

# Metodología para la Simulación de Neutrinos Atmosféricos en Geant4 para aplicaciones agrícolas

Luigi Miranda-Leuro

Director: Dr. Christian Sarmiento-Cano  
Co-director: Dr. Luis A. Nuñez



# Contenido

- Agricultura de precisión y astropartículas
  - Estimación de humedad
  - ¿Por que nos interesan las astropartículas?
  - Interacción neutrón-materia
  - Sensores de neutrones de rayos cósmicos
- Metodología
  - Configuración de las simulaciones
  - Modelo de atmósfera y suelo
  - Parámetros geométricos y de contorno
  - Resultados preliminares

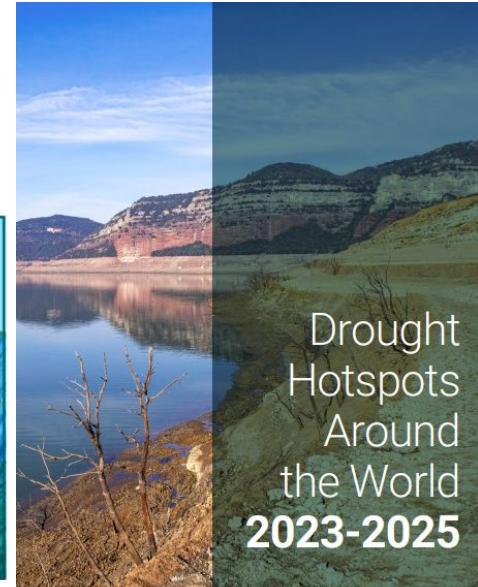
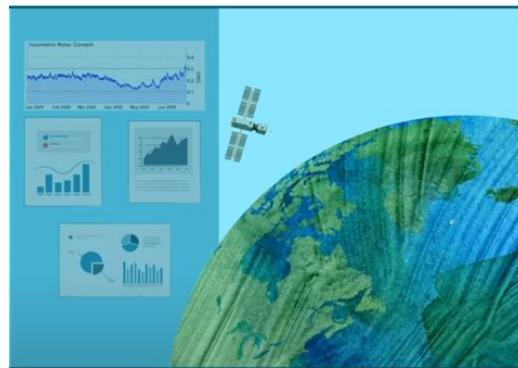
# Agricultura de precisión

Las sequías intensificadas a nivel global amenazan los medios de vida y la seguridad alimentaria, resaltando la urgencia. Haciendo urgente su optimización los procesos agrícolas.

La agricultura de precisión, mediante tecnologías como sensores y GPS, permite un uso eficiente de agua y suelo, conservando recursos y aumentando la productividad de manera sostenible.



**United Nations**  
Convention to Combat  
Desertification

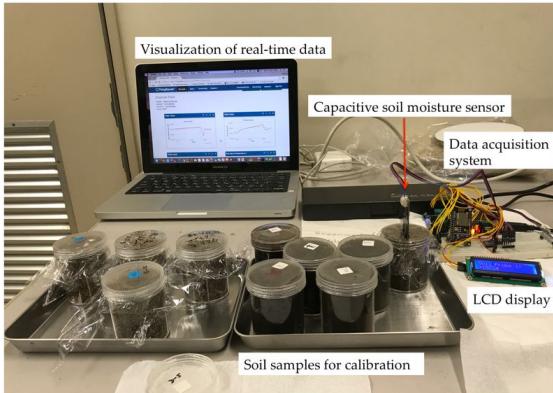


United Nations  
Convention to Combat  
Desertification



# Estimación de humedad

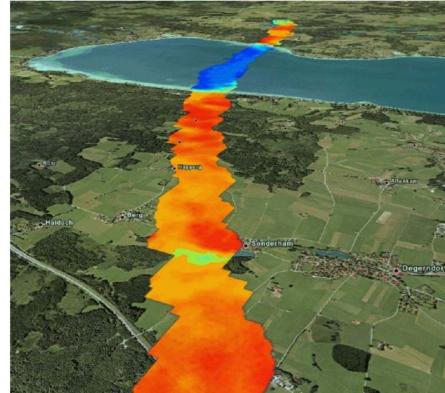
## Detocres dieléctricos



Naghahae, E. A. A. D., Fujino, T. (2019). Agriculture, 9(7):141.

Mide la humedad del suelo con sensores eléctricos en puntos específicos. Múltiples sensores permiten estimar la humedad en áreas extensas mediante interpolación.

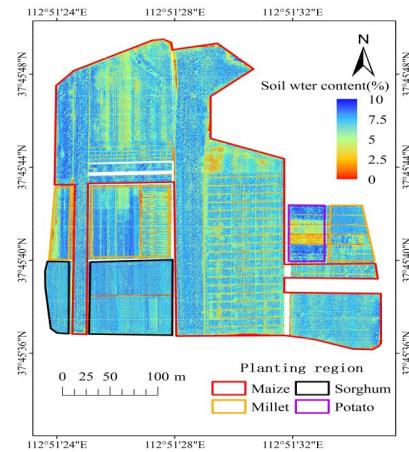
## Detocres satelitales



Kerr, Y. H., et al (2010). Proceedings of the IEEE, 98(5):666–687.

Monitorea la humedad del suelo a gran escala con datos satelitales, ideado para la gestión de amplias regiones.

## Detección con drones



Qu, T., et al. (2024). Agriculture, 14, 484.

Sobrevuela el campo de cultivo con sensores térmicos, permite el monitoreo de específicas.

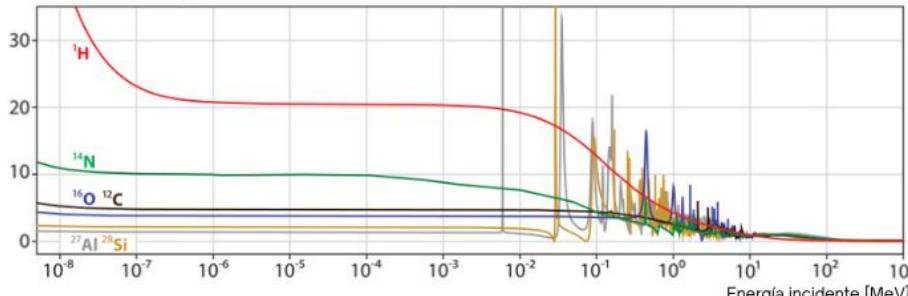
# ¿Por que nos interesan las astropartículas?

¿Es posible emplear astropartículas para estimar la humedad del suelo en aplicaciones agrícolas?



# Detectores de neutrones cósmicos

Sección eficaz de dispersión de un neutrón [barn]



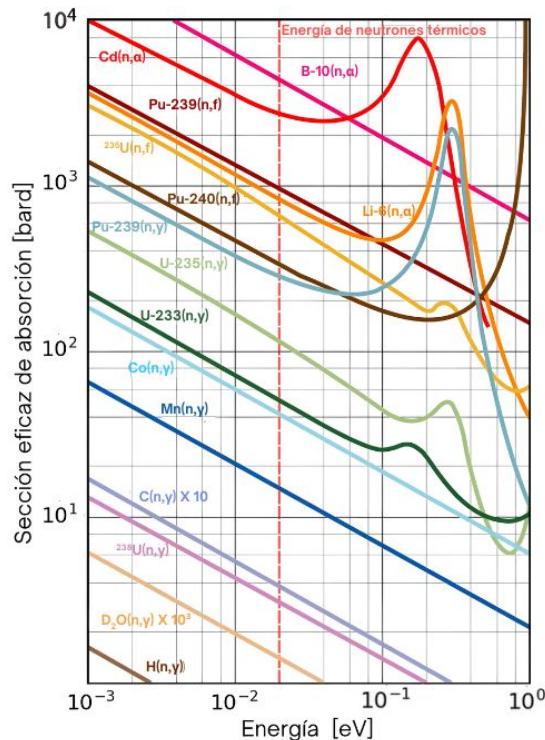
Köhli et al., Water Resources Research, 51(7):5772–5790 2015

El hidrógeno muestra la probabilidad más alta de dispersar neutrones. Además, esta interacción se caracteriza por tener la tasa más alta de pérdida de energía.

Elemento	Masa [u]	Tasa de pérdida de energía $\xi$	$n_{col}$ para termalizar
H	1	1	18
H <sub>2</sub> O	-	0.92	20
N	14	0.134	135
O	16	0.12	153
Al	27	0.0723	255
Si	28	0.0698	264
Fe	56	0.0353	522
SiO <sub>2</sub>	-	0.11	166
Aire (seco)	-	0.135	135

Köhli et al., Frontiers in Water, 2:544–847 2021

# Detectores de neutrones cósmicos

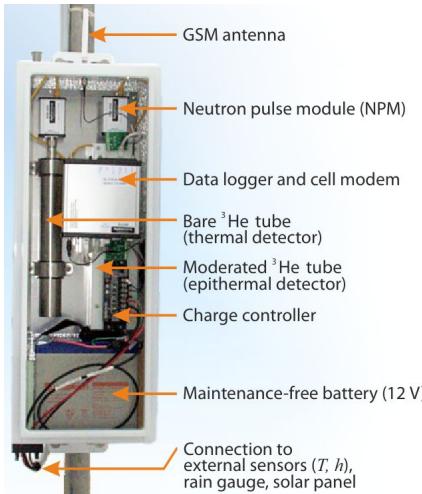


Elemento	Masa [u]	Tasa de pérdida de energía $\xi$	$n_{\text{col}}$ para termalizar
H	1	1	18
$\text{H}_2\text{O}$	-	0.92	20
N	14	0.134	135
O	16	0.12	153
Al	27	0.0723	255
Si	28	0.0698	264
Fe	56	0.0353	522
$\text{SiO}_2$	-	0.11	166
Aire (seco)	-	0.135	135

Köhli et al., Frontiers in Water, 2:544–847 2021

# Detectores de neutrones cósmicos

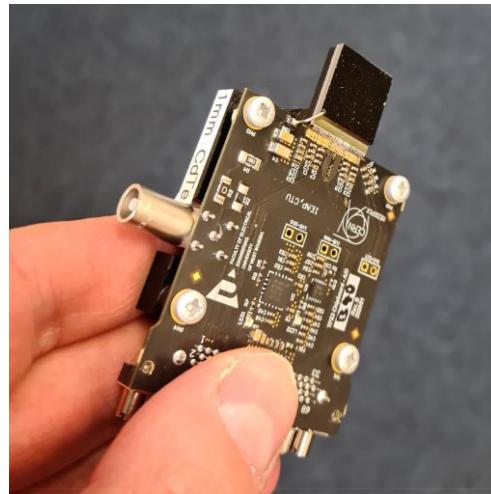
## Detectores gaseosos



Schrön et al., 2018. Intercomparison of CRNS and water balance monitoring.

Registran a través de la ionización del gas interno, generando cargas que se amplifican eléctricamente para producir la señal.

## Detectores semiconductores



Filgas et al., 2022. *Acta Astronautica*, 200, 620–625.

Detectan mediante la creación de pares electrón-hueco en un material semiconductor, cuya carga recogida forma la señal de medición.

## Detectores de centelleo

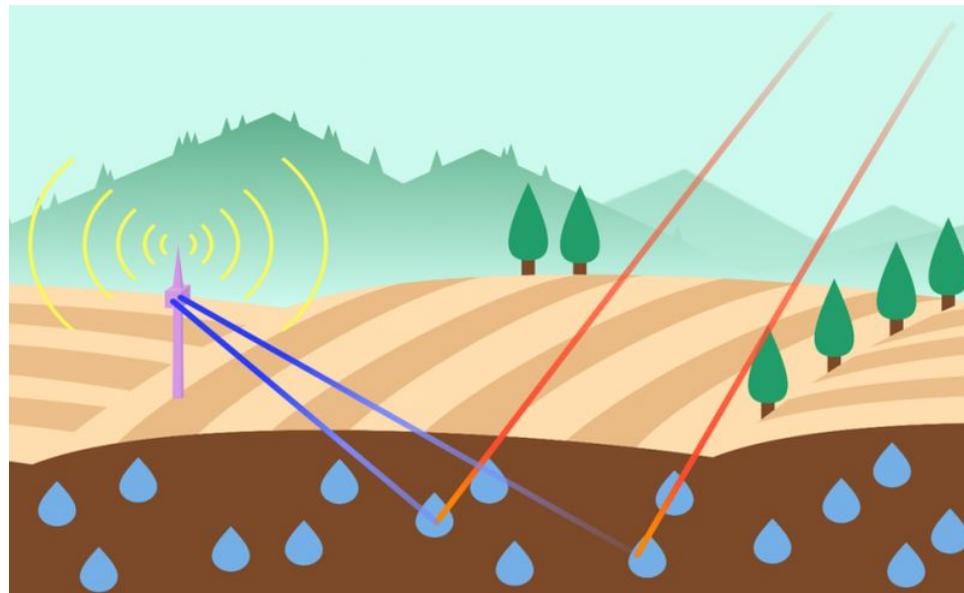


Stowell et al., 2021. In *Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2021)*.

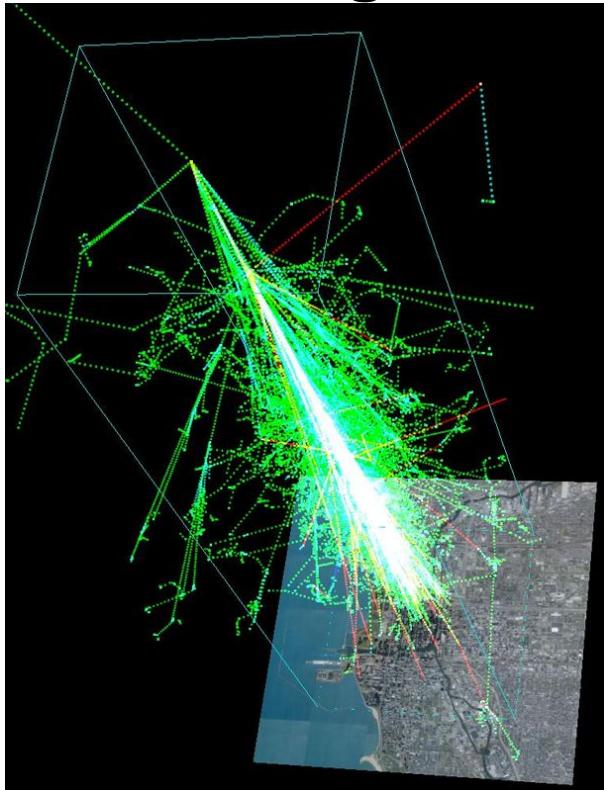
Converten la energía depositada por la radiación en destellos de luz que son detectados por fotomultiplicadores o fotodiodos.

# Detectores de neutrones cósmicos

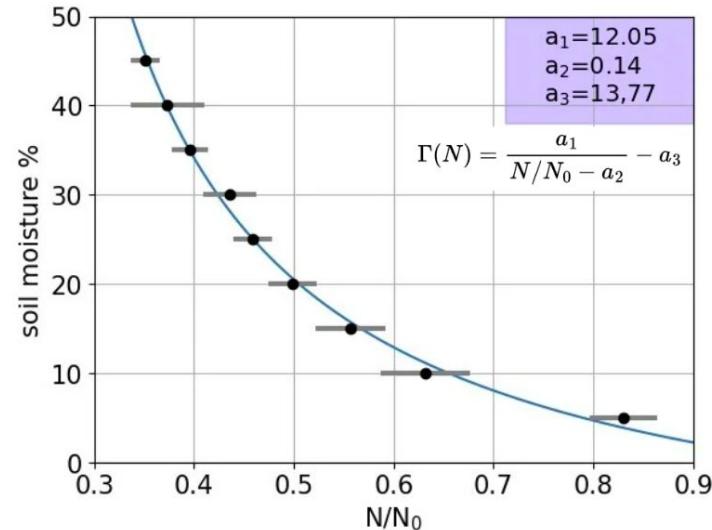
Para la calibración del CRNS, se deben tener en cuenta las condiciones geográficas, como la altitud o el campo geomagnético, del lugar donde se están realizando las mediciones. Sin embargo, la calibración de estos dispositivos sigue siendo un problema abierto.



# Metodología

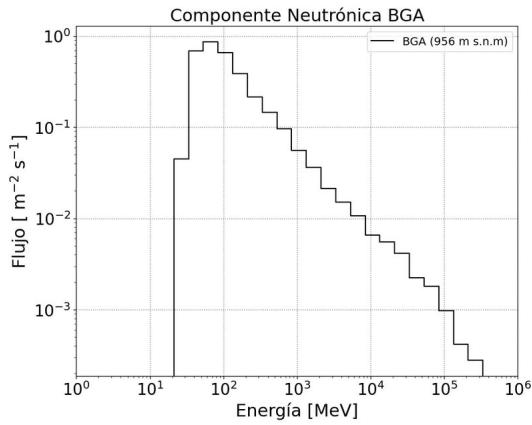
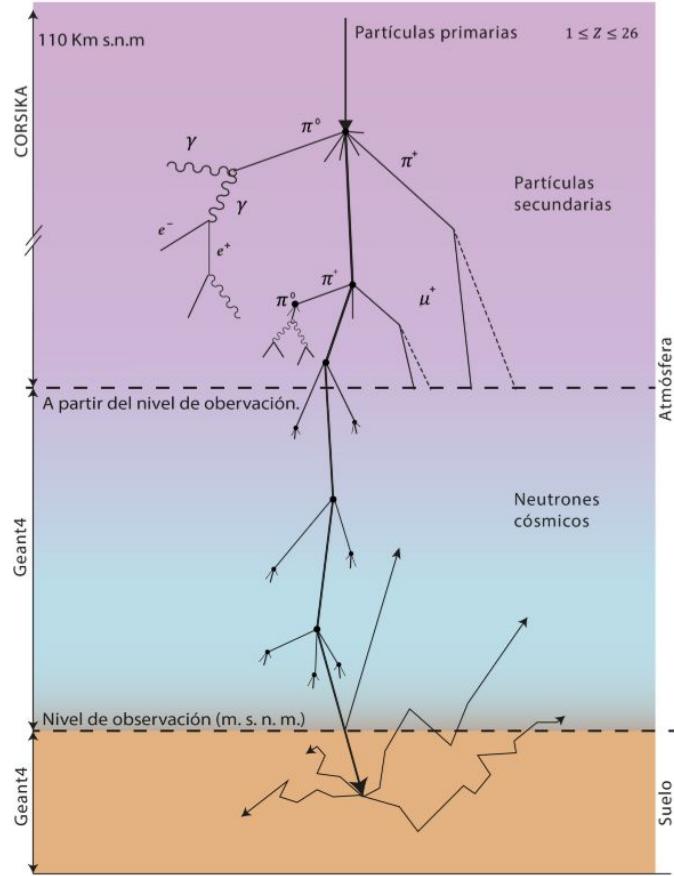


## Moderación de los neutrones

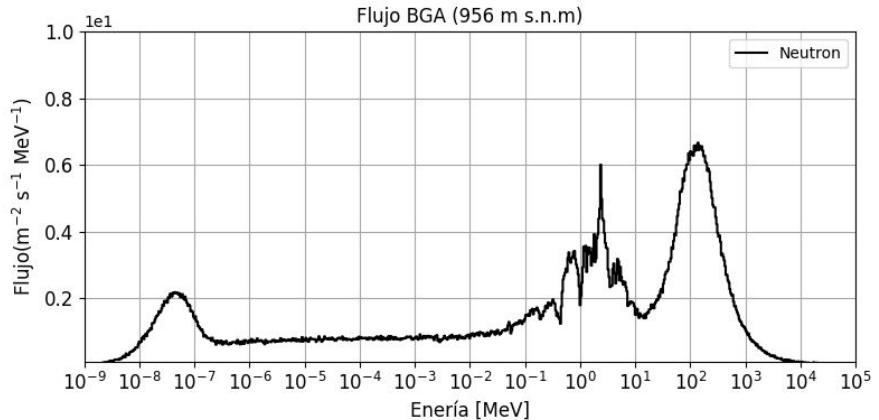


Domínguez-Ballesteros, 2023. Master thesis, ICTP-EAIFR / University of Rwanda.

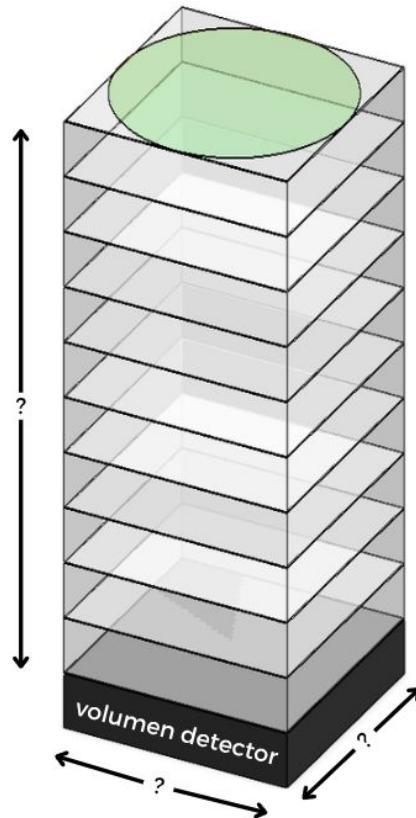
# Metodología



CORSIKA realiza un corte de energía aproximadamente a 20 MeV para los neutrones.

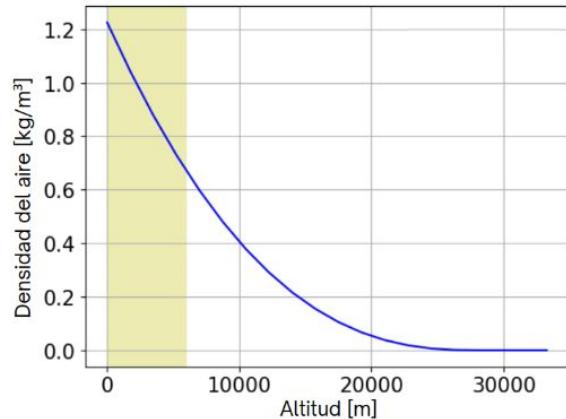


# Modelo atmosférico



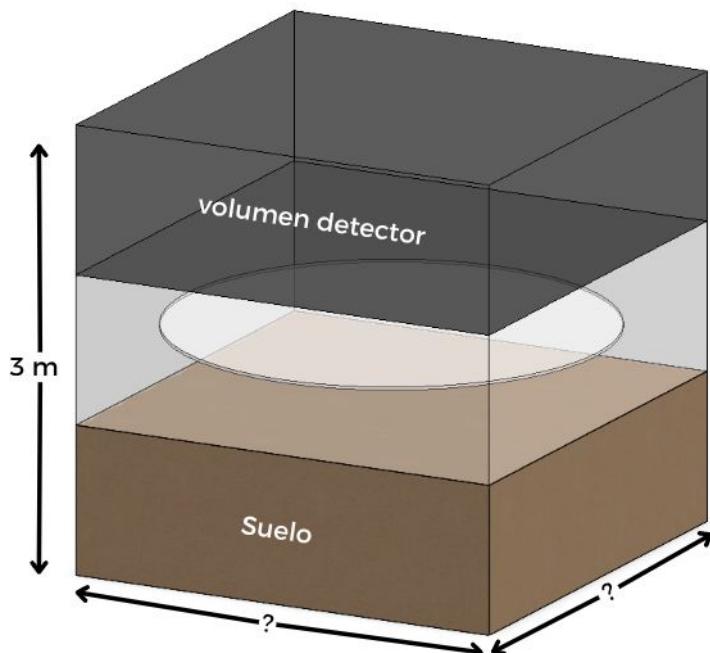
Elemento	Fracción
N	0.7808
O	0.2095
Ar	0.0090

Composición química del aire



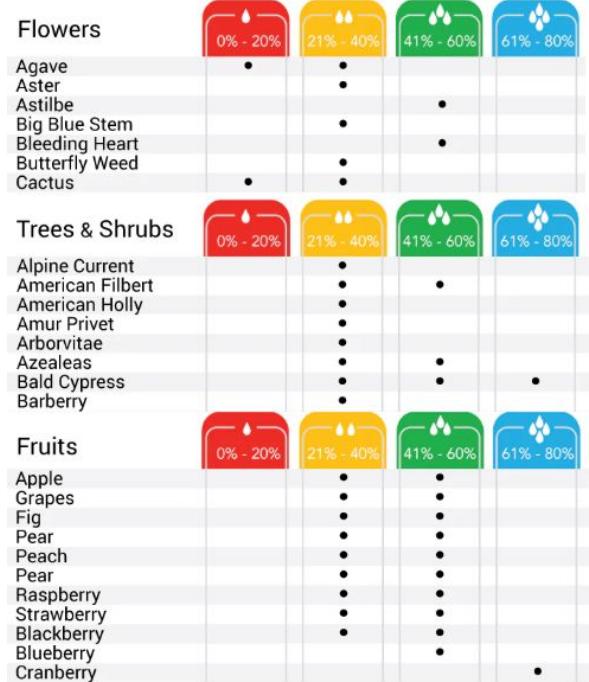
$$\rho = \frac{p_0 \cdot M}{R \cdot T_0} \left( 1 - \frac{L \cdot h}{T_0} \right)^{\left( \frac{g \cdot M}{R \cdot L} - 1 \right)}$$

# Modelo del suelo



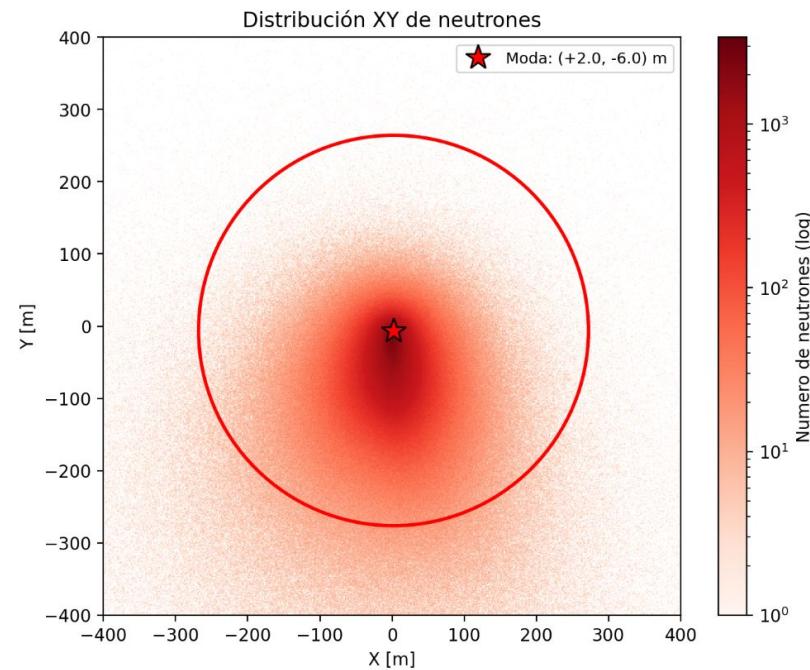
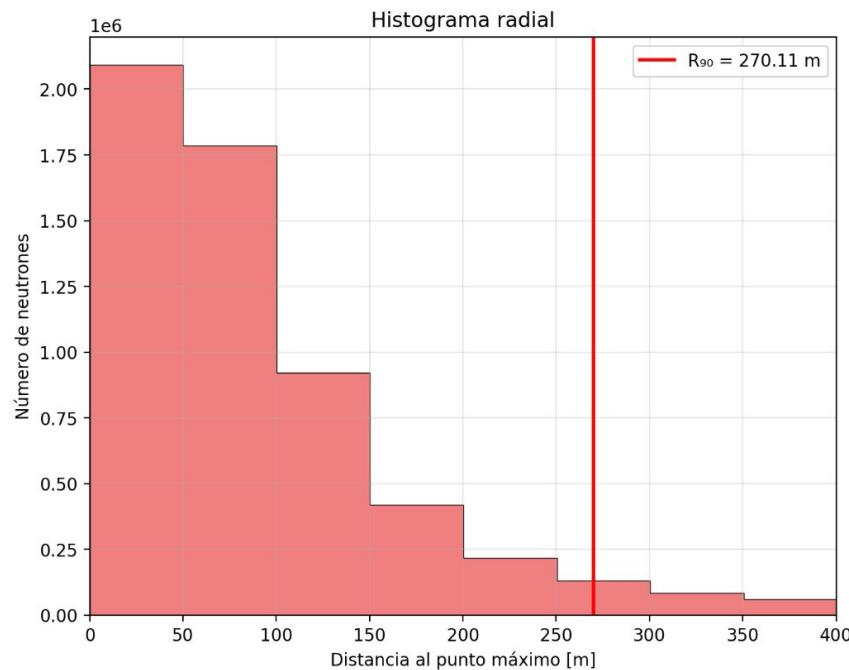
Elementos presentes en el suelo seco	Concentración [%]
O	49
Si	33
Al	7.13
Na	0.63
K	1.36
Ca	1.37
Fe	3.8
Mg	0.6
C	2
S	0.08
N	0.1
P	0.9
Ti	0.46
H	0.38

A. Vásquez-Ramírez, et al. (2021) 37 th International Cosmic Ray Conference

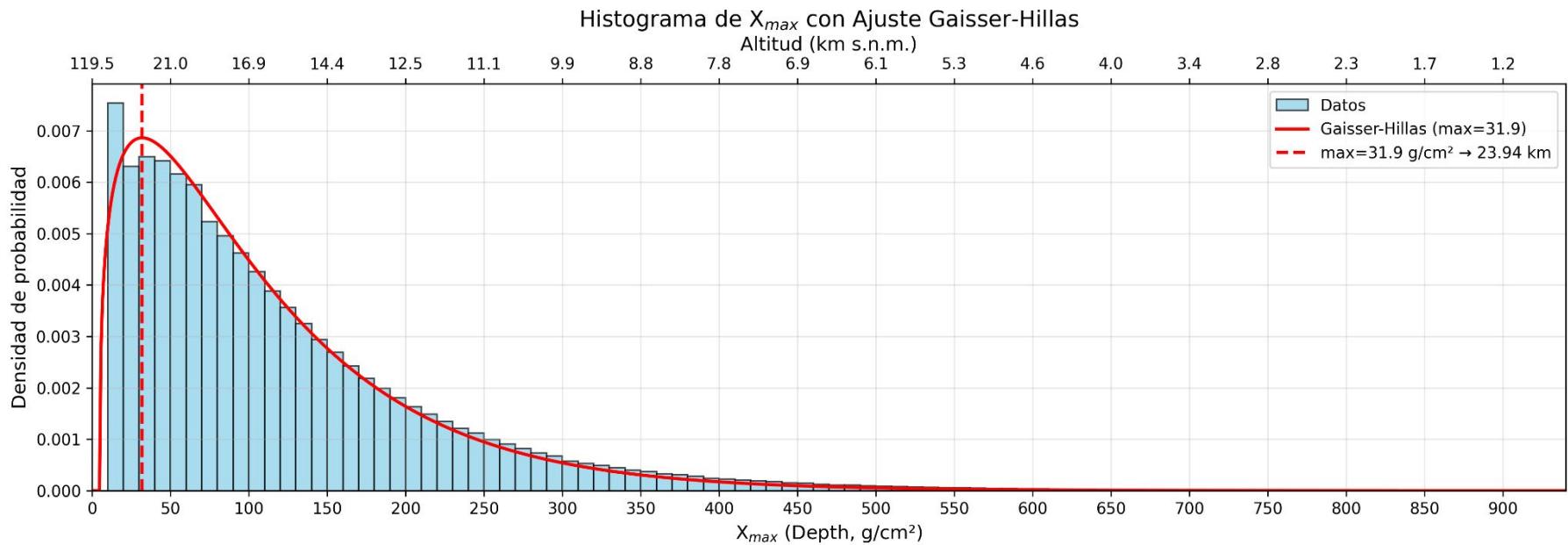


ACU RITE: Guide: Soil Moisture Recommendations for Flowers, Plants, and Vegetables

# Distancia radial de los neutrones

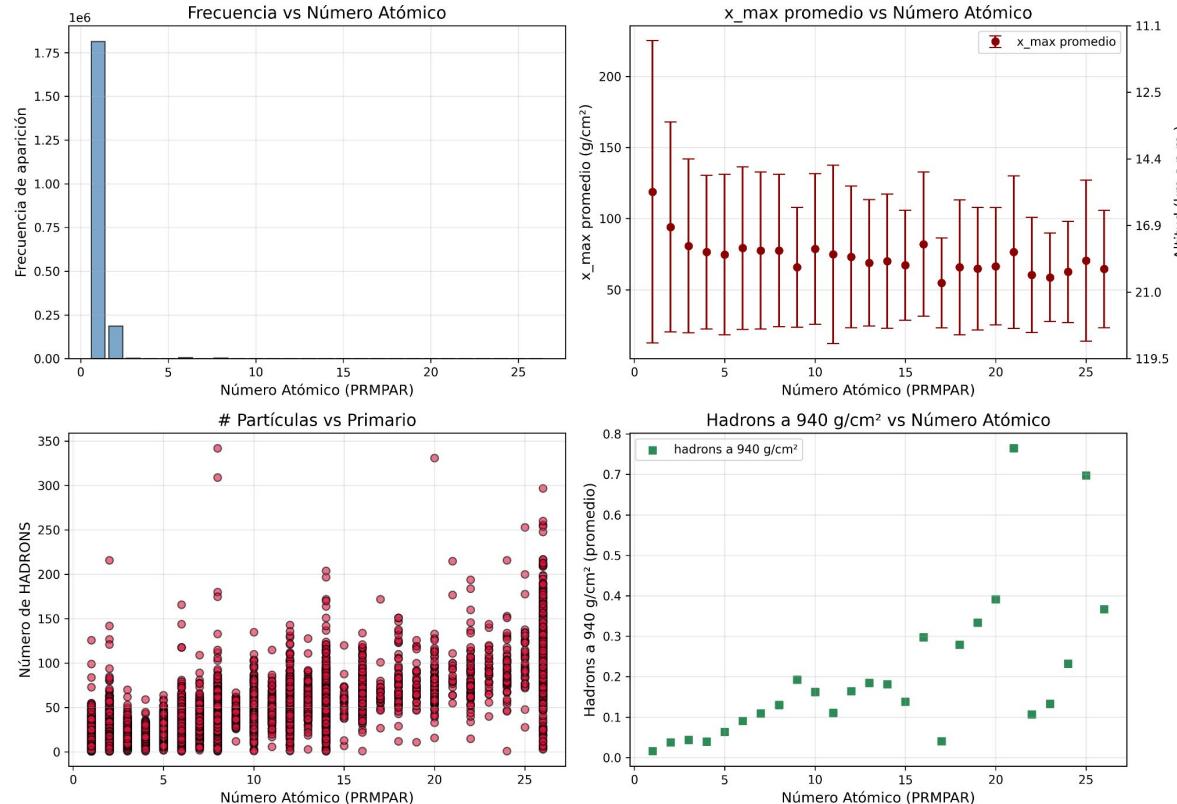


# Análisis del $X_{max}$ de los hadrones



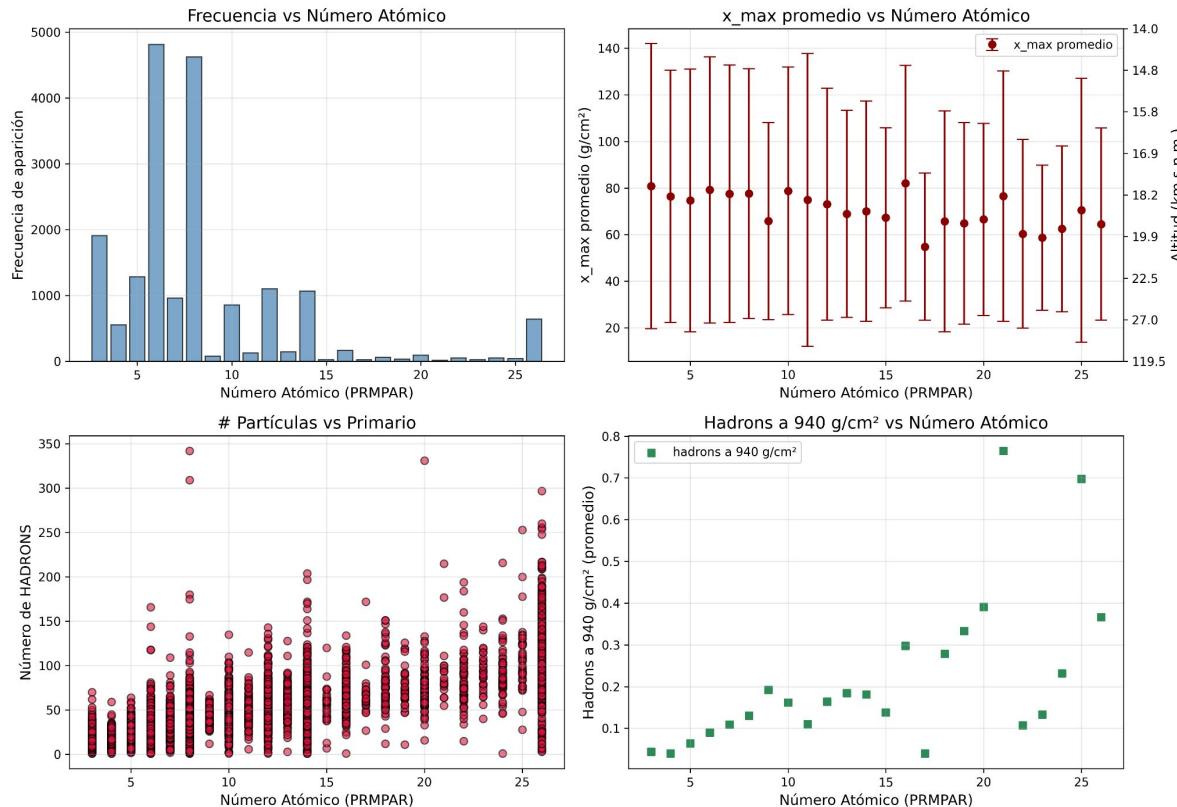
# Análisis químico

## Análisis $1 \leq Z \leq 26$



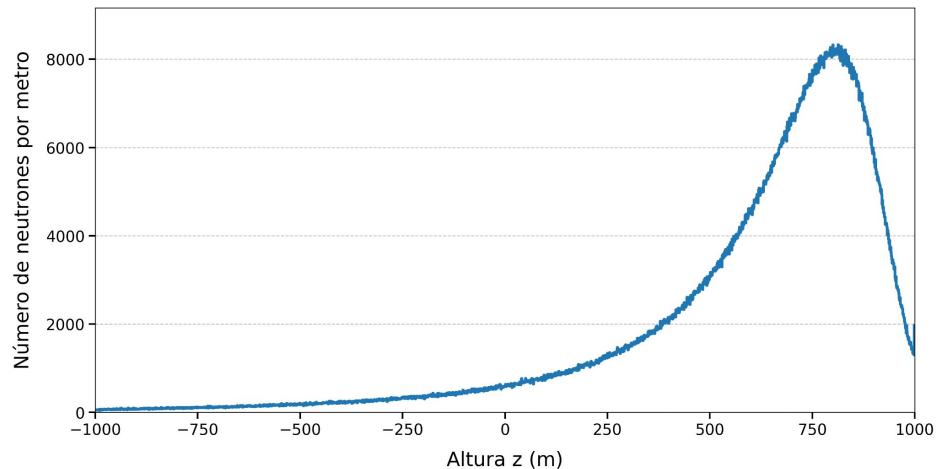
# Análisis químico

## Análisis $3 \leq Z \leq 26$

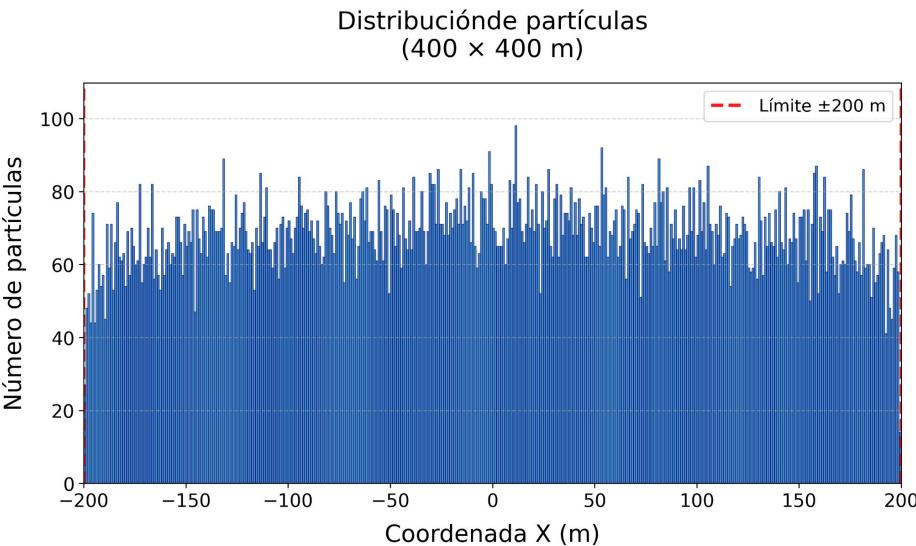


# Simulación de neutrones

Distribución vertical de neutrones que escapan por los bordes laterales  
(400 x 400 m)

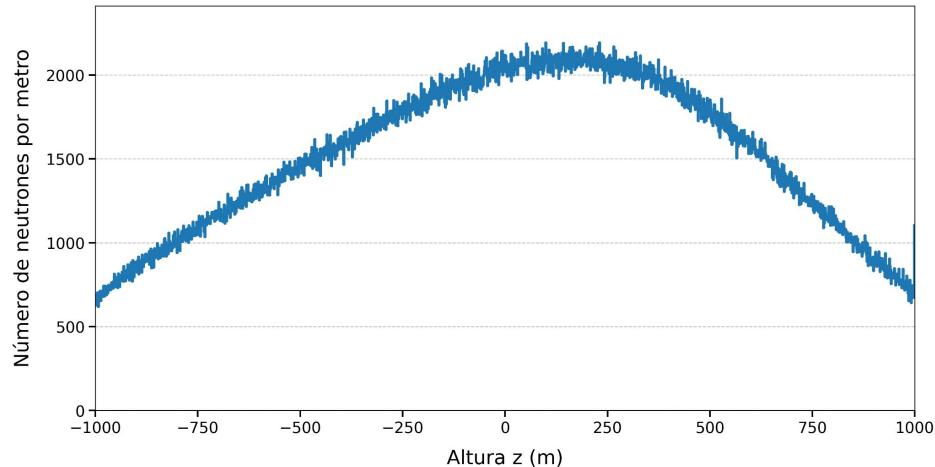


Distribución de partículas  
(400 x 400 m)

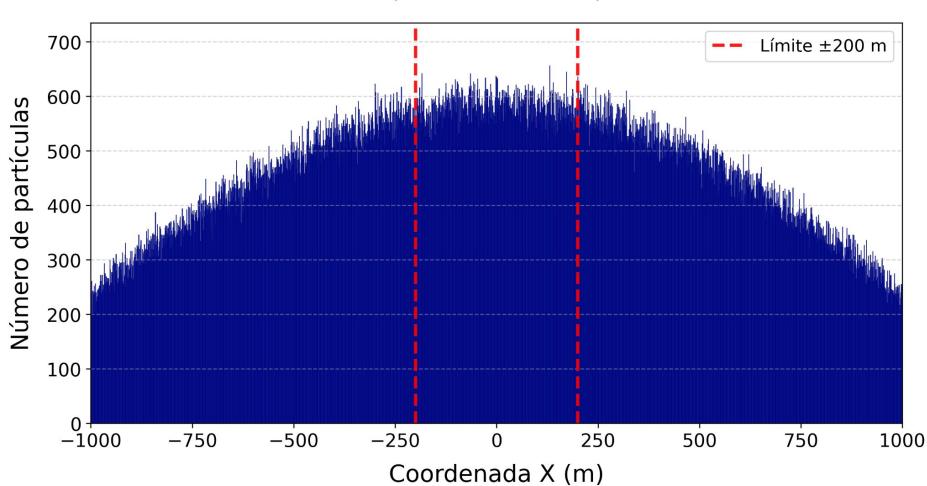


# Simulación de neutrones

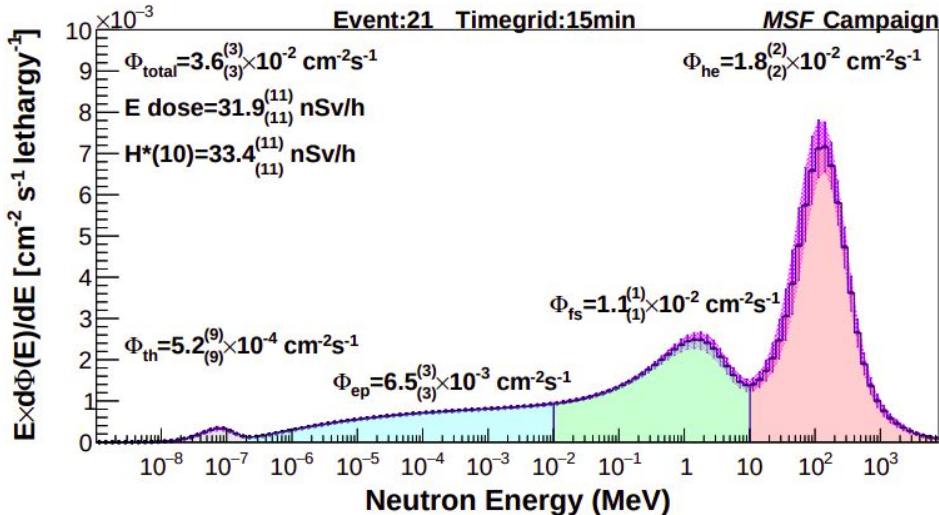
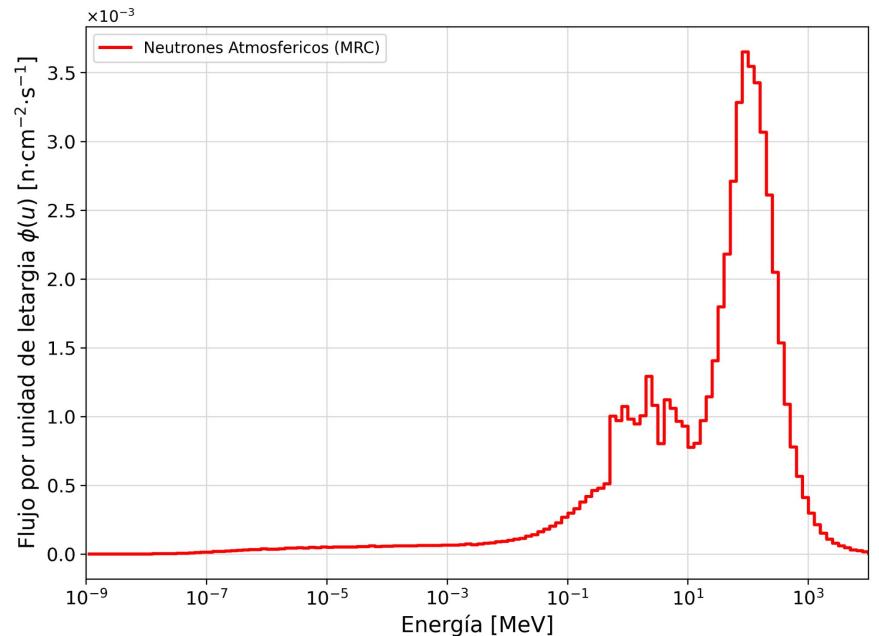
Distribución vertical de neutrones que escapan por los bordes laterales  
(2000 × 2000 m)



Distribución de partículas  
(2000 × 2000 m)

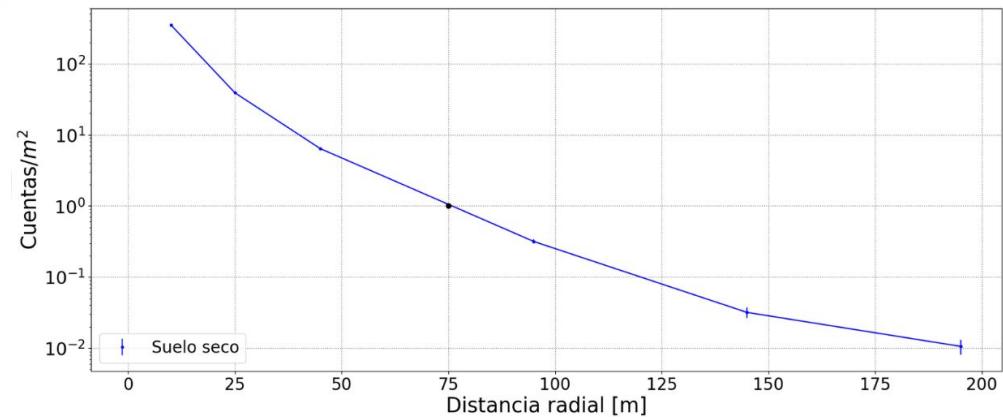
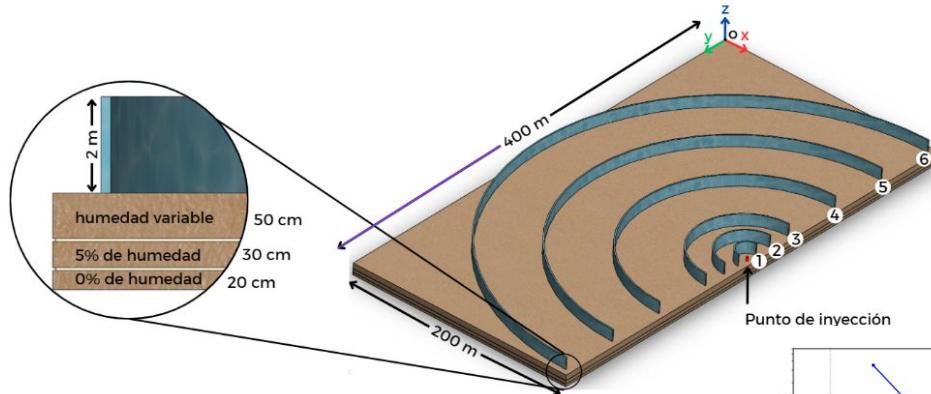


# Resultado preliminar

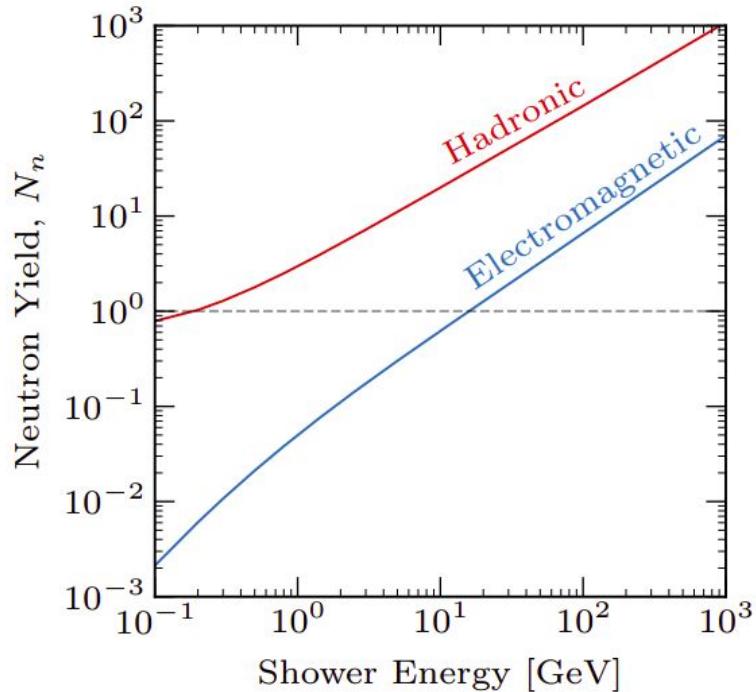


**Gracias por su atención**

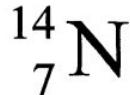
# Distancia recorrida por los neutrones



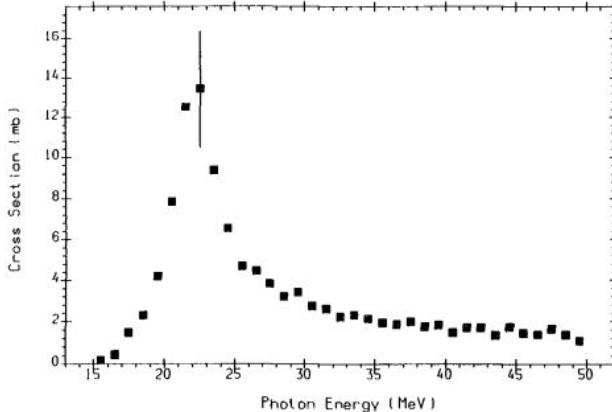
# Producción de neutrones por gammas



O. Nairat, et al., *Neutron Tagging Can Greatly Reduce Spallation Backgrounds in Super-Kamiokande*, arXiv:2409.10611 [hep-ex] (2024).



Abundance (%)	Separation Energies (MeV)							
	$\gamma, n$	$\gamma, p$	$\gamma, t$	$\gamma, ^3\text{He}$	$\gamma, \alpha$	$\gamma, 2n$	$\gamma, np$	$\gamma, 2p$
99.63	10.6	7.6	22.7	20.7	11.6	30.6	12.5	25.1



7-N-14(G,X)0-NN-1  
BRST  
M0214003 J,PR,118,(2),535,60 R.W.FAST+

A.V. Varlamov, et al., *Atlas of Giant Dipole Resonances: Parameters and Graphs of Photonuclear Reaction Cross Sections*, (1999).