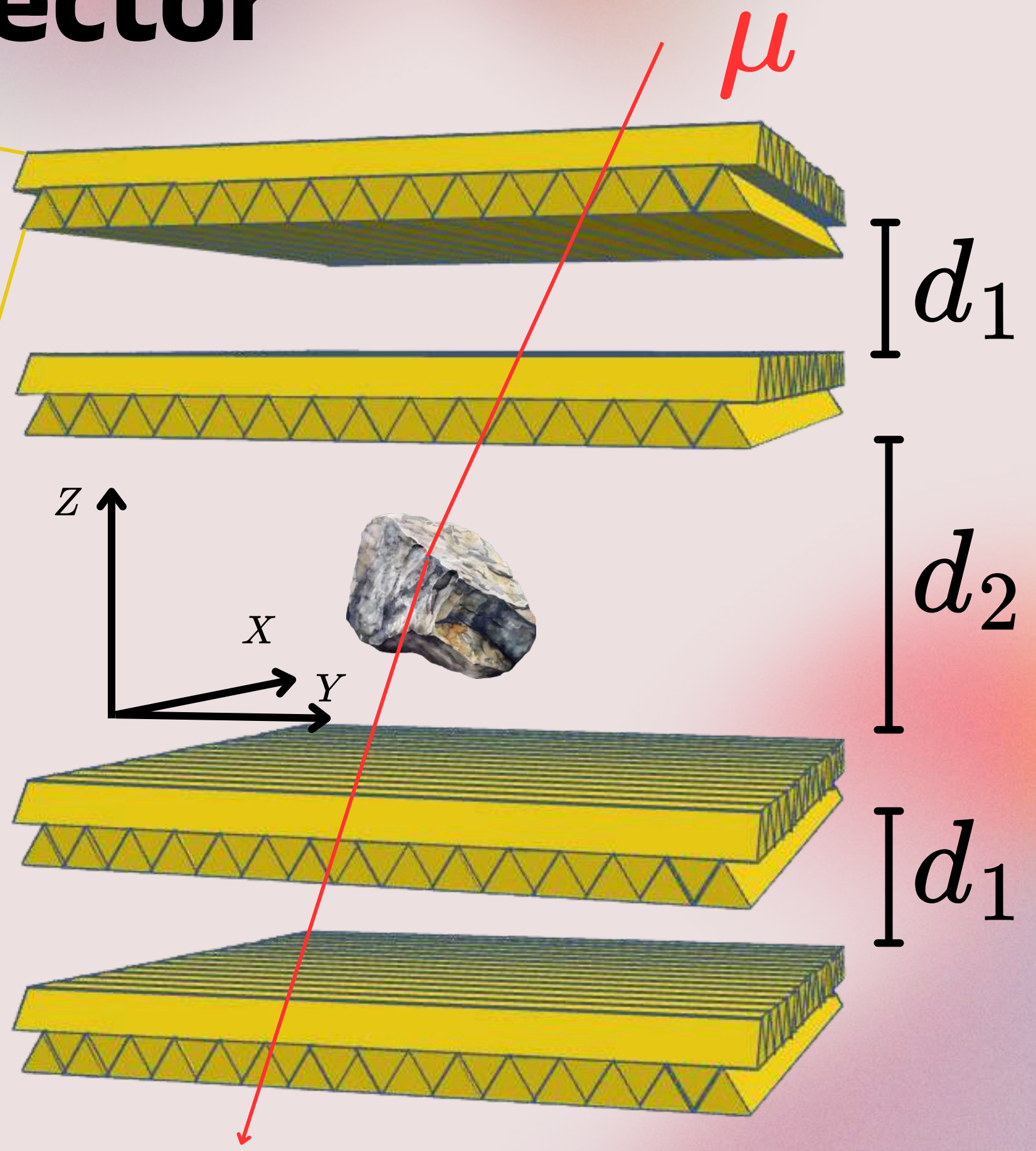
El detector



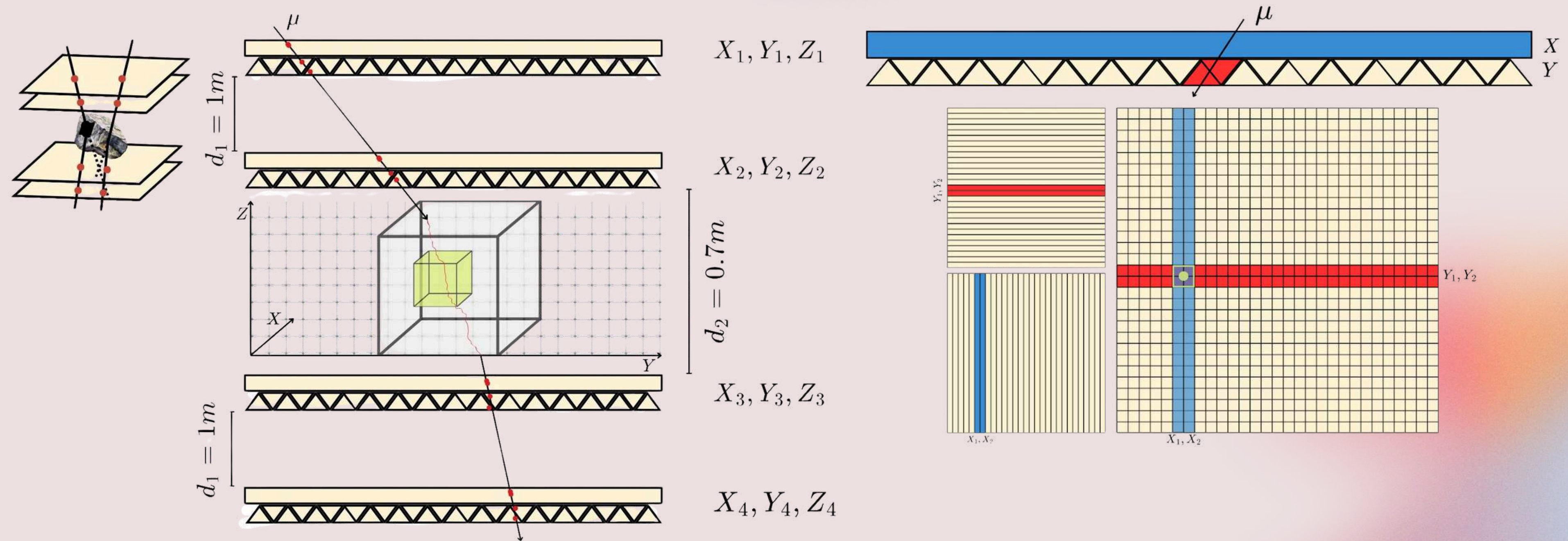
$l = 64\text{cm}$



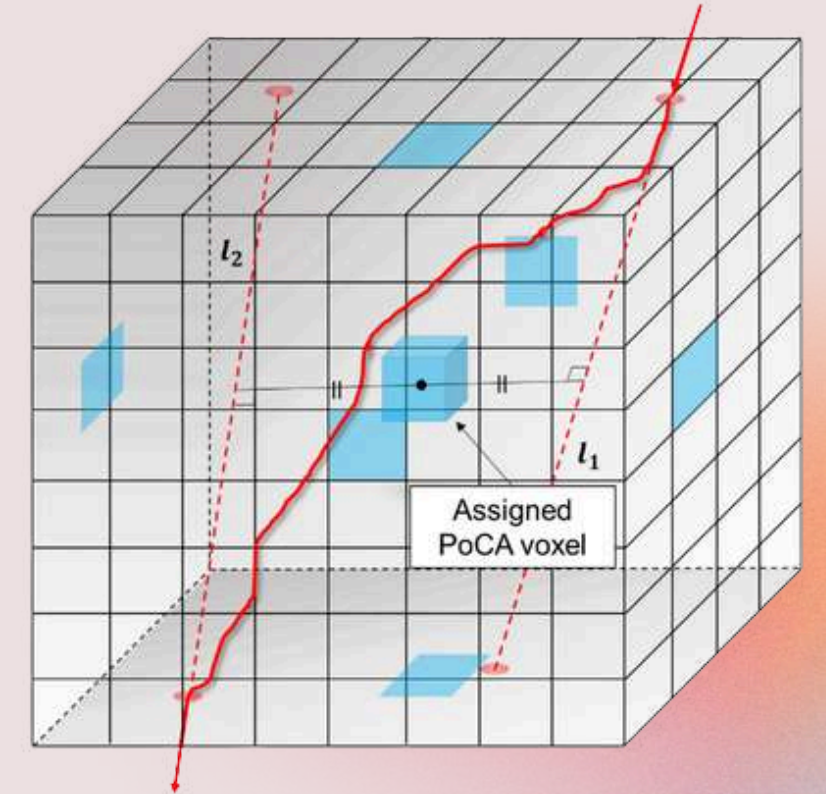
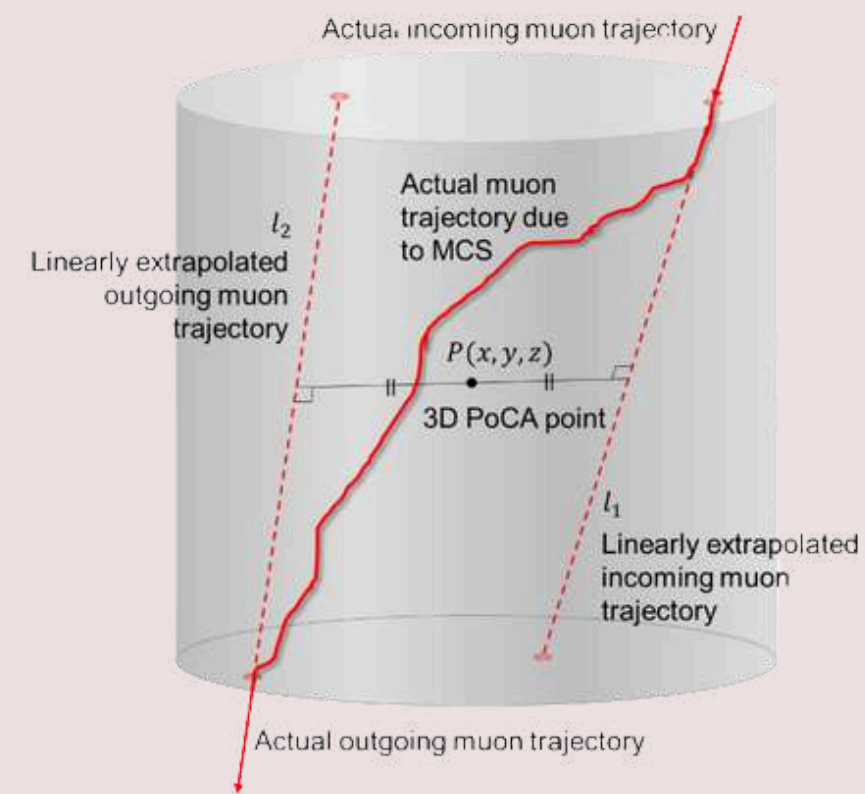
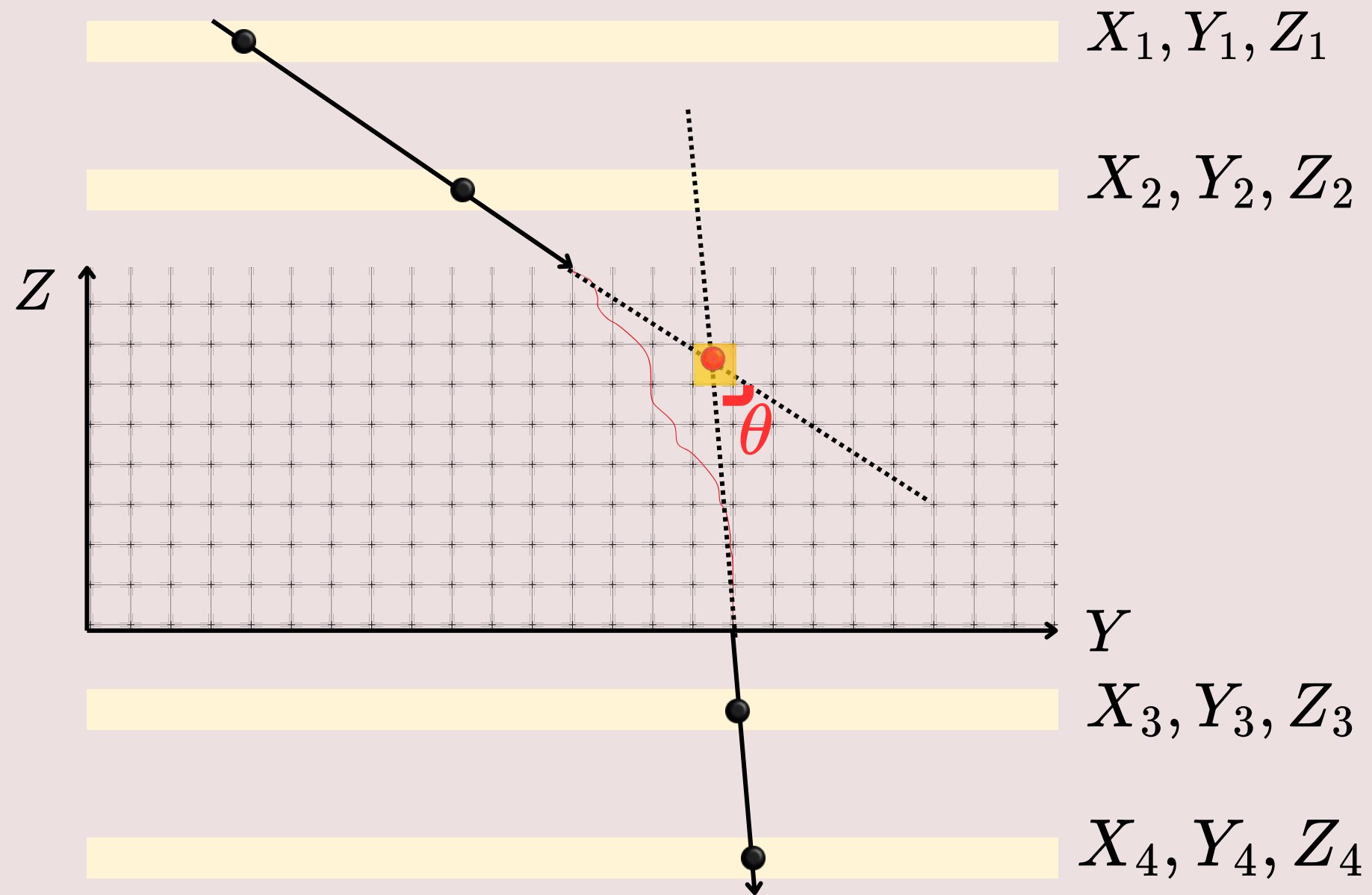
Tomado de [8]



Metodologia de reconstruccion

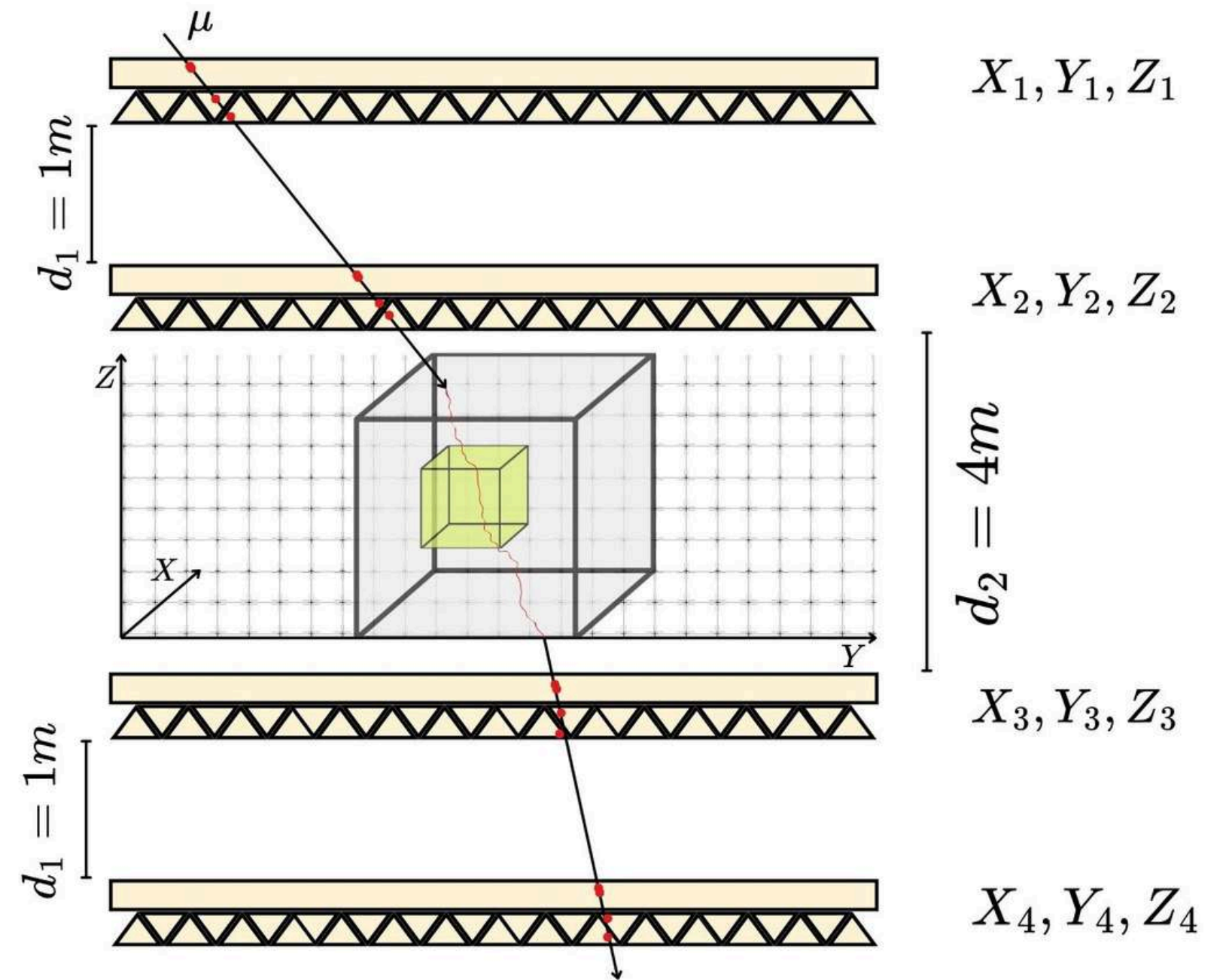
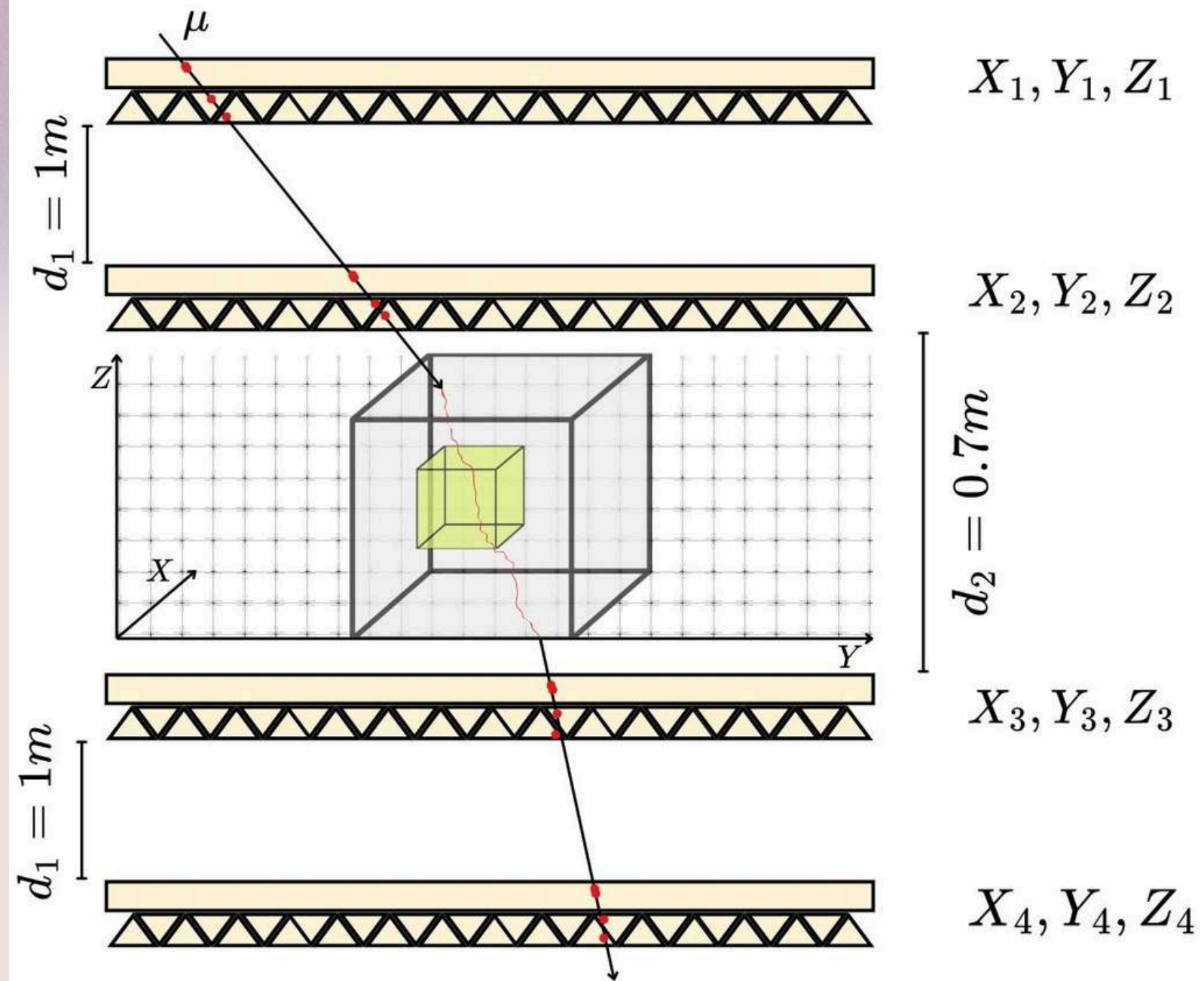


Metodologia de reconstruccion



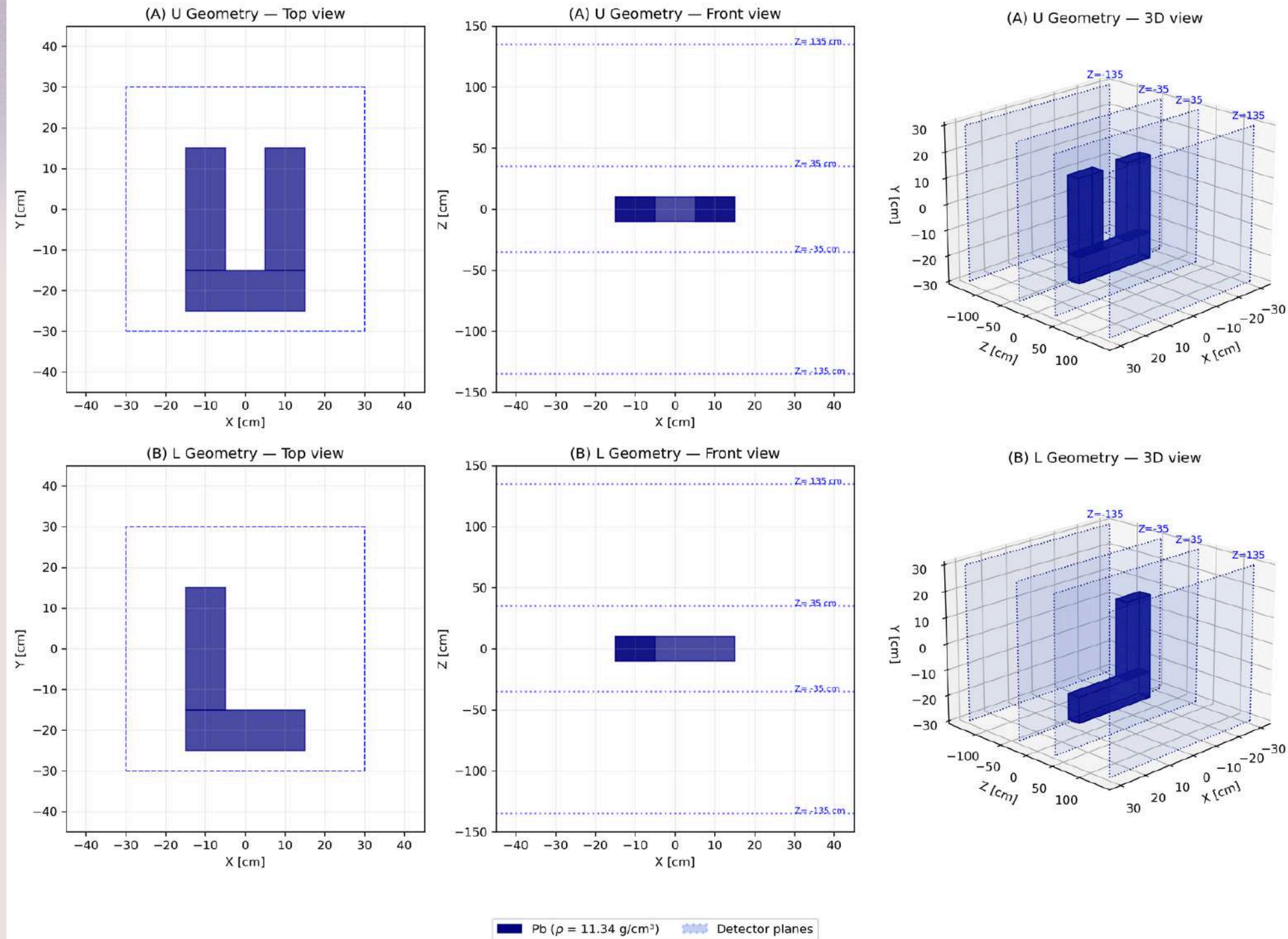
Tomado de [9]

Escenarios de Simulación

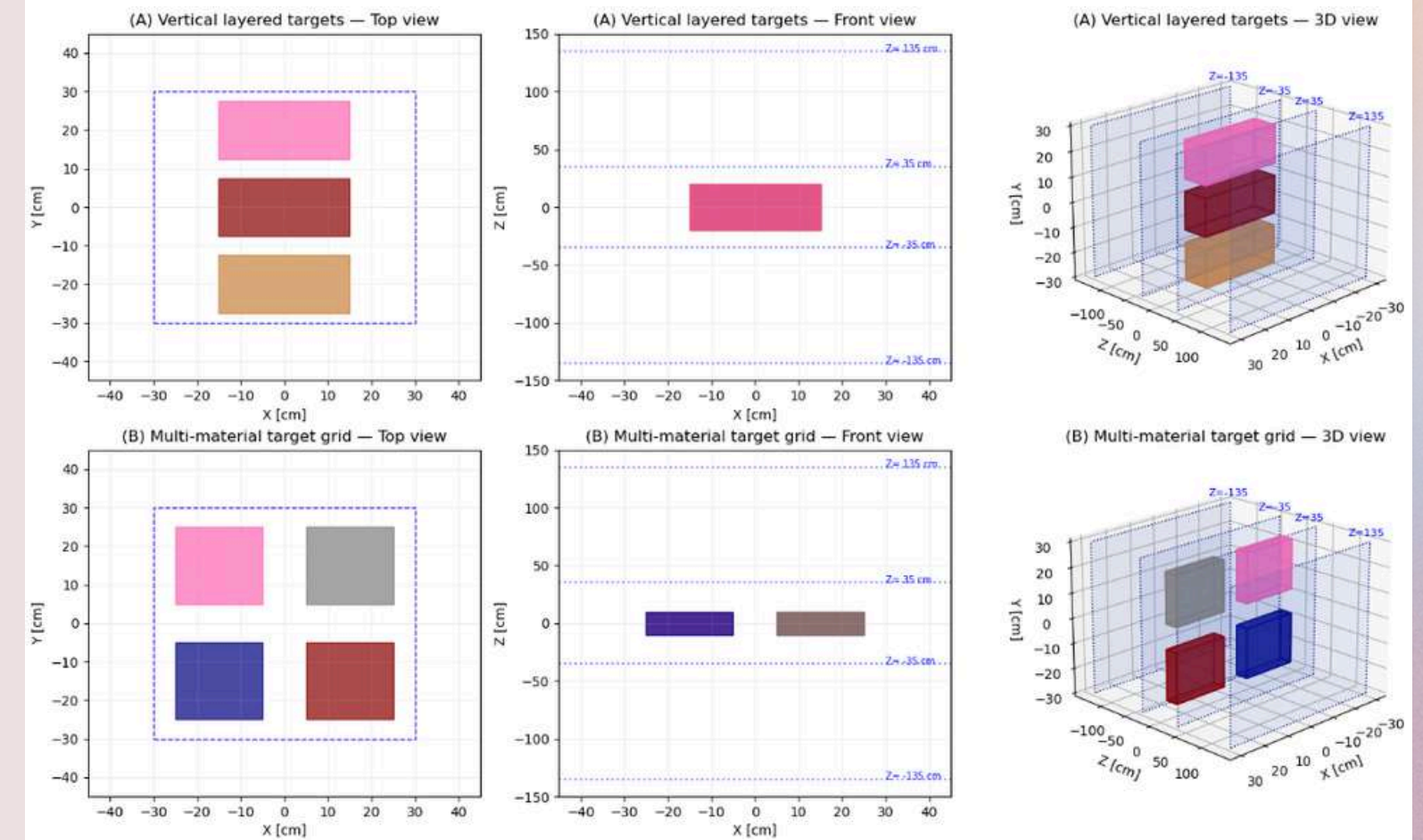


Setups para validacion

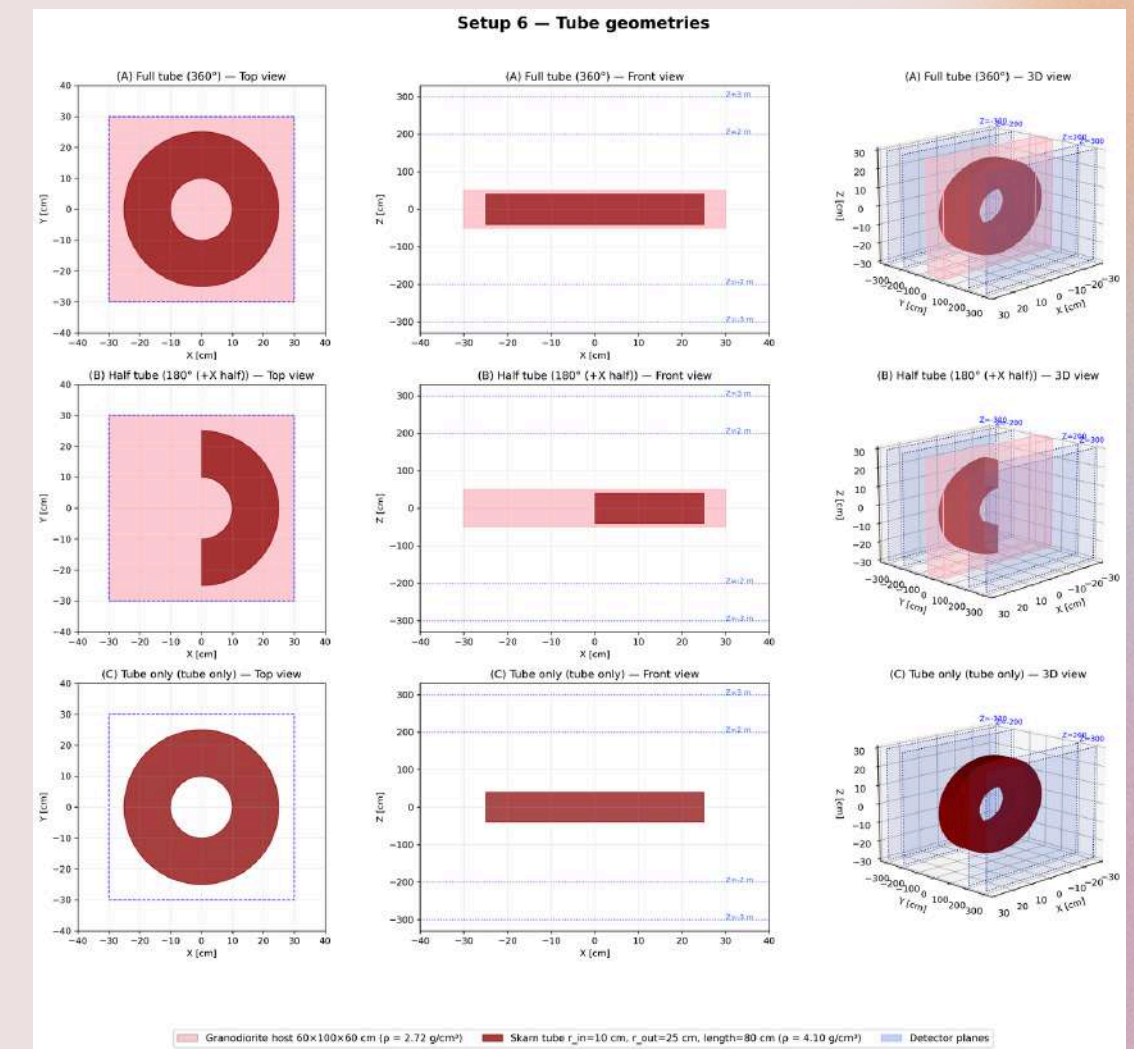
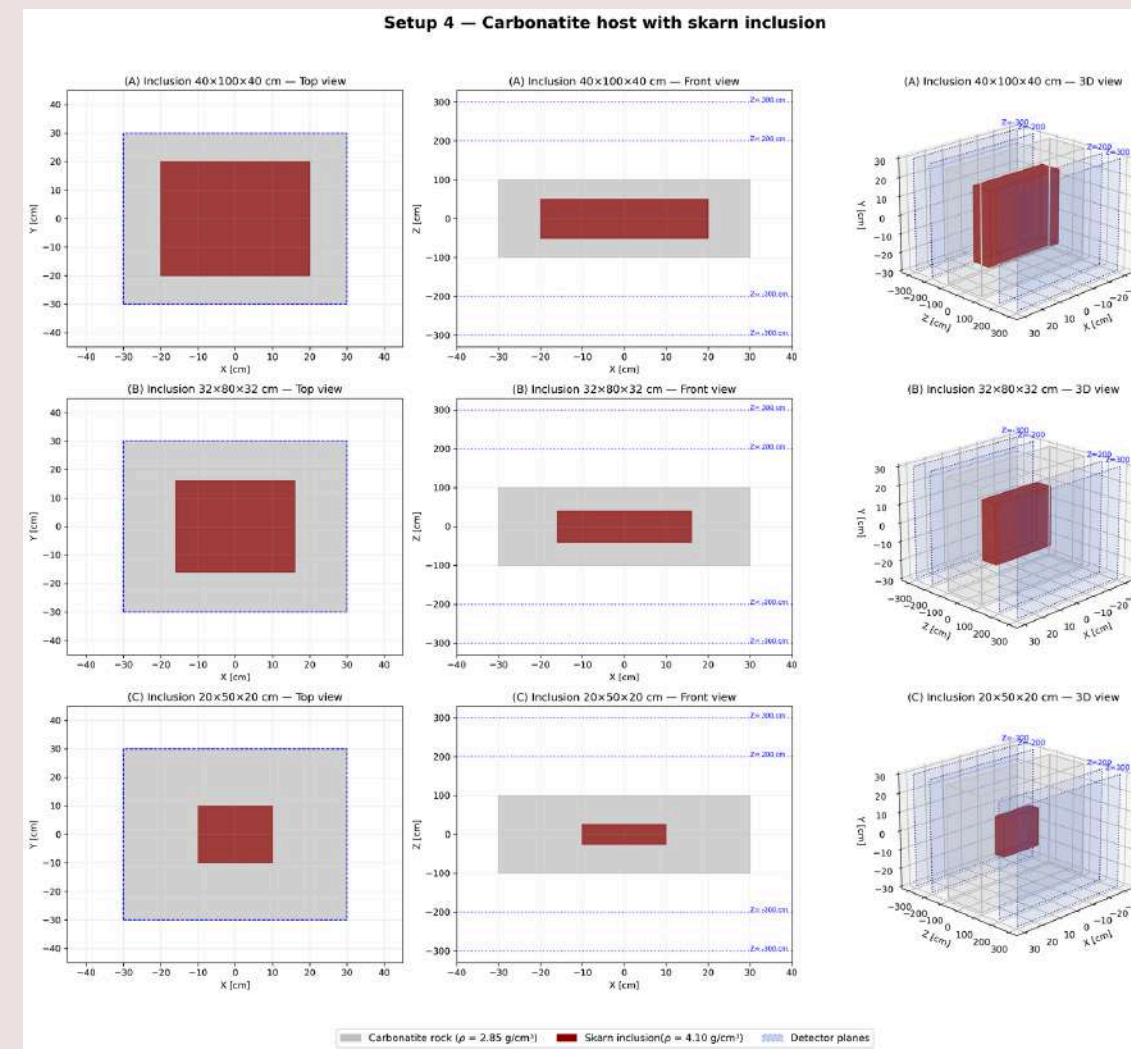
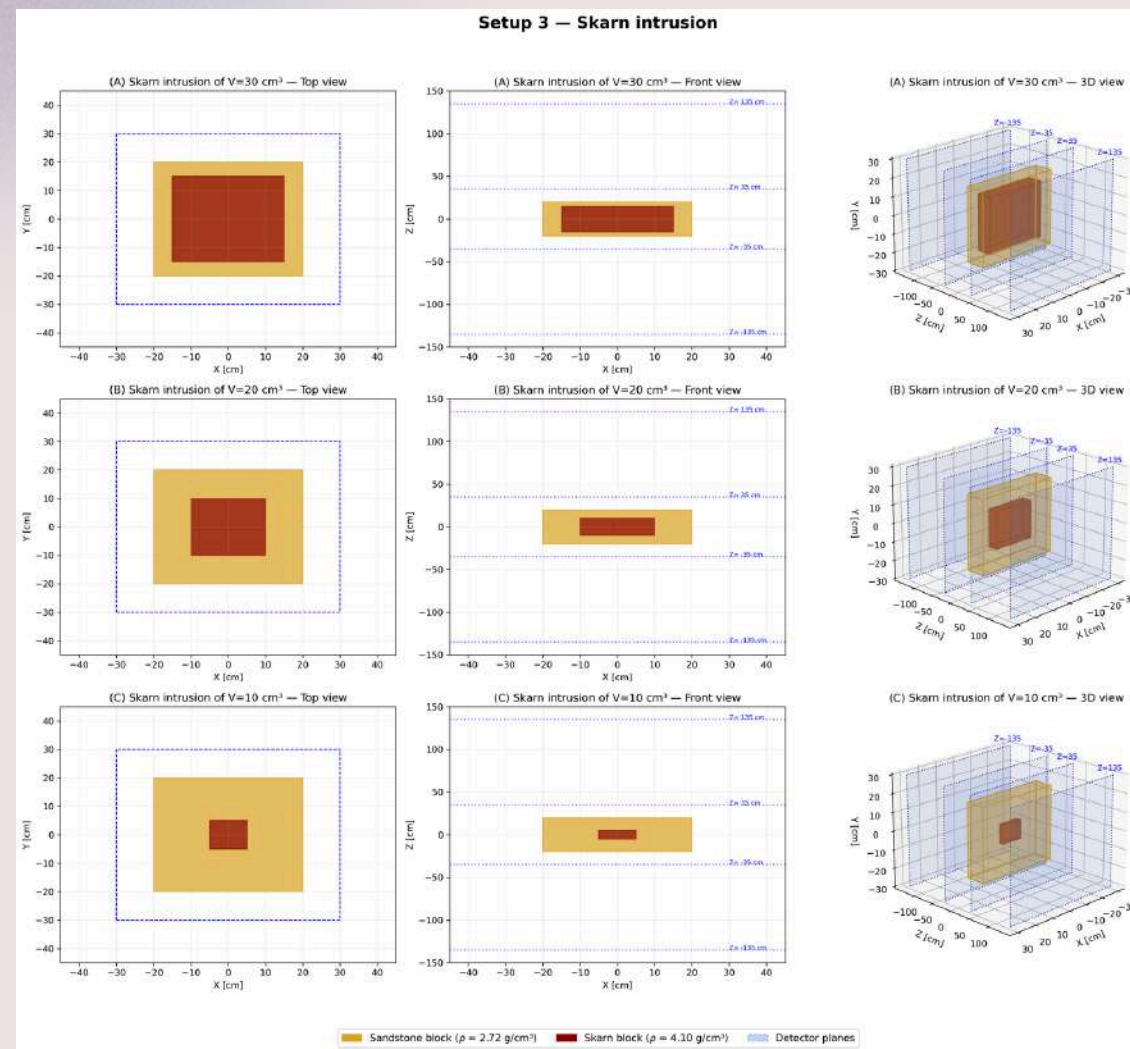
Setup 1 — Geometry variation high density



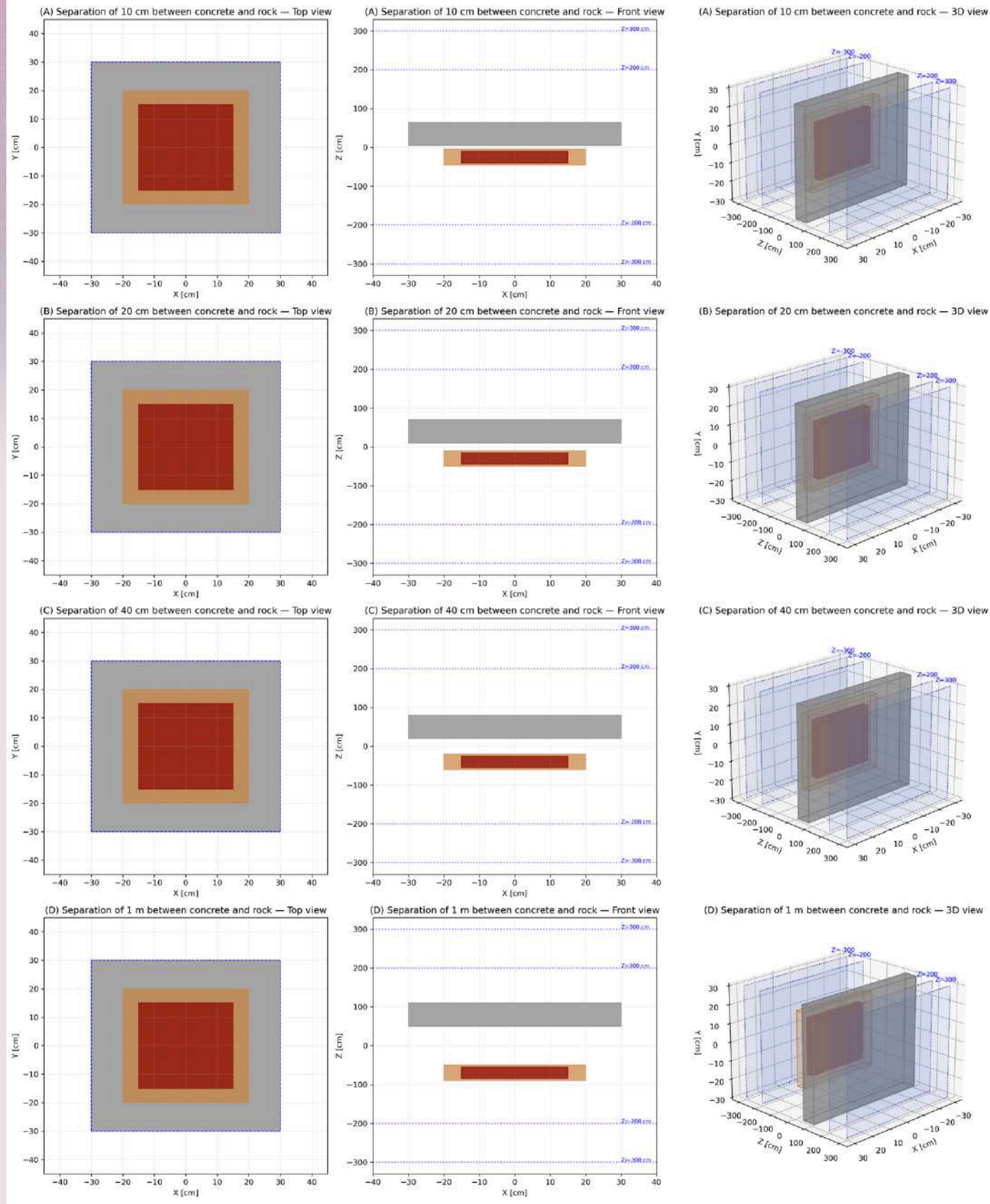
Setup 2 — Density variations



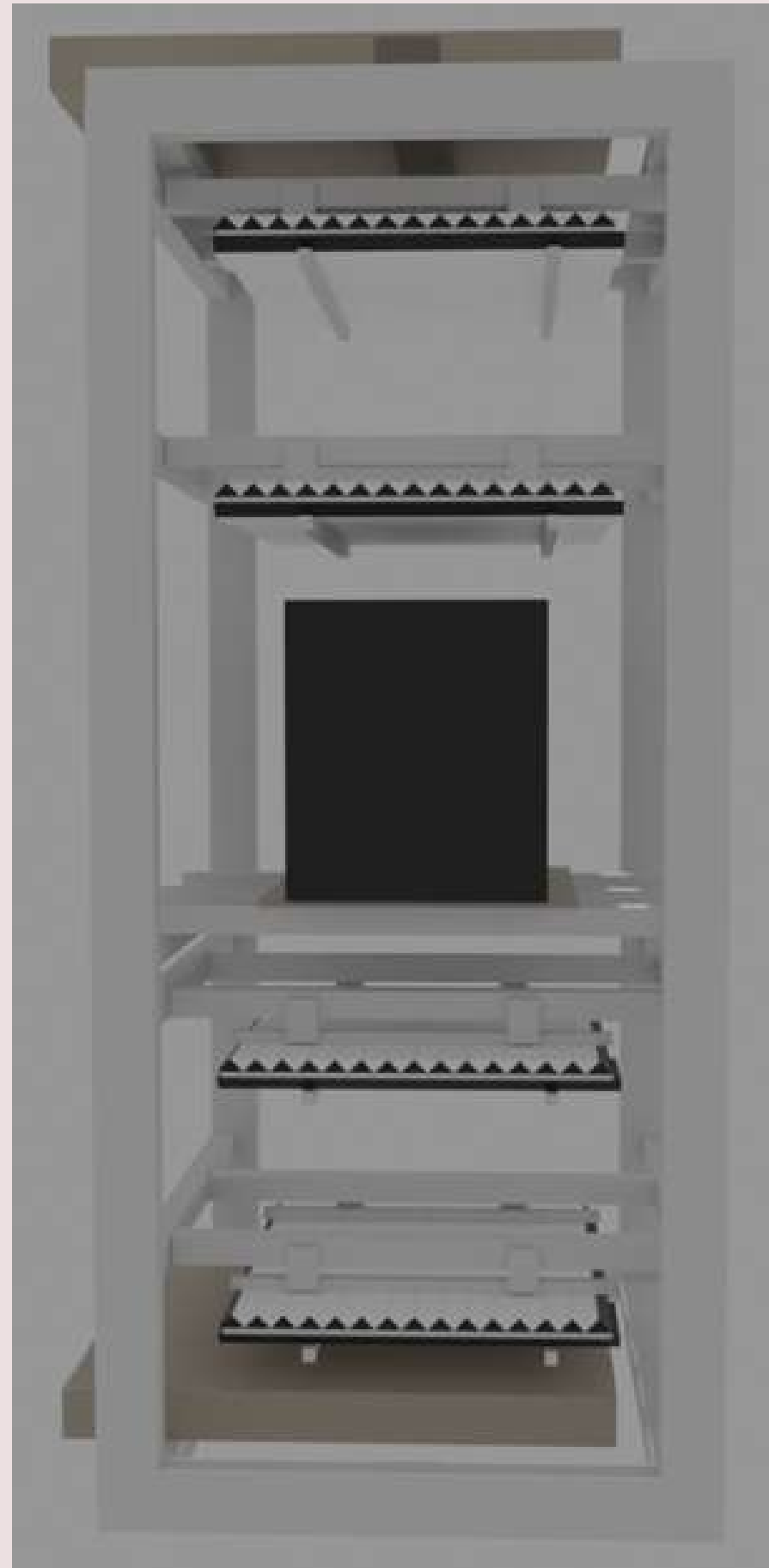
Setups para evaluar escenarios geológicos realistas



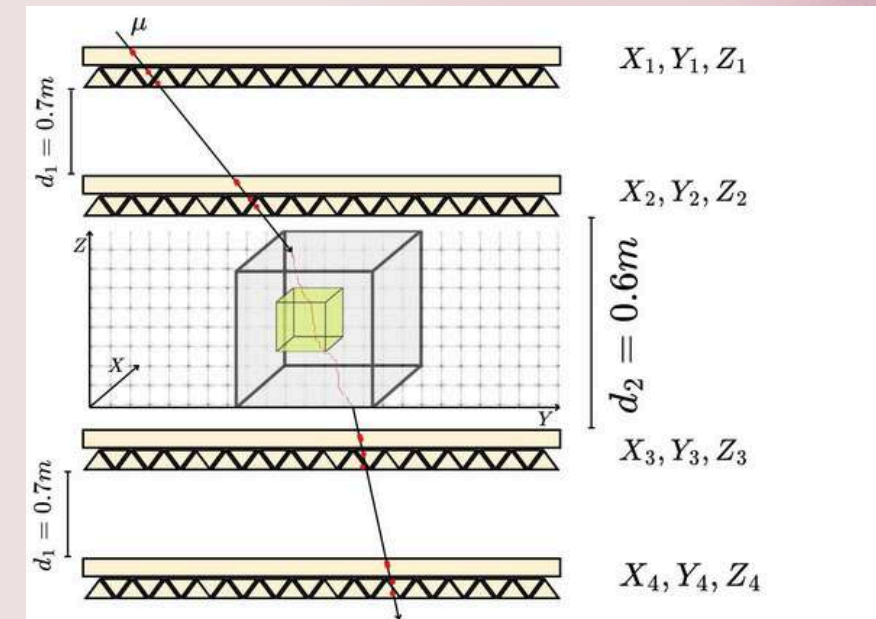
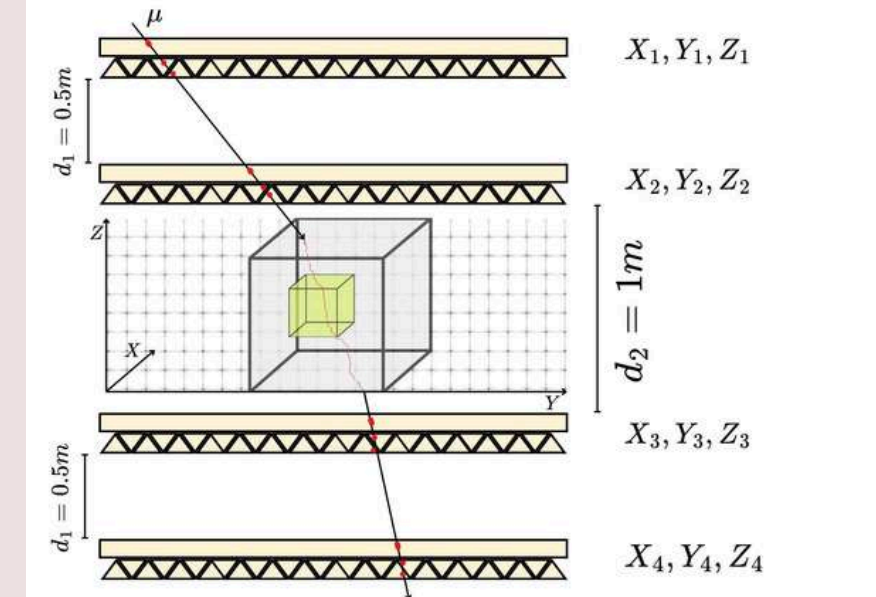
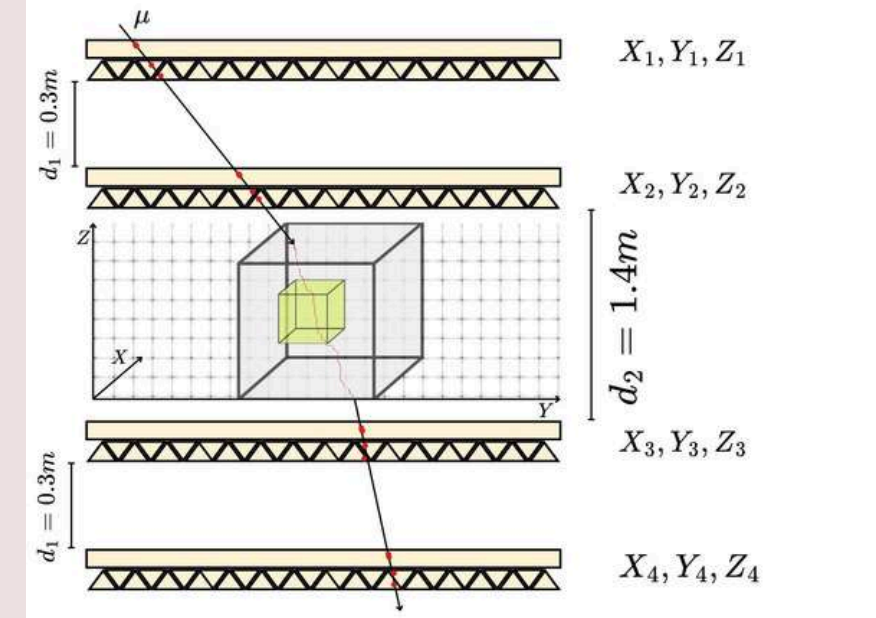
Setup 5 — Concrete top & sandstone with skarn inclusion at different separations



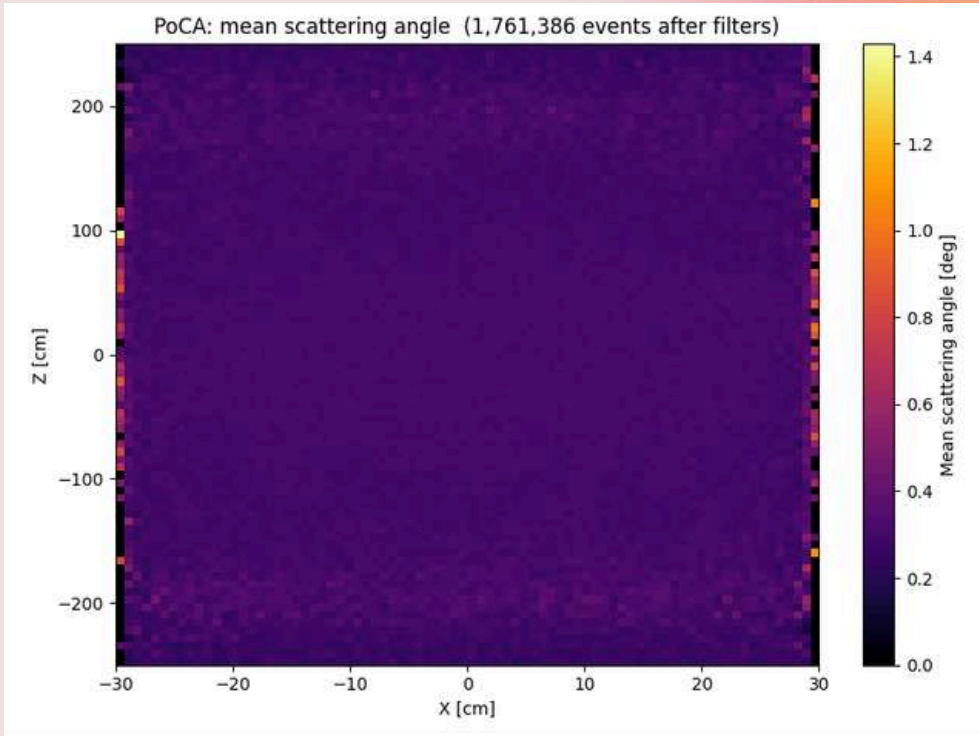
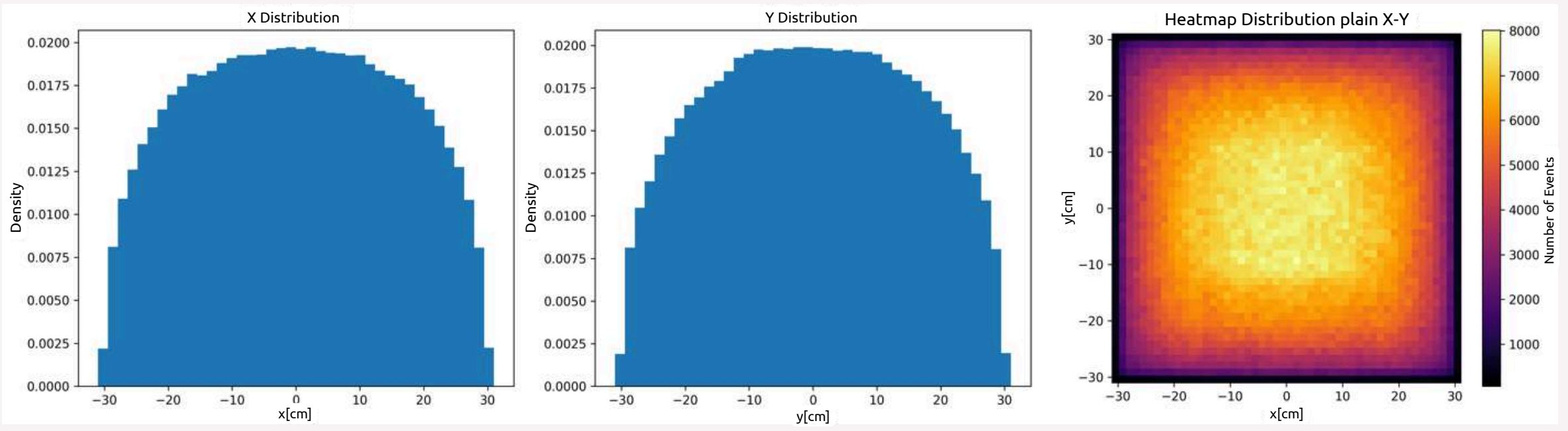
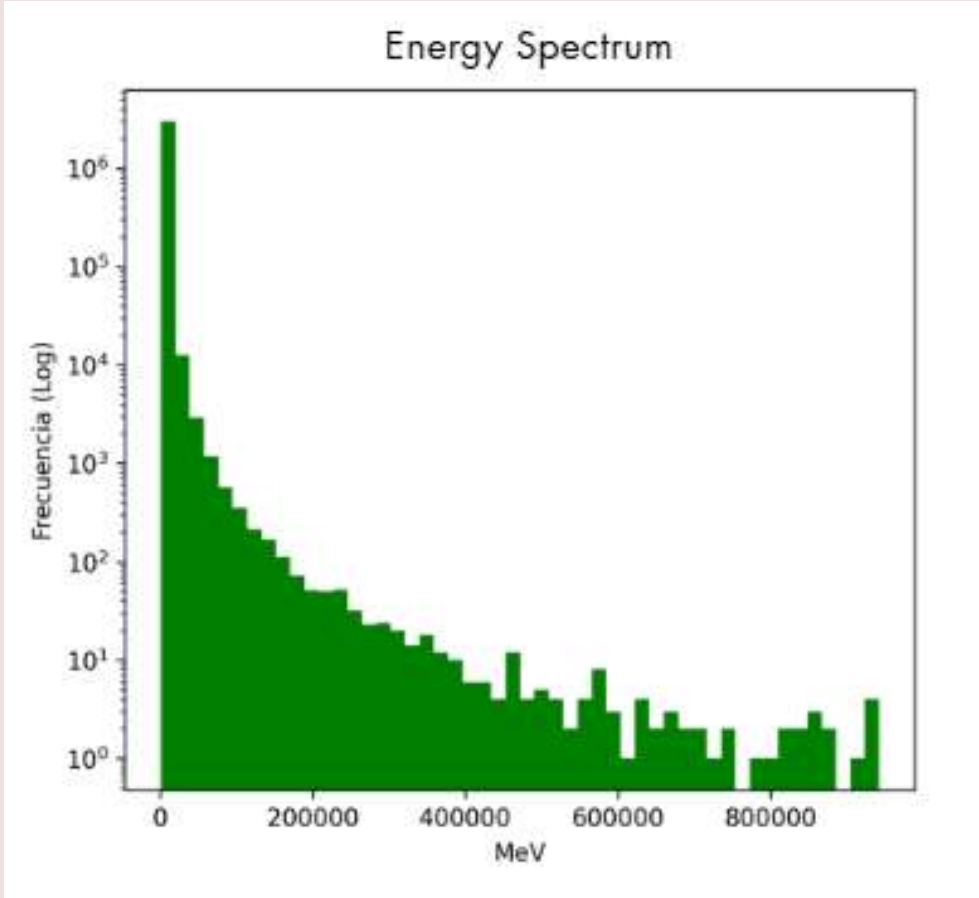
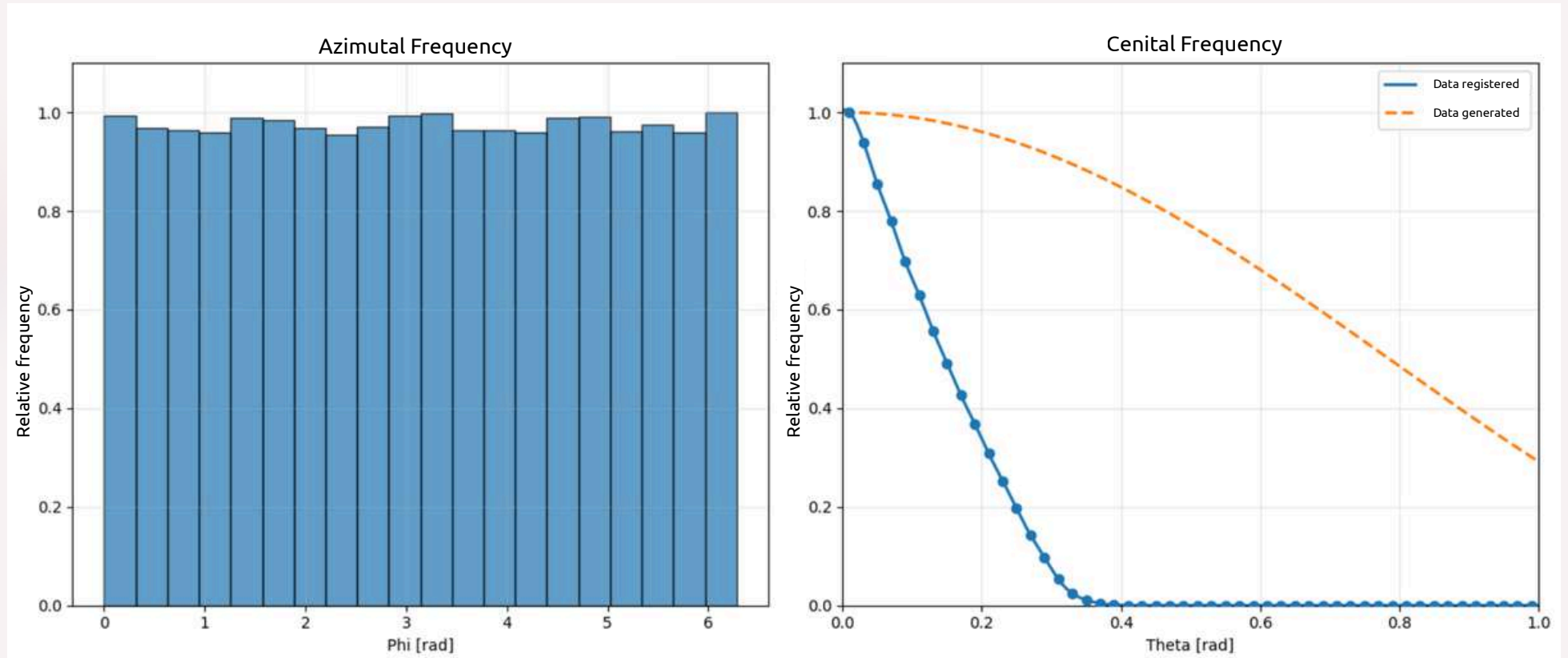
Concrete $V=60 \text{ cm}^3$ ($\rho = 2.40 \text{ g/cm}^3$) Sandstone $V=40 \text{ cm}^3$ ($\rho = 2.30 \text{ g/cm}^3$) Skarn inclusion $V=30 \text{ cm}^3$ ($\rho = 4.10 \text{ g/cm}^3$) Detector planes



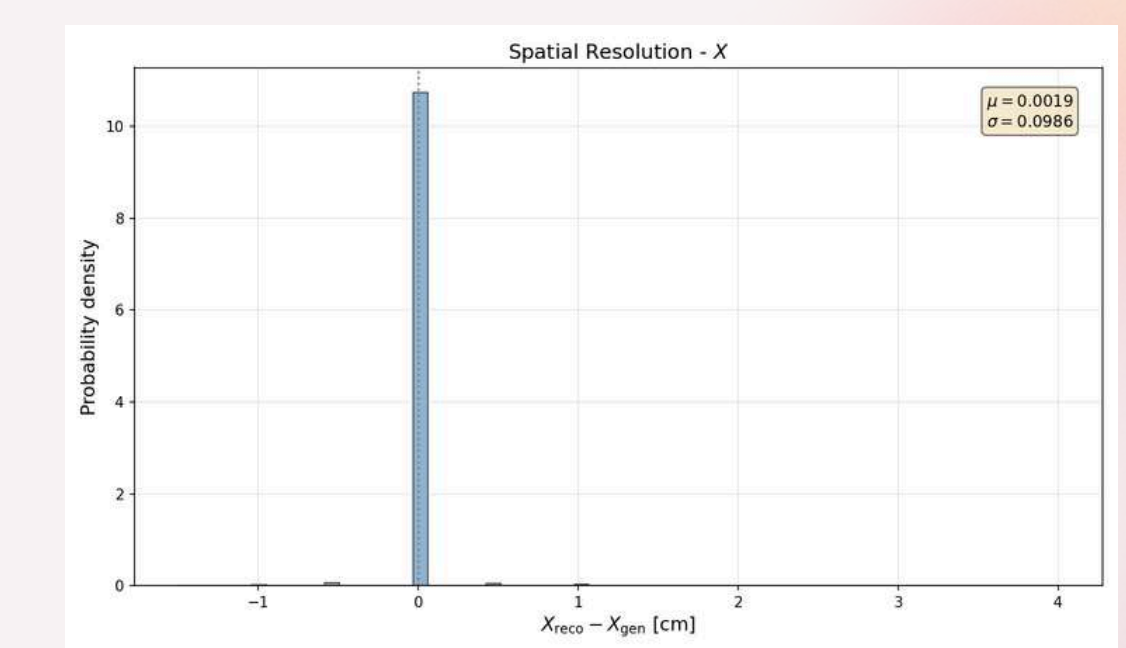
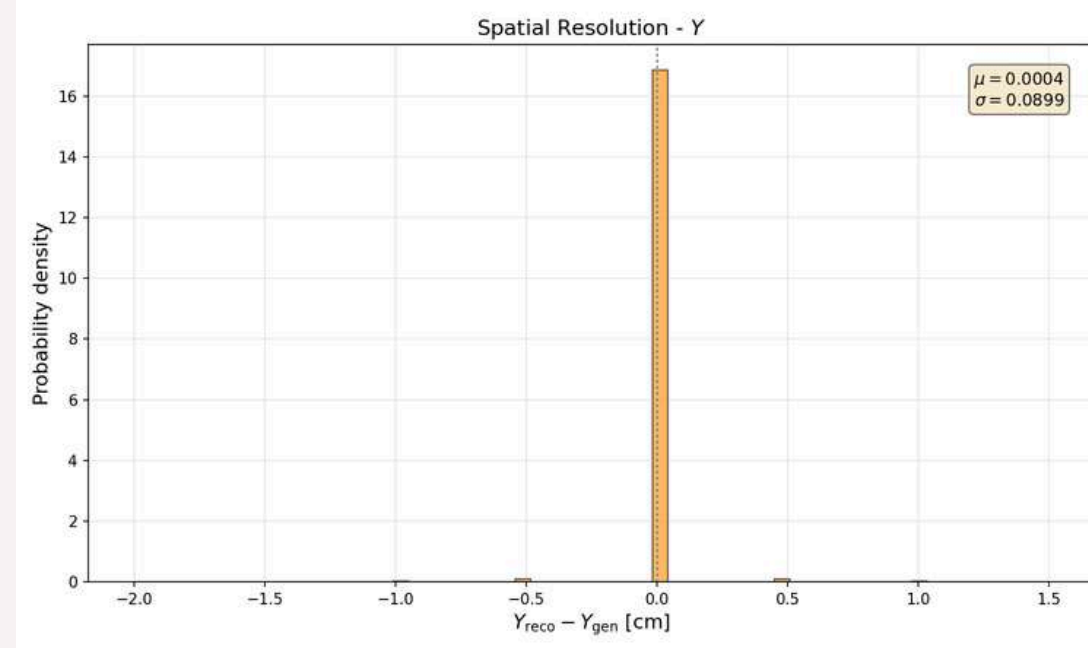
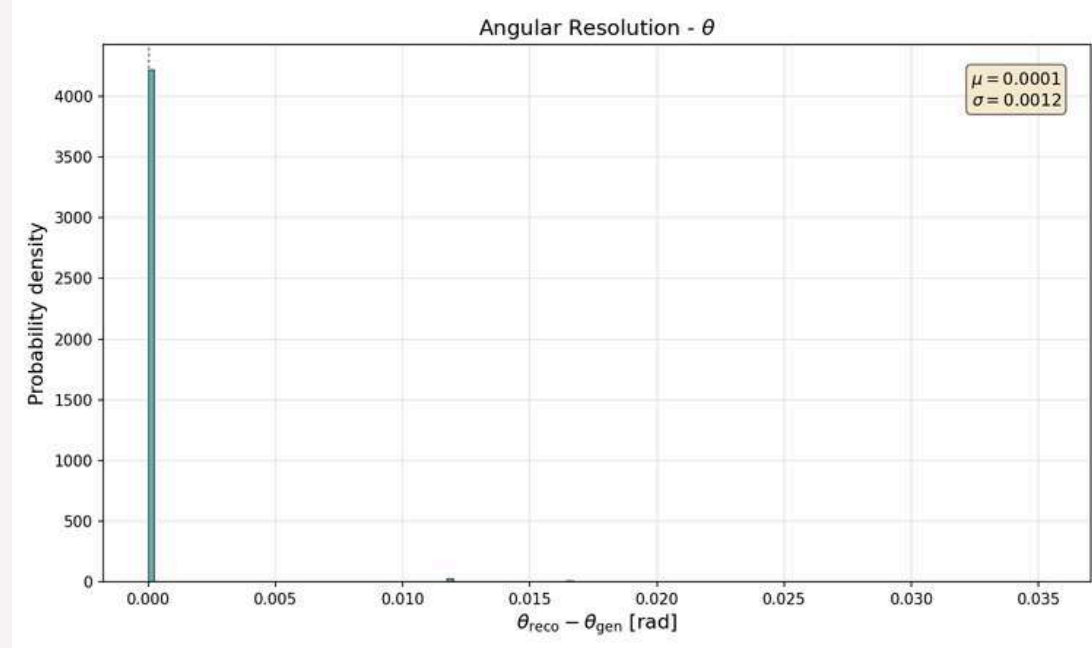
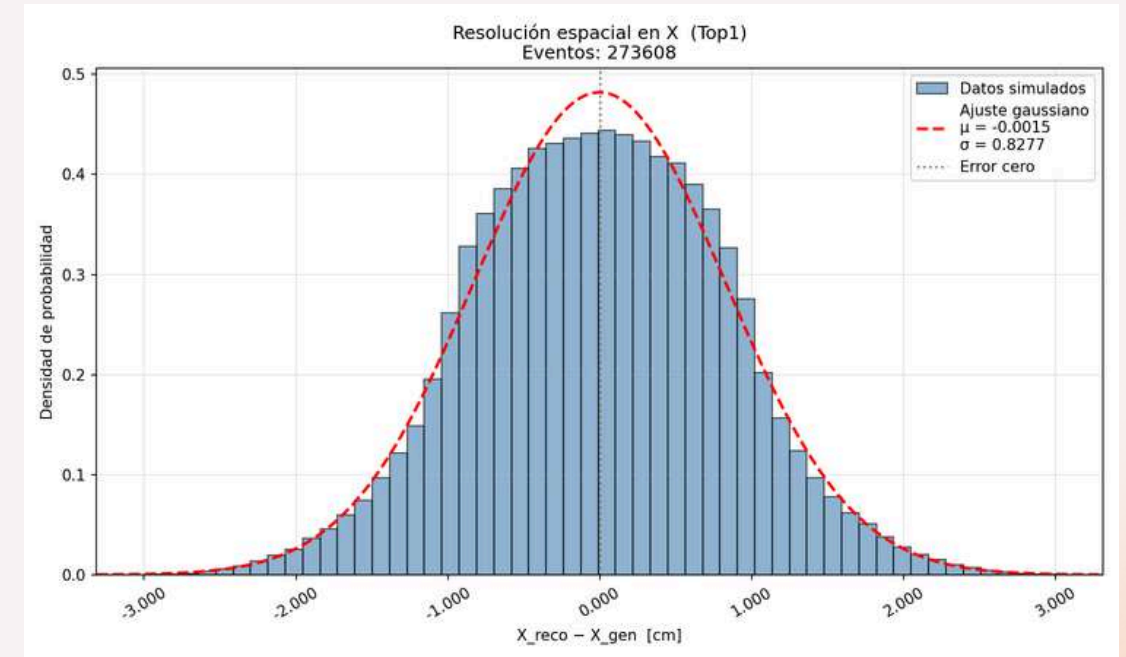
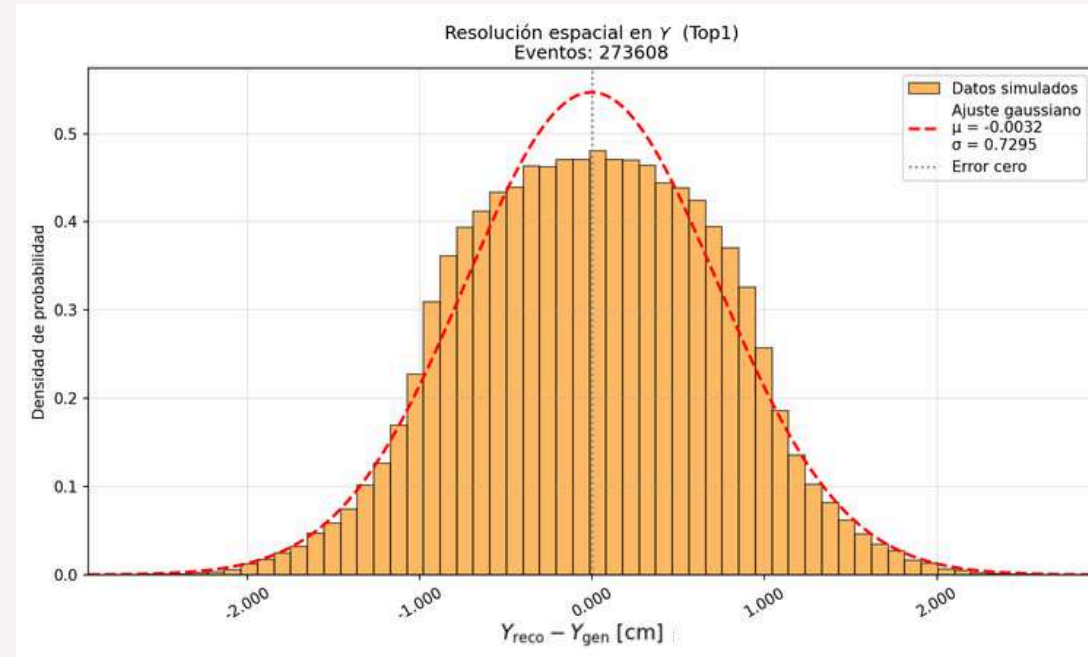
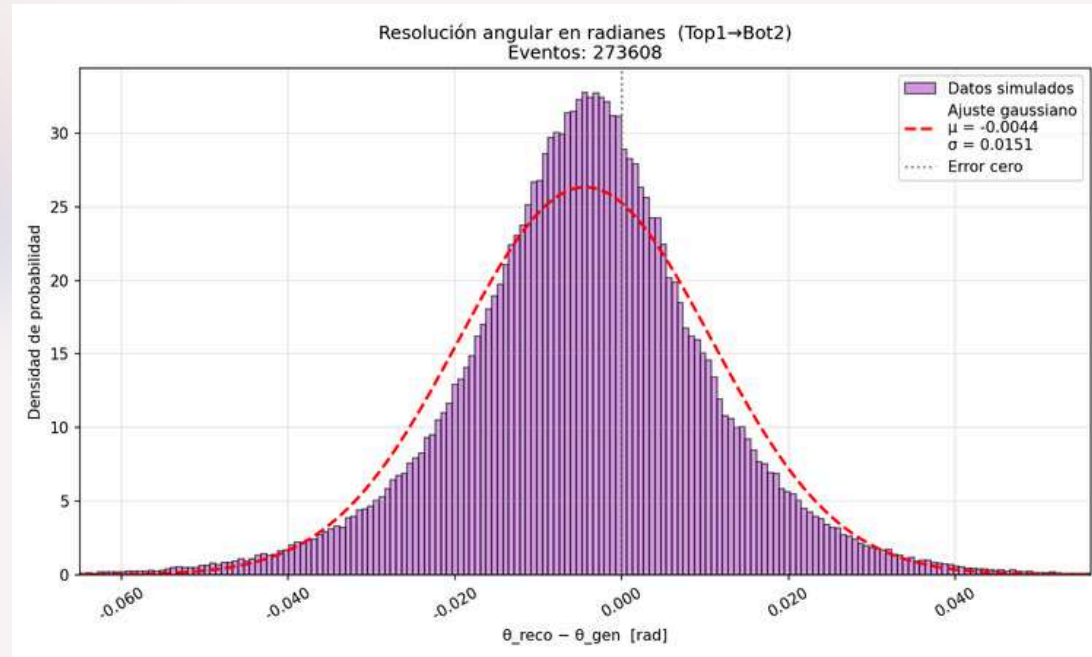
$p = 208 \text{ cm}$



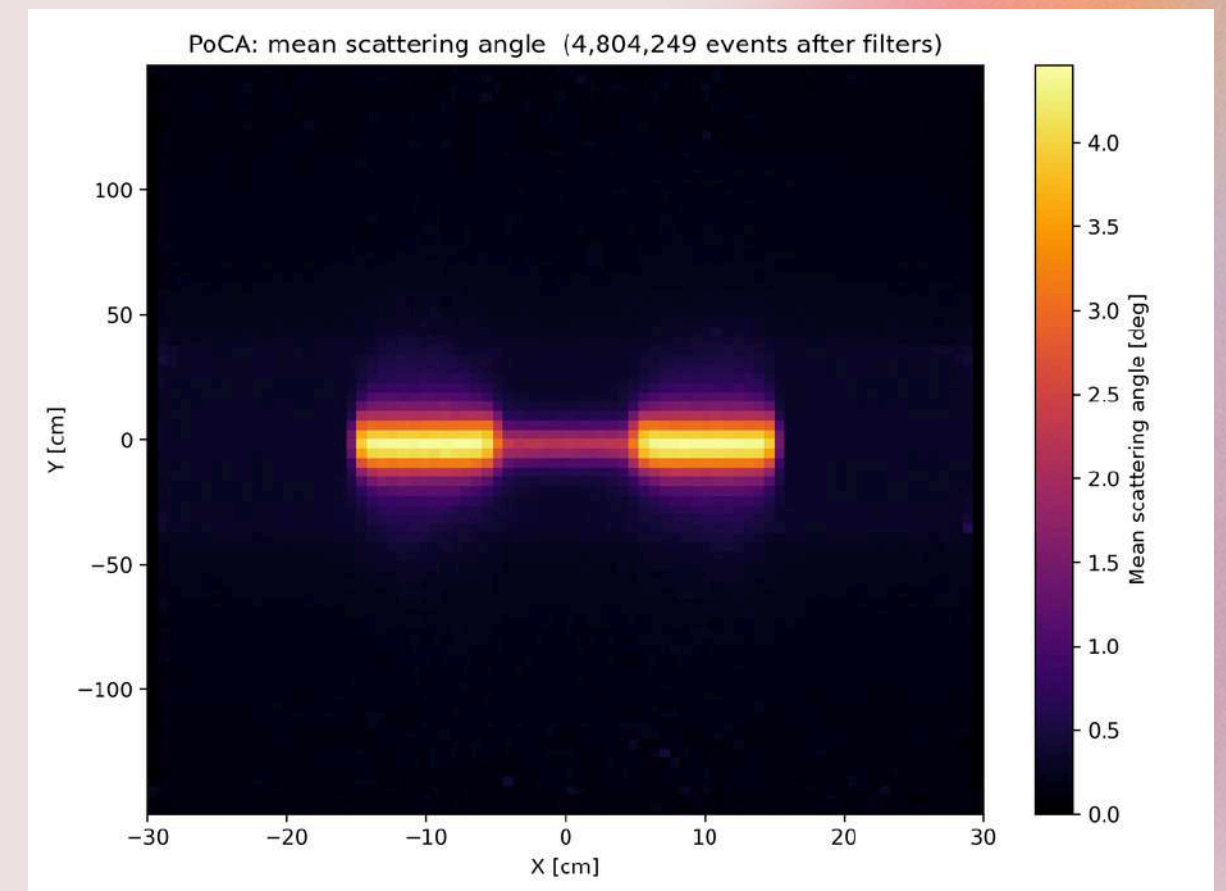
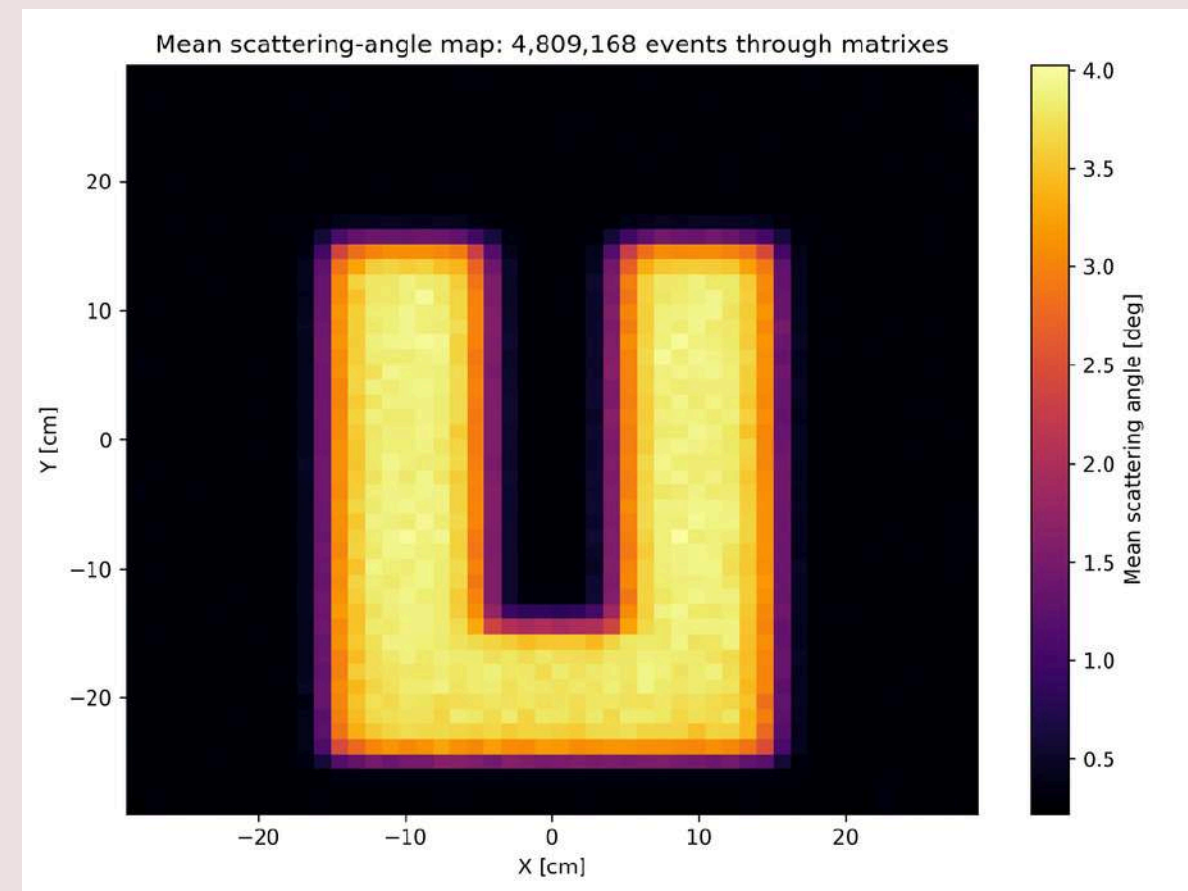
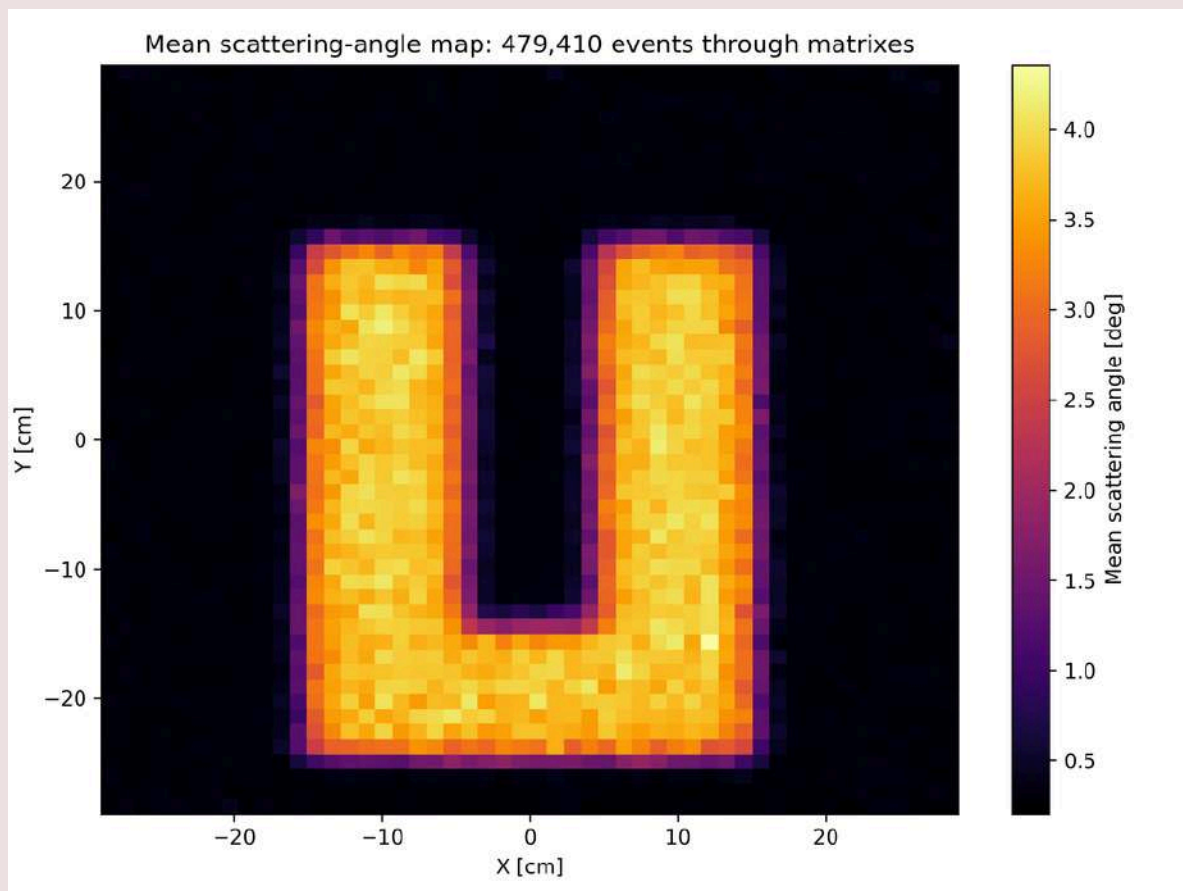
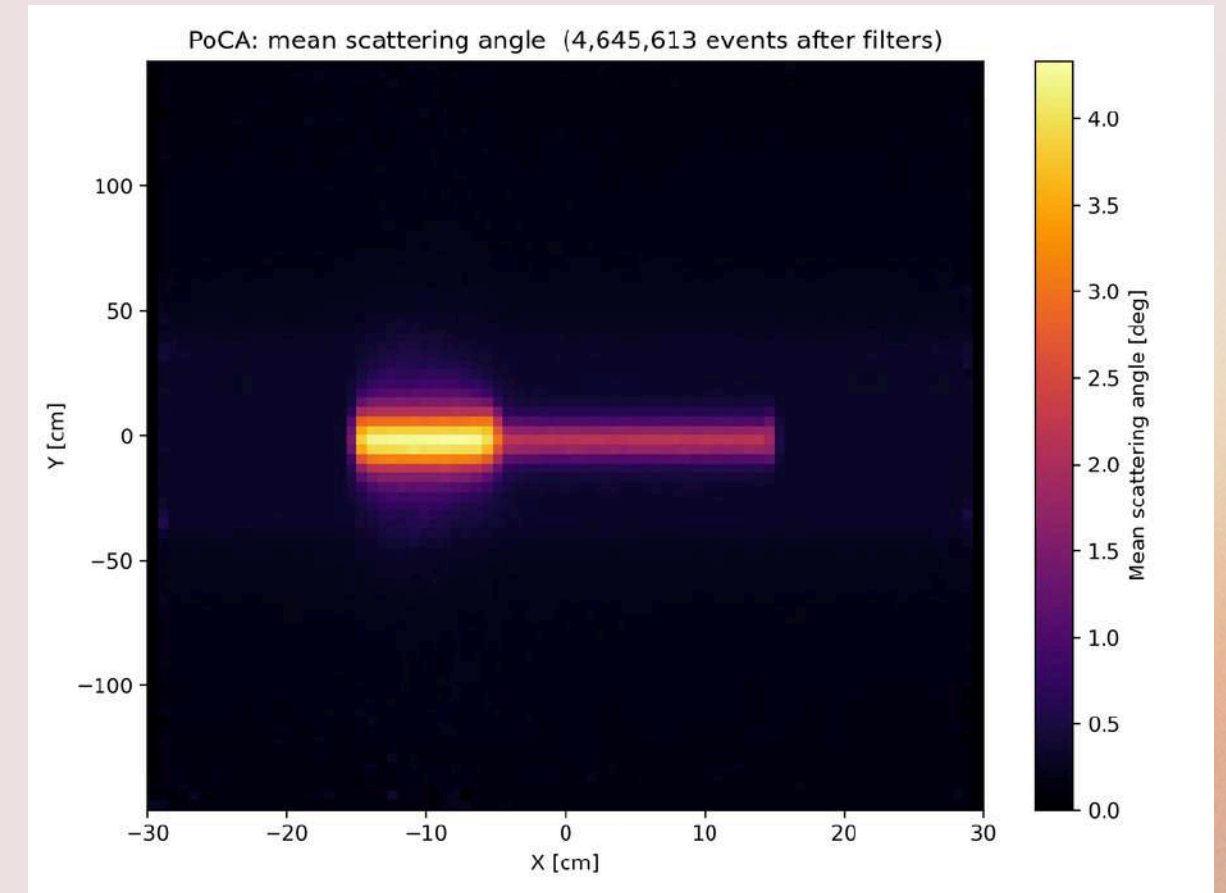
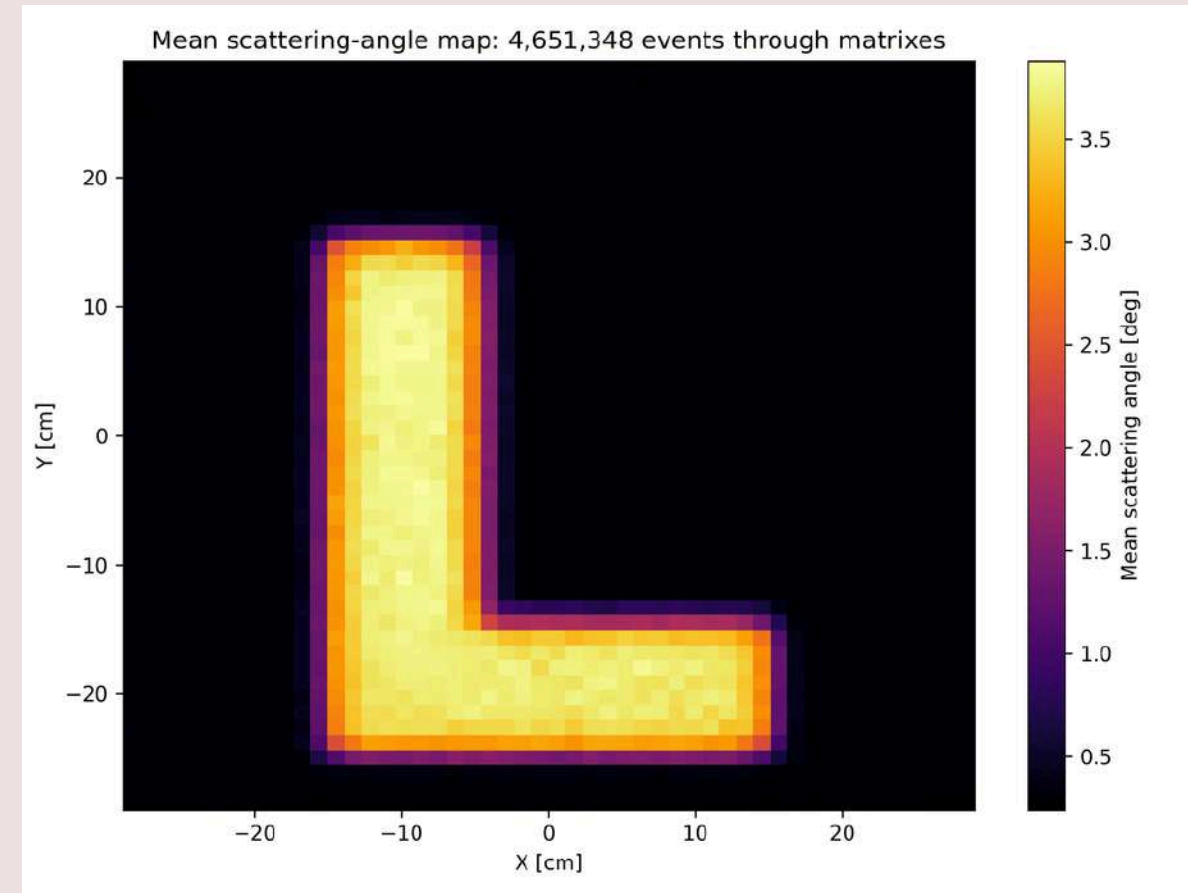
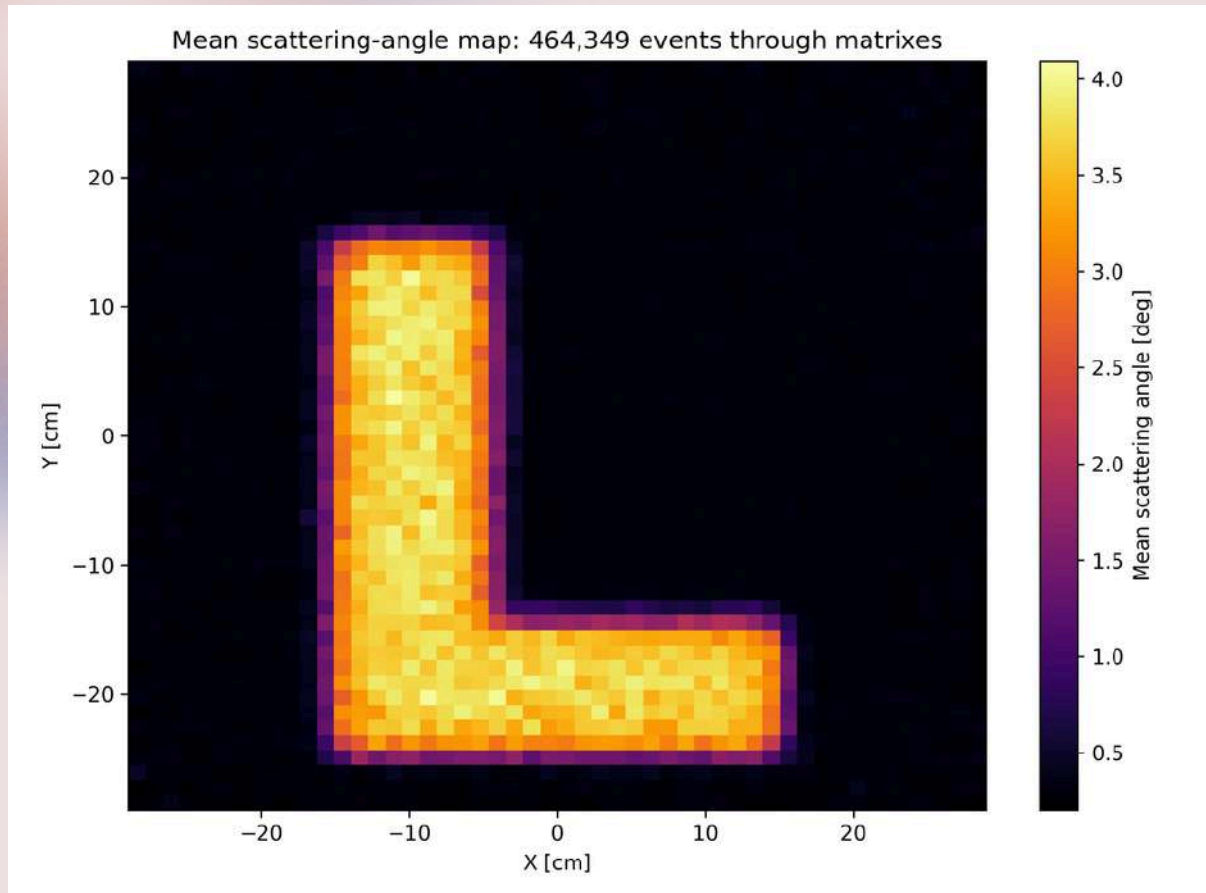
Generacion de particulas y angulos generados por material de centelleo



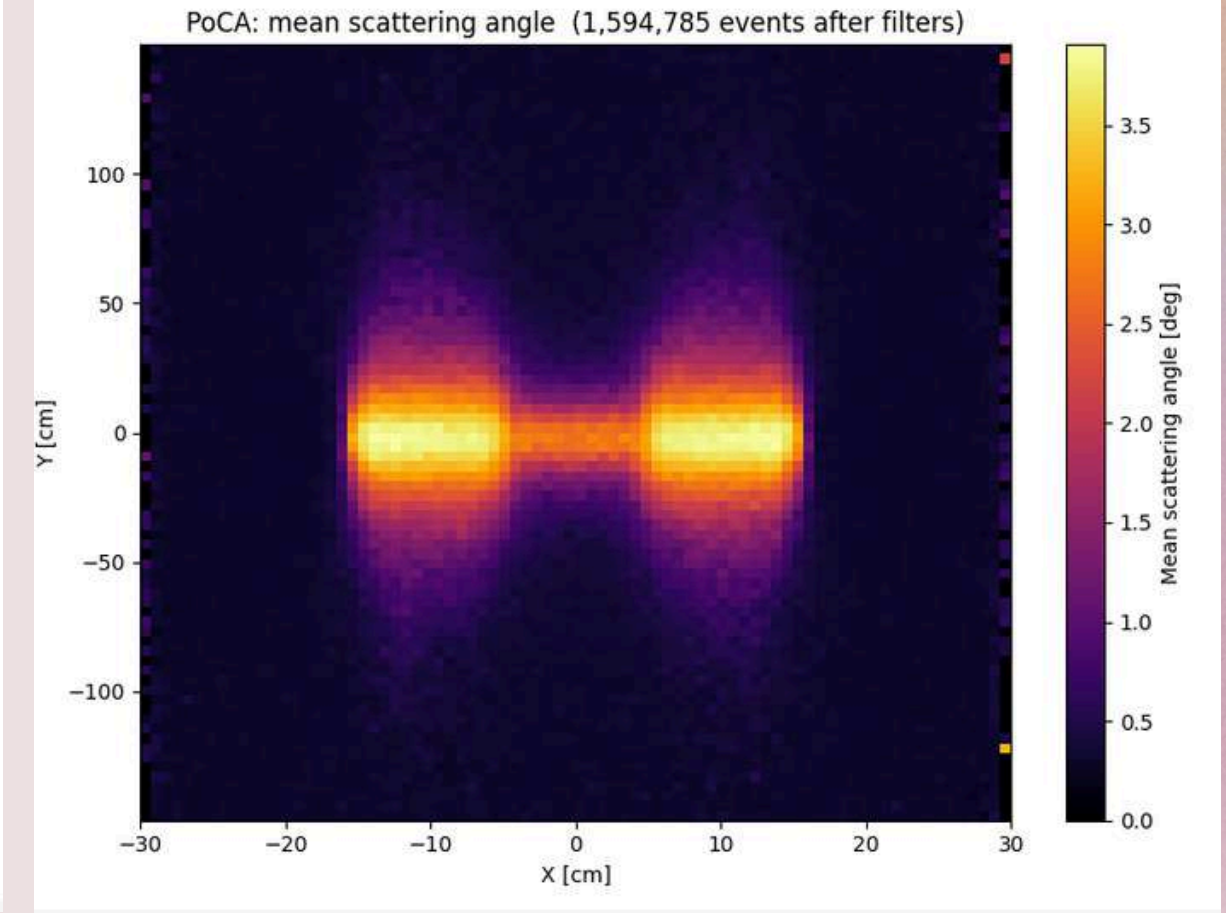
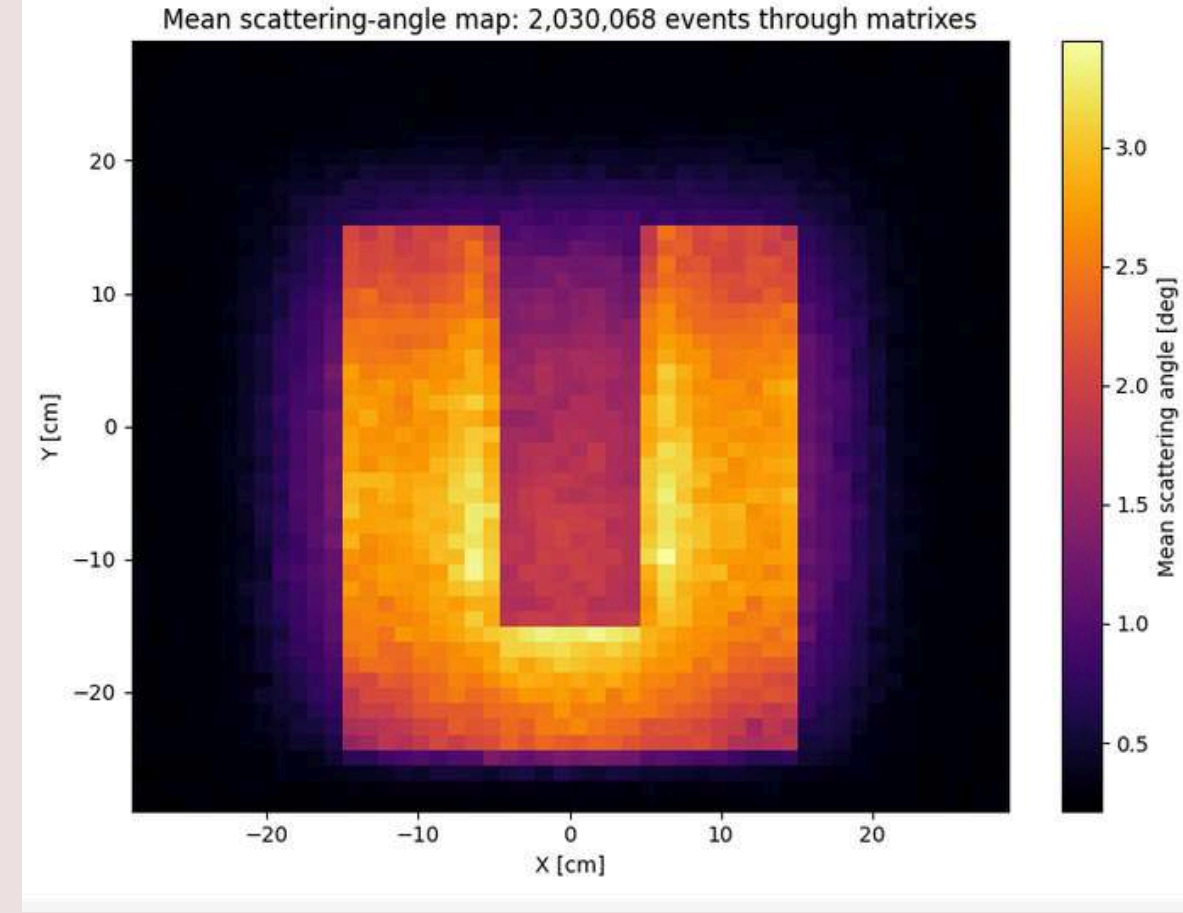
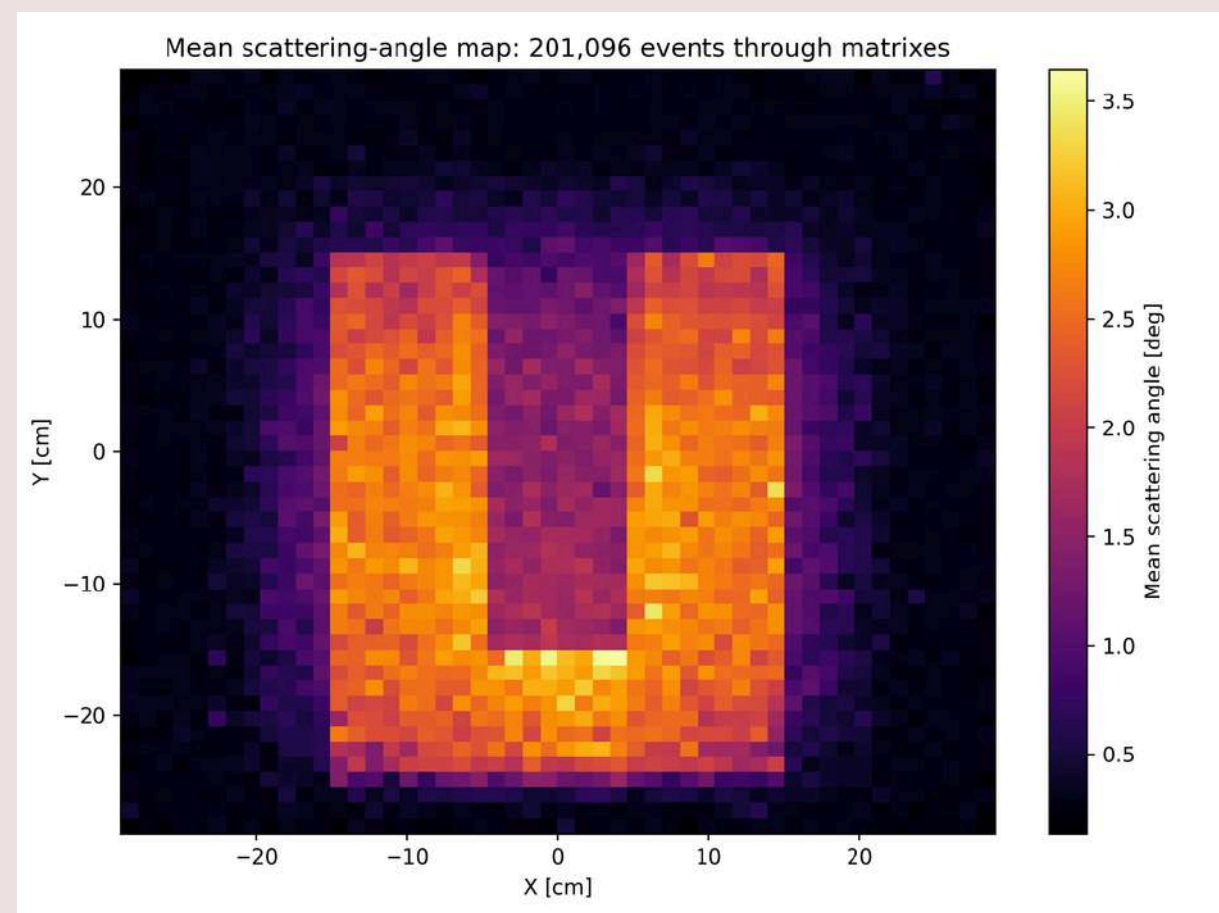
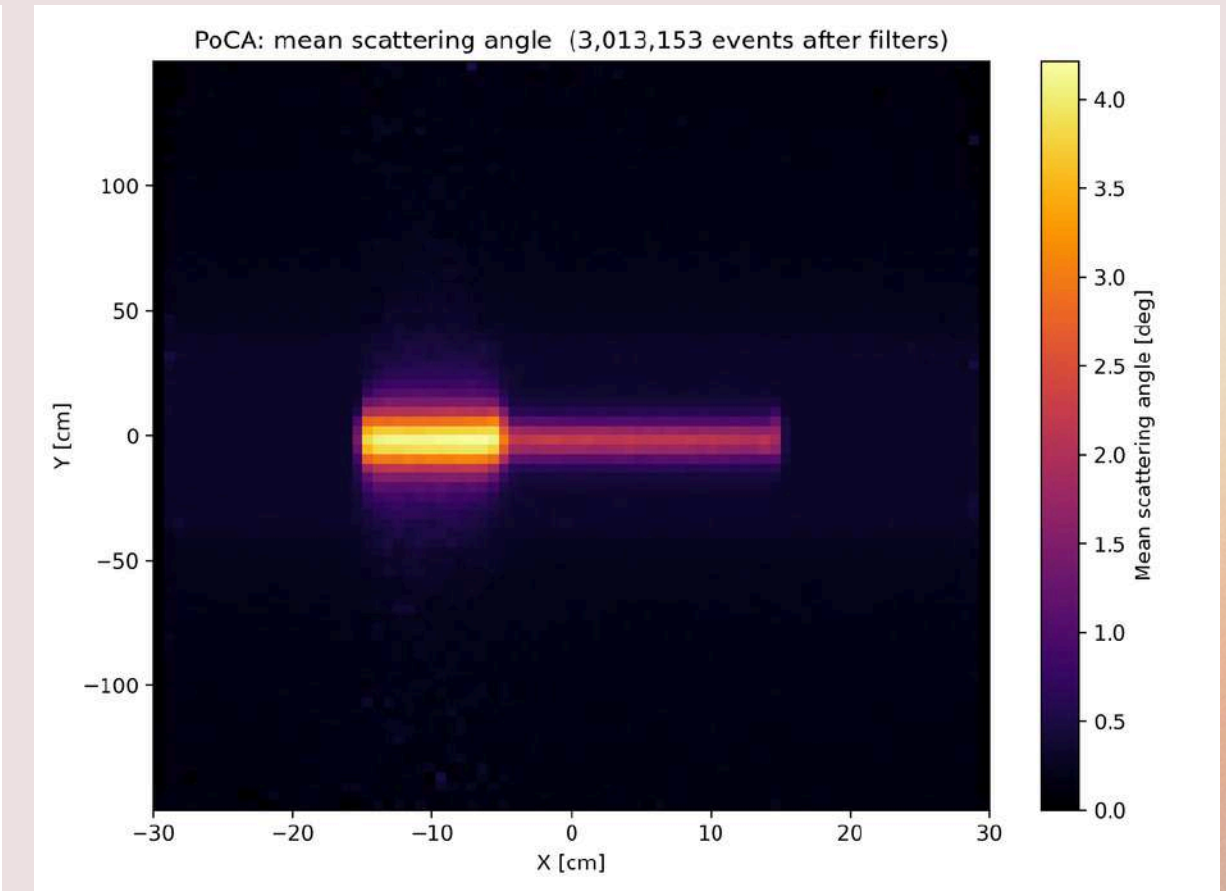
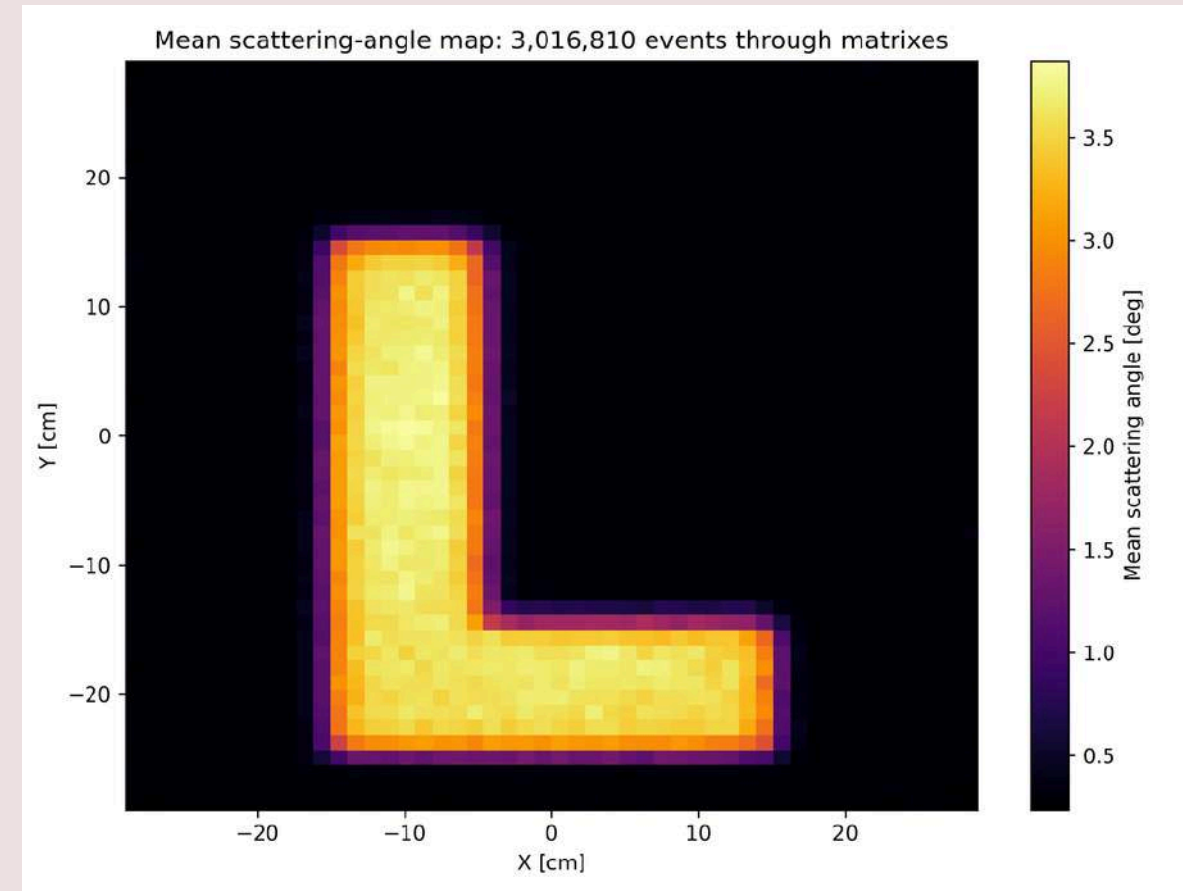
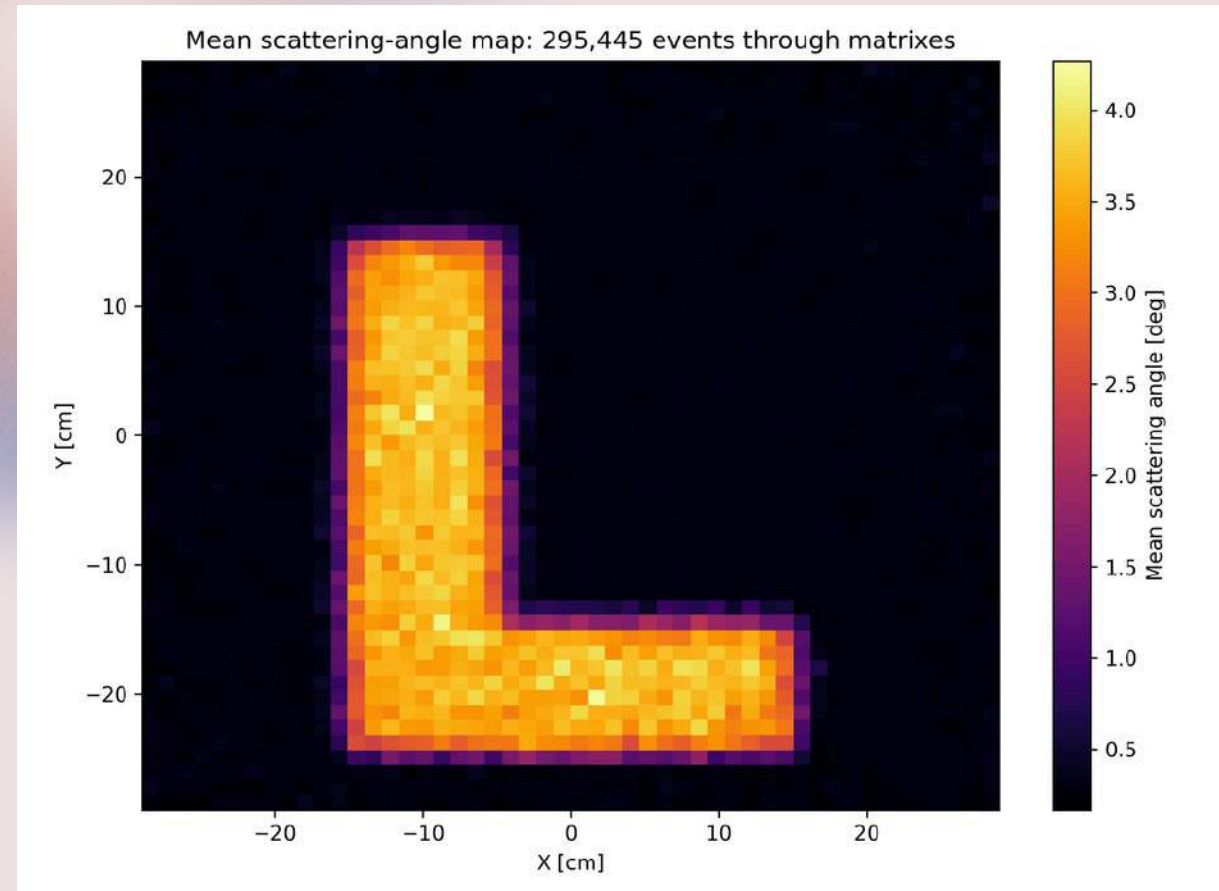
Resultados resolución angular y espacial



Resultados para verificacion

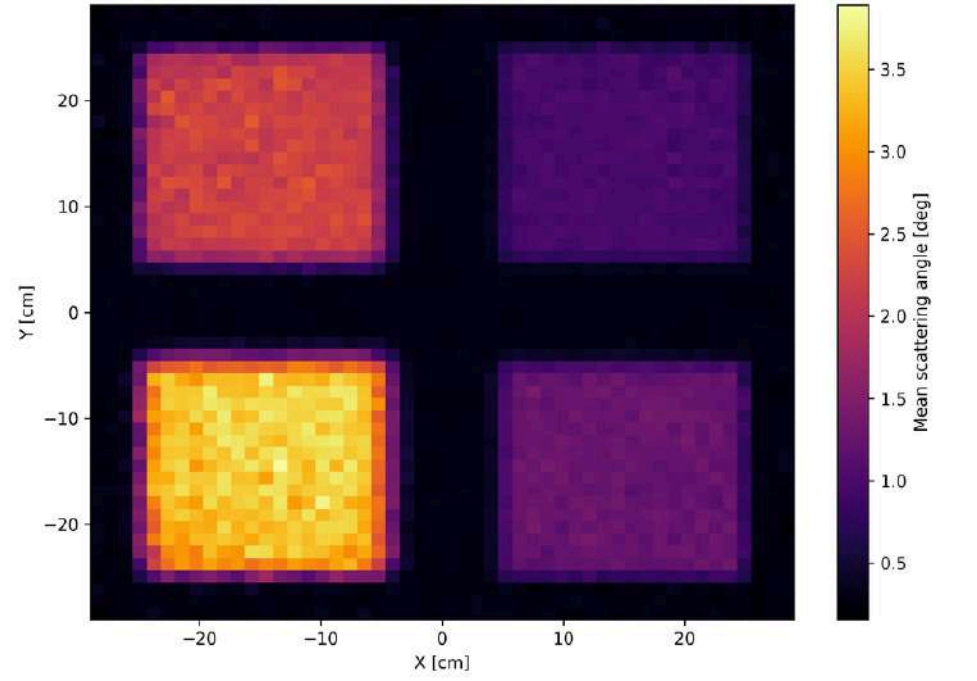


Resultados para verificacion setup d=6m

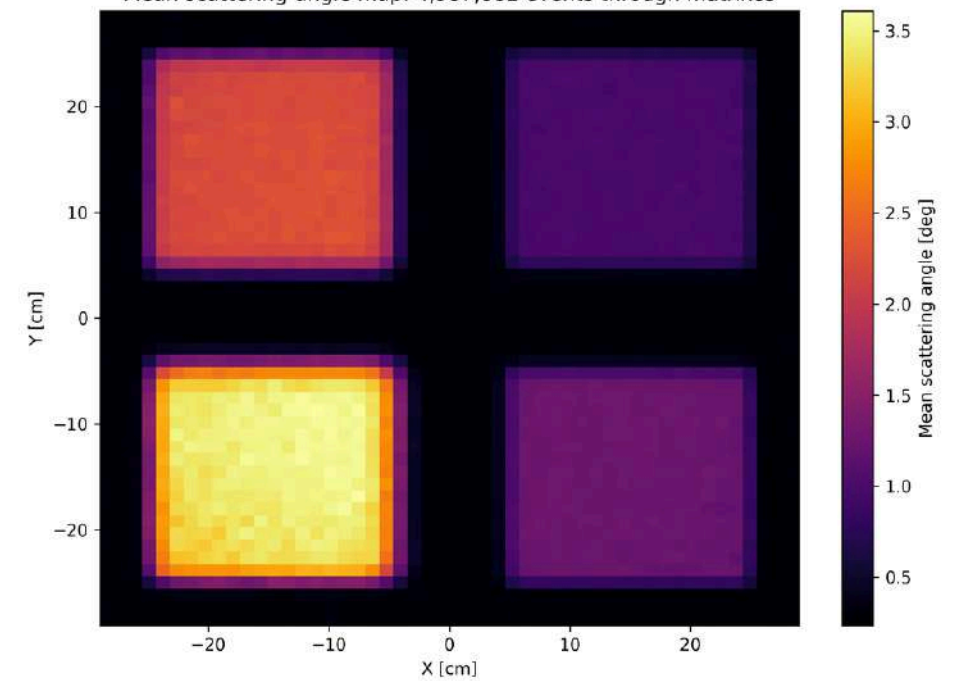


Resultados para verificacion densidades

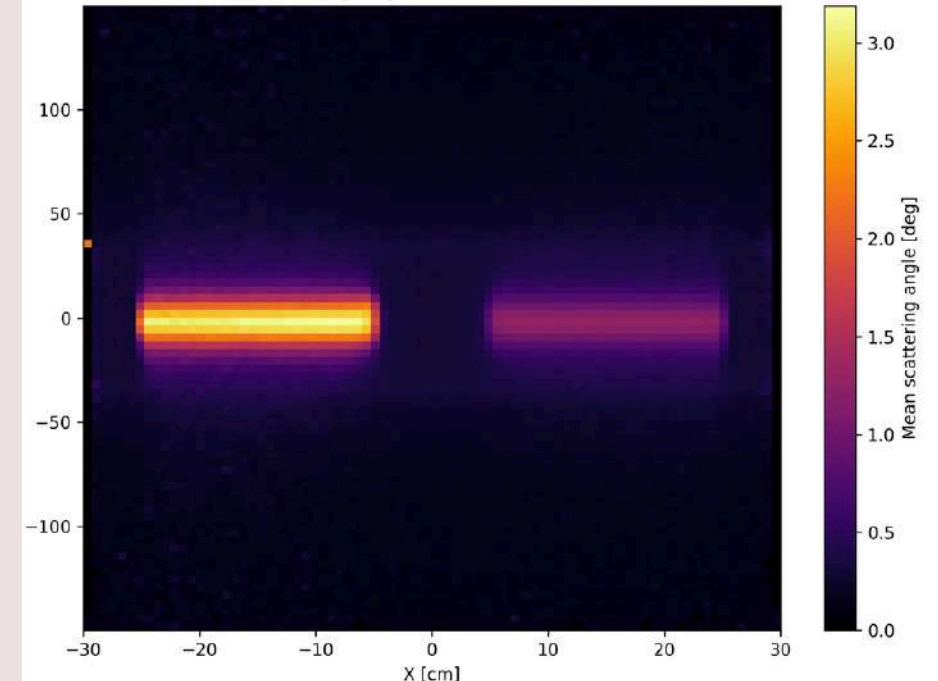
Mean scattering-angle map: 499,483 events through matrixes



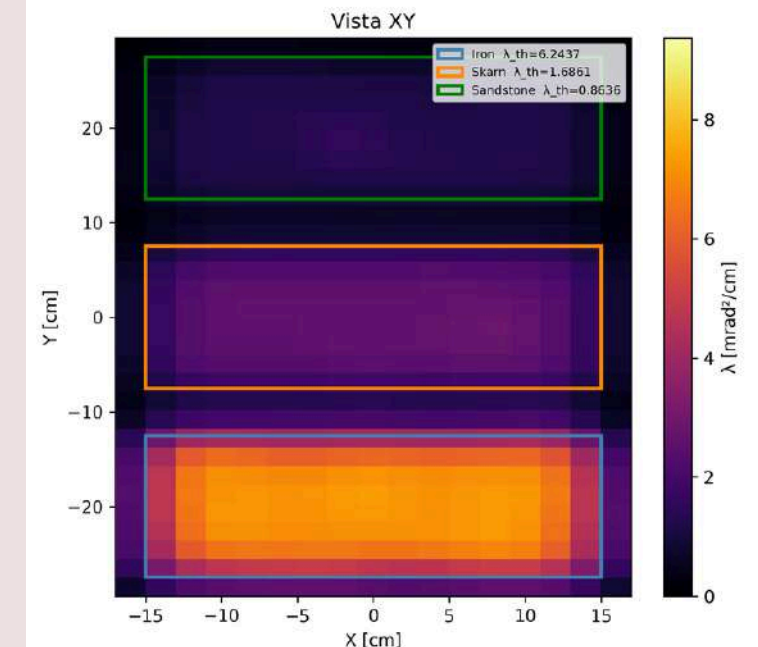
Mean scattering-angle map: 4,987,882 events through matrixes



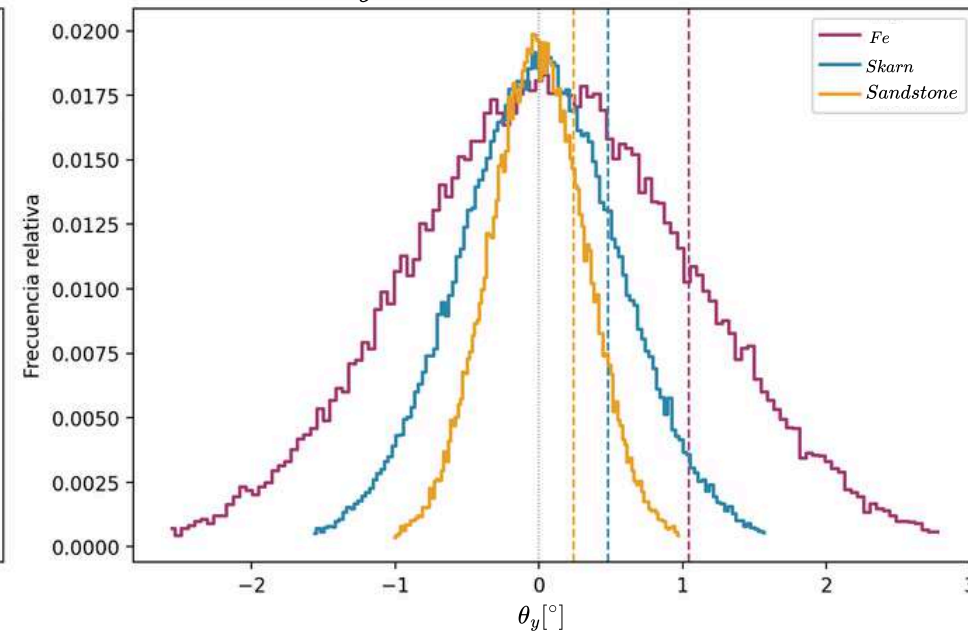
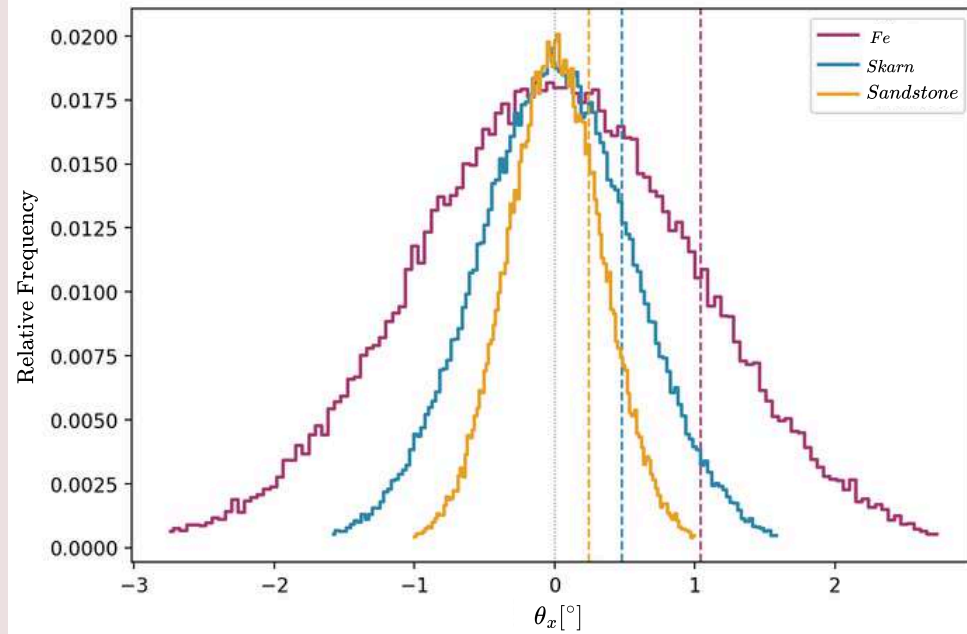
PoCA: mean scattering angle (4,983,690 events after filters)



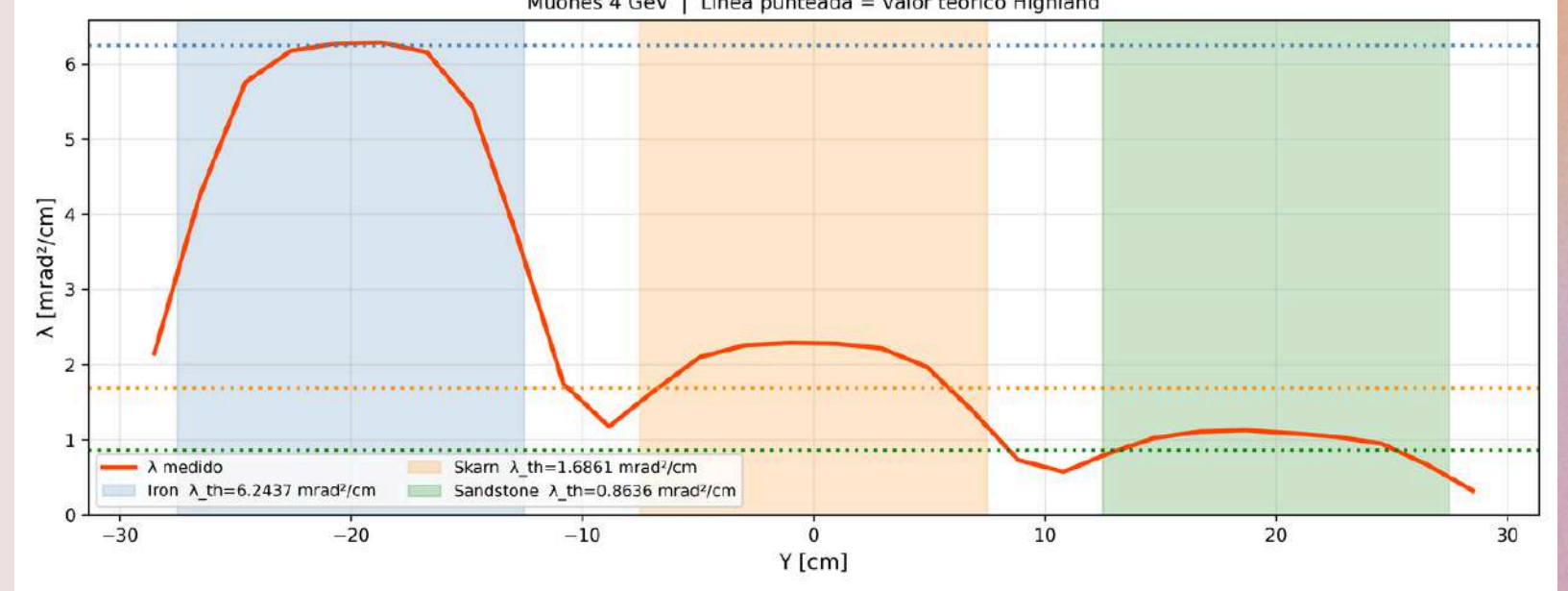
Mapa 2D de Scattering Density $\lambda = \theta^2/L$ [mrad²/cm]
Muones 4 GeV | $p = 4.104$ GeV/c | Iron > Skarn > Sandstone



Comparative material graph θ_x & θ_y



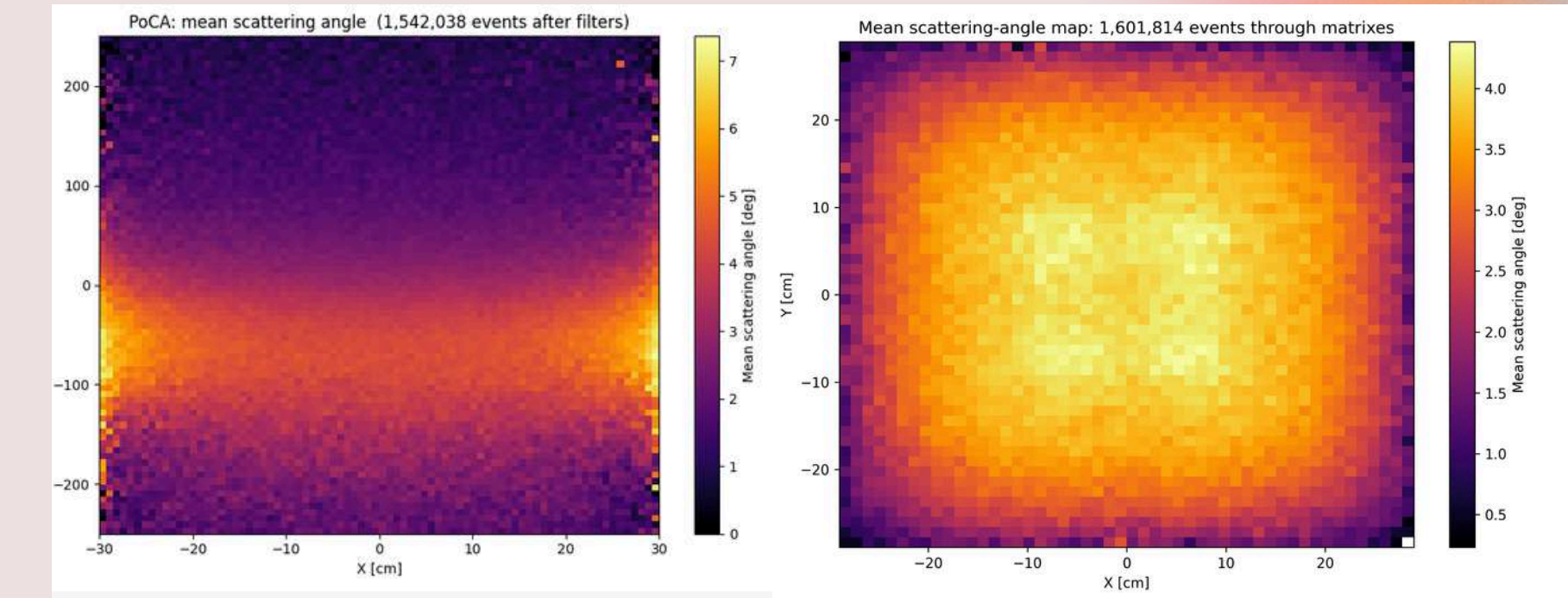
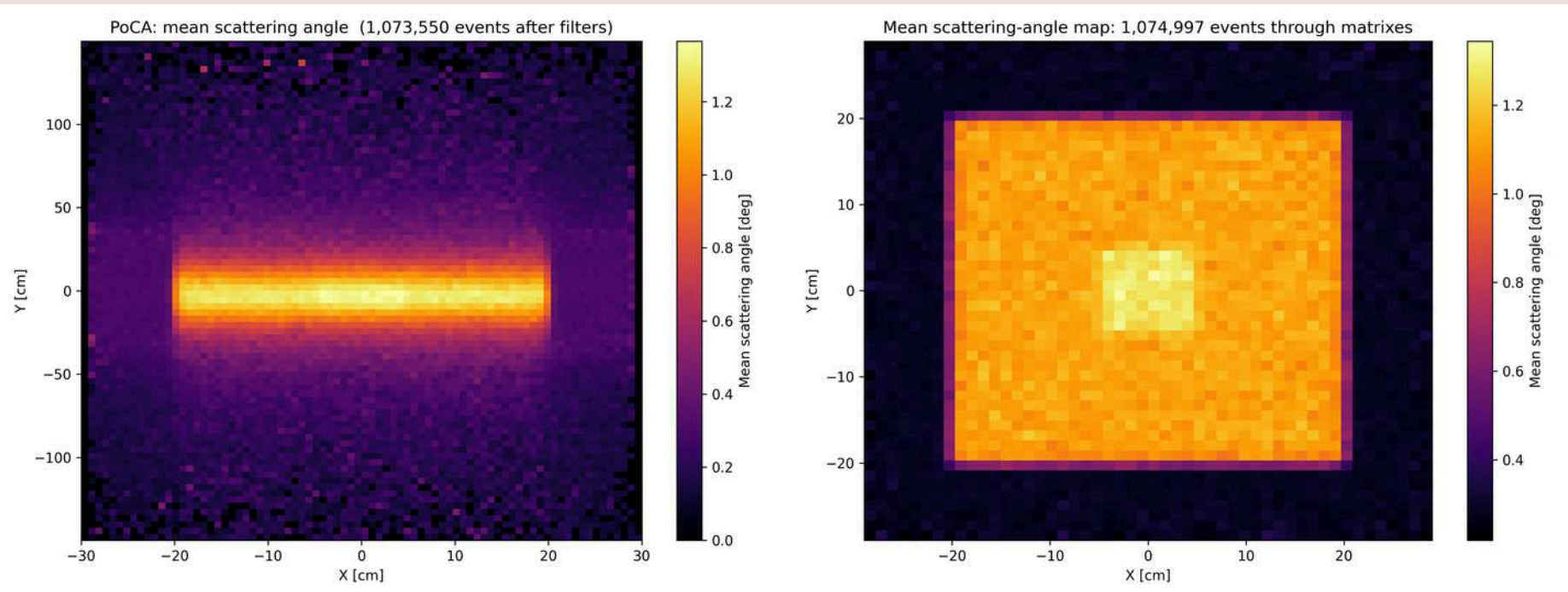
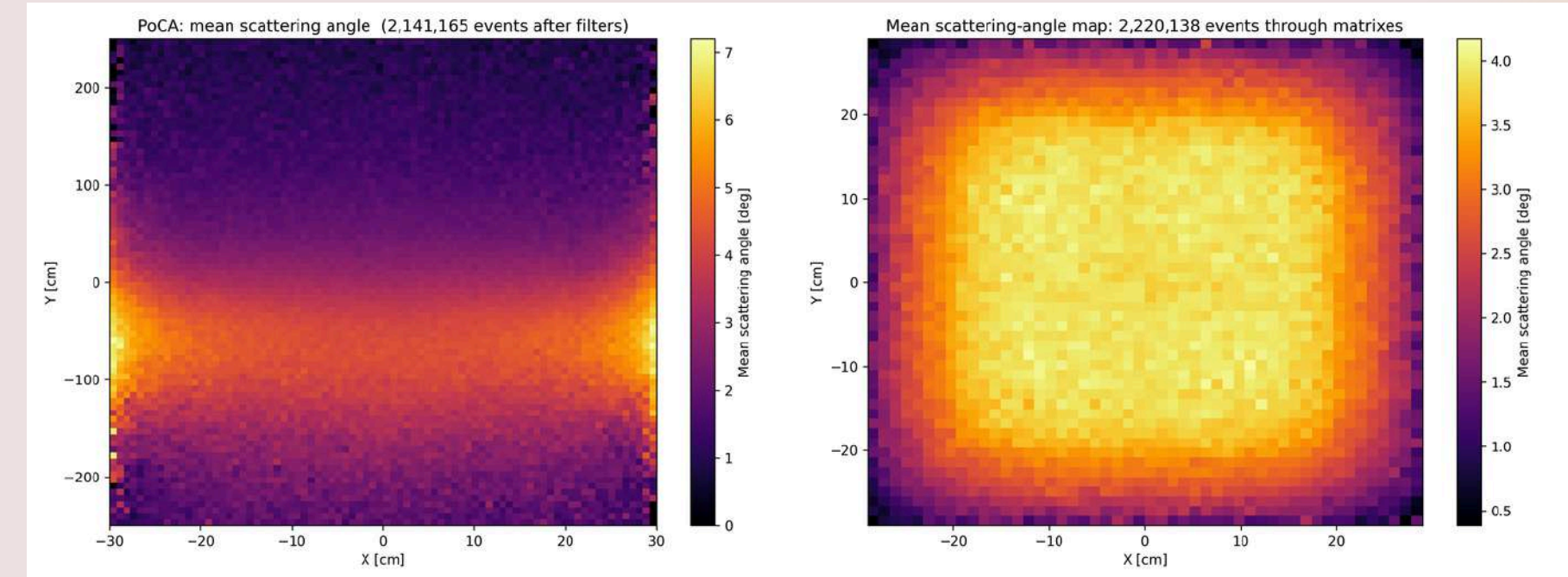
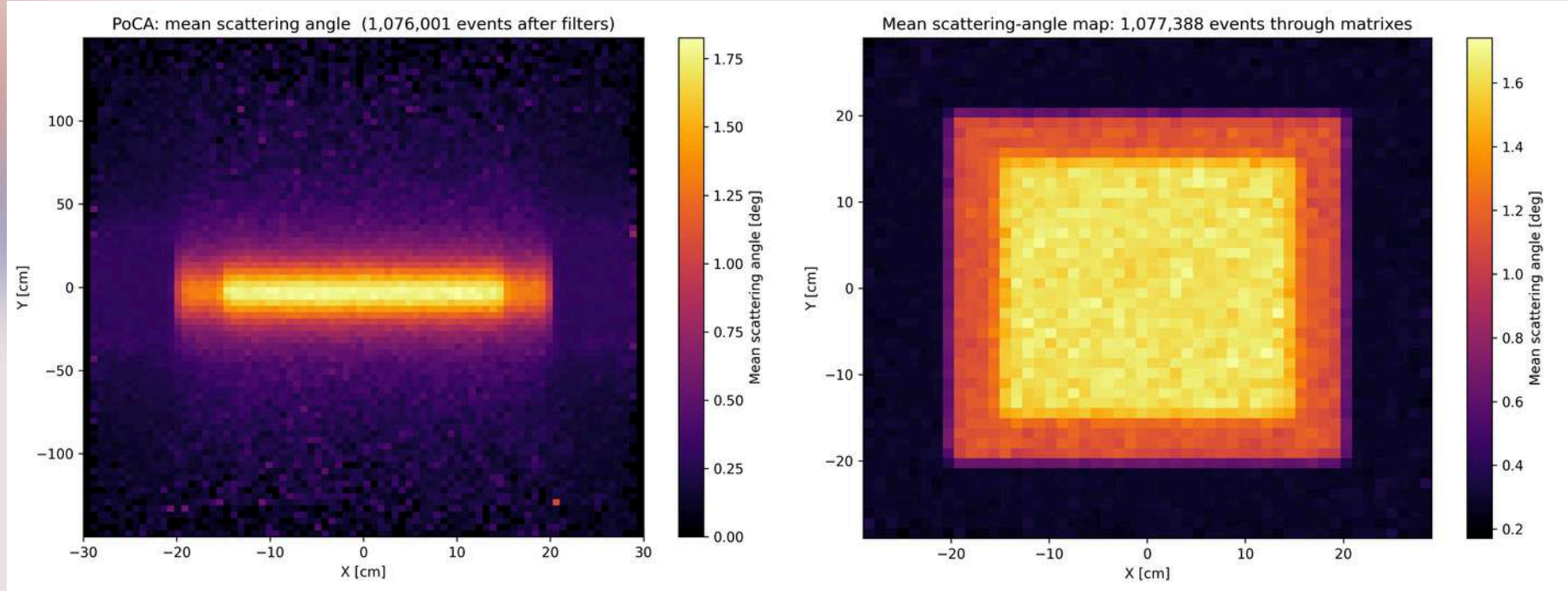
Perfil en Z de la Scattering Density
Muones 4 GeV | Línea punteada = valor teórico Highland



Resultados targets geologicos

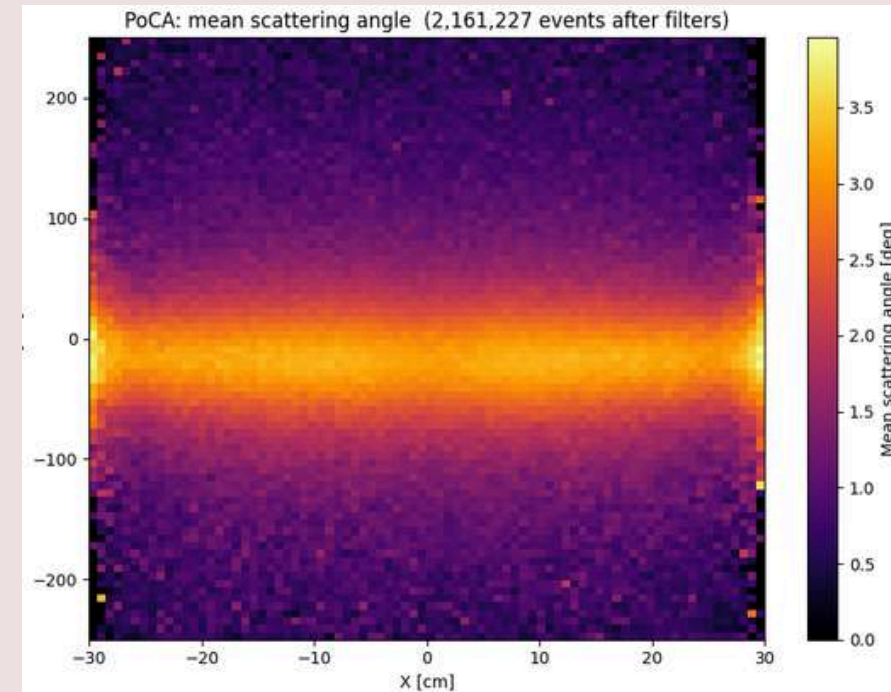
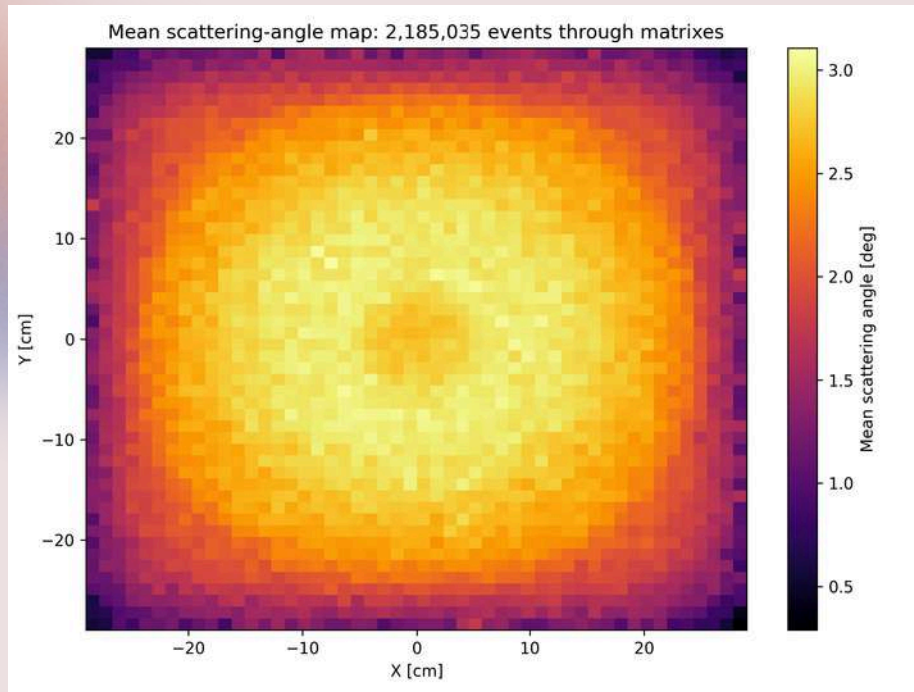
Arenisca

Carbonatita

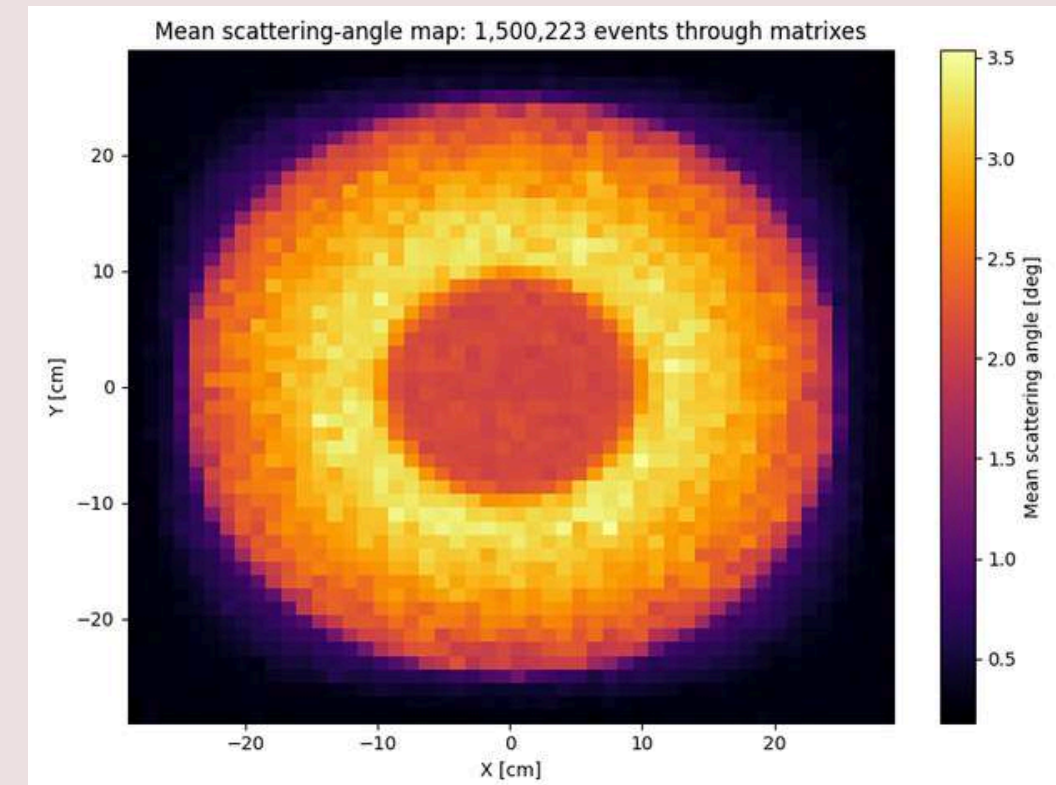


Resultados targets geologicos

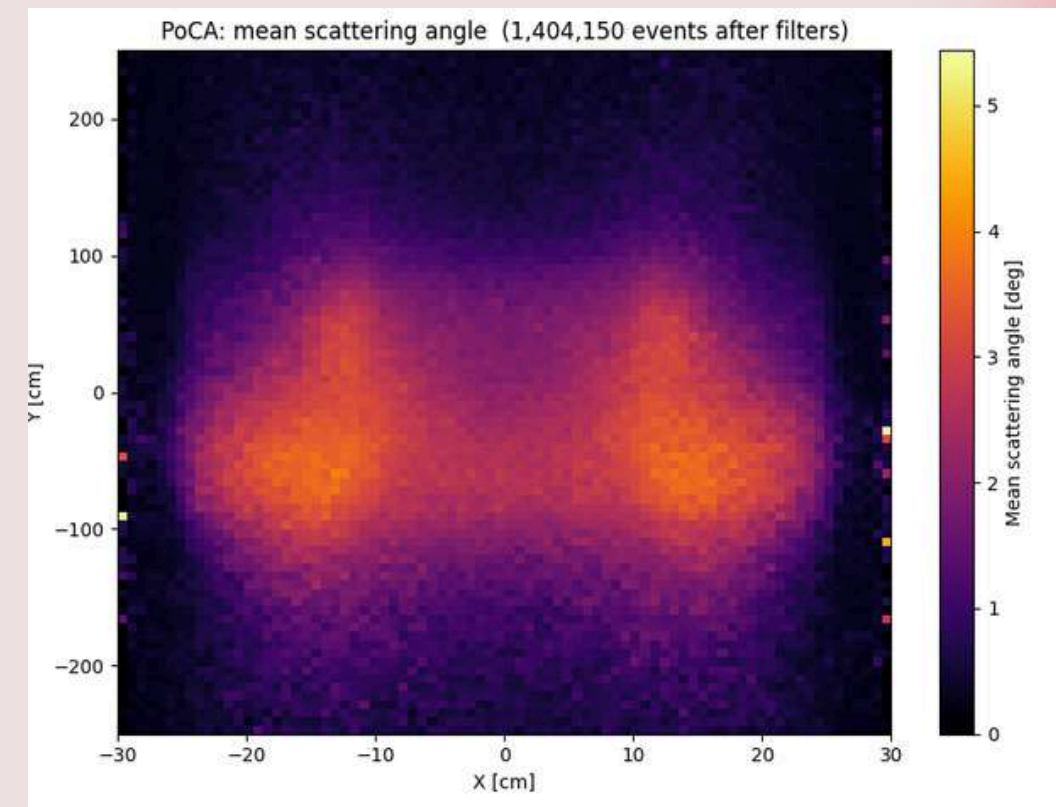
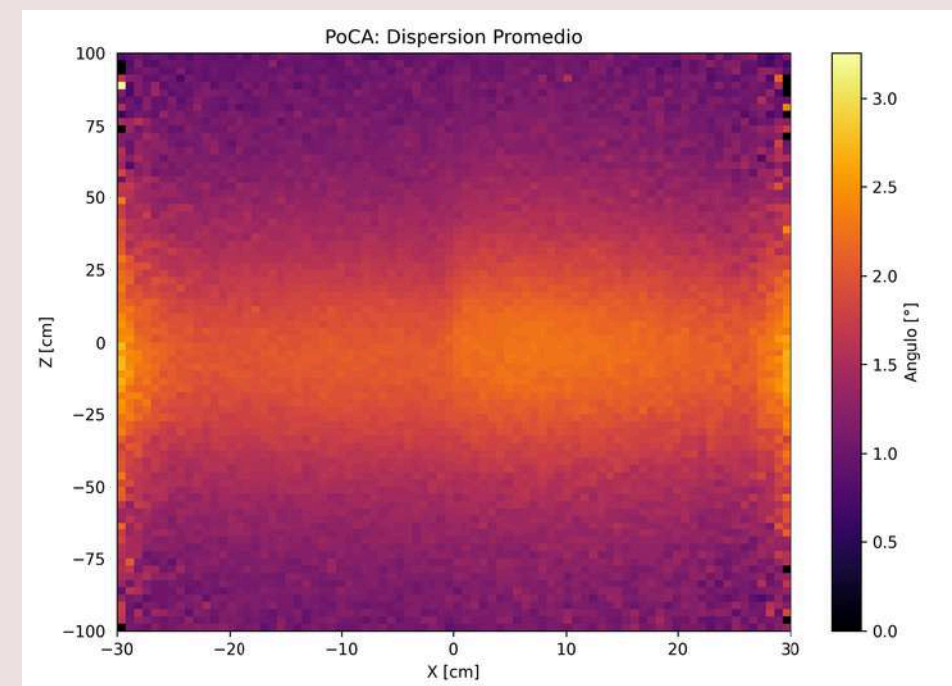
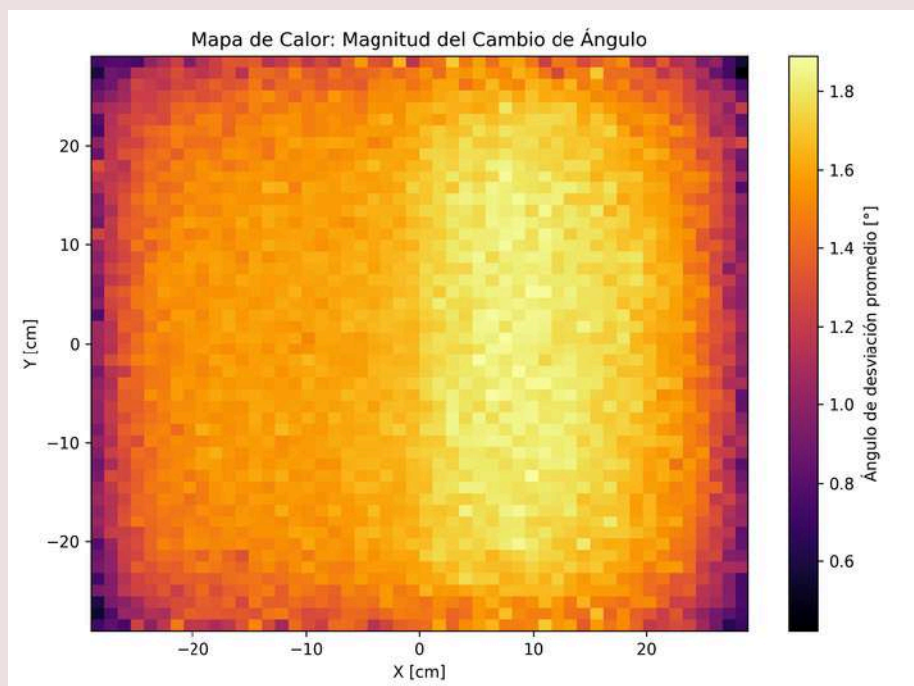
Tubo en roca



Tubo



Medio Tubo

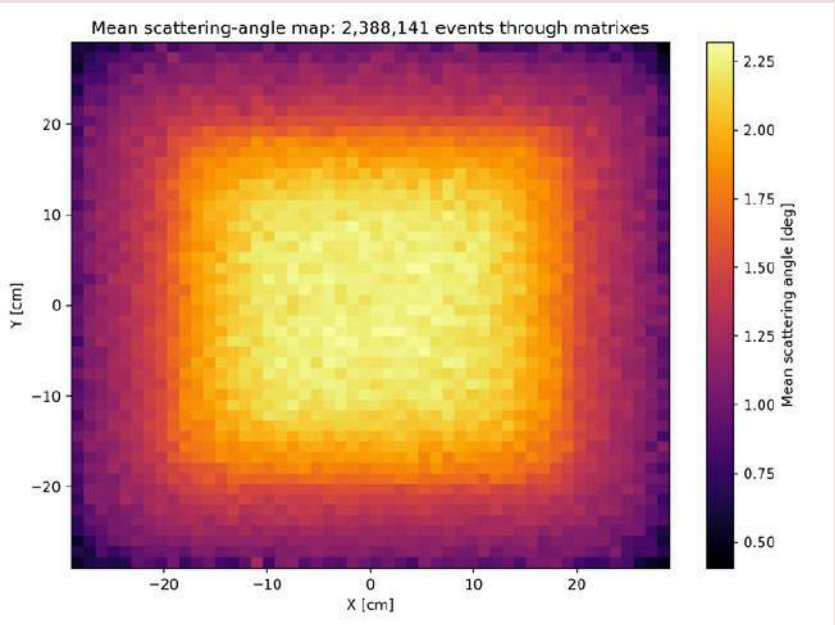


Resultados atenuacion

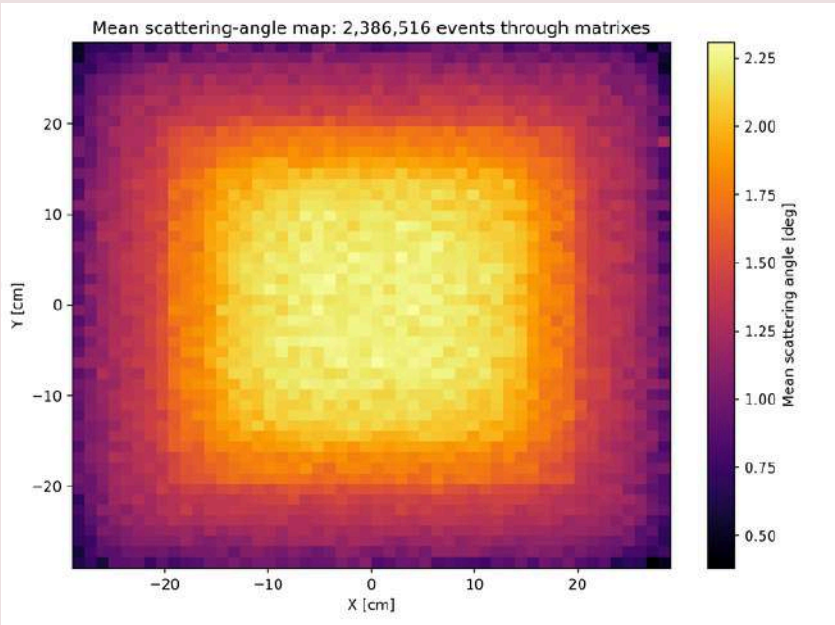
En el plano XY realmente no hay cambio

En el plano XZ hay "contaminacion" de parte de ambos materiales

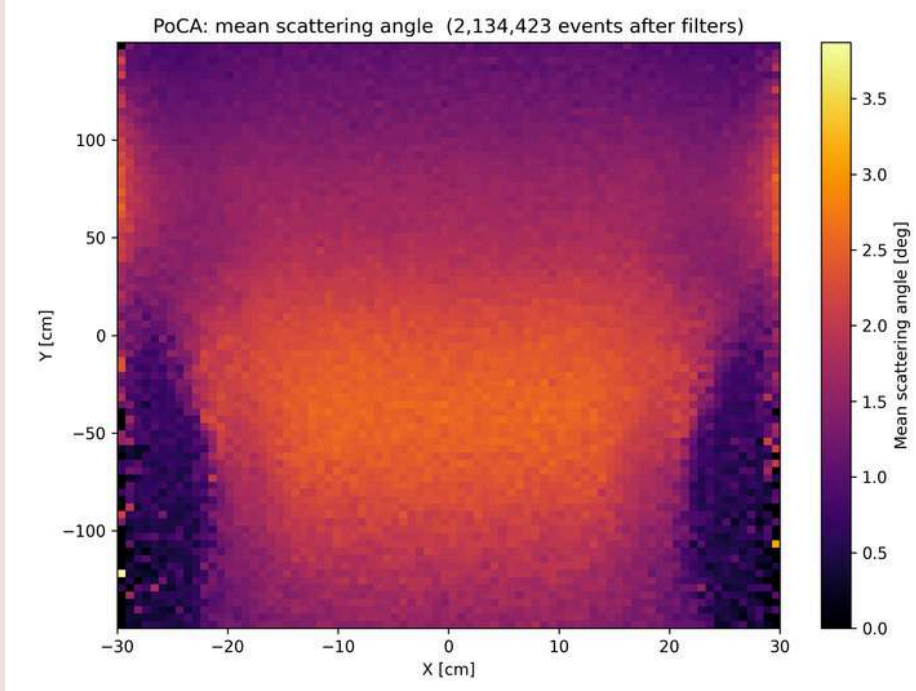
100cm



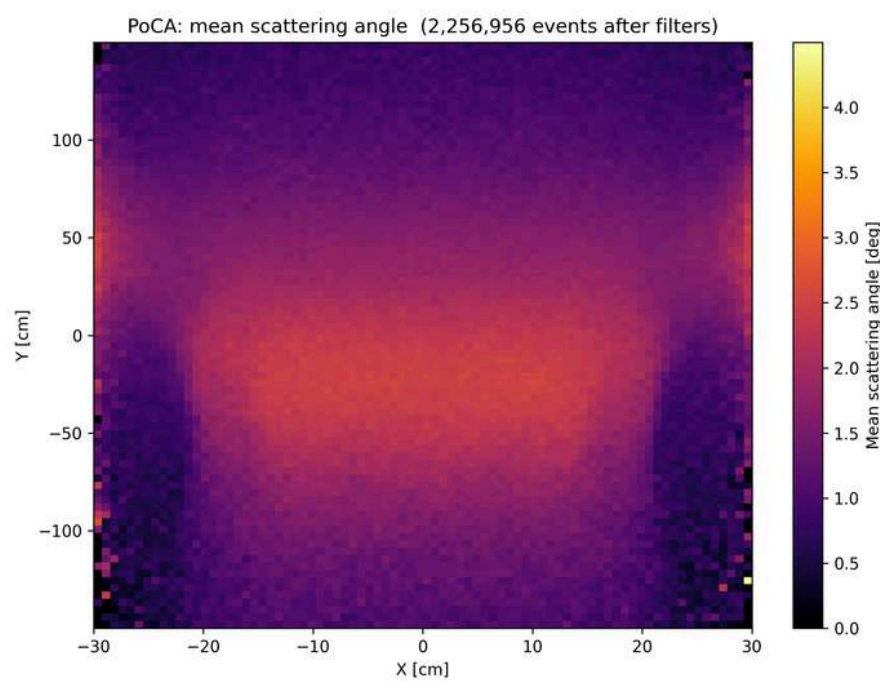
10cm



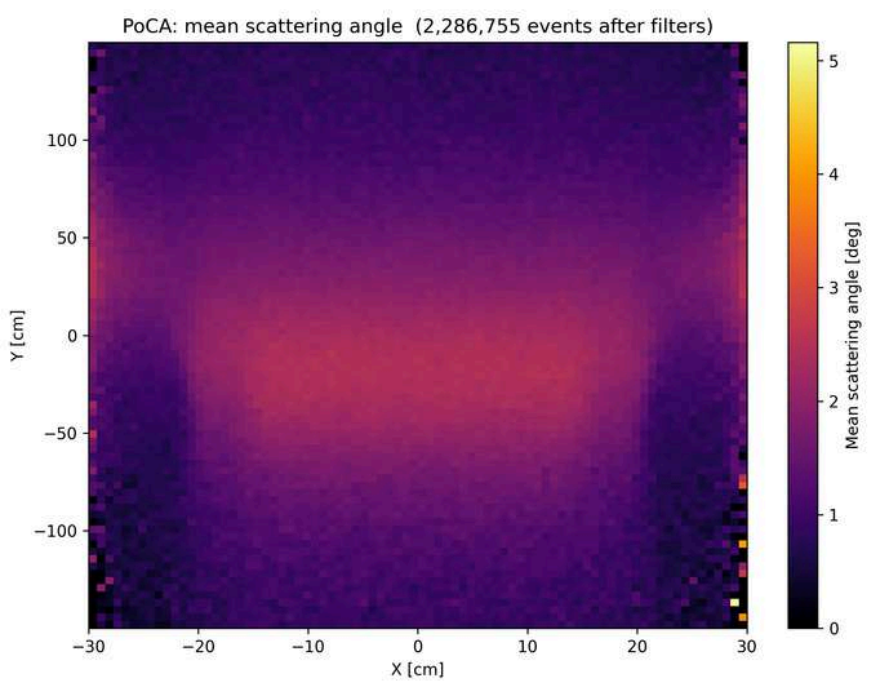
100cm



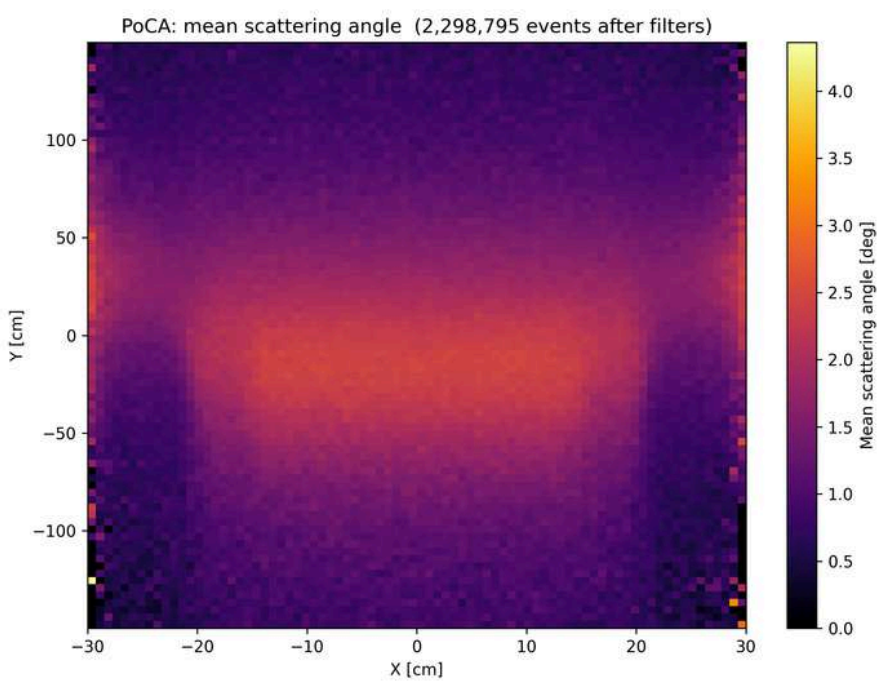
50cm



40cm

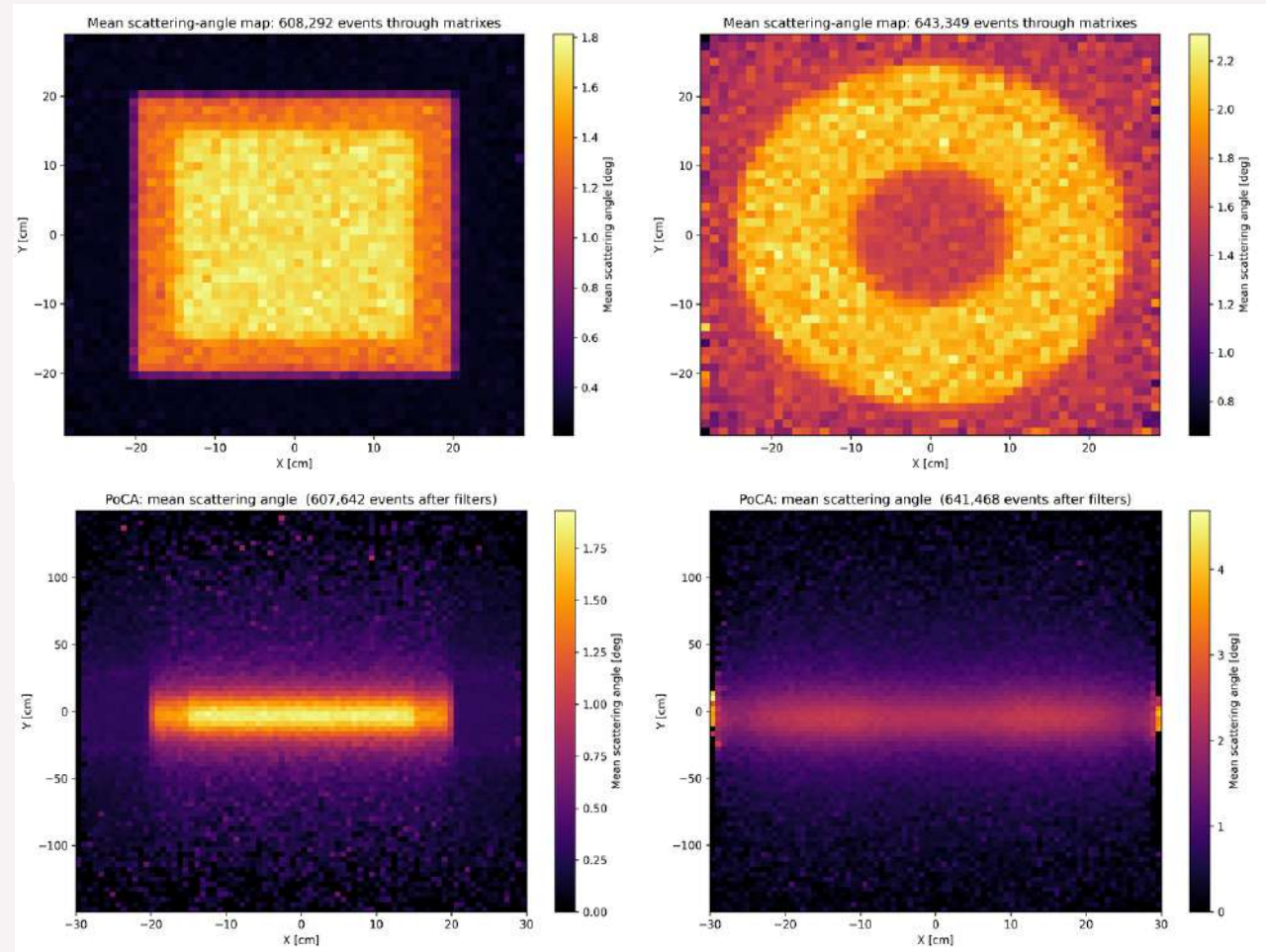


10cm

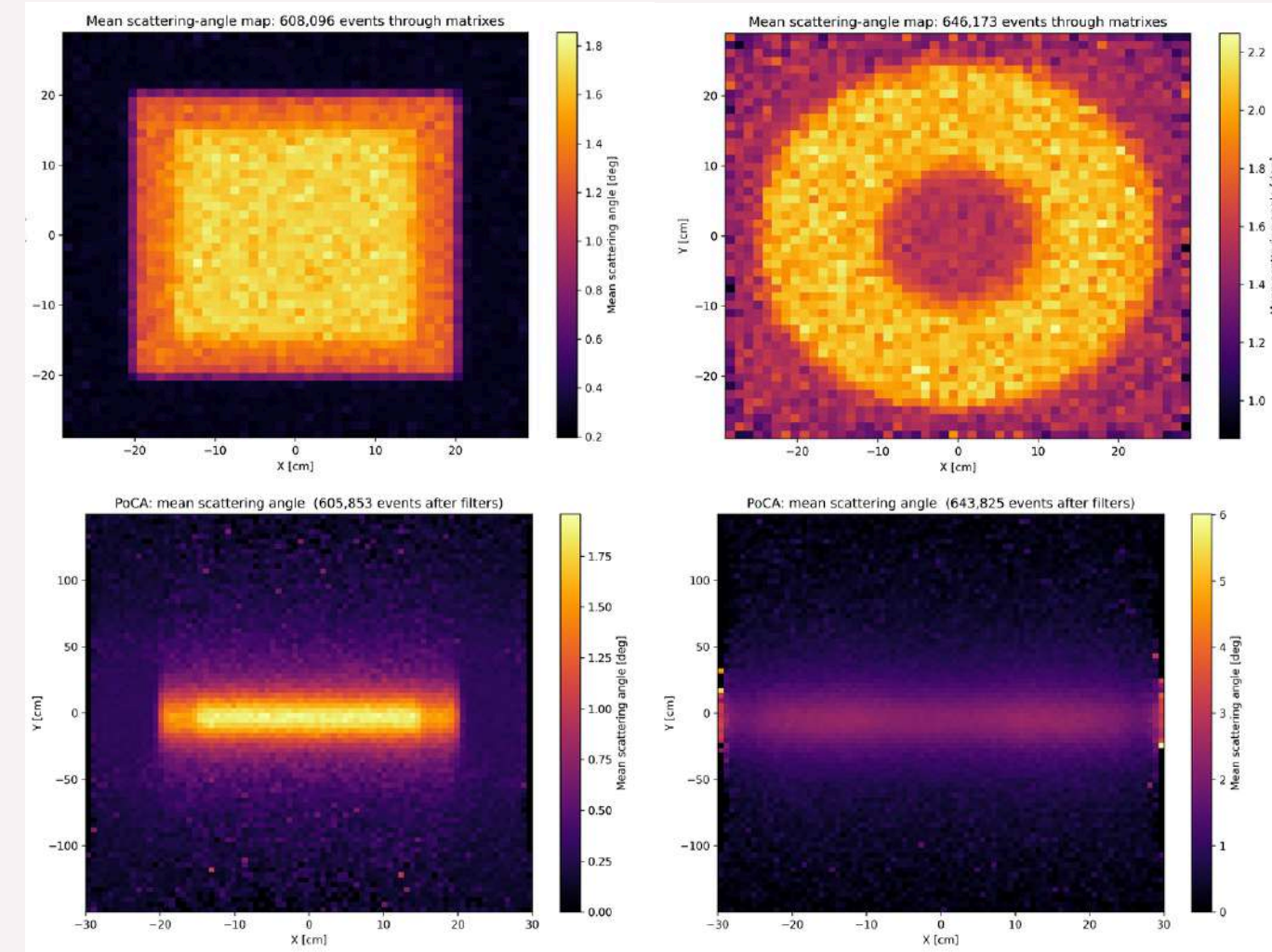


Resultados setup real baja estadística

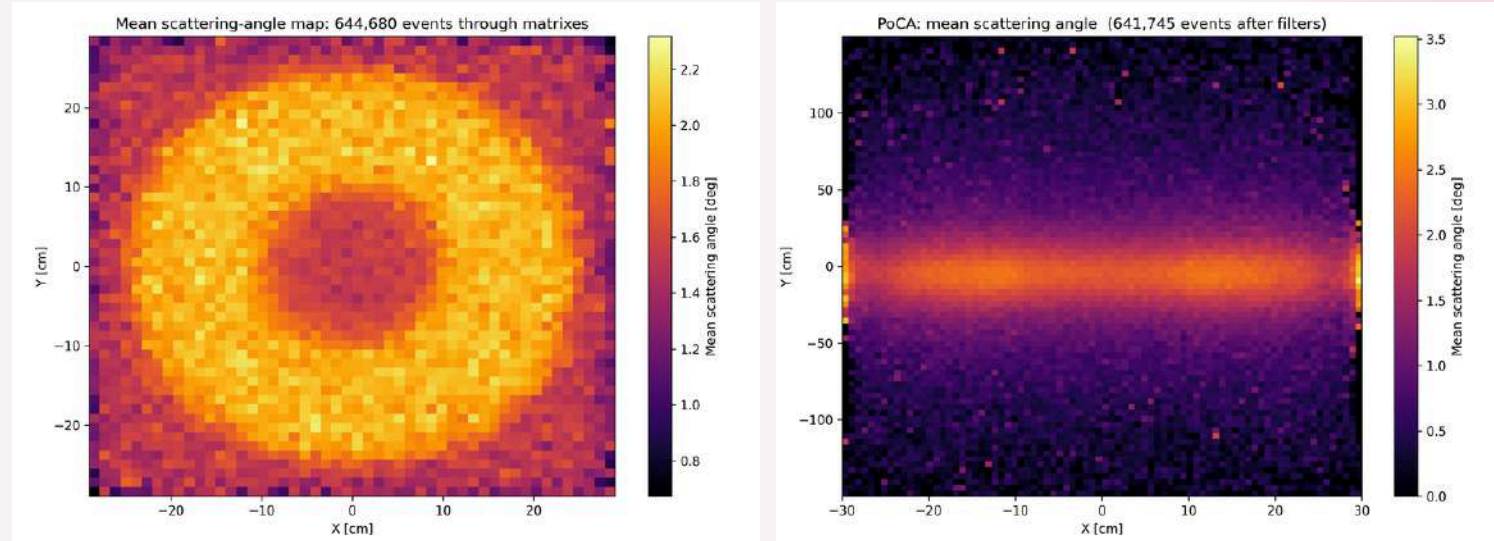
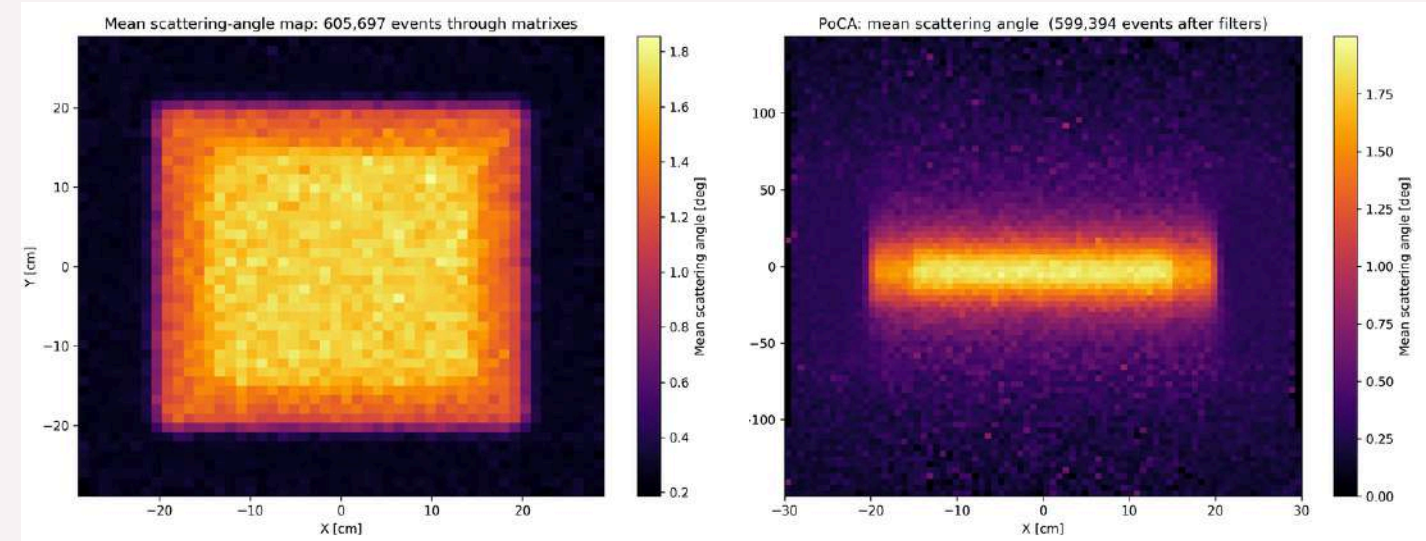
70cm



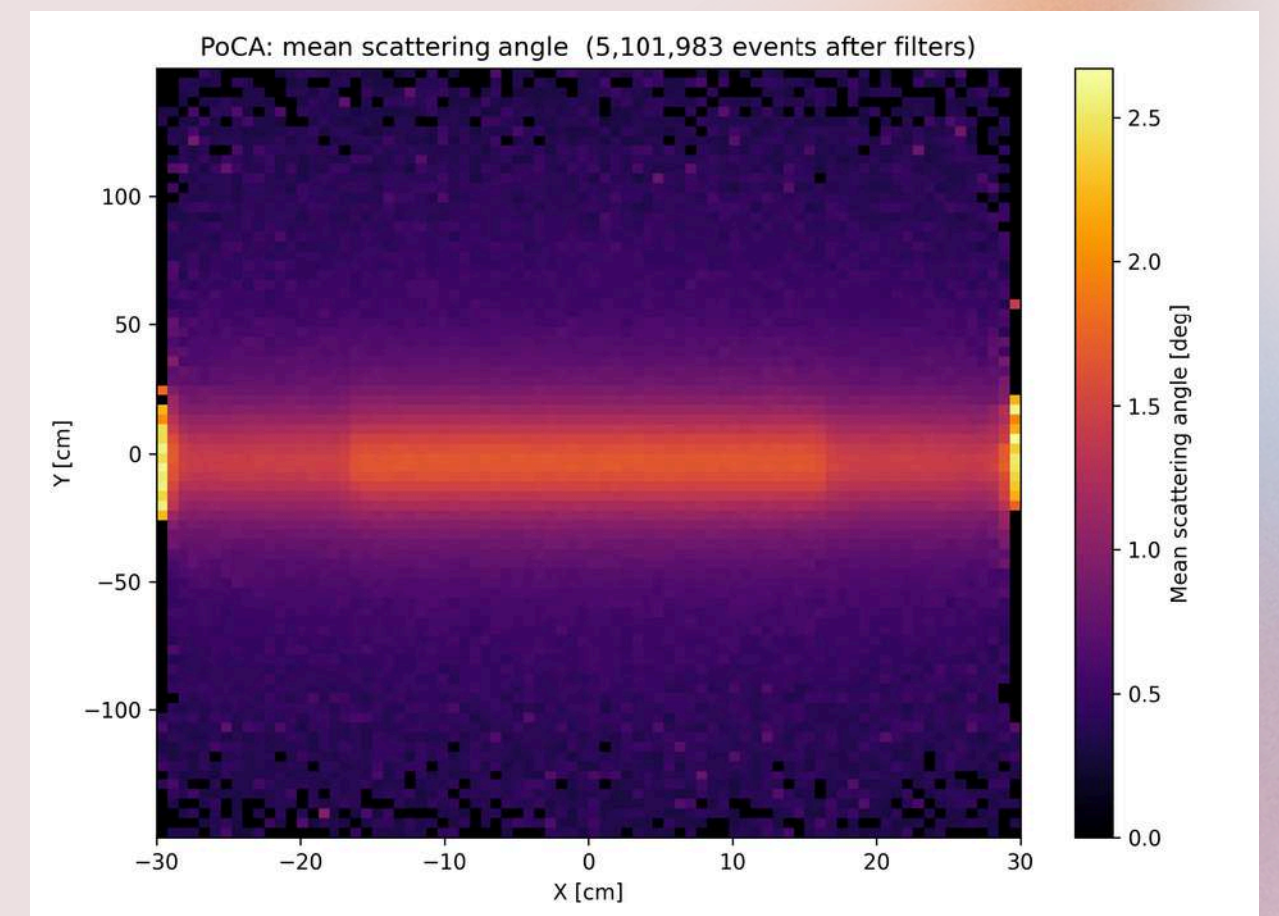
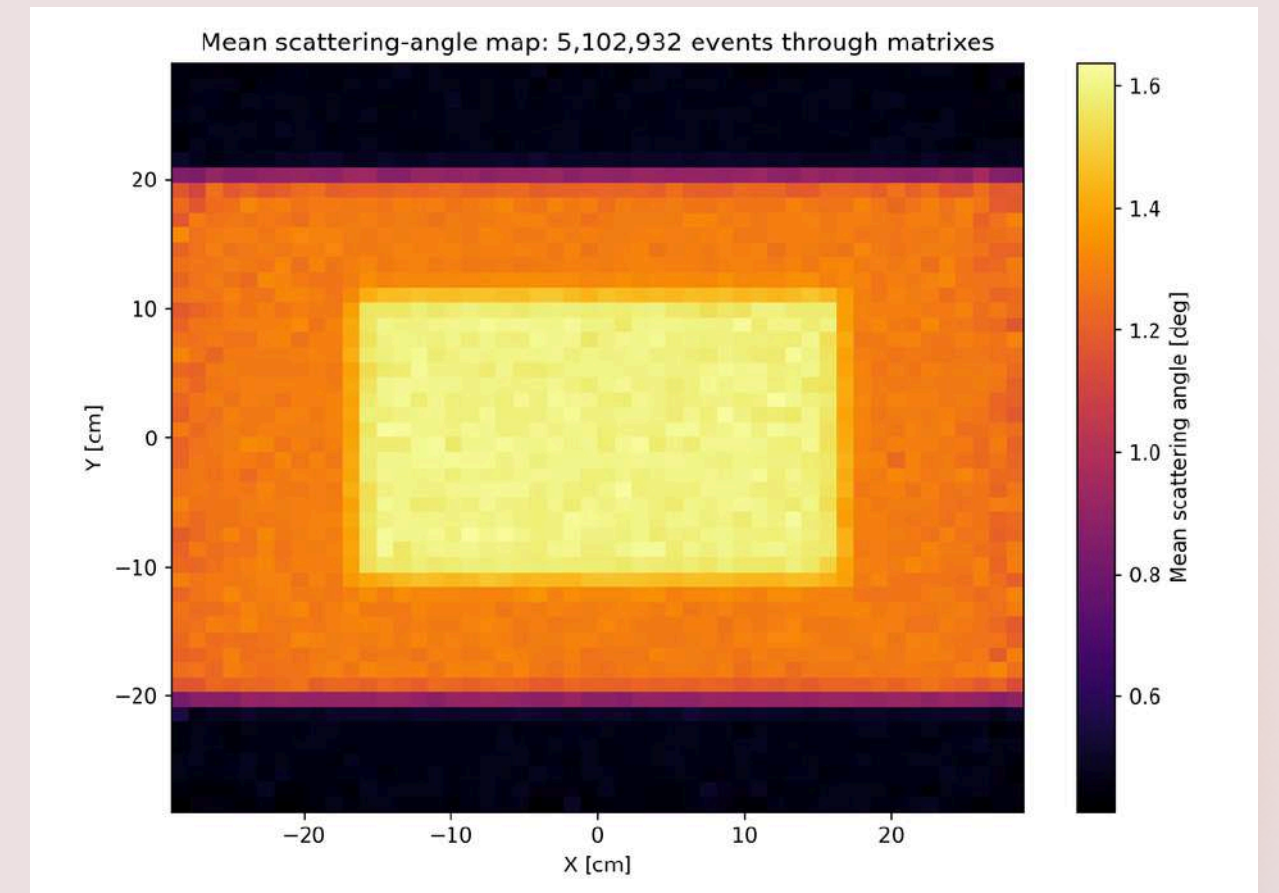
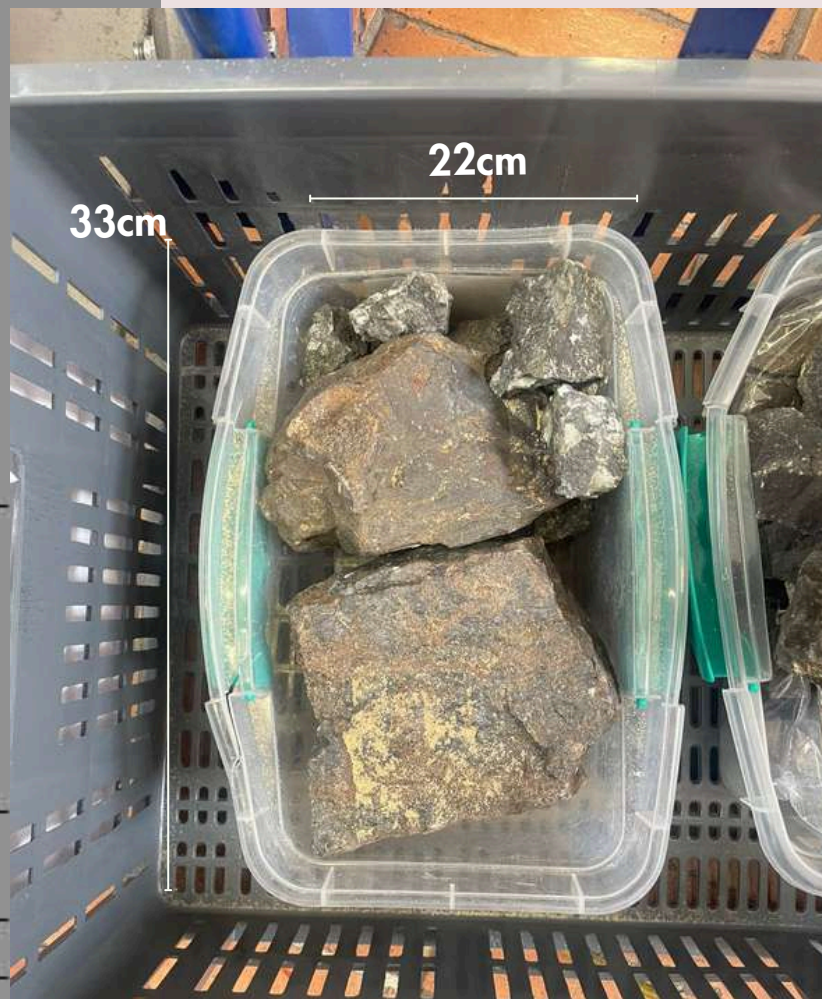
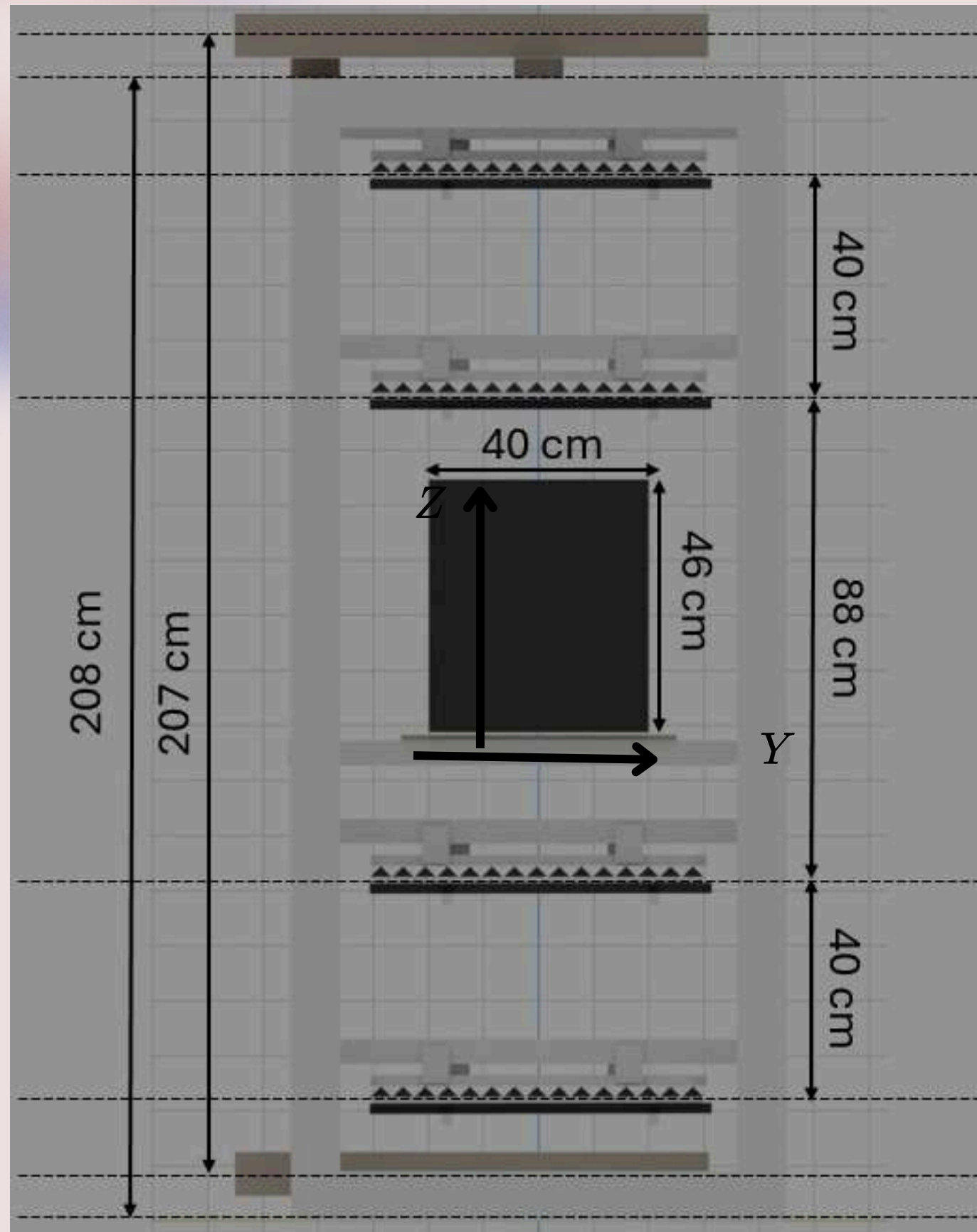
50cm



30cm



Resultados muestra prueba laboratorio



Conclusiones

- El detector tiene **resolución angular suficiente** para detectar cambios de hasta 0.015 rad, superando el requerimiento de 0.030 rad.
- Para el setup real, con estadística suficiente **el ángulo de scattering se estima correctamente**; a baja estadística el ángulo no cambia más de 1° , aunque **el plano XZ presenta regiones de alta incertidumbre** (ruido).
- En targets de alto Z las geometrías se reconstruyen correctamente tanto en XY como en XZ; sin embargo, en XZ los planos pueden "aplastarse" y el objeto aparecer más grande o más pequeño de lo real.
- **El ángulo de scattering aumenta con la densidad del material circundante**, independientemente de la separación entre detectores. **El bloque se atenúa incluso sin estar en otro material**, y también si hay un objeto por encima en el plano de detección.

- Cuando el **target es muy grande** se pierde resolución en ambos planos, pero **en XY solo se difuminan los bordes** y en **XZ aparece mas ruido en la direccion Z** de los planos de detección.
- **El ángulo registrado no varía más de 1° a pesar de baja estadística y baja eparacion entre matrices.** el método es suficiente frente a estadística reducida.
- **Si se conoce el momento del muón es posible estimar la longitud de radiación del material** atravesado, sin embargo a **muones multienergeticos** pueden hacer que la estimacion tenga muchos outliers.
- **Se recuperan bien geometrías complejas** (tubos, medios tubos, formas U/L).

Trabajo futuro

- Pruebas con muestra de laboratorio en entorno controlado
- Campaña de campo sobre depósitos skarn conocidos para validar contra datos simulados.
- Calibración del detector con materiales de Z conocido (Al, Fe, Cu, Pb) para habilitar la estimación de x/X_0 con la fórmula de Highland. Sin esta calibración no es posible hacer inferencia composicional sobre minerales desconocidos.
- Entrenar una red neuronal para resolver el problema inverso: entrada = distribuciones de ángulo de scattering por voxel, salida = mapa de densidad y Z efectivo. Esto debido a claros patrones en ciertos casos de estudio
- Estudio de optimización formal de las posiciones de matrices interiores para cada clase de target.

Referencias

1. H. K. M. Tanaka, T. Uchida, M. Tanaka, M. Takeo, J. Oikawa, T. Ohminato, Y. Aoki, E. Koyama, H. Tsuji, Detecting a mass change inside a volcano by cosmic-ray muon radiography (muography): first results from measurements at Asama volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.* 36 (2009) L17302. <https://doi.org/10.1029/2009GL039448>
2. S. Miyamoto, S. Nagahara, K. Morishima, T. Nakano, M. Koyama, Y. Suzuki, A muographic study of a scoria cone from 11 directions using nuclear emulsion cloud chambers, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 11 (2022) 127–147. <https://doi.org/10.5194/gi-11-127-2022>
3. D. W. Schouten, P. Ledru, Muon tomography applied to a dense uranium deposit at the McArthur River mine, *J. Geophys. Res. Solid Earth* 123 (2018) 8637–8652. <https://doi.org/10.1029/2018JB015626>
4. S. Kedar, H. K. M. Tanaka, C. J. Naudet, C. E. Jones, J. P. Plaut, F. H. Webb, Muon radiography for exploration of Mars geology, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 2 (2013) 157–164. <https://doi.org/10.5194/gi-2-157-2013>
5. Borja, C., Ávila, C., Roque, G. & Sánchez, M. Atmospheric muon flux measurement near Earth's equatorial line. *Instruments* 6 (2022). URL: <https://www.mdpi.com/2410-390X/6/4/78>.
6. J. Peña-Rodríguez, A. Vesga-Ramírez, A. Vásquez-Ramírez, M. Suárez-Durán, R. de León-Barrios, D. Sierra-Porta, R. Calderón-Ardila, J. Pisco-Guavabe, H. Asorey, J. D. Sanabria-Gómez, L. A. Núñez, Muography in Colombia: simulation framework, instrumentation, and data analysis, *J. Adv. Instrum. Sci.* (2022) JAIS-271. <https://doi.org/10.31526/JAIS.2022.271>
7. Tramontini, M. L. (2018). Estudio de variaciones de densidad de masa en un sistema hidrotermal volcánico mediante radiografía continua de muones [Tesis de grado, Universidad Nacional de La Plata]. SEDICI. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/68660>
8. Piatek, S. What is an SiPM and how does it work? (2016). URL: <https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mppc-sipms/what-is-an-SiPM-and-how-does-it-work.html>.
9. J. H. Bae, R. Montgomery, S. Chatzidakis, Image reconstruction algorithm for momentum dependent muon scattering tomography, *Nucl. Eng. Technol.* 56 (2024) 1553–1561. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.12.009>

¿PREGUNTAS?