



MUOGRAFÍA DE DISPERSIÓN CON APLICACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL

Daniel Corredor

Universidad de los Andes | 2026



ESTUDIO DE ESTRUCTURAS CIVILES



MÉTODOS DE ESTUDIO

3

Radiografía

- Logra penetrar hasta 60 cm de concreto.
- Requiere fuentes de alta radiación (Cobalto-60 o iridio-293)

Ultrasonido

- Distancia de penetración en función del material y resolución.
- La grava y los áridos del concreto dispersan la señal - mala resolución en altos grosores.

Ground Penetrating Radar (GPR)

- Trade-Off entre resolución y profundidad - 30 a 50 cm
- Efecto de apantallamiento para redes de varillas de acero - Jaula de Faradai

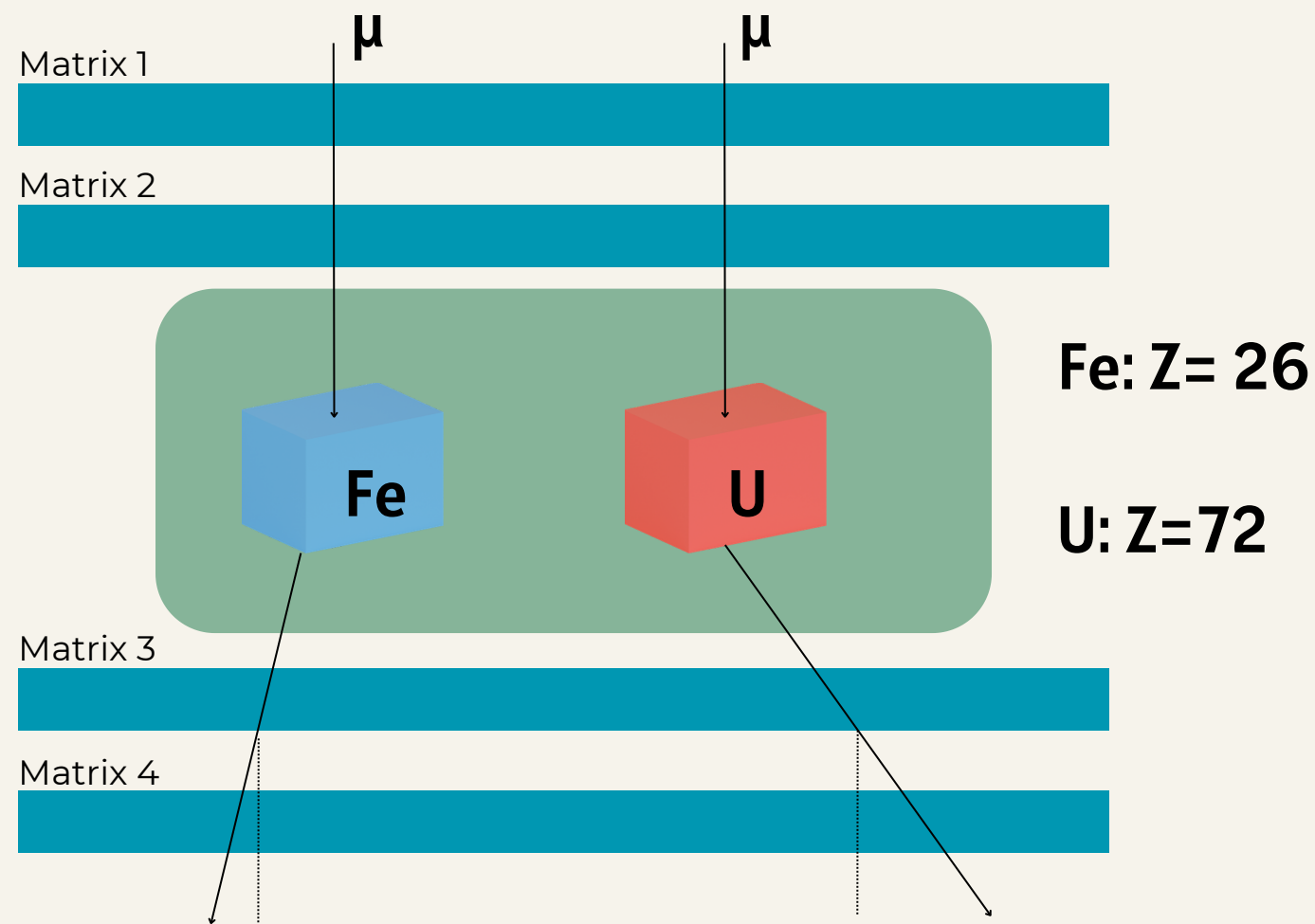
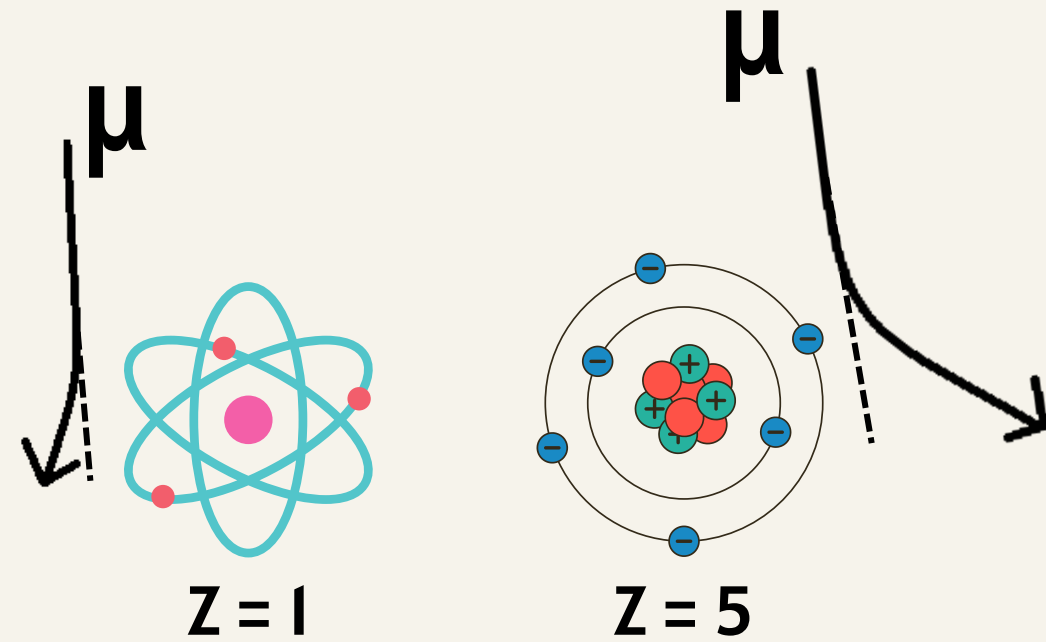
- Requieren una fuente - Dificulta la logística del montaje.
- No logran identificar tipo de materiales en la muestra



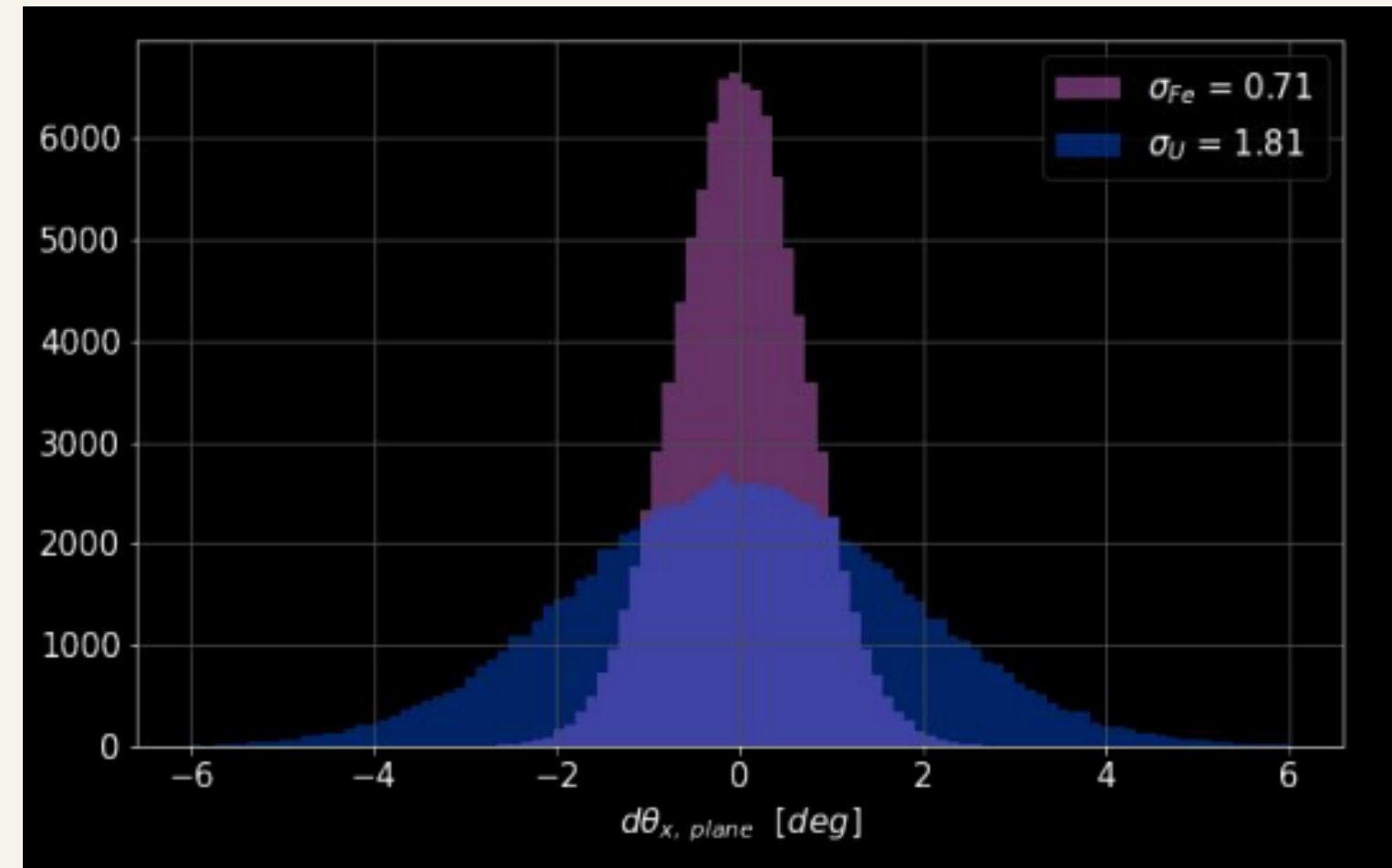
MUOGRAFÍA DE DISPERSIÓN



FUNDAMENTO



Muestreo de Ángulo de Scattering Fe vs U



Grosor: 20 cm
p: 4 GeV

Imagen tomada de [1]

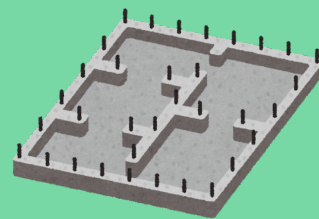
$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.088 \log_{10} \left(\frac{x z^2}{X_0 \beta^2} \right) \right]$$

X_0 : Longitud de radiación

APLICACIONES

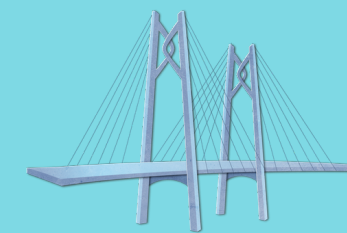
Columnas y Hormigón Armado

- Corrosión en red de barras de acero.
- Ruptura o desviación en las barras



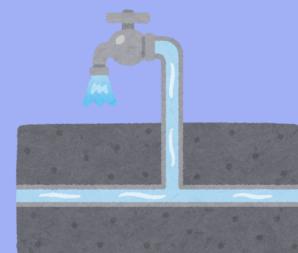
Tendones en Puentes

- Ruptura interna de tendones pretensados
- Identificación de grietas y burbujas de aire que causan oxidación crítica



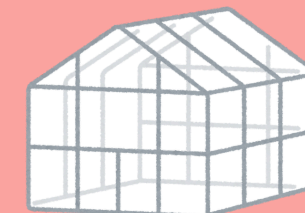
Tuberías y Ductos

- Adelgazamiento de paredes por abrasión.
- Acumulaciones de sedimentos



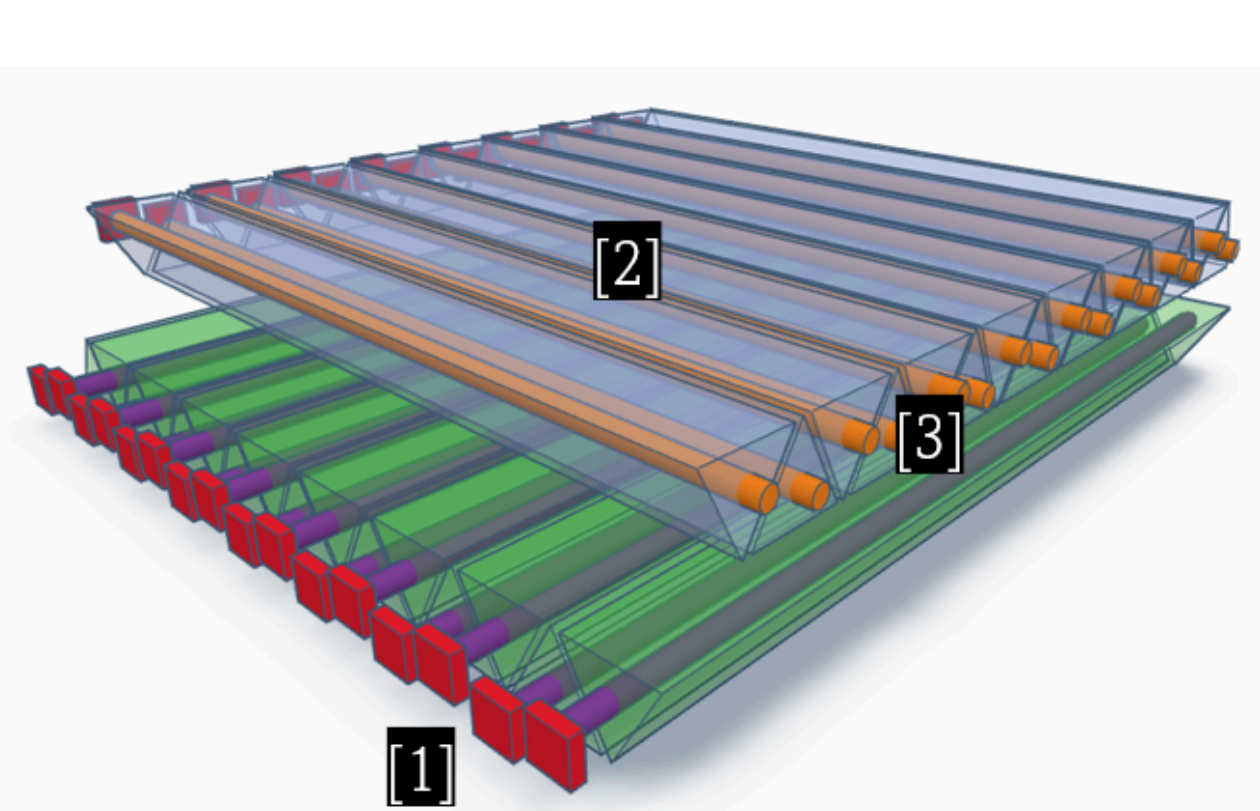
Reconstrucción de Estructuras

- Identificación de conductos ocultos.
- Identificación de inclusiones y grietas internas



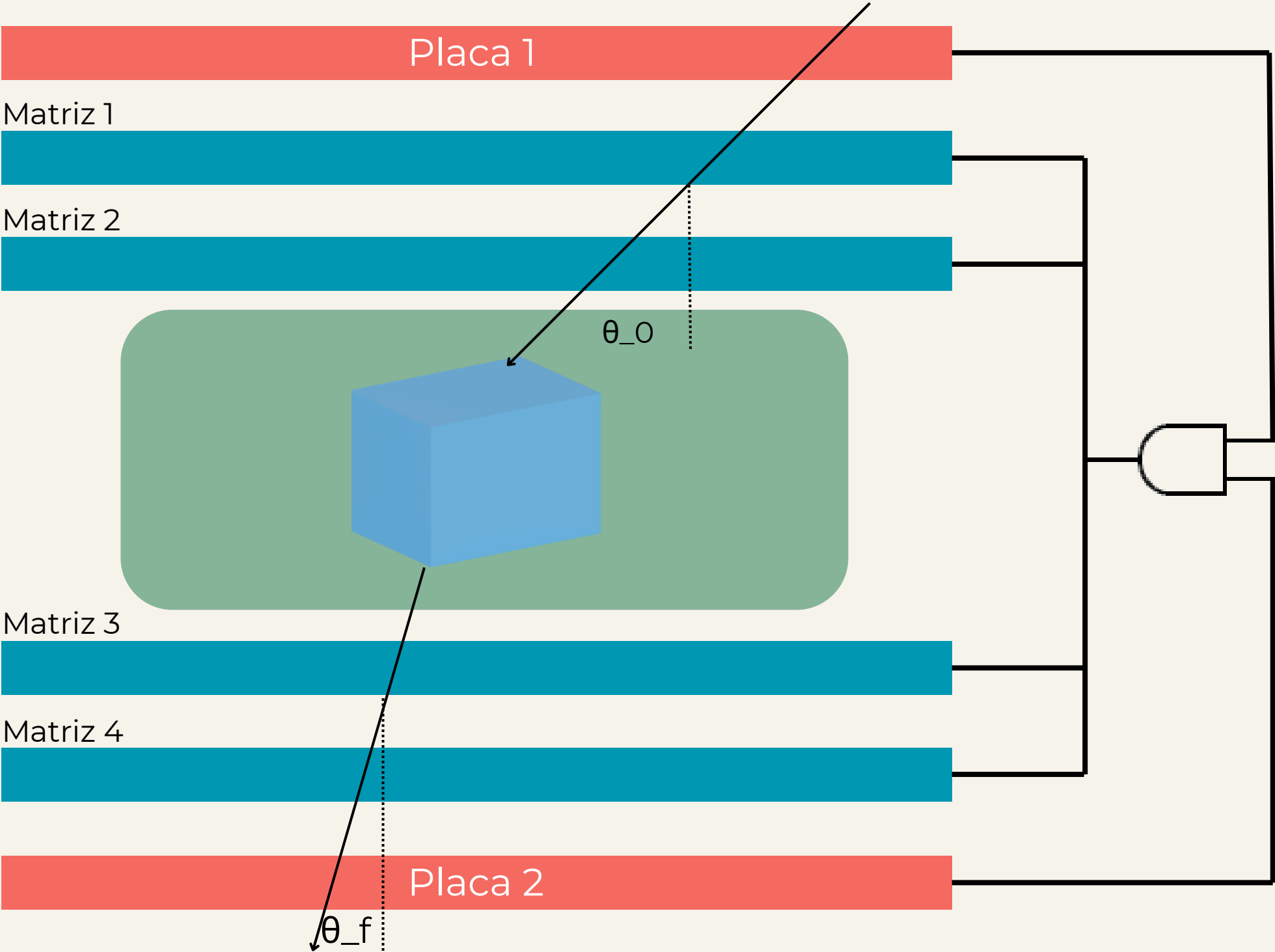
MONTAJE PROPUESTO

Matriz Centelladora

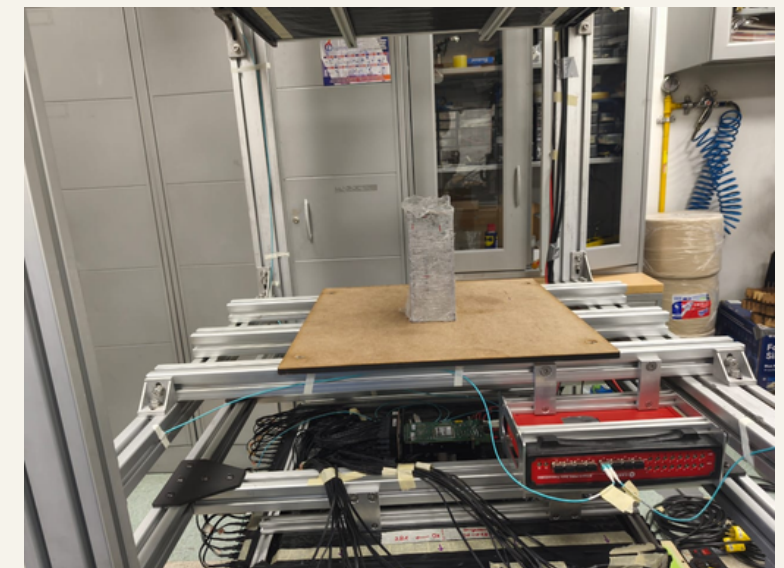
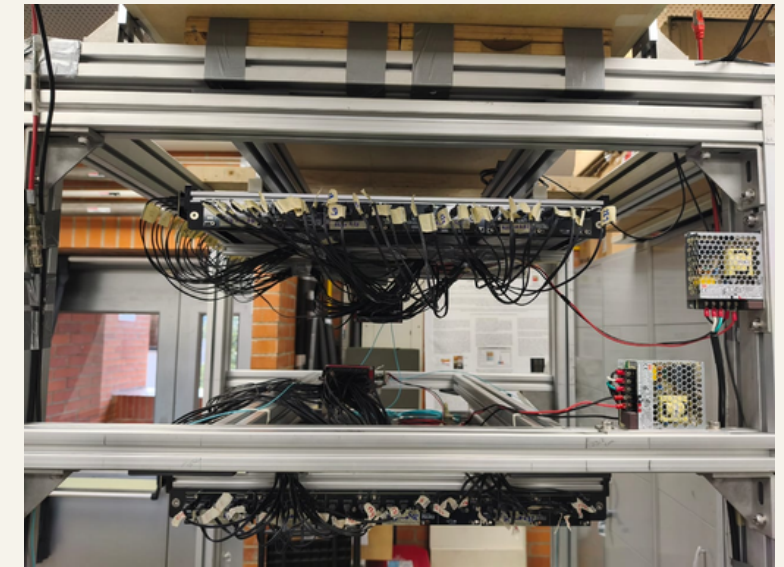
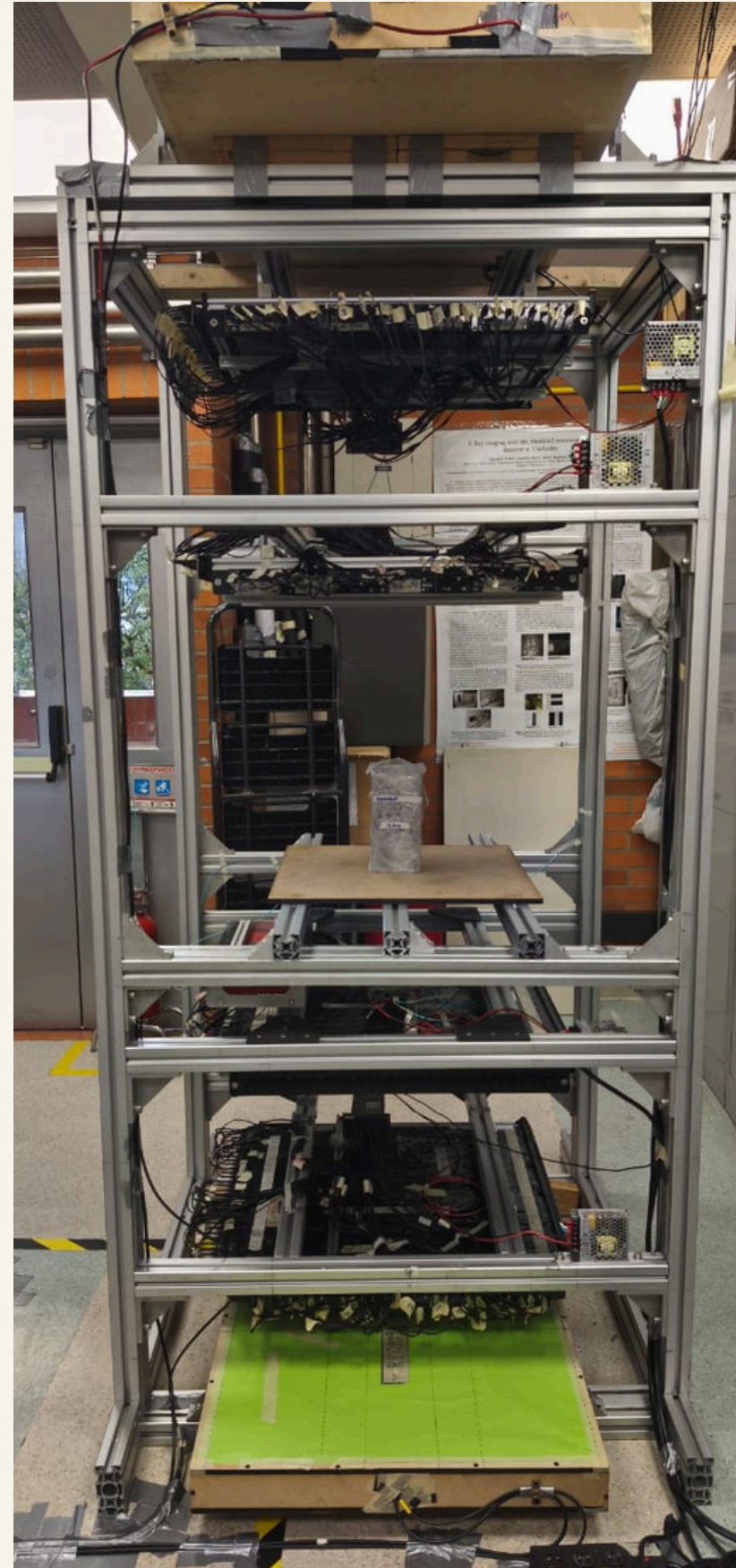


Componentes: (1) Fotomultiplicadores de Silicio (SiPM), (2) Barras Centelladoras triangulares y (3) Fibras Ópticas WLS

- 29 canales por eje

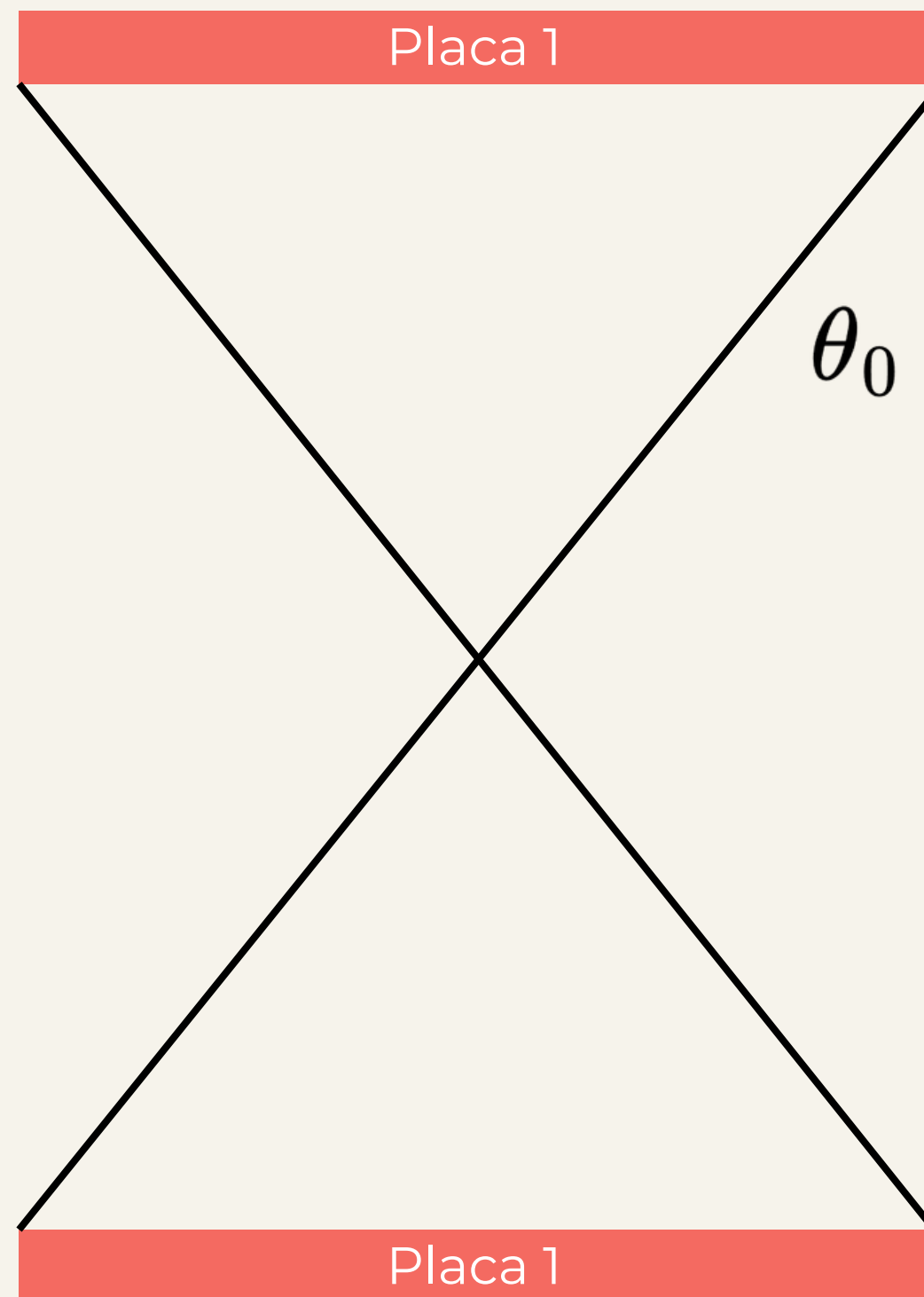
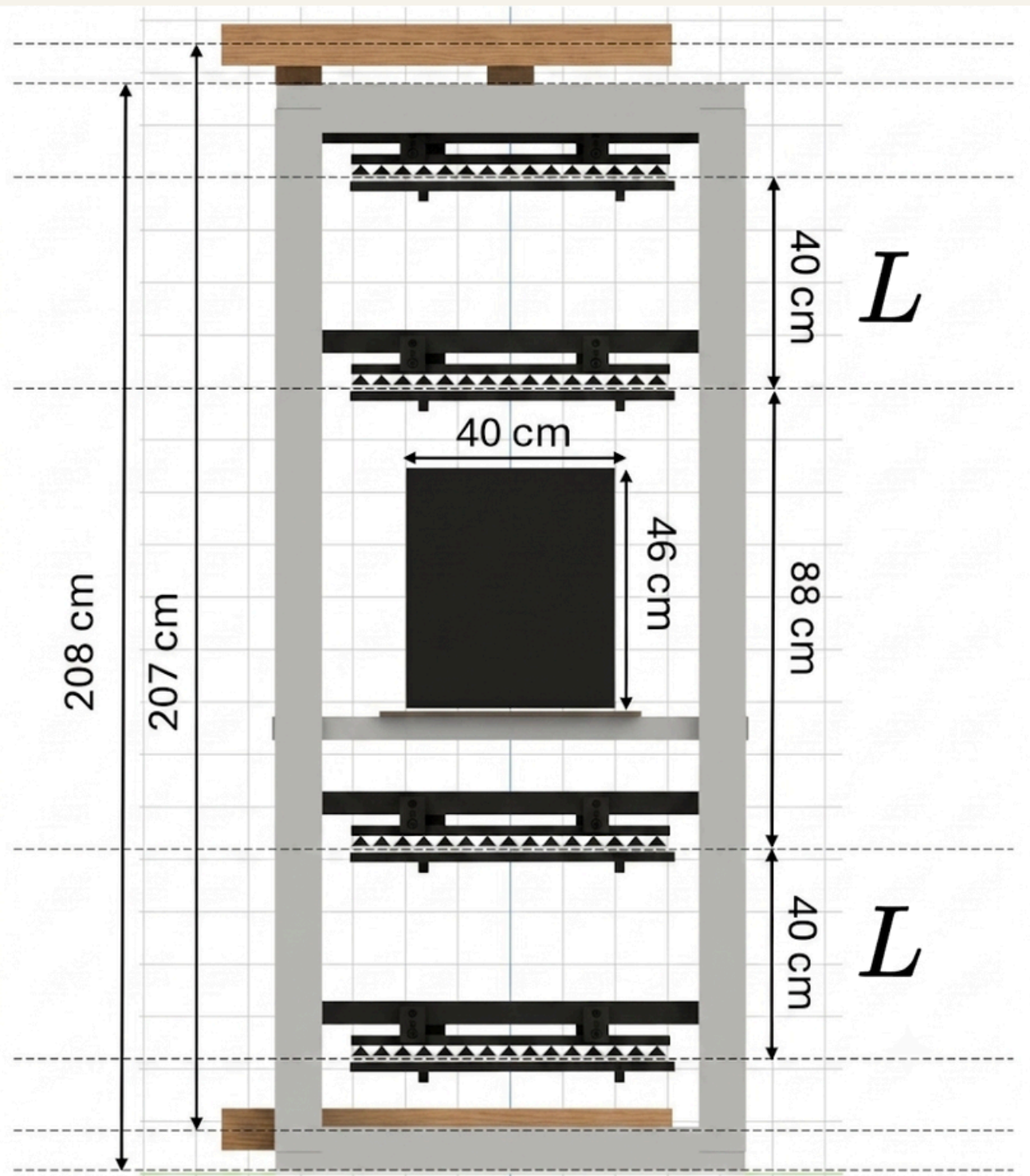


MONTAJE ACTUAL



CONDICIONES DEL MONTAJE

10



- Tasa Promedio: **1 muon/ cm² min**
- Apertura angular: $\theta_0 = \mathbf{15.6 \text{ deg}}$
- Resolución Espacial: $\sigma = \mathbf{0.48 \text{ cm}}$
- Eficiencia de cada Matriz: **~85%**

$$\theta = \arctan \left(\frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{L} \right)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sqrt{2}\sigma \cos^2 \theta}{L} \simeq \frac{\sqrt{2}\sigma}{L}$$

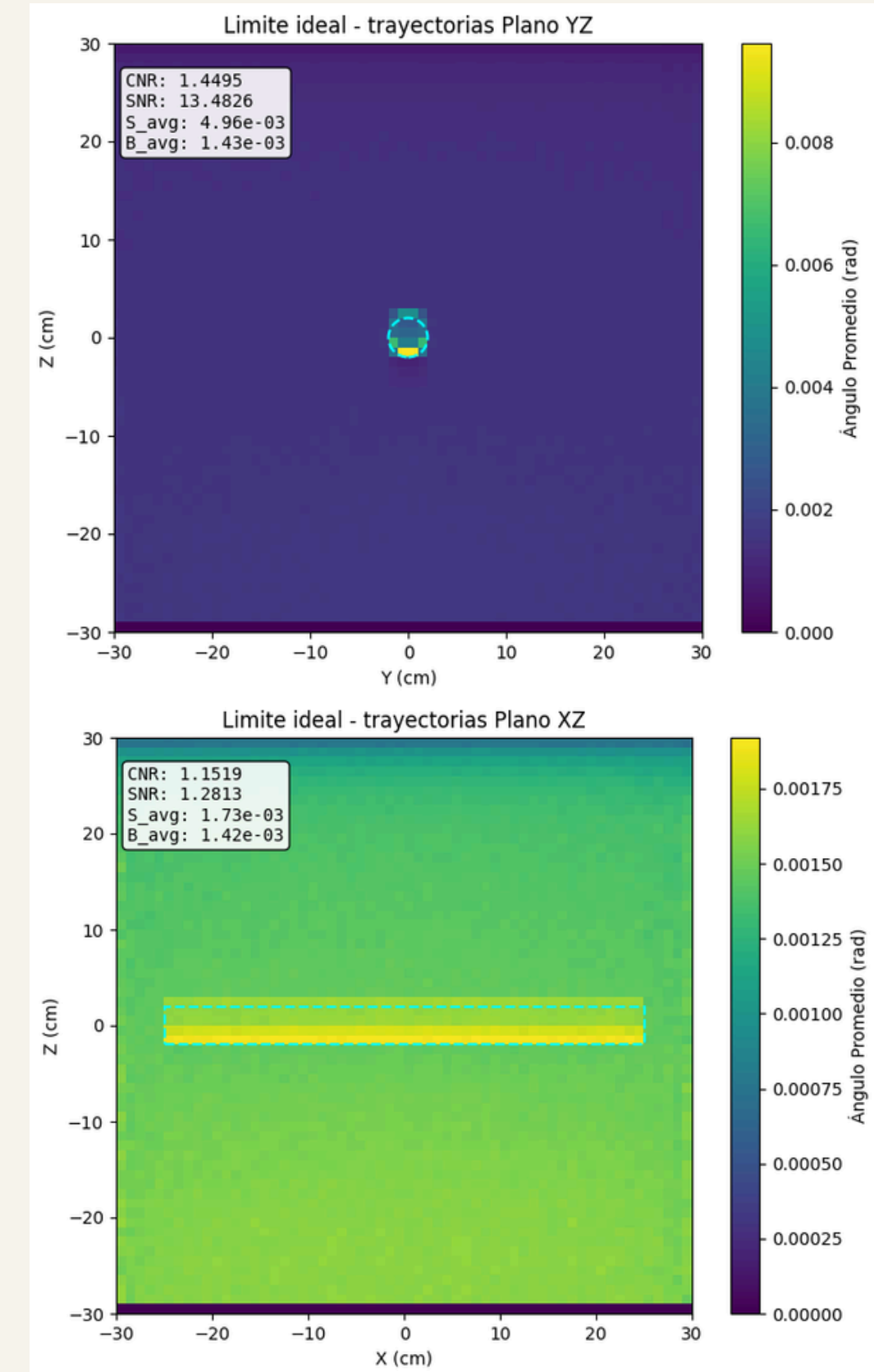
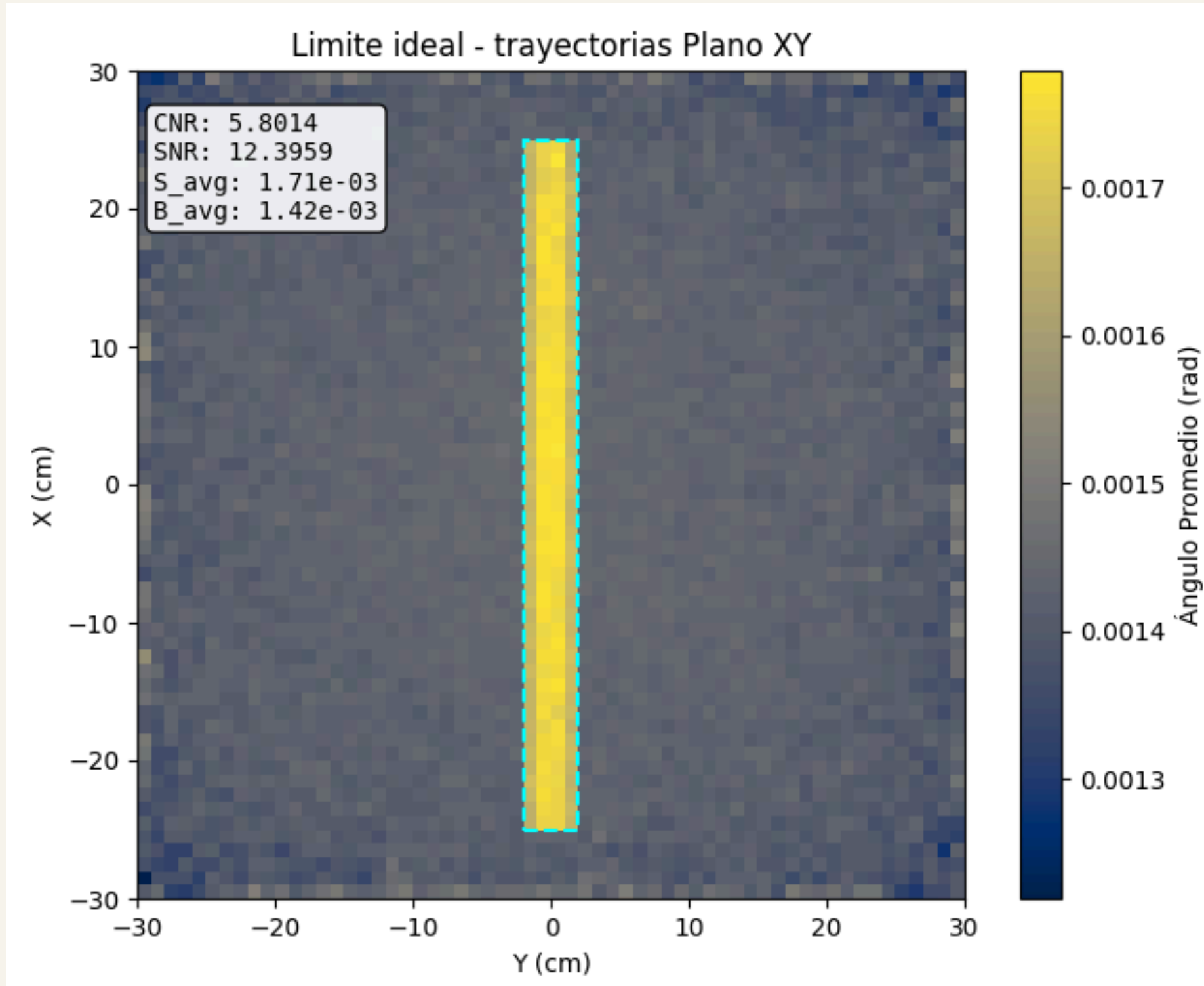
Trade-Off entre Resolución Angular y Tasa de Detección



ALGORITMOS DE RECONSTRUCCIÓN

R=2

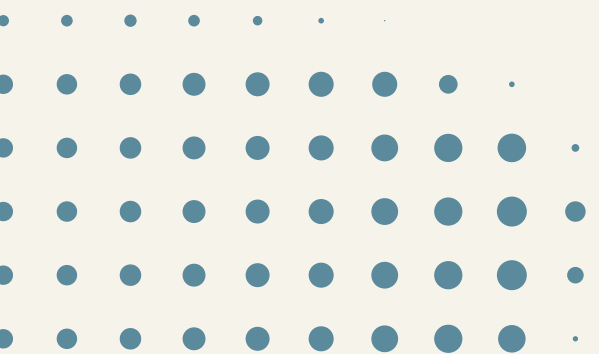
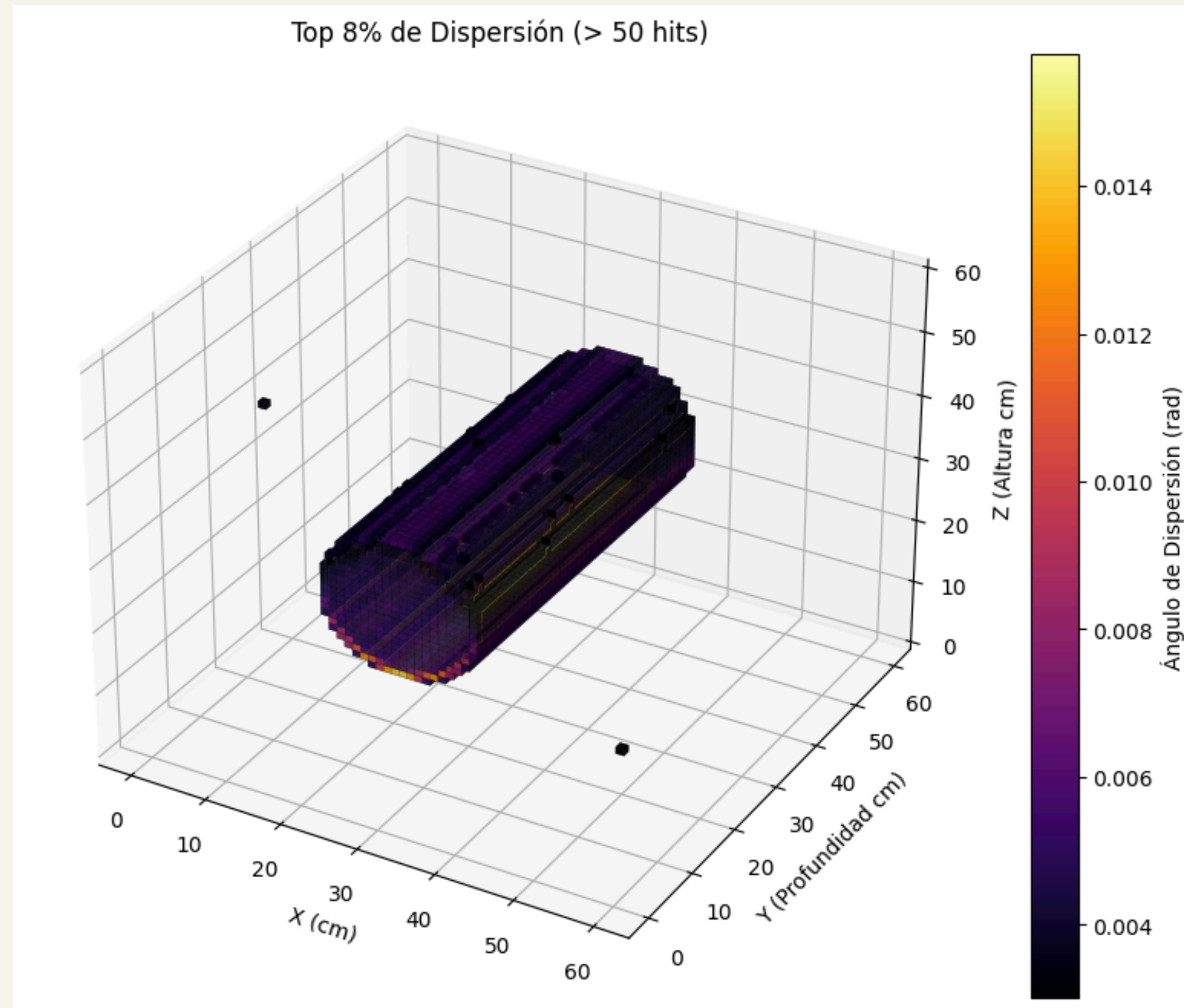
LÍMITE IDEAL



R=10

LÍMITE IDEAL

13



Point of Closest Approach (PoCA)

- Algoritmo más sencillo de reconstrucción de imagen - un solo scattering.
- Voxel: Se asigna el promedio del cuadrado del ángulo de dispersión a cada punto del espacio 3D.
- Variables de discriminación para el voxel: Ángulo de dispersión, # eventos registrados, magnitud de W .

Líneas Paramétricas

$$P_1(s) = A + s\mathbf{u}$$

$$P_2(t) = B + t\mathbf{v}$$

$$\mathbf{w} = P_1(s) - P_2(t) = A - B + s\mathbf{u} - t\mathbf{v} = \mathbf{w}_0 + s\mathbf{u} - t\mathbf{v}$$

Condiciones

$$0 = \mathbf{w} \cdot \mathbf{u}$$

$$0 = \mathbf{w} \cdot \mathbf{v}$$

$$as - bt = -d$$

$$bs - ct = -e$$

$$a = \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}$$

$$b = \mathbf{u} \cdot \mathbf{v}$$

$$c = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}$$

$$d = \mathbf{u} \cdot \mathbf{w}_0$$

$$e = \mathbf{v} \cdot \mathbf{w}_0$$



$$s_c = \frac{be - cd}{ac - b^2}$$

$$t_c = \frac{ae - bd}{ac - b^2}$$



$$M_{PoCA} = \frac{P_1(s_c) + P_2(t_c)}{2}$$

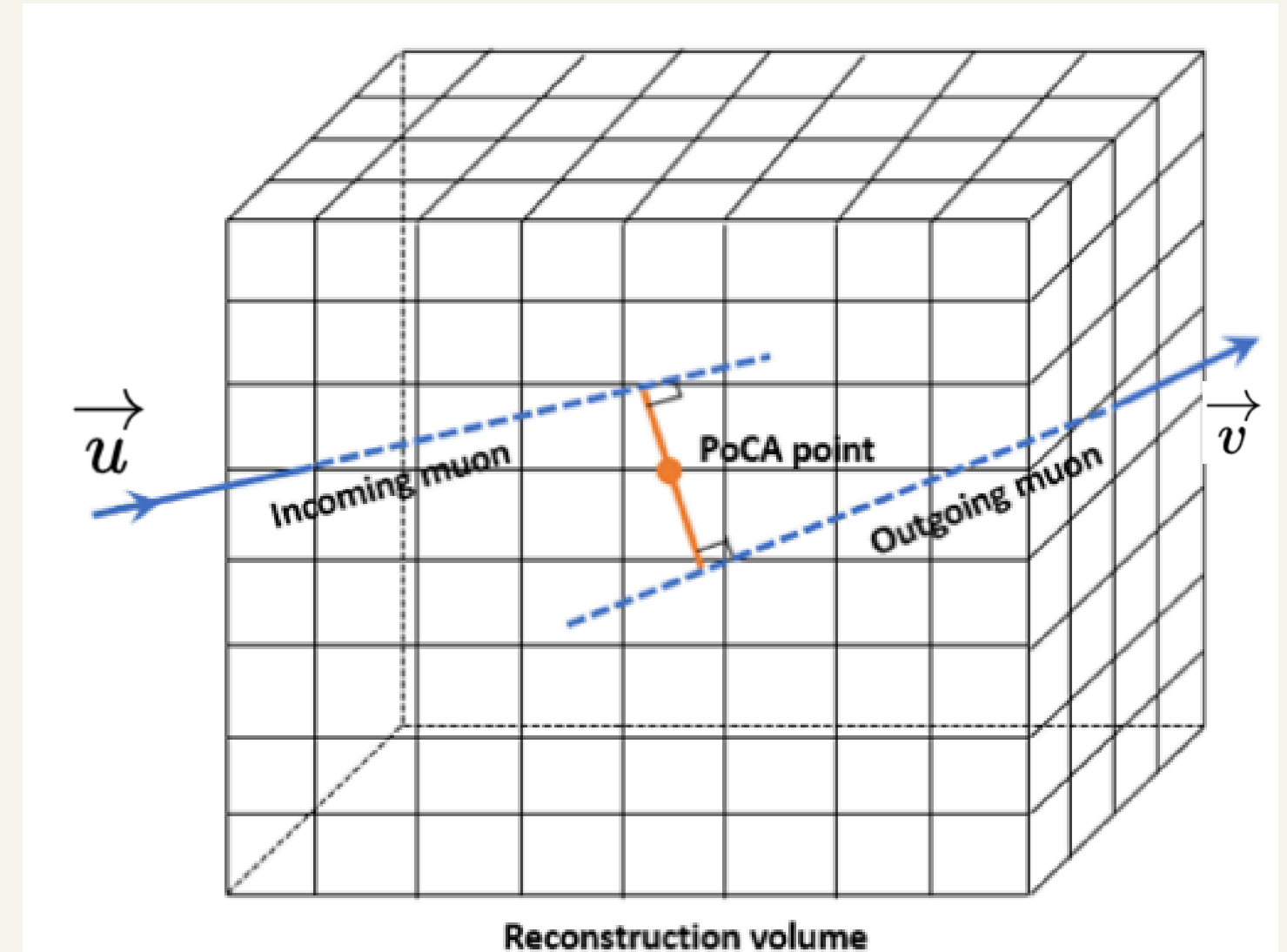


FIG. 6: Scattering point for PoCA algorithm.

Imagen tomada de [2]

μTrec

- La posición y el ángulo de dispersión se aproxima a una distribución normal bivariada.
- Estimación de trayectoria multi-scattering a partir de Teorema de Bayes.
- Mayor información por evento: Ángulo de scattering en multiples voxeles.
- Maximiza $P(Y1|Y2)$.

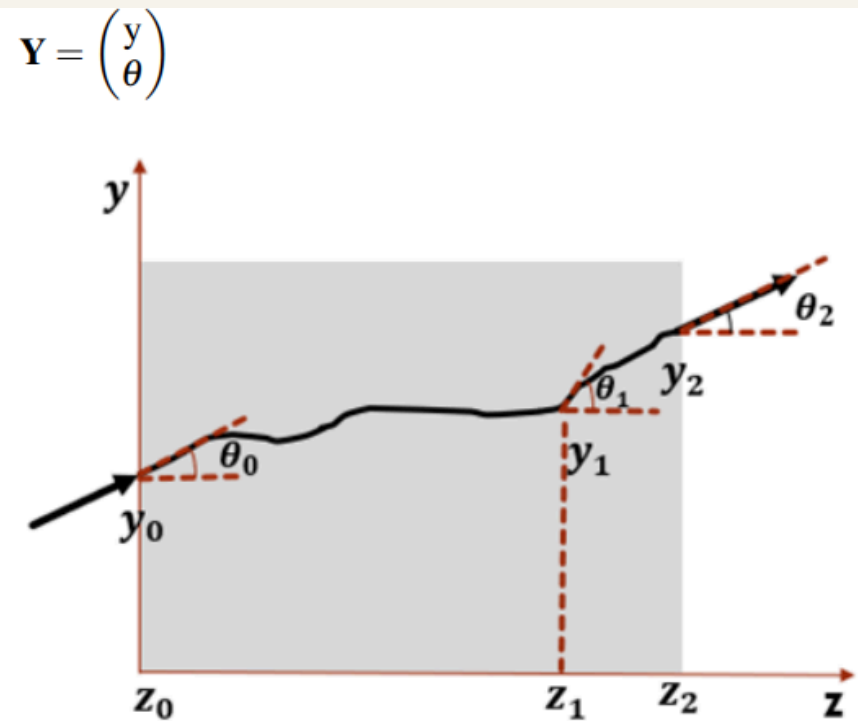


FIG. 7: Illustration of muon scattering occurring within the y-z plane.

Imagen tomada de [2]

$$P(y_1|y_0) = \frac{1}{C_1} \exp\left(-\frac{1}{2}(y_1 - R_0 y_0)^T \Sigma_1^{-1} (y_1 - R_0 y_0)\right), \quad (6)$$

$$P(y_2|y_1) = \frac{1}{C_2} \exp\left(-\frac{1}{2}(y_2 - R_2 y_1)^T \Sigma_2^{-1} (y_2 - R_2 y_1)\right), \quad (7)$$

where C_1, C_2 are constants and

$$R_0 = \begin{bmatrix} 1 & z_1 - z_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} 1 & z_2 - z_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\Sigma_1 = \begin{pmatrix} \sigma_{y_1}^2 & \sigma_{y_1 \theta_1}^2 \\ \sigma_{y_1 \theta_1}^2 & \sigma_{\theta_1}^2 \end{pmatrix}, \quad \Sigma_2 = \begin{pmatrix} \sigma_{y_2}^2 & \sigma_{y_2 \theta_2}^2 \\ \sigma_{y_2 \theta_2}^2 & \sigma_{\theta_2}^2 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

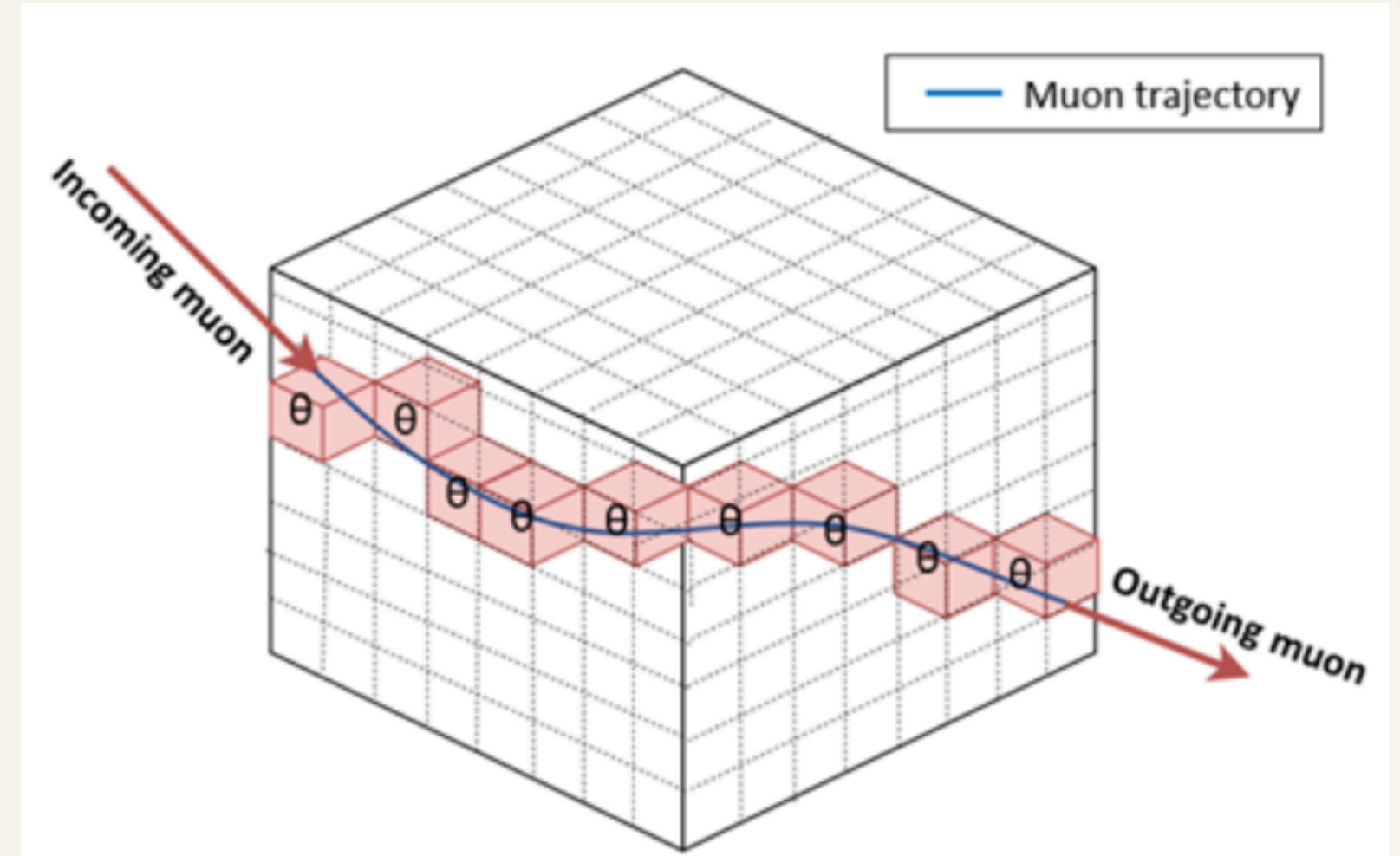


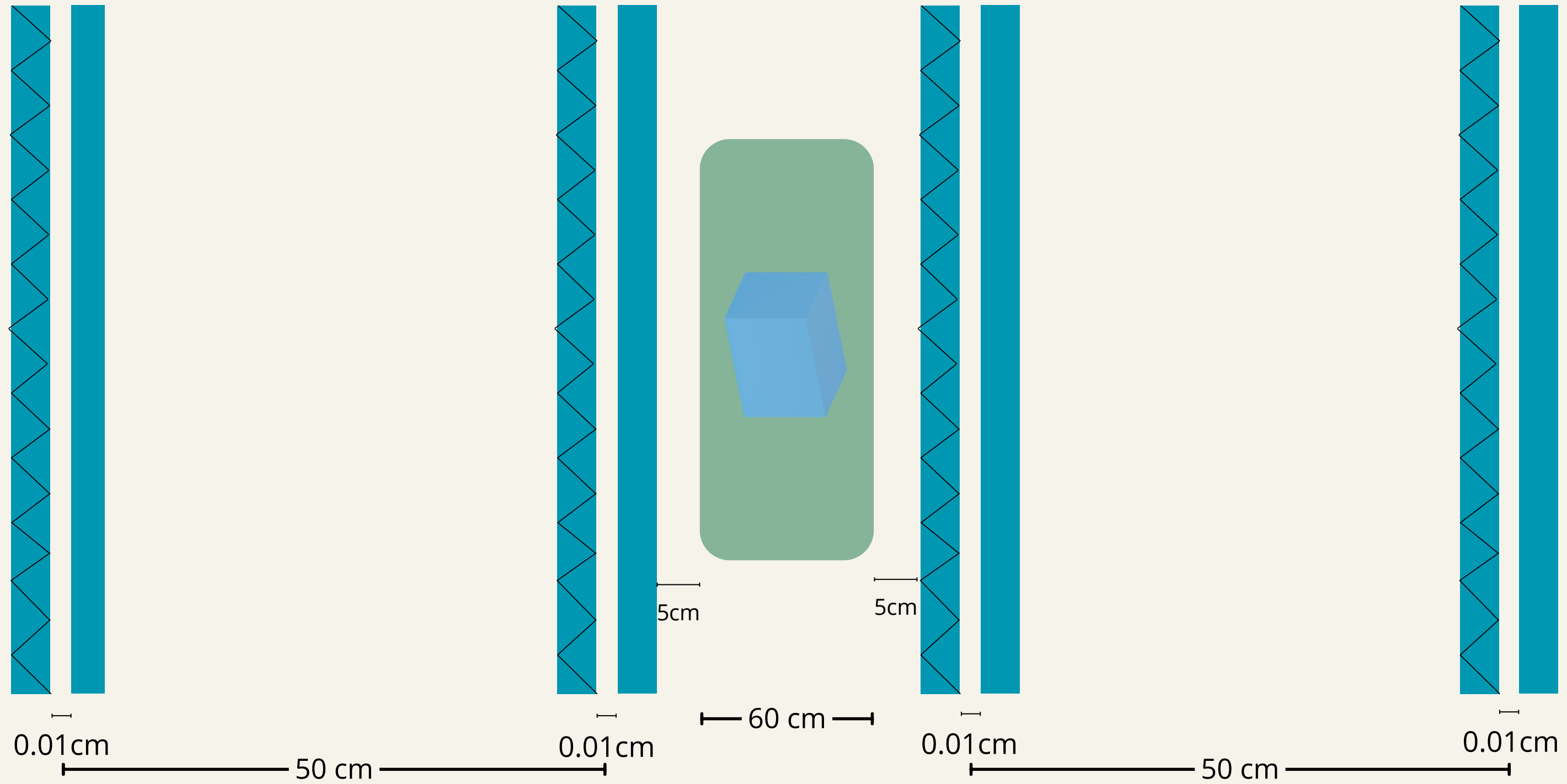
FIG. 8: Scattering angle assigned to each voxel traversed by the muon path.

Imagen tomada de [2]

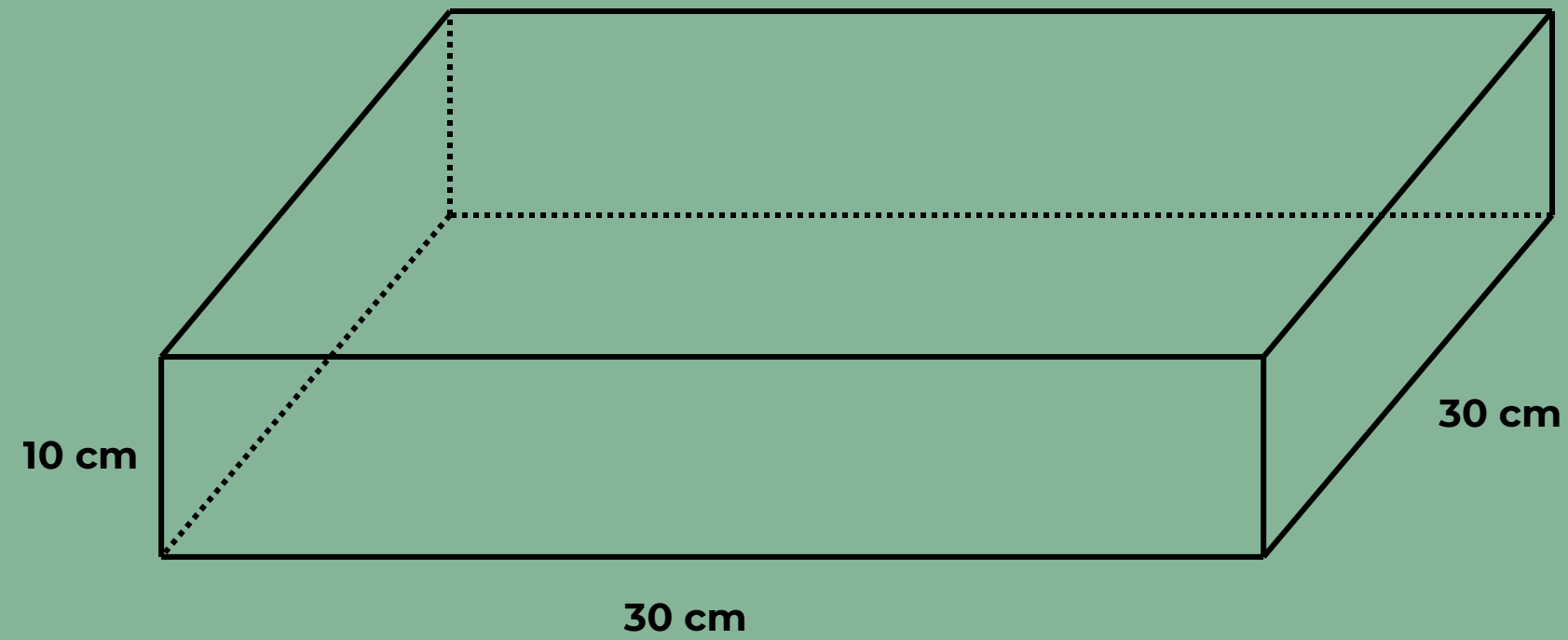
$$x_{GMTE} = (\Sigma_1^{-1} + R_2^T \Sigma_2^{-1} R_2)^{-1} (\Sigma_1^{-1} R_0 x_0 + R_2^T \Sigma_2^{-1} x_2)$$

$$y_{GMTE} = (\Sigma_1^{-1} + R_2^T \Sigma_2^{-1} R_2)^{-1} (\Sigma_1^{-1} R_0 y_0 + R_2^T \Sigma_2^{-1} y_2)$$

PARÁMETROS



SIMULACIONES

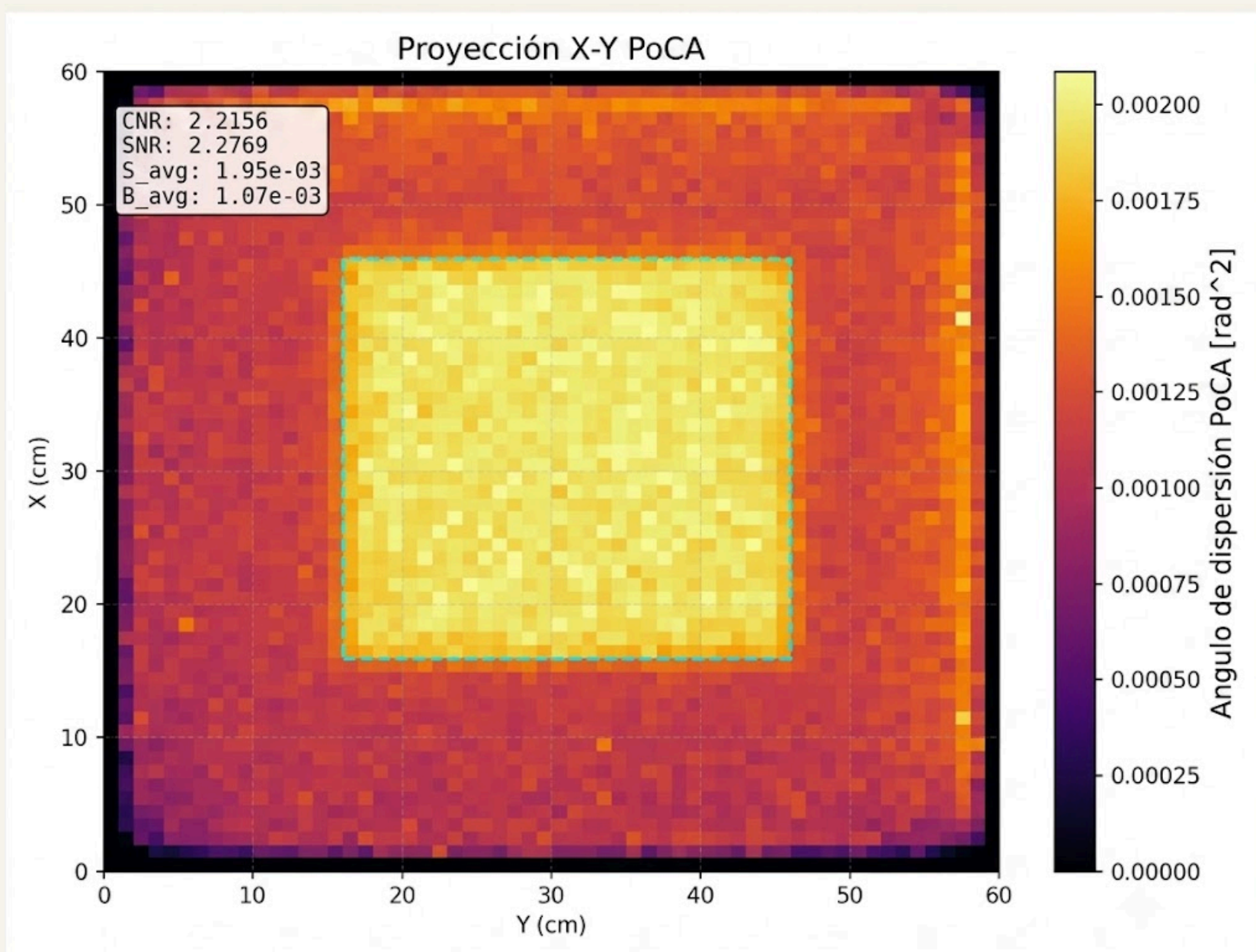


60 cm

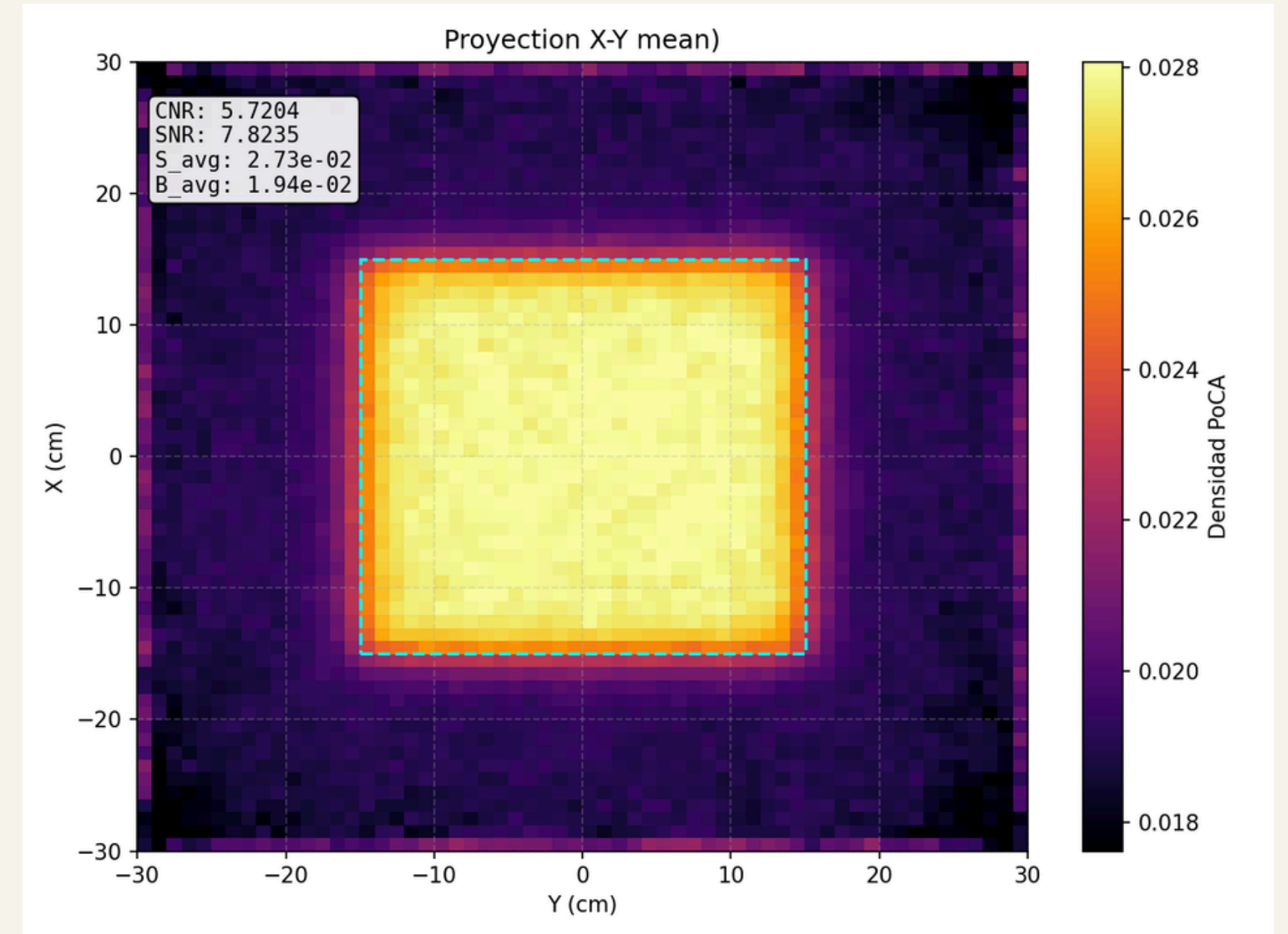


SIMULACIONES

Poca

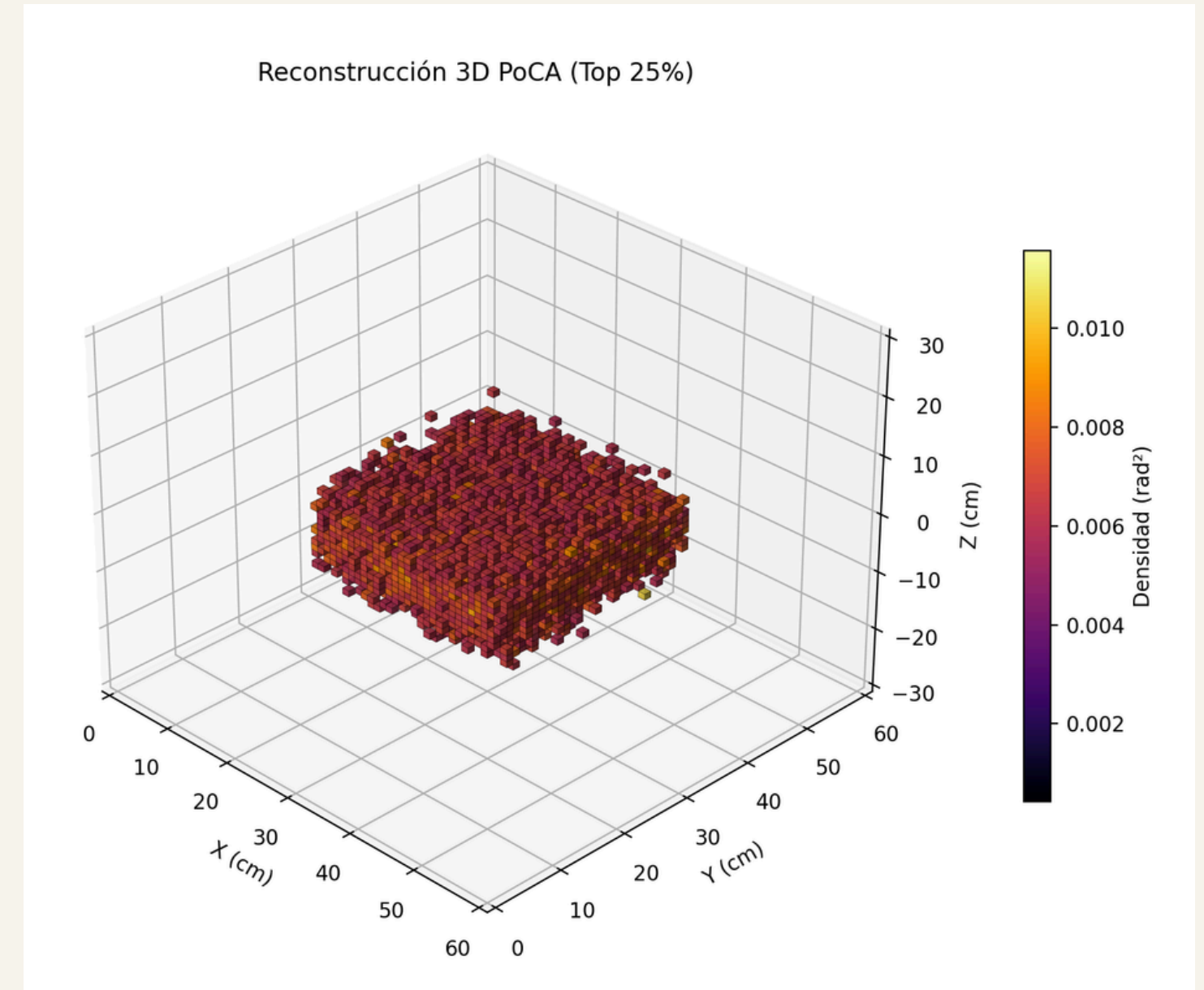
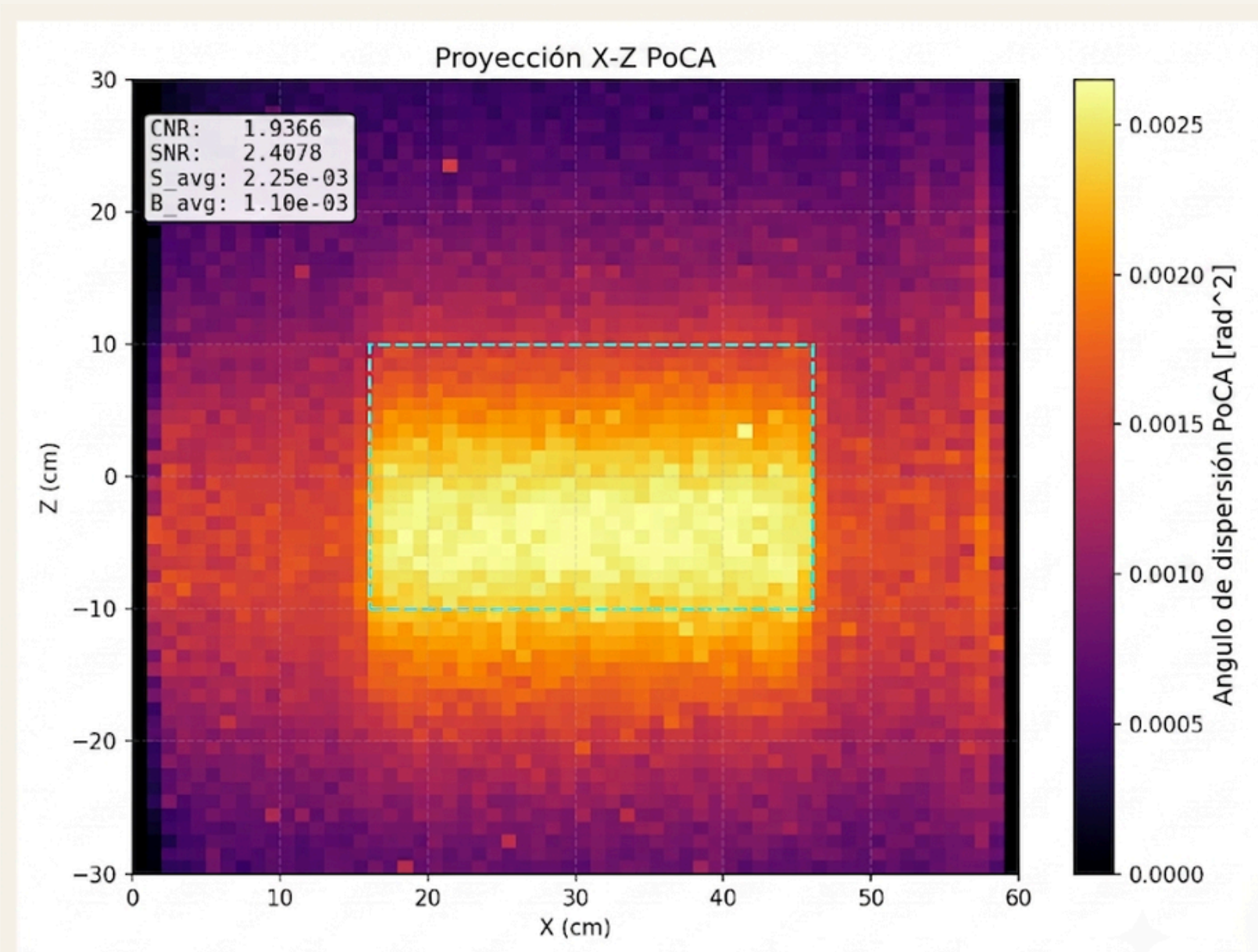


μ TREC



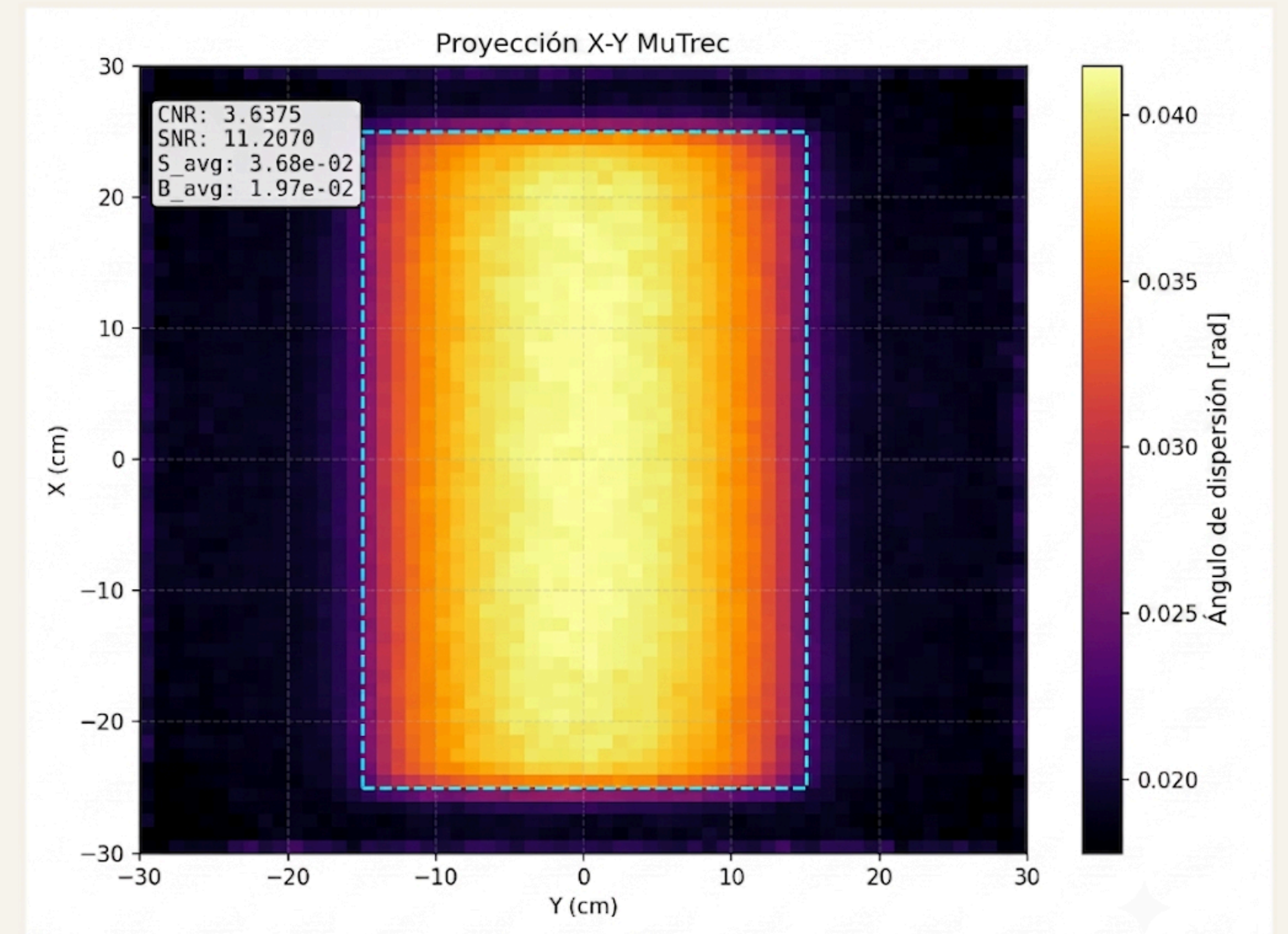
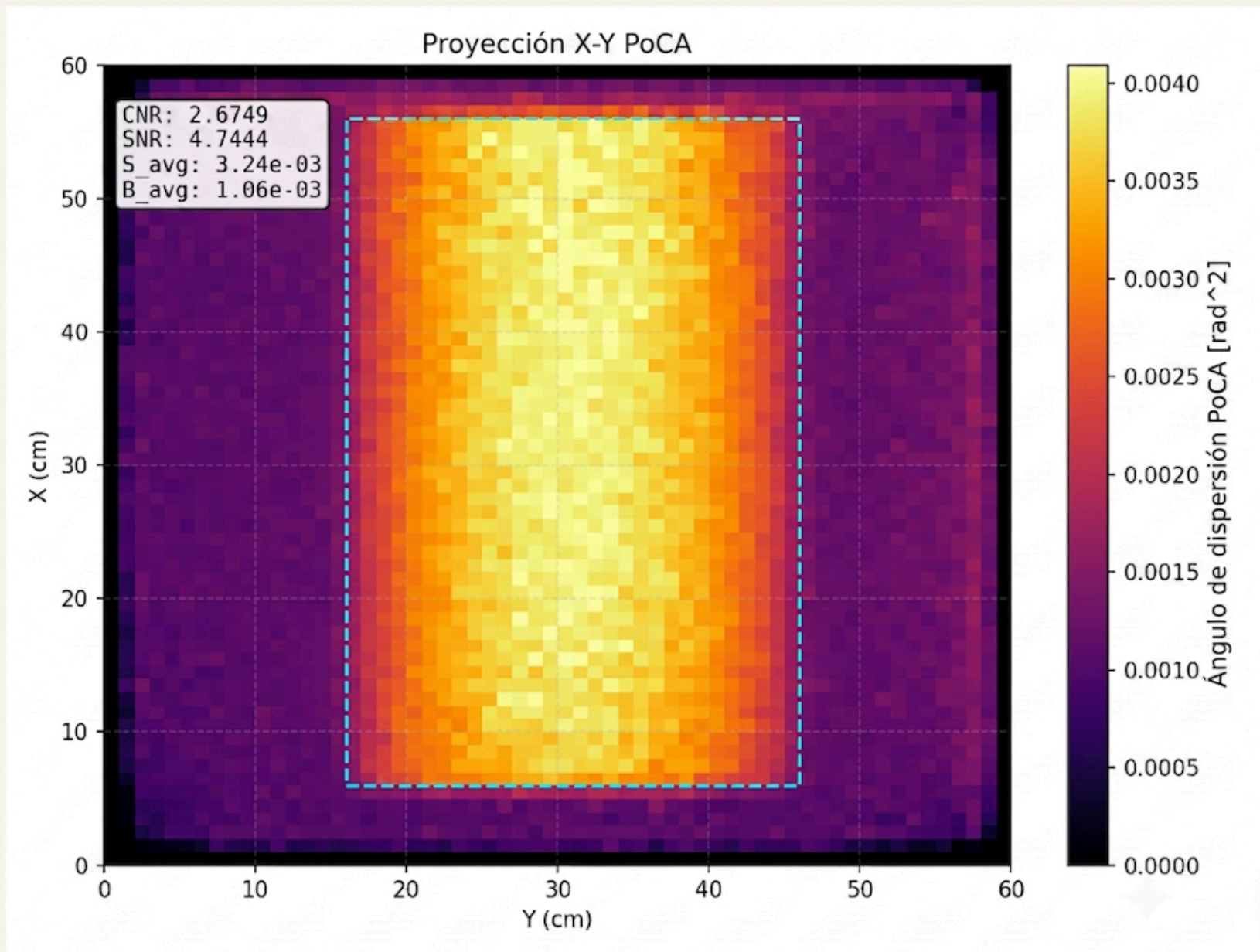
SIMULACIONES

PoCA

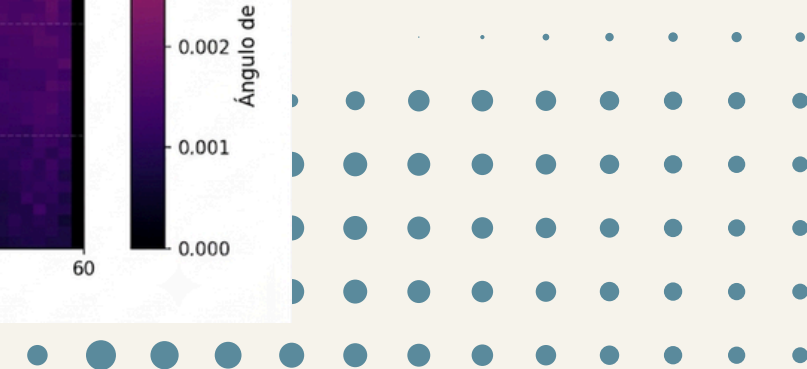
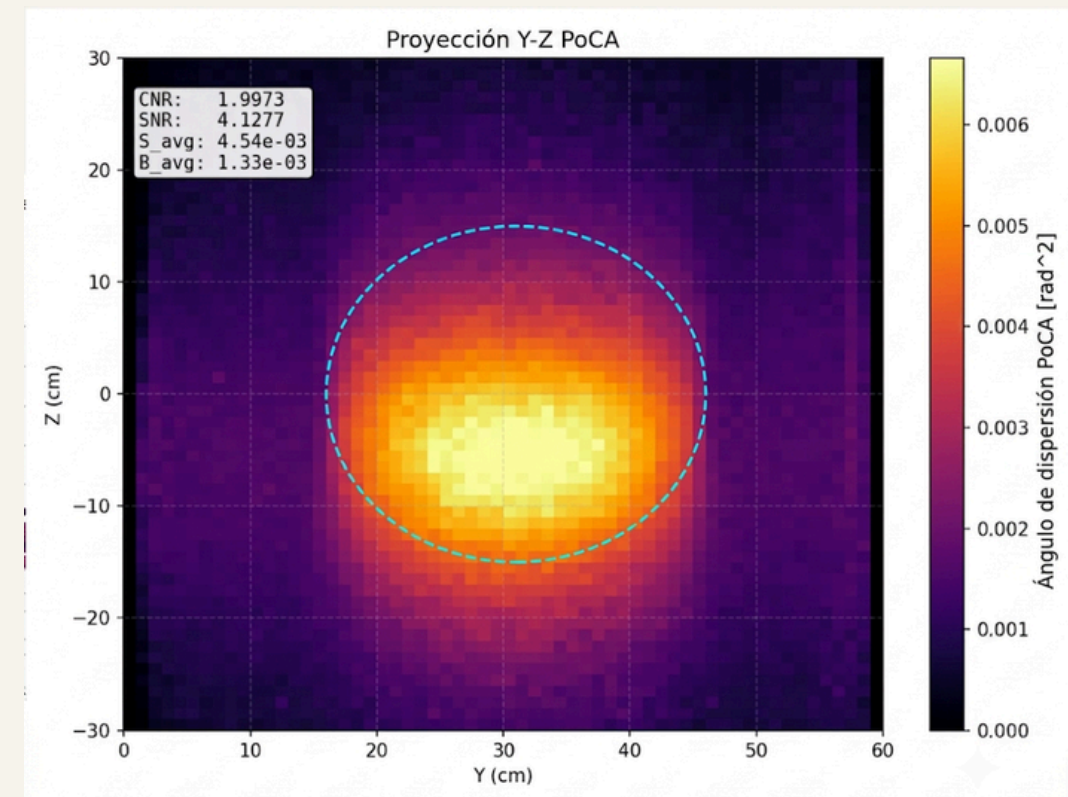
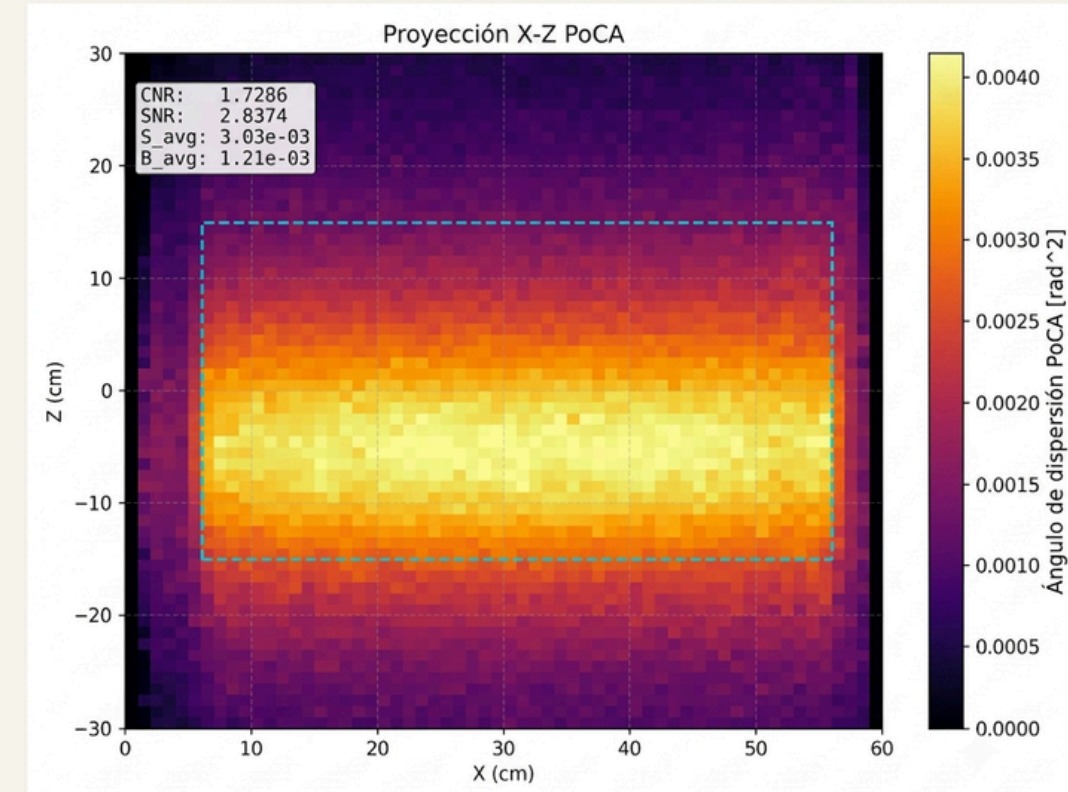
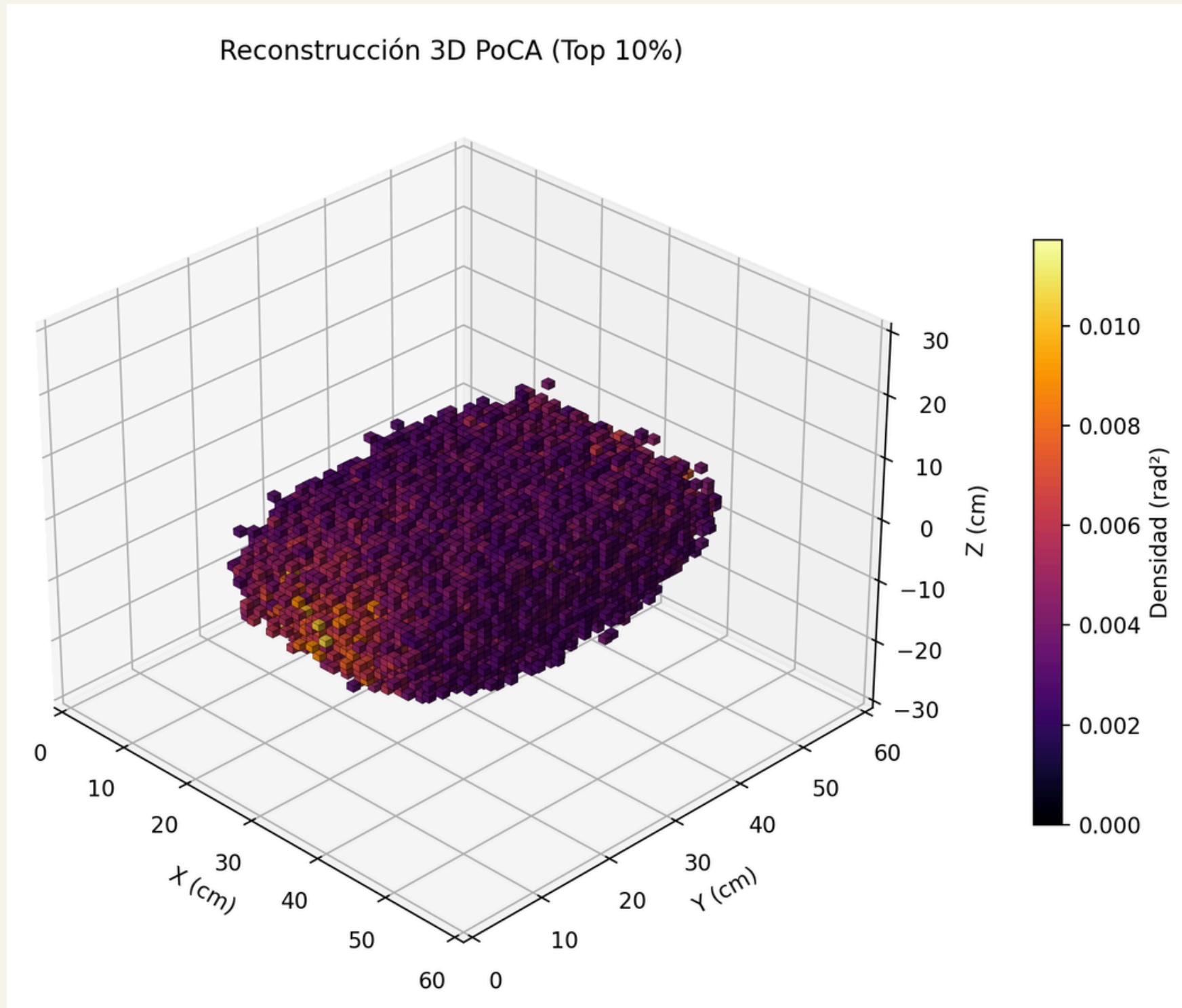


R=15

SIMULACIONES

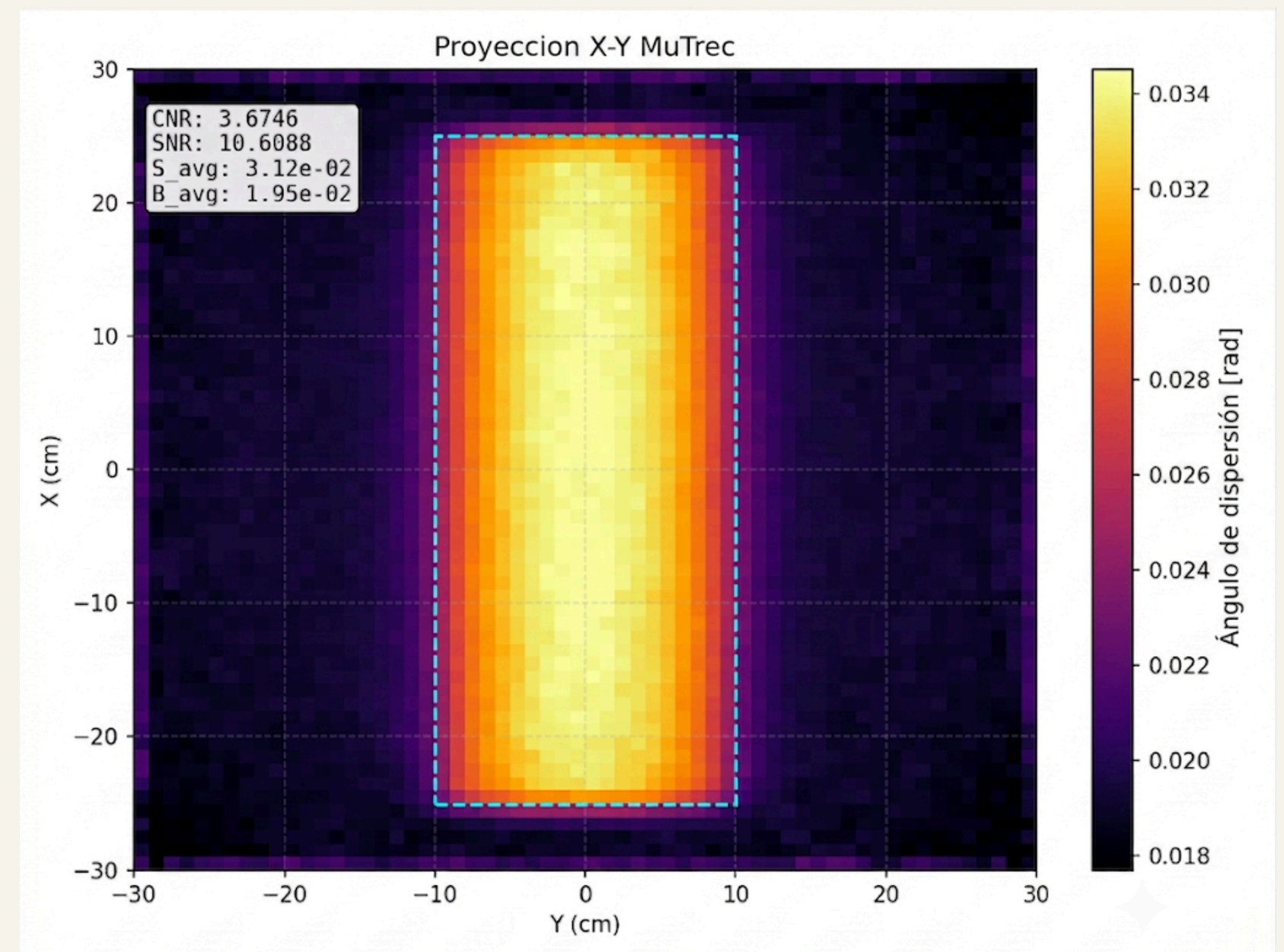
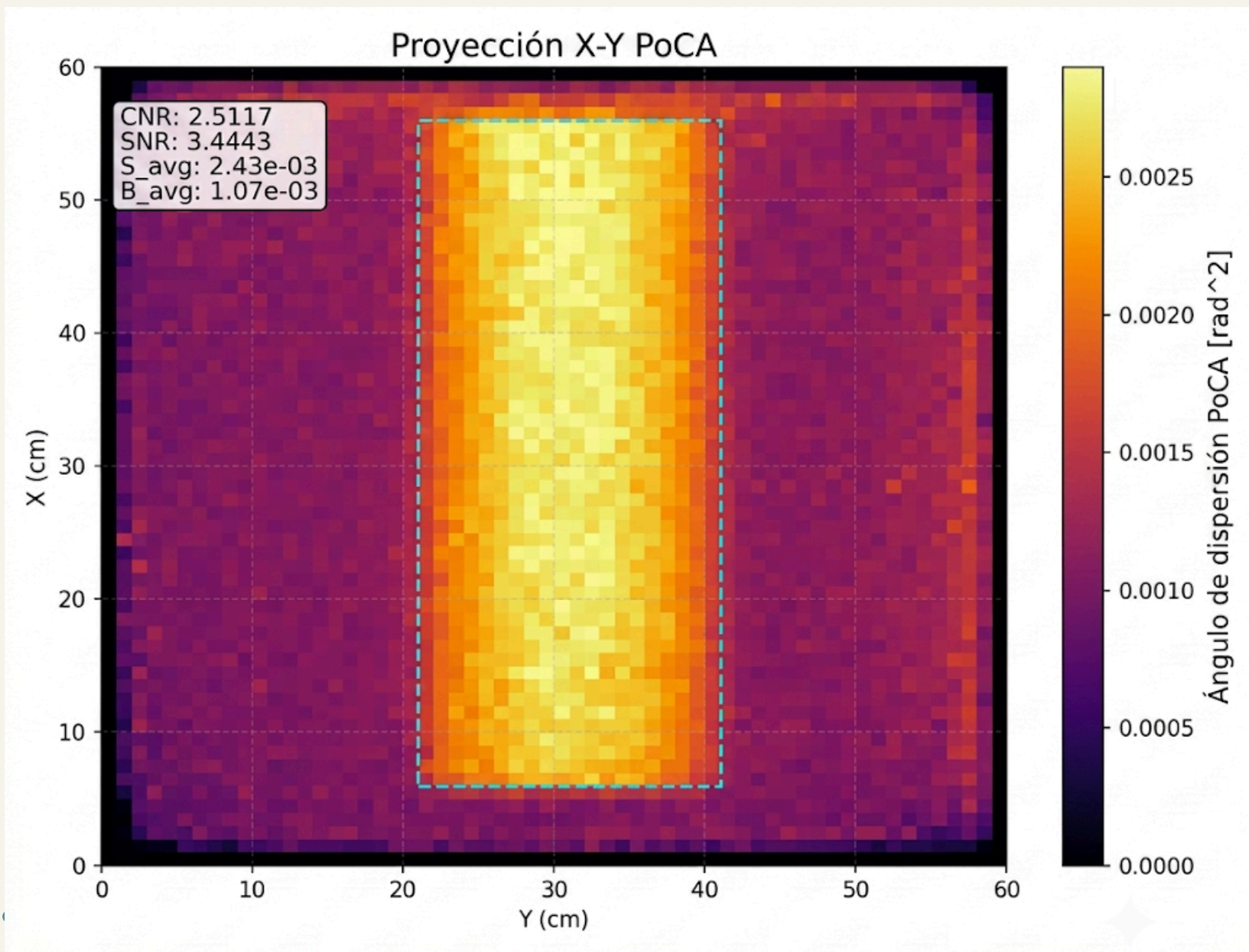
Poca **μ TREC**

SIMULACIONES



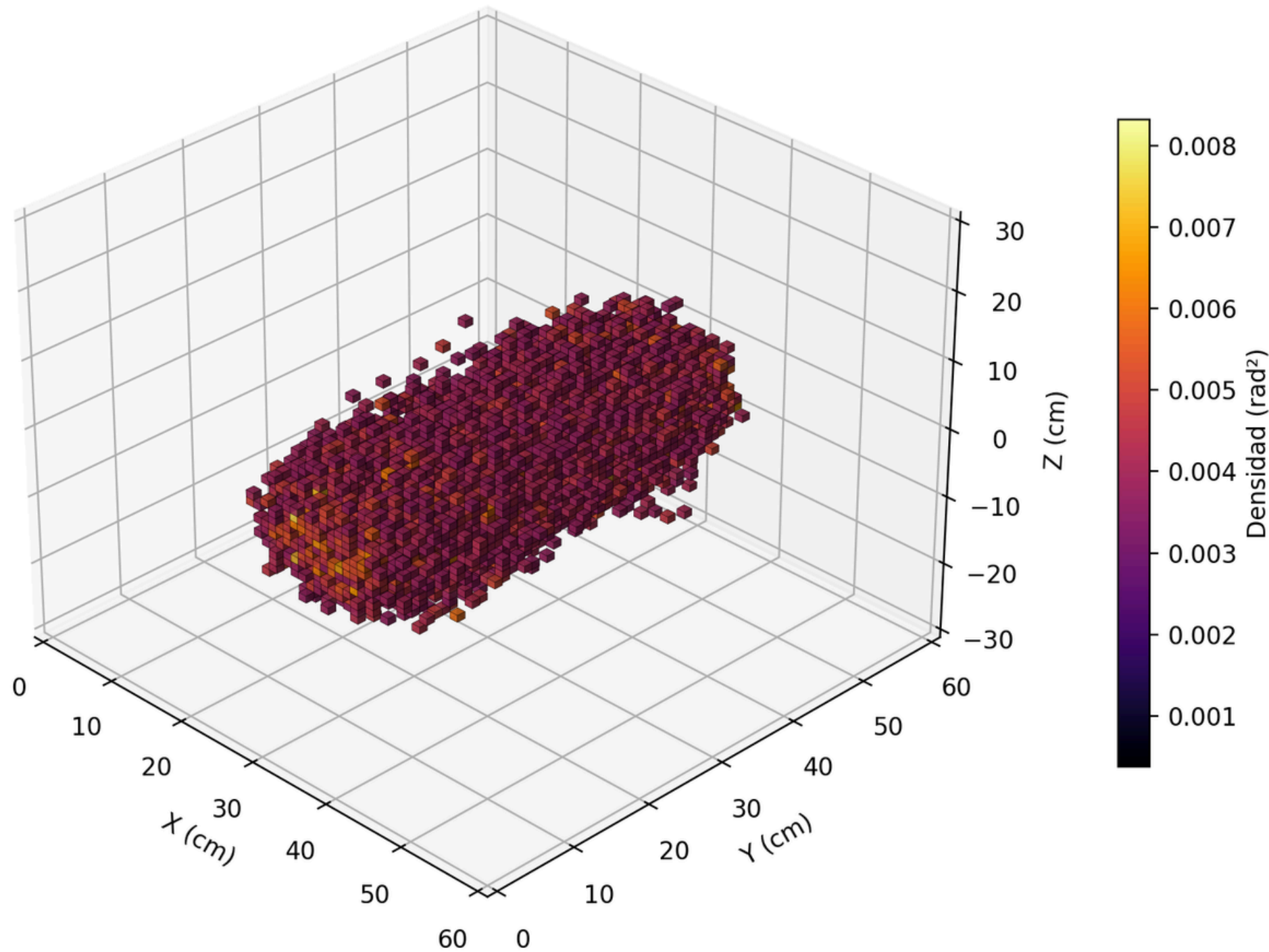
R=10

SIMULACIONES

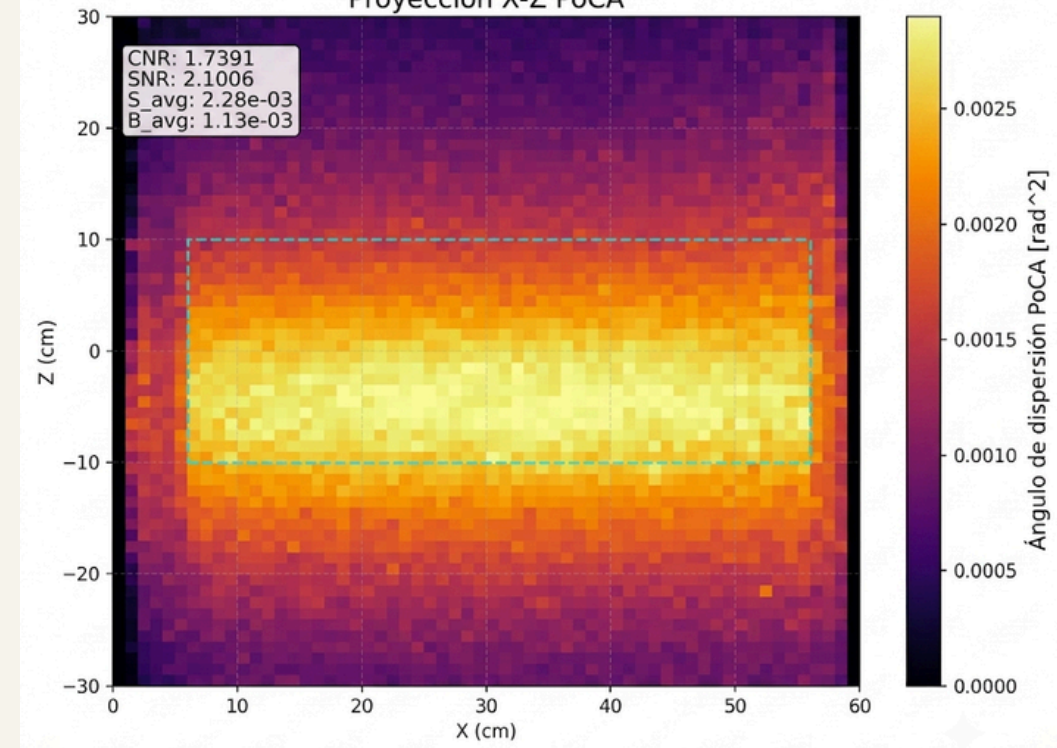
Poca **μ TREC**

SIMULACIONES

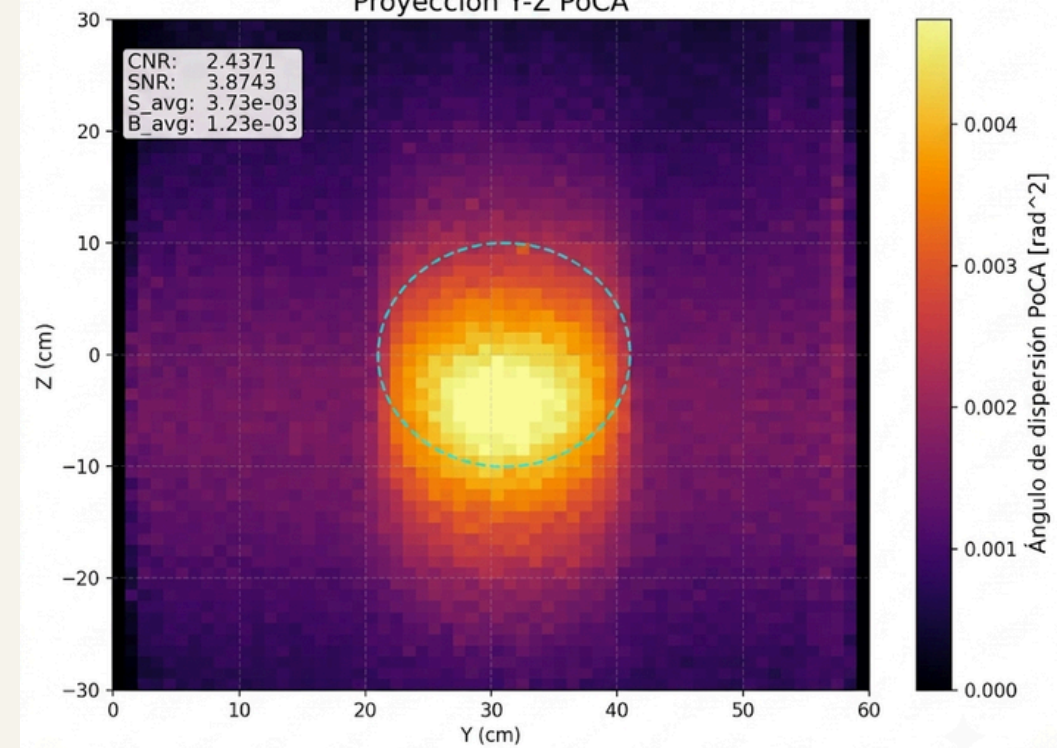
Reconstrucción 3D PoCA (Top 25%)



Proyección X-Z PoCA

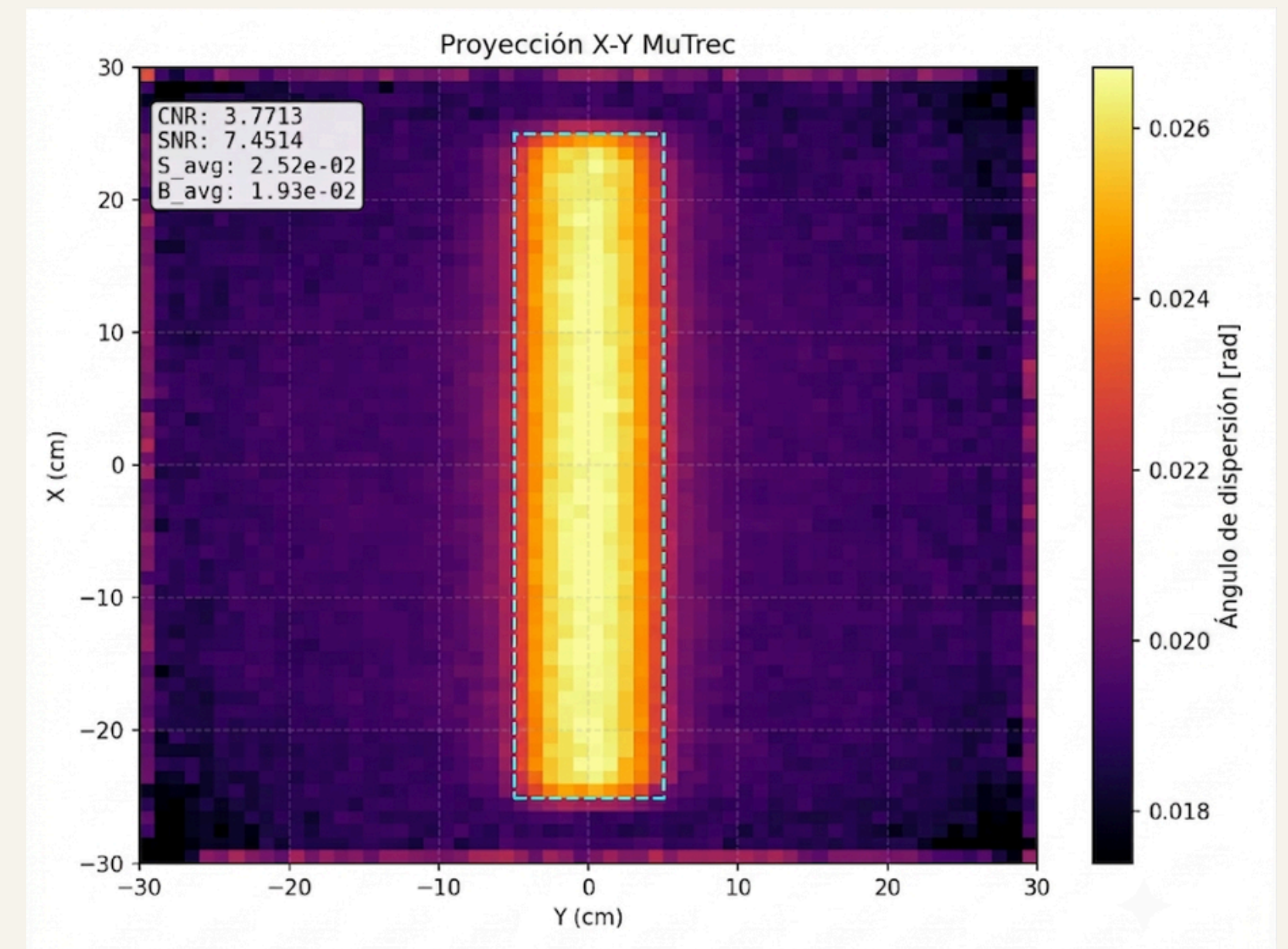
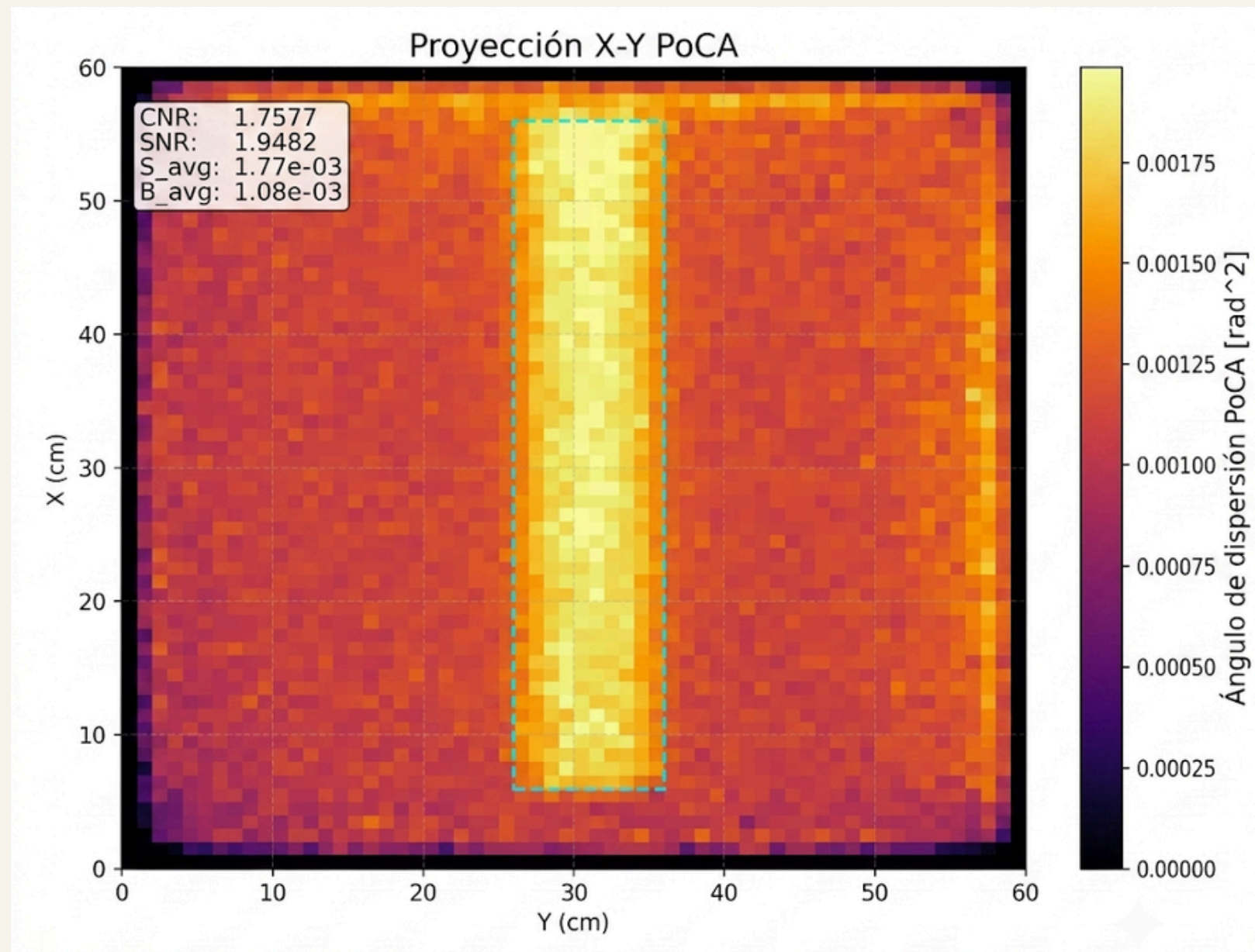


Proyección Y-Z PoCA

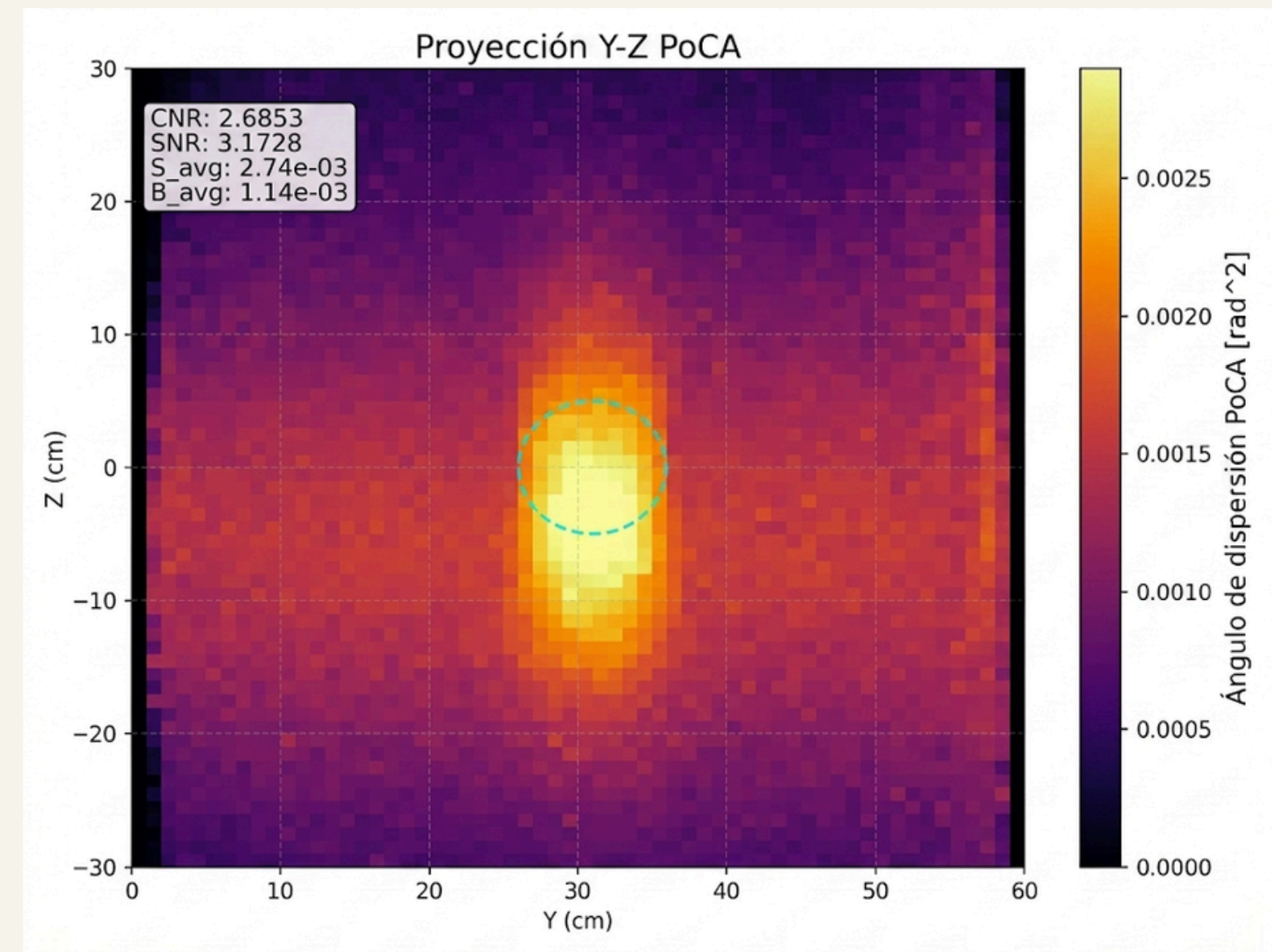
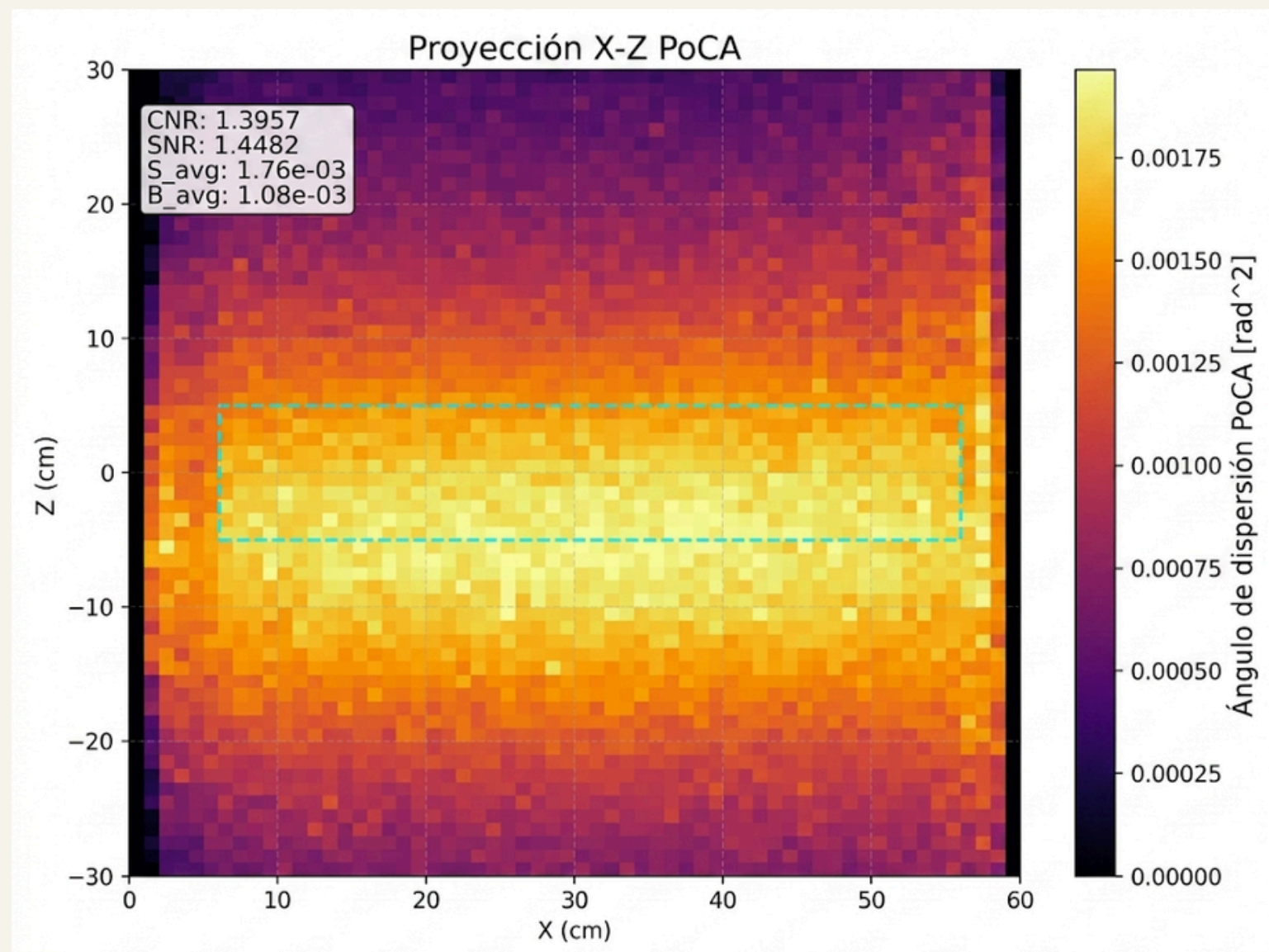


R=5

SIMULACIONES

Poca **μ TREC**

SIMULACIONES

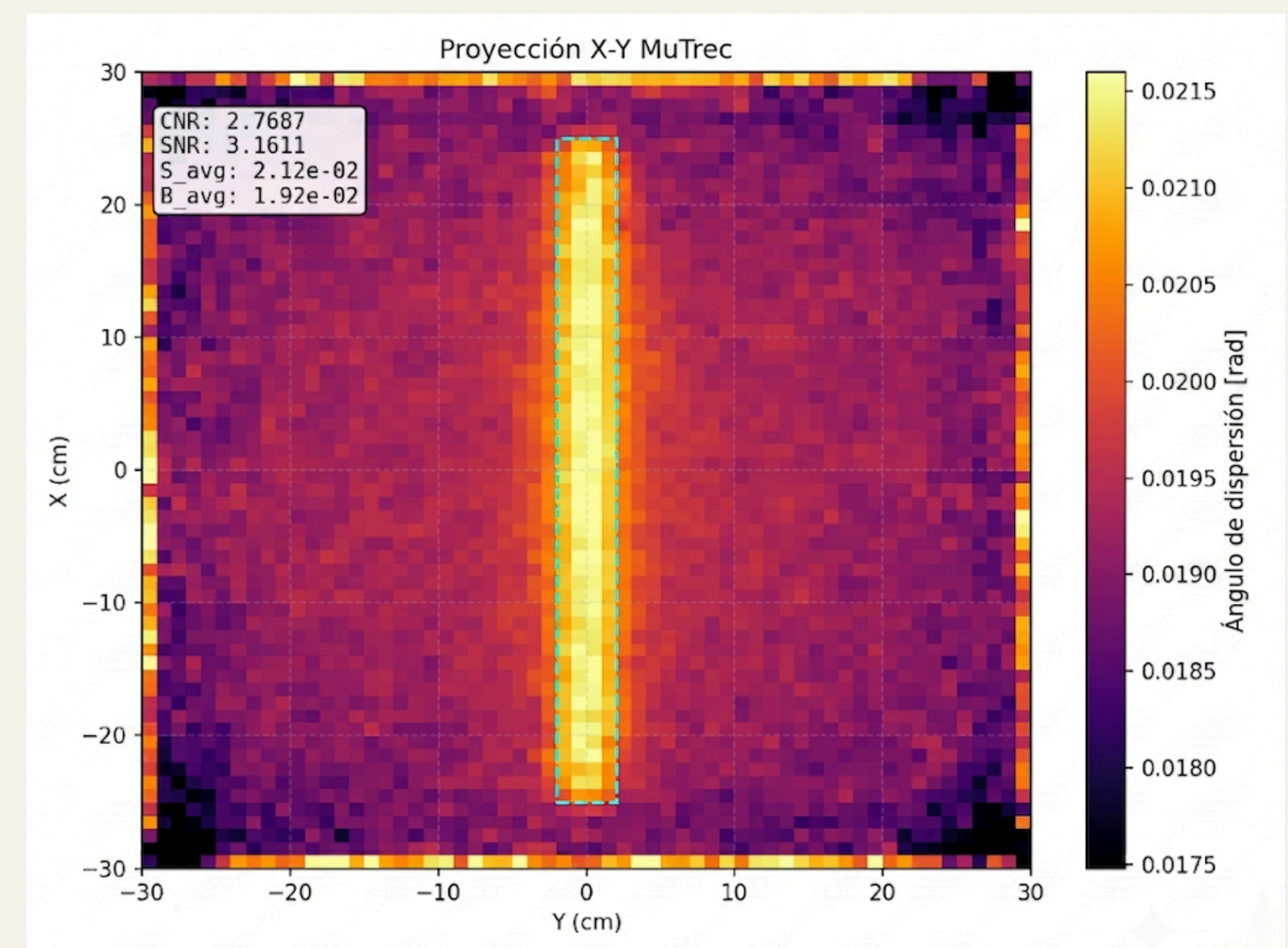
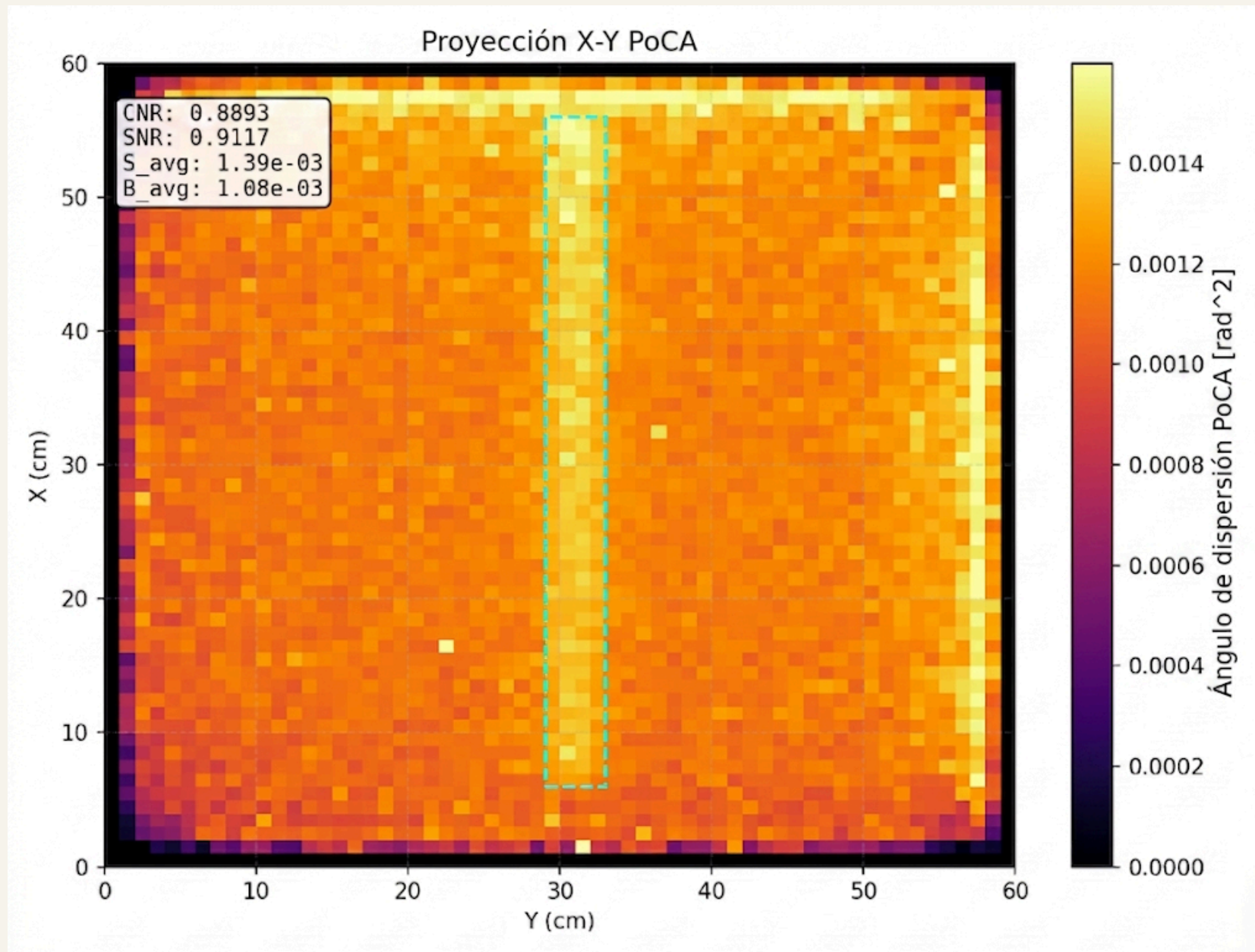


SIMULACIONES

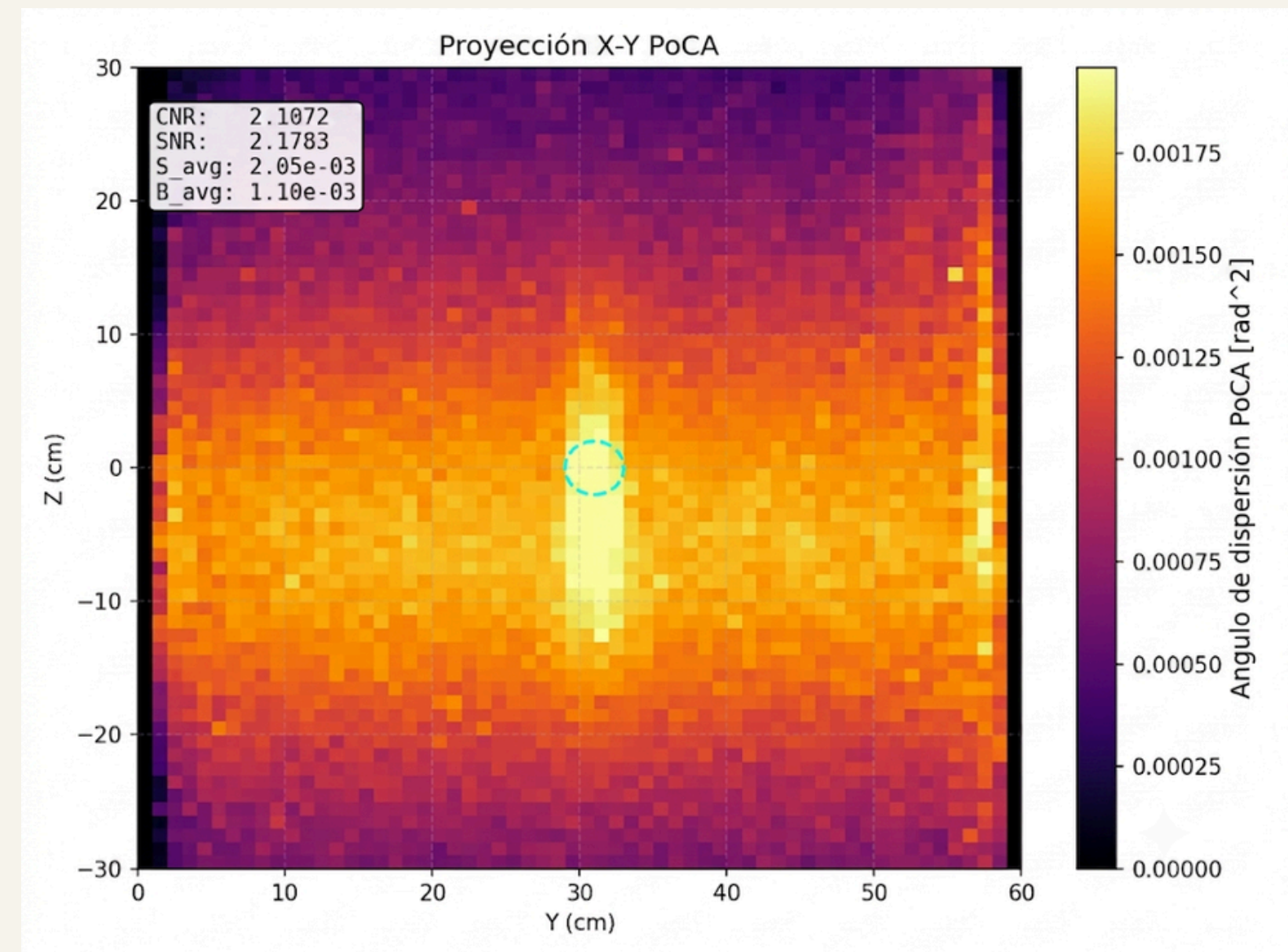
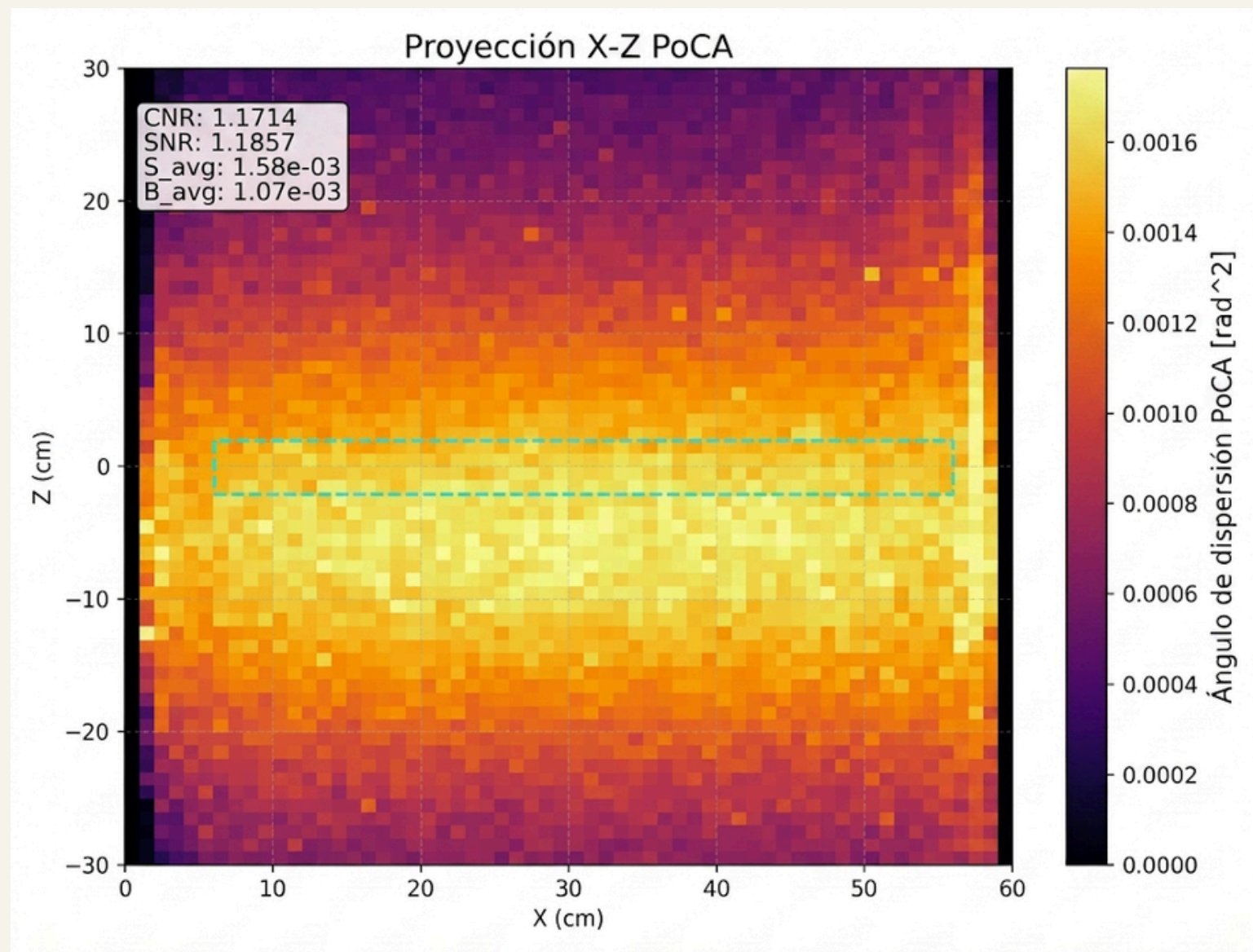
R=2

Poca

μ TREC



SIMULACIONES





IDENTIFICACIÓN DE MATERIALES - X_0

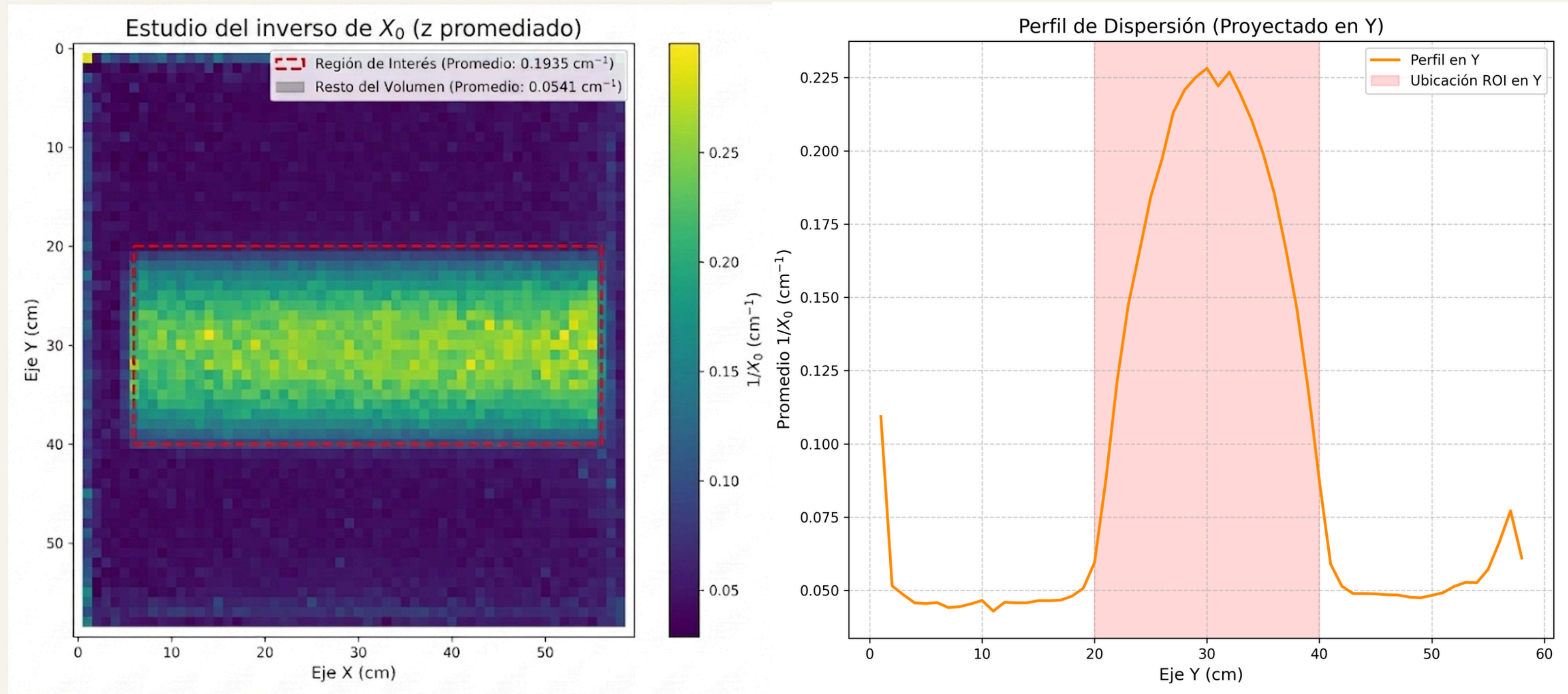


SIMULACIONES

R=10

Concreto: $1/X_0 \sim 0.09 \text{ cm}^{-1}$

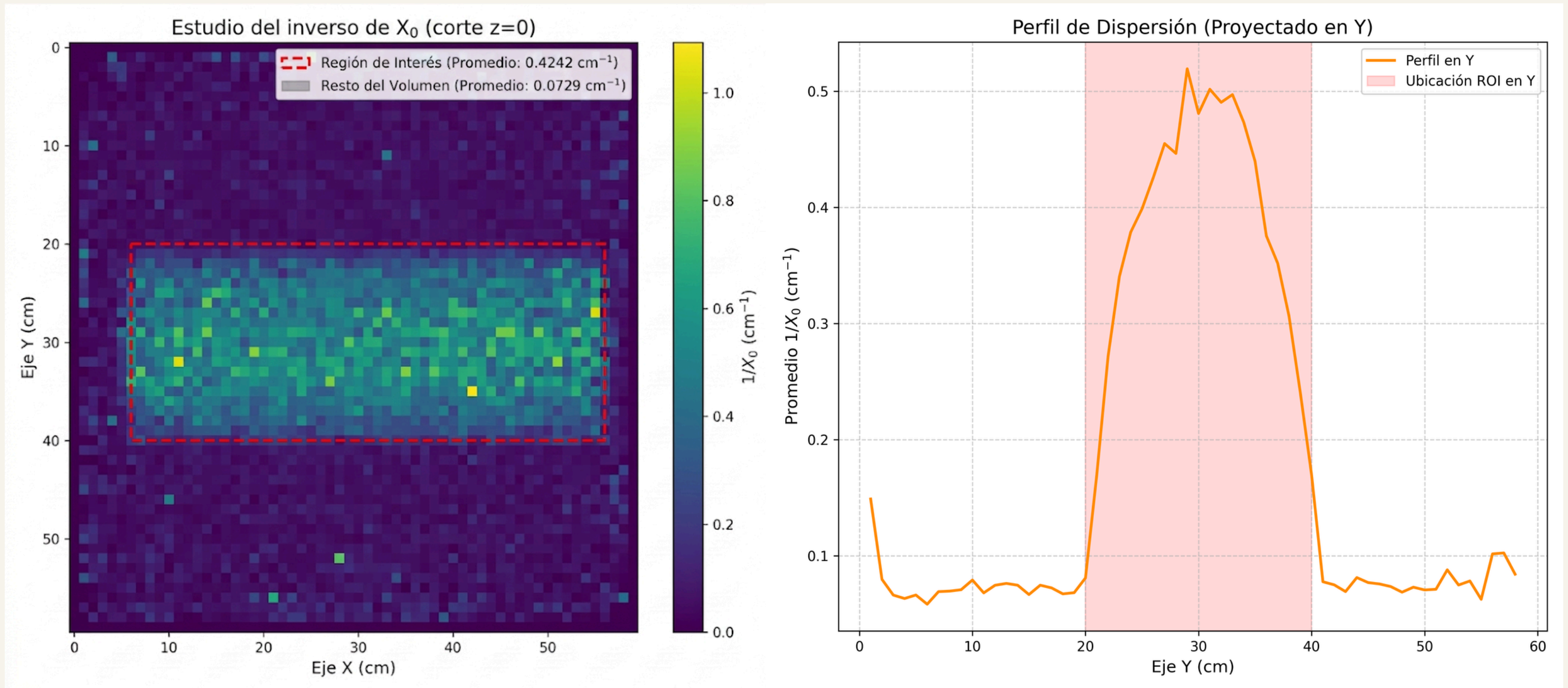
Hierro: $1/X_0 \sim 0.56 \text{ cm}^{-1}$



SIMULACIONES

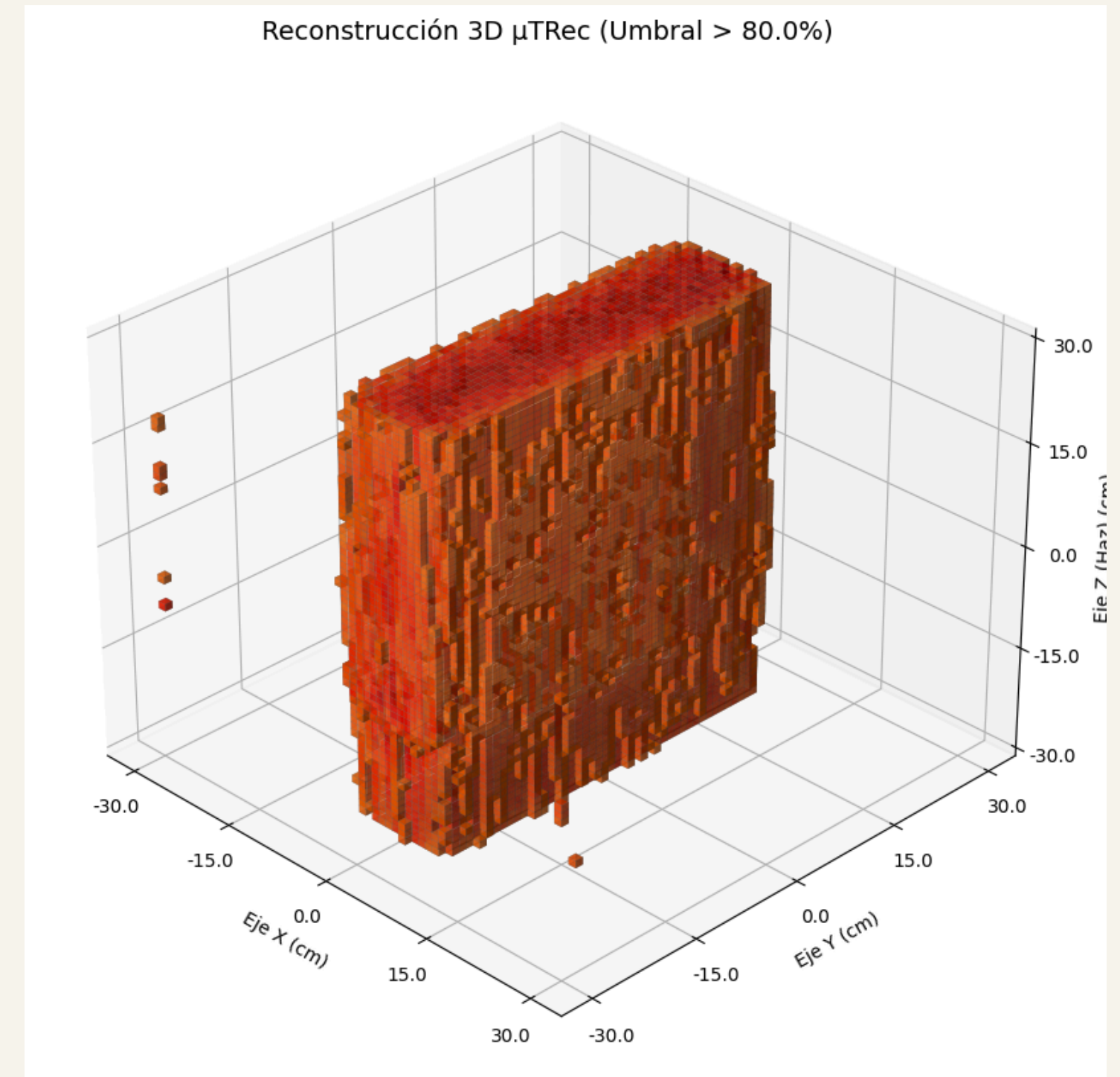
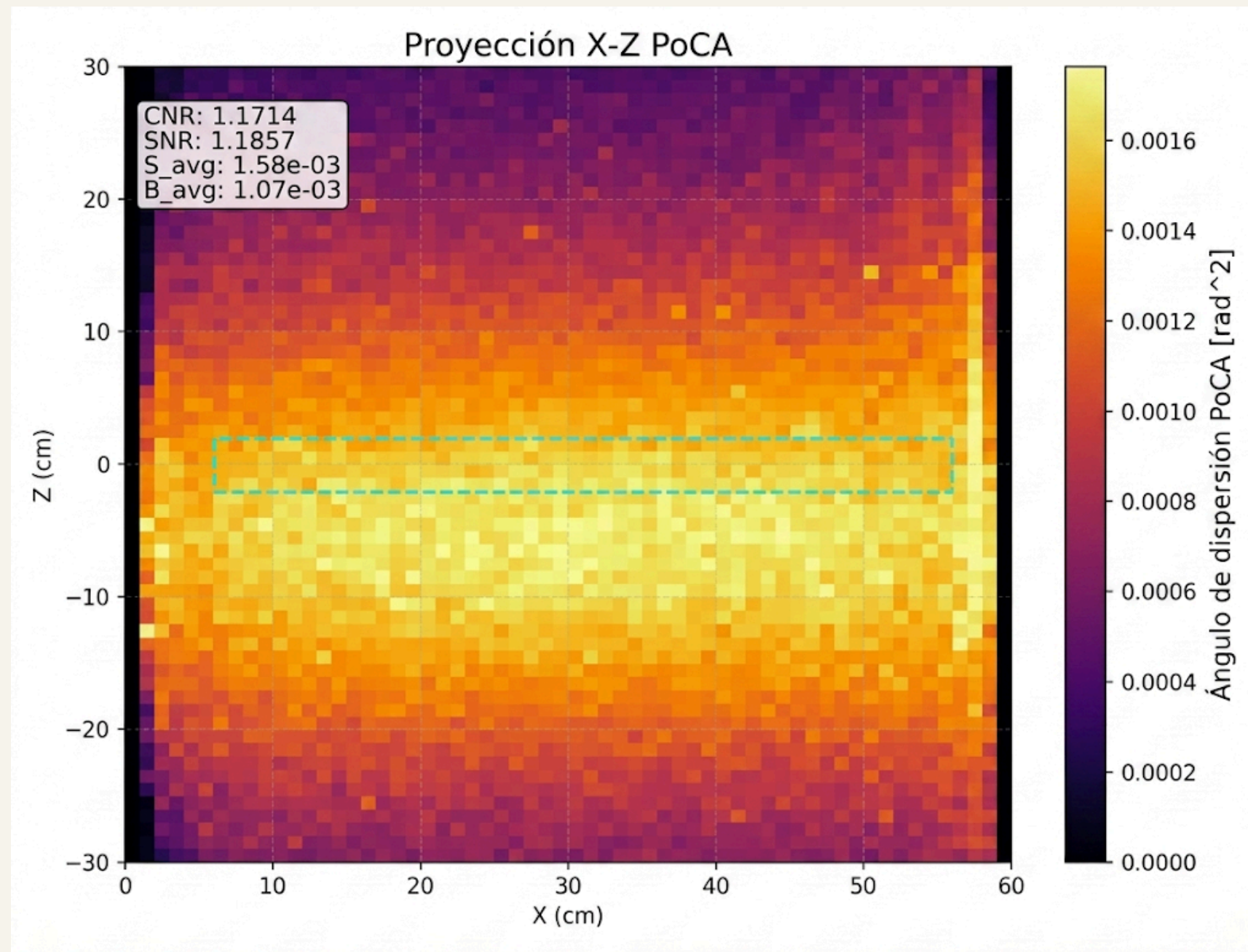
Concreto: $1/X_0 \sim 0.09 \text{ cm}^{-1}$

Hierro: $1/X_0 \sim 0.56 \text{ cm}^{-1}$

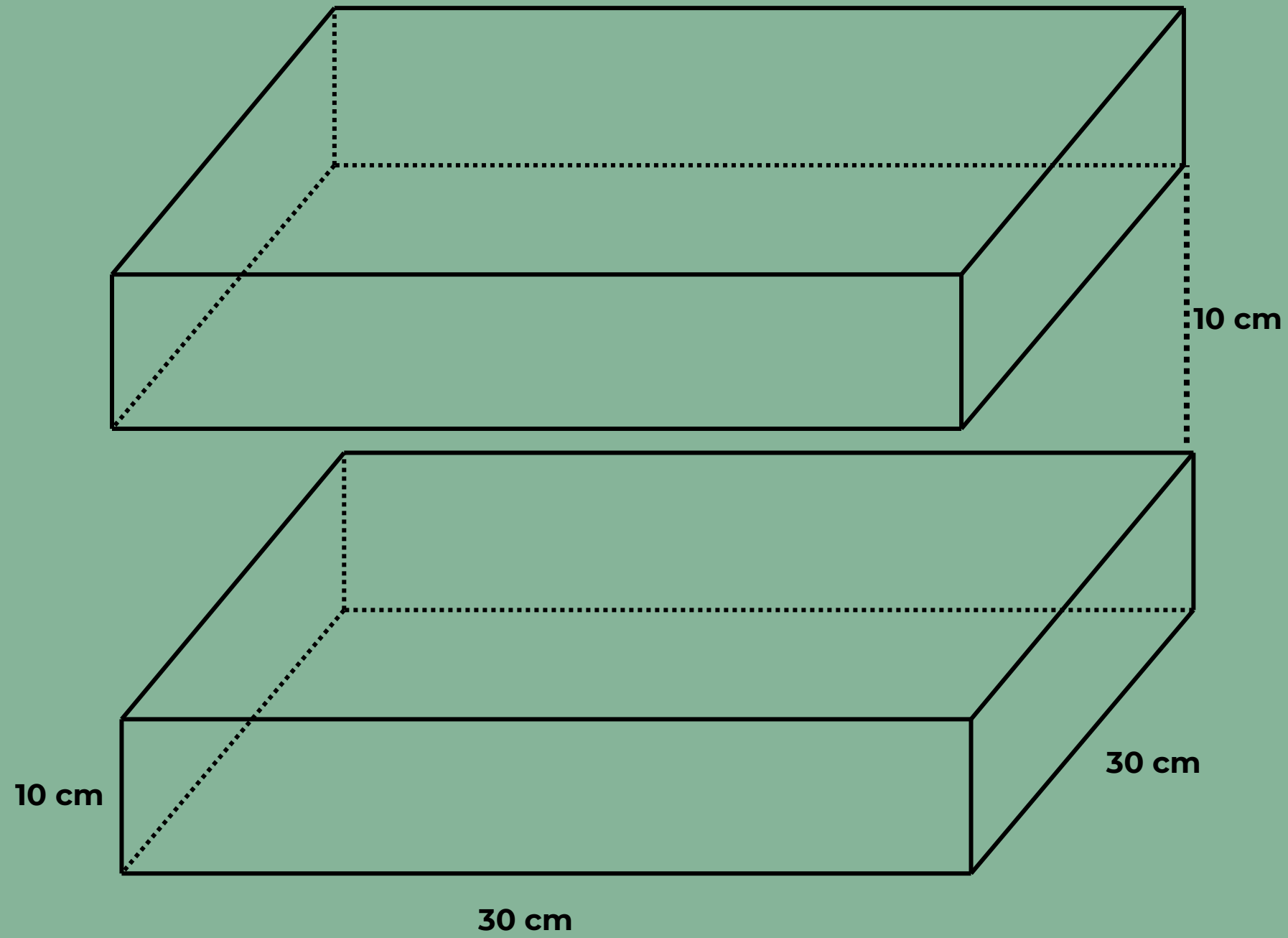


COMPARACIÓN Y LIMITACIONES

LIMITACIONES

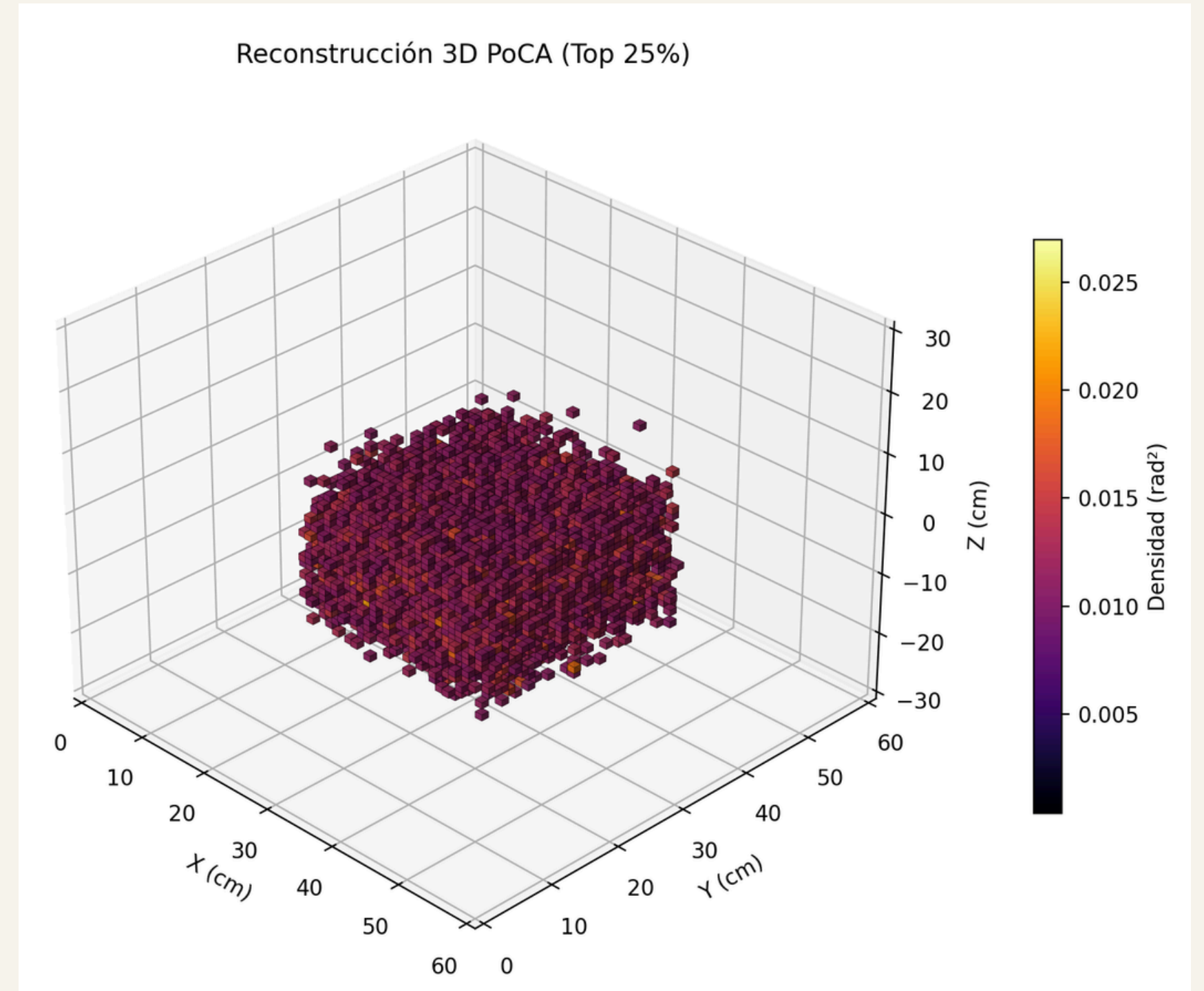
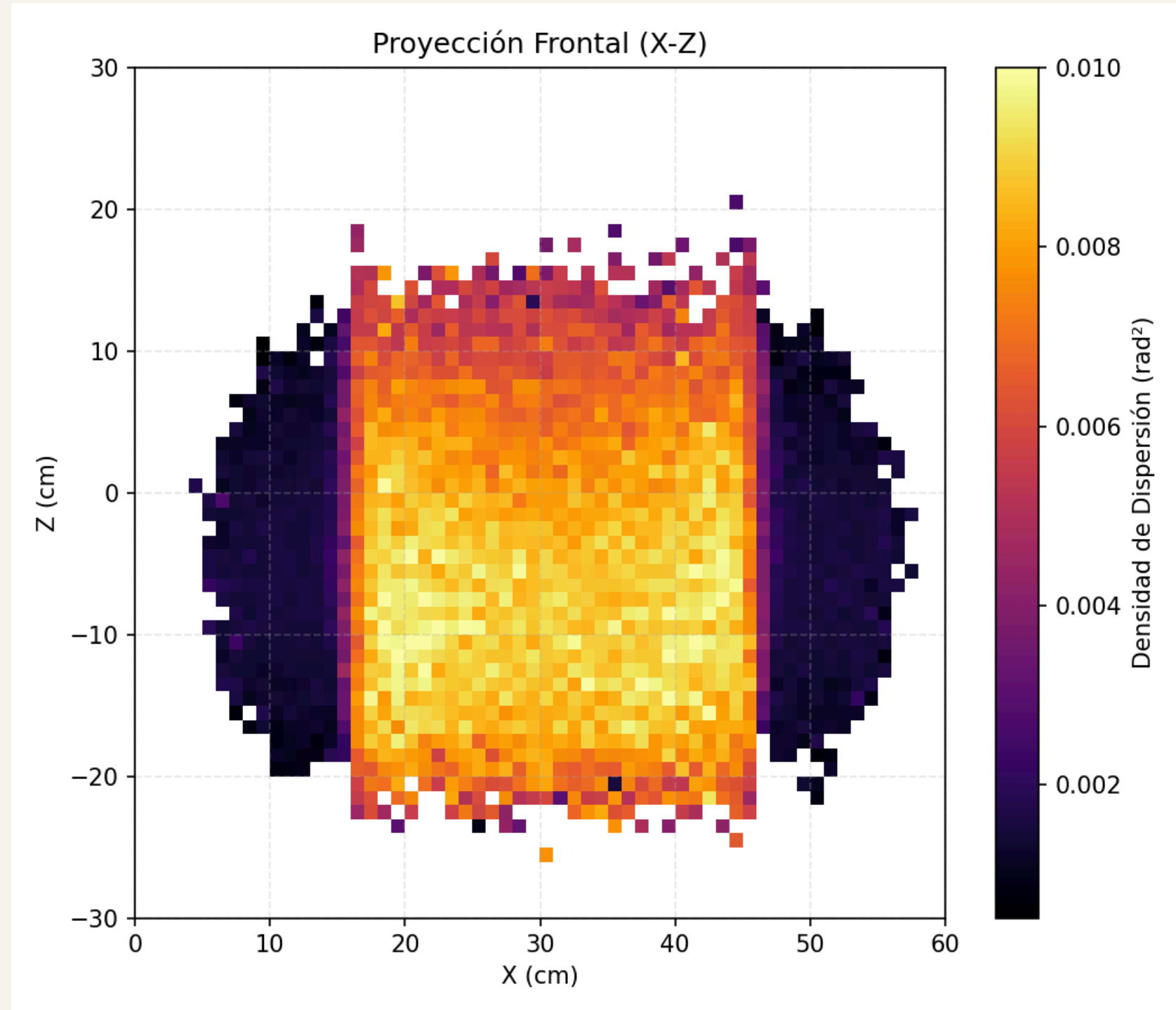


LIMITACIONES



60 cm

LIMITACIONES

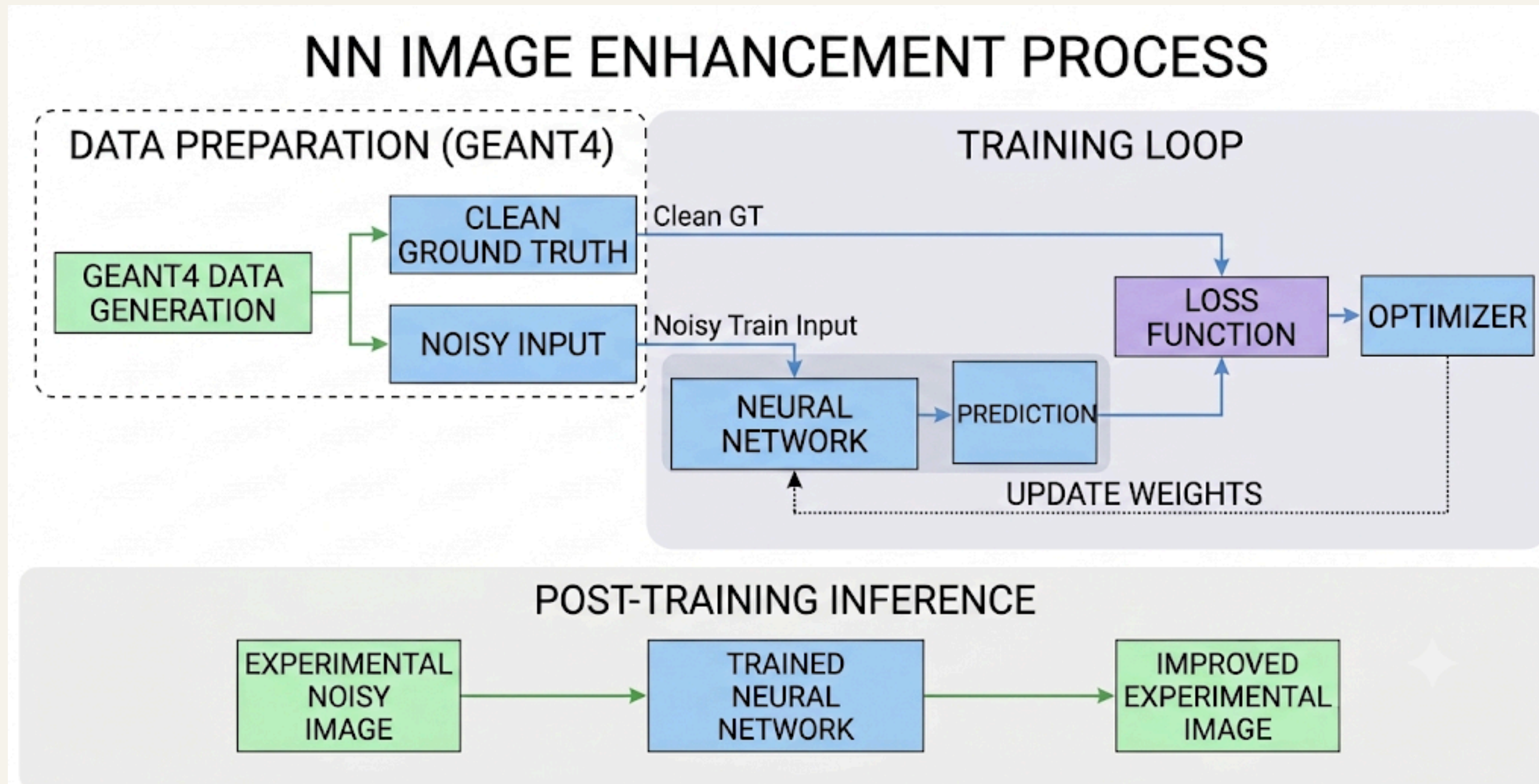




PASOS A SEGUIR Y ESTADO DEL ARTE



REDE NEURONAL PRELIMINAR



ENTRENAMIENTO OPTIMIZADO

Fast simulation for scattering muography applications using generative adversarial networks

Rubén López Ruiz ^a,* Celia Fernández Madrazo ^b, Sergio Sánchez Cruz ^c,
Lara Lloret Iglesias ^a, Pablo Martínez Ruiz del Árbol ^a

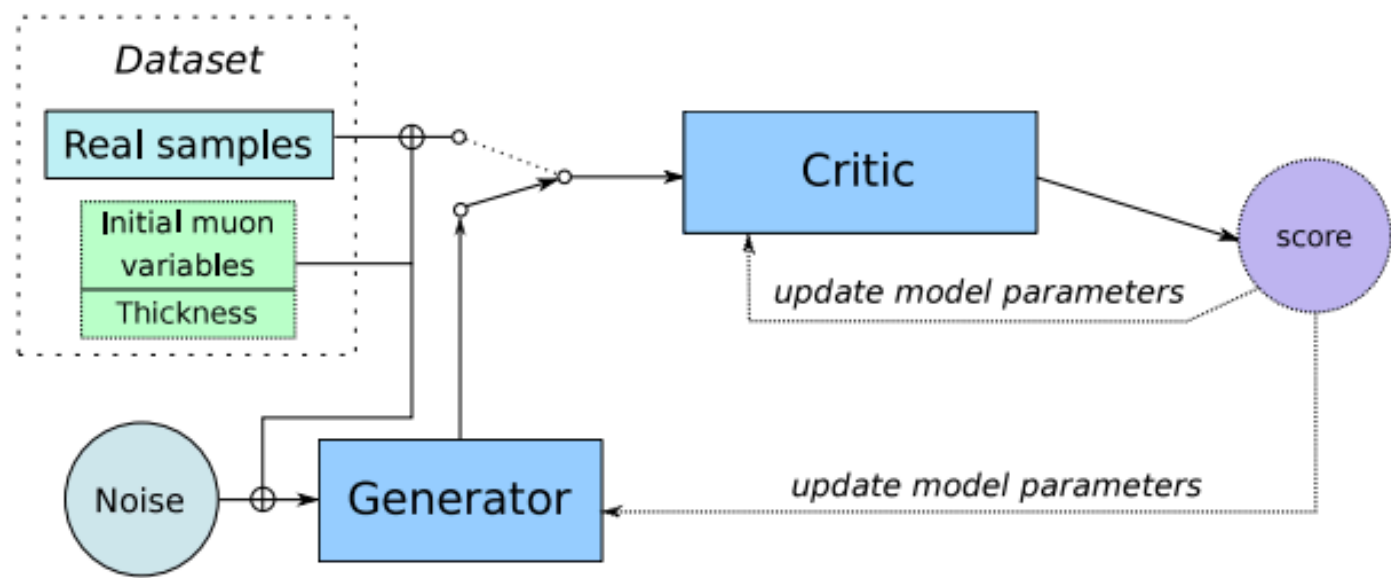


Fig. 2. Scheme of the cGAN architecture.

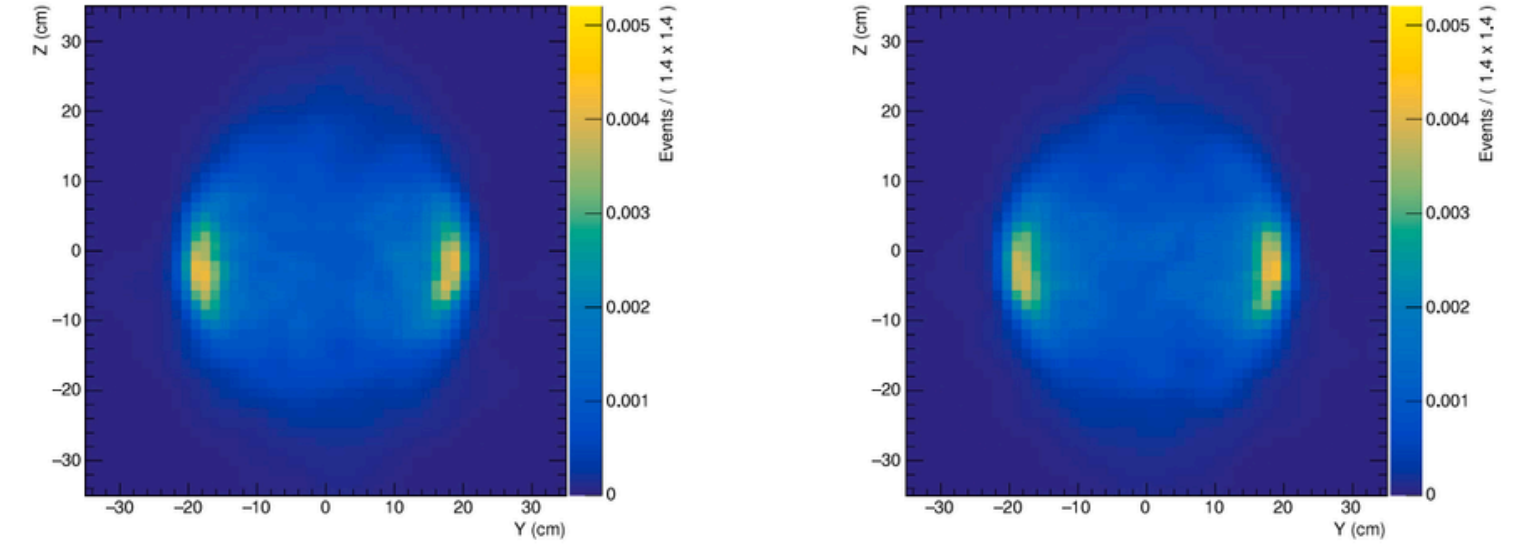


Fig. 7. Example of density maps obtained with the POCA method for a simulated sample of 300 000 muons, corresponding to a pipe of 16 mm of thickness, using GEANT4 (left) and cGAN (right) simulations.

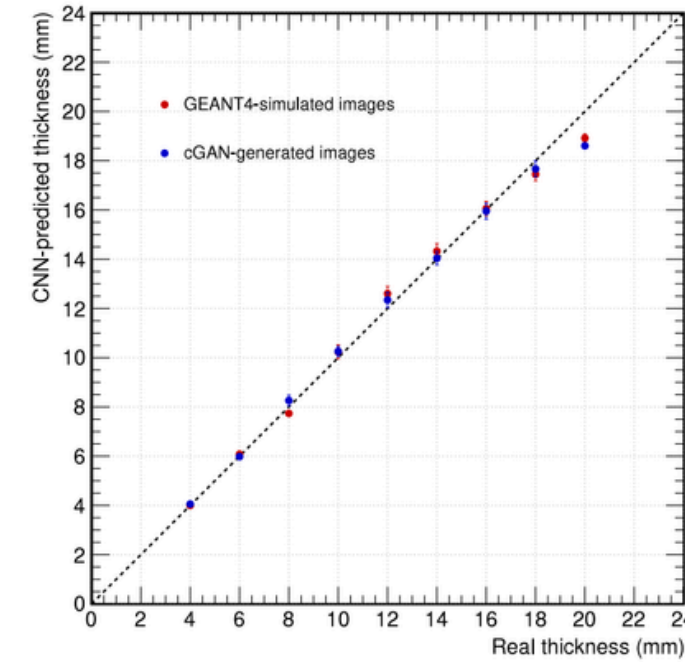
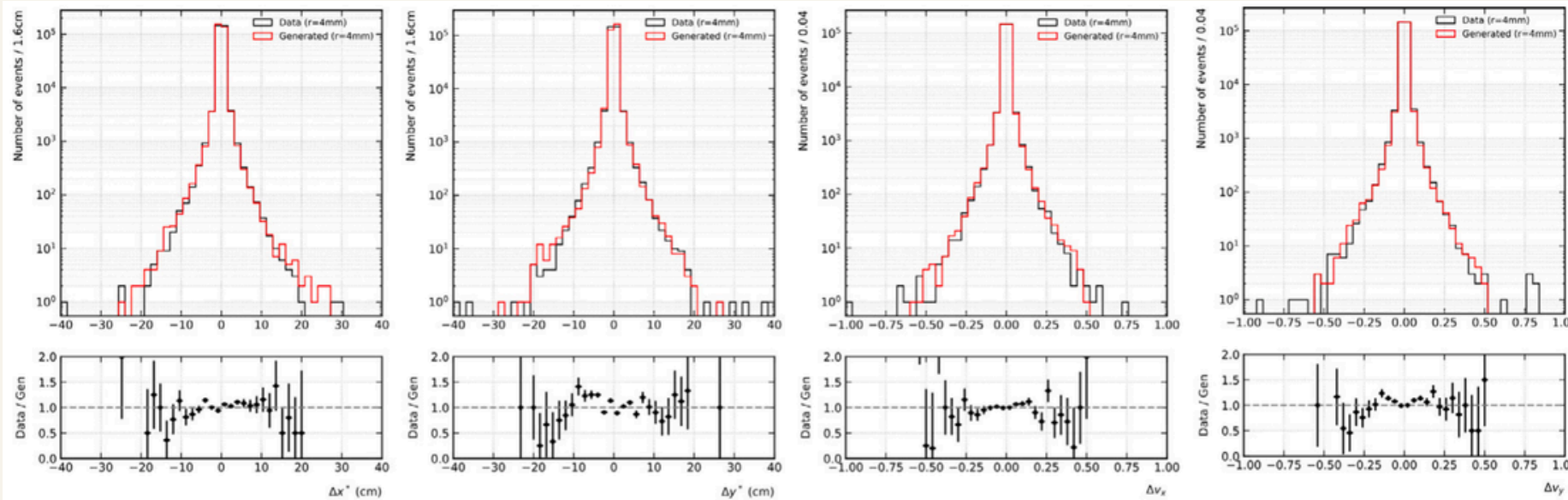


Fig. 8. Distribution of the mean CNN-predicted values of the thickness value for the set of test density maps. The error bars represent the 1-sigma uncertainty intervals.

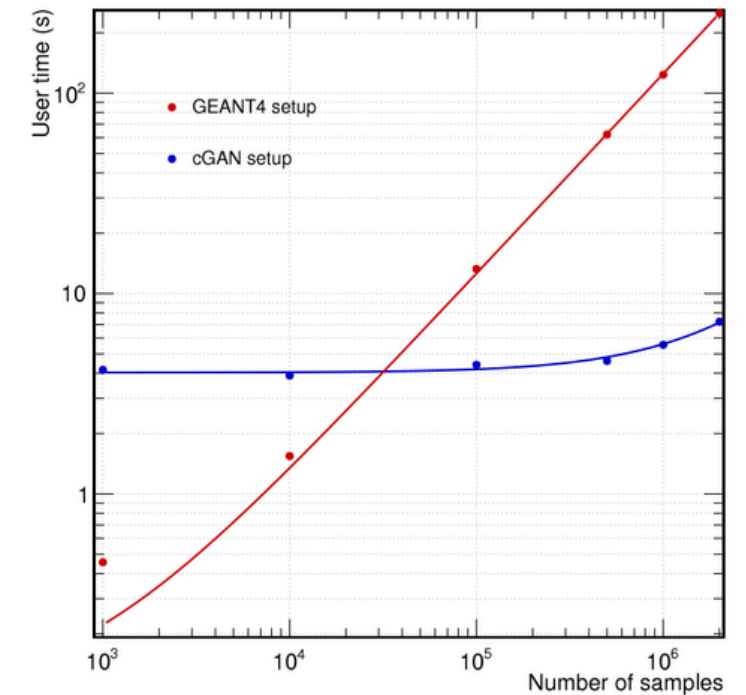


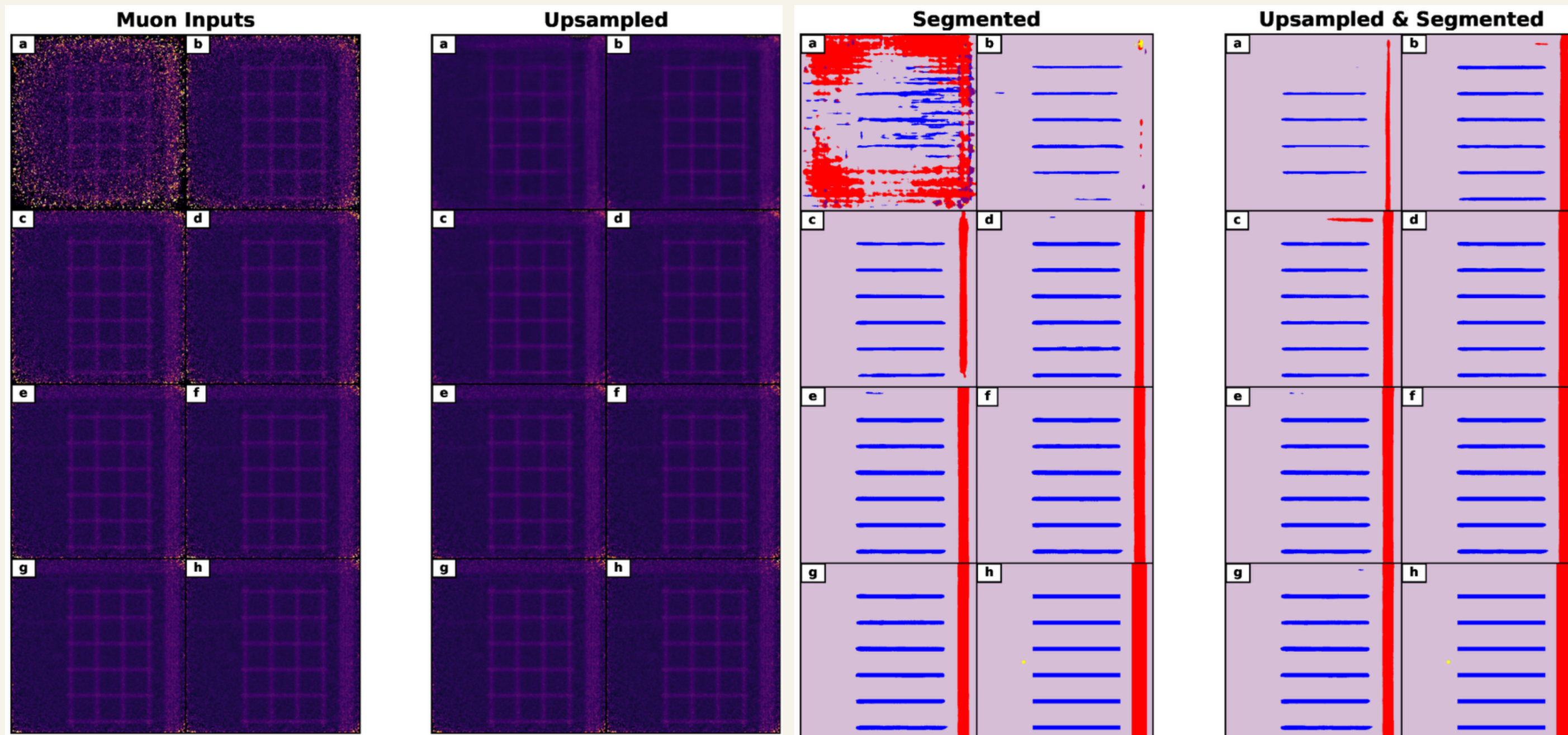
Fig. 9. User time as a function of the number of muon generated for the Geant4 setup and the GAN setup.

Imágenes tomadas de [3]

PROCESAMIENTO DE IMAGENES

Muographic Image Upsampling with Machine Learning for Built Infrastructure Applications

by William O'Donnell ^{1,2,*} , David Mahon ^{1,2} , Guangliang Yang ^{1,2}  and Simon Gardner ¹ 



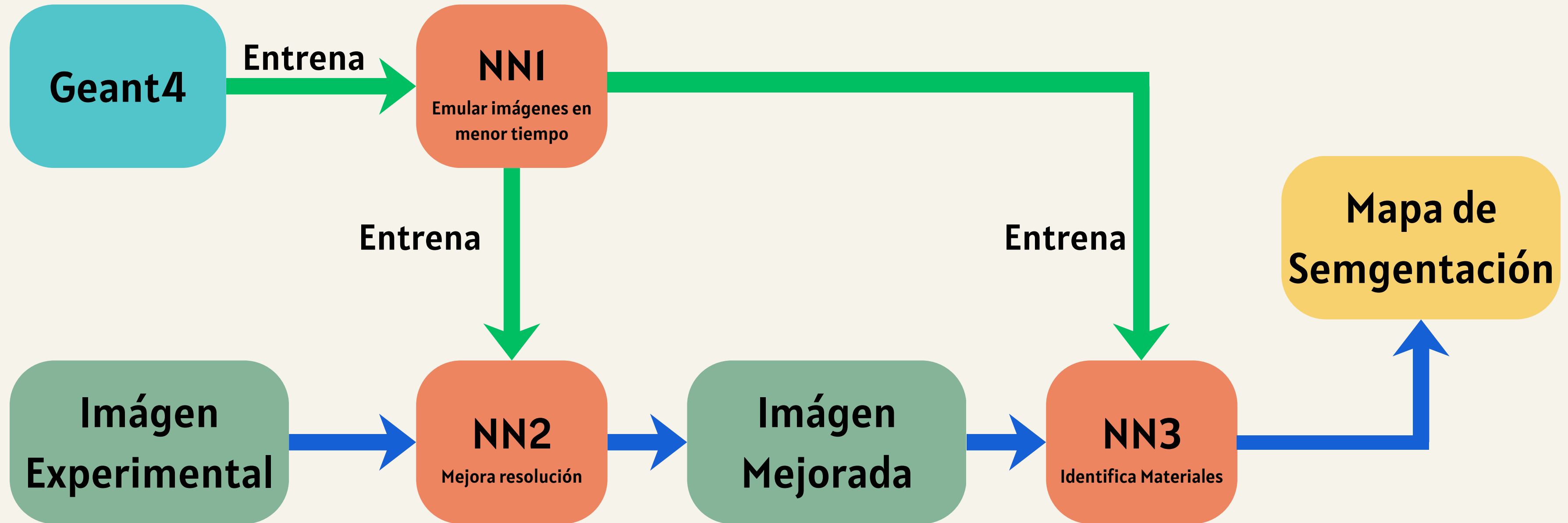
De (a) 1 día a (h) 100 días de muestreo.
Imágenes tomadas de [4]

Gris: Concreto
Azul: Hierro

Espesor de concreto: 20 cm
Separación entre planos: 5 cm

- Red que emula imágenes con mayor tiempo de adquisición.
- Red que segmenta los materiales.
- Redes generativas Antagónicas (cWGAN-GP)
- Logra distinguir el plano de barras horizontales.

TRABAJOS FUTUROS



GRACIAS

¿PREGUNTAS?

REFERENCIAS

- [1] Lagrange, M. (2024, 27 de marzo). Introduction to muography [Diapositivas de presentación]. CERN. Indico. https://indico.cern.ch/event/1395474/contributions/5865876/attachments/2827911/4940788/Introduction_to_muography.pdf.
- [2] Ughade, R., & Chatzidakis, S. (2025). μ TRec: A muon trajectory reconstruction algorithm for enhanced scattering tomography. *Journal of Applied Physics*, 138(6), Artículo 064909. <https://doi.org/10.1063/5.0278370>.
- [3] López Ruiz, R., Fernández Madrazo, C., Sánchez Cruz, S., Lloret Iglesias, L., & Martínez Ruiz del Árbol, P. (2025). Fast simulation for scattering muography applications using generative adversarial neural networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 162, Artículo 112357. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112357>.
- [4] O'Donnell, W., Mahon, D., Yang, G., & Gardner, S. (2025). Muographic Image Upsampling with Machine Learning for Built Infrastructure Applications. *Particles*, 8(1), Artículo 33. O'Donnell, W., Mahon, D., Yang, G., & Gardner, S. (2025). Muographic Image Upsampling with Machine Learning for Built Infrastructure Applications. *Particles*, 8(1), Artículo 33. <https://doi.org/10.3390/particles8010033>.

μ Trec

$$P(\mathbf{Y}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\boldsymbol{\Sigma}|}} \exp\left(-\frac{1}{2}\mathbf{Y}^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{Y}\right), \quad (3)$$

Using Bayesian theory, the probability of a muon displaying a specific displacement and angle at y_1 , given the exit point 2, can be expressed as follows:

$$P(y_1|y_2) = \frac{P(y_2|y_1)P(y_1|y_0)}{P(y_2)} \quad (4)$$

Since $P(y_2)$ is a normalization constant, we aim to maximize:

$$P(y_1|y_2) \propto P(y_2|y_1)P(y_1|y_0). \quad (5)$$

Imagen tomada de [2]

$$\sigma_{y_1}^2(z_0, z_1) = E_0^2 \left(1 + 0.038 \ln \frac{z_1 - z_0}{X_0}\right)^2 \times \int_{z_0}^{z_1} \frac{(z_1 - z)^2}{\beta^2(z)p^2(z)} \frac{dz}{X_0} \quad (16)$$

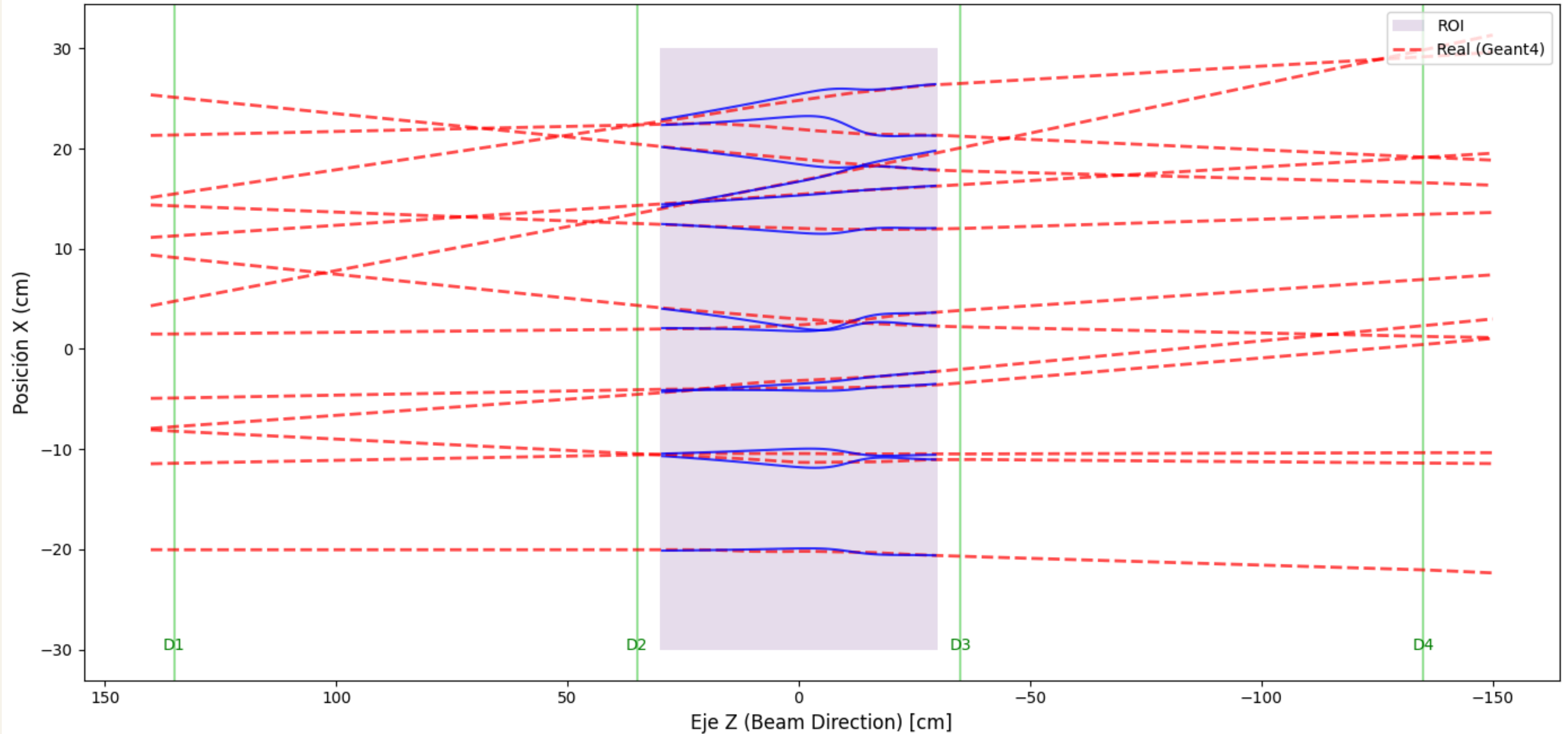
$$\sigma_{\theta_1}^2(z_0, z_1) = E_0^2 \left(1 + 0.038 \ln \frac{z_1 - z_0}{X_0}\right)^2 \times \int_{z_0}^{z_1} \frac{1}{\beta^2(z)p^2(z)} \frac{dz}{X_0} \quad (17)$$

$$\sigma_{y_1\theta_1}^2(z_0, z_1) = E_0^2 \left(1 + 0.038 \ln \frac{z_1 - z_0}{X_0}\right)^2 \times \int_{z_0}^{z_1} \frac{z_1 - z}{\beta^2(z)p^2(z)} \frac{dz}{X_0} \quad (18)$$

Imagen tomada de [2]

μ Trec

Comparación: Real vs Reconstrucción (XZ)



SIMULACIONES

$$CNR = \frac{|\mu_{Fe} - \mu_{Concreto}|}{\sqrt{\sigma_{Fe}^2 + \sigma_{Concreto}^2}}$$

Contraste: Hierro vs Concreto

$$SNR = \frac{\mu_{Fe} - \mu_{Fondo}}{\sigma_{Fondo}}$$

Relación: Señal - Ruido (Concreto)

SIMULACIONES

Ecuación de Highland

$$\sigma_{\theta} = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} \sqrt{\frac{L}{X_0}} (1 + 0.038) \ln \frac{L}{X_0}$$

Por ahora: momento
P=4000 MeV

Densidad $\rightarrow X_0$: Longitud de radiación

Ecuación trascendente
 \rightarrow Solución numérica

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g/cm}^2}{\rho} \frac{A}{Z(Z+1) \ln\left(\frac{287}{\sqrt{Z}}\right)}$$

No conocemos la densidad ni tampoco el número atómico

Mapear por X_0 ya es único por material

$$\lambda(X_0) = \left(\frac{15 \text{ MeV}}{p_0} \right)^2 \frac{1}{X_0}$$

En muongrafía se define como
Densidad de Scattering



Se mapeo $1/X_0$